



**ENERJİ ETKİN YAPI TASARIMI İÇİN KOMPOZİT
YALITIM MALZEMELERİNİN STATİK VE DİNAMİK
YÖNTEMLE PERFORMANS İNCELEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEDEF BEREKETOĞLU

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**MERSİN
HAZİRAN - 2025**

ENERJİ ETKİN YAPI TASARIMI İÇİN KOMPOZİT YALITIM MALZEMELERİNİN STATİK VE DİNAMİK YÖNTEMLE PERFORMANS İNCELEMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEDEF BEREKETOĞLU
ORCID ID: 0000-0003-2100-9672

MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DANIŞMAN VE JÜRİ ÜYELERİ

DANIŞMAN	: DOÇ. DR. FATİH ÜNAL (ORCID: 0000-0001-6660-9984)
2. DANIŞMAN	: DOÇ. DR. ŞERMİN KOÇYİĞİT (ORCID: 0000-0002-7283-8967)
JÜRİ ÜYESİ	: PROF. DR. BÜNYAMİN DEMİR
JÜRİ ÜYESİ	: DOÇ. DR. AHMET ERHAN AKAN

MERSİN
HAZİRAN - 2025

ÖZET

ENERJİ ETKİN YAPI TASARIMI İÇİN KOMPOZİT YALITIM MALZEMELERİNİN STATİK VE DİNAMİK YÖNTEMLE PERFORMANS İNCELEMESİ

Bu tez çalışmasında, enerji etkin yapı tasarımı amacıyla çevre dostu kompozit yalıtım malzemelerinin statik ve dinamik yöntemlerle performans analizi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan kompozit malzemeler, Koçyiğit (2024) tarafından geliştirilen genişletilmiş cam agregası ve çam reçinesi esaslı yapılar olup, malzemelerin termal ve mekanik özellikleri deneysel verilerden alınarak analizlerde kullanılmıştır.

Isıtma enerji ihtiyacının hesaplanmasında, Türkiye'nin farklı iklim bölgelerini temsil eden Hatay, Edirne, Bingöl ve Kars illeri seçilmiş, derece-gün (statik) ve EnergyPlus (dinamik) yöntemleri ile karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılmıştır. Her malzeme için hesaplanan optimum yalıtım kalınlıkları, $\pm 0,01$ m sapma toleransları dikkate alınarak incelenmiş; bu sayede uygulama sırasında oluşabilecek küçük kalınlık değişimlerinin enerji tüketimi ve ekonomik performans üzerindeki etkileri detaylı şekilde analiz edilmiştir.

Sonuçlar, EnergyPlus dinamik simülasyonlarının iklim, iç kazançlar ve bina özelliklerini kapsamlı şekilde modelleyerek daha gerçekçi ve güvenilir sonuçlar verdiğini göstermiştir. Ayrıca, $\pm 0,01$ m kalınlık sapmalarının enerji tüketimi ve geri ödeme sürelerinde önemli değişimlere yol açtığı saptanmış, saha uygulamalarında kalınlık hassasiyetinin ve işçilik kalitesinin enerji verimliliği performansı için kritik olduğu vurgulanmıştır.

Bu çalışma hem teorik hem de pratik açıdan optimum yalıtım kalınlığı belirleme sürecinde statik ve dinamik yöntemlerin birlikte kullanılması gerektiğini ortaya koyarak, sürdürülebilir yapı tasarımı ve enerji tasarrufu stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Enerji etkin yapı tasarımı, kompozit yalıtım malzemeleri, optimum yalıtım kalınlığı, enerji simülasyonu, geri ödeme süresi.

Danışman: Assoc. Prof. Dr. Fatih ÜNAL, Mersin Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin.

ABSTRACT

PERFORMANCE INVESTIGATION OF COMPOSITE INSULATION MATERIALS IN ENERGY-EFFICIENT BUILDING DESIGN: A STATIC AND DYNAMIC APPROACH

In this thesis study, the performance analysis of environmentally friendly composite insulation materials for energy-efficient building design was carried out using both static and dynamic methods. The composite materials used were based on expanded glass aggregate and pine resin developed by Koçyiğit (2024), with their thermal and mechanical properties experimentally determined and integrated into the analyses.

Heating energy demand was calculated for four provinces representing different climate zones of Turkey: Hatay, Edirne, Bingöl, and Kars. Comparative evaluations were conducted using the degree-day (static) and EnergyPlus (dynamic) methods. The optimum insulation thicknesses calculated for each material were examined with ± 0.01 m tolerance, enabling a detailed analysis of how small variations during application affect energy consumption and economic performance.

Results showed that EnergyPlus dynamic simulations provide more realistic and reliable outcomes by comprehensively modeling climate, internal gains, and building characteristics. Additionally, it was found that ± 0.01 m deviations in insulation thickness significantly influence energy consumption and payback periods, highlighting the critical importance of thickness precision and workmanship quality in field applications for energy efficiency.

This study reveals that combining static and dynamic methods is essential in determining the optimum insulation thickness from both theoretical and practical perspectives, contributing to sustainable building design and the development of energy-saving strategies.

Keywords: Energy-efficient building design, composite insulation materials, optimum insulation thickness, energy simulation, payback period.

Advisor: Doc. Dr. Fatih ÜNAL, Department of Mechanical Engineering, Mersin University, Mersin.

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezinin ortaya çıkmasında bilgi birikimi, akademik rehberliği ve sabırlı yaklaşımıyla yoluma ışık tutan, her aşamada desteğini hissettiren çok kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Fatih Ünal'a en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez süreci, zaman zaman zorlayıcı, sabır ve özveri gerektiren bir yolculuk oldu. Bu yolculukta, her daim yanımda yer alan, bana koşulsuz sevgi, anlayış ve destek sunan canım aileme en derin şükranlarımı sunarım. Varlığınız ve inancınız, her adımda bana güç verdi. Özellikle eşime, bu süreçte gösterdiği sabır, anlayış ve manevi desteği için yürekten teşekkür ederim. Yanımda oluşun, sadece bir destek değil; aynı zamanda huzur ve güven kaynağı oldu.

Bu çalışmayı, 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen ve başta memleketim Hatay olmak üzere ülkemizin birçok ilini derinden sarsan deprem felaketinde hayatını kaybeden tüm yurttaşlarımıza ithaf etmek istiyorum. Bu büyük acı, hepimizin hafızasında derin izler bırakmış; yaşamlarımızı, değerlerimizi ve bakış açımızı değiştirmiştir. O gün yitirdiğimiz her can, hafızamızda birer ışık olarak yanmaya devam etmektedir.

Bu felakette kaybettiğimiz, yeri asla dolmayacak olan sevgili dostum Yağmur Zülal Okurlar'ı da ayrıca anmak isterim. Güler yüzü, içtenliği ve dostluğuyla hayatımda silinmez bir iz bırakmış olan can arkadaşımı rahmet ve özlemle anıyorum. Bu tezi, onun hatırasına ithaf etmenin benim için derin bir anlam taşıdığını belirtmek isterim. Bazı eksikliklerin, yoklukların yerini hiçbir şey dolduramaz; ama anılarını yaşatmak ve onları unutulmayanlar arasında tutmak elimizdedir.

Hayat, bize her zaman kontrol edemeyeceğimiz olaylar sunsa da dayanışma, sevgi ve umutla yaralar sarılabilir. Bu çalışmanın hem akademik bir katkı sunması hem de yaşadığımız büyük kayıpların anısını yaşatma yönünde anlamlı bir iz bırakması en büyük temennimdir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇ KAPAK	i
ONAY	ii
ETİK BEYAN	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLOLAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	5
2.1. Küresel Enerji Verimliliği Politikaları ve Standartlar ile İlgili Çalışmalar	5
2.2. Kompozit Yalıtım Malzemelerine İlişkin Çalışmaların Derlemesi	5
2.3. Hafif Beton Teknolojilerinde Gelişmeler ve Yalıtım Amaçlı Uygulamalara Yönelik Çalışmalar	8
2.4. Biyobazlı Katkı Maddeleri ile Geliştirilen Yapı Malzemeleri Üzerine Çalışmalar	8
2.5. Atık Tabanlı Agregaların Isıl Performansa Etkisi: Literatür İncelemesi	9
2.6. Isı Yalıtım Malzemelerinde Çevresel Sürdürülebilirlik Kriterleri ve İlgili Çalışmalar	10
2.7. Isıl İletkenlik Değerlerinin Malzeme Mikroyapısıyla İlişkisi Üzerine Çalışmalar	10
2.8. Yalıtım Malzemelerinde Enerji Simülasyon Yöntemlerinin Kullanımı ile İlgili Çalışmalar	11
2.9. Türkiye’de Kompozit Yalıtım Malzemelerine Yönelik Araştırma Eğilimleri ve Çalışmalar	12
2.10. Literatürdeki Boşluklar ve Bu Çalışmanın Katkısı	13
3. MATERYAL ve YÖNTEM	15
3.1. Materyaller ve Modelleme Parametreleri	15
3.1.1. Seçilen İllerin Tanımlanması ve HDD (Heating Degree Day) Verilerinin Belirlenmesi	15
3.1.2. Kullanılan Kompozit Malzeme: Genleştirilmiş Cam Agregası ve Çam Reçinesi Esaslı Kompozit	17
3.1.3. Ekonomik Parametrelerin Tanımlanması	20
3.1.4. Yakıt Özellikleri ve Enerji Verimliliği Analiz Değerleri	21
3.1.5. Duvar Katmanları ve Yapı Bileşenlerinin Tanımlanması	21
3.1.6. Bina Modelinin Oluşturulması ve Simülasyon Ortamına Aktarımı	23
3.2. Kullanılan Yöntemler ve Simülasyon Yaklaşımları	25
3.2.1. Derece - gün Yöntemi ile Isı Yalıtımı Performansının Analizi	26
3.2.3. EnergyPlus Programı ile Dinamik Bina Enerji Simülasyonu ve Model Entegrasyonu	29
3.2.4. Statik ve Dinamik Yöntemler: Genel Bakış	34
3.2.5. Uygulanan Yöntemlerin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi	35
3.2.6. Optimum Yalıtım Kalınlığının $\pm 0,01$ m Sapma ile Değerlendirilmesi: Uygulama Hassasiyeti ve Sonuçlara Etkileri	35
3.2.7. Analiz Süreci ve Hesaplama Adımları	36
3.2.8. Ekonomik Analiz ve Geri Ödeme Süresi Hesaplamaları	37
3.2.9. Çevresel Etki Analizi ve Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi	37
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	39
4.1. x_{opt} Değerlerinin Belirlenmesi	39
4.2. Yıllık Isı Enerjisi Tüketiminin Yöntemlere Göre Karşılaştırılması	41
4.2.1. Hatay İlinde Yıllık Isı Enerjisi Tüketimi: Derece-Gün ve Dinamik Simülasyon Analizi	42
4.2.2. Edirne İlinde Yıllık Isı Enerjisi Tüketimi: Derece-Gün ve Dinamik Simülasyon Analizi	45
4.2.3. Bingöl İlinde Yıllık Isı Enerjisi Tüketimi: Derece-Gün ve Dinamik Simülasyon Analizi	48

	Sayfa
4.2.4. Kars İlinde Yıllık Isı Enerjisi Tüketimi: Derece-Gün ve Dinamik Simülasyon Analizi	50
4.2.5. İklim Bölgelerine Göre Bölgesel Yalıtım Performansının Değerlendirilmesi	53
4.3. Geri Ödeme Süresi Analizi	54
4.3.1. Hatay İlinde Geri Ödeme Süresi Analizi	55
4.3.2. Edirne İlinde Geri Ödeme Süresi Analizi	58
4.3.3. Bingöl İlinde Geri Ödeme Süresi Analizi	61
4.3.4. Kars İlinde Geri Ödeme Süresi Analizi	64
4.3.5. Farklı İller İçin Geri Ödeme Sürelerinin Genel Değerlendirmesi	66
4.4. Statik ve Dinamik Yöntemlerin Yorumlanması	67
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	69
5.1 Sonuçlar	69
5.2 Öneriler	70
KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	78

TABLOLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1. İklim parametreleri	16
Tablo 3.2. Yalıtım malzemelerinin termal ve ekonomik özellikleri	20
Tablo 3.3. Parametreler	20
Tablo 3.4. Yakıt özellikleri	21
Tablo 3.5. Duvar katmanları	23
Tablo 4.1. İllerin x_{opt} değerleri	39
Tablo 4.2. Hatay ili için x_{opt} senaryolarındaki değerlere göre elde edilen $Q_{yıl}$ sonuçları	42
Tablo 4.3. Edirne ili için x_{opt} senaryolarındaki değerlere göre elde edilen $Q_{yıl}$ sonuçları	45
Tablo 4.4. Bingöl ili için x_{opt} senaryolarındaki değerlere göre elde edilen $Q_{yıl}$ sonuçları	48
Tablo 4.5. Kars ili için x_{opt} senaryolarındaki değerlere göre elde edilen $Q_{yıl}$ sonuçları	51
Tablo 4.6. Hatay ili için optimum yalıtım kalınlıklarına göre HDD ve EnergyPlus yöntemleri ile hesaplanan geri ödeme süreleri (yıl)	55
Tablo 4.7. Edirne ili için optimum yalıtım kalınlıklarına göre HDD ve EnergyPlus yöntemleri ile hesaplanan geri ödeme süreleri (yıl)	58
Tablo 4.8. Bingöl ili için optimum yalıtım kalınlıklarına göre HDD ve EnergyPlus yöntemleri ile hesaplanan geri ödeme süreleri (yıl)	61
Tablo 4.9. Kars ili için optimum yalıtım kalınlıklarına göre HDD ve EnergyPlus yöntemleri ile hesaplanan geri ödeme süreleri (yıl)	64

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Hatay ili için MATLAB arayüzünden saatlik sıcaklık verisi işleme kesiti ve HDD değeri hesaplama	17
Şekil 3.2. Kompozit malzeme üretim sürecinin akış şeması: Genleştirilmiş cam agregası ve çam reçinesi hazırlanması, karıştırılması, kalıplama, sıkıştırma ve kütleme aşamaları	18
Şekil 3.3. Kompozit numunelerin deneysel özellikleri	19
Şekil 3.4. Duvar katmanları	22
Şekil 3.5. SketchUp bina modeli	25
Şekil 3.6. EnergyPlus IDF editor arayüzünde Hatay ili için tanımlanan konum bilgileri	30
Şekil 3.7. Material sekmesinde malzeme tanımlamaları	31
Şekil 3.8. Construction sekmesinde duvar katmanları	32
Şekil 3.9. Hatay, Edirne, Bingöl ve Kars illerine ait yıllık maksimum ve minimum sıcaklık değerlerinin değişimi	33
Şekil 4.1. İllere göre kompozit malzeme bazında hesaplanan optimum yalıtım kalınlıkları (x_{opt})	41
Şekil 4.2. Hatay ili için optimum yalıtım kalınlığında yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması	44
Şekil 4.3. Hatay ili için $x_{opt} - 0,01$ m için yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması	44
Şekil 4.4. Hatay ili için $x_{opt} + 0,01$ m için yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması	45
Şekil 4.5. Edirne ili için optimum yalıtım kalınlığında yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması	47
Şekil 4.6. Edirne ili için $x_{opt} - 0,01$ m için yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması	47
Şekil 4.7. Edirne ili için $x_{opt} + 0,01$ m için yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması	48
Şekil 4.8. Bingöl ili için optimum yalıtım kalınlığında yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması	49
Şekil 4.9. Bingöl ili için $x_{opt} - 0,01$ m için yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması	50
Şekil 4.10. Bingöl ili için $x_{opt} + 0,01$ m için yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması	50
Şekil 4.11. Kars ili için optimum yalıtım kalınlığında yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması	52
Şekil 4.12. Kars ili için $x_{opt} - 0,01$ m için yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması	53
Şekil 4.13. Kars ili için $x_{opt} + 0,01$ m için yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması	53
Şekil 4.14. Hatay ili için x_{opt} yalıtım kalınlığında HDD ve EnergyPlus yöntemlerine göre geri ödeme süresi karşılaştırması	57
Şekil 4.15. Hatay ili için $x_{opt} - 0,01$ m yalıtım kalınlığında HDD ve EnergyPlus yöntemlerine göre geri ödeme süresi karşılaştırması	57
Şekil 4.16. Hatay ili için $x_{opt} + 0,01$ m yalıtım kalınlığında HDD ve EnergyPlus yöntemlerine göre geri ödeme süresi karşılaştırması	58
Şekil 4.17. Edirne ili için x_{opt} yalıtım kalınlığında HDD ve EnergyPlus yöntemlerine göre geri ödeme süresi karşılaştırması	59
Şekil 4.18. Edirne ili için $x_{opt} - 0,01$ m yalıtım kalınlığında HDD ve EnergyPlus yöntemlerine göre geri ödeme süresi karşılaştırması	60
Şekil 4.19. Edirne ili için $x_{opt} + 0,01$ m yalıtım kalınlığında HDD ve EnergyPlus yöntemlerine göre geri ödeme süresi karşılaştırması	60
Şekil 4.20. Bingöl ili için x_{opt} yalıtım kalınlığında HDD ve EnergyPlus yöntemlerine göre geri ödeme süresi karşılaştırması	62
Şekil 4.21. Bingöl ili için $x_{opt} - 0,01$ m yalıtım kalınlığında HDD ve EnergyPlus yöntemlerine göre geri ödeme süresi karşılaştırması	63
Şekil 4.22. Bingöl ili için $x_{opt} + 0,01$ m yalıtım kalınlığında HDD ve EnergyPlus yöntemlerine göre geri ödeme süresi karşılaştırması	63

	Sayfa
Şekil 4.23. Kars ili için x_{opt} yalıtım kalınlığında HDD ve EnergyPlus yöntemlerine göre geri ödeme süresi karşılaştırması	65
Şekil 4.24. Kars ili için $x_{opt} - 0,01$ m yalıtım kalınlığında HDD ve EnergyPlus yöntemlerine göre geri ödeme süresi karşılaştırması	66
Şekil 4.25. Bingöl ili için $x_{opt} - 0,01$ m yalıtım kalınlığında HDD ve EnergyPlus yöntemlerine göre geri ödeme süresi karşılaştırması	66



SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltma/Simgesi	Tanım
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
BED	Buildings Energy Databook
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ÇŞİDB	Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
BEP – TR	Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği
EKB	Enerji Kimlik Belgesi
HDD	Heating Degree Day
EP	EnergyPlus
GÖS	Geri Ödeme Süresi
x_{opt}	Optimum Yalıtım Kalınlığı
$Q_{yıl}$	Yıllık Isıtma Enerjisi İhtiyacı

1. GİRİŞ

Enerji, insanlık tarihinin her aşamasında medeniyetlerin gelişiminde belirleyici bir unsur olmuştur. Sanayi Devrimi sonrasında artan enerji talebi, fosil yakıtların yoğun kullanımıyla birlikte küresel enerji tüketimini ciddi ölçüde artırmıştır. Bu artış, doğal kaynakların hızla tükenmesine, sera gazı emisyonlarının yükselmesine ve iklim değişikliği gibi küresel çevre sorunlarının ortaya çıkmasına neden olmuştur (IPCC, 2021). Enerji verimliliği ise bu sürecin kontrol altına alınmasında, düşük maliyetli ve çevre dostu bir strateji olarak öne çıkmaktadır.

Enerji, iş yapabilme kapasitesi olarak tanımlanmakta ve insan yaşamının en temel girdilerinden biri olarak kabul edilmektedir. Küresel ölçekte enerji tüketimi her geçen gün artmakta, teknolojik gelişmelere paralel olarak bireylerin ve toplumların enerjiye olan bağımlılığı da giderek yükselmektedir. Ancak artan tüketim eğilimi karşısında mevcut enerji kaynaklarının hızla tükenmesi, geleceğe yönelik ciddi endişeleri beraberinde getirmektedir. Bu soruna yönelik başlıca çözüm arayışları arasında yeni enerji kaynaklarının keşfedilmesi ve bu kaynakların sürdürülebilir biçimde kullanılması yer almakla birlikte, mevcut enerjinin daha verimli kullanılması da önemli bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Enerji verimliliğinin artırılması, enerji talebindeki artış hızını azaltarak hem kaynakların korunmasına hem de çevresel etkilerin sınırlandırılmasına önemli katkılar sağlamaktadır (Bozkurt, 2008).

Küresel ölçekte önem kazanan enerji verimliliği çalışmaları, Türkiye'de de stratejik hedefler doğrultusunda yasal düzenlemelerle desteklenmiştir. Enerji kaynaklarının etkin kullanımı ve enerji tüketiminin azaltılması, Türkiye'nin sürdürülebilir kalkınma hedefleri kapsamında büyük bir öncelik haline gelmiştir. Bu doğrultuda, 2007 yılında yürürlüğe konulan 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu, enerji kaynaklarının ve enerjinin kullanımında etkinliğin artırılması, israfın önlenmesi ve çevrenin korunması hedefleri doğrultusunda çeşitli düzenlemeler getirmiştir (Türkiye Cumhuriyeti Resmî Gazete, 2007).

Isı yalıtımı, enerji verimliliğini artırmaya yönelik küresel stratejilerde önemli bir yer tutmaktadır. Yapı sektöründe enerji kayıplarını azaltmak hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir öneme sahiptir. Türkiye'de konut ve bina sektörü, toplam enerji tüketiminin yaklaşık %30-35'ini oluşturarak ciddi bir tasarruf potansiyeli barındırmaktadır. Bu durum, özellikle ısı yalıtımına yönelik uygulamaların geliştirilmesini ve yaygınlaştırılmasını gerekli kılmakta, yapı kabuğunun termal performansının artırılması yönünde yeni malzeme ve sistem arayışlarını da beraberinde getirmektedir (Yıldız, 2024).

Yapılarda meydana gelen enerji kayıplarının önemli bir kısmı, dış ortamla doğrudan temas halinde bulunan yapı elemanları, özellikle de duvar yüzeyleri aracılığıyla gerçekleşmektedir. Bu durum, yapı kabuğunda kullanılan malzemelerin ısı özelliklerinin, enerji verimliliği üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Isıl iletkenlik katsayısı düşük olan malzemelerin tercih edilmesi, enerji tüketimini azaltmakta ve dolayısıyla enerji ekonomisine olumlu katkı sağlamaktadır (Özcan, 2022).

Isıtma ve soğutma maliyetlerinin yüksekliği, doğal kaynakların hızla tükenmesi ve atık bertarafına ilişkin artan giderler, etkili yalıtım malzemelerinin kullanımını ve uygulamalarını önemli araştırma konuları haline getirmiştir. Yalıtım ürünlerinin seri üretimine yönelik çalışmalar, 20. yüzyılın başlarında Almanya'da başlamış olup, bu dönemde giderek artan taleple birlikte yalıtım teknolojileri hızla gelişmiştir. Özellikle 1990'lı yıllardan sonra, enerji verimliliği uygulamalarının artışıyla birlikte, yalıtım kullanımı daha yaygın bir hale gelmiştir (Kolak ve Oltulu, 2023).

Teknolojik ilerlemelerle birlikte, yapı sektöründe hem estetik açıdan daha başarılı sonuçlar veren hem de fonksiyonel özellikleri geliştirilen yeni nesil malzeme türleri ortaya çıkmaktadır. Bu malzemeler yalnızca kâgir yapı elemanları veya plaka formundaki ürünlerle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda hafif yapı malzemesi niteliği taşıyan dış ve iç cephe kaplamalarında kullanılabilecek çeşitli harç karışımlarının geliştirilmesi şeklinde de kendini göstermektedir (Şapçı, 2021). Isı yalıtımı uygulamasının amacı ısı kayıplarını azaltmak olduğundan, yalıtım malzemesinin kalınlığı ve düşük ısı iletkenlik katsayısı doğrudan yalıtım direncini belirlemektedir (Bayer, 2006).

Enerji verimliliğinin artırılması için konut ve kamu binaları çok büyük bir potansiyele sahiptir. Bina dış duvarının uygun tasarımı ve seçimi, alan ısıtma ve soğutma yüklerini azaltarak hem enerji tasarrufuna hem de iklim değişikliği ile mücadeleye katkı sağlayabilir (Saffar, 2022). Ayrıca bina enerji simülasyonu sonuçları ile gerçek değerler arasında kullanıcı davranışlarına bağlı değişiklikler gözlemlenmektedir. Bu nedenle enerji simülasyonu çalışmalarında model doğruluğunun artırılması için kalibrasyon adımı büyük önem taşımaktadır (Hou vd., 2021).

Enerji tüketiminin sektörel dağılımına bakıldığında, ABD’de birincil enerji kaynaklarının %41’inin konut ve ticari binalarda tüketildiği, bu miktarın da %45’inin ısıtma ve %9’unun soğutma amaçlı kullanıldığı görülmektedir (Buildings Energy Databook, 2014). Bu veriler, yapı kabuğu tasarımının enerji verimliliği üzerindeki etkisini ve özellikle çimento esaslı kompozitlerin yalıtım performansının önemini ortaya koymaktadır.

Bu tez çalışmasında, Şermin Koçyiğit’in 2024 yılında yayımlanan “Thermal and Mechanical Properties of Eco-Friendly Lightweight Concrete Based on Pine Resin and Recycled Expanded Glass Aggregate” başlıklı çalışmasında deneysel olarak elde edilen altı farklı kompozit malzemenin (ST1–ST6) ısı iletkenlik değerleri referans alınmıştır. Söz konusu çevre dostu malzemeler, çam reçinesi ve genleştirilmiş cam agregası gibi sürdürülebilir bileşenler içermekte olup, enerji etkin yapı tasarımına önemli katkılar sağlamaktadır. Bu kapsamda, farklı ısıtma derece - gün değerlerine sahip Hatay, Edirne, Bingöl ve Kars illerinde, bahsi geçen malzemelerin optimum yalıtım kalınlıkları derece - gün yöntemiyle hesaplanmıştır. Hesaplanan optimum kalınlıklar $\pm 0,01$ m sapma değerleriyle birlikte üç farklı senaryoda değerlendirilmiştir. Elde edilen optimum yalıtım kalınlıkları, hem derece - gün yöntemiyle yapılan hesaplamalarda hem de EnergyPlus simülasyon aracı kullanılarak yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı ve geri ödeme süresi analizlerinde statik ve dinamik yöntemler kapsamında incelenmiştir. Böylece, farklı iklim bölgelerinde söz konusu kompozit malzemelerin enerji performansı

karşılaştırılmış ve dinamik simülasyonların statik yöntemlere göre sağladığı avantajlar ortaya konmuştur.





2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

2.1. Küresel Enerji Verimliliği Politikaları ve Standartlar ile İlgili Çalışmalar

Küresel enerji talebindeki artış, kaynakların verimli kullanımını çevresel ve ekonomik bir zorunluluk hâline getirmiştir. Enerji verimliliği, iklim değişikliğiyle mücadelede düşük maliyetli ve yüksek etkili bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, özellikle bina sektörü, küresel emisyonların %36'sından sorumlu olması nedeniyle politikaların odak noktasına yerleşmiştir (United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC], 2023).

Küresel girişimler çerçevesinde, Paris Anlaşması ve Avrupa Yeşil Mutabakatı, 2050 yılına kadar net sıfır emisyon hedefine ulaşılabilmesi için yapı sektöründe enerji tüketiminin azaltılmasını önceliklendirmiştir. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC), binalarda enerji tüketiminin 2050 yılına kadar %40 oranında düşürülmesini hedeflemektedir (UNFCCC, 2023). Bu hedefe yönelik olarak, Avrupa Birliği, 2010 yılında yürürlüğe giren Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) ile tüm yeni binaların "neredeyse sıfır enerjili bina" (nZEB) standartlarına uyumunu zorunlu kılmıştır. EPBD kapsamında, yeni binaların yıllık ısıtma ihtiyacı yaklaşık 30–50 kWh/m² aralığında sınırlandırılmıştır (European Commission, 2023). Ayrıca, mevcut bina stokunun 2030 yılına kadar %35 oranında enerji verimli hâle getirilmesi planlanmaktadır (European Commission, 2023).

Amerika Birleşik Devletleri'nde ise ASHRAE 90.1 standardı, bina kabuğu, HVAC sistemleri ve aydınlatma gibi bileşenler için minimum enerji performans kriterlerini belirlemektedir (Ashrae, 2022). EPBD'den farklı olarak, ASHRAE mevcut teknolojilerle ulaşılabilir performans seviyelerini baz almakta ve ofis binaları için yıllık ısıtma ihtiyacını 100–150 kWh/m² aralığında öngörmektedir (Ashrae, 2022). Bu standart, birçok eyalette yasal zorunluluk olarak benimsenmiş ve yerel düzeyde uygulanmaktadır.

Türkiye ise Avrupa Birliği ile mevzuat uyumu sürecinde, Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği (BEP-TR) gibi düzenlemeleri uygulamaya almıştır. Bu durumun temel nedenleri arasında yalıtım malzemelerinin düşük termal performansı, inşaat süreçlerinde enerji verimliliği kriterlerinin yeterince dikkate alınmaması ve enerji kimlik belgesi süreçlerinde denetim eksiklikleri yer almaktadır (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023).

2.2. Kompozit Yalıtım Malzemelerine İlişkin Çalışmaların Derlemesi

Kompozit yalıtım malzemeleri, sürdürülebilir yapı sektöründe enerji verimliliğini artırmak ve çevresel etkileri azaltmak amacıyla son yıllarda yoğun şekilde araştırılmaktadır. Bu malzemeler, doğal reçineler, geri dönüştürülmüş agregalar ve yenilikçi bağlayıcı sistemlerin birleşimiyle geliştirilmekte ve geleneksel yalıtım malzemelerinin sınırlılıklarını aşmayı hedeflemektedir.

Yapı malzemelerinde doğal reçinelerin kullanımı, son yıllarda özellikle sürdürülebilirlik odaklı araştırmaların merkezinde yer almaktadır. Devecioğlu ve Biçer (2016), genleştirilmiş kil agregası ile geven reçinesini birleştirerek hafif betonlar üzerine yaptıkları çalışmada dikkat çekici sonuçlar elde etmiştir. %1 geven reçinesi ve 4-8 mm boyutunda genleştirilmiş kil kullanılan bu kompozitlerde, ısı iletkenlik 0,215 W/m·K seviyesine düşürülmüş ve yoğunluk 867-1452 kg/m³ aralığında tutulmuştur. Bu değerler, geleneksel betonlara kıyasla termal performansta %20'lik bir iyileşmeyi işaret etmektedir. Ayrıca, 15-20 MPa basınç dayanımıyla taşıyıcı olmayan duvar panelleri ve sıva katmanları için uygun olduğu belirtilmiştir. Bu çalışma, doğal reçinelerin yapı malzemelerinde bağlayıcı olarak kullanılabileceğini kanıtlaması açısından önemli bir adım olmuştur.

Benzer bir yaklaşım, Kaya ve Kar (2016) tarafından atık EPS (genleştirilmiş polistiren) ve kitre reçinesi kombinasyonu ile test edilmiştir. %80 EPS ve %1 kitre reçinesi içeren hafif betonlarda, ısı iletkenlik 0.25 W/m·K olarak ölçülmüş ve yoğunluk 600-800 kg/m³ seviyesine düşürülmüştür. Ancak, EPS parçacıklarının heterojen dağılımı nedeniyle termal performansta beklenen iyileşmenin tam olarak sağlanamadığı vurgulanmıştır. Buna rağmen, bu çalışma plastik atıkların geri dönüşümüne yönelik potansiyeli ortaya koyması açısından değerli bulunmuştur.

Akpınar ve Koçyiğit (2016), kitre (geven reçinesi) ve pomza agregası kullanarak hafif beton üretmiş ve bu malzemelerin termal ve mekanik özelliklerini değerlendirmiştir. Elde edilen numunelerin ısı iletkenlik değerleri 0,177–0,433 W/m·K arasında ölçülmüş, yoğunlukları ise 0,728–1,772 g/cm³ aralığında bulunmuştur. Basınç dayanımı ve su emme oranı gibi diğer parametreler de bu malzemelerin hafif beton sınıfına uygun olduğunu göstermiştir. Çalışma sonucunda, söz konusu kompozitlerin yalıtım özelliği sayesinde yapı sektöründe kaplama ve bölme elemanı olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Endüstriyel atıkların yapı malzemelerinde kullanımı, sürdürülebilirliği artırmak için kritik bir stratejidir. Biçer (2019), uçucu kül ve %1 geven reçinesini birleştirerek geliştirdiği kompozitlerde, ısı iletkenliği 0.177 W/m·K'ya düşürmeyi başarmıştır. Bu çalışmada, uçucu külün pozolanik etkisiyle çimento kullanımı azaltılmış ve karbon ayak izi %40 oranında düşürülmüştür. Malzemenin yoğunluğu 1200 kg/m³ civarında tutularak hafif harç ve beton uygulamaları için ideal bir seçenek haline getirilmiştir. Ancak, reçine dozajının %1'in üzerine çıkması durumunda basınç dayanımında %17-40'lık bir azalma gözlemlenmiştir. Bu durum, malzeme formülasyonlarında optimizasyonun önemini ortaya koymaktadır.

Çam reçinesi, organik yapısı ve suya dayanıklı özellikleri nedeniyle yapı malzemelerinde alternatif bir bağlayıcı olarak dikkat çekmektedir. Biçer ve Çelik (2020), pomza agregası ve %1 çam reçinesi kullanarak geliştirdikleri kompozitlerde, ısı iletkenliği 0.23 W/m·K seviyesine indirmiş ve su emme oranını %15 azaltmayı başarmıştır. Bu malzeme, nemli ortamlarda duvar panelleri ve dış cephe sıvaları için uygun bulunmuştur. Ayrıca, reçinenin pomza taneleri arasında film oluşturarak mekanik dayanımı 20 MPa seviyesinde tuttuğu belirtilmiştir. Bu çalışma, çam reçinesinin hem termal hem de hidrofobik özelliklerini bir arada sunabilmesi açısından önem taşımaktadır.

Koçyiğit ve Çay (2020), genleştirilmiş vermikülit ve %1 doğal reçine (geven) kullanarak benzer bir yaklaşımı test etmiştir. Elde edilen kompozitlerde ısı iletkenlik $0.20 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ olarak ölçülmüş ve yoğunluk $1000\text{-}1200 \text{ kg/m}^3$ aralığında tutulmuştur. Malzemenin yangın direnci ve hafifliği, bölme duvarlar ve tavan dolguları için ideal olduğunu göstermiştir. Ancak, reçine dozajının %1'in üzerine çıkması durumunda termal iletkenlikte iyileşme sağlansa da basınç dayanımının 15 MPa 'ya düştüğü gözlemlenmiştir.

Son yıllarda, genleştirilmiş cam ve kiraz reçinesi gibi yenilikçi malzemelerin kombinasyonları test edilmiştir. Biçer (2021), genleştirilmiş cam agregası ve %1 çam reçinesi kullanarak $0.177 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ termal iletkenlik sağlamıştır. Bu çalışmada, çimento kullanımı %50 azaltılarak çevresel etkiler minimize edilmiş ve yoğunluk 1050 kg/m^3 seviyesinde tutulmuştur. Malzeme, prefabrik duvar panelleri ve hafif döşeme betonları için endüstriyel ölçekte test edilmiş, başarılı sonuçlar alınmıştır. Ancak, su emme oranının %25'in üzerinde olması, nemli ortamlarda kullanımını sınırlandıran bir faktör olarak belirtilmiştir.

Biçer ve arkadaşları (2023), kiraz ağacı reçinesi ve genleştirilmiş kil kombinasyonunu araştırmıştır. %50 kil ve %1.5 kiraz reçinesi içeren kompozitlerde, ısı iletkenlik $0.171 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ile şimdiye kadar kaydedilen en düşük değerlerden birine ulaşılmıştır. Yoğunluk 1100 kg/m^3 seviyesinde tutulurken, basınç dayanımı $15\text{-}25 \text{ MPa}$ aralığında korunmuştur. Bu malzeme, geleneksel tuğla ve briketlere alternatif olarak panel duvarlar ve iç/dış sıva katmanlarında kullanılabilecek potansiyele sahiptir. Ancak, kiraz reçinesinin üretim maliyetinin yüksek olması, endüstriyel ölçekte yaygınlaşmasını engelleyen bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

Doğal reçineli kompozitler, termal performans ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunsa da bazı sınırlamaları bulunmaktadır.

Reçineli kompozitlerde su emme oranı %30'a kadar çıkabilmekte, bu da nemli ortamlarda kullanımı sınırlandırmaktadır.

Yüksek reçine dozajları (%2 ve üzeri), basınç dayanımını %40'a kadar düşürebilmektedir. Doğal reçinelerin üretim ve saflaştırma maliyetleri, geleneksel bağlayıcılara kıyasla daha yüksektir.

Doğal reçineler ve atık agregaların birleşimi, yapı sektöründe çevre dostu ve yüksek performanslı yalıtım malzemeleri sunma potansiyeline sahiptir. 2016'dan günümüze yapılan çalışmalar, ısı iletkenliği $0.15\text{-}0.25 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ bandına düşürmeyi başarmış ve geleneksel malzemelere kıyasla %20-40 daha düşük karbon ayak izi sağlamıştır. Ancak, mekanik dayanım ve su direnci gibi parametrelerin iyileştirilmesi, bu malzemelerin endüstriyel ölçekte benimsenmesi için kritik önem taşımaktadır. Gelecek çalışmalar, malzeme formülasyonlarının optimizasyonuna ve çok disiplinli araştırma yaklaşımlarına odaklanmalıdır.

2.3. Hafif Beton Teknolojilerinde Gelişmeler ve Yalıtım Amaçlı Uygulamalara Yönelik Çalışmalar

Hafif beton teknolojileri, yoğunluğun ($<1,800 \text{ kg/m}^3$) düşürülmesi ve gözenekliliğin artırılması yoluyla ısı iletkenliği geleneksel betona kıyasla 3-5 kat azaltarak ($0.07\text{--}0.25 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) enerji verimliliğini iyileştirmektedir. Bu malzemeler, yapısal bütünlük ile ısı yalıtımını entegre ederek maliyetleri %20 düşürürken karbon ayak izini minimize etmektedir (Thongtha vd., 2023).

Gaz beton (AAC) ve köpük beton gibi hücreli yapı malzemeleri, %50–80 gözenek oranıyla $0.10\text{--}0.15 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ısı iletkenlik sunar. Özellikle AAC, $400\text{--}800 \text{ kg/m}^3$ yoğunlukta ek yalıtıma gerek kalmadan bina enerji tüketimini %50 azaltabilmektedir (Singh vd., 2024). Atık bazlı AAC formülasyonları öne çıkmaktadır: Şeker çamuru atığı ile üretilen AAC paneller, $0.09 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ iletkenlik ve %55 enerji tasarrufu sağlarken, geri dönüştürülmüş AAC tozu ham madde kullanımını %30 düşürmektedir (Thongtha vd., 2023).

Atık temelli hafif agregalar (genleştirilmiş cam köpüğü, geri dönüştürülmüş plastik, pomza) betonun yoğunluğunu $800\text{--}1,400 \text{ kg/m}^3$ 'e indirirken ısı iletkenliği $0.08\text{--}0.12 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ seviyesine çekmektedir. Cam köpüğü agregalı betonlar, %85'e varan gözeneklilikle çatı izolasyonunda etkin çözümler sunar (Singh vd., 2024). Termal performansın iyileştirilmesinde Faz Değiştiren Malzemeler (PCM) kritik rol oynar: Mikrokapsüllenmiş parafin ile kaplanmış AAC bloklar, ısısal atalet kapasitesini 2.7 kat artırarak sıcaklık dalgalanmalarını $\pm 1.5^\circ\text{C}$ sınırlamaktadır (Thongtha vd., 2023).

Sürdürülebilirlik avantajları; doğal agrega kullanımını %40 azaltmak, atık malzeme geri dönüşüm oranını %60'a çıkarmak ve üretim enerjisini geleneksel betona göre %35 düşürmektir (Singh vd., 2024).

2.4. Biyobazlı Katkı Maddeleri ile Geliştirilen Yapı Malzemeleri Üzerine Çalışmalar

Biyobazlı yapı malzemeleri, yenilenebilir kaynaklardan (bitkiler, tarımsal atıklar, mantar vb.) elde edilen katkılarla geliştirilen ve çevresel etkisi düşük kompozit sistemlerdir. Bu malzemeler, geleneksel yapı ürünlerine kıyasla %30–50 oranında daha düşük karbon ayak izi ve biyolojik parçalanabilirlik gibi çevresel avantajlar sunmaktadır. Literatürde biyobazlı kompozitlerin, inşaat sektörünün 2050 yılı net-sıfır karbon hedeflerine ulaşmasında önemli bir rol üstlenebileceği vurgulanmaktadır (Bourbia vd., 2023).

Geri dönüştürülmüş pamuk denim atıkları ile güçlendirilmiş epoksi matrisli kompozitlerin $0.042 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ düzeyinde ısı iletkenliği sunduğu ve iç cephe duvar yalıtımı uygulamalarında başarılı sonuçlar verdiği belirtilmektedir (Kinoti vd., 2023).

Biyopolimer katkılı sistemlerde ise lignin, nişasta ve kitosan gibi doğal polimerlerin kullanımı dikkat çekicidir. Lignosülfonat katkılı betonlar, hem su ihtiyacını %18 oranında azaltmakta hem de termal iletkenliği $1.8 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 'dan $1.2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 'ya düşürmektedir (Kinoti vd., 2023). Bununla birlikte,

odun talaşı katkılı polilaktik asit (PLA) esaslı kompozit panellerin 0.048 W/m·K iletkenlik değerine ve %90 biyobozunurluk oranına sahip olduğu rapor edilmiştir (Bourbia vd., 2023).

Türkiye’de yürütülen araştırmalar ise genellikle tarımsal atıkların yapı sektörüne kazandırılması üzerine odaklanmaktadır. TÜBİTAK destekli bir projede, fındık kabuğu lifi ve zeytin prinası içeren poliüretan köpük kompozitlerin 0.045 W/m·K ısı iletkenliği ve 0.18 MPa basma dayanımı ile uygun yalıtım özellikleri sunduğu belirlenmiştir (TÜBİTAK, 2023). İstanbul Teknik Üniversitesi bünyesinde yürütülen başka bir çalışmada ise buğday samanı bazlı panellerin, 28.5 dB ses yutma katsayısıyla hem termal hem de akustik yalıtımda etkin olduğu ortaya konmuştur (İTÜ Yapı Malzemeleri Laboratuvarı, 2024).

2.5. Atık Tabanlı Agregaların Isıl Performansa Etkisi: Literatür İncelemesi

Atık malzemelerin agrega olarak kullanılması, yapı malzemelerinin ısı performansını iyileştirmek amacıyla yoğun biçimde araştırılmaktadır. Beton veya harç içerisinde doğal agrega yerine atık temelli agregalar (geri dönüştürülmüş beton kırıkları, lastik parçacıkları, köpük plastik atıkları, uçucu kül bazlı sentetik agregalar vb.) kullanıldığında, malzemenin toplam yoğunluğu ve katı faz oranı azalmakta, bu da ısı iletkenlik değerlerini düşürmektedir (Adesina, 2021).

Literatürde, %10–30 hacim oranında lastik (kauçuk) agregası ilavesinin betonun ısı iletkenliğini anlamlı ölçüde düşürdüğü, örneğin %30 oranında ince kauçuk parçacık ile betonun ısı iletkenliğinde %20'lere varan azalma gözlemlendiği belirtilmiştir. Benzer şekilde, poliüretan köpük (PUR) atıklarının agregaya katılması çok yüksek porozite (%98'e varan gözeneklilik) getirdiği için betonun ısı iletimini dramatik biçimde azaltmaktadır (Siddique vd., 2008).

Bir çalışmada, toplam agreganın %30'u oranında PUR köpük atığı kullanmanın, betonun ısı iletkenliğini yaklaşık %78 oranında düşürdüğü rapor edilmiştir (Adesina, 2021). Bu denli bir azalma, atık bazlı agregaların malzeme içinde oluşturduğu boşluklu mikro yapı sayesinde ısı geçişinin kısıtlanmasından kaynaklanmaktadır. Öte yandan, atık malzeme kullanımı mekanik dayanımlarda bir miktar düşüşe yol açabilse de taşıyıcı olmayan dolgu ve panel uygulamaları için kabul edilebilir kompozitler elde etmek mümkündür.

Nitekim, bir literatür taramasında çeşitli atık plastik ve kauçuk malzemelerle üretilen harç ve betonların ısı iletkenliklerinin geleneksel eşdeğerlerine göre belirgin ölçüde düşük olduğu, uygun oran ve boyutta atık kullanımıyla hedeflenen yalıtım performansının sağlanabildiği ortaya konmuştur (Adesina, 2021; Siddique vd., 2008).

Bu bulgular, döngüsel ekonomi prensipleriyle atıkların yapı malzemelerine kazandırılmasının, sadece çevresel fayda değil aynı zamanda ısı yalıtım performansı açısından da önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir.

2.6. Isı Yalıtım Malzemelerinde Çevresel Sürdürülebilirlik Kriterleri ve İlgili Çalışmalar

Isı yalıtım malzemelerinin çevresel sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesinde, malzemenin tüm yaşam döngüsündeki etkileri dikkate alınmaktadır. Bu kapsamda başlıca kriterler; hammaddenin yenilenebilir veya geri dönüştürülmüş kaynaklı olması, üretim sürecindeki enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarının düşüklüğü, malzemenin kullanım aşamasında insan sağlığına zararlı uçucu organik bileşen (VOC) salmaması ve ömrünü tamamladığında geri dönüştürülebilir veya düşük atık bırakır nitelikte olmasıdır.

Özellikle yalıtım malzemelerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) sonuçları, küresel ısınma potansiyeli (GWP), asitletme ve ozon inceltme gibi kategorilerde olumsuz etkilerin minimize edilmesini hedefleyen tasarımları ön plana çıkarmaktadır (Asdrubali vd., 2015). Örneğin, petrol türevi poliüretan veya polistiren köpükler yüksek yalıtım performansı sağlasalar da üretim süreçlerinde fosil yakıt kullanımı ve kimyasal emisyonlar nedeniyle göreceli yüksek bir karbon ayak izine sahiptir (Asdrubali vd., 2015). Buna karşın, selüloz bazlı, ahşap lifli veya pamuk denim atığı gibi biyobazlı izolasyon malzemelerinin üretimi çok daha az sera gazı salımı gerektirmekte ve bunlar karbon nötr veya negatif olabilmektedir (Papadopoulos, 2005).

Nitekim bir çalışmada geri dönüştürülmüş pamuk/elyaf yalıtım malzemelerinin, 13 farklı çevresel etki kategorisinin tamamında geleneksel malzemelere kıyasla en düşük etkiyi gösterdiği saptanmıştır (Papadopoulos, 2005). Sürdürülebilirlik kriterleri bağlamında, yalıtım malzemelerinin yangın geciktirici kimyasal içerikleri (örn. halojenli alev kesiciler) veya ozon tabakasına zarar veren şişirici gazlar içermemesi, uzun ömürlü ve dayanıklı olup sık sık yenilenme gerektirmemesi de önem taşır.

Uluslararası LEED ve BREEAM gibi yeşil bina sertifikasyon sistemleri de malzeme seçiminde geri dönüştürülmüş içerik oranı, bölgesel malzeme kullanımı, düşük emisyonlu ve sağlığa zararsız ürün kriterleriyle bu hususları teşvik etmektedir (Asdrubali vd., 2015; Papadopoulos, 2005). Sonuç olarak, ısı yalıtım malzemelerinde çevresel sürdürülebilirlik, malzemenin hem üretimden bertarafa kadar çevreye minimum zarar vermesi hem de bina kullanımındaki enerji tasarrufu katkısıyla bütüncül bir değerlendirme gerektirir.

2.7. Isıl İletkenlik Değerlerinin Malzeme Mikroyapısıyla İlişkisi Üzerine Çalışmalar

Bir malzemenin mikroyapısı, ısı iletkenlik değerlerini doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Özellikle gözeneklilik oranı, gözenek boyutu ve dağılımı gibi mikroyapısal özellikler, malzemenin ısı transfer mekanizmalarını belirler. Genel olarak daha yüksek toplam poroziteye sahip malzemeler, içlerinde hapsedilen hava boşlukları sayesinde daha düşük ısı iletkenlik sergiler (Baino ve Gianchandani, 2025).

Malzeme içerisinde gözeneklerin boyutunun küçük ve dağılımının homojen olması da ısı iletimini kısıtlar; eşit dağılımlı küresel gözenekler, ısı köprüsü oluşturabilecek kesintisiz katı faz yollarını minimize ederek düzensiz şekilli gözeneklere kıyasla daha etkili yalıtım sağlar (Baino ve Gianchandani, 2025). Kapalı gözenekli yapılar, konvektif ısı aktarımını engelledikleri için açık gözenekli yapılardan daha düşük ısıl iletkenlik değerlerine ulaşır.

Mikroyapı-ısı iletkenliği ilişkisinin bir diğer yönü, malzemede birden fazla fazın varlığıdır: Örneğin, kompozit bir malzemede iletkenliği yüksek bir dolgu malzemesinin sürekli faz oluşturması, toplam ısı iletimini artırabilirken; düşük iletkenlikli bir ikinci fazın (örneğin hava veya boşluk) dağılımı, iletimi azaltır. Bu nedenle, ısı yalıtım malzemelerinin geliştirilmesinde mikroyapının mühendislik yöntemleriyle kontrolü (gözenek oluşturma ajanları, köpürme teknikleri, lif yönlendirme vb.) istenen ısıl performansa ulaşmada temel rol oynar.

Nitekim yapılan çalışmalar, farklı malzemelerde mikroyapısal değişimlerin ısıl iletkenlik üzerinde doğrusal veya üssel korelasyonlar oluşturduğunu göstermektedir (Baino ve Gianchandani, 2025).

Sonuç olarak, malzeme bilimi perspektifinden bakıldığında, ısıl iletkenlik ile mikroyapı arasında güçlü bir ilişki bulunmakta olup optimal yalıtım için gözenek boyutu, şekli ve dağılımı gibi parametrelerin titizlikle tasarlanması gerekmektedir.

2.8. Yalıtım Malzemelerinde Enerji Simülasyon Yöntemlerinin Kullanımı ile İlgili Çalışmalar

Enerji simülasyonlarının kökeni 20. yüzyılın ortalarına dayanmaktadır. İlk dönemlerde basit matematiksel modeller kullanılıyordu, ancak bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte bu modeller karmaşık algoritmalara dönüştü. 1970'lerde yaşanan enerji krizi, binaların enerji performansının optimize edilmesi gerekliliğini ortaya çıkardı ve bu da simülasyon yazılımlarının hızla geliştirilmesine yol açtı. Günümüzde EnergyPlus, TRNSYS, DesignBuilder ve IES VE gibi yazılımlar hem akademik çalışmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle EnergyPlus, açık kaynak kodlu yapısı ve detaylı termodinamik hesaplama yetenekleri sayesinde, bina kabuğunun ısıl davranışını saat bazında analiz edebilmektedir. Bu yazılım, yalıtım malzemelerinin ısıl iletkenlik katsayılarını (λ), yoğunluk ve özgül ısı kapasitesi gibi parametreleri entegre ederek, duvar ve çatı sistemlerinin enerji tüketimine etkisini dinamik olarak modelleyebilir (Crawley vd., 2008).

Dinamik simülasyon yazılımları, bina enerji performansını değerlendirirken çeşitli avantajlar sunar. Bu yazılımlar, saatlik hava durumu verilerini (TMY verileri) kullanarak gerçekçi bir analiz sağlar. Ayrıca, yalıtım malzemelerinin ısıl iletkenlik katsayısı (λ), yoğunluk ve nem direnci gibi parametreler, simülasyonlara direkt olarak entegre edilebilir. Örneğin, EPS + kayısı reçinesi kompozitinin ($\lambda=0,250$ W/m·K) kullanıldığı bir duvar sistemi, EnergyPlus ile simüle edildiğinde, İstanbul'da yıllık ısıtma ihtiyacını %18-22 azaltabilmektedir (Kaya ve Kar, 2016). Benzer şekilde, genleştirilmiş cam + çam

reçinesi kompoziti ($\lambda=0,177$ W/m·K), Antalya gibi sıcak iklimlerde soğutma yükünü %15 düşürmektedir (Biçer, 2021).

Optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi, enerji tasarrufu ile yatırım maliyeti arasındaki dengenin bulunduğu noktayı ifade eder. Bu kalınlık, yaşam döngüsü maliyet analizi (LCCA) ile belirlenir. LCCA’da başlangıç maliyeti, yalıtım malzemesinin birim fiyatı ve uygulama maliyetini içerirken, enerji tasarrufu yıllık ısıtma ihtiyacındaki azalma ve yakıt maliyetlerine dayanır. Örneğin, Daouas (2011) Tunus’taki bir konut projesinde poliüretan köpük kullanımının optimum kalınlığını 8 cm olarak belirlemiştir. Bu kalınlık, yıllık enerji tasarrufunu %24 artırırken, geri ödeme süresini 5,2 yıla düşürmüştür. Türkiye’de ise ucu kül + geven reçinesi gibi yerel malzemelerle benzer analizler yapılarak maliyetler optimize edilebilir (Biçer, 2019).

Enerji simülasyonları, çevresel ve ekonomik katkılar açısından da kritik sonuçlar doğurur. Düşük ısıl iletkenlikli malzemelerin kullanımı, fosil yakıt tüketimini azaltarak CO₂ emisyonlarını düşürür ve karbon ayak izini minimize eder. Türkiye’de enerji ithalatının %70’inin doğalgaz ve petrolden oluştuğu düşünüldüğünde, yalıtım optimizasyonu enerji bağımsızlığına katkı sağlayabilir (ETKB, 2023).

Son yıllarda, yapay zekâ ve makine öğrenmesi algoritmaları enerji simülasyonlarında devrim yaratmaktadır. Bu teknolojiler, geleneksel simülasyonların saatler süren hesaplamalarını dakikalara indirgeyerek hızlı veri işleme imkânı sağlar. Ayrıca, tarihsel verilerden öğrenen ML algoritmaları, gelecekteki enerji tüketimini daha doğru tahmin edebilir. Örneğin, Hou vd. (2021) derin öğrenme teknikleri kullanarak bir ofis binasının enerji tüketimini %12 daha doğru tahmin etmeyi başarmıştır. Bu tür gelişmeler, yalıtım malzemelerinin performansının gerçek zamanlı olarak izlenmesine ve iyileştirilmesine olanak tanımaktadır.

Yalıtım malzemelerinin enerji performansının değerlendirilmesinde, statik yöntemler ve dinamik simülasyonlar (EnergyPlus) bir arada kullanılmalıdır. Özellikle yerel malzemelerin simülasyonlarla test edilmesi, Türkiye’nin enerji bağımsızlığı ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri açısından kritik öneme sahiptir. Bu doğrultuda, Türkiye’de üretilen kompozitlerin termofiziksel özelliklerinin simülasyon yazılımlarına entegre edilmesi, mühendis ve mimarlara yönelik eğitim programlarının yaygınlaştırılması ve düşük ısıl iletkenliğe sahip malzemelerin kullanımının teşvik edilmesi önerilmektedir.

2.9. Türkiye’de Kompozit Yalıtım Malzemelerine Yönelik Araştırma Eğilimleri ve Çalışmalar

Türkiye’de kompozit yalıtım malzemeleri alanındaki araştırmalar, ülkenin yalıtım malzemelerinde dışa bağımlılığını azaltma ve yerli, yenilikçi ürünler geliştirme hedefi doğrultusunda son yıllarda artış göstermektedir (Arslan ve Aktaş, 2018).

Literatürde, farklı atıkların veya doğal malzemelerin uygun bağlayıcılar ile bir araya getirilerek yeni nesil yalıtım kompozitleri oluşturulabileceği ve bunların istenen ısı iletkenliği ve yangın, akustik

performans kriterlerini sağlayabileceği öngörülmektedir (Kılıç ve Yanardağ, 2020). Özellikle tarımsal atıklar ve doğal liflerin kullanımı dikkat çekmektedir: Örneğin saman, odun talaşı, pamuk artıklarının su bazlı reçinelerle birleştirilmesiyle çevre dostu yalıtım paneli üretimi üzerine TÜBİTAK destekli çalışmalar yapılmıştır.

Benzer şekilde, endüstriyel atıkların (uçucu kül, genişletilmiş perlit, geri dönüştürülmüş plastik köpük vb.) polimer veya inorganik matrislerle kompozit hale getirilerek hafif yalıtım blokları elde edilmesi araştırılmaktadır. Türkiye’deki araştırma eğilimlerinin bir diğer yönü, ileri malzeme teknolojilerinin yalıtıma entegre edilmesidir. Örneğin, poliüretan köpük matrise silika aerojel, grafen oksit, nanokil gibi katkıları eklenerek ısı performansını artırılmış kompozitler geliştirilmiştir. Çukurova Üniversitesi’nde yapılan bir sayısal çalışmada, saf PU köpüğe kıyasla %5 oranında aerojel içeren PU köpük kompozitin ısı geçiş kayıplarını yaklaşık %20 azaltarak daha iyi yalıtım sağladığı gösterilmiştir (Kılıç ve Yanardağ, 2020). Aynı çalışmada küçük oranlı nanokil ilavesinin ise ısı yalıtım performansını bir miktar düşürdüğü belirtilmiştir, bu da doğru malzeme kombinasyonunu seçmenin önemini vurgulamaktadır (Kılıç ve Yanardağ, 2020).

Bunun yanı sıra, Türkiye’de bor mineralleri açısından zengin kaynakların varlığı, bor katkı polimerik yalıtım malzemeleri üzerine araştırmaları teşvik etmektedir (ör. bor içeren kompozitlerin yangın dayanımı ve yalıtım özellikleri incelenmektedir). Genel olarak, Türkiye’de kompozit yalıtım malzemeleri araştırmaları sürdürülebilirlik ve yenilik ekseninde ilerlemekte; yerli hammaddelerin değerlendirilmesi, atıkların geri kazanımı ve yüksek performanslı hibrit malzemelerin geliştirilmesi konularına odaklanmaktadır. Bu eğilim, önümüzdeki yıllarda Türkiye’nin kendi özgün yalıtım malzemelerini üretip geliştirmesi ve dışa bağımlılığı azaltması açısından kritik bir Ar-Ge alanı olarak görülmektedir (Arslan ve Aktaş, 2018; Kılıç ve Yanardağ, 2020).

2.10. Literatürdeki Boşluklar ve Bu Çalışmanın Katkısı

Son yıllarda enerji etkin bina tasarımı alanında önemli sayıda akademik çalışma yürütülmüş olsa da mevcut literatür incelendiğinde bazı temel boşlukların olduğu görülmektedir. Özellikle Türkiye özelinde yürütülen çalışmaların çoğu, geleneksel yalıtım malzemelerinin (EPS, XPS, taş yünü vb.) performansını değerlendirmeye odaklanmakta; yerli ve çevre dostu kompozit malzemelere ilişkin sistematik ve karşılaştırmalı analizlere ise oldukça sınırlı yer verilmektedir.

Mevcut çalışmaların büyük bir kısmı, enerji performansı analizlerinde yalnızca statik yöntemler olan derece - gün hesaplamalarını temel almakta ve bu yöntemlerin dinamik simülasyonlarla karşılaştırılmasına yeterince odaklanmamaktadır. Ayrıca, farklı iklim bölgelerinde aynı yapı formunun performansını karşılaştıran disiplinler arası bütüncül analizlere de literatürde nadiren rastlanmaktadır. Bu çalışmanın özgün katkısı üç temel eksikliği hedef alarak giderme çabasıdır.

Yerli ve çevreci bir kompozit malzeme kullanımı: Şermin Koçyiğit’in (2024) çalışmasından alınan $\lambda = 0,059 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ değerine sahip çam reçinesi ve genişletilmiş cam agregası bazlı kompozit

malzeme, bu çalışmanın temel yalıtım bileşeni olarak değerlendirilmiştir. Söz konusu malzeme hem düşük ısı iletkenliği hem de geri dönüştürülebilir içeriğiyle çevre dostu yalıtım uygulamaları açısından önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Statik ve dinamik yöntemlerin entegrasyonu: Derece - gün yöntemi ile hesaplanan optimum yalıtım kalınlıkları, aynı yapı modeli üzerinde EnergyPlus simülasyonları ile test edilmiş; böylece iki yöntem arasında elde edilen enerji tüketim değerleri karşılaştırılmış ve analizlerin doğruluk düzeyi değerlendirilmiştir. Bu sayede, derece gün yöntemi ile hesaplama yaklaşımının eksiklikleri ve EnergyPlus gibi dinamik simülasyon araçlarının sunduğu ayrıntılı çözümler ortaya konmuştur.

Dört farklı bölgede eş zamanlı analiz: Türkiye'nin dört bölgesini temsilen seçilen Hatay, Edirne, Bingöl ve Kars illerinde, aynı yapının ve aynı yalıtım malzemesinin farklı iklim koşullarındaki performansı değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, iklim değişkenliğinin optimum yalıtım kalınlığı ve enerji tüketimi üzerindeki etkisi nicel olarak karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma; yerli kompozit yalıtım malzemelerinin enerji performansına etkisini, statik ve dinamik yöntemlerle değerlendiren, çok iklimli ve çok katmanlı bir araştırma olarak literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyaller ve Modelleme Parametreleri

Bu bölümde, enerji verimliliği analizlerinde kullanılan temel girdiler ve yapı bileşenleri ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Çalışmada ele alınan parametreler; iklimsel veriler, yalıtım malzemesi özellikleri, ekonomik faktörler, enerji kaynağı bilgileri, yapı kabuğu özellikleri ve bina geometrisi olmak üzere kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, enerji performansı ve optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesinde kullanılan tüm teknik ve ekonomik girdiler sistematik olarak sunulmuştur.

Materyallerin seçiminde hem Türkiye'nin iklimsel çeşitliliği hem de yapı sektöründe kullanılabilirlik kriterleri dikkate alınmıştır. Ayrıca enerji analizlerinin doğruluğunu artırmak amacıyla yüksek çözünürlüklü saatlik iklim verileri ve gelişmiş hesaplama yöntemleri kullanılmıştır. Bu unsurlar, çalışmanın bilimsel niteliğini güçlendirmiş ve elde edilen sonuçların gerçek dünya koşullarıyla daha uyumlu olmasını sağlamıştır.

3.1.1. Seçilen İllerin Tanımlanması ve HDD (Heating Degree Day) Verilerinin Belirlenmesi

Binaların ısıtma enerji ihtiyacını doğru şekilde belirlemek, enerji verimliliği uygulamalarının başarısı için vazgeçilmezdir. Isıtma Derece - gün (Heating Degree Day - HDD) parametresi, belirlenen taban sıcaklığın altındaki günlerdeki sıcaklık farklarının yıl boyunca toplanmasıyla hesaplanan ve bina ısıtma gereksinimini niceliksel olarak ortaya koyan temel bir iklim göstergesidir. Geleneksel hesaplamalarda genellikle günlük veya aylık ortalama sıcaklıklar kullanılırken, bu yöntem kısa süreli sıcaklık değişimlerinin etkisini yeterince yansıtmayabilir ve detaylı enerji modellemeleri için yetersiz kalabilir. Bu nedenle, çalışmamızda daha yüksek hassasiyete sahip saatlik sıcaklık verileri temel alınmıştır.

Türkiye'nin farklı ısıtma derece - gün değerlerine sahip Hatay, Edirne, Bingöl ve Kars illeri, bu çalışmanın kapsamına alınmıştır. Bu iller, coğrafi konumları ve iklim koşulları bakımından çeşitlilik göstermekte olup, enerji talebinin farklılaşmasını sağlamaktadır. Böylece, malzemelerin ve yapıların farklı iklim şartlarındaki performansları kapsamlı bir şekilde analiz edilebilmiştir. İklim verileri, Meteonorm 7.3 yazılımı ile ilgili illerin en yakın meteorolojik istasyonlarından sağlanan saatlik sıcaklık verilerinin interpolasyonu ile oluşturulmuştur. Meteonorm, dünya çapında geniş veri tabanına sahip, meteorolojik verileri istasyonlar arasında harmanlayarak yüksek çözünürlüklü saatlik iklim verileri sunan bir programdır. Böylece, bölgesel iklim koşullarının etkileri detaylı ve güvenilir şekilde modellenmiştir.

Saatlik sıcaklık verileri, MATLAB ortamında işlenmiş; 19 °C olarak belirlenen taban sıcaklığın altında kalan saatlik sıcaklık değerleri filtrelenmiş ve günlük bazda bu değerlerin toplamı alınarak günlük HDD hesaplanmıştır. Günlük HDD değerleri yıl boyunca toplanarak yıllık HDD değeri

oluşturulmuştur. Bu kapsamlı veri işleme, ısıtma enerjisi ihtiyacının hem mevsimsel hem de günlük değişimlerinin yüksek doğrulukla yakalanmasına olanak sağlamıştır. Tablo 3.1’de seçilen illere ait yıllık HDD değerleri verilmekte olup, farklılıkların boyutları açıkça gözlemlenmektedir.

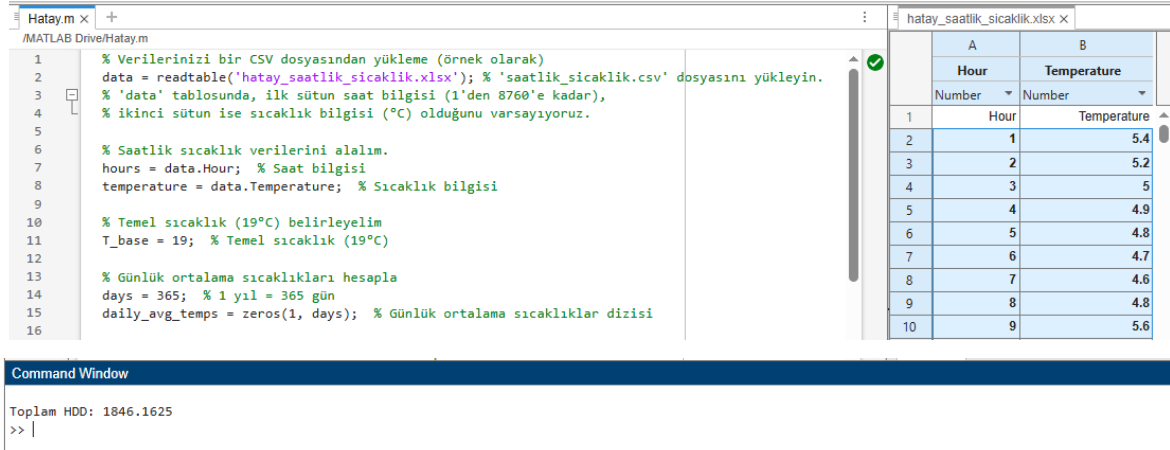
Tablo 3.1. İklim parametreleri

İller	Isıtma Derece Günleri, HDD
Hatay	1846,16
Edirne	2347,94
Bingöl	3340,46
Kars	5160,42

Saatlik sıcaklık bazlı HDD hesaplama yöntemi, sıcaklık dalgalanmalarının bina enerji ihtiyacına etkisini gerçekçi şekilde yansıtmakta ve simülasyonların güvenilirliğini artırmaktadır. Bu yaklaşım, enerji performans analizlerinde oluşabilecek hataları azaltarak, bina yalıtım kalınlıklarının optimum belirlenmesini ve enerji tasarrufu hedeflerinin gerçekleşmesini destekler. Ayrıca, bölgesel enerji tüketim ihtiyaçlarının hassas belirlenmesine olanak tanıyarak, enerji verimliliği politikalarının ve yalıtım uygulamalarının yerel iklim şartlarına uygun şekilde geliştirilmesine katkı sağlar.

Enerji verimliliği ve sürdürülebilir bina tasarımı çalışmalarında iklim verilerinin doğruluğu ve detay seviyesi kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, seçilen illerde gerçekleştirilen saatlik sıcaklık verisi işleme ve HDD hesaplama süreci, Türkiye’nin farklı ısıtma derece - gün değerlerine sahip bölgelerindeki enerji ihtiyaçlarının hassas şekilde belirlenmesini sağlamıştır. Bu veriler, enerji tüketimini azaltmaya yönelik stratejilerin oluşturulması ve enerji arz güvenliğinin sağlanması gibi ulusal düzeydeki hedeflere ulaşmada önemli bir kaynak teşkil etmektedir.

Bahsi geçen veri işleme ve analiz süreci, Şekil 3.1’de açıkça gösterilmektedir. Görselde, saatlik sıcaklık verilerinin MATLAB ortamına aktarılması, taban sıcaklık altındaki verilerin filtrelenmesi, günlük HDD hesaplama ve yıllık toplamın çıkarılması gibi aşamalar ayrıntılı olarak yer almaktadır. Bu sayede, iklim verilerinin enerji simülasyonları için uygun hale getirilme süreci sistematik ve tekrarlanabilir biçimde belgelenmektedir.



Şekil 3.1. Hatay ili için MATLAB arayüzünden saatlik sıcaklık verisi işleme kesiti ve HDD değeri hesaplama.

3.1.2. Kullanılan Kompozit Malzeme: Genleştirilmiş Cam Agregası ve Çam Reçinesi Esaslı Kompozit

Bu çalışmada kullanılan kompozit yapı malzemesi, Şermin Koçyiğit'in 2024 yılında yayımlanan "Thermal and Mechanical Properties of Eco-Friendly Lightweight Concrete Based on Pine Resin and Recycled Expanded Glass Aggregate" başlıklı çalışmasında (Koçyiğit, 2024) geliştirilmiş, sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği hedefleri doğrultusunda tasarlanmış özgün bir hafif betondur. Malzeme, geri dönüştürülmüş cam atıklarından üretilen genleştirilmiş cam agregası (Expanded Glass Aggregate - EGA) ile doğal çam reçinesinden (Pine Resin - PR) oluşmaktadır. Bu kombinasyon, düşük ısı iletkenlik, yüksek porozite ve düşük yoğunluk gibi özellikleriyle enerji verimliliği açısından yüksek performans sunarken, kabul edilebilir mekanik dayanımı da beraberinde getirmektedir.

Şekil 3.2'de kompozit malzemenin üretim süreci akış şeması sunulmaktadır. Agreganın hazırlanmasından başlayarak, çam reçinesinin eritilmesi, malzemenin karıştırılması, kalıplama, vibrasyonla sıkıştırma ve kütleme aşamalarını içeren bu üretim yöntemi, malzemenin homojenliği ve performansının garanti altına alınmasını sağlamaktadır (Koçyiğit, 2024).



Şekil 3.2. Kompozit malzeme üretim sürecinin akış şeması: Genleştirilmiş cam agregası ve çam reçinesi hazırlanması, karıştırılması, kalıplama, sıkıştırma ve kürlenme aşamaları (Koçyiğit, 2024).

Kullanılan EGA, tane boyutları bakımından 2–4 mm ve 4–8 mm olarak iki farklı gruba ayrılmıştır. Bu agregalar, %15, %35, %55 ve %75 oranlarında çimento matrisi ile hacimce karıştırılmıştır. Agregaların termal iletkenlik katsayıları, tane boyutlarına bağlı olarak sırasıyla 0.0639 W/m·K (2–4 mm) ve 0.0661 W/m·K (4–8 mm) olarak ölçülmüş; basınç dayanımları ise sırasıyla 1.4 MPa ve 1.2 MPa seviyelerinde raporlanmıştır. Düşük yoğunlukları (200–190 kg/m³) ve kapalı gözenekli yapıları, malzemeye yüksek ısı yalıtım kapasitesi kazandırmaktadır.

Doğal çam reçinesi, karışıma %0.5 ve %1.0 oranlarında dahil edilmiştir. PR, kolofoni ve terebentin içeren, su ile karıştırılarak eritilen doğal bir bağlayıcıdır. Reçine katkısı, yalnızca çimento matrisinin bağlayıcılığını güçlendirmekle kalmayıp, kür sırasında su buharının etkisiyle yapay mikro gözenekler oluşturarak malzemenin toplam porozitesini artırmaktadır.

Toplamda 24 farklı reçeteye sahip numune hazırlanmıştır. EGA ve çimento belirlenen oranlarda karıştırıldıktan sonra, eritilmiş PR homojen şekilde karışıma dahil edilmiş ve laboratuvar tipi mikserle yaklaşık 10 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karışım, 20×60×150 mm boyutlarındaki kalıplara yerleştirilmiş, vibrasyon ile sıkıştırılmış, ardından 48 saat sonra kalıptan çıkarılarak oda sıcaklığında 28 gün süreyle kürlenmiştir. Termal iletkenlik, yoğunluk, porozite, basınç dayanımı, su emme oranı, aşınma kaybı ve ultrasonik dalga hızı gibi deneyler ASTM, TS ve EN standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

En yüksek EGA ve PR oranlarına sahip numunelerde yoğunluk 0.536 g/cm³ (536 kg/m³) seviyelerine kadar düşmüş, porozite ise %68.52'ye ulaşmıştır. Bu numunelerde elde edilen en düşük ısı iletkenlik değeri 0.059 W/m·K olarak ölçülmüş, referans numuneye (E1, %15 EGA, %0 PR) göre yaklaşık %81 oranında önemli bir iyileşme sağlanmıştır. Mekanik performans açısından en yüksek basınç dayanımı 16.8 MPa ile düşük EGA ve PR içeren referans numunede (E1) elde edilirken, %75 EGA ve %1 PR içeren en hafif numunede bu değer 1.6 MPa'ya kadar düşmüştür. Ancak tüm numunelerde su emme oranı %30'un altında kalmış, bu da malzemenin donma-çözülme gibi çevresel etkiler karşısında dayanıklılığının yeterli olduğunu göstermektedir (Koçyiğit, 2024).

Şekil 3.3'te, farklı tane boyutları ve reçine oranları ile hazırlanan kompozit numunelerin deneysel özellikleri detaylı şekilde sunulmaktadır. Bu tabloda yoğunluk, porozite, ısı iletkenlik, basınç dayanımı, su emme oranı, aşınma kaybı, ultrasonik darbe hızı ve elastik modül gibi kritik fiziksel ve mekanik parametreler yer almaktadır.

EGS size (mm)	Pine resin ratio	Specimen code	Weight ratio of EGS (%)	Density (g/cm ³)	Porosity (%)	Thermal conductivity (W/mK)	Compressive strength (MPa)	Water absorption (%)	Abrasion loss (%)	Ultrasonic pulse velocity (km/s)	Modulus of elasticity
2-4	0% PR	E1	15	1.372	11.21	0.312	16.8	23.8	5	5.38	27.32
		E2	35	1.207	23.19	0.253	10.6	20.3	9	4.97	24.58
		E3	55	0.978	41.37	0.146	6.7	18.5	13	4.55	22.41
		E4	75	0.701	58.65	0.095	3.6	18.1	16	3.92	20.17
	0.5% PR	D1	15	1.303	13.76	0.264	15.2	24.6	8	5.02	26.67
		D2	35	1.137	24.48	0.201	8.3	21.5	13	4.88	23.36
		D3	55	0.885	43.91	0.121	4.8	19.6	15	4.15	21.12
		D4	75	0.668	60.23	0.087	2.5	18.7	18	3.75	19.14
	1% PR	A1	15	1.283	15.06	0.242	10.7	25.2	11	4.91	24.63
		A2	35	0.946	27.32	0.192	5.6	22.7	15	4.75	21.69
		A3	55	0.763	47.28	0.115	3.9	20.5	17	4.04	20.42
		A4	75	0.612	61.47	0.081	2.1	19.1	20	3.12	18.71
4-8	0% PR	E5	15	1.194	16.32	0.217	14.7	19.3	7	4.11	26.46
		E6	35	1.148	31.81	0.168	9.2	17.2	11	3.81	23.86
		E7	55	0.962	49.54	0.124	6.3	14.5	15	3.32	22.16
		E8	75	0.628	62.27	0.078	2.9	12.7	19	2.78	19.53
	0.5% PR	D5	15	1.152	17.95	0.204	13.3	19.7	10	3.93	25.85
		D6	35	1.118	33.53	0.154	7.9	17.9	15	3.71	23.13
		D7	55	0.846	51.24	0.113	4.1	15.1	18	3.05	20.58
		D8	75	0.591	65.13	0.065	2.2	13.8	22	2.51	18.82
	1% PR	A5	15	1.121	18.73	0.182	9.5	20.3	14	3.81	24.02
		A6	35	0.912	35.76	0.141	4.2	18.6	18	3.25	20.66
		A7	55	0.744	54.28	0.098	3.1	16.2	21	2.98	19.72
		A8	75	0.536	68.52	0.059	1.6	15.4	24	2.14	18.11

Şekil 3.3. Kompozit numunelerin deneysel özellikleri (Koçyiğit, 2024).

Seçilen malzemeler, daha kolay takip ve karşılaştırma amacıyla yeni kodlar ile isimlendirilmiştir. Malzemelerin özellikleri, Koçyiğit'in (2024) çalışmasında belirtilen ısı iletkenlik katsayısı, özgül ısı, yoğunluk ve mekanik dayanım gibi kritik parametreler temel alınarak belirlenmiş ve enerji modelleme süreçlerine entegre edilmiştir. Her ne kadar bu malzemeler doğrudan bu çalışma için üretilmemiş olsa da simülasyonlarda kullanılan veriler güncel ve geçerli laboratuvar deneyleriyle doğrulanmış verilerdir.

Kompozit yalıtım malzemelerinin detaylı termal ve ekonomik özellikleri Tablo 3.2'de sunulmaktadır. Bu veriler, malzemelerin ısı yalıtımı açısından potansiyel performanslarını değerlendirmek ve simülasyonlarda doğru girdiler sağlamak için kullanılmıştır.

Tablo 3.2. Yalıtım malzemelerinin termal ve ekonomik özellikleri

Malzeme Kodu	Yoğunluk (kg/m^3)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Özgül Isı ($J/kg \cdot K$)	Maliyet (TL/m^3)
ST 1	701	0,095	1355,21	1100
ST 2	668	0,087	1302,40	980
ST 3	612	0,081	1323,53	750
ST 4	628	0,078	1242,04	820
ST 5	591	0,065	1099,83	670
ST 6	536	0,059	1100,75	450

3.1.3. Ekonomik Parametrelerin Tanımlanması

Optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi, yalnızca yapı kabuğunun ısı performansına yönelik teknik ölçütlerle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda ekonomik açıdan uygulanabilirliğin değerlendirilmesini de gerektirmektedir. Bu kapsamda, yalıtım uygulamalarının maliyet etkinliğinin değerlendirilebilmesi için yatırım kararlarına yön veren temel ekonomik parametrelerin dikkate alınması büyük önem arz etmektedir. Söz konusu analizlerde kullanılan faiz oranı (i), enflasyon oranı (g) ve ekonomik ömür süresi (N) gibi değişkenler, yalıtım yatırımının uzun vadeli ekonomik geri dönüşünü ortaya koymakta ve enerji tasarrufu ile ilişkilendirilen finansal avantajların hesaplanmasına imkân tanımaktadır. Bu ekonomik göstergelerden elde edilen şimdiki değer faktörü, farklı yalıtım senaryolarının aynı finansal düzlemde karşılaştırılmasını sağlayarak, optimum yalıtım kalınlığının ekonomik açıdan en uygun noktada belirlenmesini mümkün kılmaktadır.

Yalıtım uygulamalarının teknik performansının yanı sıra, ekonomik uygunluğu da değerlendirme kapsamına alınmıştır. Bu doğrultuda, Mart 2025 tarihinde Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası (TCMB) tarafından belirlenen politika faiz oranı %42,5, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından açıklanan yıllık enflasyon oranı ise %38,1 olarak dikkate alınmıştır (TCMB, 2025; TÜİK, 2025). Ekonomik ömür süresi 10 yıl olarak varsayılmış ve bu parametreler doğrultusunda net bugünkü değer yöntemine dayalı olarak yıllık eşdeğer maliyet hesaplamaları için PWF katsayısı 8,45 olarak hesaplanmıştır. Bu katsayı, enerji tasarrufunun bugünkü mali değerini belirlemek ve optimum yalıtım kalınlığını ekonomik açıdan da analiz edebilmek amacıyla kullanılmıştır. Elde edilen parametrelere Tablo 3.3'te yer verilmiştir.

Tablo 3.3. Parametreler

Parametreler	Veriler
Ömür, N	10 yıl
Faiz, i	%42,5
Enflasyon, g	%38,1
PWF	8,45

3.1.4. Yakıt Özellikleri ve Enerji Verimliliği Analiz Değerleri

Bu tez kapsamında enerji kaynağı olarak doğalgaz tercih edilmiştir. Doğalgaz, yüksek enerji yoğunluğu, kullanım kolaylığı ve çevresel avantajları nedeniyle ısıtma sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir yakıttır. Sistemin enerji dönüşüm verimliliği %90 olarak kabul edilmiştir; bu değer, modern kombi ve kazan sistemlerinde elde edilen ortalama verimlilik seviyesini yansıtmaktadır. Bu verimlilik, kullanılan yakıtın enerji içeriğinin ne kadarının efektif olarak ısı enerjisine dönüştürüldüğünü ifade etmektedir.

Yakıtın alt ısı değeri (Alt Isıl Değer - AID), 34.485.000 J/kg olarak belirlenmiştir. Alt ısı değeri, bir yakıtın yanması sonucu açığa çıkan enerji miktarını gösterir ve enerji tüketim hesaplamalarında kritik bir parametredir. Ayrıca, doğalgazın birim fiyatı 5,928 TL/m³ olarak alınmıştır. Bu fiyat, bölgesel piyasa koşullarına ve güncel ekonomik verilere dayanmakta olup, enerji maliyetlerinin hesaplanmasında temel girdi olarak kullanılmaktadır.

Tablo 3.4'te sunulan bu yakıt özellikleri hem enerji tüketim analizlerinde hem de ömür boyu maliyet değerlendirmelerinde önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle, yalıtım kalınlığının artırılmasıyla birlikte doğalgaz tüketiminde sağlanan azalma, enerji giderlerinde belirgin bir tasarruf potansiyeli yaratmaktadır. Bu sayede, yalıtım yatırımlarının geri dönüş süreleri ve ekonomik etkinliği hesaplanabilmektedir.

Enerji verimliliği analizleri kapsamında, yalıtım kalınlığının değişimine bağlı olarak sistemin yıllık ısıtma ihtiyacı ve maliyetleri modellenmiş; böylelikle optimum yalıtım seviyeleri ve ekonomik fayda dengesi ortaya konmuştur. Bu yaklaşım, sürdürülebilir enerji kullanımının teşvik edilmesi ve ekonomik kaynakların etkin yönetilmesi açısından önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, doğalgazın alt ısı değeri, enerji dönüşüm verimliliği ve birim fiyatı gibi parametrelerin doğru belirlenmesi, enerji tüketimi ve maliyet analizlerinin doğruluğunu artırmakta ve enerji verimliliği stratejilerinin güvenilirliğini sağlamaktadır.

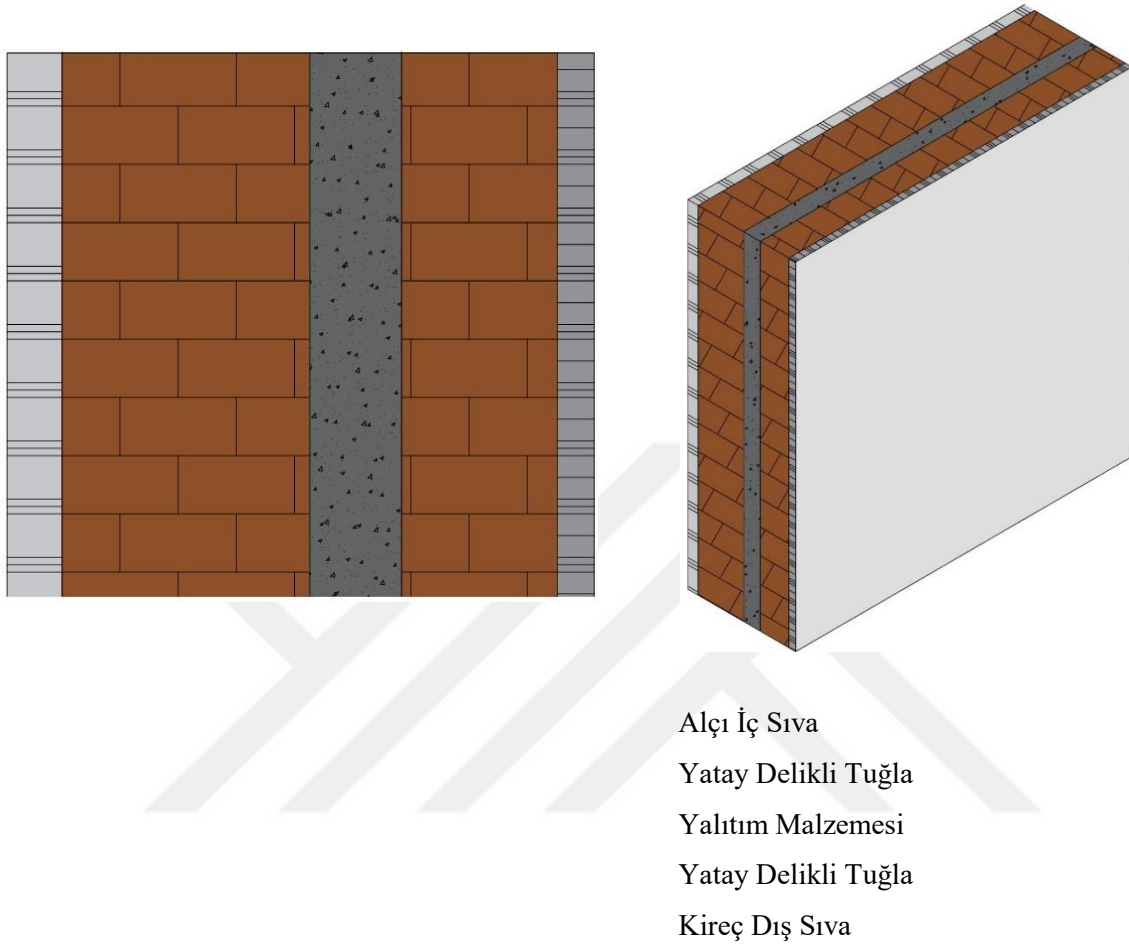
Tablo. 3.4. Yakıt özellikleri

Yakıt	Maliyet (C_{fuel}) (TL/m ³)	Alt Isıl Değer (H_u) (J/kg)	Verim (η)
Doğalgaz	5,928	34.485.000	0.90

3.1.5. Duvar Katmanları ve Yapı Bileşenlerinin Tanımlanması

Enerji verimliliği analizlerinde kullanılan dış duvar kesitinin katman yapısı, ısı kayıplarının doğru hesaplanması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, çalışmada temel referans olarak alınan dış duvar kesiti, iç ortamdan dış ortama doğru yedi ana bileşenden oluşmaktadır. Şekil 3.4'te bu yapı bileşenlerinin detaylı kesit modeli sunulmuştur. Söz konusu katmanlar; iç yüzey taşınım direnci,

alçı sıva katmanı, birinci yatay delikli tuğla katmanı, yalıtım malzemesi katmanı, ikinci yatay delikli tuğla katmanı, kireç sıva ve dış yüzey taşınım direncidir.



Şekil 3.4. Duvar katmanları

Şekilde, her katmanın kalınlığı, malzeme tipi ve katmanlar arası sınırlar açıkça belirtilmiş olup, katmanların yapısal düzeni ve termal özelliklerinin anlaşılmasına olanak sağlamaktadır. İç ve dış yüzey taşınım dirençleri, yüzeyler arası ısı transferinin modellenmesinde dikkate alınan önemli parametrelerdir. Alçı ve kireç sıva katmanları hem yapısal sağlamlık hem de iç ve dış ortam sıcaklıkları arasında ısı akışının düzenlenmesinde rol oynar. Yatay delikli tuğla katmanları, yapının taşıyıcı elemanı olmasının yanı sıra, orta düzeyde ısı yalıtımı sağlayan bir katman olarak işlev görür. Yalıtım malzemesi ise toplam duvar ısı direncine önemli katkı sağlayarak, ısı kayıplarını minimize etmeye yardımcı olur.

Bu çalışmada özellikle iki yatay delikli tuğla katmanı arasına yerleştirilen kompozit yalıtım malzemeleri (ST1–ST6) dikkate alınmıştır. Bu malzemeler, genleştirilmiş cam agregası ve çam reçinesi esaslı olup, çevre dostu yapıları ve düşük ısı iletkenlik değerleri ile dikkat çekmektedir. Bu yalıtım katmanı sayesinde ısı kayıplarının azaltılması ve yapı kabuğunun enerji verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir.

Tablo 3.5’te, bu dış duvar kesitine ait her bir katmanın kalınlığı ve ısıya karşı gösterdiği direnç değerleri ayrıntılı şekilde sunulmaktadır. Katman kalınlıkları, kullanılan malzemelerin standart uygulama kalınlıklarına uygun olarak belirlenmiştir. Isı geçiş direnci (R değeri), malzeme kalınlığı ve ısıl iletkenlik katsayısına bağlı olarak hesaplanmakta ve toplam duvar direnci bu katmanların dirençlerinin toplamı şeklinde ifade edilmektedir. Yüksek toplam direnç, duvarın ısıtma enerjisi kaybını azaltmakta ve enerji verimliliğini artırmaktadır.

Tablo 3.5. Duvar katmanları

Duvar Katmanları	d (m)	k (W/mK)	R ($m^2 \cdot K/W$)
$R_{iç}$	-	-	0,1300
Alçı Sıva	0,02	0,51	0,0392
Yatay Delikli Tuğla	0,085	0,33	0,2576
Yatay Delikli Tuğla	0,135	0,33	0,4091
Kireç Sıva	0,03	1,00	0,0300
$R_{dış}$	-	-	0,0400
R_{toplam}	-	-	0,9059

Tablodaki direnç değerleri, duvarın her katmanında ısı akışına karşı sağlanan engeli nicel olarak göstermektedir. Özellikle yalıtım malzemesinin yüksek ısı direnci, duvarın enerji performansını doğrudan etkileyen kritik bir parametre olarak öne çıkar. Sıva katmanlarının ise ısı iletimi üzerindeki sınırlı etkisi olsa da yapı stabilitesi ve iç ortam konforu açısından katkıları önemlidir.

Bu yapı bileşeni tanımlaması, farklı iklim koşullarına göre optimum yalıtım kalınlıklarının belirlenmesi için sağlam bir temel oluşturmakta ve enerji performansı analizlerinin doğruluğunu artırmaktadır. Ayrıca, duvar kesitinin bu şekilde detaylandırılması, simülasyonlarda kullanılan bina modeli ile gerçek yapı performansı arasında tutarlılık sağlamaktadır. Bu sayede, enerji tüketimi ve tasarruf potansiyelleri daha gerçekçi ve güvenilir sonuçlarla ortaya konabilmektedir.

3.1.6. Bina Modelinin Oluşturulması ve Simülasyon Ortamına Aktarımı

Bu tez kapsamında yapılan enerji performansı analizlerinin doğruluğu ve güvenilirliği açısından kullanılan bina modeli, özellikle karşılaştırmalı çalışmaların sağlıklı yürütülebilmesi için standartlaştırılmıştır. Bu nedenle model, tek katlı, 100 m² net kullanım alanına sahip, toplamda yaklaşık 300 m³ brüt hacmi olan, basit geometrik yapıya sahip dikdörtgen planlı bir yapı olarak tanımlanmıştır. Bu modelleme yaklaşımı, karmaşık bina geometrilerinden kaynaklanabilecek hesaplama belirsizliklerini azaltarak, malzeme ve yalıtım performansının daha net ve izole biçimde incelenebilmesini sağlamaktadır.

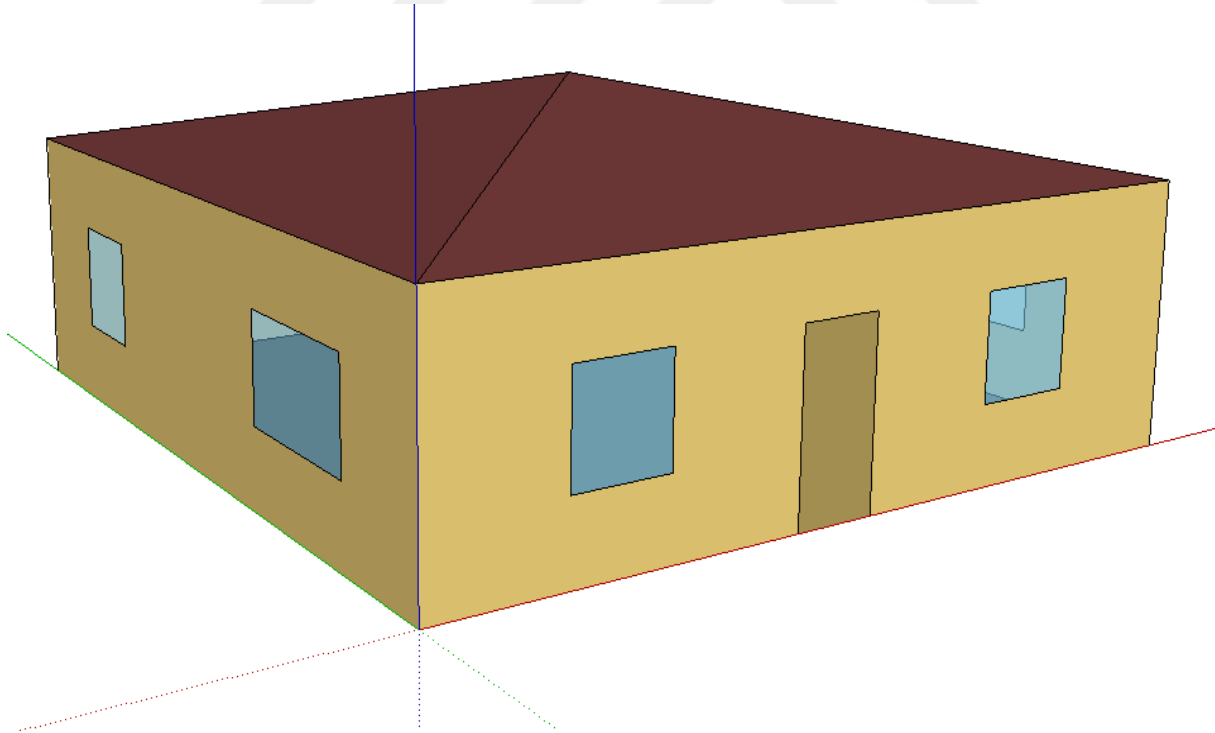
Modelleme sürecinde, yapı kabuğunu oluşturan dış yüzey alanlarının ve katmanlarının gerçekçi bir şekilde temsil edilmesi önceliklendirilmiştir. Bu amaçla, üç boyutlu bina tasarımı, kullanıcı dostu ve esnek modelleme olanağı sunan SketchUp programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SketchUp’ın sunduğu kolay çizim araçları sayesinde bina cepheleri, pencere ve kapı açıklıkları, çatılar ve zeminler

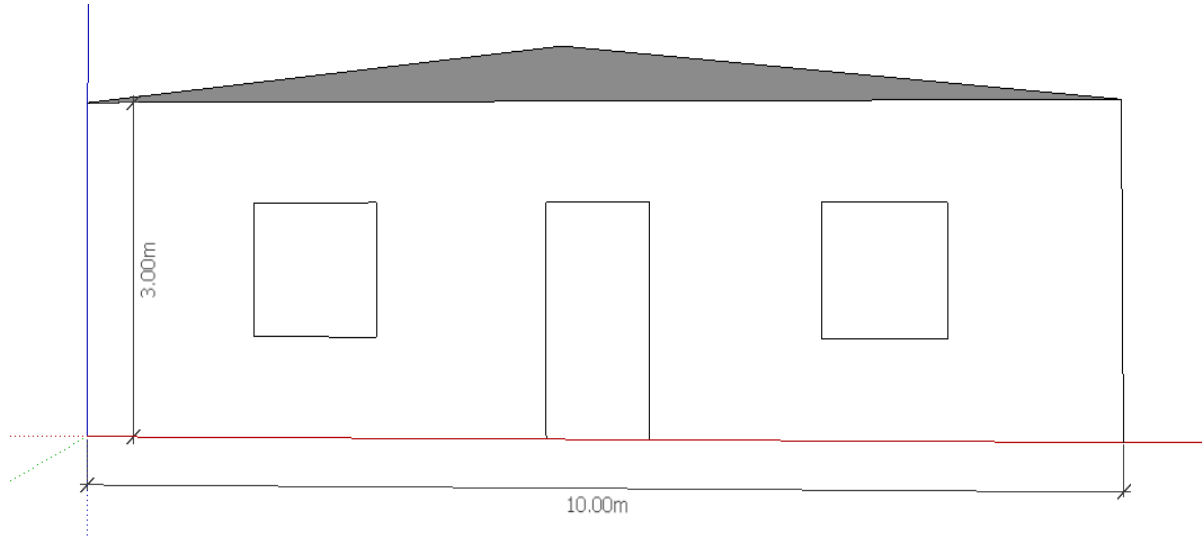
detaylı şekilde modellenmiş; böylece gerçek bir yapıyı simüle etmeye uygun kapsamlı bir geometri oluşturulmuştur.

Oluşturulan SketchUp modeli, enerji simülasyonları için kullanılan EnergyPlus programı ile uyumlu hale getirilmiştir. Bu entegrasyon sürecinde OpenStudio eklentisi aktif olarak kullanılmıştır. OpenStudio, SketchUp ortamında çizilen bina geometrisini EnergyPlus simülasyon formatına dönüştürme, bina özelliklerini düzenleme, malzeme katmanlarını ve iç yüklemeleri tanımlama gibi kritik görevleri üstlenmektedir. Bu sayede model, enerji simülasyonlarına tam hazır hale gelmiş, bina fiziki özellikleri ve çevresel parametreleri doğru şekilde aktarılmıştır.

Her bir çalışma bölgesi için hazırlanan bu model, iklim verilerine uygun olarak parametrelerle beslenmiş ve simülasyon ortamında farklı yalıtım kalınlıkları, malzeme özellikleri ve enerji talebi analizlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı, yalıtım kalınlığı ile yatırım ve işletme maliyetleri ile kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir. Bu analizler, bina performansının farklı iklim koşulları ve malzeme kombinasyonları altında nasıl değiştiğini ortaya koymaktadır.

SketchUp ile hazırlanmış ve OpenStudio eklentisi ile EnergyPlus'a aktarılmış bina modeli, Şekil 3.5'te detaylı olarak sunulmuştur. Modelde, binanın tüm cepheleri, çatı yapısı ve iç bölümleri net bir şekilde görünmekte, simülasyon parametrelerinin doğruluğu açısından gerekli tüm detayları içermektedir.





Şekil 3.5. SketchUp bina modeli

3.2. Kullanılan Yöntemler ve Simülasyon Yaklaşımları

Bu çalışmada, yapıların yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacının hesaplanmasında hem termodinamik prensiplere dayanan teorik yöntemler hem de gelişmiş bina enerji simülasyon yazılımları bir arada kullanılmıştır. Böylece, farklı yöntemlerin avantajları değerlendirilerek hem teknik hem de ekonomik açıdan optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesine olanak sağlayacak kapsamlı ve güvenilir bir analiz gerçekleştirilmiştir.

Uygulanan yöntemler, enerji tüketimini etkileyen fiziksel parametreleri doğru şekilde modelleyerek, ısı kayıplarını minimize edecek yalıtım kalınlıklarını belirlemek üzere yapılandırılmıştır. Teorik yaklaşım olarak, derece – gün yöntemi kullanılmış; bu yöntem, dış ortam sıcaklığı ile bina içi konfor sıcaklığı arasındaki farkların belirli bir zaman diliminde toplanması esasına dayanır ve bina ısıtma yükünün yaklaşık tahmininde pratik bir araç sunar.

Bunun yanı sıra, daha detaylı ve dinamik analizler için EnergyPlus enerji simülasyon yazılımı tercih edilmiştir. EnergyPlus, iklim verileri, bina geometrisi, yapı malzemeleri ve sistem özelliklerini bir arada değerlendiren, zaman çözünürlüğü yüksek, karmaşık fiziksel süreçleri simüle eden güçlü bir programdır. Bu yazılım, saatlik bazda ısı transferi, iç ısı kazancı, havalandırma, güneş etkisi gibi parametreleri hesaba katarak gerçekçi sonuçlar üretir.

Çalışmada, derece - gün yöntemi ile elde edilen optimum yalıtım kalınlıkları ve yıllık ısıtma ihtiyacı değerleri, EnergyPlus tarafından yapılan dinamik simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu sayede, statik ve dinamik yöntemlerin avantajları, kısıtları ve sonuç farklılıkları ortaya konulmuştur. Sonuç olarak, bu iki farklı yöntemle yapılan analizler hem kısa vadeli yatırım maliyetleri hem de uzun vadeli enerji tasarruflarını göz önünde bulundurarak, yapıların enerji verimliliğini artırmaya yönelik optimum yalıtım çözümlerinin belirlenmesini sağlamaktadır.

3.2.1. Derece – Gün Yöntemi ile Isı Yalıtımı Performansının Analizi

Bu bölümde, derece – gün yöntemi temelinde enerji kaybı, maliyet analizi ve optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesine ilişkin hesaplama yaklaşımları detaylı şekilde açıklanmaktadır. Çalışmanın metodolojik çerçevesi içerisinde, hem ısı transferi prensiplerine dayanan fiziksel parametreler hem de ekonomik performans kriterlerini içeren ömür maliyeti analizleri ele alınmıştır.

Derece – gün yöntemi, dış ortam sıcaklığının konfor sıcaklığının altında kaldığı süre ve bu farkların toplamını ifade eden bir iklim parametresidir. Bu yöntem, basit ve pratik yapısıyla binaların ısıtma enerji ihtiyacının yaklaşık olarak hesaplanmasında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Hesaplamalarda, yalıtım kalınlığının artırılmasıyla birlikte sağlanan ısı kaybı azalması ve buna bağlı yakıt tüketimindeki düşüş dikkate alınmaktadır.

Ekonomik analiz kısmında ise, yalıtım malzemesinin birim hacim maliyeti, yalıtım kalınlığı ve alanı üzerinden hesaplanan yatırım maliyeti ile sağlanan enerji tasarrufunun ekonomik değeri karşılaştırılarak, en uygun yalıtım kalınlığı belirlenmektedir. Bu kapsamda, enerji maliyeti, sistem verimi ve yakıtın alt ısı değeri gibi parametreler de hesaplamalara dahil edilmiştir.

Aşağıda, derece - gün yöntemi ile yalıtım performansının analizinde kullanılan temel formüller sunulmaktadır. Bu formüller, ısı kaybı, yatırım maliyeti ve enerji tasarrufu gibi parametrelerin hesaplanmasında yol gösterici olarak kullanılmaktadır.

Isıtma sezonu boyunca dış duvar yüzeyinden kaynaklanan yıllık ısı kaybı, iç-dış ortam sıcaklık farkı ve yapı elemanının ısı geçirme kapasitesine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Bu doğrultuda, birim yüzeyden gerçekleşen yıllık ısı kaybı (1) nolu denklem ile tanımlanır.

$$q_{yıl} = 86400 \cdot HDD \cdot U \quad (3.1)$$

Burada $q_{yıl}$, birim yüzeyden yıllık toplam ısı kaybını (J/m^2), HDD yıllık ısıtma derece - gün değerini ($^{\circ}C \cdot gün$), U ise toplam ısı geçiş katsayısını (W/m^2K) ifade etmektedir. 86400 sabiti, günlük saniye sayısını temsil etmekte ve zamana bağlı enerji geçişini yıllık ölçeğe uyarlamak amacıyla kullanılmaktadır.

Yalıtımsız duvarın toplam ısı direnci, yapı bileşenlerinin iç ve dış yüzey taşınım dirençleri ile duvar gövdesinin ısı direncinin toplamından oluşur. Burada; R_i iç yüzey taşınım direnci, R_{duvar} duvar gövdesine ait iletim direnci ve R_o dış yüzey taşınım direncidir, (2) nolu denklemde verilmiştir.

$$R_{d,t} = R_i + R_{duvar} + R_o \quad (3.2)$$

Yalıtım malzemesine ait ısı taşınım direnci (3) nolu denklem ile hesaplanmaktadır. x yalıtım kalınlığını (m), k ise yalıtım malzemesinin ısı iletkenlik katsayısını ($W/m \cdot K$) ifade etmektedir.

$$R_{ins} = \frac{x}{k} \quad (3.3)$$

U değeri, yalıtımın varlığına göre iki farklı biçimde tanımlanır: (4) nolu denklem yalıtımsız duvarın, (5) nolu denklem ise yalıtımlı duvarın toplam ısı geçiş katsayısını göstermektedir.

$$U = \frac{1}{R_i + R_{duvar} + R_o}$$

$$U = \frac{1}{R_{d,t} + R_{ins}} \quad (3.4)$$

Yıllık enerji ihtiyacı, yapıdan ısı kaybının karşılanabilmesi için gerekli enerji miktarını temsil eder. Isıtma sisteminin verimliliği göz önünde bulundurularak yalıtımsız duvar için (6) nolu, yalıtımlı duvar için (7) nolu denklem kullanılır. η ısıtma sisteminin verim katsayısını göstermektedir. Bu parametre, gerçek enerji tüketiminin belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır.

$$E_{yıl} = \frac{86400 \cdot HDD}{R_{d,t} \cdot \eta} \quad (3.5)$$

$$E_{yıl} = \frac{86400 \cdot HDD}{(R_{d,t} + R_{ins}) \cdot \eta} \quad (3.6)$$

Enerji ihtiyacına bağlı olarak yıllık yakıt maliyeti hesaplanabilir. Yakıtın alt ısı değeri ve birim fiyatı dikkate alınarak, birim yüzey için yıllık enerji maliyeti (8) nolu denklemle hesaplanmaktadır.

Burada $c_{yakıt}$, yakıtın birim maliyeti (TL/kWh), Hu ise kullanılan yakıtın alt ısı değeridir (kWh/m³ veya J/m³).

$$C_{yıl} = \frac{86400 \cdot U \cdot HDD \cdot c_{yakıt}}{Hu \cdot \eta} \quad (3.7)$$

Ekonomik ömür süresince yapılacak yatırımın maliyet analizinde net bugünkü değer yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde, gerçek faiz oranı ile şimdiki değer faktörü (PWF) hesaplanır. Gerçek faiz oranı aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$i > g$ ise

$$r = \frac{i - g}{1 + i} \quad (3.8)$$

$g > i$ ise

$$r = \frac{g - i}{1 + g} \quad (3.9)$$

Buradan elde edilen gerçek oran ile toplam ömür boyunca maliyetin bugünkü değer karşılığı (11) nolu formülle hesaplanmaktadır: Burada, N sistemin öngörülen ekonomik ömrüdür (yıl).

$$PWF = \frac{(1+r)^N - 1}{r \cdot (1+r)^N} \quad (3.10)$$

Yalıtım yapılmadığı durumda yıllık toplam ısıtma maliyeti (12) nolu denklemle, yalıtım malzemesi maliyeti ise (13) nolu denklemle hesaplanmaktadır. Yalıtım uygulandığında oluşan toplam maliyet ise hem yıllık enerji maliyeti hem de yalıtım yatırım bedelinin toplamı (14) olarak hesaplanır.

$$c_{toplam} = \frac{86400 \cdot HDD \cdot c_{yakıt} \cdot PWF}{(R_{d,t}) \cdot Hu \cdot \eta} \quad (3.11)$$

$$c_{ins} = c_{ins,m} \cdot x \quad (3.12)$$

$$c_{ins,toplam} = \frac{86400 \cdot HDD \cdot c_{yakıt} \cdot PWF}{(R_{d,t} + R_{ins}) \cdot Hu \cdot \eta} + c_{ins,m} \cdot x \quad (3.13)$$

Optimum yalıtım kalınlığı, toplam yıllık maliyetin minimum olduğu kalınlığı ifade eder. Bu değer, (15) nolu denklem ile hesaplanmaktadır.

$$x_{opt} = 293,94 \sqrt{\frac{HDD \cdot c_{yakıt} \cdot PWF \cdot k}{Hu \cdot c_{ins,m} \cdot \eta} - k \cdot R_{d,t}} \quad (3.14)$$

Yalıtımın uygulanmasıyla elde edilen yıllık net tasarruf miktarı (16) nolu denklemle hesaplanmaktadır.

$$A_{yıl} = c_{toplam} - c_{ins,toplam} \quad (3.15)$$

Bu yatırımın geri ödeme süresi, yatırım maliyetinin yıllık tasarruf miktarına bölünmesiyle hesaplanmaktadır (17). Burada $C_{yıl}^1$ yalıtımsız durumun yıllık maliyeti, $C_{yıl}^2$ ise yalıtımlı durumun yıllık maliyetidir.

$$C_{yıl}^1 \rightarrow \text{Yalıtımsız}$$

$$C_{yıl}^2 \rightarrow \text{Yalıtımlı}$$

$$pp = \frac{C_{ins}}{C_{yıl}^1 - C_{yıl}^2} \quad (3.16)$$

Bu çalışma kapsamında kullanılan derece - gün yöntemi, dış ortam sıcaklıklarına dayalı olarak yıllık ısıtma gereksinimini belirlemede etkili ve pratik bir hesaplama yaklaşımı sunmaktadır. Özellikle

farklı iklim bölgelerine göre hesaplanan HDD değerleri, yapıların enerji ihtiyacının iklimsel bağlamda karşılaştırılmasını mümkün kılmakta ve yalıtım stratejilerinin bölgesel gereksinimlere göre optimize edilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece, sadece teorik olarak değil, aynı zamanda iklime dayalı tasarım ilkesine uygun olarak enerji verimliliği hedeflenmektedir.

Gerçekleştirilen tüm bu hesaplamalar, bir yapının ısıtma enerjisi tüketimini azaltmak için yalıtım kalınlığının ne ölçüde etkili olduğunu ortaya koymakta ve optimum kalınlığın belirlenmesiyle ekonomik açıdan da en verimli çözümün elde edilmesini sağlamaktadır. Bu bağlamda, yapı kabuğunun termal performansının sistematik olarak değerlendirilmesi hem enerji tasarrufu hem de uzun vadeli maliyet avantajı açısından sürdürülebilir bina tasarımının temel bir bileşeni olarak değerlendirilmektedir.

3.2.3. EnergyPlus Programı ile Dinamik Bina Enerji Simülasyonu ve Model Entegrasyonu

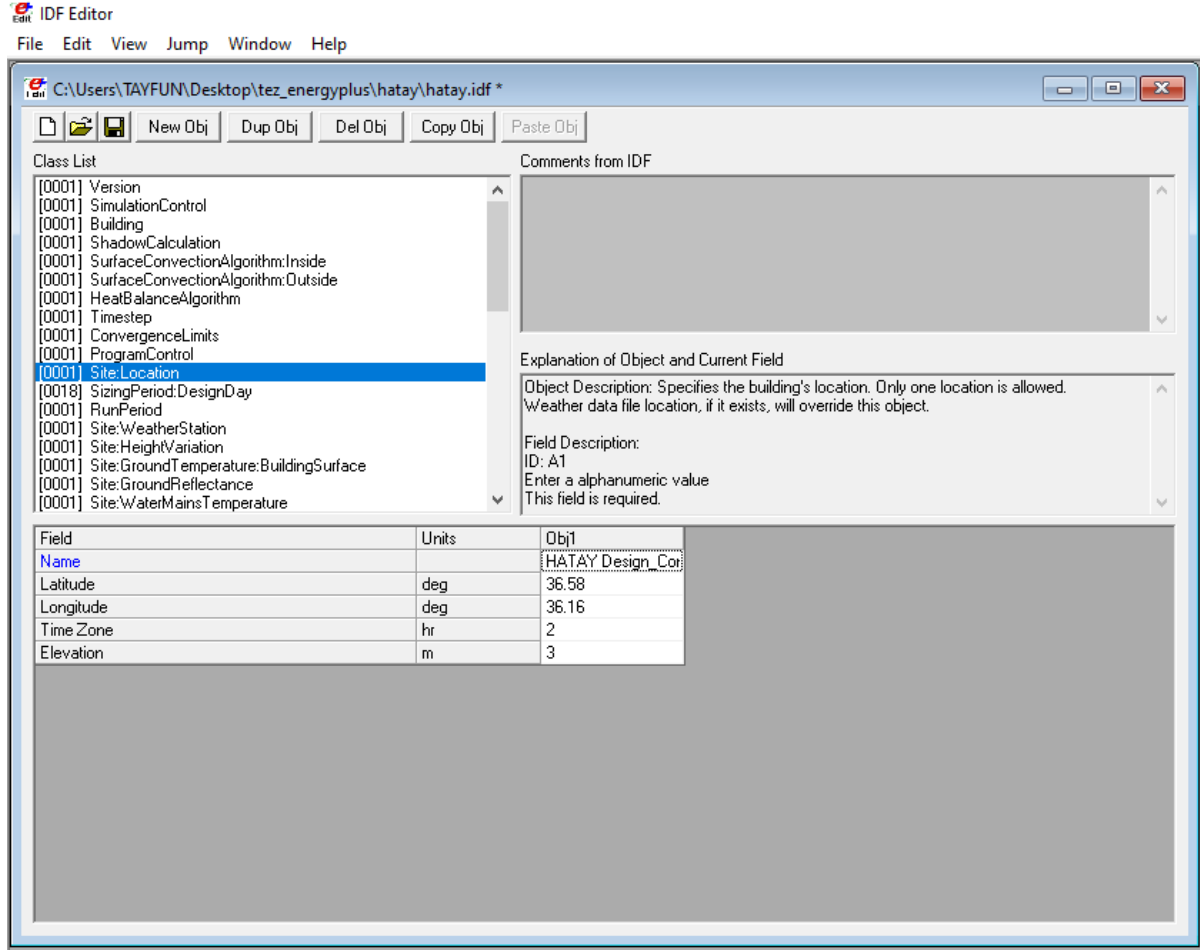
Bu çalışmada, yapıların enerji performansını gerçek yaşam koşullarına daha yakın ve detaylı şekilde değerlendirebilmek amacıyla, dinamik bina enerji simülasyonu yapabilen EnergyPlus programı kullanılmıştır. EnergyPlus, ABD Enerji Bakanlığı (U.S. Department of Energy) tarafından geliştirilmiş, açık kaynak kodlu ve çok bileşenli bir enerji modelleme yazılımıdır. Yazılım, saatlik iklim verileri ve yapı bileşenlerine ait ayrıntılı özellikler ışığında, binanın ısıtma, soğutma, aydınlatma, havalandırma ve iç konfor koşullarını kapsamlı şekilde analiz edebilme kapasitesine sahiptir (DOE, 2023).

EnergyPlus programının en önemli avantajlarından biri, zamana bağlı değişkenleri gerçekçi biçimde modelleyebilmesidir. Bu özelliği sayesinde, klasik derece - gün veya aylık ortalama temelli analiz yöntemlerinden farklılaşarak, binanın gerçek iklim ve kullanım koşulları altında saatlik bazda davranışını ortaya koyar. Program, termal konfor analizleri, pasif tasarım stratejilerinin değerlendirilmesi, doğal havalandırma potansiyelinin incelenmesi, enerji tüketimi hesapları ve HVAC (Isıtma, Havalandırma, İklimlendirme) sistemlerinin performans analizleri gibi çok çeşitli parametreleri entegre bir biçimde simüle eder.

Bununla birlikte, EnergyPlus yalnızca toplam enerji tüketimini hesaplamakla kalmaz; enerjinin bina içerisinde nasıl dağıldığı, hangi yüzeyler ve bileşenler tarafından ne ölçüde emildiği veya kaybedildiği gibi fiziksel süreçlerin detaylı temsillerini sunar. Bu, mühendislerin ve araştırmacıların bina tasarımında daha bilinçli kararlar almasına olanak verir.

Model entegrasyonu açısından, üç boyutlu bina geometrisi SketchUp programında tasarlanmış ve OpenStudio eklentisi aracılığıyla EnergyPlus formatına dönüştürülmüştür. Bu entegrasyon, bina katmanlarının, malzeme özelliklerinin ve iç ortam koşullarının simülasyona doğru ve eksiksiz aktarılmasını sağlamıştır. Ayrıca, Meteonorm programı ile elde edilen saatlik iklim verileri, simülasyonlara entegre edilerek farklı iklim bölgelerinde yapı performansının karşılaştırmalı analizi yapılmıştır.

Sonuç olarak, EnergyPlus kullanımı, bu çalışmaya dinamik ve kapsamlı bir bakış açısı kazandırmış; yalıtım kalınlığı ve malzeme seçimlerinin bina enerji tüketimine olan etkilerinin ayrıntılı ve güvenilir şekilde değerlendirilmesini mümkün kılmıştır.



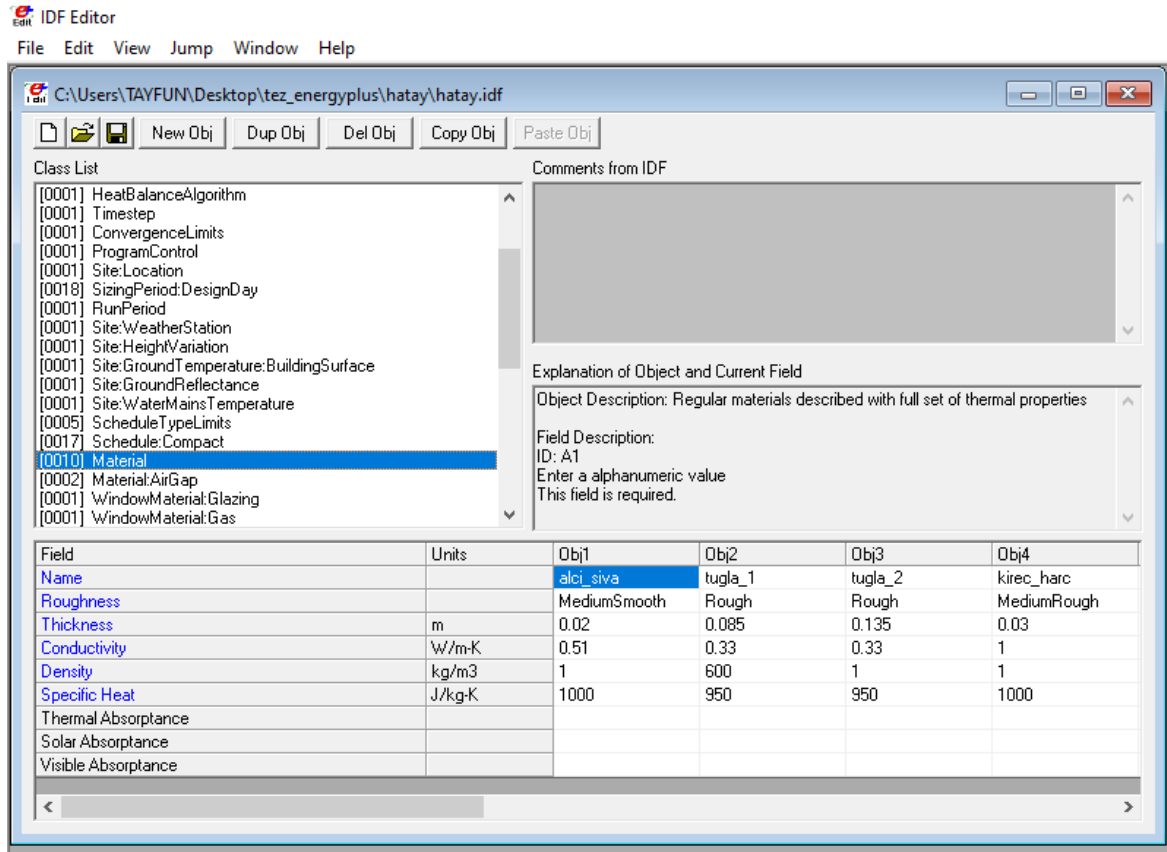
Şekil 3.6. EnergyPlus IDF editor arayüzünde Hatay ili için tanımlanan konum bilgileri

Şekil 3.6’da bina modeline ait coğrafi konum bilgileri tanımlanmıştır. Hatay ili için girilen veriler; enlem (Latitude) 36.58°, boylam (Longitude) 36.16°, saat dilimi (Time Zone) +2 ve deniz seviyesinden yükseklik (Elevation) 3 m’dir. Bu parametreler, EnergyPlus programında kullanılacak iklim verisinin doğru bir şekilde tanımlanması açısından büyük önem taşımaktadır.

EnergyPlus ortamında simülasyonların güvenilirliğini sağlamak amacıyla, her şehir için “Site:Location” başlığı altında coğrafi konum bilgileri tanımlanmıştır. Edirne için bu değerler; enlem 41.67°, boylam 26.57°, saat dilimi +2 ve rakım 48 m olarak girilmiştir. Bingöl ili için ise 38.86° enlem, 40.50° boylam, saat dilimi +3 ve yükseklik 1177 m olarak belirlenmiştir. Türkiye’nin en yüksek rakımlı illerinden biri olan Kars için tanımlanan değerler; 40.60° enlem, 43.08° boylam, saat dilimi +4 ve 1775 m yükseklik şeklindedir. Bu bilgiler, her bir ilin özgün iklim verilerinin bina enerji simülasyonlarına doğru biçimde yansıtılmasını sağlamakta ve analiz sonuçlarının doğruluğunu doğrudan etkilemektedir.

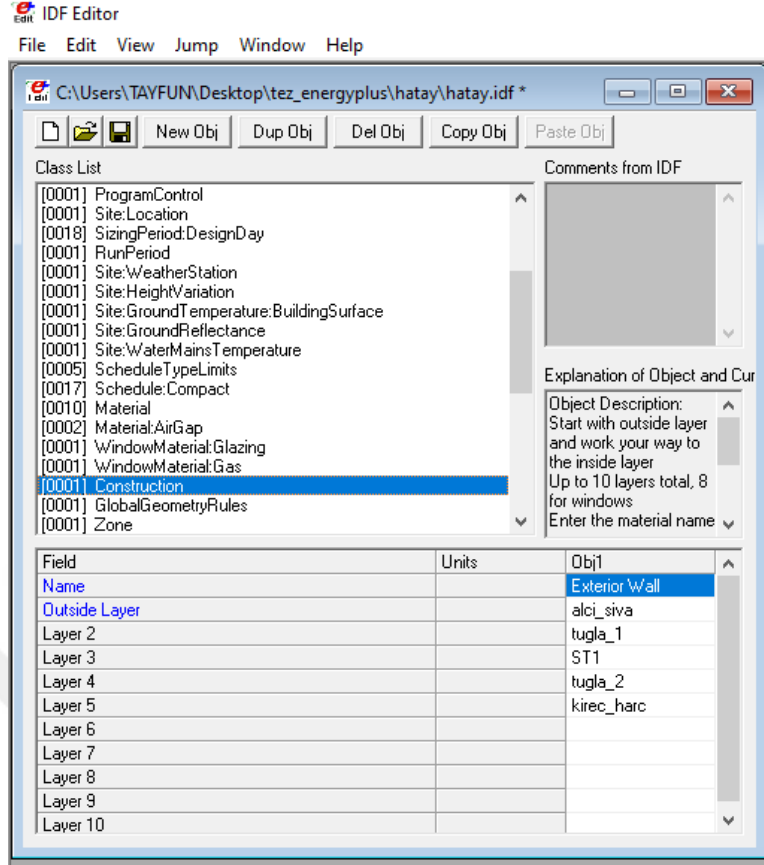
Bu çalışmada, bina enerji performansının detaylı analizi için kullanılan model, EnergyPlus programı için özel olarak hazırlanmış IDF (Input Data File) formatında malzeme ve katman tanımlamalarını içermektedir. Modelin doğruluğu ve güvenilirliği, kullanılan malzeme özelliklerinin fiziksel ve termal parametreleriyle doğrudan ilişkilidir.

EnergyPlus yazılımında, malzemelerin tanımlanması “Material” sekmesi altında gerçekleştirilir. Burada her malzeme için kalınlık (m), ısı iletkenlik ($W/m \cdot K$), yoğunluk (kg/m^3), özgül ısı kapasitesi ($J/kg \cdot K$) ve yüzey pürüzlülüğü gibi özellikler detaylı biçimde girilir. Bu parametreler, malzemenin ısı transferindeki davranışını belirler ve simülasyon sonuçlarının gerçekçiliğini artırır. Örneğin, dış duvarda kullanılan “tuğla_1” malzemesi 0.085 m kalınlıkta, 0.33 $W/m \cdot K$ ısı iletkenlik ve 600 kg/m^3 yoğunluğa sahiptir. Daha kalın olan “tuğla_2” ise 0.135 m kalınlıkta olup, diğer özellikler benzerdir. Bu malzeme özelliklerinin detaylı tanımları Şekil 3.7’de görülmektedir.



Şekil 3.7. Material sekmesinde malzeme tanımlamaları

“Construction” sekmesi, binanın yapı elemanlarının çok katmanlı yapısını tanımlar. Her yapı elemanı, dıştan içe doğru sıralanan malzeme katmanlarından oluşur. Örneğin, dış duvar “Construction” girdisinde alçı sıva, birinci tuğla katmanı, yalıtım malzemesi (örneğin ST1), ikinci tuğla katmanı ve kireç sıva katmanları belirtilmiştir. Bu tanımlamalar, EnergyPlus’ın her yapı bileşeninin toplam ısı geçirgenlik katsayısını (U-değeri) otomatik olarak hesaplamasına imkân verir. Bu katmanların detaylı yapısı Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Construction sekmesinde duvar katmanları

Malzeme ve katman tanımlamalarının hassaslığı, EnergyPlus'ın dinamik simülasyonlarının güvenilirliğini doğrudan etkiler. Özellikle farklı iklim bölgelerinde ve yalıtım senaryolarında yapılacak analizlerde, malzeme kalınlığı ve termal özelliklerin doğru girilmesi, bina enerji performansının gerçekçi tahmin edilmesi için kritik öneme sahiptir.

Bu çalışma kapsamında, SketchUp ile oluşturulan 3D bina modeli OpenStudio eklentisi kullanılarak EnergyPlus'a aktarılmış ve malzeme-katman tanımlamaları IDF dosyasında titizlikle düzenlenmiştir. Bu entegrasyon, simülasyonlarda doğru yapı kabuğu temsilini sağlayarak, ısıtma enerjisi ihtiyacının detaylı ve güvenilir analizine olanak tanımıştır.

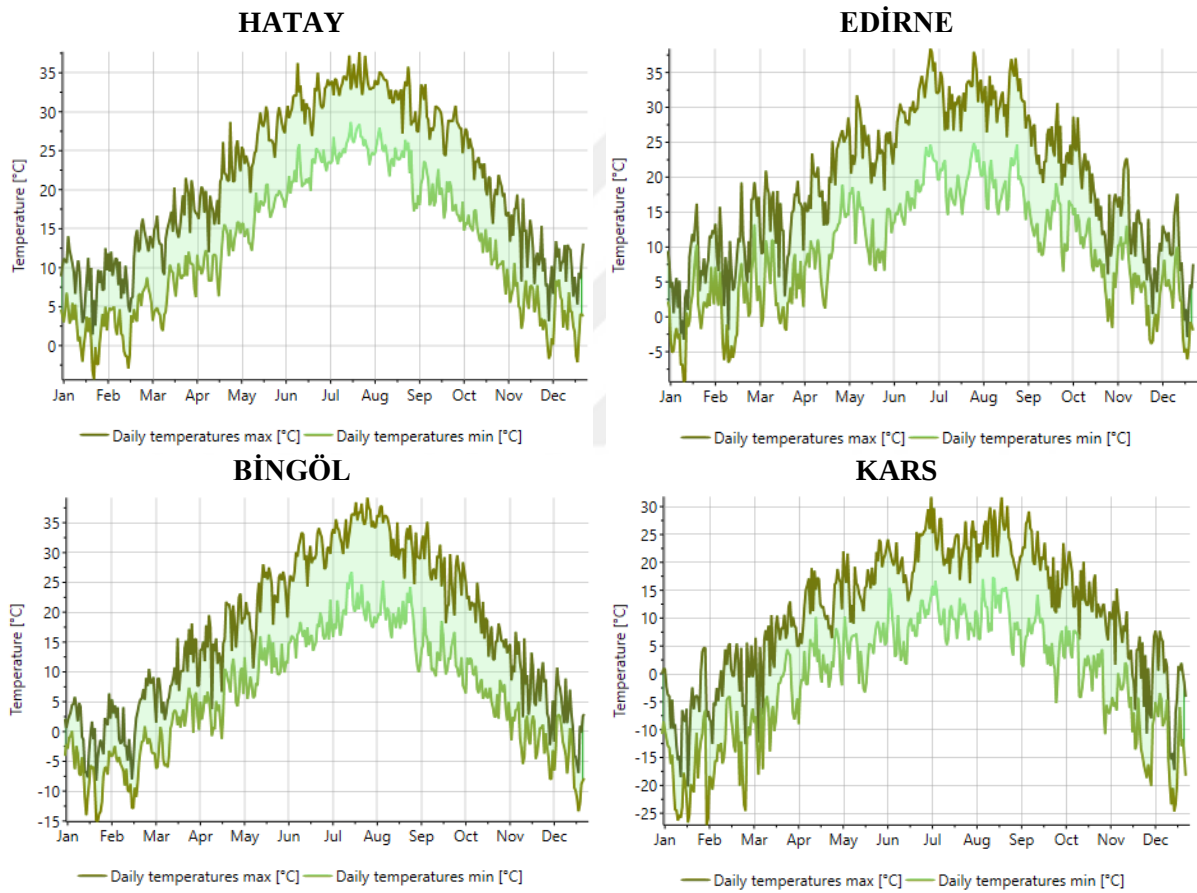
Sonuç olarak, EnergyPlus ortamında gerçekleştirilen bu ayrıntılı malzeme ve katman tanımlamaları, binanın termal davranışının ve enerji tüketiminin gerçekçi bir şekilde modellenmesini mümkün kılmış, yalıtım performansı ve enerji tasarrufu potansiyelinin doğru şekilde değerlendirilmesini sağlamıştır.

SketchUp modeli, OpenStudio arayüzü aracılığıyla EnergyPlus'a entegre edilmiş ve her bir yapı bileşeni için termal zonlar tanımlanmıştır. OpenStudio eklentisi, SketchUp modeline enerji analizine dair işlevsellik kazandırarak; yüzey tipi ataması, zon tanımlaması, iç kazanç değerleri (insan, ekipman, aydınlatma), havalandırma oranları, HVAC sistem konfigürasyonları ve zamanlama profilleri gibi

detayların model üzerine uygulanmasını mümkün kılmaktadır. Böylece bina, yalnızca geometrik olarak değil, aynı zamanda termal ve operasyonel olarak da tanımlanmıştır.

Simülasyonlarda kullanılan iklim verileri, Meteororm 7.3 yazılımı aracılığıyla temin edilmiş ve EPW (EnergyPlus Weather) formatında programa entegre edilmiştir. Her bir il (Hatay, Edirne, Bingöl, Kars) için ayrı ayrı iklim dosyaları oluşturulmuş ve analizler bu şehirlerin temsil ettiği dört farklı iklim bölgesi doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Simülasyon süresi bir takvim yılı olarak tanımlanmış, böylece tüm mevsimsel değişkenlikler sonuçlara yansıtılmıştır. Bu doğrultuda model, toplamda 8760 saatlik veri ile çalıştırılmış ve tüm yıl boyunca saatlik ısıtma enerjisi ihtiyacı hesaplanmıştır.

Bu illere ait yıllık dış ortam sıcaklıklarının değişimi, Meteororm'dan elde edilen grafiklerle desteklenmiştir. Bu grafiklere Şekil 3.9.'da yer verilmiştir.



Şekil 3.9. Hatay, Edirne, Bingöl ve Kars illerine ait yıllık maksimum ve minimum sıcaklık değerlerinin değişimi

EnergyPlus ile gerçekleştirilen analizlerde, farklı yalıtım kalınlıklarına sahip kompozit yapı elemanları modele entegre edilerek yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı değerleri hesaplanmıştır. Bu doğrultuda, yalıtımsız temel modelin yanı sıra altı farklı yalıtım senaryosu tanımlanmıştır. Her bir simülasyonda yalnızca dış duvarlarda kullanılan yalıtım kalınlığı değiştirilmiş; diğer yapı elemanlarının termal özellikleri sabit tutulmuştur. Bu sayede yalıtım kalınlığının enerji performansı üzerindeki etkisi izole edilmiş ve karşılaştırmalı analiz yapılmıştır.

Programın gelişmiş hesaplama motoru hem ısı iletimi hem de güneş radyasyonu, ısı köprüleri, hava sızdırmazlığı, iç kazançlar (insan, aydınlatma, ekipman), gece soğutması, zemin ısısı ve HVAC sistem tepkileri gibi pek çok fiziksel parametreyi eşzamanlı olarak analiz edebilmektedir. Bu çalışmada ısıtma sistemi olarak doğal gazlı bir kazan tanımlanmış, sistem verimi ve yakıtın alt ısı değeri kullanıcı tarafından girilmiştir. Isıtma iç mekân set sıcaklığı 20 °C olarak belirlenmiş ve sistem bu sıcaklığı sabit tutmak üzere çalışacak şekilde yapılandırılmıştır.

OpenStudio arayüzü kullanılarak yapılan tanımlamalar; termal zonlar, iç kazanç profilleri, yüzey özellikleri ve sistem bağlantıları üzerinden gerçekleştirilmiştir. Program, yapı kabuğundaki her bir yüzeyi (duvar, tavan, zemin, pencere) ayrı ayrı değerlendirerek detaylı bir enerji bilançosu çıkarmakta ve her saat için enerji yüklerini hesaplamaktadır. Bu kapsamlı yaklaşım, farklı yalıtım senaryolarının yıl boyunca binaya etkilerini yüksek doğrulukla değerlendirmeye olanak sağlamaktadır. Elde edilen simülasyon sonuçları, her bir iklim bölgesi için yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı (kWh/yıl) cinsinden raporlanmış ve yalıtım senaryoları arasında enerji performansı açısından karşılaştırmalar yapılmıştır. EnergyPlus ile elde edilen veriler, aynı yapı modeli için derece - gün yöntemi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış; böylece hem yöntemler arası sapma analizleri hem de yöntemlerin doğruluk düzeyi değerlendirilmiştir. Ayrıca simülasyonların sonuç raporları, her bir yapı bileşeninin saatlik enerji akışları, iç ortam sıcaklık değişimleri, HVAC sistem yanıt süreleri ve günlük ısıtma yükleri gibi detaylı çıktılar üretmiştir.

Sonuç olarak, EnergyPlus simülasyonları, yapıların gerçek iklim verileri altındaki davranışını zamansal çözünürlükle ortaya koyarak yalnızca teorik değil, aynı zamanda pratik açıdan da optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesine katkı sunmuştur. Bu yönüyle program, ileri düzey bina enerji analizi çalışmalarında kullanılabilecek etkin ve güvenilir bir mühendislik aracı olduğunu kanıtlamıştır.

3.2.4. Statik ve Dinamik Yöntemler: Genel Bakış

Yapıların enerji performansının değerlendirilmesinde kullanılan statik ve dinamik yöntemler, farklı analiz derinlikleri ve uygulama alanlarına sahiptir. Statik yöntemler, zamana bağlı çevresel ve kullanım değişkenlerini göz ardı ederek, genellikle ortalama veya sabit sıcaklık farkları üzerinden ısı kaybı hesaplamaları yapar. Derece - gün yöntemi, bu kapsamda en çok tercih edilen basit ve hızlı bir yaklaşımdır. Hesaplama sürecinin yalınlığı ve düşük veri gereksinimi, özellikle tasarımın erken aşamalarında kullanışlıdır. Ancak, bu yöntemde sıcaklık dalgalanmaları, iç ısı kazançları ve güneş etkileri gibi dinamik faktörler dikkate alınmadığından, sonuçların gerçek kullanım koşullarını tam olarak yansıtmaya kapasitesi sınırlıdır.

Dinamik yöntemler ise, saatlik veya daha kısa zaman dilimlerinde çevresel ve bina içi değişkenleri modelleyerek çok daha karmaşık ve gerçekçi analizler yapar. EnergyPlus gibi gelişmiş simülasyon programları, iklim verilerinin yanı sıra bina geometrisi, malzeme termal özellikleri, iç kazançlar, havalandırma, HVAC sistemleri ve kullanıcı davranışlarını bütüncül bir şekilde entegre eder.

Bu sayede, binanın yıl boyunca karşılaştığı koşullar altında enerji tüketimi, konfor seviyeleri ve sistem performansları detaylı olarak ortaya konur. Dinamik simülasyonların yüksek hesaplama maliyeti ve karmaşıklığı, pratikte bazı sınırlamalar yaratmakla birlikte, tasarım ve optimizasyon süreçlerinde vazgeçilmezdir.

Her iki yöntemin avantajları ve kısıtlamaları vardır; dolayısıyla yapı enerji performans değerlendirmelerinde çoğu zaman birlikte kullanılarak, hızlı ön değerlendirmeler ile detaylı analizler arasında denge kurulmaktadır. Bu çalışma da bu yaklaşımı benimseyerek hem teorik hem de simülasyon bazlı sonuçların elde edilmesini sağlamıştır.

3.2.5. Uygulanan Yöntemlerin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

Çalışmada kullanılan derece - gün yöntemi ve EnergyPlus dinamik simülasyonları, ısıtma enerjisi ihtiyacının hesaplanmasında farklı metodolojiler sunmaktadır. Derece - gün yöntemi, basitleştirilmiş model yapısıyla düşük veri ihtiyacı ve hızlı sonuç üretme avantajı taşırken, özellikle iklim ve kullanım kaynaklı günlük ve saatlik değişkenleri yansıtmakta yetersiz kalmaktadır. Buna karşın, EnergyPlus simülasyonları, saatlik iklim verisi, bina kullanım senaryoları, iç ısı kazançları ve bina geometrisini dikkate alarak daha doğru ve ayrıntılı enerji ihtiyaçları sunar.

Analizler, EnergyPlus simülasyonlarının genellikle derece - gün yöntemine göre daha yüksek ve gerçekçi ısıtma enerji ihtiyaçları verdiğini ortaya koymuştur. Bu fark, dinamik simülasyonların gece-gündüz sıcaklık farkları, güneşlenme, zemin ısı ve kullanıcı alışkanlıkları gibi ek faktörleri kapsamına almasından kaynaklanmaktadır. Her iki yöntem arasında hesaplama karmaşıklığı, veri gereksinimi ve uygulama alanı bakımından belirgin farklılıklar bulunmakla birlikte, bu çalışma iki yöntemin avantajlarını kullanarak kapsamlı bir enerji verimliliği değerlendirmesi yapmıştır.

Sonuçta, hızlı karar alma süreçleri için derece - gün yöntemi pratik bir çözüm sunarken, tasarım ve performans optimizasyonlarında EnergyPlus simülasyonları vazgeçilmezdir. Bu çalışmada elde edilen karşılaştırmalı sonuçlar, farklı iklim bölgelerinde yalıtım kalınlıklarının belirlenmesinde hangi yöntemin hangi amaçla tercih edilmesi gerektiğine dair önemli rehberlik sağlamıştır.

3.2.6. Optimum Yalıtım Kalınlığının $\pm 0,01$ m Sapma ile Değerlendirilmesi: Uygulama Hassasiyeti ve Sonuçlara Etkileri

Optimum yalıtım kalınlığı, yapıların enerji tasarrufu ve ekonomik verimlilik hedeflerine ulaşması için kritik bir parametredir. Ancak pratikte, uygulama sırasında çeşitli nedenlerle belirlenen optimum kalınlık değerinden sapmalar meydana gelebilir. Bu sapmaların büyüklüğü genellikle $\pm 0,01$ m gibi küçük aralıklarda olup, saha koşulları, malzeme üretim toleransları, işçilik kalitesi, yüzey düzensizlikleri ve malzemenin zamanla deformasyonu gibi faktörlerle ilişkilidir.

Bu çalışma, optimum yalıtım kalınlığındaki $\pm 0,01$ m sapmanın enerji tüketimi, ısı kaybı ve ekonomik performans üzerindeki etkilerini kapsamlı şekilde incelemiştir. Sonuçlar, kalınlık sapmalarının yıllık ısıtma ihtiyacında anlamlı değişikliklere neden olabileceğini göstermiştir. Yalıtım kalınlığının azalması, ısı kayıplarını artırarak yakıt tüketimini ve işletme maliyetlerini yükseltirken, fazlalık kalınlık ise ilk yatırım maliyetlerini artırmakta ve geri ödeme süresini uzatmaktadır. Bu dengenin doğru yönetilmesi hem enerji tasarrufunun maksimize edilmesi hem de ekonomik sürdürülebilirliğin sağlanması açısından önemlidir.

Uygulamada kalite kontrolün artırılması, malzeme standartlarının yükseltilmesi ve saha denetimlerinin etkinleştirilmesi sapmaların minimize edilmesine yardımcı olur. Ayrıca, tasarım aşamasında tolerans paylarının bırakılması, uygulama kaynaklı olası kalınlık farklılıklarının enerji performansına olumsuz etkilerini azaltır. Bu sayede, gerçek saha koşullarında da enerji verimliliği hedeflerine ulaşılması mümkün olur.

Sonuç olarak, optimum yalıtım kalınlığı değerindeki küçük sapmaların bina enerji performansı ve ekonomik geri dönüş süreleri üzerindeki etkisi dikkate alınmalı; bu konuda uygulama hassasiyeti ve kalite yönetimi öncelikli olmalıdır. Bu çalışma, bu hassasiyetin önemini vurgulayarak saha uygulamalarına yönelik önemli çıkarımlar sağlamıştır.

3.2.7. Analiz Süreci ve Hesaplama Adımları

Çalışmanın analiz süreci, veri toplama, matematiksel modelleme, malzeme tanımlamaları, bina modelleme ve hesaplama yöntemlerinin eşzamanlı entegrasyonunu içeren kapsamlı ve sistematik bir yapıya sahiptir. İlk aşamada, Türkiye'nin dört farklı iklim bölgesini temsil eden Hatay, Edirne, Bingöl ve Kars illerine ait 8760 saatlik dış ortam sıcaklık verileri Meteonorm 7.3 yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Bu veriler, MATLAB ortamında işlenmiş ve 19 °C taban sıcaklığın altındaki saatlik sıcaklıklar filtrelenerek özgün Isıtma Derece Günü (HDD) değerleri hesaplanmıştır. Bu süreçte, saatlik verilerin tüm yıl boyunca entegrasyonu ile hassas ve detaylı HDD değerleri oluşturulmuştur.

İkinci aşamada, Koçyiğit (2024) tarafından geliştirilen genleştirilmiş cam agregası ve çam reçinesi esaslı altı farklı ST tipi kompozit yalıtım malzemesinin deneysel olarak belirlenmiş ısı iletkenlik, yoğunluk, özgül ısı ve mekanik dayanım özellikleri analiz modellerine parametrik olarak dahil edilmiştir.

Üçüncü aşamada, ekonomik analizler için gerçek faiz oranı, enflasyon oranı, ekonomik ömür süresi, sistem verimi, yakıt alt ısı değeri ve birim maliyet gibi parametreler tanımlanarak, yatırım maliyeti ve geri ödeme süreleri hesaplanmıştır.

Dördüncü aşamada, derece - gün yöntemi kullanılarak farklı malzeme ve bölgeler için yıllık ısı kaybı, yakıt maliyeti, optimum yalıtım kalınlığı ve net tasarruf miktarı hesaplanmıştır.

Beşinci aşamada, SketchUp yazılımıyla 3B bina modeli oluşturulmuş, OpenStudio eklentisiyle EnergyPlus ortamına entegre edilmiştir. İklim verileri EPW formatında EnergyPlus'a aktarılmış ve saatlik bazda simülasyonlar gerçekleştirilerek detaylı enerji performans verileri elde edilmiştir.

Son aşamada, elde edilen tüm veriler karşılaştırılarak yöntemler arası farklılıklar, benzerlikler ve optimum yalıtım kalınlığı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu entegre analiz süreci, çalışmanın bilimsel kapsamını ve güvenilirliğini artırmış; enerji etkin yapı tasarımı için önemli çıktılar sunmuştur.

3.2.8. Ekonomik Analiz ve Geri Ödeme Süresi Hesaplamaları

Yalıtım uygulamalarının enerji verimliliği açısından etkili olması kadar, ekonomik açıdan da sürdürülebilir olması önemlidir. Bu bağlamda, yapılan ekonomik analizlerde hem ilk yatırım maliyetleri hem de enerji tasarrufundan kaynaklanan uzun vadeli kazançlar değerlendirilir. Bu çalışma kapsamında, yalıtım malzemelerinin birim hacim maliyetleri, uygulama alanına göre toplam yatırım maliyeti olarak hesaplanmıştır. Malzeme maliyetlerinin yanı sıra, işçilik, montaj ve bakım giderleri de ekonomik analizde göz önünde bulundurulabilir.

Enerji tasarrufuna bağlı olarak azalan yakıt tüketimi, yıllık işletme giderlerinde önemli düşüslere yol açar. Bu nedenle, yatırım maliyetlerinin geri dönüş süresi hesaplanırken, yıllık enerji tasarrufu ve yakıt maliyetlerindeki azalma dikkate alınır. Geri ödeme süresi, yatırımın amorti edilme süresi olarak tanımlanır ve kısa geri ödeme süreleri yatırımın cazibesini artırır.

Ekonomik analizde ayrıca faiz oranları, enflasyon ve ekonomik ömür gibi finansal parametreler de modele dahil edilmiştir. Şimdiki değer ve iç karlılık oranı gibi finansal göstergeler, yalıtım uygulamasının ekonomik sürdürülebilirliğini daha kapsamlı değerlendirmeye olanak sağlar. Bu göstergeler, enerji fiyatlarındaki dalgalanmalara ve ekonomik koşullara karşı yatırımın dayanıklılığını ölçmek için kritik öneme sahiptir.

Sonuç olarak, ekonomik analizler enerji verimliliği projelerinin sadece çevresel değil, aynı zamanda finansal açıdan da uygulanabilirliğini ortaya koyar. Bu çalışma, yalıtım kalınlığının ve malzeme seçimlerinin maliyet-etkinliğini karşılaştırmalı olarak inceleyerek, optimum yatırım stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlamıştır.

3.2.9. Çevresel Etki Analizi ve Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi

Günümüzde binalarda enerji verimliliği uygulamalarının çevresel etkileri, sürdürülebilirlik hedeflerinin merkezinde yer almaktadır. Isı yalıtımı, doğrudan enerji tüketimini ve dolayısıyla fosil yakıt kullanımını azaltarak karbon emisyonlarının düşürülmesinde etkin bir yöntemdir. Bu çalışma kapsamında kullanılan geliştirilmiş cam agregası ve çam reçinesi bazlı kompozit malzemeler, çevre dostu ve geri dönüştürülebilir bileşenlerden oluşması nedeniyle ekolojik açıdan avantaj sağlamaktadır.

Çevresel etki analizi, yalıtım malzemelerinin yaşam döngüsü boyunca (üretim, nakliye, uygulama, kullanım ve bertaraf) ortaya çıkan karbon ayak izi ve diğer çevresel etkileri değerlendirmeyi kapsar. Bu analizde, malzeme üretim süreçlerindeki enerji tüketimi, kullanılan hammaddelerin sürdürülebilirliği ve atık yönetimi önemli parametrelerdir. Ayrıca, yalıtım sayesinde elde edilen enerji tasarrufu, toplam çevresel yükün azaltılmasında kritik rol oynar.

Sürdürülebilirlik değerlendirmesi, enerji tasarrufunun yanı sıra malzeme seçimi ve bina performansının çevresel etkileriyle de ilişkilidir. Kullanılan kompozit malzemeler hem çevresel etkiyi azaltmakta hem de yapı ömrü boyunca yüksek performans sunarak kaynak kullanımını optimize etmektedir. Bu durum, bina sektöründe karbon nötrlüğü hedeflerine ulaşmada önemli bir katkı sağlar.

Bu çalışmada, enerji tasarrufu ile çevresel faydaların değerlendirilmesi, yalıtım stratejilerinin çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından bütüncül analizini mümkün kılmıştır. Böylece, enerji verimliliği politikalarının geliştirilmesi ve uygulanması için bilimsel dayanaklar güçlendirilmiştir.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. x_{opt} Değerlerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada, derece-gün yöntemi kullanılarak Türkiye'nin farklı iklim koşullarını temsil eden Hatay, Edirne, Bingöl ve Kars illerinde altı farklı kompozit yalıtım malzemesi için optimum yalıtım kalınlığı (x_{opt}) değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, malzeme özellikleri ve iklimsel koşulların optimum yalıtım kalınlığı üzerinde belirleyici etkilerinin olduğunu göstermiştir.

Tablo 4.1'de görüldüğü üzere, daha soğuk iklim bölgelerinde (örneğin Kars), yalıtım için gerekli optimum kalınlıklar daha yüksek değerlerde belirlenirken, sıcak iklim bölgelerinde (Hatay gibi) bu kalınlıklar daha düşüktür. Bu durum, bölgesel ısı kayıplarının ve ısıtma gereksinimlerinin iklimden kaynaklı farklılıklarını açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca, malzemelerin ısı iletkenlik değerleri arttıkça optimum kalınlıkların azaldığı, daha düşük iletkenlik katsayısına sahip malzemelerin daha ince tabakalarda bile etkili yalıtım sağladığı gözlenmiştir.

Tablo 4.1. İllerin x_{opt} değerleri

İller	Malzeme Kodu	x_{opt} (m)		
		x	x – 0,01	x + 0,01
HATAY	ST 1	0,063	0,053	0,073
	ST 2	0,072	0,062	0,082
	ST 3	0,093	0,083	0,103
	ST 4	0,086	0,076	0,096
	ST 5	0,099	0,089	0,109
	ST 6	0,130	0,120	0,140
EDİRNE	ST 1	0,082	0,072	0,092
	ST 2	0,092	0,082	0,102
	ST 3	0,115	0,105	0,125
	ST 4	0,106	0,096	0,116
	ST 5	0,119	0,109	0,129
	ST 6	0,154	0,144	0,164
BİNGÖL	ST 1	0,115	0,105	0,125
	ST 2	0,125	0,115	0,135
	ST 3	0,151	0,141	0,161
	ST 4	0,140	0,130	0,150
	ST 5	0,154	0,144	0,164
	ST 6	0,194	0,184	0,204
KARS	ST 1	0,163	0,153	0,173
	ST 2	0,174	0,164	0,184
	ST 3	0,205	0,195	0,215
	ST 4	0,191	0,181	0,201
	ST 5	0,205	0,195	0,215
	ST 6	0,254	0,244	0,264

Optimum kalınlık değerlerine $\pm 0,01$ m sapma uygulanarak yapılan analizlerde, küçük kalınlık değişimlerinin bile enerji tüketimi ve ekonomik performans üzerinde anlamlı etkiler yarattığı tespit edilmiştir. Özellikle kalınlıkta azalma durumunda enerji kayıplarında artış gözlenirken, kalınlığın artırılması ilk yatırım maliyetlerini yükseltmekle birlikte enerji tasarrufu potansiyelini de artırmaktadır. Bu bulgular, yalıtım uygulamalarında hassasiyetin ve kalite kontrolün önemini açıkça vurgulamaktadır. Elde edilen optimum kalınlık değerleri, malzeme ve iklim özelliklerinin yanı sıra uygulama toleranslarının da performans üzerindeki etkisini net biçimde göstermiştir. Bu sonuçlar, enerji verimliliği hedeflerine ulaşmak için yalnızca tasarım aşamasındaki teorik hesaplamaların değil, saha uygulamalarındaki dikkat ve titizliğin de gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesinde hem iklimsel koşulların hem malzeme özelliklerinin yanı sıra uygulama sürecindeki hassasiyet ve işçilik kalitesinin de göz önünde bulundurulması gerektiğini desteklemektedir. Bu kapsamlı yaklaşım, sürdürülebilir ve enerji etkin bina tasarımı için kritik öneme sahiptir.

Tablo 4.1’de sunulan x_{opt} değerleri incelendiğinde, Hatay ilinde hesaplanan optimum yalıtım kalınlıklarının 0,063 m (ST1) ile 0,130 m (ST6) arasında değiştiği görülmektedir. Hatay’ın daha ılıman iklim koşullarına sahip olması nedeniyle, yalıtım gereksinimi diğer illere kıyasla daha azdır. Bu kapsamda en düşük kalınlık değeri ST1 malzemesi için 0,063 m olarak belirlenmiştir.

Edirne için belirlenen optimum kalınlıklar 0,082 m (ST1) ile 0,154 m (ST6) arasında değişmektedir. Edirne’nin daha sert kış koşullarına sahip olması nedeniyle, Hatay’a kıyasla daha yüksek x_{opt} değerleri hesaplanmıştır. Özellikle ST6 gibi düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip malzemelerde, yalıtım kalınlığı artmakla birlikte sağlanan enerji kazancı da paralel olarak artmaktadır.

Bingöl’de x_{opt} değerleri 0,115 m (ST1) ile 0,194 m (ST6) arasında değişmiş; bu, bölgenin daha soğuk iklim şartlarının yalıtım ihtiyacına doğrudan etkisini göstermektedir.

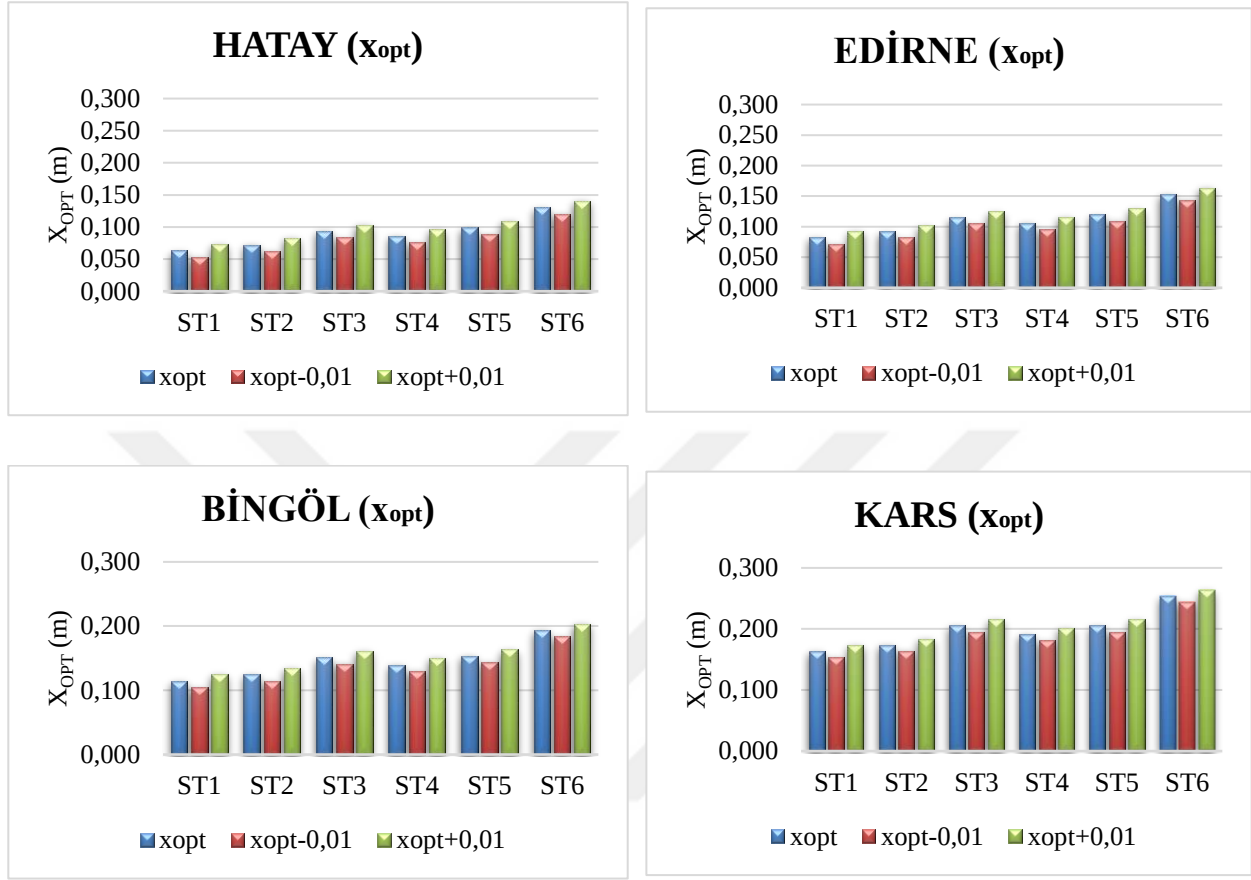
Kars’ta ise optimum yalıtım kalınlıkları en yüksek seviyededir; ST1 için 0,163 m, ST6 için ise 0,254 m olarak belirlenmiştir. Bu değerler, Kars’ta yapı kabuğunda uygulanacak yalıtımın daha kalın olması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Genel olarak, x_{opt} değerleri üzerinde en belirleyici faktörlerin ısınma derece - gün (HDD) ve malzemenin ısı iletkenlik katsayısı olduğu görülmektedir. Soğuk iklimlerde x_{opt} artmakta, düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip malzemelerde ise optimum kalınlık daha yüksek hesaplanmaktadır. Bu da malzeme seçiminin iklim koşullarıyla birlikte değerlendirilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Ayrıca, her il ve malzeme için hesaplanan x_{opt} değerlerine ek olarak $\pm 0,01$ m varyasyonlar da dikkate alınarak enerji performansı üzerindeki etkiler analiz edilmiştir. Bu senaryolar, uygulama sırasında oluşabilecek toleransların yıllık ısıtma ihtiyacı üzerindeki potansiyel etkilerini ortaya koyması açısından önemlidir.

Şekil 4.1’de, Hatay, Edirne, Bingöl ve Kars illerinde altı farklı kompozit malzeme için hesaplanan optimum yalıtım kalınlıkları ve varyasyonları grafiksel olarak sunulmaktadır. Grafiklerde,

iklim sertleştikçe optimum yalıtım kalınlığı ile varyasyonların etkisinin arttığı, daha soğuk bölgelerde $\pm 0,01$ m’lik kalınlık değişimlerinin enerji performansına daha belirgin etkileri olduğu görülmektedir.



Şekil 4.1. İllere göre kompozit malzeme bazında hesaplanan optimum yalıtım kalınlıkları (x_{opt})

Grafiksel veriler, optimum kalınlıkların illere ve malzeme türlerine göre belirgin şekilde farklılaştığını, düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip malzemelerde x_{opt} değerlerinin daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, malzeme seçimi ve uygulama toleranslarının iklimle birlikte değerlendirilmesinin gerekliliğini desteklemektedir. Ayrıca grafikler, saha uygulamaları ve karar süreçleri için önemli karşılaştırma ve rehberlik imkânı sağlamaktadır.

4.2. Yıllık Isı Enerjisi Tüketiminin Yöntemlere Göre Karşılaştırılması

Bu bölümde, Hatay, Edirne, Bingöl ve Kars illerine ait yıllık toplam ısı enerjisi tüketimi ($Q_{yıl}$) değerleri, iki farklı yöntem kullanılarak analiz edilmiştir. Kullanılan yöntemler, statik hesaplama temelli Heating Degree Day (HDD) yöntemi ve dinamik simülasyon aracı EnergyPlus (EP) olarak belirlenmiştir. Tüm analizlerde, her il için altı farklı kompozit yalıtım malzemesi (ST1–ST6) ve üç farklı yalıtım kalınlığı senaryosu (x_{opt} , $x_{opt} - 0,01$ m, $x_{opt} + 0,01$ m) dikkate alınmıştır. EnergyPlus

simülasyonlarında kullanılan yalıtım kalınlığı değerleri, derece - gün yöntemiyle hesaplanan optimum kalınlık değerlerinden alınmıştır.

Yöntemler arasındaki $Q_{yıl}$ değerlerinin farklılık göstermesinin temel nedeni, veri girdilerindeki çeşitlilik ve modelleme düzeylerindeki farklılıklardır. HDD yöntemi, yalnızca dış ortam sıcaklığı ve yapı elemanlarının ısı geçirgenlik katsayısına dayanarak enerji tüketimini tahmin etmekte, iç kazanç, güneşlenme süresi ve kullanıcı davranışı gibi faktörleri hesaba katmamaktadır. Öte yandan, EnergyPlus programı saatlik iklim verileri, iç yükler, bina yönlenmesi, HVAC sistemleri ve yapı kabuğunun tüm termofiziksel özelliklerini entegre ederek daha kapsamlı ve gerçekçi simülasyon sonuçları üretmektedir.

4.2.1. Hatay İlinde Yıllık Isı Enerjisi Tüketimi: Derece-Gün ve Dinamik Simülasyon Analizi

Bu alt bölümde, Hatay iline ait yıllık ısı enerjisi tüketimi ($Q_{yıl}$) değerleri, derece-gün (HDD) temelli statik yöntem ve EnergyPlus (EP) dinamik simülasyon aracı kullanılarak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Analizlerde, altı farklı kompozit yalıtım malzemesi (ST1–ST6) ve üç farklı yalıtım kalınlığı senaryosu (x_{opt} , $x_{opt} - 0,01$ m, $x_{opt} + 0,01$ m) dikkate alınmıştır. EnergyPlus simülasyonlarında kullanılan yalıtım kalınlıkları, derece-gün yöntemiyle hesaplanan optimum kalınlık değerlerinden alınmıştır. Tablo 4.2’de, Hatay ili için her malzeme ve kalınlık senaryosuna göre HDD ve EnergyPlus yöntemleriyle hesaplanan yıllık ısı enerjisi tüketimi sonuçları sunulmaktadır.

Tablo 4.2. Hatay ili için x_{opt} senaryolarındaki değerlere göre elde edilen $Q_{yıl}$ sonuçları

		x_{opt}	HDD	EP
x_{opt}	ST1	0,063	28,230	97,047
	ST2	0,072	25,499	95,507
	ST3	0,093	21,524	93,114
	ST4	0,086	22,085	93,480
	ST5	0,099	18,224	91,338
	ST6	0,130	14,229	88,985
$x_{opt} - 0,01$	ST1	0,053	30,259	98,436
	ST2	0,062	27,305	96,722
	ST3	0,083	22,897	93,977
	ST4	0,076	23,593	94,453
	ST5	0,089	19,455	92,132
	ST6	0,120	15,048	89,469
$x_{opt} + 0,01$	ST1	0,073	26,455	95,885
	ST2	0,082	23,917	94,488
	ST3	0,103	20,306	92,074
	ST4	0,096	20,759	92,654
	ST5	0,109	17,139	90,663
	ST6	0,140	13,495	88,544

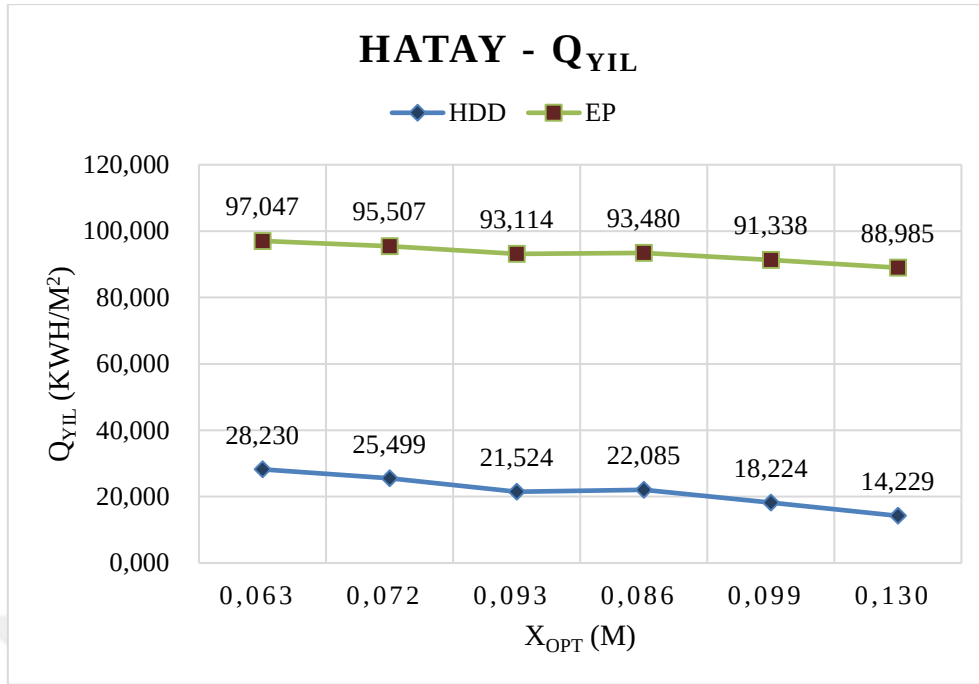
Tablo 4.2’de verilen verilere göre, Hatay ili için ST1 kompozit yalıtım malzemesinde optimum yalıtım kalınlığı (x_{opt}) 0,063 m olarak belirlenmiştir. Bu kalınlık altında gerçekleştirilen yıllık ısı

enerjisi tüketimi analizlerinde, derece-gün (HDD) yöntemine göre yaklaşık 28,230 kWh enerji tüketimi hesaplanırken, EnergyPlus dinamik simülasyon aracında bu değer 97,047 kWh olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar arasında yaklaşık 3,44 katlık bir fark gözlenmektedir. Bu fark, HDD yönteminin dış ortam sıcaklığı ve yapı elemanlarının ısı geçirgenlik katsayısına dayalı basitleştirilmiş bir model olmasına karşılık, EnergyPlus'ın saatlik iklim verisi, bina geometrisi, iç kazançlar ve HVAC sistem performansını içeren çok daha kapsamlı ve gerçekçi bir analiz sağlamasından kaynaklanmaktadır.

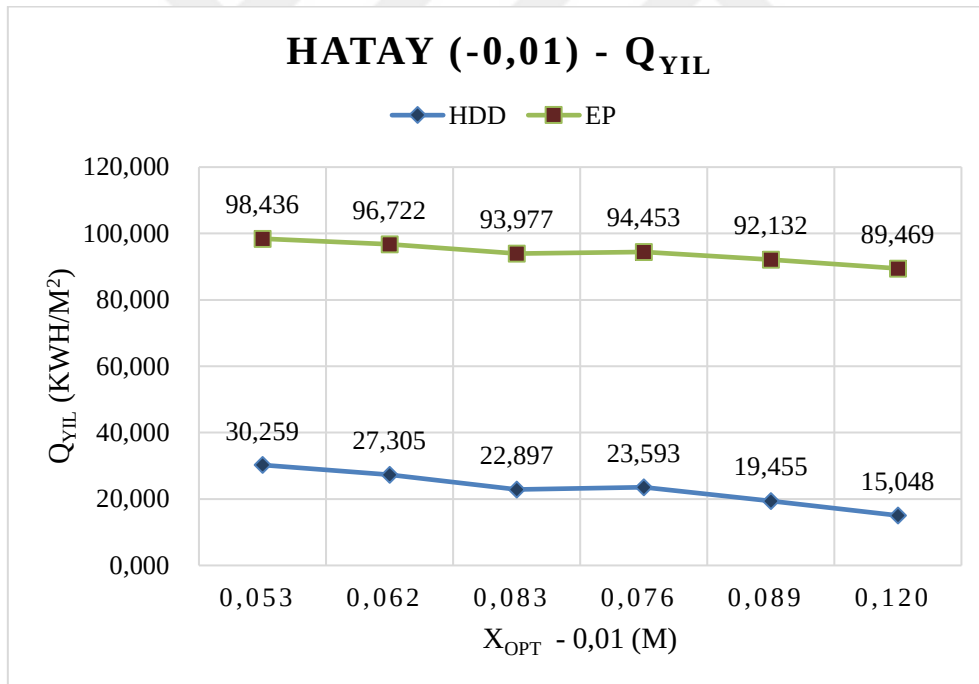
Optimum yalıtım kalınlığının azaltılması durumunda ($x_{opt} - 0,01 = 0,053$ m), HDD yöntemiyle hesaplanan yıllık ısıtma ihtiyacı 30,259 kWh'ye yükselirken; EnergyPlus simülasyonunda 98,436 kWh'ye ulaşmaktadır. Benzer şekilde, optimum kalınlığın artırılması durumunda ($x_{opt} + 0,01 = 0,073$ m), HDD yöntemi 26,455 kWh'ye düşerken, EnergyPlus ise 95,885 kWh seviyesine inmektedir.

Bu sayısal veriler, HDD tabanlı hesaplamaların yalıtım kalınlığındaki küçük değişikliklere karşı daha yüksek duyarlılık gösterdiğini, buna karşın EnergyPlus'ın çok parametrelili dinamik simülasyonlarının değişikliklere daha dengeli ve gerçekçi yanıtlar verdiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, bina enerji performansının değerlendirilmesinde, özellikle saha uygulamalarındaki tolerans ve işçilik kalitesinin etkilerinin doğru analiz edilebilmesi için, statik HDD analizlerinin dinamik simülasyonlarla desteklenmesi önem arz etmektedir.

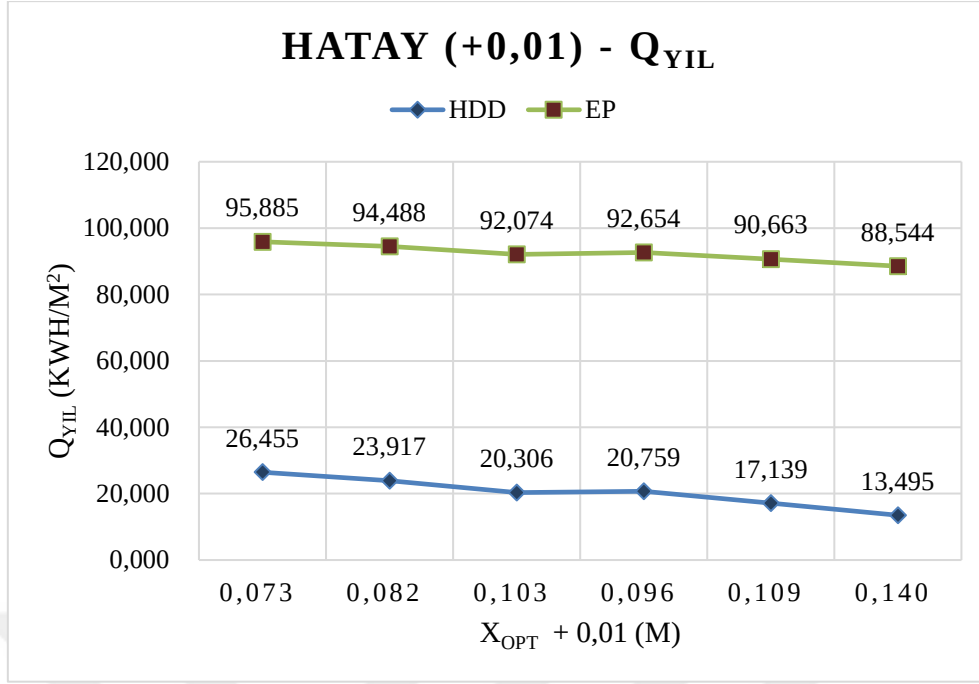
Şekil 4.2, Hatay ilinde her bir kompozit yalıtım malzemesi için derece-gün (HDD) ve EnergyPlus (EP) yöntemleri kullanılarak hesaplanan optimum yalıtım kalınlıklarına karşılık gelen yıllık ısı enerjisi tüketimi değerlerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 ise sırasıyla, optimum yalıtım kalınlığındaki 0,01 m azalma ($x_{opt} - 0,01$ m) ve 0,01 m artış ($x_{opt} + 0,01$ m) durumlarının yıllık ısıtma ihtiyacı üzerindeki etkilerini detaylı şekilde göstermektedir. Bu grafikler, yalıtım kalınlığındaki küçük değişimlerin enerji performansına olan etkisini açıkça ortaya koymakta ve saha uygulamalarında kalınlık toleranslarının önemini vurgulamaktadır.



Şekil 4.2. Hatay ili için optimum yalıtım kalınlığında yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.3. Hatay ili için $x_{opt} - 0,01$ m için yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.4. Hatay ili için $x_{opt} + 0,01$ m için yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması

4.2.2. Edirne İlinde Yıllık Isı Enerjisi Tüketimi: Derece-Gün ve Dinamik Simülasyon Analizi

Bu bölümde, Edirne iline ait yıllık ısı enerjisi tüketimi (Q_{yil}) değerleri, derece-gün (HDD) yöntemi ile EnergyPlus (EP) simülasyonu kullanılarak karşılaştırılmıştır. Analizler, altı farklı kompozit yalıtım malzemesi (ST1–ST6) ve üç yalıtım kalınlığı senaryosunu (x_{opt} , $x_{opt} - 0,01$ m, $x_{opt} + 0,01$ m) kapsamaktadır. Tablo 4.3'te, Edirne için her malzeme ve kalınlık senaryosuna ilişkin enerji tüketimi sonuçları sunulmaktadır.

Tablo 4.3. Edirne ili için x_{opt} senaryolarındaki değerlere göre elde edilen Q_{yil} sonuçları

		x_{opt}	HDD	EP
x_{opt}	ST1	0,082	31,836	131,405
	ST2	0,092	28,756	129,458
	ST3	0,115	24,273	126,629
	ST4	0,106	24,906	127,108
	ST5	0,119	20,552	124,542
	ST6	0,154	16,047	121,690
$x_{opt} - 0,01$	ST1	0,072	33,849	132,861
	ST2	0,082	30,548	130,714
	ST3	0,105	25,637	127,511
	ST4	0,096	26,402	128,119
	ST5	0,109	21,774	125,360
	ST6	0,144	16,861	122,225
$x_{opt} + 0,01$	ST1	0,092	30,049	130,169
	ST2	0,102	27,163	128,379
	ST3	0,125	23,048	125,857
	ST4	0,116	23,571	126,240
	ST5	0,129	19,460	123,831

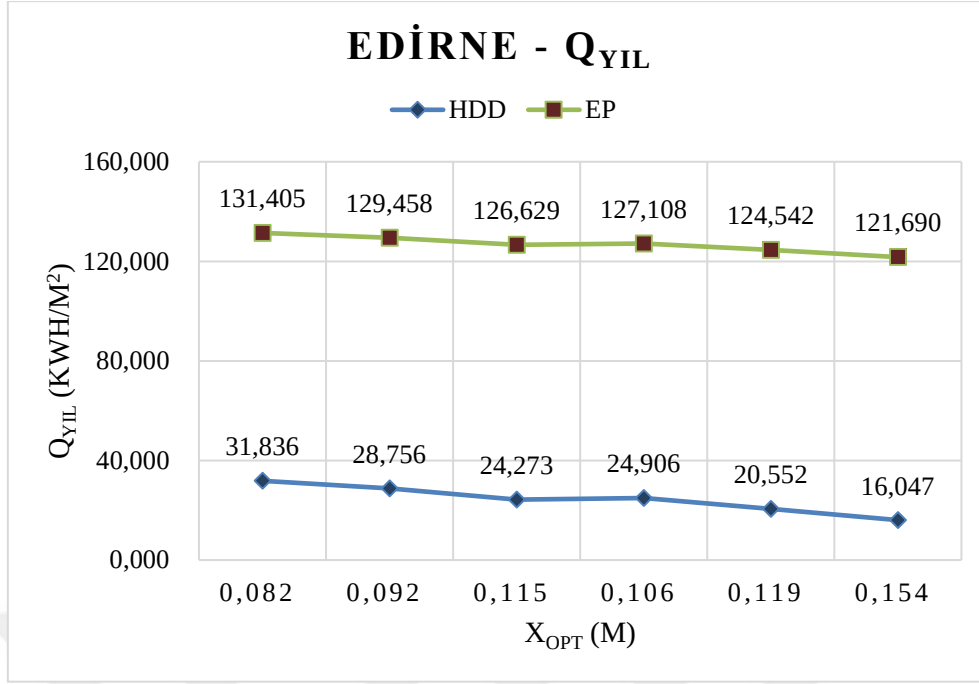
ST6	0,164	15,308	121,292
-----	-------	--------	---------

ST1 malzemesi için optimum yalıtım kalınlığı 0,082 m olarak belirlenmiş ve HDD yöntemi yıllık 31,836 kWh enerji tüketimi verirken, EnergyPlus simülasyonu 131,405 kWh değerini göstermiştir. İki yöntem arasındaki fark, EnergyPlus'ın iklim, iç kazanç ve HVAC sistemlerini de hesaba katması nedeniyle ortaya çıkmaktadır.

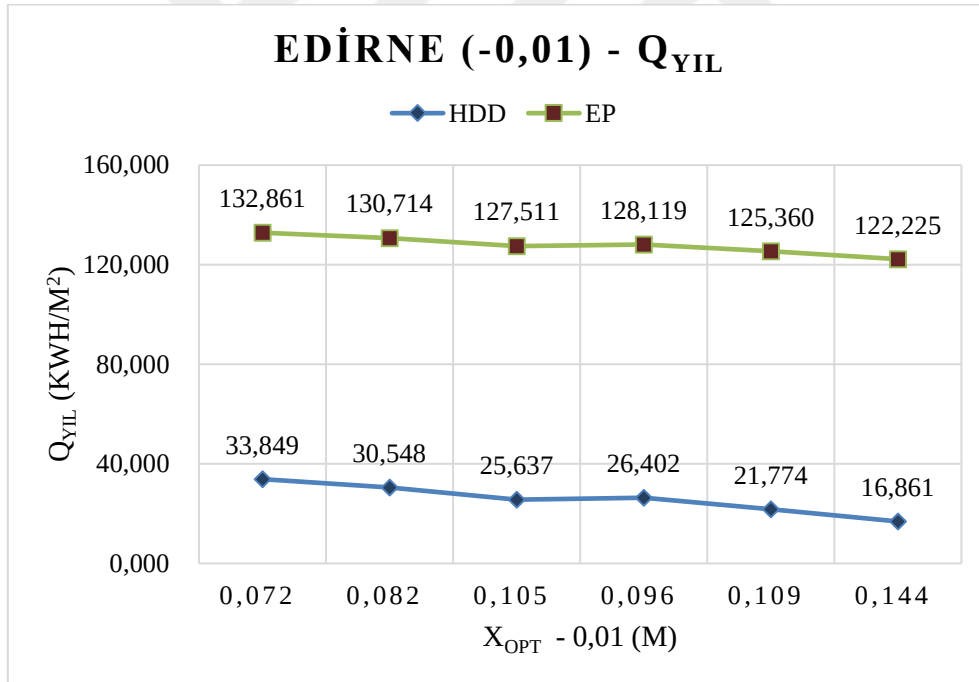
Kalınlık 0,01 m azaldığında, HDD'ye göre enerji tüketimi 33,849 kWh olurken, EnergyPlus'ta 132,861 kWh'ye çıkmaktadır. Kalınlık 0,01 m artırıldığında ise HDD ile 30,049 kWh, EnergyPlus ile 130,169 kWh hesaplanmıştır.

Bu veriler, HDD yönteminin kalınlık değişimlerine karşı daha duyarlı olduğunu, EnergyPlus'ın ise daha dengeli ve gerçekçi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Bu nedenle, saha uygulamalarındaki tolerans ve işçilik kalitesinin etkilerini doğru değerlendirmek için dinamik simülasyonların desteklenmesi önemlidir.

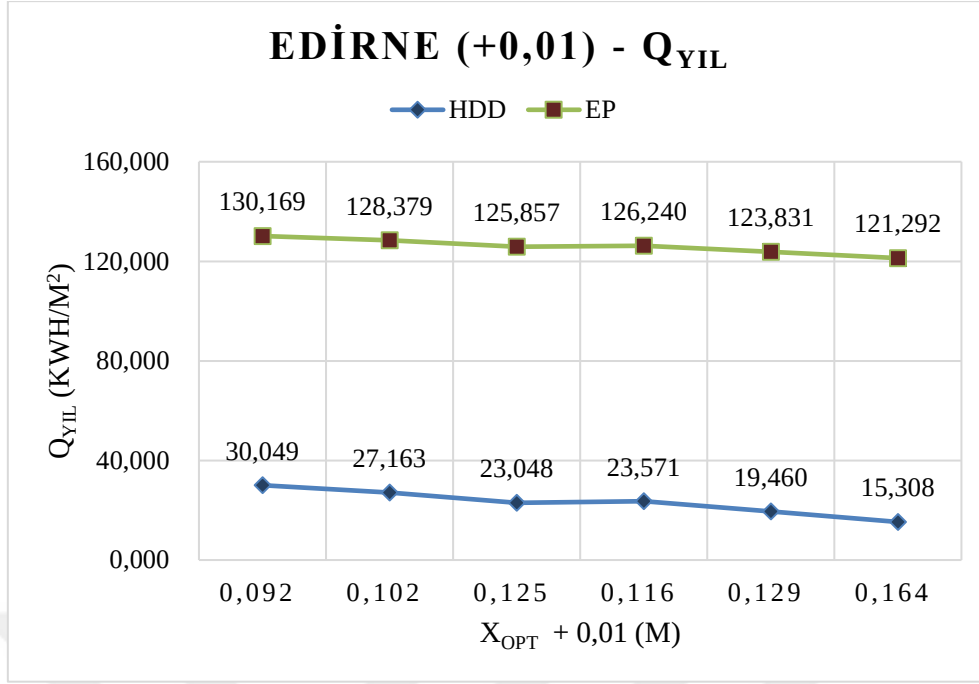
Şekil 4.5, Edirne ili için her bir kompozit yalıtım malzemesinde hesaplanan optimum yalıtım kalınlıklarında (x_{opt}) yıllık ısı enerjisi tüketimi değerlerini derece-gün (HDD) ve EnergyPlus (EP) yöntemleri açısından karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 ise sırasıyla, optimum yalıtım kalınlığındaki 0,01 m azalma ($x_{opt} - 0,01$ m) ve 0,01 m artış ($x_{opt} + 0,01$ m) senaryolarının yıllık ısıtma ihtiyacı üzerindeki etkilerini detaylı şekilde ortaya koymaktadır. Bu grafikler, yalıtım kalınlığındaki küçük değişimlerin enerji tüketimine olan etkisini net biçimde ortaya koyarak, saha uygulamalarındaki kalınlık toleranslarının enerji verimliliği performansına olan kritik etkisini vurgulamaktadır. Bu veriler, yalıtım kalınlığındaki küçük değişikliklerin enerji tüketimini önemli ölçüde etkilediğini göstermekte olup, saha uygulamalarında hassasiyet ve kalite kontrolün enerji verimliliği açısından önemini bir kez daha ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, uygulama aşamasında standartlara uygun toleransların sağlanması, uzun vadede enerji tasarrufu hedeflerinin gerçekleşmesinde belirleyici rol oynamaktadır.



Şekil 4.5. Edirne ili için optimum yalıtım kalınlığında yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.6. Edirne ili için $x_{opt} - 0,01$ m için yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.7. Edirne ili için $x_{opt} + 0,01$ m için yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması

4.2.3. Bingöl İlinde Yıllık Isı Enerjisi Tüketimi: Derece-Gün ve Dinamik Simülasyon Analizi

Bingöl ili için yürütülen analizlerde, yıllık ısı enerjisi tüketimi (Q_{yil}) derece-gün (HDD) yöntemi ve EnergyPlus (EP) simülasyonu kullanılarak değerlendirilmiştir. Altı farklı kompozit yalıtım malzemesi (ST1–ST6) ve üç yalıtım kalınlığı senaryosu (x_{opt} , $x_{opt} - 0,01$ m, $x_{opt} + 0,01$ m) analiz kapsamındadır. Tablo 4.4, Bingöl’de elde edilen enerji tüketimi sonuçlarını içermektedir.

Tablo 4.4. Bingöl ili için x_{opt} senaryolarındaki değerlere göre elde edilen Q_{yil} sonuçları

		x_{opt}	HDD	EP
x_{opt}	ST1	0,115	37,973	165,088
	ST2	0,125	34,300	162,830
	ST3	0,151	28,953	159,525
	ST4	0,140	29,708	159,998
	ST5	0,154	24,514	156,696
	ST6	0,194	19,140	153,169
$x_{opt} - 0,01$	ST1	0,105	39,966	166,367
	ST2	0,115	36,073	163,971
	ST3	0,141	30,304	160,372
	ST4	0,130	31,189	160,949
	ST5	0,144	25,724	157,474
	ST6	0,184	19,947	153,728
$x_{opt} + 0,01$	ST1	0,125	36,170	163,946
	ST2	0,135	32,692	161,822
	ST3	0,161	27,717	158,750
	ST4	0,150	28,360	159,098
	ST5	0,164	23,412	155,986
	ST6	0,204	18,396	152,700

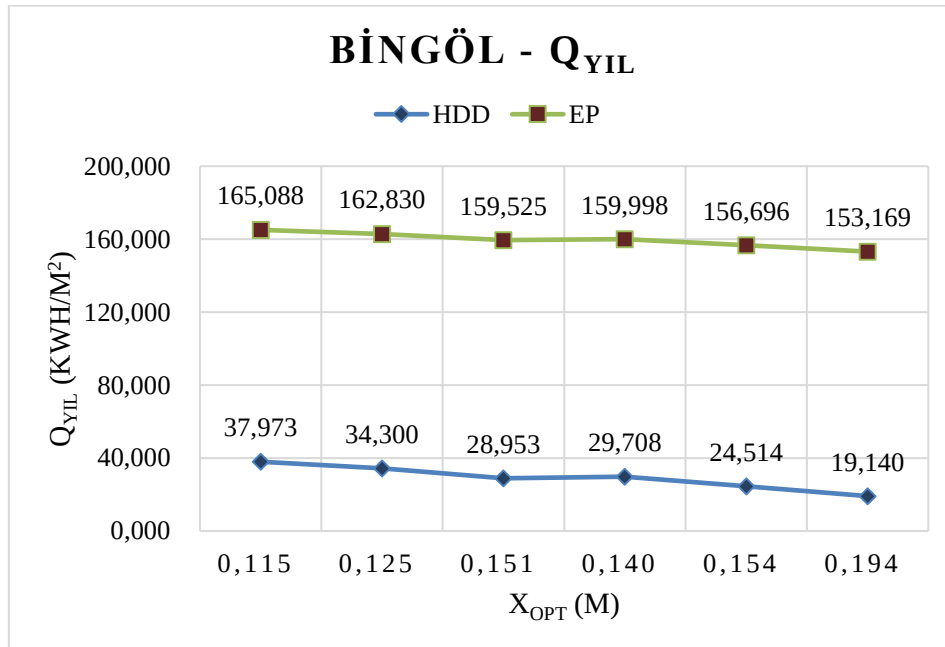
Optimum yalıtım kalınlığı ST1 için 0,115 m olarak belirlenmiş ve HDD yöntemine göre yıllık ısıtma ihtiyacı 37,973 kWh olarak hesaplanmıştır. Dinamik simülasyonlarda ise bu değer 165,088 kWh'dir. EnergyPlus sonuçlarının daha yüksek olması, programın daha detaylı bina ve çevre koşullarını hesaba katmasından kaynaklanmaktadır.

Kalınlık 0,01 m azaldığında HDD yöntemiyle enerji tüketimi 39,966 kWh'ye, EnergyPlus simülasyonunda 166,367 kWh'ye yükselmiştir. Kalınlık 0,01 m artırıldığında ise enerji tüketimi azalmış, değerler 36,170 kWh ve 163,946 kWh olarak hesaplanmıştır.

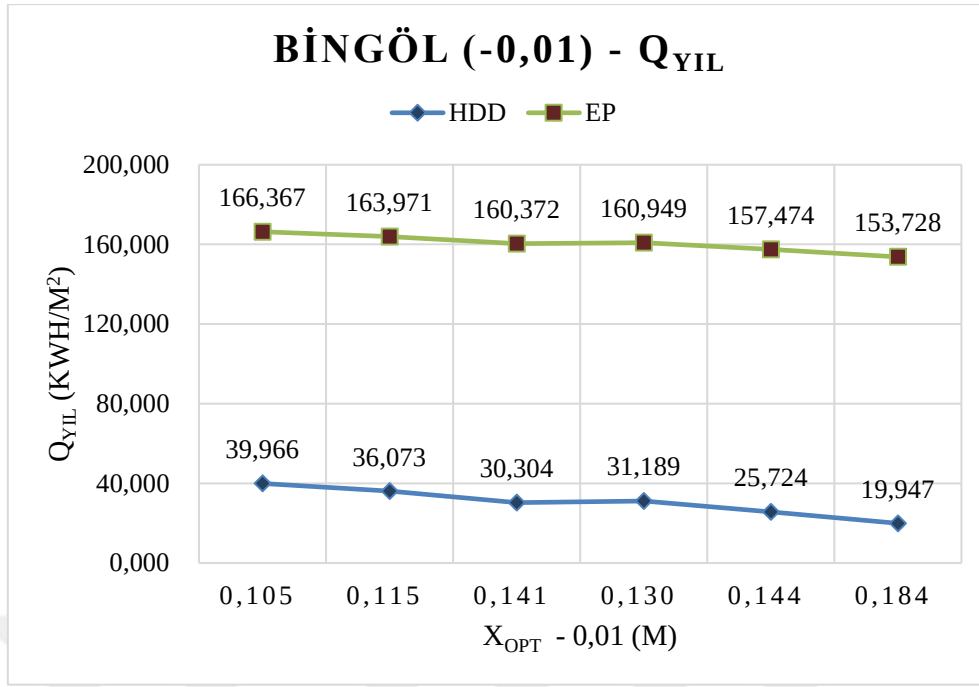
Bu sonuçlar, kalınlık değişikliklerinin enerji tüketimi üzerinde önemli etkiler yarattığını ve farklı yöntemlerin değişimlere karşı farklı duyarlılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Saha uygulamalarında tolerans ve işçilik kalitesinin enerji performansını belirgin şekilde etkilediği göz önünde bulundurularak hem statik hem dinamik analizlerin birlikte değerlendirilmesi önerilmektedir.

Bingöl'deki daha sert iklim koşulları, yalıtım kalınlığının enerji tüketimi üzerindeki etkisini belirgin hale getirmektedir. Özellikle düşük ısı iletkenlikli malzemelerin kalınlık optimizasyonunda dikkat edilmesi gerektiğini göstermektedir. Yalıtım kalınlığındaki ufak sapmalar, enerji tasarrufunu doğrudan etkileyerek hem maliyet hem de konfor açısından önemli sonuçlar doğurabilir.

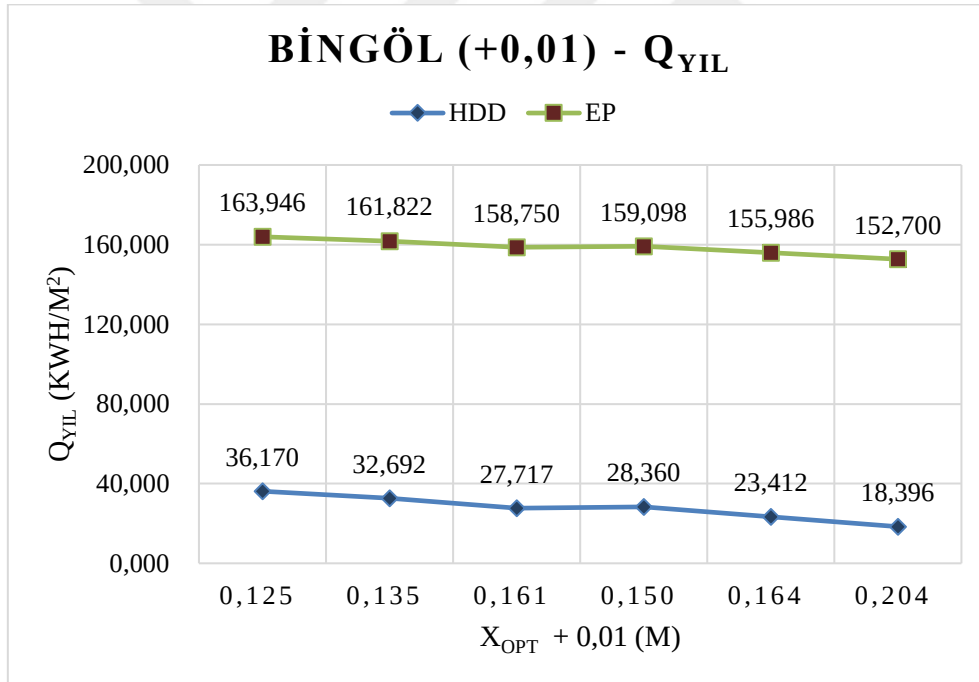
Şekil 4.8, Bingöl'de optimum yalıtım kalınlıklarına karşılık gelen enerji tüketimi değerlerini HDD ve EnergyPlus bazında karşılaştırmaktadır. Şekil 4.9 ve Şekil 4.10, kalınlıkta $\pm 0,01$ m değişimlerin enerji tüketimine etkilerini grafiksel olarak detaylandırmaktadır. Bu görseller, uygulamadaki hassasiyetin enerji verimliliği üzerindeki önemini bir kez daha vurgulamaktadır.



Şekil 4.8. Bingöl ili için optimum yalıtım kalınlığında yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.9. Bingöl ili için $x_{opt} - 0,01$ m için yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.10. Bingöl ili için $x_{opt} + 0,01$ m için yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması

4.2.4. Kars İlinde Yıllık Isı Enerjisi Tüketimi: Derece-Gün ve Dinamik Simülasyon Analizi

Kars ili için yürütülen analizlerde, yıllık ısı enerjisi tüketimi ($Q_{yıl}$) hem derece-gün (HDD) tabanlı statik yöntemle hem de EnergyPlus (EP) dinamik simülasyon aracı ile değerlendirilmiştir. Çalışmada, altı farklı kompozit yalıtım malzemesi (ST1–ST6) ve üç farklı yalıtım kalınlığı senaryosu

(x_{opt} , $x_{opt} - 0,01$ m, $x_{opt} + 0,01$ m) dikkate alınmıştır. Tablo 4.5, Kars için her malzeme ve kalınlık senaryosuna göre hesaplanan yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerini sunmaktadır.

Tablo 4.5. Kars ili için x_{opt} senaryolarındaki değerlere göre elde edilen $Q_{yıl}$ sonuçları

		x_{opt}	HDD	EP
x_{opt}	ST1	0,163	47,197	235,136
	ST2	0,174	42,631	232,184
	ST3	0,205	35,986	227,869
	ST4	0,191	36,924	228,449
	ST5	0,205	30,468	224,062
	ST6	0,254	23,790	219,440
$x_{opt} - 0,01$	ST1	0,153	49,169	236,377
	ST2	0,164	44,387	233,303
	ST3	0,195	37,324	228,757
	ST4	0,181	38,391	229,421
	ST5	0,195	31,667	224,953
	ST6	0,244	24,590	220,016
$x_{opt} + 0,01$	ST1	0,173	45,377	233,986
	ST2	0,184	41,009	231,145
	ST3	0,215	34,739	227,033
	ST4	0,201	35,565	227,550
	ST5	0,215	29,357	223,380
	ST6	0,264	23,040	218,896

Optimum yalıtım kalınlığı ST1 malzemesi için 0,163 m olarak belirlenmiş olup, HDD yöntemi ile yıllık ısıtma ihtiyacı 47,197 kWh, EnergyPlus simülasyonu ise 235,136 kWh olarak hesaplanmıştır. EnergyPlus sonuçlarının daha yüksek çıkması, programın kapsamlı iklim verisi, iç kazançlar ve sistem performansını dikkate alarak daha gerçekçi analiz yapmasından kaynaklanmaktadır.

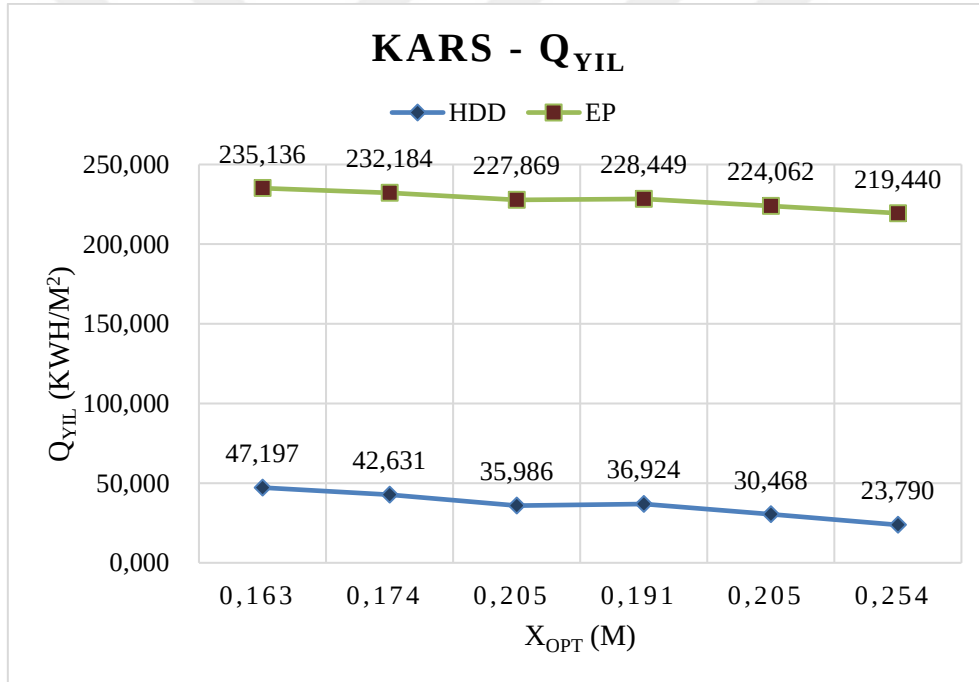
Optimum kalınlığın 0,01 m azaltılması ($x_{opt} - 0,01$ m) durumunda, HDD'ye göre enerji tüketimi 49,169 kWh'ye, EnergyPlus simülasyonunda ise 236,377 kWh'ye ulaşmıştır. Öte yandan, kalınlığın 0,01 m artırılması ($x_{opt} + 0,01$ m) ile HDD yöntemi 45,377 kWh'ye düşerken, EnergyPlus ile 233,986 kWh seviyesine inmiştir.

Bu bulgular, yalıtım kalınlığındaki ufak değişikliklerin özellikle soğuk iklimlerdeki enerji tüketimini anlamlı biçimde etkilediğini ortaya koymaktadır. HDD yöntemi daha değişken sonuçlar verirken, EnergyPlus'ın dinamik yaklaşımı daha dengeli ve gerçekçi sonuçlar sunmaktadır. Dolayısıyla,

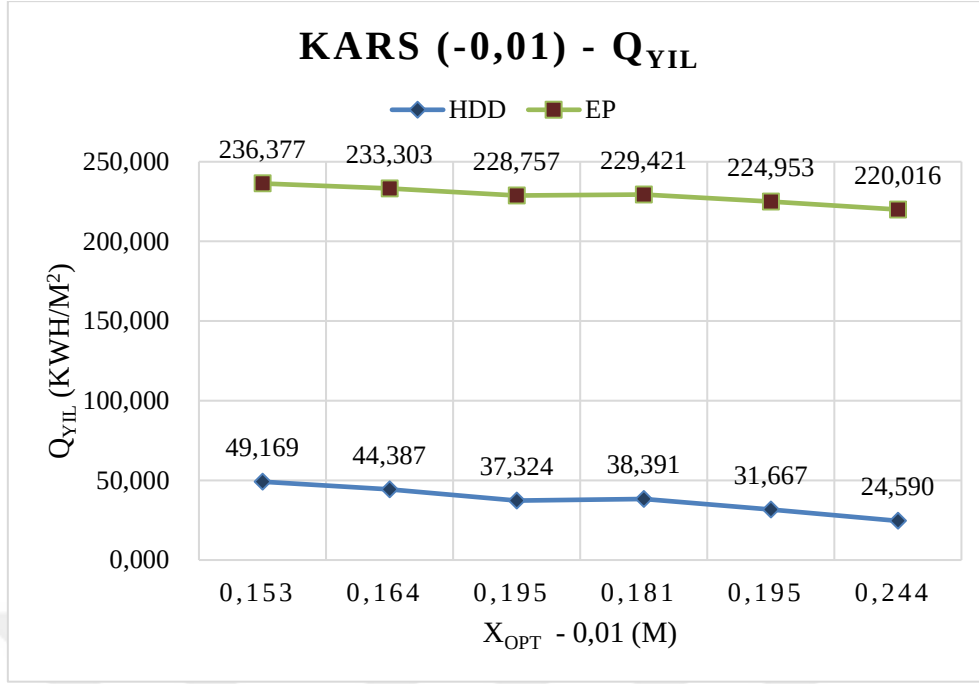
Kars gibi zorlu iklim koşullarında, saha uygulamalarındaki kalınlık toleranslarının ve işçilik kalitesinin enerji performansı üzerindeki etkileri doğru analiz edilebilmek için her iki yöntemin birlikte kullanılması önem taşımaktadır.

Şekil 4.11, Kars ilinde optimum yalıtım kalınlıklarına karşılık gelen enerji tüketim değerlerini HDD ve EnergyPlus yöntemleriyle karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 ise kalınlıkta $\pm 0,01$ m değişimlerin enerji tüketimine etkilerini grafiksel olarak detaylandırmaktadır. Bu grafikler, uygulama hassasiyetinin enerji tasarrufu üzerindeki kritik rolünü bir kez daha gözler önüne sermektedir.

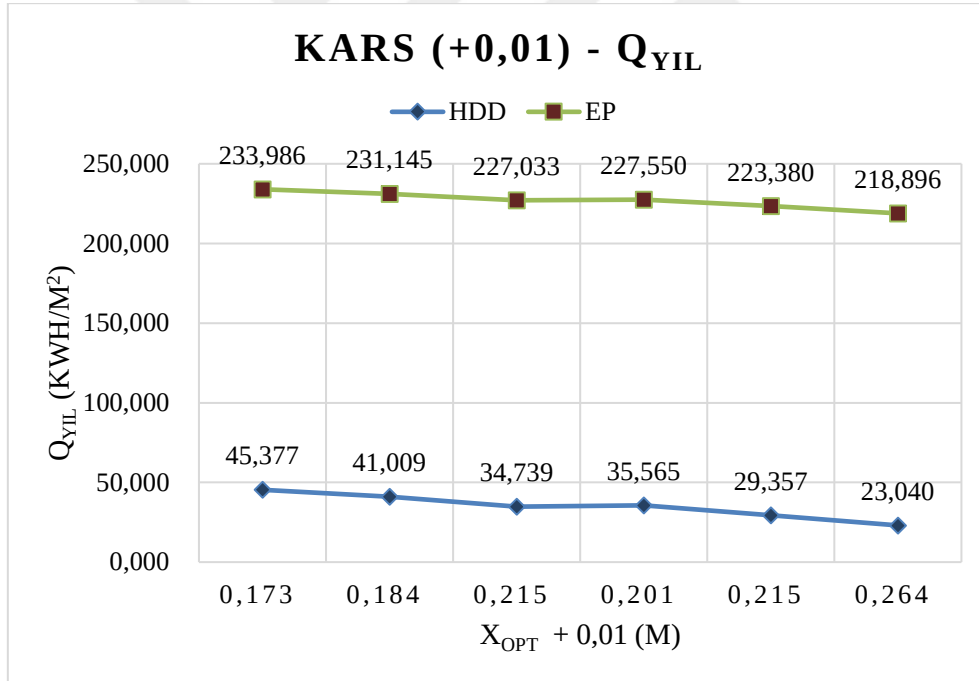
Kars ili, en soğuk iklim bölgesinde yer almakta olup tüm yöntemlerde en yüksek $Q_{yıl}$ değerlerine ulaşılmıştır. Şekil 4.12’de görüldüğü üzere ST6 malzemesi için EnergyPlus değeri $328,77 \text{ kWh/m}^2$, HDD değeri $23,79 \text{ kWh/m}^2$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.13’te, kalınlığın $0,01$ m azaltılması durumunda tüketim $329,23 \text{ kWh/m}^2$ ’ye yükselmiş, Şekil 4.14’te ise kalınlık artırıldığında $328,33 \text{ kWh/m}^2$ ’ye düşerek yaklaşık %0,15 oranında iyileşme sağlanmıştır.



Şekil 4.11. Kars ili için optimum yalıtım kalınlığında yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.12. Kars ili için $x_{opt} - 0,01$ m için yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.13. Kars ili için $x_{opt} + 0,01$ m için yıllık ısıtma ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması

4.2.5. İklim Bölgelerine Göre Bölgesel Yalıtım Performansının Değerlendirilmesi

Çalışmada analiz edilen dört il, farklı iklim koşullarını temsil ederek yalıtım performansının iklimle olan ilişkisini ortaya koymaktadır. Hatay, ılıman iklimi ve düşük ısıtma ihtiyacı ile optimum yalıtım kalınlıklarının en düşük olduğu bölge olarak dikkat çekmektedir. Bu durum, enerji tüketimini minimize ederken yatırım maliyetlerinin de daha düşük kalmasını sağlar.

Edirne ise daha soğuk iklim koşullarına sahip olup, Hatay'a kıyasla daha yüksek optimum yalıtım kalınlıkları gerektirmektedir. Buradaki enerji ihtiyacı, yalıtım kalınlığının artmasıyla orantılı olarak azalma eğilimi gösterirken, yatırım ve işletme maliyetleri arasında dengeli bir çözüm aranmalıdır.

Bingöl, kış koşullarının daha sert olduğu ve ısıtma ihtiyacının belirgin şekilde arttığı bir bölge olarak öne çıkar. Yalıtım kalınlıkları ve enerji tüketimi açısından Edirne'den daha yüksek değerlere sahiptir. Bu durum, özellikle yalıtım malzemelerinin termal performansının önemini artırmakta, enerji verimliliği açısından kritik bölge olarak sınıflandırılmasını sağlamaktadır.

Kars, dört il arasında en sert iklim koşullarına sahip olup, optimum yalıtım kalınlıklarının en yüksek olduğu ve enerji ihtiyacının da en fazla olduğu bölgedir. Burada yapılan enerji tasarrufu yatırımları, uzun vadede önemli ekonomik ve çevresel faydalar sağlamaktadır. Bu yüzden Kars için yalıtım malzemelerinin performansı ve uygulanacak kalınlıklar konusunda hassas ve detaylı planlama gerekmektedir.

Sonuç olarak, her ilin iklimsel özellikleri ve ısıtma enerji ihtiyacı doğrultusunda, uygun malzeme seçimi ve yalıtım kalınlığı stratejilerinin geliştirilmesi enerji verimliliğini maksimize etmek adına kritik öneme sahiptir.

4.3. Geri Ödeme Süresi Analizi

Enerji verimliliği uygulamalarında ekonomik sürdürülebilirlik, teknik performans kadar kritik bir parametredir. Bu bağlamda, yapılan yalıtım yatırımlarının ekonomik geri dönüş süresi (geri ödeme süresi) önemli bir değerlendirme kriteri olarak ortaya çıkmaktadır. Geri ödeme süresi analizi, yalıtım uygulamasına harcanan yatırım maliyetinin, sağlanan yıllık enerji tasarrufu karşılığında kaç yıl içinde amorti edileceğini göstermektedir.

Çalışmada, her bir il için belirlenen optimum yalıtım kalınlıkları ve $\pm 0,01$ m kalınlık toleransları kapsamında hesaplanan enerji tasarrufları kullanılarak, ilgili yalıtım malzemelerinin geri ödeme süreleri ayrıntılı olarak hesaplanmıştır. Yatırım maliyetleri, malzemenin birim hacim maliyeti ve optimum kalınlık değerleri dikkate alınarak belirlenmiş; enerji maliyetleri ise bölgesel doğalgaz fiyatları ve yıllık enerji tüketimi üzerinden hesaplanmıştır.

Analiz sonuçları, geri ödeme süresinin hem malzeme özelliklerine hem de iklimsel koşullara bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Daha düşük ısıl iletkenlik değerine sahip malzemelerin, daha uzun optimum kalınlıklarının getirdiği yüksek yatırım maliyetlerine rağmen, sağladıkları enerji tasarrufu sayesinde genellikle daha kısa geri ödeme sürelerine sahip olduğu gözlenmiştir. Benzer şekilde, iklimsel olarak ısıtma ihtiyacının yüksek olduğu bölgelerde yalıtım yatırımlarının geri dönüş süresi, daha ılıman bölgelerdeki uygulamalara kıyasla daha kısa olabilmektedir.

Bununla birlikte, geri ödeme süresi hesaplamalarında kullanılan enerji fiyatları, faiz oranları ve ekonomik ömür gibi parametrelerin değişkenliği, sonuçlar üzerinde önemli etkiler yaratmaktadır. Bu

nedenle, geri ödeme süresi analizlerinin güncel ekonomik koşullar ışığında periyodik olarak revize edilmesi önerilmektedir.

Sonuç olarak, enerji tasarrufu ve ekonomik verimlilik arasındaki dengeyi sağlamada geri ödeme süresi analizleri vazgeçilmez bir araçtır. Bu çalışma kapsamında yapılan detaylı analizler, yalıtım yatırımlarının hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilirliğini değerlendirmek için sağlam bir temel oluşturmaktadır. Yatırım kararlarında bu tür çok boyutlu analizlerin dikkate alınması, enerji etkin ve maliyet açısından akılcı yapı tasarımlarının hayata geçirilmesini desteklemektedir.

4.3.1. Hatay İlinde Geri Ödeme Süresi Analizi

Tablo 4.6’da Hatay iline ait optimum yalıtım kalınlıklarına göre, HDD (Derece - Gün) ve EnergyPlus (EP) yöntemleri kullanılarak hesaplanan geri ödeme süreleri detaylı şekilde sunulmuştur. Geri ödeme süresi, yapılan yalıtım yatırımının, sağlanan enerji tasarrufları yoluyla kaç yıl içinde kendini amorti edeceğini gösteren önemli bir ekonomik performans göstergesidir. Bu analiz, sadece teknik etkinliğin değil, aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirliğin de değerlendirilmesini sağlayarak, enerji verimliliği yatırımlarının fizibilitesini ortaya koymaktadır. Böylece, farklı malzeme ve yalıtım kalınlığı kombinasyonlarının yatırım geri dönüş sürelerine etkisi net bir şekilde karşılaştırılabilmektedir.

Tablo 4.6. Hatay ili için optimum yalıtım kalınlıklarına göre HDD ve EnergyPlus yöntemleri ile hesaplanan geri ödeme süreleri (yıl)

		x_{opt}	HDD	EP
x_{opt}	ST1	0,063	4,079	6,956
	ST2	0,072	3,756	6,432
	ST3	0,093	3,240	5,528
	ST4	0,086	3,315	5,668
	ST5	0,099	2,782	4,784
	ST6	0,130	2,201	3,782
$x_{opt} - 0,01$	ST1	0,053	3,432	7,692
	ST2	0,062	3,237	6,958
	ST3	0,083	2,893	5,799
	ST4	0,076	2,929	5,990
	ST5	0,089	2,501	4,979
	ST6	0,120	2,032	3,865
$x_{opt} + 0,01$	ST1	0,073	4,726	6,441
	ST2	0,082	4,275	6,048
	ST3	0,103	3,587	5,233
	ST4	0,096	3,702	5,421
	ST5	0,109	3,062	4,630
	ST6	0,140	2,370	3,710

Optimum kalınlık senaryosunda, ST1 malzemesi için HDD yöntemine göre geri ödeme süresi yaklaşık 4,08 yıl olarak belirlenirken, EP simülasyonunda bu süre 6,96 yıla çıkmaktadır. Daha gelişmiş

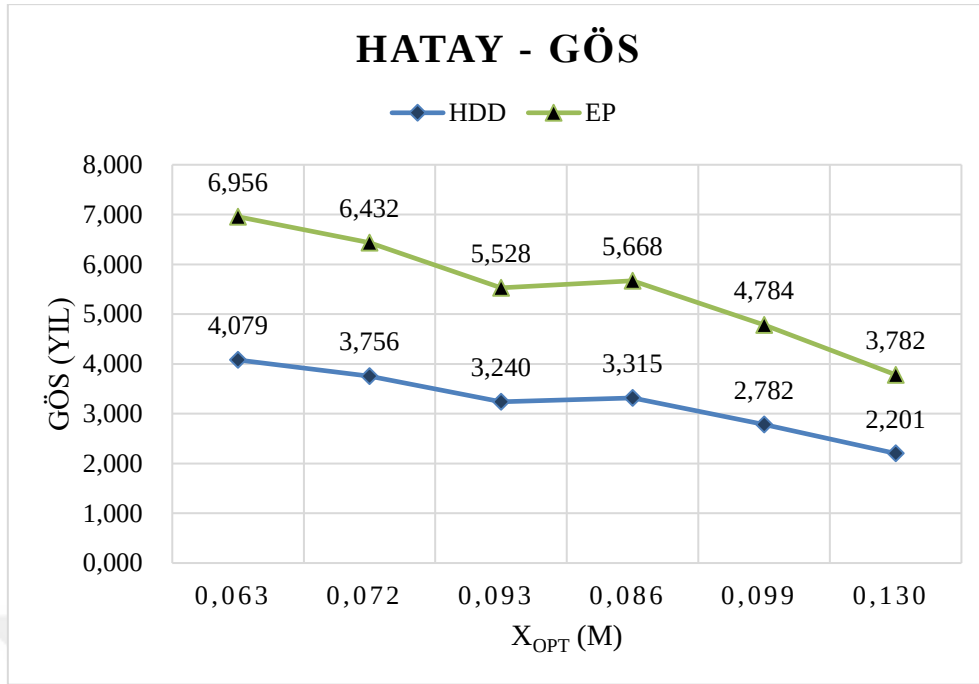
yalıtım performansına sahip ST6 malzemesinde ise geri ödeme süreleri HDD yöntemi ile 2,20 yıl, EP ile 3,78 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu durum, yüksek yalıtım kalitesinin enerji tasarrufu sağlama potansiyelini artırarak, yatırımların daha kısa sürede kendini amorti etmesine olanak verdiğini göstermektedir.

Yalıtım kalınlığının 0,01 m azaltılması durumunda ($x_{opt} - 0,01$), HDD yönteminde geri ödeme süreleri ST1 malzemesi için 3,43 yıla düşerken, EP’de ise 7,69 yıla yükselmektedir. Bu durum, uygulama sahasında yaşanabilecek kalınlık azalmalarının enerji tasarrufu kapasitesini olumsuz etkileyerek ekonomik geri dönüş süresini uzatabileceğine işaret etmektedir. Buna karşılık, kalınlığın 0,01 m artırılması ($x_{opt} + 0,01$) HDD yöntemiyle ST1 için geri ödeme süresini 4,73 yıla çıkarırken, EP yöntemiyle bu süre 6,44 yıla gerilemektedir. Kalınlık artışı, yatırım maliyetini artırsa da sağlanan enerji tasarrufu nedeniyle geri ödeme süresi üzerinde olumlu bir denge yaratmaktadır.

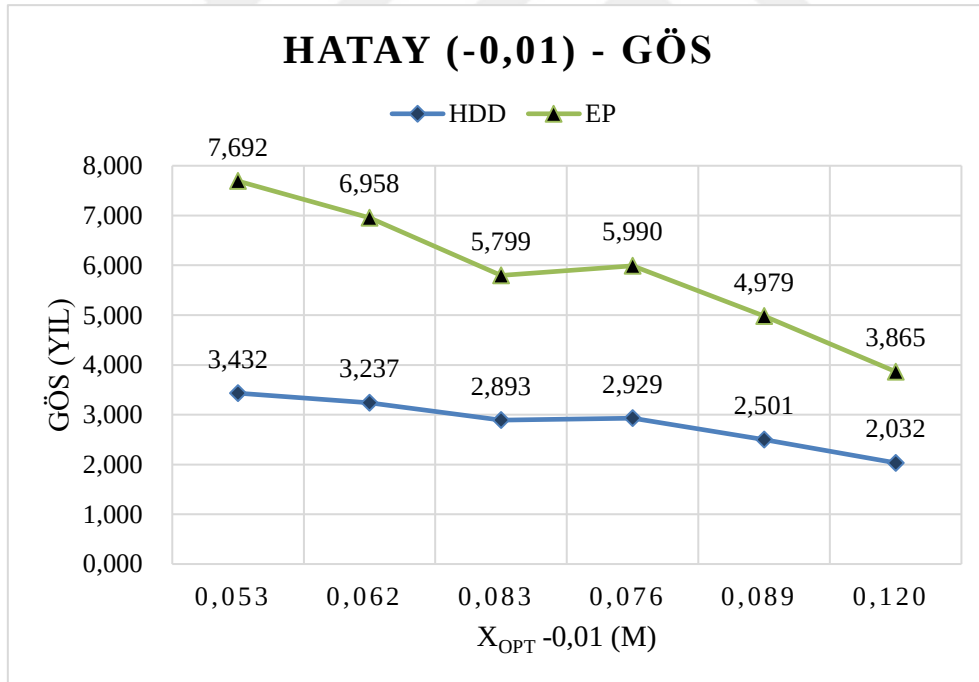
Şekil 4.14, Hatay ilinde farklı yalıtım kalınlıkları için her iki yöntemle hesaplanan geri ödeme sürelerinin karşılaştırmalı görsel sunumunu yapmaktadır. Grafikler hem HDD hem de EnergyPlus sonuçlarının kalınlık değişimlerine karşı farklı duyarlılıklar sergilediğini ortaya koymakta; bu da saha uygulamalarında kalınlık toleranslarının ekonomik sürdürülebilirlik üzerindeki önemini vurgulamaktadır.

Ek olarak, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da sırasıyla optimum yalıtım kalınlığındaki 0,01 m azalma ($x_{opt} - 0,01$ m) ve 0,01 m artış ($x_{opt} + 0,01$ m) senaryolarının geri ödeme süresi üzerindeki etkileri detaylı şekilde gösterilmektedir. Bu grafikler, kalınlıkta yapılabilecek küçük değişikliklerin ekonomik geri dönüş sürelerini nasıl etkileyebileceğini net olarak ortaya koymakta, uygulama sırasında hassasiyet ve kalite kontrolün önemini bir kez daha vurgulamaktadır.

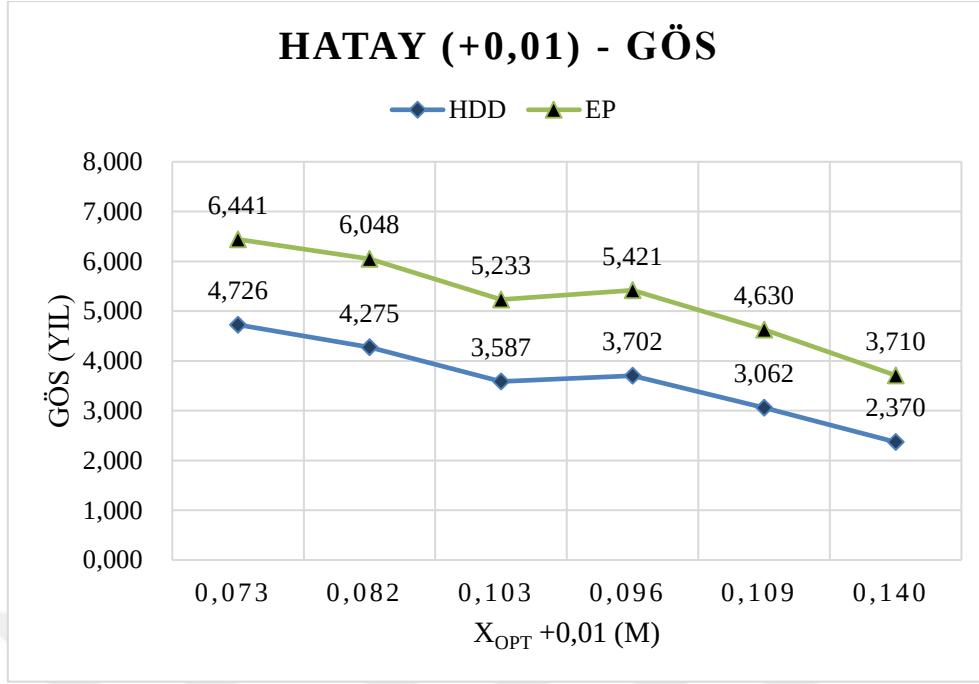
Sonuç olarak, tasarım ve uygulama aşamalarında kalınlık hassasiyetinin korunması hem enerji verimliliği hem de ekonomik geri dönüş açısından büyük önem taşımaktadır.



Şekil 4.14. Hatay ili için x_{opt} yalıtım kalınlığında HDD ve EnergyPlus yöntemlerine göre geri ödeme süresi karşılaştırması



Şekil 4.15. Hatay ili için $x_{opt} - 0,01$ m yalıtım kalınlığında HDD ve EnergyPlus yöntemlerine göre geri ödeme süresi karşılaştırması



Şekil 4.16. Hatay ili için $x_{opt} + 0,01$ m yalıtım kalınlığında HDD ve EnergyPlus yöntemlerine göre geri ödeme süresi karşılaştırması

4.3.2. Edirne İlinde Geri Ödeme Süresi Analizi

Tablo 4.6’da Edirne iline ait optimum yalıtım kalınlıkları için HDD (Derece-Gün) ve EnergyPlus (EP) yöntemleriyle hesaplanan geri ödeme süreleri verilmiştir. Bu analiz, farklı yalıtım kalınlıkları ve malzeme türleri bazında ekonomik etkinliğin anlaşılmasına olanak sağlamaktadır.

Tablo 4.7. Edirne ili için optimum yalıtım kalınlıklarına göre HDD ve EnergyPlus yöntemleri ile hesaplanan geri ödeme süreleri (yıl)

		x_{opt}	HDD	EP
x_{opt}	ST1	0,082	3,698	5,574
	ST2	0,092	3,385	5,123
	ST3	0,115	2,903	4,415
	ST4	0,106	2,973	4,531
	ST5	0,119	2,485	3,824
	ST6	0,154	1,961	3,026
$x_{opt} - 0,01$	ST1	0,072	3,247	5,940
	ST2	0,082	3,016	5,388
	ST3	0,105	2,650	4,557
	ST4	0,096	2,692	4,701
	ST5	0,109	2,277	3,929
	ST6	0,144	1,834	3,075
$x_{opt} + 0,01$	ST1	0,092	4,148	5,297
	ST2	0,102	3,755	4,915
	ST3	0,125	3,157	4,298
	ST4	0,116	3,254	4,394
	ST5	0,129	2,693	3,737

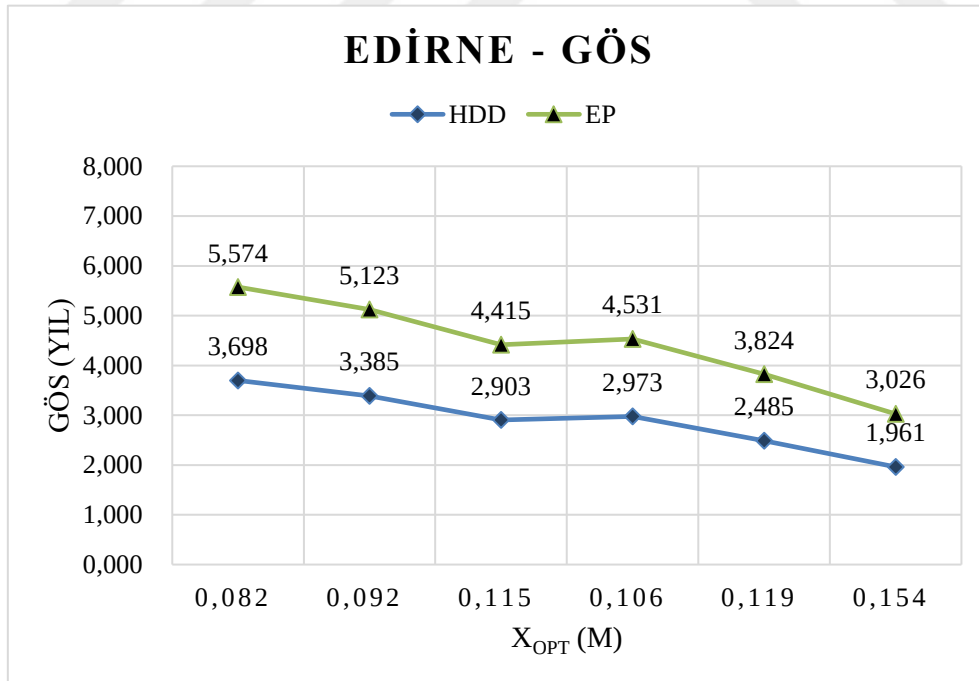
ST6	0,164	2,089	2,990
-----	-------	-------	-------

Optimum kalınlık senaryosunda, ST1 malzemesi için HDD yöntemi geri ödeme süresini 3,70 yıl olarak verirken, EP yöntemiyle bu süre 5,57 yıl olarak hesaplanmıştır. Daha düşük ısı iletkenliğe sahip ST6 malzemesinde ise geri ödeme süreleri sırasıyla 1,96 yıl ve 3,03 yıl olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, malzeme kalitesinin yatırım geri dönüş süresine olan etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

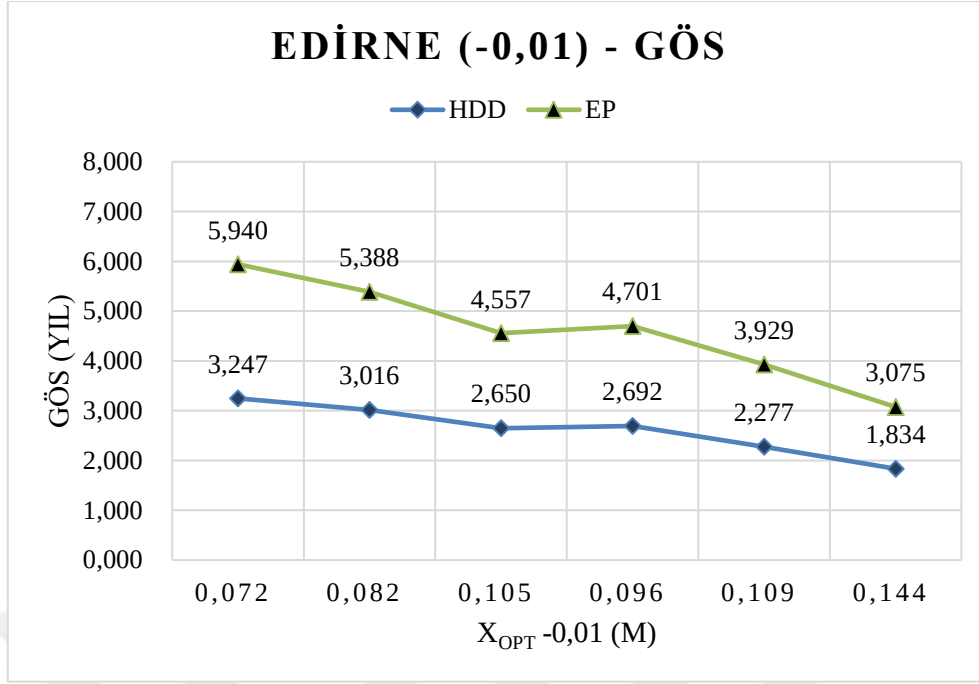
Yalıtım kalınlığının 0,01 m azaltılması durumunda ($x_{opt} - 0,01$), HDD yöntemine göre ST1 malzemesinin geri ödeme süresi 3,25 yıla düşerken, EnergyPlus simülasyonunda 5,94 yıla yükselmektedir. Kalınlığın 0,01 m artırılması durumunda ($x_{opt} + 0,01$) ise HDD yöntemi 4,15 yıl, EP yöntemi ise 5,30 yıl geri ödeme süresi vermektedir. Bu değişimler, saha uygulamalarında kalınlık toleranslarının ekonomik performansa etkisini göstermektedir.

Şekil 4.17, Edirne için optimum kalınlıkta geri ödeme sürelerinin her iki yöntemle karşılaştırılmasını sunarken, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19, kalınlıkta $\pm 0,01$ m değişikliklerin geri ödeme süresi üzerindeki etkilerini detaylandırmaktadır. Bu grafikler, uygulama hassasiyetinin yatırım geri dönüş süresindeki kritik rolünü vurgulamaktadır.

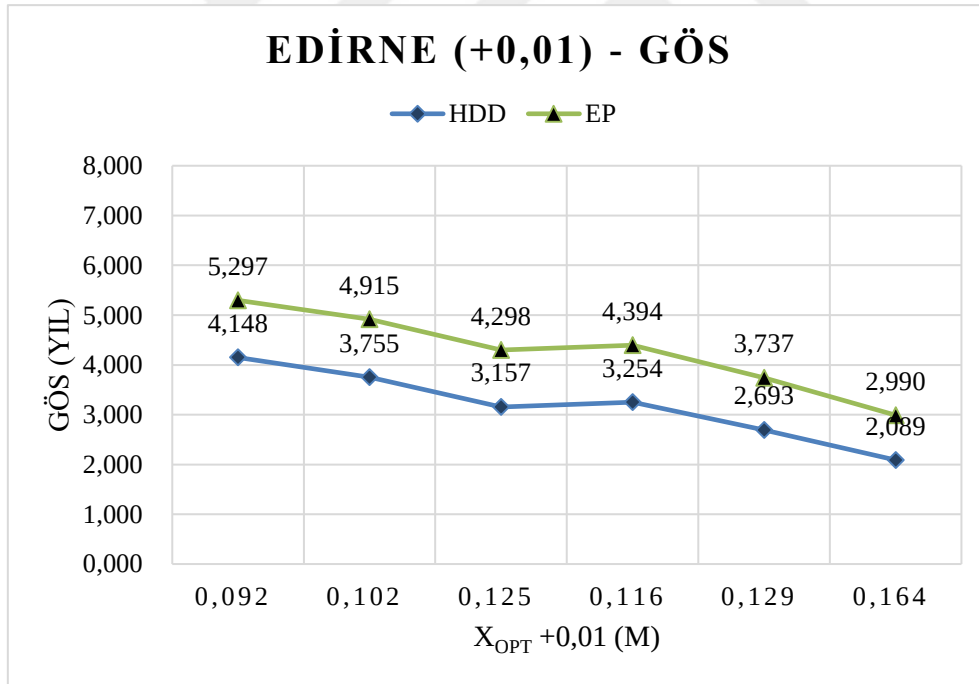
Sonuç olarak, Edirne’de yapılan analizler, geri ödeme sürelerinin hem yalıtım kalınlığı hem de malzeme seçimine bağlı olarak değiştiğini göstermekte; saha uygulamalarındaki hassasiyet ve kalite kontrolün ekonomik sürdürülebilirlik için önemini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.17. Edirne ili için x_{opt} yalıtım kalınlığında HDD ve EnergyPlus yöntemlerine göre geri ödeme süresi karşılaştırması



Şekil 4.18. Edirne ili için $x_{opt} - 0,01$ m yalıtım kalınlığında HDD ve EnergyPlus yöntemlerine göre geri ödeme süresi karşılaştırması



Şekil 4.19. Edirne ili için $x_{opt} + 0,01$ m yalıtım kalınlığında HDD ve EnergyPlus yöntemlerine göre geri ödeme süresi karşılaştırması

4.3.3. Bingöl İlinde Geri Ödeme Süresi Analizi

Tablo 4.6’da Bingöl ilinde optimum yalıtım kalınlıkları için HDD ve EnergyPlus (EP) yöntemleriyle hesaplanan geri ödeme süreleri sunulmaktadır. Geri ödeme süresi, yapılan yalıtım yatırımlarının enerji tasarrufu karşılığında kaç yıl içinde amorti edileceğini belirleyen önemli bir ekonomik göstergedir. Bu analiz, yalıtım kalınlığı ve malzeme çeşidine göre yatırımın ekonomik verimliliğini ortaya koymaktadır.

Optimum kalınlık senaryosunda, ST1 malzemesi için HDD yöntemi 3,17 yıl geri ödeme süresi verirken, EnergyPlus yöntemi 5,08 yıl olarak hesaplanmıştır. Daha yüksek yalıtım performansına sahip ST6 malzemesinde bu süreler sırasıyla 1,65 yıl ve 2,64 yıl olarak belirlenmiştir. Bu durum, düşük ısı iletkenlik değerine sahip malzemelerin yatırım geri dönüş süresini kısalttığını göstermektedir.

Yalıtım kalınlığı 0,01 m azaltıldığında ($x_{opt} - 0,01$ m), HDD yöntemi ST1 için 2,89 yıl, EP yöntemi ise 5,26 yıl geri ödeme süresi verirken, kalınlık 0,01 m artırıldığında ($x_{opt} + 0,01$ m) bu süreler sırasıyla 3,44 yıl ve 4,92 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu farklılıklar, saha uygulamalarındaki kalınlık toleranslarının ekonomik performansa etkisini yansıtmaktadır.

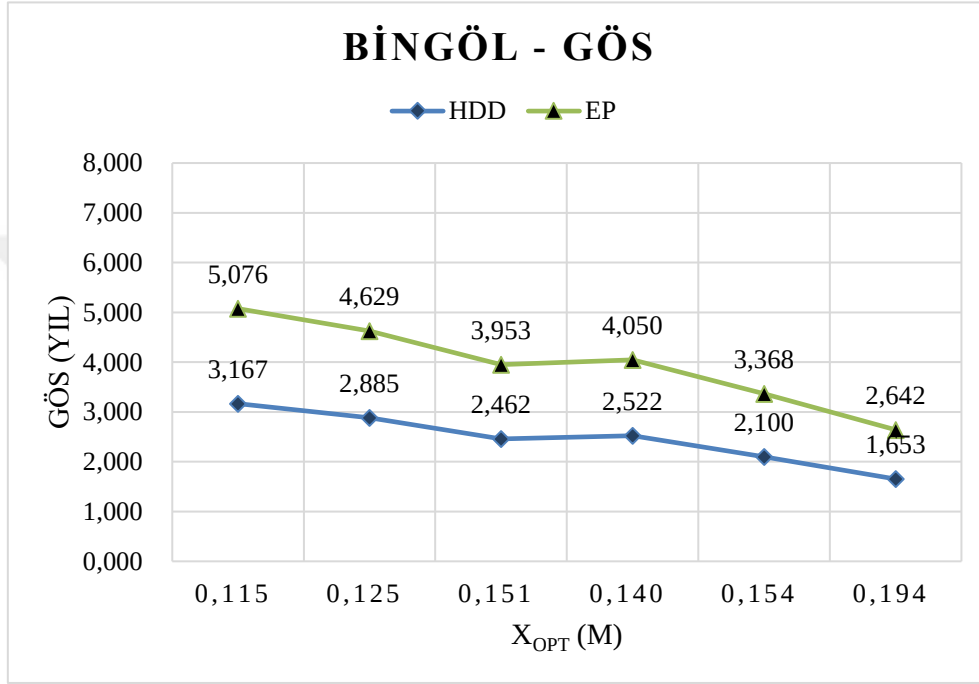
Şekil 4.20, Bingöl ilinde optimum kalınlıkta geri ödeme sürelerinin HDD ve EP yöntemleriyle karşılaştırmasını verirken; Şekil 4.21 ve Şekil 4.22, kalınlıktaki $\pm 0,01$ m değişikliklerin geri ödeme süresi üzerindeki etkilerini detaylı şekilde göstermektedir. Bu grafikler, uygulama hassasiyetinin yatırım geri dönüşündeki önemini vurgulamaktadır.

Sonuç olarak, Bingöl’de gerçekleştirilen geri ödeme süresi analizleri, ekonomik verimlilik ve enerji tasarrufu dengesinin sağlanmasında malzeme seçimi ve uygulama kalınlığı hassasiyetinin kritik rol oynadığını göstermektedir. Bu bulgular, enerji etkin bina tasarımında ekonomik planlama ve saha uygulamalarına özen gösterilmesinin gerekliliğini desteklemektedir.

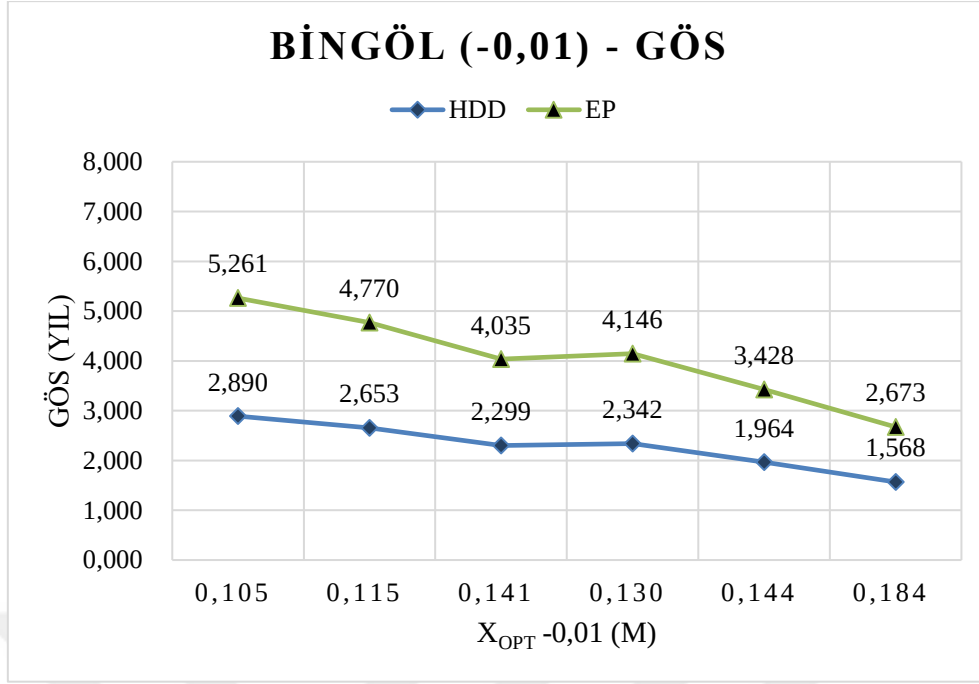
Tablo 4.8. Bingöl ili için optimum yalıtım kalınlıklarına göre HDD ve EnergyPlus yöntemleri ile hesaplanan geri ödeme süreleri (yıl)

		x_{opt}	HDD	EP
x_{opt}	ST1	0,115	3,167	5,076
	ST2	0,125	2,885	4,629
	ST3	0,151	2,462	3,953
	ST4	0,140	2,522	4,050
	ST5	0,154	2,100	3,368
	ST6	0,194	1,653	2,642
$x_{opt} - 0,01$	ST1	0,105	2,890	5,261
	ST2	0,115	2,653	4,770
	ST3	0,141	2,299	4,035
	ST4	0,130	2,342	4,146
	ST5	0,144	1,964	3,428

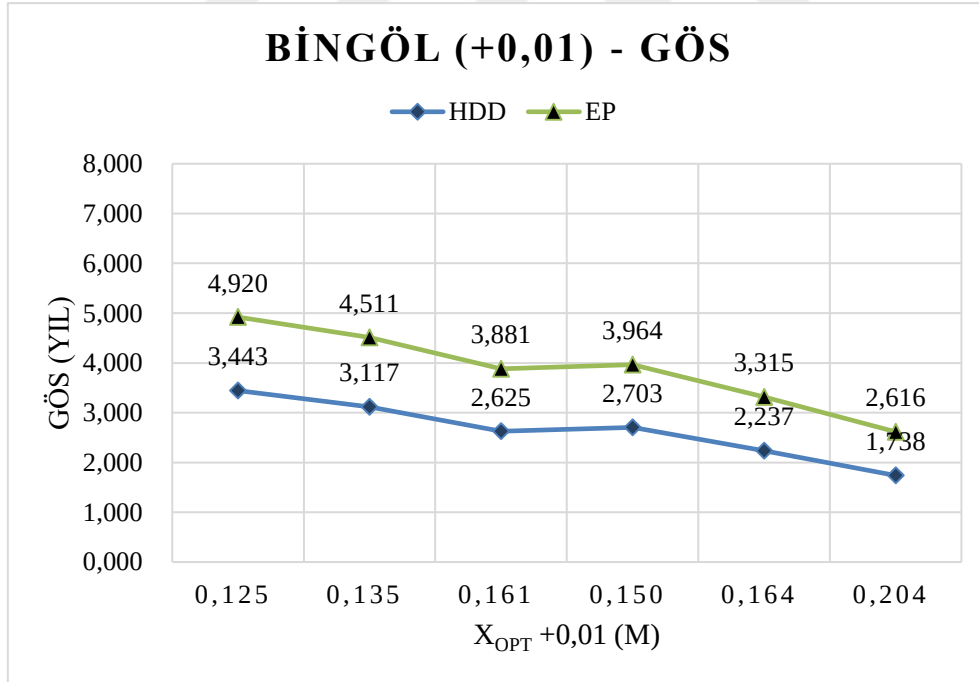
$x_{opt} + 0,01$	ST6	0,184	1,568	2,673
	ST1	0,125	3,443	4,920
	ST2	0,135	3,117	4,511
	ST3	0,161	2,625	3,881
	ST4	0,150	2,703	3,964
	ST5	0,164	2,237	3,315
	ST6	0,204	1,738	2,616



Şekil 4.20. Bingöl ili için x_{opt} yalıtım kalınlığında HDD ve EnergyPlus yöntemlerine göre geri ödeme süresi karşılaştırması



Şekil 4.21. Bingöl ili için $x_{opt} - 0,01$ m yalıtım kalınlığında HDD ve EnergyPlus yöntemlerine göre geri ödeme süresi karşılaştırması



Şekil 4.22. Bingöl ili için $x_{opt} + 0,01$ m yalıtım kalınlığında HDD ve EnergyPlus yöntemlerine göre geri ödeme süresi karşılaştırması

4.3.4. Kars İlinde Geri Ödeme Süresi Analizi

Tablo 4.7’de Kars ilinde optimum yalıtım kalınlıkları için HDD ve EnergyPlus (EP) yöntemleriyle hesaplanan geri ödeme süreleri verilmiştir. Bu analiz, yalıtım yatırımlarının ekonomik açıdan geri dönüş süresini malzeme ve kalınlık varyasyonları çerçevesinde değerlendirmektedir.

Tablo 4.9. Kars ili için optimum yalıtım kalınlıklarına göre HDD ve EnergyPlus yöntemleri ile hesaplanan geri ödeme süreleri (yıl)

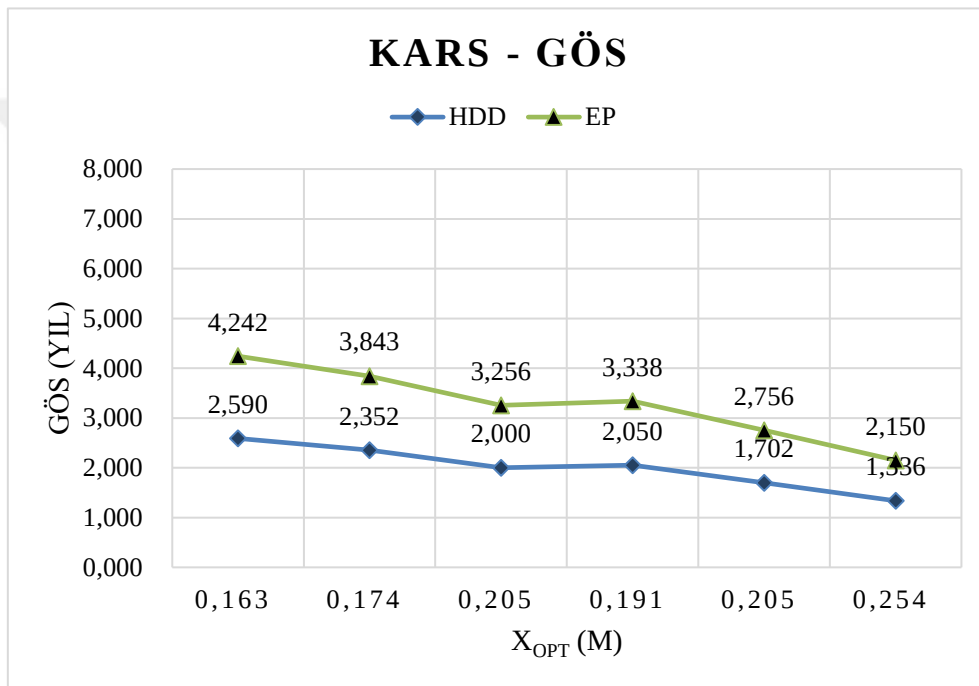
		x_{opt}	HDD	EP
x_{opt}	ST1	0,163	2,590	4,242
	ST2	0,174	2,352	3,843
	ST3	0,205	2,000	3,256
	ST4	0,191	2,050	3,338
	ST5	0,205	1,702	2,756
	ST6	0,254	1,336	2,150
$x_{opt} - 0,01$	ST1	0,153	2,431	4,329
	ST2	0,164	2,217	3,911
	ST3	0,195	1,902	3,298
	ST4	0,181	1,942	3,386
	ST5	0,195	1,619	2,790
	ST6	0,244	1,284	2,166
$x_{opt} + 0,01$	ST1	0,173	2,748	4,164
	ST2	0,184	2,487	3,782
	ST3	0,215	2,097	3,217
	ST4	0,201	2,157	3,294
	ST5	0,215	1,785	2,730
	ST6	0,264	1,389	2,135

Optimum kalınlık senaryosunda, ST1 malzemesi için HDD yöntemine göre geri ödeme süresi 2,59 yıl iken, EP yöntemiyle 4,24 yıl olarak bulunmuştur. Daha yüksek yalıtım performansına sahip ST6 malzemesinde ise bu süreler sırasıyla 1,34 yıl ve 2,15 yıl olarak hesaplanmıştır. Düşük ısı iletkenlik değerine sahip malzemelerin yatırım geri dönüşünü kısalttığı gözlenmiştir.

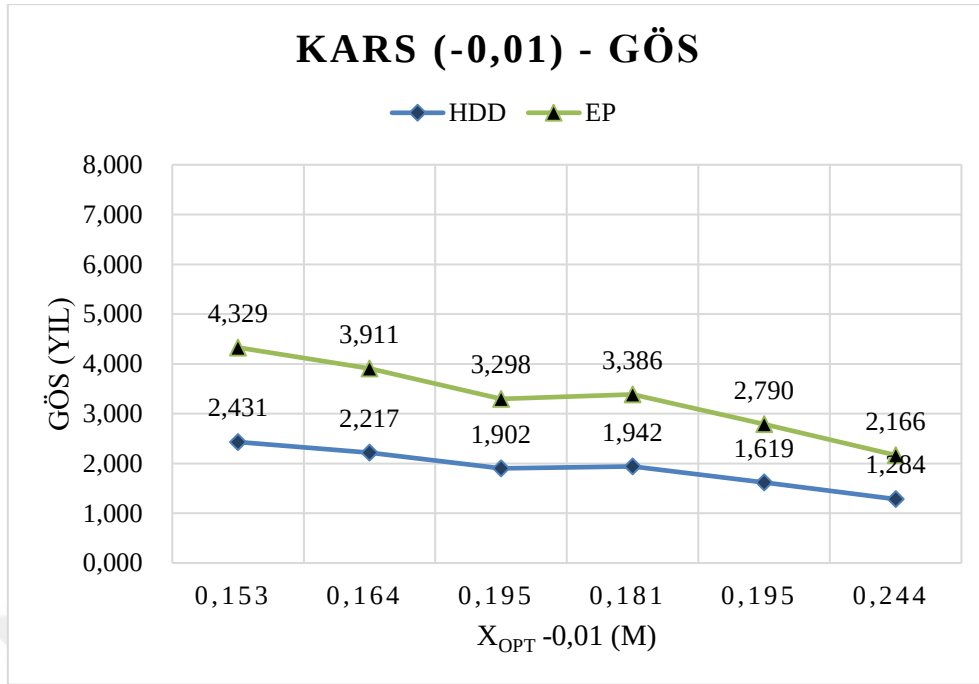
Yalıtım kalınlığı 0,01 m azaltıldığında ($x_{opt} - 0,01$ m), HDD yöntemi ST1 için 2,43 yıl, EnergyPlus yöntemi ise 4,33 yıl geri ödeme süresi verirken; kalınlık 0,01 m artırıldığında ($x_{opt} + 0,01$ m) bu değerler sırasıyla 2,75 yıl ve 4,16 yıl olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar, uygulama aşamasında kalınlık toleranslarının geri ödeme süresi üzerinde belirgin etkiler yaratabileceğini göstermektedir.

Şekil 4.23, Kars ilinde optimum kalınlıkta geri ödeme sürelerinin HDD ve EP yöntemleriyle karşılaştırmasını sunarken; Şekil 4.24 ve Şekil 4.25, kalınlıkta $\pm 0,01$ m değişikliklerin geri ödeme süresine etkilerini detaylı şekilde göstermektedir. Bu grafikler, sahada yapılacak uygulamalarda hassasiyetin ekonomik verimlilik açısından ne denli kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

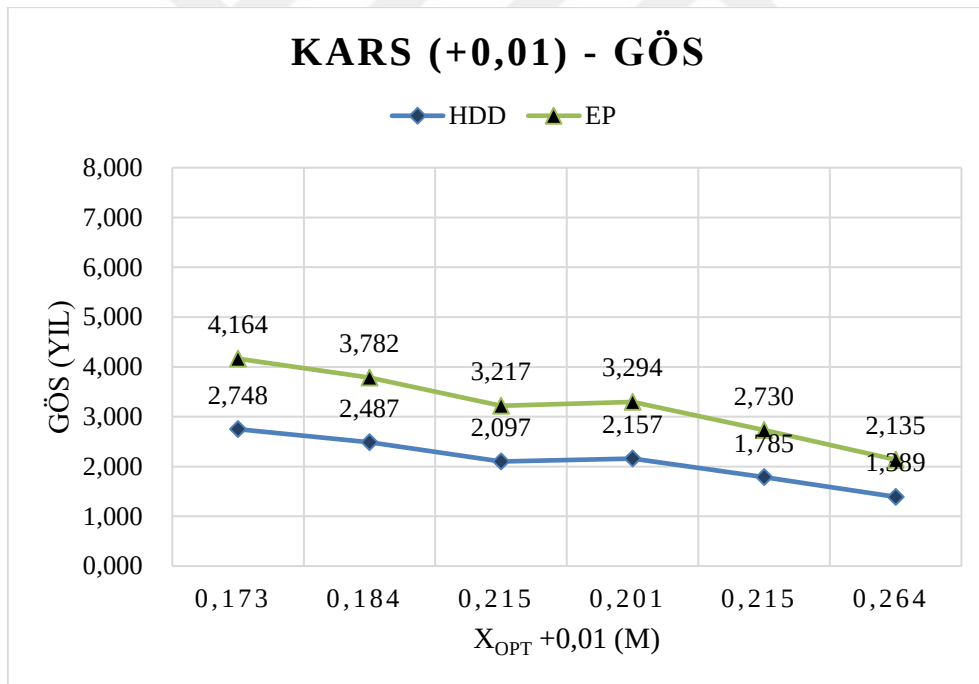
Sonuç olarak, Kars ilinde yapılan analizler, yüksek ısıtma gereksinimi ve zorlu iklim koşullarının geri ödeme sürelerini kısalttığını; ayrıca malzeme seçimi ve uygulama kalınlığındaki hassasiyetin ekonomik sürdürülebilirlik açısından temel faktörler olduğunu doğrulamaktadır. Bu bağlamda, enerji etkin bina tasarımında ekonomik ve teknik değerlendirmelerin bir arada yürütülmesi gerekmektedir.



Şekil 4.23. Kars ili için x_{opt} yalıtım kalınlığında HDD ve EnergyPlus yöntemlerine göre geri ödeme süresi karşılaştırması



Şekil 4.24. Kars ili için $x_{opt} - 0,01$ m yalıtım kalınlığında HDD ve EnergyPlus yöntemlerine göre geri ödeme süresi karşılaştırması



Şekil 4.25. Kars ili için $x_{opt} + 0,01$ m yalıtım kalınlığında HDD ve EnergyPlus yöntemlerine göre geri ödeme süresi karşılaştırması

4.3.5. Farklı İller İçin Geri Ödeme Sürelerinin Genel Değerlendirmesi

Bu bölümde, Hatay, Edirne, Bingöl ve Kars illerine ait geri ödeme süresi analiz sonuçları kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir. Her ilin kendine özgü iklim ve ekonomik koşulları, yalıtım yatırımlarının geri dönüş sürelerini doğrudan etkilemektedir.

Hatay gibi daha ılıman iklime sahip illerde, yalıtım yatırımlarının geri ödeme süreleri genel olarak daha uzun olmasına rağmen, düşük yatırım maliyetleri ve ılıman hava koşullarına bağlı olarak enerji tasarrufları sınırlı kalmaktadır. Buna karşılık, Edirne ve Bingöl gibi ılıman ile soğuk iklim özelliklerini taşıyan illerde geri ödeme süreleri daha kısa olmakta, yalıtımın enerji tüketimine olan olumlu etkisi belirginleşmektedir. Bu illerde, ısı iletkenliği düşük malzemelerin tercih edilmesi geri dönüş süresini azaltmada kritik rol oynamaktadır.

Kars gibi sert ve soğuk iklime sahip bölgelerde ise, yüksek ısıtma ihtiyacı nedeniyle yalıtım yatırımlarının geri ödeme süreleri en kısa seviyelerde gerçekleşmektedir. Yüksek ısı kayıplarının önlenmesi ve enerji maliyetlerinin artması, burada yapılan yalıtım yatırımlarının ekonomik geri dönüşünü hızlandırmaktadır. Bu durum, yatırımın hem teknik hem ekonomik açıdan daha avantajlı olduğunu göstermektedir.

Genel olarak, geri ödeme süreleri, malzeme seçiminden yalıtım kalınlığına, iklim şartlarından ekonomik parametrelere kadar birçok faktöre bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu bağlamda, farklı illerde uygulanacak yalıtım stratejilerinin yerel koşullara uygun şekilde optimize edilmesi, yatırımın ekonomik verimliliğini artıracaktır. Ayrıca, saha uygulamalarındaki işçilik kalitesi ve uygulama hassasiyetinin de geri ödeme süresi üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Bu nedenle, ekonomik değerlendirmelerde hem teknik hem de uygulama boyutlarının bütüncül olarak ele alınması gerekmektedir.

4.4. Statik ve Dinamik Yöntemlerin Yorumlanması

Bu tez çalışmasında, yapıların yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacını belirlemek için kullanılan statik derece-gün (HDD) yöntemi ile dinamik EnergyPlus simülasyonları arasında önemli farklar gözlemlenmiştir. Çalışmada Hatay, Edirne, Bingöl ve Kars illerinde elde edilen veriler ışığında, HDD yönteminin enerji tüketim tahminlerinin EnergyPlus simülasyonlarına kıyasla belirgin şekilde düşük olduğu ortaya konmuştur.

Örneğin, Hatay ili için ST1 malzemesinde optimum yalıtım kalınlığı (x_{opt}) 0,063 m olarak belirlenmiş ve HDD yöntemi yıllık 28,230 kWh enerji tüketimi hesaplamıştır. Ancak EnergyPlus simülasyonlarında aynı koşullar altında enerji tüketimi 97,047 kWh olarak bulunmuş; bu da HDD değerinin yaklaşık 3,44 kat üzerindedir. Benzer eğilimler diğer iller ve malzeme tipleri için de geçerlidir. Edirne’de ST1 için HDD ile 31,836 kWh, EnergyPlus ile 131,405 kWh; Bingöl’de 37,973 kWh’ye karşı 165,088 kWh; Kars’ta ise 47,197 kWh’ye karşı 235,136 kWh değerleri hesaplanmıştır.

Bu farkların temel nedeni, EnergyPlus simülasyonlarının sadece dış ortam sıcaklığına değil, aynı zamanda saatlik iklim verileri, bina geometrisi, iç kazançlar, güneş radyasyonu, kullanıcı davranışları ve HVAC sistemi performansına ilişkin çok sayıda değişkeni entegre ederek detaylı analizler gerçekleştirmesidir. Buna karşılık, HDD yöntemi dış sıcaklık ve yapı elemanı özelliklerine

dayalı basitleştirilmiş hesaplamalar yapmaktadır. Bu nedenle HDD yöntemi, genel olarak enerji tüketimini daha düşük gösterme eğilimindedir.

Yalıtım kalınlığındaki $\pm 0,01$ m'lik değişiklikler, her iki yöntemle yapılan analizlerde dahi enerji tüketimi ve ekonomik geri ödeme süresi üzerinde anlamlı etkiler yaratmaktadır. HDD yöntemi bu değişimlere karşı daha hassas sonuçlar verirken, EnergyPlus simülasyonları daha tutarlı ve dengeli sonuçlar ortaya koymaktadır. Bu durum, uygulama toleranslarının ve işçilik kalitesinin bina enerji performansına etkisinin büyüklüğünü göstermektedir.

Sonuç olarak, statik HDD yöntemi hızlı ve maliyeti düşük ön değerlendirmeler için uygun olmakla beraber, bina enerji performansının tam olarak analiz edilmesi, optimum yalıtım kalınlığının hassas belirlenmesi ve ekonomik analizlerin doğru yapılabilmesi için dinamik EnergyPlus simülasyonlarının mutlaka desteklenmesi gerekmektedir. İki yöntemin birlikte kullanımı hem pratiklik hem de ayrıntıcılık açısından enerji verimliliği çalışmalarında kapsamlı ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu araştırma kapsamında elde edilen optimum yalıtım kalınlığı değerleri, iklim koşulları ve kullanılan malzemelerin termal özellikleriyle birlikte dikkate alındığında önemli farklılıklar göstermektedir. Örneğin, Hatay ilinde ST1 malzemesi için hesaplanan optimum kalınlık 0,063 m iken, aynı malzeme Kars'ta yaklaşık üç kat artarak 0,163 m'ye ulaşmıştır. Bu durum, soğuk iklimlerin yalıtım ihtiyacı üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Malzeme bazında yapılan değerlendirmeler de benzer şekilde farklılıklar göstermektedir. Örneğin, düşük ısı iletkenlik değerine sahip ST6 malzemesinin optimum kalınlığı Hatay'da 0,130 m, Kars'ta ise 0,254 m olarak hesaplanmıştır. Bu, malzemenin termal performansının, optimum yalıtım kalınlığını doğrudan etkileyen bir faktör olduğunu göstermektedir. ST6 malzemesi, daha yüksek ısı iletkenliğe sahip ST1 malzemesine göre yaklaşık %40 daha düşük kalınlıkla benzer enerji tasarrufu sağlama kapasitesine sahiptir.

Sonuç olarak, optimum yalıtım kalınlığı hesaplamalarında bölgesel iklim koşulları, malzemenin ısı özellikleri ve uygulama hassasiyetinin dikkate alınarak yapılan analizler önemlidir. Yalıtım kalınlığındaki $\pm 0,01$ m gibi küçük değişikliklerin bile enerji verimliliği açısından önemli etkiler yaratabileceği vurgulanmaktadır.

Yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı ($Q_{yıl}$) hesaplamaları, kullanılan statik derece-gün (HDD) yöntemi ile dinamik EnergyPlus (EP) simülasyonları arasında belirgin farklar ortaya koymuştur. Örneğin, Hatay'da ST1 malzemesi için HDD yöntemiyle hesaplanan yıllık enerji ihtiyacı 28,230 kWh iken, EnergyPlus simülasyonunda bu değer 97,047 kWh'ye ulaşmıştır. Bu fark, dinamik simülasyonların iç ve dış kazançlar, iklim verileri ve bina özelliklerini daha ayrıntılı modellemesi nedeniyle ortaya çıkmaktadır.

Benzer şekilde, diğer illerde de bu farklar gözlemlenmiştir. Örneğin, Edirne'de ST1 malzemesi için HDD yöntemiyle hesaplanan yıllık enerji ihtiyacı 31,836 kWh iken, EnergyPlus simülasyonunda 131,405 kWh olarak raporlanmıştır. Bu farklar, soğuk iklim koşullarının enerji ihtiyacı üzerindeki doğrudan etkisini göstermektedir. Bingöl ve Kars gibi daha soğuk bölgelerde ise enerji ihtiyacı daha da artmaktadır.

Yalıtım kalınlığındaki $\pm 0,01$ m'lik değişiklikler, özellikle statik HDD yöntemi ile yapılan hesaplamalarda daha belirgin bir artışa yol açmıştır. Hatay'da ST1 için kalınlık 0,01 m azaltıldığında yıllık enerji tüketimi HDD yöntemiyle %7,2, EnergyPlus ile %1,4 oranında artarken, kalınlık 0,01 m artırıldığında HDD'de %6,3, EnergyPlus'ta ise %1,2 oranında bir azalma gözlemlenmiştir. Bu veriler, statik yöntemlerin küçük kalınlık değişimlerine karşı daha duyarlı olduğunu, dinamik simülasyonların ise daha dengeli ve gerçekçi bir tepki verdiğini ortaya koymaktadır.

Kars gibi soğuk bölgelerde ise küçük kalınlık sapmalarının enerji tüketimindeki etkisi daha belirgin olmaktadır. ST6 malzemesinin optimum kalınlığı 0,254 m iken, kalınlık sapmalarının geri ödeme sürelerini nasıl etkilediği de analiz edilmiştir. Bu durum, yalıtım uygulamalarında hassasiyetin kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, dinamik simülasyonlar, iç yükler, bina geometrisi ve gerçek iklim verilerini dikkate alarak, daha kapsamlı ve gerçekçi sonuçlar sunmaktadır. Statik yöntemler ise hızlı ve maliyetsiz ön değerlendirmeler için uygun olmasına rağmen, dinamik simülasyonlar enerji verimliliğini optimize etmek için daha güvenilir bir araçtır.

Enerji verimliliği yatırımlarının ekonomik sürdürülebilirliği açısından geri ödeme süresi (GÖS) hesaplamaları önemli farklılıklar göstermektedir. Hatay, Edirne, Bingöl ve Kars illeri için yapılan analizlerde, derece-gün (HDD) ve EnergyPlus (EP) yöntemlerine göre geri ödeme sürelerinde farklılıklar gözlemlenmiştir. Örneğin, Hatay’da ST1 malzemesi için HDD yöntemiyle geri ödeme süresi 4,08 yıl, EnergyPlus simülasyonunda ise 6,96 yıl olarak hesaplanmıştır. En yüksek performanslı ST6 malzemesi için ise bu süreler sırasıyla 2,20 yıl ve 3,78 yıl olarak bulunmuştur. Bu farklar, dinamik simülasyonların enerji tasarrufunu daha doğru şekilde değerlendirmesi nedeniyle ortaya çıkmaktadır.

Soğuk iklim koşullarına sahip Bingöl ve Kars illerinde ise geri ödeme süreleri daha kısa olmuştur. Bingöl’de ST1 malzemesi için HDD yöntemiyle geri ödeme süresi 3,17 yıl, EP yönteminde ise 5,08 yıl olarak hesaplanırken, Kars’ta ST6 için bu süreler sırasıyla 1,34 yıl (HDD) ve 2,15 yıl (EP) olarak belirlenmiştir. Bu durum, yüksek ısıtma ihtiyacının yalıtım yatırımlarının ekonomik geri dönüşünü hızlandırdığını göstermektedir.

Geri ödeme süresi analizlerinde küçük kalınlık değişikliklerinin ($\pm 0,01$ m) enerji tüketimi ve geri ödeme süreleri üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Hatay’da ST1 malzemesi için kalınlık 0,01 m azaltıldığında geri ödeme süresi HDD yöntemiyle 3,43 yıla düşerken, EP yönteminde 7,69 yıla yükselmiştir. Bu da saha uygulamalarındaki küçük toleransların ekonomik sonuçlar üzerindeki etkisini vurgulamaktadır.

Sonuç olarak, geri ödeme süresi hesaplamaları, optimum yalıtım kalınlıkları ve iklim koşulları tarafından şekillendirilmekte olup, soğuk iklimlerde geri ödeme süreleri daha hızlı gerçekleşmektedir. Yalıtım malzemesi seçiminde yalnızca teknik özellikler değil, bölgesel iklim faktörleri ve ekonomik geri dönüş süreleri de dikkate alınmalıdır.

5.2 Öneriler

Bu çalışma, kompozit yalıtım malzemelerinin enerji verimliliği üzerindeki etkilerini ortaya koymuş ve malzeme seçiminde ısıl iletkenlik değerlerinin yanı sıra, malzemenin yoğunluğu, özgül ısısı, mekanik dayanımı ve maliyet gibi faktörlerin de dikkate alınması gerektiğini göstermiştir. Soğuk iklimlerde, düşük ısıl iletkenlik değerine sahip malzemeler tercih edilerek enerji tüketiminde anlamlı

azalmalar sağlanabilir. Malzeme seçiminde, yatırım maliyetleri ile enerji tasarrufu arasında dengeli bir analiz yapılması gerekmektedir.

Yalıtım kalınlığındaki küçük tolerans sapmalarının, enerji tüketimi ve geri ödeme süreleri üzerinde önemli etkiler yarattığı gözlemlenmiştir. Bu bulgu, uygulama kalitesinin enerji performansı üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle, saha uygulamalarında işçilik kalitesinin artırılması, uygulama toleranslarının minimize edilmesi ve düzenli kalite kontrol mekanizmalarının kurulması önerilmektedir. Yalıtım kalınlığındaki hataların azaltılması, enerji tasarrufunu maksimize ederken, yatırımın geri dönüş süresini de kısaltacaktır.

Statik ve dinamik yöntemlerin birlikte kullanılması önerilmektedir. Statik yöntemler, hızlı ve pratik değerlendirmeler sağlarken, dinamik simülasyonlar daha kapsamlı ve gerçekçi sonuçlar üretmektedir. Bu ikili yaklaşım, enerji performansını optimize etmek ve tasarım sürecinde daha sağlam temellere dayanmak için faydalı olacaktır. Özellikle kritik projelerde dinamik simülasyonların kullanılması teşvik edilmelidir.

Son olarak, optimum yalıtım kalınlıklarının doğru belirlenebilmesi için güncel ve yüksek zaman çözünürlüğüne sahip iklim verilerinin kullanılması büyük önem taşımaktadır. İklim değişiklikleri ve uzun dönemli iklim verilerinin düzenli olarak güncellenmesi, yalıtım stratejilerinin etkinliğini artıracaktır.

Enerji verimliliği uygulamalarının yaygınlaştırılması için devlet desteklerinin ve teşvik politikalarının güçlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, eğitim programları ve kalite standartlarının yükseltilmesi, bina sektöründe enerji verimliliği konusunda önemli katkılar sağlayacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma, enerji verimliliği ve sürdürülebilir bina tasarımı açısından önemli bulgular sunmuştur. Optimum yalıtım kalınlıkları ve doğru malzeme seçimi hem enerji tasarrufu hem de ekonomik verimlilik açısından kritik rol oynamaktadır. Çalışmada elde edilen sonuçlar, yalıtım uygulamalarında işçilik kalitesinin ve saha toleranslarının önemini vurgulamaktadır. Statik ve dinamik yöntemlerin birlikte kullanılması, doğru enerji performansı değerlendirmeleri yaparak tasarım sürecinin daha verimli hale gelmesini sağlayacaktır. Ayrıca, enerji verimliliği yatırımlarının ekonomik sürdürülebilirliği için geri ödeme sürelerinin dikkatlice hesaplanması ve iklimsel faktörlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu öneriler, bina sektöründe daha verimli ve ekonomik enerji çözümlerinin uygulanmasına katkı sağlayacak ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada önemli bir adım olacaktır. Gelecekte, bu alanda yapılacak daha geniş kapsamlı saha uygulamaları ve ekonomik analizler, enerji verimliliği konusunda daha somut veriler elde edilmesini sağlayarak, uygulamaların etkinliğini artıracaktır.



KAYNAKLAR

- Adesina, A. (2021). Overview of the influence of waste materials on the thermal conductivity of cementitious composites. *Cleaner Engineering and Technology*, 2, 100046. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100046>
- Akpınar, E. K., & Koçyigit, F. (2016). Thermal and mechanical properties of lightweight concretes produced with pumice and tragacanth. *Journal of adhesion science and Technology*, 30(5), 534-553. <https://doi.org/10.1080/01694243.2015.1111832>
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2022). *ASHRAE standard 90.1: Energy standard for buildings except low-rise residential buildings*. <https://www.ashrae.org>
- Arslan, M. A., & Aktaş, M. (2018). İnşaat Sektöründe Kullanılan Yalıtım Malzemelerinin Isı ve Ses Yalıtımı Açısından Değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 21(2), 299-320. <https://doi.org/10.2339/politeknik.407257>
- Asdrubali, F., D'Alessandro, F. ve Schiavoni, S. (2015). Geleneksel olmayan sürdürülebilir bina yalıtım malzemelerinin bir incelemesi. *Sürdürülebilir Malzemeler ve Teknolojiler*, 4, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>
- Baino, F., & Kumar Gianchandani, P. (2025). Porous Glass for Thermal Insulation in Buildings with a Focus on Sustainable Materials and Technologies: Overview and Challenges. *Ceramics*, 8(1), 2571-6121. <https://doi.org/10.3390/ceramics8010028>
- Bayer, G. (2006). *Binalarda uygulanan ısı yalıtım sistemleri ve örnek bir projede ısı yalıtım maliyeti analizi* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Sakarya Üniversitesi.
- Biçer, A. (2019). Tragacanth reçinesinin uçucu kül-çimento kompozitlerinin termal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi. *Yapışma Bilimi ve Teknolojisi Dergisi*, 33 (10), 1019-1032. <https://doi.org/10.1080/01694243.2018.1543530>
- Biçer, A. (2021). Uçucu kül ve çam ağacı reçinesinin genleşmiş kil agregalı betonların termo-mekanik özellikleri üzerindeki etkisi. *İnşaat Malzemelerinde Vaka Çalışmaları*, 15, e00624. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00624>

- Biçer, A. & Celik, N. (2020). Çam reçinesinin pomza-çimento kompozitlerinin termo-mekanik özellikleri üzerindeki etkisi. *Çimento ve Beton Kompozitleri*, 112, 103668. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103668>
- Biçer, A., Çelik, N., Özgen, F., Kıstak, C. & Taskiran, A. (2023). Kiraz ağacı reçinesi ve genleşmiş kil (exclay) agregasından oluşan bir betonun termomekanik özellikleri. *Uygulamalı Bilimler*, 14 (1), 336. <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/1/336>
- Bourbia, S., Kazeoui, H. & Belarbi, R. (2023). Biyobazlı yapı malzemeleri ve uygulamaları üzerine son araştırmalara ilişkin bir inceleme. *Yenilenebilir ve Sürdürülebilir Enerji için Malzemeler*, 12 (2), 117-139. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101734>
- Bozkurt, A.U. (2008). *Yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji verimliliği açısından değerlendirilmesi* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Buildings Energy Databook*. (2014). U.S. Department of Energy: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. <https://docs.nrel.gov/docs/fy16osti/64720.pdf>
- Crawley, D.B., Hand, J.W., Kummert, M. & Griffith, B.T. (2008). Bina enerji performansı simülasyon programlarının yeteneklerinin karşılaştırılması. *Bina ve Çevre*, 43 (4), 661-673. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.027>
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023). *Ulusal enerji verimliliği eylem planı*. <https://csb.gov.tr>
- Daouas, N. (2011). Soğutma ve ısıtma iletim yüklerinin analitik hesaplanmasına dayalı olarak Tunus binalarında duvarlarda optimum yalıtım kalınlığı ve enerji tasarrufu üzerine bir çalışma. *Uygulamalı Enerji*, 88 (1), 156-164. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.030>
- Devecioğlu, AG, & Biçer, Y. (2016). Genleştirilmiş kil ile karıştırılmış hafif betonların termal ve mekanik özellikleri üzerine tragakant ilavesinin etkileri. *Periodica Polytechnica İnşaat Mühendisliği*, 60 (1), 45-50. <https://pp.bme.hu/ci/article/view/7984>
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023). *Enerji Verimliliği Strateji Belgesi 2023–2030*. <https://enerji.gov.tr>

- European Commission. (2023). *Energy performance of buildings directive (EPBD)*. <https://energy.ec.europa.eu>
- Hou, X., Heidarinejad, M., Dalgo, D., & Srebric, J. (2021). Calibration of building energy models: Challenges and solutions. *Energy and Buildings*, 252, 111382. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111382>
- IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Kaya, A., & Kar, F. (2016). Atık genleştirilmiş polistiren ve doğal reçine içeren betonun özellikleri. *İnşaat ve Yapı Malzemeleri*, 105, 572-578. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.177>
- Kılıç, M., & Yanardağ, M. (2020). Soğutma panellerinde kullanılabilecek yeni tip kompozit yalıtım malzemelerin sayısal incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(3), 647–658. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.846390>
- Kınacı, I., Bedada, K., Nyabuto, A., & Marangu, J. (2023). Beton için biyobazlı katkı maddelerindeki gelişmeler üzerine inceleme. *Sürdürülebilir İnşaat Malzemeleri ve Teknolojileri Dergisi*, 8 (4), 344-367. <https://doi.org/10.47481/jscmt.1328915>
- Koçyiğit, F., & Çay, V.V. (2020). Doğal reçinenin genleşmiş vermikülit-çimento kompozitlerinin termo-fiziksel özellikleri üzerindeki etkisi. *Uluslararası Termofizik Dergisi*, 41 (10), 138. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10765-020-02719-3>
- Koçyiğit, Ş. (2024). Çam reçinesi ve geri dönüştürülmüş genleştirilmiş cam agrega esaslı çevre dostu hafif betonun ısı ve mekanik özellikleri. *İnşaat Mühendisliğinde Malzeme Dergisi*, 36 (12), 04024410. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-17854>
- Kolak, M. N., & Oltulu, M. (2023). Effect of expanded perlite addition on the thermal conductivity and mechanical properties of bio-composites with hemp-filled. *Journal of Building Engineering*, 71, 106515. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106515>
- Özcan, Ş. P. (2022). *Endüstriyel atık liflerinin otoklavsız gazbeton blok elemanlarının üretiminde kullanılabilirliğinin irdelenmesi* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. İzmir Kâtip Celebi Üniversitesi.

- Papadopoulos, A. M. (2005). State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and Buildings*, 37(1), 77-86. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.05.006>
- Saffar, S. W. A. (2022). *Yaklaşık Sıfır Enerjili Bir Bina tasarımı için enerji performansı modellemesi ve simülasyonu* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Necmettin Erbakan Üniversitesi.
- Siddique, R., Khatib, J., & Kaur, I. (2008). Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste management*, 28(10), 1835-1852. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.011>
- Singh, N., Raza, J., Colangelo, F., & Farina, I. (2024). Advancements in lightweight artificial aggregates: typologies, compositions, applications, and prospects for the future. *Sustainability*, 16(21), 9329. <https://doi.org/10.3390/su16219329>
- Thongtha, A., Maneewan, S., & Fazlizan, A. (2023). Enhancing thermal performance of autoclaved aerated concrete (AAC) incorporating sugar sediment waste and recycled aac with phase change material-coated applications for sustainable energy conservation in building. *Sustainability*, 15(19), 14226. <https://doi.org/10.3390/su151914226>
- Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası, (2025, 6 Mart). *2025 yılı para ve kur politikası metni* (Duyuru No: 2025-15). <https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/06e05e5b-98c0-4d31-81fc-9d1bdfde0fa6/DUY2025-15.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=ROOTWORKSPACE-06e05e5b-98c0-4d31-81fc-9d1bdfde0fa6-plH7bZH>
- Türkiye Cumhuriyeti Resmî Gazete, (2007). *Doğalgaz Piyasası Kanunu* (No. 5627). <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=5627&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5>
- Türkiye İstatistik Kurumu, (2025). *Tüketici Fiyat Endeksi, Mart 2025* (Bülten No: 54178). <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=T%C3%BCketici-Fiyat-Endeksi-Mart-2025-54178&dil=1>
- U.S. Department of Energy, (2023). *EnergyPlus Engineering Reference*. <https://energyplus.net>
- United Nations Framework Convention on Climate Change, (2023). *Global status report for buildings and construction*. <https://unfccc.int>

Yıldız, C. (2024) Binalarda Enerji Verimliliğinde Son Gelişmeler: Türkiye Örneği. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 12(1), 176-213.
<https://doi.org/10.29109/gujsc.1293759>



