

T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI AMAÇLAR İÇİN KULLANILAN BİNALARIN
YAŞAM DÖNGÜLERİNİN ENERJİ VE EKSERJİ
ANALİZİ YÖNÜNDEN İNCELENMESİ

Betül YALÇIN

Danışman
Doç. Dr. Mevlüt ARSLAN

Yozgat 2019

T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI AMAÇLAR İÇİN KULLANILAN BİNALARIN
YAŞAM DÖNGÜLERİNİN ENERJİ VE EKSERJİ
ANALİZİ YÖNÜNDEN İNCELENMESİ

Betül YALÇIN

Danışman
Doç. Dr. Mevlüt ARSLAN

Yozgat 2019



YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ

TEZ ONAY FORMU

T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

Enstitümüzün Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans/~~Doktora~~ Programı 70110917009 numaralı öğrencisi Betül YALÇIN'ın hazırladığı “**Farklı Amaçlar İçin Kullanılan Binaların Yaşam Döngülerinin Enerji ve Ekserji Analizi Yönünden İncelenmesi**” başlıklı tezi ile ilgili tez savunma sınavı, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri gereğince 05/09/2019 Perşembe günü saat 10:30'da yapılmış, tezin onayına oy birliği/oy çokluğu ile karar verilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. İrfan KURTBAŞ

Jüri Üyesi (Danışman) : Doç. Dr. Mevlüt ARSLAN

Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Murat Kadir YEŞİLYURT

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun 12.../09.../2019 tarih ve 43. sayılı Enstitü Yönetim Kurulu Kararı ile onaylanmıştır.

12.../09.../2019

Prof. Dr. Mustafa SAGMACI



TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdığı yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

BETÜL YALÇIN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
TABLolar DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
SİMGELER, SEMBOLLER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. KURAMSAL BİLGİLER	9
3.1. Enerji ve Ekserji	9
3.2. Enerji ve Ekserji Analizi	15
3.3. Çalışma Bölgesinin Tanıtılması	15
4. TEORİK VE BİLİMSEL MODELLERİN ORTAYA KONMASI	17
4.1. Binaların Ekserji Tüketiminin Enerji Tüketimine Oranı REXE'nin Tanımlanması	17
4.2. Elektrik ve Yakıt Ekserjilerinin Hesaplanması	18
4.3. Bina Yaşam Döngüsü İçin Ekserji, Enerji Tüketimlerinin ve REXE'nin Hesaplanması.....	19
4.3.1. Bina malzemesinin üretimi ve bina bakım onarım aşamaları için ortaya çıkan enerji, ekserji tüketimlerinin ve REXE'nin hesaplanması	19
4.3.2. Binanın inşası ve yıkımı aşamaları için enerji, ekserji tüketimi değerleri ve bu aşamalar için REXE oranlarının hesaplanması	20
4.3.3. Bina kullanım aşaması için enerji, ekserji tüketimi değerlerinin ve bu aşamaya ait REXE oranlarının hesaplanması	21

4.4. Bina yaşam döngüsü için toplam enerji ve ekserji tüketimlerinin ve $REXE_{YD}$ 'nin hesaplanması.....	22
4.5. $REXE_{YD}$ Değerinin Optimizasyonunda Kullanılan Regresyon Modelleri..	23
4.6. Bina Ömür Döngüsünün Ekonomik Analizi	23
5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER.....	25
5.1. Yapı Malzemelerinin Üretimi ve Bina Bakım -Onarımı İçin Elde Edilen $REXE_{Malzeme}$ ve $REXE_{Bakım}$ Değerlerinin Tartışılması	25
5.2. Bina İnşası ve Yıkımı İçin Hesaplanan $REXE_{inşa}$ ve $REXE_{yıkım}$ Değerlerinin Tartışılması	27
5.3. Binanın Kullanımı Aşaması İçin Hesaplanan $REXE_{kul}$ Değerlerinin Tartışılması.....	27
5.4. Bina Ömür Döngüsü İçin Hesaplanan Enerji, Ekserji Tüketimi ve $REXE_{YD}$ Değerlerinin Tartışılması.....	27
5.5. Bina Ömür Döngüsü Maliyeti Değerlerinin Tartışılması	30
5.6. Bina Ömür Döngüsü Enerji Tüketimi ile $REXE_{YD}$ Arasındaki İlişkinin Regresyon Modelleri ile İncelemesi	32
5.7. Bina Ömür Döngüsü Enerji Veriminin Tartışılması	35
5.7.1. Bina yaşam döngüsü boyunca harcanan enerji verimliliğinin tartışılması.....	35
5.7.2. $REXE_{YD}$ değerlerinin tartışılması.....	37
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	39
KAYNAKLAR	41
EKLER	46
ÖZGEÇMİŞ.....	49

FARKLI AMAÇLAR İÇİN KULLANILAN BİNALARIN YAŞAM DÖNGÜLERİNİN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ YÖNÜNDEN İNCELENMESİ

Betül YALÇIN

Yozgat Bozok Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

2019; Sayfa: 49

Danışman: Doç. Dr. Mevlüt ARSLAN

ÖZET

Bu tez çalışmasında; değişik amaçlar için kullanılan dört farklı binaya ait yaşam döngülerinde ortaya çıkan ekserjinin, harcanan enerjiye oranı (REXE) karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Binaların yaşam döngüsünün daha iyi anlaşılabilmesi için kullanılan bu oran, bina yaşam döngüsü enerji verimliliğini değerlendirmek için yeni bir termodinamik parametre olarak bu çalışmada kullanılmıştır. $REXE_{YD}$ olarak tanımlanan bina yaşam döngüsü parametresi, binaların yaşam döngüleri süresince kullandıkları enerji tüketiminin tam olarak anlaşılmasını sağlar. Bu parametre aynı zamanda, bina yaşam döngülerindeki ekserji tüketiminin hesaplanmasında da basitleştirilmiş bir yol olarak kullanılır. Ayrıca, seçilen binaların, birim inşa (yapım) alanı için hesaplanmış olan maliyeti, enerji ve ekserji tüketimleri $REXE_{YD}$ analizinde değişken olarak kullanılmıştır. $REXE_{YD}$ temel olarak 5 farklı aşamaya ait REXE değerleri kullanılarak hesaplanır. Bunlar; bina malzemesinin üretimi, bina bakımı-onarımı, bina inşası, bina yıkımı ve bina kullanımı aşamalarından oluşmaktadır. Yapılan ekonomik analizler neticesinde, çok büyük veya çok küçük $REXE_{YD}$ değerine sahip binaların ekonomik olmadıkları sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada, $REXE_{YD}$ ile binaların yaşam döngüleri süresince harcanan enerji miktarları arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek için dört farklı regresyon modelinden yararlanılmıştır. En iyi sonuçlar Quadratik ve Power-2 modellerinde elde edilmiş olup, seçilen binalar dört bölgede değerlendirilmiştir. Sonuç olarak hesaplanan $REXE_{YD}$ değerleri, binanın dış cephesinin optimize edilmesinde önemli bir talimatname niteliği taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bina Enerji Verimliliği, Enerji Tüketimi, Ekserji Tüketimi, Ekserji Tüketiminin Enerji Tüketimine Oranı (REXE)

**INVESTIGATION OF THE LIFECYCLE OF BUILDINGS USED FOR
DIFFERENT PURPOSES IN TERMS OF ENERGY AND EXERGY
ANALYSIS**

Betül YALÇIN

**Yozgat Bozok University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
MsC Thesis**

2019; Page: 49

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mevlüt ARSLAN

ABSTRACT

The main goal of the present study is to analyze of the ratio of the exergy to the energy consumption (REXE) during the lifecycle of the four different buildings used for various purposes comparatively. This ratio, which is used for better understanding of the lifecycle of buildings, is utilized in this study as a new thermodynamic parameter to evaluate the energy efficiency of the building lifecycle. The building lifecycle parameter, named as $REXE_{LC}$, gives an opinion regarding the energy consumption of buildings during their lifecycle. It is also used as a simplified way of calculating exergy consumption during building lifecycle. In addition, the cost, energy and exergy consumption per construction area of the selected buildings are employed as variables in the $REXE_{LC}$ analysis. $REXE_{LC}$ is mainly calculated considering REXE values for five different stages of building lifecycle. These are as follows: building materials' production, building maintenance, building construction, building demolition, and building running. As a result of economic analysis, it is concluded that buildings having too large or too small $REXE_{LC}$ values are not economical. Moreover, four different regression models are utilized in order to determine the relationship between $REXE_{LC}$ and the energy consumption of the building lifecycle. The best results were obtained in quadratic and power-2 models, thereby; the selected buildings were evaluated in four regions. Finally, $REXE_{LC}$ values would be a substantial instruction in optimizing of the building envelope design.

Keywords: Building Energy Efficiency, Energy Consumption, Exergy Consumption, The Ratio of Exergy Consumption to Energy Consumption (REXE)

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden yardımlarını esirgemeyen ve katkılarıyla beni yönlendiren değerli tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Mevlüt ARSLAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması süresince yardımlarını esirgemeyen ve deneyimlerinden faydalandığım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Murat Kadir YEŞİLYURT'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezde kullanılan verilere erişimde gerekli yardımı sağlayan başta Yozgat Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürü Sayın İbrahim TAMER olmak üzere, Müdür Yardımcısı Sayın Yücel DEMİR, Proje ve Yapım Şube Müdürü Sayın A. Murat KARABACAK ve Sayın Seyit ONBAŞI'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasının her aşamasında her türlü yardımlarını sağlayan ve tecrübeleriyle bana yol gösteren sevgili babam İbrahim YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince yanımda olan ve maddi manevi desteklerini esirgemeyen sevgili annem Saniye YILMAZ'a ve sevgili kardeşim Enes Behlül YILMAZ'a; akademik hayatıma yön vermem de büyük yardımı dokunan, her zaman yanımda olan sevgili eşim Emre YALÇIN'a ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Enerji ve Ekserji Kavramlarının Karşılaştırılması	14
Tablo 3.2. Binaların Detayları	16
Tablo 4.1. Enerji Kaynaklarının Alt Isıl Değeri ve Ekserji Değeri	18
Tablo 4.2. Yapı Malzemelerin Üretim Aşamasındaki Enerji, Ekserji Tüketimleri, REXE _{mal} Değeri ve Malzemelerin Üretim Maliyeti.....	20
Tablo 4.3. Enerji Kaynaklarının Fiyatı.....	24
Tablo 5.1. Bina Yapımı İçin Yapı Malzemeleri ve Enerji Tüketimi	25
Tablo 5.2. Bina Yaşam Döngüsü Aşamalarındaki Enerji, Ekserji ve REXE Değerleri	30
Tablo 5.3. Binaların Yapı Malzemelerin Maliyeti	31
Tablo 5.4. Binaların İnşaat Maliyeti.....	31
Tablo 5.5. Binaların Kullanım Maliyeti	31
Tablo 5.6. Binaların Yaşam Döngüsü Maliyetleri	31
Tablo 5.7. Regresyon Modellerinin Katsayıları, Denklemleri ve Hata Değerleri.....	33

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Enerji Kaynakları Türleri.....	10
Şekil 3.2. Dünyada Birincil Enerji Kullanımı.....	11
Şekil 3.3. Türkiye’de Birincil Enerji Üretiminin Kaynaklar Bazındaki Dağılımı	11
Şekil 3.4. Türkiye’de Enerji Tüketiminin Kaynaklar Bazında Dağılımı	12
Şekil 3.5. Türkiye’de Yerli Kaynaklardan Enerji Üretimi ve Toplam Enerji Tüketimi	13
Şekil 3.6. Ülkemizde Doğal Gaz Tüketiminin Sektörel Dağılımı	13
Şekil 3.7. Seçilen Binaların Profilleri	16
Şekil 5.1. Binaların Malzeme Üretim Aşamasındaki Enerji ve Ekserji Tüketimleri.	26
Şekil 5.2. Binaların Malzeme Üretim Aşamasındaki $REXE_{mal}$ Değerleri	26
Şekil 5.3. Binaların Yaşam Döngüleri Boyunca Enerji ve Ekserji Tüketimleri	28
Şekil 5.4. Binaların Yaşam Döngüleri Boyunca $REXE_{YD}$ Değerleri	29
Şekil 5.5. Binaların Yaşam Döngüsü Boyunca Birim İnşa Alanına Düşen Maliyeti ve $REXE_{YD}$ Değeri.....	32
Şekil 5.6. Yaşam Döngüsü Boyunca Hesaplanan Enerji Tüketimi ve $REXE$ Değerleri İçin Oluşturulan Quadratik Polinom Eğrisi	34
Şekil 5.7. Yaşam Döngüsü Boyunca Hesaplanan Enerji Tüketimi ve $REXE$ Değerleri İçin Oluşturulan Power-2 Polinom Eğrisi	34

SİMGELER, SEMBOLLER VE KISALTMALAR LİSTESİ

<u>Simgeler</u>	<u>Anlamı ve Birimi</u>
E	: Enerji Tüketimi, MJ
Ex	: Ekserji Tüketimi, MJ
λ_y	: Enerji Kalite Katsayısı
T_{yanma}	: Adyabatik Yanma Sıcaklığı, °C
T_0	: Dış Ortam Sıcaklığı, °C
m	: Malzeme
M	: Maliyet, TL
N	: Enerji Tüketimi
N'	: Bina Ömrü, Yıl
Q_{alt}	: Yakıtların Alt Isıl Değeri
<u>Alt İndisler</u>	<u>Anlamı ve Birimi</u>
$elec$	: Elektrik
$d.gaz$	: Doğal Gaz
i	: Enerji Türleri
j	: Malzeme Türleri
mal	: Malzeme
kul	: Kullanım
y	: Yakıt
YD	: Bina Yaşam Döngüsü
<u>Kısaltma</u>	<u>Anlamı ve Birimi</u>
AVM	: Alışveriş Merkezi
$Btep$	: Bin Ton Eşdeğer Petrol
$Mtep$	: Milyon Ton Eşdeğer Petrol
$HVAC$	: Heating Ventilating and Air Conditioning (Isıtma, Havalandırma, İklimlendirme)
<u>Sembol</u>	<u>Anlamı ve Birimi</u>
φ	: Bina Bakım Oranı
ψ	: Bina Yıkım Oranı

1. GİRİŞ

Dünyada son yıllarda hızlı bir biçimde artan nüfus ve gelişen teknoloji ile birlikte bireylerin ve işletmelerin tükettikleri enerji miktarları, hızlı bir biçimde artmaktadır. Ülkeler açısından enerji, refah seviyesi ve ekonomik kalkınmanın bir göstergesi konumundadır. Ekonomik kalkınma ve refah seviyesinin sürekliliği için enerji tasarrufunun ve çevreyi korumanın önemli olduğu bilinmektedir. Sınırlı enerji kaynakları göz önüne alındığında; gelecekte ihtiyaç duyulan enerjiye ulaşmada probleminin yaşanmaması için, günümüzde enerji verimliliği kavramı önem kazanmıştır. Ayrıca, verimli enerji tüketimi ile enerji kaynaklarının azlığı probleminin üstesinden gelinebilir. Bu doğrultuda, enerjinin tüketildiği her alanda enerji verimliliği kavramının dikkate alınması gerekir [1].

Çevre şartlarında çalışan enerji sistemleri için, “kullanılabilir enerji” olarak da bilinen ekserji, enerjinin faydalı kısmı olarak düşünülebilir. Diğer bir deyişle, ekserji, enerjinin faydalı kısmı ve enerjinin kullanılabilir enerji formuna dönüştürülebilen kısmı olarak tanımlanabilir. Bir madde ya da bir enerji akışına bağlı olan ekserji; baca gazı, soğutma suyu ve ısı kaybı şeklinde de çevreye atılır. Hem ekserji yok oluşu hem de ekserji kaybı, termodinamiğin ikinci kanun analizi de denilen ‘Ekserji Analizi’ aracılığı ile saptanır. Termodinamiğin ikinci kanunu; hem bir enerji taşıyıcısının gerçek termodinamik değerini, hem de işlem ya da sistemlerden ortaya çıkan olası kayıpların ve gerçek termodinamik yetersizliklerin hesaplanması sonucu ile bir enerji dengesini tamamlar ve geliştirir. Ekserji yok oluşu, direk olarak sistem içindeki tersinmezliklerin sonucudur [2, 3].

Genellikle, bina enerji sistemleri; bina tarafından tüketilen kömür, gaz ve elektrik enerjisinin bütünü olarak düşünülebilir. Bina enerji sistemi birçok alt sistem içerir. Bunlar; binanın dış yüzey örtüsü, binayı ısıtma ve soğutma kaynakları, hava şartlandırma terminali (iklimlendirme sistemi), iç ortam alt sistemleri ve enerji sağlama araçları vb. gibi alt sistemlerdir. Bina enerji sistemleri tarafından tüketilen enerji, insanoğlunun yaşamında toplam kullanılan enerji miktarları içerisinde en büyük paya sahiptir. Hatta bina tarafından tüketilen bu enerji, ciddi çevresel problemlere neden olabilmektedir. Günümüze kadar yapılan birçok çalışmada, bina enerji verimliliğini değerlendirmek için enerji analiz metotları kullanılmıştır [4, 5].

Bu tez çalışmasında, binaların yüksek kalitedeki enerji kullanımını ve verimliliğini etkin bir biçimde analiz edebilen önceden geliştirilmiş [6] bir parametre (REXE) kullanılmıştır. Bu parametre ile farklı amaçlar için kullanılan binaların yapım süreçlerinin (bina yapımında kullanılan malzemelerin üretim süreci, binanın inşaa süreci, binanın kullanım süreci, binanın bakım-onarım süreci ve binanın yıkım süreci) tamamında tüketilen enerji ve ekserji miktarları dikkate alınarak, verimlilik analizi yapılması hedeflenmiştir. Ayrıca, bu parametrenin başarılı bir şekilde değerlendirilmesinde nicel değişkenlerin arasındaki ilişkilerin matematiksel modellenmesi ve analizi için, istatistik temelli çalışmalarda etkin bir biçimde kullanılan, regresyon analizi metodu kullanılmıştır. Binaların yaşam döngüsü boyunca enerji ve ekserji verimliliklerinin belirlenmesi için çeşitli deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu deneysel çalışmalar için, Yozgat ilinde bulunan ve çeşitli yaşamsal faaliyetlerin gerçekleştiği dört farklı bina örneği seçilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Tezin bu bölümünde, temel olarak, tez kapsamında yapılan çalışmaların temelini oluşturan enerji ve ekserji verimliliği konularında literatürde önceden yapılmış çalışmalar yer almaktadır.

2003 yılında yapılan [7] çalışmada, temel olarak, ofis binalarının teknolojik gelişmeler karşısında sergilediği mimari değişimler, ayrıntısıyla incelenmiştir. Ofis binalarının tasarımlarının çevresel faktörler bağlamındaki değişimleri analiz edilmiştir. Bu doğrultuda, yenilenebilir enerji kaynakları ele alınmış, enerjinin verimli kullanımı için farklı yöntemler derinlemesine incelenmiştir.

Fay ve ark.'nın yaptığı çalışmada; binaların çevresel etkenlerle birlikte kullanımı neticesinde ortaya çıkan enerji tüketimleri, binaların ömür boyu enerji verimliliği kapsamında incelenmiş ve önemli bir parametre olarak ele alınmıştır. Avustralya'daki binaların, yaşam döngüsü boyunca, enerji analizinin daha başarılı bir şekilde yapılabilmesi için çeşitli tasarım teknikleri geliştirilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada ömür döngüsü analizi ile ilgili teorik sorunlar ele alınmıştır [8].

Sandamouris ve Angiriou'nun yaptıkları çalışmada, Avrupa'da bulunan binaların enerji tüketim verileri incelenmiştir. Avrupa'nın güneyinde bulunan ofis binalarında tüketilen enerji değerinin m^2 başına 250-350 kW-h olduğu gözlenmiştir. Bu tüketim değerinin, yaklaşık olarak ısıtma ve havalandırma amaçlı tüketim için eşit oranda dağıldığı görülmüştür. Avrupa'nın kuzeyinde bulunan binalarda ise, bu tüketim değeri 270-350 kW-h olarak elde edilmiştir. Ayrıca, güneş enerjisinin ısıtma ve aydınlatmadaki fonksiyonlarına ek olarak, soğutma fonksiyonundaki etkisi de analiz edilmiştir [9].

Ramesha ve ark.'nın yaptıkları çalışmada; 13 ülkede konut ve ofis binaları içeren toplam 73 binanın yaşam döngülerine ait enerji analizi, ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Elde ettikleri sonuç neticesinde; enerji kullanımının yaklaşık %80'in işletme, %20'sinin gömülü aşamalarında olduğu gözlemlenmiştir. Konut ömür döngüsü enerji ihtiyacının yılda 150-400 kW-h/ m^2 arasında değiştiği gözlemlenirken, bu değer ofis binalarında 250-600 kW-h/ m^2 aralığında olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, konut ömür döngüsünün enerji talebinin, kullanılan farklı teknolojiler yardımıyla, ofise kıyasla belirgin bir şekilde daha az olduğu sonucuna varılmıştır [10].

Günümüzde hızla artan enerji tüketiminin daha verimli hale getirilebilmesi için Al-Hamoud yaptığı çalışmada, binaların tasarım sürecindeki konum, yapı vb. gibi karakteristik özelliklerini ele almıştır. Çeşitli bilgisayar uygulamaları yardımı ile binaların ele alınan karakteristik özelliklerinin enerji tüketimi üzerindeki verimliliğine önemini vurgulamıştır. Bilgisayar uygulamaları aracılığı ile bu karakteristik özellikler irdelenmiş, binaların inşa aşamasındaki enerji tüketimleri azaltılarak daha verimli binaların inşa edilebileceğini öngörülmüştür. Sonuç olarak; binaların enerji verimliliği tespitinde, bilgisayar destekli uygulamaların geleneksel enerji analizlerine kıyasla daha başarılı ve etkin olduğu gözlemlenmiştir [11].

Yazıcı ve ark. yaptıkları çalışmada; Türkiye’de bulunan Denizli şehrinde ticari ve mesken amaçlı inşa edilecek bir bina için kullanılacak en uygun yakıtın doğalgaz olduğunu vurgulamıştır. Bu sonuca, binanın yıllık ısı ihtiyacını karşılayacak olan motorin, fueloil, kömür, doğalgaz vb. miktarlarının maliyetlerini ayrıntılı bir şekilde analiz ederek ulaşmışlardır. Ayrıca bu çalışmada, binaların yıllık CO₂ emisyon miktarı dikkate alınmıştır. Elde edilen bulgular neticesinde; doğalgazın hem maliyet hem de CO₂ emisyon miktarı açısından, diğer yakıt cinslerine göre daha verimli olduğu sonucuna varmışlardır [12].

Balıkesir Üniversitesi yerleşkesinde yer alan ve yıllık 320-330 kW-h/m² aralığında ısıtma enerjisine ihtiyaç duyan benzer tipte iki lojman binasının (yalıtlımlı-yalıtlımsız) enerji/ekserji analizlerinin yapıldığı çalışmada; yalıtlımlı olan binanın yalıtlımsız binaya kıyasla daha az ısı enerjisine ihtiyaç duyduğu gözlemlenmiştir. Yalıtlımlı binanın diğer binaya kıyasla, yaklaşık %52 daha az ısı enerjisine ihtiyaç duyduğu ve yaklaşık %82 daha az ısı kaybının olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca yalıtlımlı binada yaklaşık %93 daha az ekserji kaybı olduğu belirlenmiştir [13].

Atatürk Üniversitesi için yapılmış bir diğer çalışmada, içerisinde kızgın su dağıtım hatları, eşanjör dairesi ve kazan gibi bölümlerden oluşan ısıtma sistemlerinin enerji ve ekserji analizleri ayrıntılı bir şekilde yapılmıştır. Kazan sistemi özelinde yapılan analizde; yanma olayı ayrıntılı bir şekilde incelenerek bu sistem içerisinde oluşan tersinmezlikler ve lokasyonları belirlenmiştir. Yapılan çalışma neticesinde elde edilen

bulgular; kazan sistemi içerisindeki enerji verimliliğinin yaklaşık %92, ekserji verimliliğinin ise yaklaşık %25 olduğunu göstermiştir. Elde edilen bir diğer sonuç ise, kazan sistemi içerisinde oluşan ekserji kaybının büyük bir çoğunluğunun yanma sırasında ve ısıtılmış suyun sistem içerisinde bulunan borulara dağıtımı esnasında olduğudur [14].

2006 yılında yapılan bir diğer çalışmada ise; temel olarak termik santrallerin enerji ve ekserji analizleri ayrıntılı bir şekilde yapılmıştır. Üç farklı termik santral dikkate alınarak, farklı basınç türbinleri (yüksek, orta, alçak) için ayrı ayrı ekserji ve enerji verimlilik değerleri hesaplanmıştır. Orhaneli, Yatağan ve Seyit Ömer Termik Santrali için enerji verimi değerleri sırasıyla %44,8; %33,4; %22,8 olarak hesaplanmıştır. Ekserji verimi değerleri ise sırasıyla %37,9; %19,4; %28,6 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bulgular neticesinde, bu farklılıkların nedeninin termik santrallerde bulunan kazanlarındaki yanma işlemi olduğu belirlenmiştir [15].

Ekserji ve enerji analizinin birlikte yapıldığı bir diğer çalışmada, bir seramik fabrikası; yanma ünitesi, türbin, püskürtmeli kurutucu vb. gibi alt-sistemlere ayrılarak, bu sistemlerin enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Elde edilen bulgular neticesinde; tesirliliğin bu alt-sistemlerin sıcaklığı ile doğru orantılı olduğu, sistemde oluşan basınç ile de ters orantılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır [16].

Isıtma amaçlı kullanılan bir kazanda (fuel-oil yakıtı kullanan) gerçekleşen yanma neticesinde oluşan enerji ve ekserji kayıplarını inceleyen Çomaklı ve ark. baca gazlarında meydana gelen sıcaklık değişimlerinin kazan sisteminin verimliliğinin düşmesine sebep olduğu sonucuna varmışlardır. Ek olarak, baca gazı ile atmosfere salınan enerjinin sistem içerisindeki suyun ısıtılmasında kullanılmasının, yüksek oranda enerji ve ekserji tasarrufu sağlayacağı sonucuna varmışlardır [17].

Konya şehrinde bulunan Bilişim Meslek Lisesi içerisindeki ısıtma sisteminin enerji, ekserji ve ekonomik analizlerinin yapıldığı bir diğer çalışmada; bina içerisindeki odalara yerleştirilmiş radyatörlerde farklı boyutlar kullanılarak verimlilik sağlanması hedeflenmiştir. Öncelikle mevcut sistem içerisindeki radyatörlerin ve ısı üreticilerinin enerji ve ekserji açısından verimlilikleri hesaplanmıştır. Isı üretici ve radyatörlerde yapılacak değişikliklerin maliyet hesabı yapılarak, enerji ve ekserji verimliliği açısından kıyaslanmıştır. [18].

Enerji ve ekserji analizinin birlikte yapıldığı bir diğer çalışma da, süt tozu üretimi işlemi 3 ana basamak olarak incelenmiştir. Üretim işlemi sistemi, püskürtmeyle kurutma, buharlaştırma ve pastörizasyon olmak üzere alt basamaklara bölünmüştür. Enerji-kütle eşitlik denklemleri yardımıyla, sistemin enerji verimliliği belirlenmiştir. Sonuç olarak, sistemin ekserji verimliliğinin yaklaşık %86 olduğu, enerji verimliliğinin ise %9 ile %83 arasında değişebildiği sonucuna varılmıştır [19].

Ergün [20], Ankara şehrinde bulunan bir alışveriş merkezi (AVM) için enerji ve ekserji analizlerini ayrıntılı bir şekilde yapmıştır. Çalışması için seçmiş olduğu AVM, 80.000 m² kapalı alana sahiptir. Çalışma neticesinde; AVM içerisinde ısıtma ve soğutma amaçlı kullanılabilen kazan, klima santrali, fan coil ve eşanjör gibi sistemlerin enerji ve ekserji açısından verimliliklerinin analizini yapmıştır.

Ehyai ve ark.'nin yapmış olduğu çalışmada; binalar açısından dizel motorların soğutma, ısı ve elektrik amacıyla kullanılabilirliğinin ne oranda olduğu analiz edilmiştir. Bu amaçla İran'da bulunan Tahran ili içerisinde mevcut olan 10 kattan ve 40 daireden oluşan bir bina seçilmiştir. Seçilen bina dikkate alınarak, hem kış hem de yaz ayları için ekonomi ve ekserji analizleri yapılmıştır. Elde ettikleri bulgular neticesinde, seçilen bina ve bu binaya benzer binalar için ortalama elektrik maliyetinin yaklaşık 0,06 \$/kW-h olduğu ortaya çıkmıştır [21].

İstanbul şehrinde bulunan bir hastanede ameliyathane amacıyla kullanılan bir alanın ısıtılması için kazan ve ısıtma klima santrali açısından ekserji analizinin yapıldığı çalışmada; kazan için ekserji veriminin yaklaşık %22, ekserji kaybının ise yaklaşık 555 kW olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, klima santrali için ekserji veriminin yaklaşık %21, ekserji kaybının ise yaklaşık 3 kW olduğu görülmüştür [22].

Manisa şehrinde bulunan Soma Termik Santrali için yapılmış olan bir çalışmada ise, sistem içerisinde bulunan suyun giriş-çıkış sıcaklıkları, debileri, basınçları gibi parametreler analiz edilmiştir. Sistemde; kuruluşundan bugüne kadar ortaya çıkan kayıplar incelendiğinde, ekserji veriminin yaklaşık %80'lerden %75'lere düştüğü gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, bu süreç içerisinde toplam net güç değerinde yaklaşık %7 oranında bir kayıp olduğu sonucuna varılmıştır. Bu düşüşün nedeni olarak da, alçak basınç türbini içerisindeki son kademelerin kullanımdan kaldırılması olduğu belirtilmiştir [23].

Tuğcu'nun yapmış olduğu çalışmada; tek kademeli absorpsiyonlu soğutma sisteminin farklı eriyik konsantrasyonlarının optimizasyon analizi, jeotermal destekli farklı tasarım parametreleri için ayrıntılı bir şekilde yapmıştır. Bu çalışmada, sisteme giren Jeotermal akışkanın sıcaklığı yaklaşık 110⁰C de sabitlenip, sistemi etkileyen diğer parametreler değiştirilerek farklı çözümler oluşturmuştur. Sistem açısından en uygun değerlerin; soğutma etkinlik kat sayısının yaklaşık 0,55 ve ekserji veriminin yaklaşık 0,4 olduğu sonucuna varılmıştır [24].

Şimdiye kadar birçok araştırmacı, bina enerji analizi metotları kullanarak, bina enerji sistemlerinin enerji verimliliklerinin değerlendirilmesi ile ilgili birçok çalışma yapmıştır [25, 26]. Fakat elde edilen bulgular neticesinde; bina enerji verimliliği için yapılacak enerji analizlerinin, enerji kalitesini artırmada tek başına yeterli olamayacağı sonucuna varılmıştır. Bu yüzden bina enerji sistemleri için enerji analizine ek olarak, bina ömür döngüsü ekserji analizinin de yapılması zorunlu hale gelmiştir [27]. Enerji analizi ile karşılaştırıldığında, ekserji analizi bize enerjinin niteliğini ve niceliğini ifade etme imkânı sunar. Bu doğrultuda ekserji metodu, bina enerji sistemleri çalışmalarında geniş bir şekilde kullanılmaktadır [28]. Daha da ötesi; hem enerji hem de ekserji metotlarını kullanarak, bina enerji sistemleri üzerine çalışma yapan birçok araştırmacı vardır. [29, 30, 31, 32, 33]. Enerji ve ekserji metotlarının kullanıldığı çeşitli enerji sistemleri ve enerji kaynakları kalitesinin değerlendirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda, enerji kalite katsayısı [34] ve enerji sınıfı denge katsayısından yararlanılmıştır [35, 36]. Bina enerji verimliliği için yapılan çalışmalarda enerji ve ekserji metotları geniş bir kullanım bulmasına rağmen; enerji ve ekserji analizinin birlikte yapıldığı birkaç çalışmada ise, bina ömür döngüsü verimliliğinin değerlendirilmesi için kapsamlı ve anlaşılır parametreler kullanmışlardır.

Ping Wang ve ark. [6] yaptıkları çalışmada; bina enerji verimliliğinin genel değerlendirilmesine olanak sağlayan enerji ve ekserji metotları ile ilgili boyutsuz bir parametre oluşturulmuştur. Bu kapsamda, enerji ve ekserji metodu temelinde kullanılacak parametre olarak binanın ekserji tüketiminin enerji tüketimine oranı (REXE), bir değerlendirme parametresi olarak ele alınmıştır. Şimdiye dek yapılan birçok pratik uygulamada bina enerji verimliliği analizi yanında, ekonomik analiz de göz önünde bulundurulmuştur. Bu sebeple bina ömür döngüsü analizinde enerji tasarrufu önlemlerinin yanında, ekonomik analizlerin yapılması verimlilik açısından

önemlidir. Bu amaçla, bina enerji döngüsü sisteminin optimizasyonu ile ilgili yapılan ekonomik ve çeşitli termodinamik analizlerin yer aldığı çalışmalar mevcuttur [37, 38, 39]. Qinsheng [40] yaptığı çalışmada bina enerji sistemini; binanın dış yüzey örtüsü, binanın ısıtılmasında ve soğutulmasında kullanılan hava şartlandırma terminali (iklimlendirme sistemi), iç ortam alt sistemleri, enerji sağlama araçları ve bunun gibi alt sistemlere ayırarak ele almış ve incelemiştir. Elde ettiği bulgular neticesinde, bina enerji sistemleri tarafından tüketilen enerjinin genellikle kömür, gaz ve elektrik enerjisinden oluştuğunu belirtmiştir. Bina enerji sistemi tarafından tüketilen enerjinin, insanların yaşamlarında kullandıkları toplam enerjinin önemli bir miktarını oluşturduğu ve bu enerjinin ciddi çevresel problemlere neden olduğu sonucuna varmıştır.

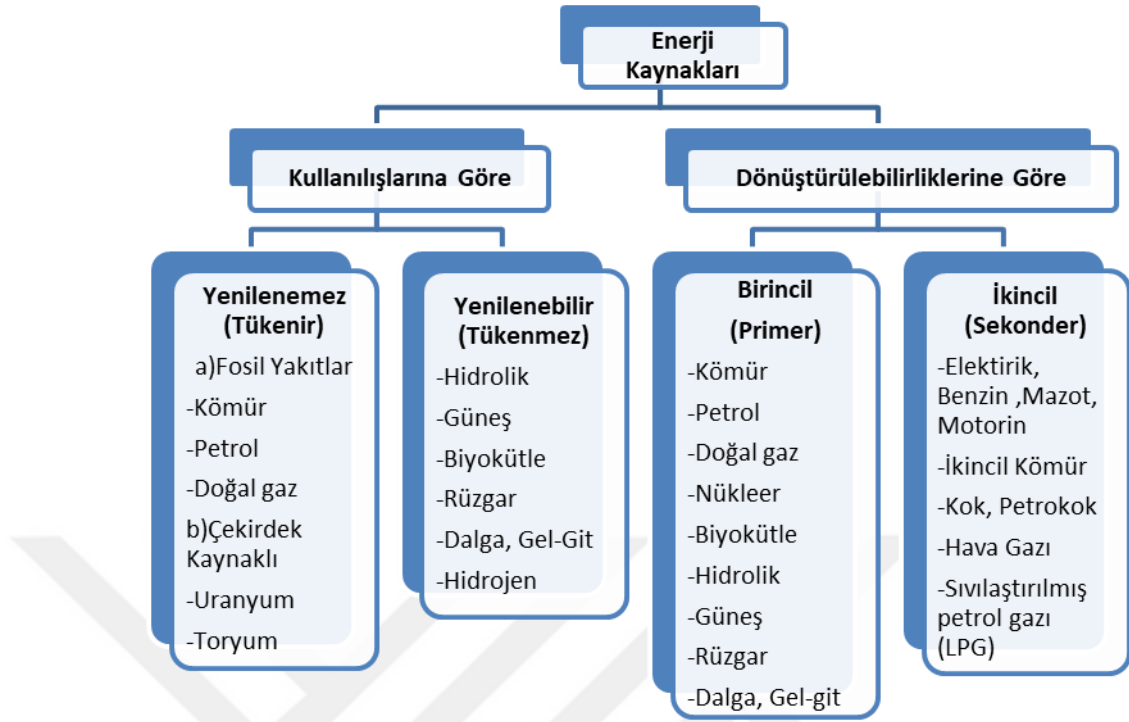
Bu tez çalışmasında, binaların yapı ekonomisi ve bina enerji verimliliğini içeren bina yaşam döngüsü göz önünde bulundurulduğunda, binaların enerji verimliliklerinin değerlendirilmesinde yeni bir ölçüt olan ve ekserjinin enerjiye oranı şeklinde tanımlanan $REXE_{YD}$ [6] parametresini kullanılmıştır. Ömür döngüsü teorisine göre bina yaşam döngüsü beş aşamadan oluşmaktadır. Bunlar; bina malzemelerin üretimi, binanın inşası, binanın kullanımı, binanın bakım-onarımı ve binanın yıkımından oluşmaktadır. $REXE$, bina ömür döngüsünün ve her bir bina aşamasının enerji verimliliğinin değerlendirilmesinde kullanılan bir parametredir.

3. KURAMSAL BİLGİLER

3.1 Enerji ve Ekserji

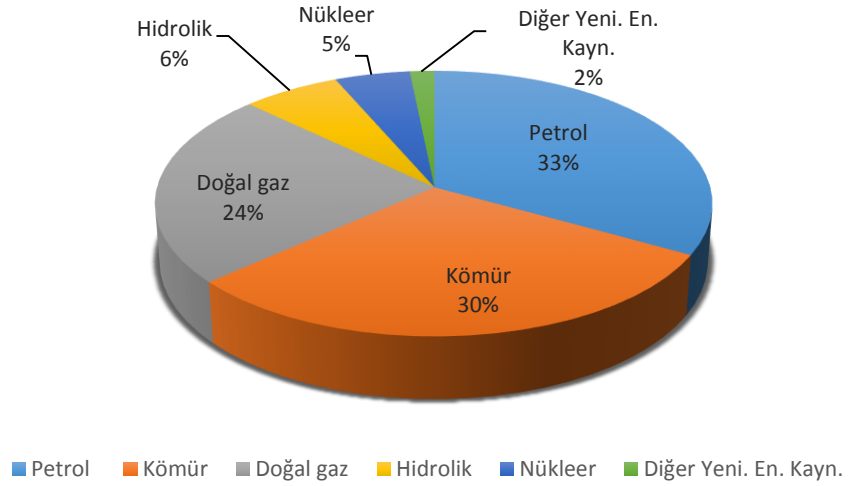
Enerji, fizikte bir sistemin iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Başka bir deyişle değişikliklere yol açan etken olarak ifade edilebilir. Enerjinin kullanılması, insanoğlunun yaşamını sürdürmesinde ve sosyal olarak gelişmesinde temel bir unsur olarak ortaya çıkar. İnsanoğlu enerji kaynağını ilk olarak ısınma amaçlı kullanması ile ilk adımı atmıştır. Günlük yaşamda her aşamada kullanım alanı bulan enerji, kendi içinde farklı kategoriler altında incelenebilir. Bu kategoriler temel olarak; mekanik (kinetik ve potansiyel) enerjisi, elektrik enerjisi, kimyasal enerji, ışık enerjisi, ısı enerjisi, ses enerjisi ve nükleer enerjisidir [15]. Bu farklı kategorideki enerji türleri, içerisinde bulunduğu durum ve şartlara göre farklı yöntemlerle birbirine dönüştürülebilmektedir [13].

Üretilmesi, elde edilmesi, maliyet ve teknik açıdan farklı olan bu kaynaklar, enerji kaynakları olarak tanımlanabilir. Bu kaynaklar üretilirlik açısından farklı kategorilerde sınıflandırılabilir. Şekil 3.1 dönüştürülebilirliklerine göre enerji kaynakları birincil (primer) ve ikincil (sekonder) enerji kaynağı şeklinde ikiye ayrılırken; kullanım türlerine göre enerji kaynakları benzer şekilde yenilenebilir ve yenilenemez kaynaklar olarak ikiye ayrılır [14]. Yenilenebilir enerji kaynakları, gelecekte tükenmeden doğada sürekli kalabilen ve kendini yenileyebilen enerji kaynağı olarak ifade edilebilir. Bu kaynaklara; jeotermal enerjisi, güneş enerjisi, dalga enerjisi, rüzgâr enerjisi, gel-git enerjisi örnek olarak verilebilir. Yenilenemez enerji kaynakları, uzun süreli olmayan ve gelecekte tükenebileceği öngörülen enerji kaynaklarıdır. Bu kaynaklar, fosil kaynaklılar ve çekirdek kaynaklılar olmak üzere iki başlık altında sınıflandırılır. Birincil enerji kaynağı, enerjinin herhangi bir hal değişime ya da dönüşümüne uğramamış hali iken, ikincil enerji, birincil enerjiden elde edilen farklı bir enerji biçimi olarak tanımlanabilir. Birincil enerji kaynaklarına örnek olarak hidrolik, doğalgaz, biyokütle, petrol, kömür, güneş ve rüzgâr verilebilir. Diğer yandan, birincil enerjiden dönüştürülerek elde edilebilen ikincil enerjinin en bilinen örnekleri; motorin, kok kömürü, hava gazı, sıvılaştırılmış petrol gazı, elektrik, benzin olarak karşımıza çıkar. [41]



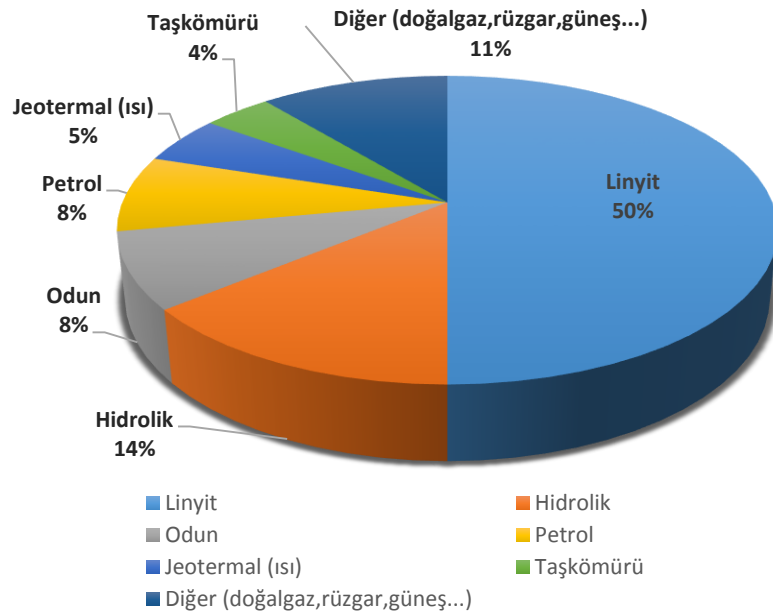
Şekil 3.1. Enerji Kaynakları Türleri

Birincil enerji kaynakları, günümüzde dünyada kullanılan enerjinin çoğunu oluşturmaktadır. OECD verilerine göre dünyada kullanılan toplam birincil enerji kaynakları miktarı yaklaşık 12.275 Mtep (milyon ton eşdeğer petrol)'dur. Şekil 3.2'de, birincil enerji kaynaklarının kullanım oranları sunulmuştur. Verilen şekilde, birincil enerji kaynakları açısından en büyük kullanım oranına sahip olan kaynağın yaklaşık %33 ile petrol olduğu gözükmemektedir. Petrolün ardından, sırasıyla yaklaşık %30 orana sahip olan kömürün ve yaklaşık %24 orana sahip olan doğalgazın, en yüksek kullanım oranlarına sahip kaynaklar olduğu söylenebilir. Ayrıca, aynı şekil üzerinde verilen "Diğer Yeni. En. Kayn." olarak ifade edilen birincil enerji kaynakları ise; güneş, jeotermal, rüzgâr ve biyoyakıt kaynaklarından oluşmaktadır [42]



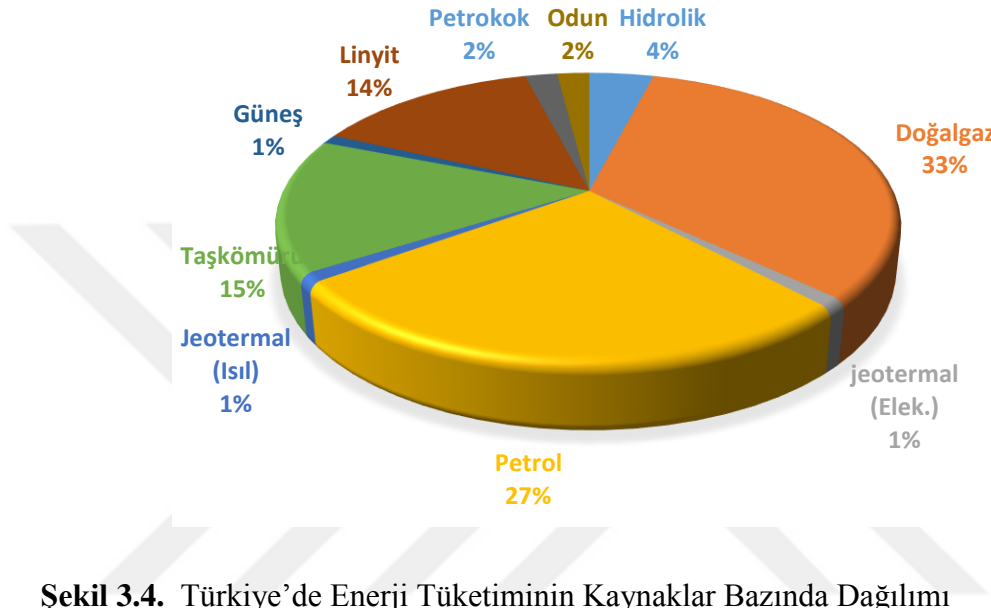
Şekil 3.2. Dünyada Birincil Enerji Kullanımı

Ülkemizde ise, son yıllardaki veriler dikkate alındığında, birincil enerji üretiminin yaklaşık 32.223 Btep (bin ton eşdeğer petrol) olarak gerçekleştiği söylenebilir. Ülkemizdeki birincil enerji üretim kaynaklarının birbirlerine kıyasla oranları Şekil 3.3’de verilmiştir. Bu oranlar dikkate alındığında, ülkemizde en yüksek birincil enerji kaynağının yaklaşık %50 oranla linyit olduğu söylenebilir. Linyitin ardından sırasıyla, hidrolik, petrol ve odun gelmektedir. [43]



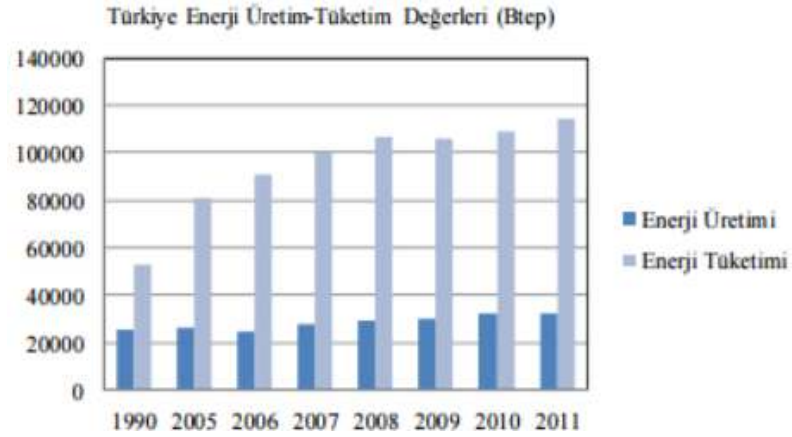
Şekil 3.3. Türkiye’de Birincil Enerji Üretiminin Kaynaklar Bazındaki Dağılımı

Türkiye'nin toplam enerji tüketimi son yıllardaki verilere göre yaklaşık olarak 114.500 Btep'dir. Enerji tüketiminde ülkemiz, dünyada enerji tüken ülkeler sıralamasında 23. sırada yer alırken; enerji tüketimi olarak en çok miktara sahip olan ve bu sebeple de dışa bağımlı olduğumuz enerji kaynaklarını petrol ve doğalgaz oluşturmaktadır [44]. Türkiye toplam enerji tüketiminin kaynak dağılımı Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



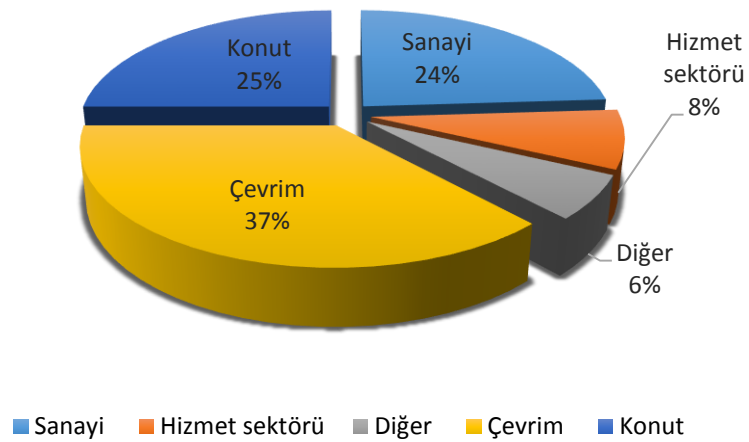
Şekil 3.4. Türkiye'de Enerji Tüketiminin Kaynaklar Bazında Dağılımı

Dünyada ve ülkemizde en fazla tüketilen enerji, ikincil (sekonder) enerji kaynağıdır. Türkiye'de yerli kaynaklardan enerji üretim ve toplam enerji tüketim miktarları Şekil 3.5'de verilmiştir. Başlıca yenilenemez enerji kaynakları; doğalgaz, nükleer, kömür ve petroldür. Dünya rezervleri; kömürde yaklaşık 861 milyar ton, petrolde yaklaşık 225 milyar ton, doğalgazda ise 209 trilyon m³' tür. Bu rezervlerin kalan kullanım ömürleri yaklaşık olarak; kömürde 104 yıl, doğalgazda 56 yıl, petrolde ise 44 yıl olarak öngörülmektedir [45]. Enerji kaynaklarının tükenme eğiliminde olduğu ve enerji kullanımından kaynaklanan çevre sorunlarının da ortaya çıktığı için yapılan enerji planlaması; ithal kaynaklara bağımlı, enerji kaynakları kısıtlı, yetersiz döviz kaynaklara sahip ülkeler için zorunlu bir araç olarak görülmektedir.



Şekil 3.5. Türkiye'de Yerli Kaynaklardan Enerji Üretimi ve Toplam Enerji Tüketimi

Ülkemizde doğal gazda dışa bağımlılık oranı 2018 yılı itibariyle yaklaşık olarak %90'lar seviyesinde olduğu bilinmektedir. Doğal gaz ihtiyacımızda 2017 yılına göre 2018 yılında %8,41 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Bu durum büyük oranda; elektrik üretimindeki, sanayide kullanılan doğal gaz miktarındaki ve konutlardaki gaz tüketimindeki azalmalardan kaynaklanmıştır. Bu üç sektörde bir önceki yıla göre daha az doğal gaz kullanılmıştır. Sektörlere göre doğal gaz tüketiminin yıllara göre karşılaştırması Şekil 3.6'da görülmektedir. 2018 yılında elektrik üretimi için kullanılan doğal gaz miktarı, bir önceki yıla göre %18,7 oranında azalmıştır. Benzer şekilde sanayi sektöründe kullanılan doğal gaz miktarında %10, konutlarda (hane halkı) tüketilen doğal gaz miktarında ise %6 oranında azalma görülmüştür [46].



Şekil 3.6. Ülkemizde Doğal Gaz Tüketiminin Sektörel Dağılımı

Termodinamik; enerji ve bazı enerji çeşitlerinin birbiriyle olan ilişkilerini konu alan bir fizik dalı olarak tanımlanır. Termodinamik bakış açısından enerji; bir sistemde kullanılabilen maksimum enerji ve sistemde meydana gelen kayıplar sonucu yok olan enerji olmak üzere iki kısım halinde incelenir. Termodinamik bakış açısından ekserji ise; bir referans çevreyle denge haline gelirken, bir sistem ya da madde veya enerji akışıyla üretilebilecek maksimum miktarda faydalı iş potansiyeli olarak tanımlanır. Termodinamiğin birinci yasasına göre; enerjinin korunumunu ifade eder, diğer bir deyişle enerji ne yok edilebilir, ne de yoktan var edilebilir. Enerji başka türe dönüşebilir. Sisteme ne kadar enerji verilirse, o oranda iş elde edilir. Termodinamiğin ikinci yasası ise enerjinin niceliğinin yanında, niteliğinin de dikkate alınması gerektiğini ortaya koyar. Doğada meydana gelen değişiklikler enerjinin niteliğini azaltan yönde gerçekleşir. Termodinamiğin ikinci yasası, hal değişimlerinin hangi yönde gerçekleşebileceklerini belirler [47]. Tablo 3.1’de enerji ve ekserji ifadelerinin karşılaştırılması verilmiştir [41].

Tablo 3.1. Enerji ve Ekserji Kavramlarının Karşılaştırılması

ENERJİ	EKSERJİ
Sadece madde ya da enerji akış parametrelerine bağlıdır. Çevresel parametrelere bağlı değildir.	Madde ya da enerji akışı parametrelerine bağlıdır. Çevresel parametrelere de bağlıdır.
Sıfırdan farklı değerleri vardır.	Ölü durumda sıfıra eşittir.
Tüm süreçler için termodinamiğin 1. Kanunuyla gösterilir.	Sadece tersinir süreçler için termodinamiğin 1. Kanunuyla gösterilir.
Tüm süreçler için termodinamiğin 1. Kanunuyla sınırlıdır (tersinir olanlar dahil)	Tüm süreçler için termodinamiğin 2. Kanunuyla sınırlı değildir.
Hareket ya da hareketi üretme kabiliyetidir.	İş ya da iş üretme kabiliyetidir.
Bu süreçte her zaman korunur ne vardan yok olur ne de yoktan var edilir.	Tersinir süreçlerde her zaman korunur, tersinmez süreçlerde her zaman tüketilir.
Miktarın (niceliğin) bir ölçüsüdür.	Niceliğin ve entropi nedeniyle niteliğin (kalitenin) bir ölçüsüdür.

3.2 Enerji ve Ekserji Analizi

Ülkelerin sürdürülebilir kalkınması için gerekli olan enerji kullanımı; küresel ısınma, asit yağmurları, ozon tabakasının delinmesi, iklim değişimi gibi çevresel felaketlere sebep olmaktadır. Ayrıca enerjinin yoğun kullanımı, özellikle başlıca enerji kaynaklarımızdan olan fosil yakıt rezervlerinin yakın gelecekte tükenecek olması ve bunun sonucu olarak da giderek yakıt fiyatlarının sürekli artması, ekserji terimi ve ekserji analizini önemli hale getirmektedir. Bu nedenle enerji ve ekserji analizlerin yapılmasında; termodinamik kanunlar, önemli bir rol oynamaktadır. Enerji ve ekserji analizi, termodinamiğin birinci ve ikinci kanunlarını birlikte ele alan ve enerjinin maksimum kullanımı veya faydalı işi ifade eden bir analiz şeklidir. Özellikle birinci kanun enerji analizi yapmakta kullanılırken, ikinci kanun da tersinir ve tersinmezliği belirlediği için ekserji analizinde kullanılır. Bu konu ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır [48, 49]. Bu nedenle bu tez çalışmasında seçilen binaların yaşam döngüsü içerisindeki enerji ve ekserji analizleri, hem birinci kanun (enerji analizi) hem de ikinci kanun (ekserji analizi) kullanılarak yapılmıştır.

3.3 Çalışma Bölgesinin Tanıtılması

Binaların yaşam döngüsü enerji ve ekserji analizlerinin daha gerçekçi yapılabilmesi için bulundukları lokasyonların, iklim şartlarının ve bina özelliklerinin göz önüne alınması gerekmektedir. Tez kapsamında seçilen binalar Yozgat ilindedir. İç Anadolu Bölgesi'nin batısında bulunan Yozgat ili yazları sıcak, kışları soğuktur. Seçilen örnek binalar güçlendirilmiş betonarme yöntemi ile inşa edilmiş ve yalıtım kabuğu ile donatılmış binalardır. Bu binaların ömrünün yaklaşık 50 yıl olacağı düşünülmektedir. Bu çalışmada, yaşam döngüsü sürecinde, binaların seçilen profil ve detaylarına ait enerji kullanım hesaplarının yapılması hedeflenmektedir. Bu binaların toplam inşaat alanları ve bina tipleri Tablo 3.2'de verilmiştir. Bütün binaların ısıtma ve soğutma yükleri, ısı mühendisliği bilim dalı içerisinde yaygın ve etkin bir biçimde kullanılan metot ve yöntemler kullanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 3.2. Binaların Detayları

Binalar	Toplam inşaat alanı (m ²)	Bina tipleri
A Binası	1.500	Anaokulu Binası
B Binası	848,52	ASM-TSM Binası
C Binası	725	Spor salonu Binası
D Binası	4.926	Yurt Binası

Seçilen binaların profilleri sırasıyla; (a)-Anaokulu, (b)-Aile ve Toplum Sağlık Merkezi, (c)-Spor Salonu ve (d)-Yurt Binası Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Seçilen Binaların Profilleri

Bu çalışmada yapılmış olan hesaplamalarda kullanılan dış çevre parametreleri (şartları) ve tipik iklim değerleri, Yozgat Meteoroloji İl Genel Müdürlüğü’nden temin edilmiştir. Binaların soğutulması için tarih aralığı; 15 Haziran 2018-15 Eylül 2018 dönemi, ısıtılması için tarih aralığı ise; 15 Ekim 2018-15 Mayıs 2019 dönemi olarak seçilmiştir. Bu verilere ilaveten, binaların iç hava sıcaklığı yaz şartları için 24⁰ C; kış şartları için ise 18⁰ C olarak alınmıştır.

4. TEORİK VE BİLİMSEL MODELLERİN ORTAYA KONMASI

Birçok araştırmacı ve mühendis; sistemleri ve süreçleri analiz etmek, değerlendirmek, tasarlamak, iyileştirmek ve optimize etmek için ekserji analiz yöntemlerinin güçlü bir araç olduğunu ifade etmişlerdir. Ekserji analizlerinin faydalarının büyük olduğu, özellikle enerji analizleriyle karşılaştırıldığında ortaya çıkmaktadır. Hesaplamalarda ekserji analizi için enerji kalitesi dikkate alınır. Bu nedenle ekserji analizi; ulaşım, bina yaşam döngüsü enerji verimliliği ve ekolojik değerlendirme gibi pratik projelerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Farklı amaçlar için kullanılan binaların performansının belirlenmesinde kullanılan parametrelerin binaların performansı üzerindeki etkileri, detaylı olarak incelenmiştir. Bu çalışmada yapılan incelemeler ışığında, binaların yaşam döngülerinin tam anlaşılması ve bu binaların ömürleri üzerinde yapılması gereken iyileştirmelerin önerilmesi planlanmaktadır. Bu çalışmada kullanılacak olan hesaplama modeli için çeşitli performans kriterleri mevcuttur. Bu bölümde, kriterler alt başlıklar altında sunulmuştur.

4.1 Binaların Ekserji Tüketiminin Enerji Tüketimine Oranı REXE'nin Tanımlanması

Binaların ekserji tüketimi hesaplamaları, özellikle enerji tüketimlerinin hesaplanması ile karşılaştırıldığında oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Bina ömür döngüsünün ekserji tüketiminin daha iyi anlaşılabilmesini sağlamak için REXE terimi önerilmiştir [6]. Aynı zamanda bina yaşam döngüsünün her aşamasının REXE değerleri de Denklem 4.1'de ki eşitlik kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$REXE = Ex/E \quad (4.1)$$

Bu denklemde Ex ve E , binanın ekserji ve enerji tüketimini ifade eder. REXE ise, binanın enerji tüketimi ile ekserji tüketimi arasındaki ilişkiyi açıklar. Bu tez çalışmasında temel olarak bina yaşam döngüsünün REXE analizi üzerinde durulmuştur. Ayrıca bu çalışmada bina yaşam döngüsünün her aşaması için REXE değerlerinin hesaplanmasına ve bu hesaplanan REXE değerlerinden yararlanılarak toplam bina kullanım ömrünün $REXE_{YD}$ değerinin bulunmasına odaklanılmıştır. Bina yaşam döngüsünün $REXE_{YD}$ değeri, hesaplanan ekserji ve enerji tüketimlerinin oranlanmasıyla elde edilebilir. Aslında $REXE_{YD}$ değeri, toplam bina yaşam döngüsü

sırasında tüketilen yakıtların enerji kalite katsayılarının ağırlıklı ortalama değerini tanımlar.

Bina kullanım ömrü ile ilgili olan bina yaşam döngüsü parametresi $REXE_{YD}$, genellikle binanın enerji ve ekserji tüketimleri ile alakalı olduğu bir terimdir. Bina enerji tüketimi değeri bilindiği sürece; bina yaşam döngüsü ekserji tüketimi, $REXE_{YD}$ terimi kullanılarak kolayca elde edilebilir. Bununla birlikte $REXE_{YD}$ terimi, bina yaşam döngüsü enerji verimliliğini değerlendirmek için yeni bir termodinamik parametre olarak karşımıza çıkmakta ve bina enerji kullanım oranını açıklamaktadır. Binaların toplam yaşam döngüsünün analizinde kullanılan $REXE_{YD}$ değeri aşağıdaki aşamalar yoluyla hesaplanır.

4.2 Elektrik ve Yakıt Ekserjilerinin Hesaplanması

Yakıtın ekserjisi, adyabatik yanma sıcaklığında yanma gazının ekserjisi olarak düşünülebilir [50, 51]. Enerji kalitesi katsayısı ile hesaplanır. Yakıtın enerji kalitesi katsayısı λ_y [6], Denklem (4.2)'de verilmiştir.

$$\lambda_y = 1 - (T_0 / (T_{yanma} - T_0)) \cdot \ln(T_{yanma} / T_0) \quad (4.2)$$

Bu denklem de T_{yanma} , yakıtın teorik adyabatik yanma sıcaklığını; T_0 , referans sıcaklığı olarak alınan dış ortam sıcaklığını ifade eder. Genellikle yaygın olarak kullanılan yakıtların enerji kalite katsayıları [50, 52, 53] kaynaklarından alınmıştır. Yakıtın ekserjisi Ex_y , Denklem (4.3) kullanılarak hesaplanır [50, 54].

$$Ex_y = \lambda_y \cdot Q_{alt,y} \quad (4.3)$$

Burada $Q_{alt,y}$ yakıtın alt ısı değeri. Yakıtların alt ısı değeri Tablo 4.1'de verilmiştir [6].

Tablo 4.1. Enerji Kaynaklarının Alt Isıl Değeri ve Ekserji Değeri

Kullanılan malzemeler	λ	Alt ısı değeri ($Q_{alt,y}$)	Ekserji
Standart kömür (liniyit)	0,528	29.307,60 (kJ/kg)	15.474,42 (kJ/kg)
Motorin (Ağır yağ)	0,706	41.281,85 (kJ/kg)	29.145 (kJ/kg)
Sanayi yakıtı (fuel oil)	0,706	38.518,56 (kJ/kg)	27.194,10 (kJ/kg)
Benzin	0,706	43.542,72 (kJ/kg)	30.741,16 (kJ/kg)
Dizel	0,706	42.705,36 (kJ/kg)	30.149,98 (kJ/kg)
Doğal gaz	0,721	34.541,10 (kJ/m ³)	24.904,13 (kJ/m ³)
Elektrik	1	3.600 (kJ/kWh)	3.600 (kJ/kWh)

Teorik olarak elektrik enerjisi tamamen mekanik işe dönüştürülebilir. Bu sebeple, elektriğin ekserji ve enerji değerleri aynı alınır ve bu nedenle elektrik enerjisinin enerji kalite katsayısı 1 olarak kabul edilir [55].

4.3 Bina Yaşam Döngüsü İçin Ekserji, Enerji Tüketimlerinin ve REXE'nin Hesaplanması

Ömür döngüsü teorisine göre, bina yaşam döngüsü beş aşamaya ayrılabilir. Bunlar; inşaat malzemelerin üretimi, binanın inşası, binanın kullanımı, binanın bakım-onarımı ve binanın yıkımından oluşmaktadır. Beş aşamanın enerji tüketimi ve ekserji tüketimi hesaplama modeli aşağıdaki alt başlıklarda verilmiştir.

4.3.1 Bina malzemesinin üretimi ve bina bakım onarım aşamaları için ortaya çıkan enerji, ekserji tüketimlerinin ve REXE'nin hesaplanması

Bu tez çalışmasında binalarda kullanılan ana yapı malzemeleri başlıca; tuğla, içi boş kil tuğla, beton, çelik çubuk, kireç, cam ve çimentodan oluşmaktadır. Tablo 4.2'de gösterilen bu malzemelerin birim enerji tüketimleri, istatistiksel ve araştırma verilerinden elde edilmiştir [56, 57, 58]. Tablo 4.2 incelendiğinde yapı malzemeleri üretimi için harcanan başlıca enerji kaynaklarının elektrik ve kömür olduğu söylenebilir. Malzeme üretimi sırasında gerçekleşen enerji tüketim $E_{mal,j}$ ve ekserji tüketimi miktarları $Ex_{mal,j}$ Denklem (4.4) ve (4.5)'den hesaplanır.

$$E_{mal,j} = \sum m_{y,i} \cdot Q_{alt,y,i} \quad (4.4)$$

$$Ex_{mal,j} = \sum m_{y,i} \cdot Ex_{y,i} \quad (4.5)$$

Bu denklemde $m_{y,i}$, j . malzemenin üretimi için i . enerji kaynağının tüketim miktarlarını gösterir. $Q_{alt,y,i}$, i . enerji kaynağının alt ısı değeri; $Ex_{y,i}$, ise, i . enerji kaynağının ekserji değeridir. Yapı malzemelerinin bileşenlerine ait $E_{mal,j}$ ve $Ex_{mal,j}$ sonuçları Tablo 4.2'te verilmiştir.

E_{mal} , Ex_{mal} ve $REXE_{mal}$ değerleri sırasıyla Denklem (4.6), (4.7) ve (4.8) ile hesaplanır.

$$E_{mal} = \sum m_j \cdot E_{mal,j} \quad (4.6)$$

$$Ex_{mal} = \sum m_j \cdot Ex_{mal,j} \quad (4.7)$$

$$REXE_{mal} = Ex_{mal}/E_{mal} \quad (4.8)$$

Burada m_j binaların inşasında kullanılan yapı malzemesi türlerinin kullanım miktarını $Ex_{mal,j}$ ve $E_{mal,j}$ yapı malzemesi türünün birim miktarına ait üretim aşamasında harcanan ekserji ve enerji miktarlarını ifade etmektedir.

Tablo 4.2. Yapı Malzemelerin Üretim Aşamasındaki Enerji, Ekserji Tüketimleri, $REXE_{mal}$ Değeri ve Malzemelerin Üretim Maliyeti

Malzeme Türleri	Elektrik (kW-h)	Kömür (kg)	Motorin (kg)	Doğalgaz (kg)	$E_{mal,j}$ (MJ)	$Ex_{mal,j}$ (MJ)	$REXE_{MAL}$	Maliyet (TL)
Tuğla 190 x 85 x 190 mm (1000 adet.)	42,80	156,8	0	0	4.749,51	2.580,47	0,54	310
Tuğla 190 x 135 x 190 mm (1000 adet.)	55,32	205,6	0	0	6.224,79	3.380,69	0,54	390
Beton (m ³)	41,85	29,15	0	0	1.004,98	601,74	0,60	135
Çelik çubuk (kg)	6,62	2,32	0,262	0,019	100,30	67,84	0,68	4,02
Kireç (kg)	0,0486	0,144	0	0	4,40	2,40	0,55	0,23
Cam (kg)	1,092	0,436	0,2486	0	26,97	17,92	0,66	3,33
Çimento (kg)	0,166	0,156	0	0	5,17	3,01	0,58	0,7

Bina bakım-onarım sürecinin enerji tüketimi $E_{bakım}$ ve ekserji tüketimi $Ex_{bakım}$ değerleri bina malzemelerinin üretimi aşamasına bağlı olarak [59], Denklem (4.9) ve (4.10) kullanılarak hesaplanır.

$$E_{bakım} = \varphi \cdot E_{mal} \quad (4.9)$$

$$Ex_{bakım} = \varphi \cdot Ex_{mal} \quad (4.10)$$

Burada φ binanın bakımı ile ilgili bir orandır ve % 12 olarak alınır [59].

Bina yapı malzemelerinin üretimi ve bina bakım-onarımı aşamalarına ait $REXE_{mal}$ ve $REXE_{bakım}$ değerleri Denklem (4.11) yardımıyla hesaplanır.

$$REXE_{bakım} = Ex_{bakım}/E_{bakım} = REXE_{mal} \quad (4.11)$$

4.3.2 Binanın inşası ve yıkımı aşamaları için enerji, ekserji tüketimi değerleri ve bu aşamalar için REXE oranlarının hesaplanması

Yapı inşaatı süreci boyunca detaylı istatistiksel veriler elde etmek çok zor ve karmaşıktır. Çeşitli inşaat makinaları tarafından tüketilen enerji, binanın inşası

aşamasında tüketilen enerjinin çoğunu oluşturur. Yapılan araştırmalar neticesinde elde edilen verilere göre inşaat makinaları tarafından kullanılan ana enerji kaynakları elektrik, dizel ve benzindir [6].

Bina inşası sürecinde tüketilen enerji $E_{inşa}$, tüketilen ekserji ise $Ex_{inşa}$ ve $REXE_{inşa}$ değerleri Denklem (4.12), (4.13) ve (4.14) yardımıyla bulunur.

$$E_{inşa} = \sum m_i \cdot Q_{alt,y,i} \quad (4.12)$$

$$Ex_{inşa} = \sum m_i \cdot Ex_{y,i} \quad (4.13)$$

$$REXE_{inşa} = Ex_{inşa} / E_{inşa} \quad (4.14)$$

Burada m_i , bina yapımı sırasında tüketilen i . enerjinin miktarını, $Q_{alt,y,i}$, i . enerji kaynağının alt ısı değeri; $Ex_{y,i}$ ise i . enerjinin ekserji miktarını belirtir.

Binanın yıkımı sürecinde harcanan enerji tüketimi $E_{yıkım}$, ekserji tüketimi ise $Ex_{yıkım}$ binanın inşa (yapım) aşamasına bağlı olarak Denklem (4.15) ve (4.16) yardımı ile hesaplanır [60] :

$$E_{yıkım} = \psi \times E_{inşa} \quad (4.15)$$

$$Ex_{yıkım} = \psi \times Ex_{inşa} \quad (4.16)$$

Burada ψ binanın yıkımı ile ilgili bir orandır ve % 90 olarak alınır [60].

Bina inşası ve yıkımı için $REXE_{inşa}$ ve $REXE_{yıkım}$ değerleri Denklem (4.17) de aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$REXE_{yıkım} = REXE_{inşa} = Ex_{inşa} / E_{inşa} \quad (4.17)$$

4.3.3 Bina kullanım aşaması için enerji, ekserji tüketimi değerlerinin ve bu aşamaya ait REXE oranlarının hesaplanması

Binanın kullanım aşaması en uzun aşamadır ve bina yaşam döngüsünde tüketilen en fazla enerji bu aşamada tüketilir. Bu aşamada ortaya çıkan enerji verimliliği, bina yaşam döngüsü enerji verimliliği için büyük bir öneme sahiptir. Bina kullanım aşaması için enerji ihtiyacı, toplam enerji ihtiyacının %50 ila %60'ını kapsayan sıcak su, iletişim, aydınlatma ve HVAC (Heating Ventilating and Air Conditioning) sisteminden oluşur [61]. Bu tez çalışmasında, bina kullanım aşaması için sadece

HVAC sisteminin ısıtma ve soğutma uygulamasında harcanan enerji tüketimi dikkate alınmıştır. Bu çalışmada HVAC sistemi enerji tüketimine odaklanıldığından; sıcak su, iletişim ve aydınlatma için tüketilen enerji dikkate alınmamıştır. Çünkü bu tez çalışmasında binanın dış cephesi ile ilgili enerji tüketimine odaklanılmıştır. Bütün binaların ısıtılmasında Doğal Gazlı Merkezi Isıtma sisteminden; soğutulmasında ise ya İklimlendirme - Havalandırma Sisteminden ya da Split Klima Sisteminden yararlanılmıştır. Binaların kullanım aşamalarında tüketilen enerji türü; ısıtmada doğal gaz, soğutmada ise elektrik enerjisi olduğu bilinmektedir. Yıllık enerji tüketimi $E_{kul,yıl}$, ekserji tüketimi $Ex_{kul,yıl}$ ve $REXE_{kul,yıl}$ Denklem (4.18), (4.19) ve (4.20) ile hesaplanır. Yapılan hesaplamaların tablosu Ek 1 ve Ek 2’de sunulmuştur.

$$E_{kul,yıl} = E_{elek} \cdot N_{elek,yıl} + E_{d.gaz} \cdot N_{d.gaz,yıl} \quad (4.18)$$

$$Ex_{kul,yıl} = Ex_{elek} \cdot N_{elek,yıl} + Ex_{d.gaz} \cdot N_{d.gaz,yıl} \quad (4.19)$$

$$REXE_{kul,yıl} = Ex_{kul,yıl} / E_{kul,yıl} \quad (4.20)$$

Sırasıyla E_{elek} , $E_{d.gaz}$, Ex_{elek} ve $Ex_{d.gaz}$ elektrik ve doğal gazın enerji ve ekserji tüketim değerlerini gösterir. $N_{elek,yıl}$, binaların soğutulmasında kullanılan yıllık elektrik tüketim miktarıdır. $N_{d.gaz,yıl}$, binaların ısıtılmasında tüketilen yıllık doğal gaz tüketim miktarıdır.

4.4 Bina yaşam döngüsü için toplam enerji ve ekserji tüketimlerinin ve $REXE_{YD}$ ’nin hesaplanması

Bu çalışmada bina yaşam döngüsü beş aşamaya ayrılmaktadır: Bina Malzemelerin Üretimi, İnşaatı, Kullanımı, Bakım-Onarımı ve Yıkımından oluşmaktadır. Binaların ömrü 50 yıl olarak kabul edilmiştir. Bina yaşam döngüsünün enerji ve ekserji tüketimi, bu beş aşamanın toplamıdır.

$$E_{YD} = E_{mal} + E_{inşa} + E_{kul,yıl} \cdot N' + E_{bakım} + E_{yıkım} \quad (4.21)$$

$$Ex_{YD} = Ex_{mal} + Ex_{inşa} + Ex_{kul,yıl} \cdot N' + Ex_{bakım} + Ex_{yıkım} \quad (4.22)$$

Burada E_{YD} , bina yaşam döngüsünün enerji tüketimidir; Ex_{YD} ise bina yaşam döngüsünün ekserji tüketimidir; N' binaların yaşam döngüsünü ifade eder ve 50 yıl olarak kabul edilir. Toplam bina yaşam döngüsüne ait $REXE_{YD}$ değeri aşağıda Denklem (4.23)’ de verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$REXE_{YD} = Ex_{YD}/E_{YD} \quad (4.23)$$

Burada E_{YD} ve Ex_{YD} sırasıyla, bina yaşam döngüsünün toplam enerji tüketimi ve ekserji tüketimini ifade etmektedir.

4.5 $REXE_{YD}$ Değerinin Optimizasyonunda Kullanılan Regresyon Modelleri

Bina yaşam döngüsü enerji tüketimi ile $REXE_{YD}$ arasındaki ilişkiyi araştırmak için elde edilen sonuçlara regresyon analiz yöntemleri uygulanmıştır. Dört farklı binaya ait hesaplanan sonuçlar regresyon analizinde örnek veriler olarak alınmıştır. Örneklerin miktarı regresyon modellerinin doğruluğunu etkileyecektir. Çünkü sadece dört örnek için bir regresyon modeli oluşturulamaz. Bu nedenle, bina yaşam döngüsü fonksiyonları olan enerji tüketimi E_{YD} ile $REXE_{YD}$ arasındaki ilişkinin belirlenmesi ve optimum değerlerin elde edilmesi için; regresyon analizinde Lineer, Quadratik, Power ve Power-2 regresyon matematiksel modellerinden yararlanılmıştır. $REXE_{YD}$ ve E arasındaki ilişki Denklem (4.24)'de ifade edilir.

$$REXE_{YD} = f(E) \quad (4.24)$$

4.6 Bina Ömür Döngüsünün Ekonomik Analizi

$REXE_{YD}$ hakkında genel bir çalışma yapabilmek için, bina yaşam döngüsünün ekonomik analizine de bu çalışmada yer verilmiştir. Bina yaşam döngüsünün ekonomik analizi; yapı malzemeleri üretiminin, bina inşasının, bina kullanımının, bina bakım onarımının ve bina yıkımının maliyet analizi yapılarak sunulmuştur.

Bina yaşam döngüsünün toplam maliyeti Denklem (4.25) ile elde edilir. Sırasıyla M_{mal} , $M_{inşa}$, $M_{kul,yıl}$, $M_{bakım}$, $M_{yıkım}$ değerlerinin hesabı sırasıyla Denklem (4.26), (4.27), (4.28), (4.29) ve (4.30) eşitlikleriyle yapılmaktadır.

$$M_{YD} = M_{mal} + M_{inşa} + M_{kul,yıl} \cdot N' + M_{bakım} + M_{yıkım} \quad (4.25)$$

$$M_{mal} = \sum M_{mal,j} \cdot m_j \quad (4.26)$$

$$M_{inşa} = \sum M_{y,i} \cdot m_i + \sum M_{işçi} \quad (4.27)$$

$$M_{kul,yıl} = M_{elek} \cdot N_{elek,yıl} + M_{d,gaz} \cdot N_{d,gaz,yıl} \quad (4.28)$$

$$M_{bakım} = M_{mal} \cdot \varphi \quad (4.29)$$

$$M_{yıkım} = M_{inşaat} \cdot \psi \quad (4.30)$$

M_{mal} ve $M_{inşa}$, sırasıyla, bina malzemelerinin üretim maliyeti ve inşa yapım maliyetidir. $M_{kul,yıl}$, binanın yıllık kullanımında ortaya çıkan maliyettir. $M_{bakım}$, binanın bakım onarım giderini; $M_{yıkım}$ ise, binanın yıkımı sırasında oluşan maliyet giderinin ifade etmektedir.

$M_{mal,j}$ ve m_j , sırasıyla Tablo 4.2’de verilen malzeme maliyeti ve Tablo 5.1’de kullanılan malzeme miktarını ifade etmektedir. $M_{y,i}$ ve m_i , inşaat makinalarının kullandığı i . enerji kaynağının maliyetini ve tüketim miktarını göstermektedir.

$M_{işçi}$, inşaat işçilik maliyetini ifade eder. Bu maliyet; T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı’nın resmi gazete de 30716 sayılı ve 16 Mart 2019 tarihli yayımlanan “*Yapı Yaklaşık Birim Maliyetleri Hakkında Tebliğ*” den alınan veriler kullanılarak, T.C. Sosyal güvenlik kurumunun sitesinde yer alan “*inşaat işçilik maliyeti hesaplama*” yöntemine göre belirlenmiştir [62]. M_{elek} ve $M_{d.gaz}$, Tablo 4.3’de verilen elektrik ve doğal gazın birim fiyatlarının ve $N_{elek,yıl}$ ve $N_{d.gaz,yıl}$, sırasıyla yıllık soğutma ve ısıtma sistemlerinin elektrik ve doğal gaz tüketim miktarını belirtir. Burada φ binanın bakımı ile ilgili bir orandır ve % 12 olarak alınır [59]. ψ ise binanın yıkımı ile ilgili bir orandır ve % 90 olarak alınır [60].

Tablo 4.3. Enerji Kaynaklarının Fiyatı

Türleri	Elektrik (/kW-h)	Benzin (kg)	Dizel (kg)	Doğal gaz (m ³)
$M_{y,j}$ (TL)	0,57	6,72	5,67	1,3

5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu tez çalışmasında tipik kamu binaları olan anaokulu, ASM-TSM (Aile sağlık merkezi-Toplum sağlık merkezi), spor salonu, öğrenci yurdu binalarının yaşam döngüleri boyunca enerji, ekserji, REXE ve maliyet analizleri yapılmıştır. Bu binalara ait bulgular karşılaştırmalı olarak aşağıdaki başlıklar altında incelenmiştir. Bunun yanında yaşam döngüsü aşamalarına ait maliyet analizi sonuçları da yapılmış ve değerlendirilmiştir. Enerji ve REXE analizlerinden elde edilen sonuçlar, MATLAB programında regresyon analizinde kullanılmıştır. Analiz verilerine göre binalara ait bölgeler oluşturulmuş, binaların verimlilikleri tartışılmış ve yorumlanmıştır.

5.1 Yapı Malzemelerinin Üretimi ve Bina Bakım -Onarımı İçin Elde Edilen $REXE_{Mal}$ ve $REXE_{Bakım}$ Değerlerinin Tartışılması

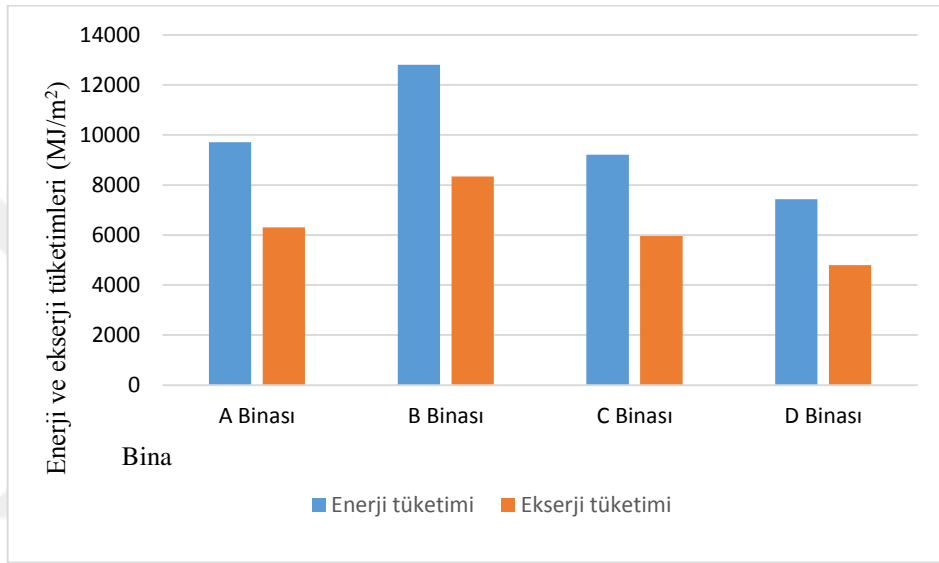
Tablo 5.1’de gösterilen temel yapı malzemelerinin tüketim miktarları, Yozgat Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü’nden temin edilen “*Pratik Bina Yapım Bütçe Listesi*”nden alınmıştır [62]. Yapı malzemelerinin üretim ve bina bakım-onarım aşamaları için elde edilen enerji ve ekserji tüketimleri sırasıyla Tablo 4.2, 4.3 ve 5.1’de sunulan veriler kullanılarak, Denklemler (4.6), (4.7), (4.9) ve (4.10) yardımıyla hesaplama yapılarak elde edilmiştir. Yapı malzemelerinin üretimine ait $REXE_{mal}$ ve $REXE_{bakım}$, Denklem (4.11) kullanılarak elde edilmiştir.

Tablo 5.1. Bina Yapımı İçin Yapı Malzemeleri ve Enerji Tüketimi.

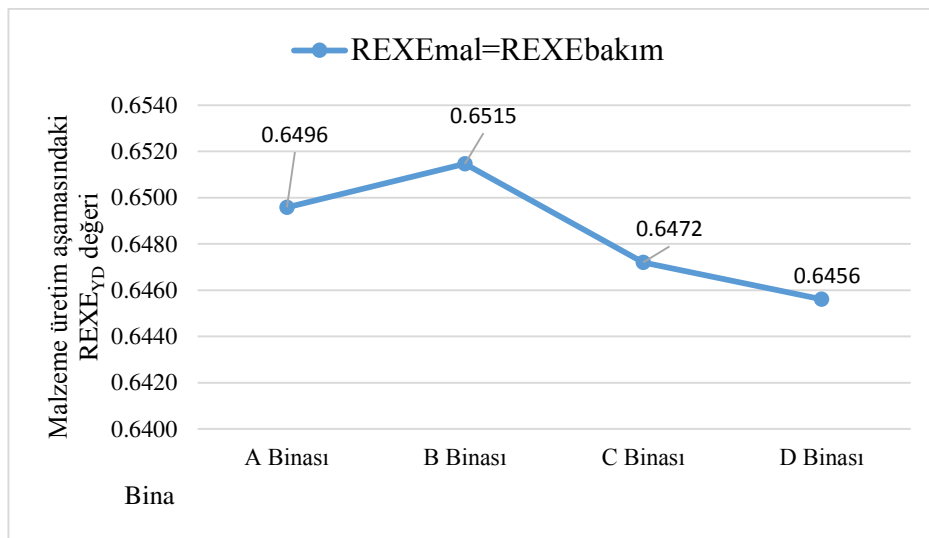
Malzeme türleri	A Binası	B Binası	C Binası	D Binası
Delikli tuğla (190x85x190 adet/m ²)	10,41	28,31	12,80	8,35
Delikli tuğla (190x190x135 adet/m ²)	16,52	10	17,12	27,63
Beton (m ³ /m ²)	0,74	0,73	1,06	0,76
Çelik çubuk (kg/m ²)	83,77	113,61	76,21	60,71
Kireç (kg/m ²)	2,62	1,06	5,32	9,01
Cam (kg/m ²)	1,71	3,61	1	0,51
Çimento (kg/m ²)	21,09	7,02	12	26,01
Elektrik (kW-h/m ²)	1,75	0,99	1,10	4,49
Benzin (kg/m ²)	0,05	0,03	0,05	0,14
Dizel (kg/m ²)	0,07	0,04	0,06	0,12

Binalara ait yapı malzemelerinin üretim aşamasındaki enerji, ekserji tüketimleri hesaplanmış ve Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Tablo 4.2’de verilen her bir yapı malzemesinin enerji, ekserji tüketim miktarları ve $REXE_{mal,j}$ değerlerinden

yararlanılarak hesaplanan bina yapı malzemeleri üretim aşamasına ait $REXE_{mal}$ değeri ise Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Üretilen yapı malzemeleri arasında, çelik ($REXE_{çelik} = 0,68$) değeri ile en fazla paya sahiptir. Bunun nedeni; enerji kalite katsayısı bir olan elektrik enerjisinin çelik malzemesinin üretiminde en fazla tüketilmesidir. Dört binanın üretimi sırasında en fazla çelik B binasında kullanıldığından dolayı, bütün binalar arasında en yüksek $REXE_{mal}$ değeri bu binada görülmektedir.



Şekil 5.1. Binaların Malzeme Üretim Aşamasındaki Enerji ve Ekserji Tüketimleri



Şekil 5.2. Binaların Malzeme Üretim Aşamasındaki $REXE_{mal}$ Değerleri

5.2 Bina İnşası ve Yıkımı İçin Hesaplanan $REXE_{inşa}$ ve $REXE_{yıkım}$ Değerlerinin Tartışılması

İnşaat makinelerinin birim alan başına enerji tüketimleri Tablo 5.1'de verilmiştir. İnşaat makinalarının bina yapım aşamasında harcadığı enerji ve ekserji tüketimleri Denklem (4.12) ve (4.13) kullanılarak elde edilir. Tablo 5.2'ye bakıldığında; bina yapım (inşa) ve bina yıkım aşamalarının enerji tüketimlerinin diğer aşamalar içerisinde bütün binalarda en az paya sahip olduğu görülür. Aslında, bina inşa (yapım) aşaması genellikle büyük maliyet gerektiren elle yapılan işleri içerir. Bu nedenle sonuçlar, $REXE_{inşa}$ değerinin $REXE_{mal}$ değerinden daha yüksek olduğunu gösterir. Bunun nedeni, yapı malzemelerinin üretiminde kullanılan enerjinin genellikle kömür olması ve kömürün de diğer kaynaklar arasında en düşük λ ($\lambda_{kömür} = 0,429$) değerine sahip olmasıdır. Bununla birlikte bina inşa aşamasında tüketilen enerjiler genellikle dizel, benzin ve elektrik olduğundan ve bu kaynakların λ değerlerinin ($\lambda_{dizel} = \lambda_{petrol} = 0,706$; $\lambda_{elektrik} = 1$) kömürün λ değerinden büyük olduğundan kaynaklanmaktadır.

5.3 Binanın Kullanımı Aşaması İçin Hesaplanan $REXE_{kul}$ Değerlerinin Tartışılması

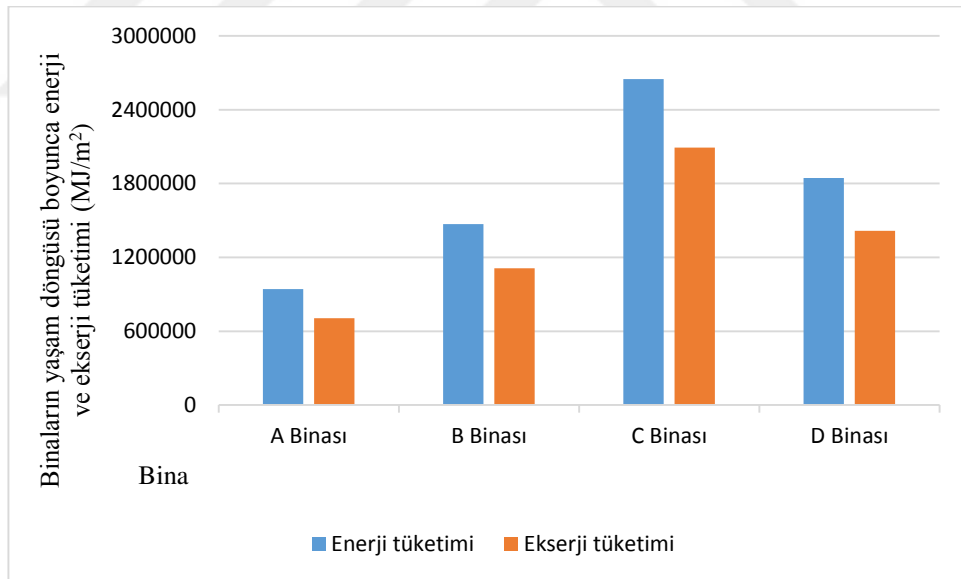
Dört farklı binanın toplam yıllık ısıtma ve soğutma yükü, ısı mühendisliği bilim dalı içerisinde yaygın ve etkin bir biçimde kullanılan metot ve yöntemler kullanılarak hesaplanmıştır. Bina kullanımı sırasında harcanan enerji ve ekserji miktarları Denklem (4.18) ve (4.19) yardımıyla hesaplanmıştır. Sonuçlar; bina kullanım aşamasında A ve B binalarının birim inşa alanına düşen enerji tüketimlerinin, D ve E binaların enerji tüketimlerinden daha az olduğunu göstermektedir. Bunu sebebi D ve E binalarında daha fazla insan hareketliliği olduğundan dolayı büyük ısıtma ihtiyaçlarına sahiptirler. Ayrıca, bu binaların iklimlendirme sistemlerinin günlük çalışma süresi A ve B binalarından daha uzundur. Bu binaların bina kullanım aşamasında en fazla enerji (elektrik ve doğal gaz) tükettiği sonucuna varılır.

5.4 Bina Ömür Döngüsü İçin Hesaplanan Enerji, Ekserji Tüketimi ve $REXE_{YD}$ Değerlerinin Tartışılması

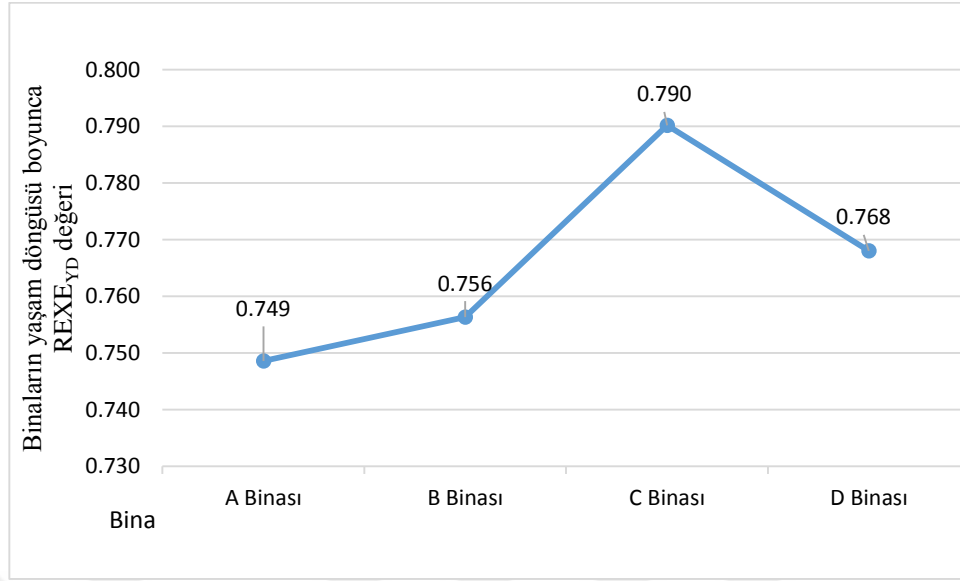
Yukarıdaki sonuçlar ışığında, bina yaşam döngüsüne ait enerji ve ekserji değerleri, Denklem (4.21) ve (4.22) ile elde edilmiştir. Bina yaşam döngüsüne ait $REXE_{YD}$ değeri ise Denklem (4.23) ile hesaplanmaktadır. Dört değişik binaya ait toplam enerji

tüketimleri ve REXE değerleri Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’de görülmektedir. C ve D binalarının birim inşa alanı başına düşen enerji ve ekserji tüketim değerlerinin, A ve B binalarınıninkinden daha fazla olduğu sonucuna varılabilir. Tablo 5.2’e bakıldığında bu dört farklı bina için bina malzemeleri üretim aşamasında ortaya çıkan yüksek enerji tüketimine sahip olan B binası, bina kullanım aşamasında düşük enerji tüketimine sahip binalardandır. Bunun nedeni bina malzeme üretim aşamasında kullanılan çelik çubuğun diğer binalara göre fazla kullanılmasındandır.

C binasının bina yaşam döngüsü boyunca harcanan enerji tüketimi göz önüne alındığında bu dört bina içerisinde en yüksek değere sahip olanıdır. Yine C binasının yaşam döngüsü aşamaları içerisinde en yüksek enerji tüketim değeri bina kullanım aşamasında görülmektedir. Bina kullanım aşaması sırasında ortaya çıkan bu yüksek enerji tüketimi; sadece bina dış cephesi kompozisyonuna bağlı olmayıp, binaların yerleşimi, pencere-duvar oranı, bina şekil faktörü katsayısı, iç ısı kazanımı ve bunun gibi parametrelere bağlıdır.



Şekil 5.3. Binaların Yaşam Döngüleri Boyunca Enerji ve Ekserji Tüketimleri



Şekil 5.4. Binaların Yaşam Döngüleri Boyunca REXE_{YD} Değerleri

Tablo 5.2’de binaların her aşamanın enerji tüketim miktarını göstermektedir. Tabloda binanın kullanımı için gösterilen enerji ve ekserji tüketim değerleri yıllıktır. Yaşam döngüsü için hesaplanan değerler, bina ömrünün 50 yıl olarak kabul edilmesi ile elde edilmiştir. Tablo 5.2’de görüldüğü üzere, bina yaşam döngüsü (REXE_{YD}) değerinin büyük bir oranı (%95-%99) bina kullanım aşamasından elde edilmiştir. Yani, bina yaşam döngüsündeki enerji ve ekserji tüketimi büyük bir oranda bina kullanım süresinden kaynaklanmıştır. Diğer bir deyişle, bina kullanım aşamasına ait enerji verimliliği, bina yaşam döngüsünün tamamındaki enerji verimliliğini hesaplamada ciddi bir rol oynamaktadır. Ayrıca, Tablo 5.2 açıklamaktadır ki; bina yaşam döngüsünün REXE_{YD} değerinin, bina kullanım aşamasının enerji tüketim miktarı ile birlikte arttığı bir gerçektir. Genel olarak söylenebilir ki; çok fazla yüksek miktarda enerji tüketmek bina yaşam döngüsüne ait REXE_{YD} değerinin sıfıra yaklaştırır. Bu durum da bina yaşam döngüsünde verimsiz enerji kullanımını açıklar.

Tablo 5.2. Bina Yaşam Döngüsü Aşamalarındaki Enerji, Ekserji ve REXE Değerleri

Yaşam Döngüsü Aşamaları	Aşamalar	A Binası	B Binası	C Binası	D Binası
İnşaat malzemelerin üretimi	<i>E</i>	9.716,06	12.804,55	9.217,53	7.434,68
	<i>Ex</i>	6.311,35	8.341,78	5.965,63	4.799,91
	REXE	0,6496	0,6515	0,6472	0,6456
Binanın bakım onarımı	<i>E</i>	1.165,93	1.536,55	1.106,10	892,16
	<i>Ex</i>	757,36	1.001,02	715,87	575,99
	REXE	0,6496	0,6515	0,6472	0,6456
Binanın inşası	<i>E</i>	11,38	6,58	8,70	27,38
	<i>Ex</i>	9,89	5,70	7,31	24,09
	REXE	0,8688	0,8654	0,8398	0,8795
Binanın yıkımı	<i>E</i>	10,24	5,93	7,83	24,65
	<i>Ex</i>	8,90	5,13	6,57	21,68
	REXE	0,8688	0,8654	0,8398	0,8795
Binanın kullanımı (Yıllık)	<i>E</i>	18.651,85	29.119,35	52.751,31	36.728,62
	<i>Ex</i>	13.984,05	22.054,57	41.712,59	28.228,81
	REXE	0,7497	0,7574	0,7907	0,7686
Yaşam döngüsü	<i>E</i>	943.496,02	1.470.321,0	2.647.905,5	1.844.809,99
	<i>Ex</i>	706.290,01	1.112.082,2	2.092.325,2	1.416.862,40
	REXE	0,7486	0,7564	0,7902	0,7680

5.5 Bina Ömür Döngüsü Maliyeti Değerlerinin Tartışılması

Binaların yaşam döngüsü aşamalarına ait M_{mal} , $M_{inşa}$, $M_{kul,yıl}$, $M_{bakım}$ ve $M_{yıkım}$ maliyetleri Tablo 4.2, Tablo 4.3, ve Tablo 5.1 'deki verilere göre sırasıyla Denklem (4.26), (4.27), (4.28), (4.29) ve (4.30) kullanılarak elde edilir. Binaların yaşam döngülerine ait toplam maliyet ise Denklem (4.25) ile elde edilir. Sonuçlar, sırasıyla Tablo 5.3, Tablo 5.4, Tablo 5.5, Tablo 5.6 ve Şekil 5.5 'de verilmiştir. Tablo ve şekillerden anlaşılabileceği üzere; C ve D binaların yaşam döngüsü maliyetinin, A ve B binalarınınkinden daha yüksek olduğu aşikârdır. Tüm binalar için bina kullanım aşaması maliyetinin, bina yaşam döngüsü maliyetinin çoğunu oluşturduğu ve yaklaşık olarak %95 - %99 oranında olduğu görülmektedir.

Binaların birim inşa alanı başına düşen maliyet ile $REXE_{YD}$ arasındaki ilişki Şekil 5.5'de verilmiştir. A, B ve C binaları için $REXE_{YD}$ değeri, birim inşa alanı başına düşen maliyet ile birlikte artar. Fakat D binası için $REXE_{YD}$ değeri çok farklı alanlarda değişiklik gösterir. Örneğin bu binada birim inşa alanı başına düşen maliyet azaldığında da $REXE_{YD}$ değeri de azalmıştır. Bundan dolayı sınırlandırılmış örnek binalar sonuçları etkileyebilir. Çok büyük $REXE_{YD}$ değerine sahip binaların ekonomik

olmayacağı sonucuna varılabilir. Bu açıdan, REXE_{YD} binaların ekonomisi için uygun bir açıklığa sahip olmalıdır.

Tablo 5.3. Binaların Yapı Malzemelerin Maliyeti

Malzeme türleri	A Binası	B Binası	C Binası	D Binası
Tuğla (190x85x190 TL/m ²)	3,2271	8,7761	3,968	2,5885
Tuğla (190x190x135 TL/m ²)	6,4428	3,9	6,6768	10,7757
Beton (TL/m ²)	99,9	98,55	143,1	102,6
Çelik çubuk (TL/m ²)	336,7554	456,7122	306,3642	244,0542
Kireç (TL/m ²)	0,6026	0,2438	1,2236	2,0723
Cam (TL/m ²)	5,6943	12,0213	3,33	1,6983
Çimento (TL/m ²)	14,763	4,914	8,4	18,207
M_{mal} (TL/m²)	467,3852	585,1174	473,0626	381,996

Tablo 5.4. Binaların İnşaat Maliyeti

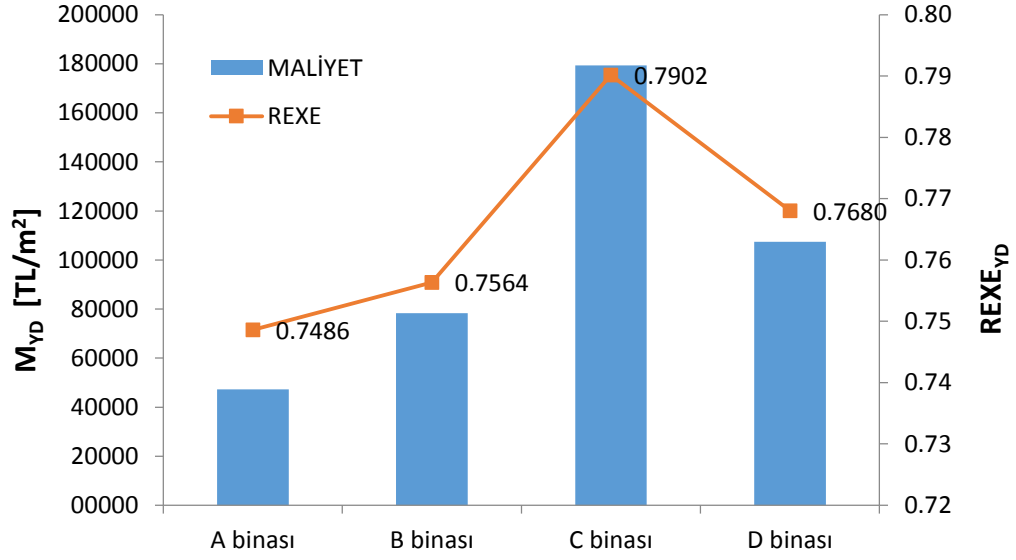
Maliyet kalemleri	A Binası	B Binası	C Binası	D Binası
Elektrik (TL/m ²)	0,998	0,56544	0,627	2,5593
Benzin (TL/m ²)	0,336	0,2016	0,336	0,9408
Dizel (TL/m ²)	0,397	0,2268	0,3402	0,6804
İşçilik (TL/m ²)	66,15	81,675	66,15	110,025
M_{inşa} (TL/m²)	67,86696	82,66884	67,4532	114,2055

Tablo 5.5. Binaların Kullanım Maliyeti

Maliyetler	A Binası	B Binası	C Binası	D Binası
Doğalgaz (TL/m ² yıl)	630	953	1.489	1.147
Elektrik (TL/m ² yıl)	304	601	2.088	992
M _{kul.} (TL/m ² yıl)	934	1.554	3.577	2.138
M_{kul.} . N' (TL/m²)	46.695	77.715	178.844	106.915

Tablo 5.6. Binaların Yaşam Döngüsü Maliyetleri

Maliyetler	A Binası	B Binası	C Binası	D Binası
M_{mal} (TL/m²)	467,39	585,12	473,06	382,00
M_{bakım} (TL/m²)	56,09	70,21	56,77	45,84
M_{inşa} (TL/m²)	67,87	82,67	67,45	114,21
M_{yıkım} (TL/m²)	61,08	74,40	60,71	102,78
M_{kul} (TL/m²)	46.695	77.715	178844	106915
M_{YD} (TL/m²)	47.347,10	78.527,50	179.502,07	107.559,86



Şekil 5.5. Binaların Yaşam Döngüsü Boyunca Birim İnşa Alanına Düşen Maliyeti ve REXE_{YD} Değeri

5.6 Bina Ömür Döngüsü Enerji Tüketimi ile REXE_{YD} Arasındaki İlişkinin Regresyon Modelleri ile İncelemesi

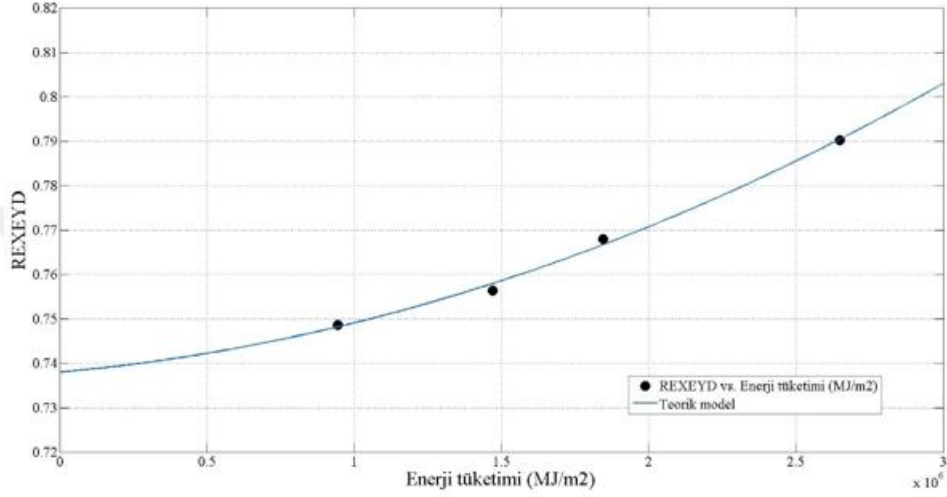
Bina yaşam döngüsü enerji ve maliyet analizi üzerine yapılan çalışmalar incelenmiş; çalışmalarda en doğru sonuçların elde edildiği regresyon modelleri Tablo 5.7’de verilmiştir. Tablo 5.7’de verilen modeller MATLAB yazılımında yapılan regresyon analizinde kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında seçilen binalar için birim inşa alanı başına tüketilen enerji miktarları hesaplanmış ve bu hesaplanan değerler regresyon analizi veri girişini oluşturmaktadır.

Literatürde en yaygın kullanılan regresyon modellerinin deneysel verilere uygulanması ile elde edilen R-Square (R^2) [63] ve Kök Ortalama Kare Hata (RMSE) [64] değerleri hesaplanmış ve Tablo 5.7’de verilmiştir. Bir denklemin uygunluğu tespitinde yüksek R-Square ve düşük RMSE değerlerine bakılır. R-Square ve RMSE değerleri karşılaştırılarak R-Square’nin bir (1)’e ve RMSE değerinin de sıfır (0)’a yaklaştığı durumu veren model seçilir. Literatürde yaygın olarak kullanılan ve MATLAB programında regresyon çalışması yapılan bu dört regresyon modelinin R-Square ve RMSE değerlerine bakılmıştır ve bina yaşam döngüsü için en iyi sonucu veren Quadratik ve Power-2 modelleri seçilmiştir

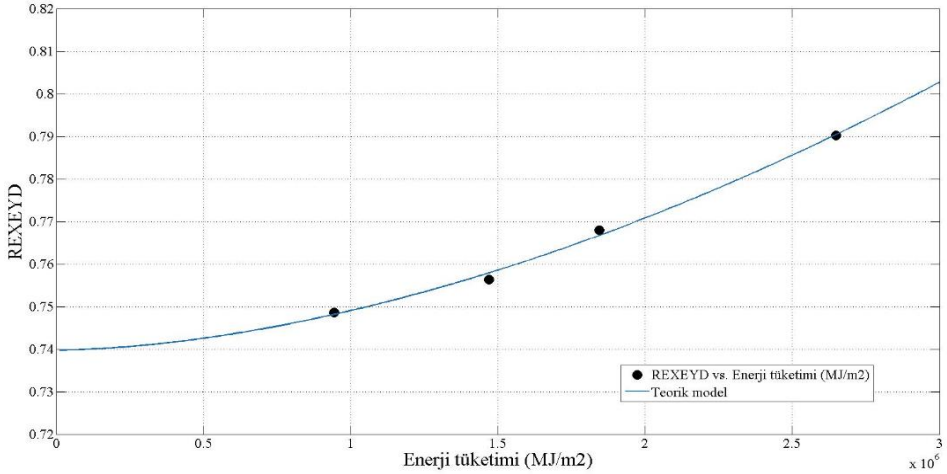
Tablo 5.7. Regresyon Modellerinin Katsayıları, Denklemleri ve Hata Değerleri

Model İsmi	Model Denklemi	A binası	B binası	C binası	D binası	Katsayılar			R ²	RMS
		E _{YD} = 943496,02 MJ/m ²	E _{YD} =1470321,00 MJ/m ²	E _{YD} =2647905,49 MJ/m ²	E _{YD} =1844809,99 MJ/m ²	P1	P2	P3		
		REXE _{YD} =0,7486	REXE _{YD} = 0,7564	REXE _{YD} =0,7902	REXE _{YD} =0,7680					
Lineer	f(x)=p1*x + p2	0,7461	0,7593	0,7888	0,7687	2,505*10 ⁻⁸	0,7225	-	0,983	0,00292
Quadratik	f(x)=p1*x^2+p2*x+p3	0,7482	0,7579	0,7094	0,7667	5,289*10 ⁻¹⁵	5,804*10 ⁻⁹	0,738	0,996	0,00209
Power-1	f(x)=p1*x ^{p2}	0,7442	0,7618	0,7859	0,7710	0,36	0,05279	-	0,922	0,00620
Power-2	f(x)= p1*x ^{p2} +p3	0,7481	0,7579	0,7904	0,7667	3,186*10 ⁻¹³	1,744	0,739	0,996	0,00204

Şekil 5.6 ve 5.7 de verilen bina yaşam döngüsü enerji tüketimi ile $REXE_{YD}$ değerine ait grafik üzerinde görülen dört nokta parabolik dağılım göstermekte ve yaklaşık değerler almaktadır. Bu yüzden bina ömrü boyunca enerji tüketimi ile $REXE_{YD}$ arasındaki ilişki, ikinci dereceden polinom Quadratik regresyonu ve Power-2 regresyonu ile MATLAB kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de sunulmuştur.



Şekil 5.6. Yaşam Döngüsü Boyunca Hesaplanan Enerji Tüketimi ve REXE Değerleri İçin Oluşturulan Quadratik Polinom Eğrisi



Şekil 5.7. Yaşam Döngüsü Boyunca Hesaplanan Enerji Tüketimi ve REXE Değerleri İçin Oluşturulan Power-2 Polinom Eğrisi

5.7 Bina Ömür Döngüsü Enerji Veriminin Tartışılması

5.7.1 Bina yaşam döngüsü boyunca harcanan enerji verimliliğinin tartışılması

Grafiğin sol tarafı bina yaşam döngüsü boyunca düşük enerji tüketimine sahip binaları ifade ederken sağ tarafı bina yaşam döngüsü boyunca yüksek enerji tüketimine sahip binaları ifade eder. Böylece, [6]'da ifade edildiği gibi bina yaşam döngüsü analizine göre binalar 4 bölgeye ayrılır ve her bölgenin performansı aşağıdaki gibi tanımlanabilir, ayrıca binaların enerji verimliliklerine göre dağılımları Ek 3'te sunulmuştur.

I. Bölge:

Binaların performansı: bina yaşam döngüsü boyunca düşük enerji tüketimini ifade eder. Buna bağlı olarak; bina kullanım aşamasının düşük enerji tüketimi miktarı ve bina yapı malzemelerinin üretim aşamasının yüksek enerji tüketimi miktarını ifade eder.

Binaların özellikleri: bina yapı malzemelerinin üretim aşamasının enerji tüketimi, birkaç yeni teknoloji için nispeten düşüktür ve bina dış cephesi yapımı için yeni malzemeler uygulanmaktadır. Aynı zamanda, bina kullanım aşamasının enerji tüketimi, iklimlendirme cihazının günlük kısa kullanım zamanı ve düşük iç mekân konfor talebi için nispeten düşüktür. Bu durum Bina yaşam döngüsü boyunca düşük enerji tüketimi ve düşük $REXE_{YD}$ değerine yol açar. A binası bu bölge için örnek gösterilebilir. Bina yaşam döngüsü boyunca enerji tüketimi ve $REXE_{YD}$ değeri günlük çalışma süresi ve iç mekân konfor talebi artışı olduğu sürece artacaktır.

Bina yaşam döngüsü enerji verimliliği için potansiyel araçlar: Bölüm I' de yer alan binalar, yapı malzemelerinin üretiminin enerji verimliliğine odaklanmalıdır.

II. Bölge:

Binaların performansı: bina yaşam döngüsü boyunca enerji tüketimi artar; Yapı malzemelerinin üretim aşamasının enerji tüketim miktarı azalmakta ve bina kullanım aşamasının enerji tüketim oranı kademeli olarak en üst noktaya yükselmektedir.

Binaların özellikleri: Yeni teknolojilerin ve yeni malzemelerin artan uygulamaları için yapı malzemelerinin üretim aşamasının enerji tüketimi artar. Binaların çalışma evresinin enerji tüketimi, iç mekân konforunun iyileştirilmesi ve her gün çalışma süresinin uzaması için artmaktadır. $REXE_{YD}$, bina kullanım aşamasının yükselen

enerji tüketim oranı ile birlikte zirveye çıkmaktadır. Bu çalışmada C Binası, II. Bölge için örnek bina gösterilebilir.

Bina yaşam döngüsü enerji verimliliği için potansiyel araçlar: II. Bölgede bulunan binalar, bina kullanım aşamasının enerji verimliliğine odaklanmaktadır. Jeotermal ve fotovoltaik elektrik gibi düşük kaliteli enerji kaynakları, elektrik gibi yüksek kaliteli enerji kaynağının aşırı kullanımını önlemek için soğutma ve ısıtma kaynağı olarak kullanılabilir.

III. Bölge:

Binaların performansı: bina yaşam döngüsü boyunca enerji tüketimi artmaya devam ediyor; bu aşama da yapı malzemelerinin üretimindeki enerji tüketimi miktarı düşük olurken ve bina kullanım aşamasının enerji tüketimi oranı nispeten yüksektir ve kademeli olarak azalır

Binaların özellikleri: Yeni teknolojilerin ve yeni malzemelerin uygulamalarının artışının devam etmesi için yapı malzemelerinin üretim aşamasının enerji tüketim oranı artar. Yeni teknolojinin ve yeni malzemelerin bina dış cephesine uygulanması, binaların ısıtma ve soğutma yükünü azaltmaya yardımcı olur. Böylece, REXE_{YD} artan bina yaşam döngüsü boyunca artış gösteren enerji tüketimi ile birlikte azalır. Bu çalışmada D Binası, III. Bölge için örnek bina gösterilebilir.

Bina yaşam döngüsü enerji verimliliği için potansiyel araçlar: III. Bölgede yer alan binalar, yapı malzemeleri üretim aşamasının yanı sıra binanın kullanım aşamasının enerji verimliliğine de odaklanmalıdır. Yapı malzemelerinin üretim aşamasının enerji verimliliği artırılmalı ve düşük kaliteli enerji kaynakları soğutma ve ısıtma kaynağı olarak uygulanabilir.

IV. Bölge:

Binaların performansı: bina yaşam döngüsü boyunca enerji tüketimi artmaya devam ediyor; bu aşama da yapı malzemelerinin üretimindeki enerji tüketimi oranının da artış olurken, bina kullanım aşamasının enerji tüketimi oranı nispeten düşüktür ve kademeli olarak artar.

Binaların özellikleri: bina dış cephesi için uygulanan Yeni teknoloji ve yeni malzemeler maksimum kullanımlarına kadar kademeli olarak artırılır. Aşırı güçlendirilmiş dış cephe binanın ısıtma ve soğutma yükünü daha fazla

azaltmayacaktır. Bina yaşam döngüsünün çok yüksek enerji tüketimi ciddi sonuçlara yol açar. Bu çalışmada B Binası, IV. Bölge için örnek bina gösterilebilir.

Bina yaşam döngüsü enerji verimliliği için potansiyel araçlar: IV. Bölgede bulunan binalar, yapı malzemelerinin üretim aşamasındaki enerji verimliliğine odaklanmalıdır. Bina dış cephesinin oluşturulması için enerji tüketimi kesinlikle kontrol edilmelidir. Aynı zamanda bina dış cephesinin oluşturulmasında yeni malzemelerin ve yeni teknolojilerin aşırı kullanılmasından kaçınılmalıdır.

5.7.2 REXE_{YD} değerlerinin tartışılması

Bina yaşam döngüsüne ait REXE_{YD} değeri, temel olarak enerji tüketim miktarı ile bina yapı malzemesinin üretim aşaması ve bina kullanım aşamasının REXE değerlerine bağlıdır. REXE_{mal}, yapı malzemelerinin üretiminde kullanılan enerji kaynaklarının enerji kalitesi katsayısına bağlıdır.

Enerji kaynakları temel olarak standart kömür, petrol, doğal gaz, elektrik ve benzindir. Tablo 4.1'de gösterildiği gibi, minimum enerji kalitesi katsayısı, standart kömürün enerji kalitesi katsayısı olan 0,528'dir. Daha sonra, bina yaşam döngüsü boyunca tüketilen tek enerji kaynağı standart kömür olduğu durumda, REXE_{YD,min} = 0,528 olur. Bina yaşam döngüsü boyunca tüketilen enerji kaynakları elektrik ve doğal gaz (REXE_{kul} < 1) olduğu durumda REXE_{YD,max} bir'e (1) yakın değer alır. Sonuç olarak REXE_{YD} parametresinin alabileceği değerler, 0,528 ile 1 arasında değiştiği söylenebilir.

Daha küçük REXE_{YD} değerine sahip bina, yaşam döngüsü boyunca daha az yüksek kalitede enerji tüketir. Diğer bir deyişle, REXE_{YD} değerindeki artış, tüketilen yüksek kalitedeki enerji miktarını arttırmaktadır. Bir yandan; yüksek kaliteye sahip enerji, genellikle birincil enerjiden üretilen ikincil enerji olurken, daha az yüksek kalitedeki enerji tüketimi daha az birincil enerji tüketimi anlamına gelmektedir ve böylece daha az çevresel sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu durum, binaların yaşam döngüsü boyunca daha verimli enerji kullanımını sağlamaktadır. Diğer yandan; ekipman ve prosesler, düşük kalitedeki enerjiye kıyasla yüksek kalitedeki enerjinin tüketilmesi ile daha yüksek verime sahip olurlar. Bu da, REXE_{YD} değeri daha küçük olan binanın daha düşük ekipman verimliliğine sahip olabileceği anlamına gelmektedir. Bina yaşam döngüsünün enerji verimliliği düşünüldüğünde; binaların REXE_{YD} değerlerinin çok büyük veya çok küçük olmaması, enerji verimliliği açısından gerekli olduğu sonucuna

varılmıştır. REXE_{YD} değerinin, binaların yaşam döngüleri ve kullanım amaçları göz önünde bulundurulduğunda, sınırlı aralıklarda değişmesi ve en uygun değere sahip olması beklenir.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, dört farklı binanın performansı incelenerek, binaların verimliliği için yeni bir değerlendirme modeli oluşturulmaya çalışılmıştır. Öncelikle, ekserji tüketiminin enerji tüketimine oranı olan REXE değeri, bina yaşam döngüsünün enerji verimliliğinin değerlendirilmesi için yeni bir termodinamik parametre olarak önerilmiştir.

Sonuç olarak:

- 1- Bu dört bina için; bina yaşam döngüsü boyunca enerji tüketimi, ortalama olarak %95 ve %99 arasında değişen oranlara sahip olan bina kullanım aşamasında harcanan enerji tüketiminden meydana gelmektedir. Bina kullanımı aşamasındaki enerji verimliliğinin bina yaşam döngüsü enerji verimliliğinde önemli bir rol oynadığı aşikârdır. Aynı zamanda, bina kullanım aşamasının maliyeti bina yaşam döngüsü maliyetinin yaklaşık büyük bir kısmını oluşturur. Bu maliyet oranı da binalar için %95 ile %99 arasında değişir.
- 2- $REXE_{YD}$ değeri; esas olarak bina kullanım aşaması için hesaplanan REXE değeri ile bu aşamada harcanan enerji tüketim miktarından oluşmaktadır.
- 3- Dört bina için yapılan yıllık hesaplamalar neticesinde elde edilen bulgular, birim metre kare inşa maliyeti ile $REXE_{YD}$ arasında özel bir ilişkinin olmadığını göstermektedir. Ayrıca çok küçük veya çok büyük $REXE_{YD}$ değerine sahip binaların ekonomik olamayacağı sonucuna varılabilir. Buradan anlaşılabileceği üzere; binaların ekonomik olmaları için $REXE_{YD}$ değerleri uygun bir aralıkta olmalıdır.
- 4- Dört farklı regresyon modeli kullanılarak yapılan analizde, bu tez çalışmasında ele alınan dört binanın yaşam döngüsü boyunca tükettikleri enerji ile hesaplanan $REXE_{YD}$ değerleri arasında nasıl bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Kullanılan regresyon modelleri içerisinde RMSE ve R-Square metrikleri açısından en başarılı modellerin Quadratik ve Power-2 regresyon modelleri olduğu gözlemlenmiştir. Binaların $REXE_{YD}$ değerlerinin dağılımları dört farklı bölgede ele alınmış ve bu bölgelerde yer alan binaların yaşam döngülerindeki enerji verimlilikleri için kendi ısı performans ve potansiyel değerlerine sahip olduğu gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, binaların $REXE_{YD}$ değerlerinin kullanım amaçlarına göre sınırlı olduğu ve bu değerlerin, $REXE_{min}$ ve $REXE_{max}$ değerleri aralığında uygun değerler aldığı sonucuna varılabilir. Ayrıca, bu tez çalışmasında kullanılan sınırlı ve az sayıda olan veriler, oluşturulan

modellerin doğruluğunu doğrudan etkileyebilir. Bu problemin önüne geçmek için gelecekte farklı ve çok sayıda veri ile daha fazla çalışma yapılmasına ihtiyaç vardır.



KAYNAKLAR

1. Fischer, Corinna., Feedback on Household Electricity Consumption: A Tool for Saving Energy., *Energy Efficiency* 1.1: 79-104, 2008.
2. Rosen, Marc A., Ibrahim Dincer, And Mehmet Kanoglu., Role Of Exergy in Increasing Efficiency and Sustainability and Reducing Environmental Impact., *Energy Policy* 36.1: 128-137, 2008.
3. Schlueter, Arno, And Frank Thesseling., Building Information Model Based Energy/Exergy Performance Assessment in Early Design Stages., *Automation in Construction* 18.2: 153-163, 2009.
4. Chandel, S. S., et al., Overview of the Initiatives in Renewable Energy Sector Under the National Action Plan on Climate Change in India., *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54: 866-873, 2016.
5. Liu, Zhongbing, et al., Review of Solar Thermoelectric Cooling Technologies for use in Zero Energy Buildings., *Energy And Buildings* 102: 207-216, 2015.
6. Wang, Ping, et al., Investigation of the Ratio of Exergy Consumption to Energy Consumption for Building Energy Efficiency., *International Journal of Green Energy* 15.12: 681-691, 2018.
7. Ağca Türkan, S., Büro Binalarının Tipolojik Özellikleri Üzerine Karşılaştırmalı bir Araştırma: Enerji Kullanımı, Yapım, Bilişim Teknolojileri ve Mimariye Yansıması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ, İstanbul, 2003.
8. Fay, Roger, Graham Treloar, and Usha Iyer-Raniga., Life-Cycle Energy Analysis of Buildings: A Case Study., *Building Research & Information* 28.1: 31-41, 2000.
9. Santamouris, Mat, and A. Argiriou., Renewable Energies and Energy Conservation Technologies for Buildings in Southern Europe., *International Journal of Solar Energy* 15.1-4: 69-79, 1994.
10. Ramesh, T., Ravi Prakash, and K. K. Shukla., Life Cycle Energy Analysis of Buildings: An Overview., *Energy and Buildings* 42.10: 1592-1600, 2010.
11. Al-Homoud, Mohammad Saad., Computer-Aided Building Energy Analysis Techniques., *Building And Environment* 36.4: 421-433, 2001.
12. Akçay, Mehmet, and Salih Özer., Denizli’de Bir Binanın Farklı Yakıt Türlerine Göre Yakıt Maliyeti ve Co2 Emisyon Miktarının Belirlenmesi., *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi* 4.2: 59-69, 2012.

13. Akyol,T., Binaların Isı Yalıtımında Ekserji ve Enerji Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Balıkesir, 2006.
14. Çomaklı,K., Atatürk Üniversitesinin Isıtma Merkezinin Enerji ve Ekserji Analizi ,Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Erzurum, 2003.
15. Tekel, E., Termik Santrallerin Enerji ve Ekserji Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Denizli, 2006.
16. Kılıçarslan, Y., Seramik Fabrikalarında Ekserji Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı, İstanbul, 2004.
17. Çomaklı K., Yüksel B. Şahin B. Karagöz Ş., Kazan Bacalarında Meydana Gelen Enerji ve Ekserji Kayıpları., Tesisat Mühendisliği Dergisi, Sayı (92):12-16, 2006.
18. Dilek,M., Energy And Exergy Analyses of a High School Heating System, Yüksek Lisans Tezi, Middle East Technical University, Kıbrıs, 2007.
19. Yildirim, Nurdan, and Seda Genc., Energy and Exergy Analysis of a Milk Powder Production System., Energy Conversion and Management 149, 2017: 698-705.
20. Ergün, A., 80.000 m²'lik Isıtma Soğutma İhtiyacı Olan Bir Alışveriş Merkezinin Enerji ve Ekserji Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı, Ankara , 2010.
21. Ehyaei, M. A., et al., Feasibility Study of Applying Internal Combustion Engines in Residential Buildings by Exergy, Economic and Environmental Analysis., Energy and Buildings 55: 405-413, 2012.
22. Altundağ, A., Bir Hastanede Ameliyathane Klima Santrali Isıtma Hattının Ekserji Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Karabük, 2015.
23. Dinçol, Ş., Soma Termik Santralinin Enerji ve Ekserji Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Termodinamik Ana Bilim Dalı, İzmir, 2016.
24. Tuğcu,A., “Jeotermal Enerji Destekli Absorbsiyonlu Gıda Soğutma Sisteminin Termodinamik İncelemesi ve YSA ile Optimizasyonu”, Doktora Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kütahya, 2015.
25. Chandel, S. S., Aniket Sharma, and Bhanu M. Marwaha., Review of Energy Efficiency Initiatives and Regulations for Residential Buildings in India., Renewable and Sustainable Energy Reviews 54: 1443-1458, 2016.

26. Liu, Zhongbing, et al., Review of Solar Thermoelectric Cooling Technologies for use In Zero Energy Buildings., *Energy and Buildings* 102: 207-216, 2015.
27. Schlueter, Arno, and Frank Thesseling., Building Information Model Based Energy/Exergy Performance Assessment in Early Design Stages., *Automation in Construction* 18.2: 153-163, 2009.
28. Söğüt, M. Ziya., Investigation of Environmental Effects Based on Exergetic Irreversibility for Display Cases' Units in Commercial Cooling., *International Journal of Green Energy* 12.1: 15-22, 2015.
29. Al Ali, M., And I. Dincer., Performance Assessment of Integrated Energy Systems for HVAC Applications., *International Journal of Green Energy* 13.13: 1342-1351, 2016.
30. Yildiz, Abdullah, and Ali Güngör., Energy and Exergy Analyses of Space Heating in Buildings., *Applied Energy* 86.10: 1939-1948, 2009.
31. Yucer, Cem Tahsin, and Arif Hepbasli., Thermodynamic Analysis of a Building Using Exergy Analysis Method., *Energy and Buildings* 43.2-3: 536-542, 2011.
32. Sakulpipatsin, Poppong, et al., An Exergy Application for Analysis of Buildings and HVAC Systems., *Energy and Buildings* 42.1: 90-99, 2010.
33. Velmurugan, P., and R. Kalaivanan., Energy and Exergy Analysis of Multi-Pass Flat Plate Solar Air Heater, An Analytical Approach., *International Journal of Green Energy* 12.8: 810-820, 2015.
34. Jiang, Y., X. Liu, et al., Research on the Assessment Indicator of Energy Conversion System (In Chinese)., *Chinese Energy* 26 (3):27-31, 2004.
35. Ki Brojang J. (Russian)., *Exergy Method and Its Application.*, Beijing: China Power Press, 1996.
36. Zhou, Yan, and Guangcai Gong., Exergy Analysis of the Building Heating and Cooling System from the Power Plant to the Building Envelop with Hourly Variable Reference State., *Energy and Buildings* 56: 94-99, 2013.
37. Baghernejad, A., and M. Yaghoubi., Thermoeconomic Methodology for Analysis and Optimization of a Hybrid Solar Thermal Power Plant., *International Journal of Green Energy* 10.6: 588-609, 2013.
38. Wang, Ping, et al., Thermodynamic Investigation of Building Integrated Energy Efficiency for Building Retrofit., *Energy and Buildings* 77: 139-148, 2014.

39. Gong, Guangcai, et al., Scheme-Selection Optimization Of Cooling and Heating Sources Based on Exergy Analysis., Applied Thermal Engineering 27.5-6: 942-950, 2007.
40. Qinsheng, F., Thermodynamic Analyze Method of the Energy System., Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press (In Chinese), 2005.
41. Sever, Z., Bir Alışveriş Merkezi Isıtma ve Soğutma Sistemlerinin Enerji ve Ekserji Analizi Yüksek Lisans Tezi, Yozgat Bozok Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yozgat , 2018.
42. BP Statistical Review of World Energy, British Petroleum (BP), London, UK, 2012.
43. Enerji Tabii ve Kaynaklar Bakanlığı, “2011 Yılı Enerji Dengesi,” http://www.enerji.gov.tr/EKLENTI_VIEW/index.php, son erişim tarihi: 19.12.2012.
44. https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/a8c16d2696b35f9_ek.pdf (Erişim Tarihi 25 Nisan 2019)
45. Koç, E., Şenel, M. C., Dünyada ve Türkiye’de Enerji Durumu-Genel Değerlendirme, Mühendis ve Makina, 54(639):32-44, 2013.
46. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Doğal Gaz Piyasası Sektör Raporu 2017, Ankara, 2018.
47. Yumrutas, R., Kunduz, M., Kanoglu, M., Exergy Analysis of Vapor Compression Refrigeration Systems, Exergy An International Journal 2:266-272, 2002.
48. Wall G., Exergy-a Useful Concept, Physical Resource Theory Group, PhD. Chalmers Univ. of Technology, Göteborg, Sweden, 1986.
49. Çamdalı, Ü., Erişen, A. ve Çelen, F., Energy and Exergy Analyses in a Rotary Burner with Pre-Calcinations in Cement Production., Energy Conversion and Management, Cilt 45, 3017- 3031, 2004.
50. Jinye, X., Energy Conversion and New Energy Resources., Beijing: Metallurgical Industry Press (In Chinese), 1990.
51. Schlueter, Arno, and Frank Thesseling., Building Information Model Based Energy/Exergy Performance Assessment in Early Design Stages., Automation in Construction 18.2: 153-163, 2009.
52. Xiang, X., Exergy Method for the Engineering., Beijing: Petroleum Industry Press (In Chinese), 1990.

53. <http://www.karel.com.tr/tbgoster.aspx?id=YAKITLARIN%20ISIL%20DE%20C4%9EERLER%C4%B0> (Erişim tarihi 21 Aralık 2018)
54. Zhou, Yan, And Guangcai Gong., Exergy Analysis Combined with LCA for Building Envelope Energy Efficiency Retrofit., International Journal of Exergy 8.4: 379-391, 2011.
55. Zhu, M., Exergy Analysis of the Energy System., Beijing: Tsinghua University Press (In Chinese), 1998.
56. Huang, Z., The Model and Case Study of the Life Cycle Assessment of Building Energy Systems. PHD Thesis, Tongji University, Shanghai (In Chinese), 2013.
57. Liu, M., Study on Lifecycle Exergy Assessment of Building Environmental Impacts. PHD Thesis, Chongqing University, Chongqing, China (In Chinese), 2018.
58. Liu, Meng, Baizhan Li, And Runming Yao., A Generic Model of Exergy Assessment for the Environmental Impact of Building Lifecycle., Energy and Buildings 42.9: 1482-1490, 2010.
59. Thormark, C., A Low Energy Building in a Life Cycle-Its Embodied Energy, Energy Need For Operation and Recycling Potential. Building and Environment 37:429-35, 2012.
60. Yang, J., Life-Cycle Analysis of Energy Use In Anaerobic Acidificationactivated Sludge Process (In Chinese). Environmental Protection Science 29 (115):20-23, 2003.
61. Gb50189., Design Standard for Energy Efficiency of Public Buildings. Beijing: China Building Industry Press (In Chinese), 2005.
62. Çevre Ve Şehircilik Bakanlığının Resmi Gazete’de 30716 Sayılı Ve 16 Mart 2019 Tarihli Yayımlanan “Yapı Yaklaşık Birim Maliyetleri Hakkında Tebliğ”.
63. Cameron, A. C., & Windmeijer, F. A., An R-Squared Measure of Goodness of Fit for Some Common Nonlinear Regression Models. Journal Of Econometrics, 77(2), 329-342, 1997.
64. Su, X., & Khoshgoftaar, T. M., A Survey of Collaborative Filtering Techniques. Advances in Artificial Intelligence, 2009.

EKLER

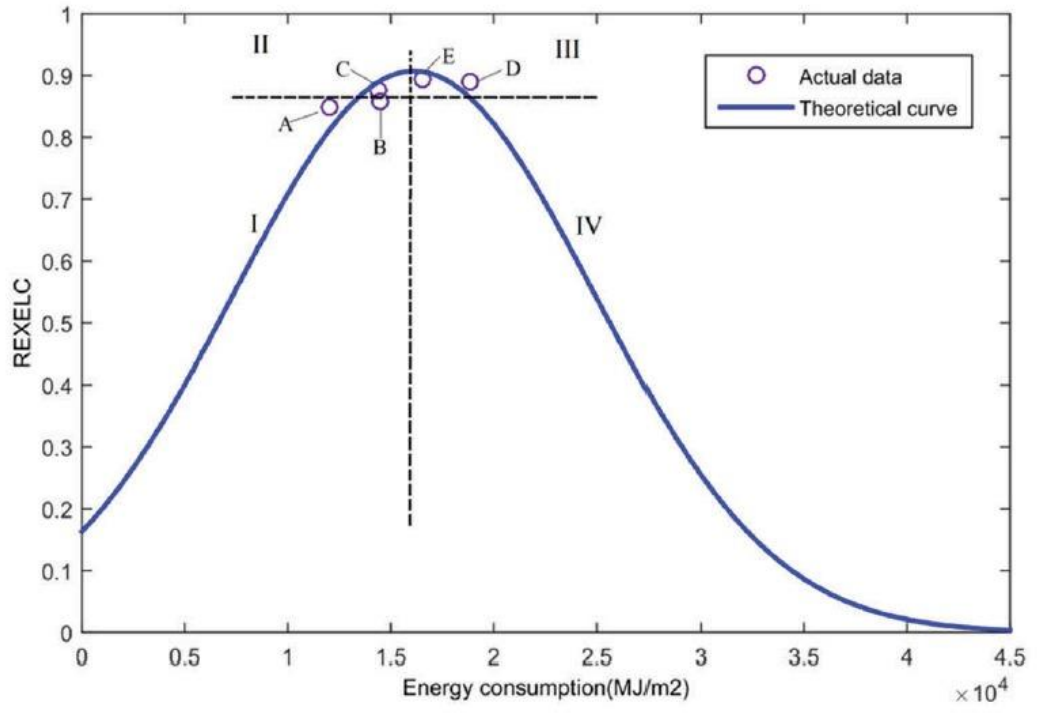
EK 1: Binaların Yıllık Doğal Gaz Tüketim Miktarları Tablosu

Isıtma	A binası	B binası	C binası	D binası
Alan (m2)	1500	848,52	725	4926
Yükseklik (m)	3	3,2	7	3,5
Hacim (m3)	4500	2715,264	5075	17241
C (k.cal/m3.h.C)	50	50	50	50
ΔT (15-(-t))	37	35	30	33
kcal/h	8325000	4751712	7612500	28447650
Hu (kcal/m3)	8250	8250	8250	8250
V (m3/h)	1009,1	576,0	922,7	3448,2
t (h/gün)	4	6	5	7
v (m3/gün)	4036,4	3455,8	4613,6	24137,4
v (m3/ay)	121090,9	103673,7	138409,1	724122,0
v (m3/yıl)	726545,5	622042,3	830454,5	4344732,0
M (TL/m3)	1,3	1,3	1,3	1,3
Maliyet (TL/yıl)	944509	808655	1079591	5648152
m (m3/m2.yıl)	484	733	1145	882
Maliyet (TL/m ² .yıl)	630	953	1489	1147

EK 2: Binaların Yıllık Elektrik Tüketim Miktarları Tablosu

Soğutma	A binası	B binası	C binası	D binası
Alan (m ²)	1500	848,52	725	4926
Yükseklik (m)	3	3,2	7	3,5
Hacim (m ³)	4500,0	2715,3	5075,0	17241,0
C (k.cal/m ³ .h.C)	50	50	50	50
ΔT (35-t)	17	21	25	19
kcal/h	3825000	2851027,2	6343750	16378950
hu (kcal/kW-h)	860	860	860	860
V (kW-h/h)	4447,7	3315,1	7376,5	19045,3
t (h/gün)	2	3	4	5
v (kW-h/gün)	8895,3	9945,4	29505,8	95226,5
v (kW-h/ay)	266860,5	298363,3	885174,4	2856793,6
v (kW-h/yıl)	800581,4	895089,9	2655523,3	8570380,8
M (TL/kW-h)	0,57	0,57	0,57	0,57
Maliyet (TL/yıl)	456331	510201	1513648	4885117
m (kW-h/m ² .yıl)	534	1055	3663	1740
Maliyet (TL/m ² .yıl)	304	601	2088	992

Ek 3: Binaların Enerji Verimliliklerine Göre Dağılımları



ÖZGEÇMİŞ

1995 yılında Yozgat'ta doğan Betül YALÇIN, İlköğrenimini Tokat'ta, Orta ve lise öğrenimini Yozgat'ta tamamlamıştır. 2013 yılında Yozgat Bozok Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü 2017 yılında tamamlamış, aynı yıl yüksek lisans eğitimine Yozgat Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında başlamıştır.

İletişim Bilgileri

Adres: Yeşil yurt Mah. Şifa Cad. Tellaloğlu Apt. No: A/6 SİVAS

Telefon: 05433819730

E-posta: betul.senem.66@hotmail.com