T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRDÜRÜLEBİLİR YAPILARDA YEŞİL ÇATILARDA KULLANILACAK MALZEMELERİN DEĞER MÜHENDİSLİĞİ YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ

Ahmet Eren ÇELİK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı İşletmesi Programı

Danışman

Doç. Dr. Şenay ATABAY

Mart, 2026

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRDÜRÜLEBİLİR YAPILARDA YEŞİL ÇATILARDA KULLANILACAK MALZEMELERİN DEĞER MÜHENDİSLİĞİ YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ

Ahmet Eren ÇELİK tarafından hazırlanan tez çalışması 02.03.2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı İşletmesi Programı **YÜKSEK LİSANS** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Şenay ATABAY
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Şenay ATABAY, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Ozan OKUDAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. İsmail Cengiz YILMAZ, Üye
İstanbul Arel Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Şenay ATABAY sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Sürdürülebilir Yapılarda Yeşil Çatılarda Kullanılacak Malzemelerin Değer Mühendisliği Yöntemi İle Belirlenmesi" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ahmet Eren ÇELİK

İmza

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının konusunun belirlenmesinden sonuçlandırılmasına kadar geçen süreçte; engin bilgi birikimi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, her aşamada desteğini hissettiren ve kıymetli vaktini ayırarak ufkumu açan değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Şenay ATABAY'a en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Akademik eğitimim boyunca bilgi ve deneyimlerinden istifade ettiğim, tezimin gelişimine yapıcı eleştirileri ve önerileriyle katkı sağlayan, desteklerini esirgemeyen bölümümüzün değerli öğretim üyelerine ve jüri üyelerime şükranlarımı sunarım.

Mesleki kariyerimi sürdürürken akademik çalışmalarımı da yürütmem konusunda sağladıkları motivasyon, anlayış ve destekten ötürü mensubu olmaktan gurur duyduğum kurumum T.C. Ziraat Bankası AŞ'ye ve değerli yöneticilerime teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde olduğu gibi bu yoğun ve zorlu çalışma sürecinde de yanımda olan, aldığım her kararda beni destekleyen, varlıklarıyla bana güç veren kıymetli anneme ve babama minnettarım. Onların sonsuz sabrı, sevgisi ve bana olan inançları olmasaydı bu süreci tamamlamak çok daha güç olurdu; hakları ödenmez.

Ahmet Eren ÇELİK

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ ix

KISALTMA LİSTESİ x

ŞEKİL LİSTESİ xii

TABLO LİSTESİ xiii

ÖZET xiv

ABSTRACT xvi

1 GİRİŞ 1

1.1 Problem Tanımı ve Çalışmanın Arka Planı 1

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı 2

1.3 Çalışmanın Yöntemi 3

1.4 Çalışmanın Önemi ve Özgün Değeri 4

2 SÜRDÜRÜLEBİLİR YAPILAR 5

2.1 Sürdürülebilirlik Kavramı Tanımı 5

2.2 Sürdürülebilirliğin Tarihsel Gelişimi 10

2.3 Sürdürülebilirliğin Boyutları 13

2.3.1 Çevresel Sürdürülebilirlik 15

2.3.2 Ekonomik Sürdürülebilirlik 16

2.3.3 Sosyal Sürdürülebilirlik 17

2.3.4 Boyutların Bütünleştirilmesi: Zayıf ve Güçlü Sürdürülebilirlik 18

2.4 Dünyada ve Türkiye'de Sürdürülebilirlik 19

2.4.1 Dünyada Sürdürülebilirlik Politikaları ve Uygulamaları 19

2.4.2 Türkiye'de Sürdürülebilirlik Politikaları ve Yapısal Zorluklar 20

2.5 Sürdürülebilir Yapılar 22
2.5.1 Sürdürülebilir Tasarım Temel İlkeleri 23
2.5.2 Yeşil Bina Değerlendirme ve Sertifika Sistemleri 24
2.5.3 Türkiye'de Sürdürülebilir Yapılar ve Yeşil Çatılara Geçiş 24
3 YEŞİL ÇATILAR **26**
3.1 Yeşil Çatıların Tanımı 26
3.2 Yeşil Çatıların Tarihsel Gelişimi 28
3.2.1 Geleneksel Kökler ve Kavramsal Öncüler 29
3.2.2 Modern Yeşil Çatıların Doğuşu ve Standartlaşması: Almanya Ekolü (1960-1980'ler) 31
3.2.3 Küresel Yaygınlaşma (1990'lar ve Sonrası) 32
3.3 Yeşil Çatı Sistemlerinin Sınıflandırılması 33
3.3.1 Ekstensif (Sığ Katmanlı) Yeşil Çatılar 33
3.3.2 İntensif (Derin Katmanlı) Yeşil Çatılar 34
3.3.3 Yarı-İntensif (Karma) Sistemler 35
3.3.4 Yapım Yöntemine Göre Sınıflandırma 36
3.4 Yeşil Çatı Sistemlerinin Faydaları 36
3.4.1 Çevresel (Ekolojik) Faydalar 37
3.4.2 Ekonomik Faydalar 38
3.4.3 Sosyal Faydalar 38
3.5 Yeşil Çatı Sistemi Katmanları ve Malzemeleri 39
3.5.1 Yapısal Çatı Döşemesi (Strüktür) 40
3.5.2 Su Yalıtım Membranı 41
3.5.3 Kök Koruma Katmanı 43
3.5.4 Koruma ve Nem Tutucu Katman 44
3.5.5 Drenaj Katmanı 45
3.5.6 Filtre Katmanı (Sistem Filtresi) 45
3.5.7 Bitki Taşıyıcı Ortam (Substrat) 45
3.5.8 Bitki Örtüsü 46
3.6 Yeşil Çatı Sistemlerinin Türkiye Uygulamaları ve Yasal Çerçeve 47

3.6.1 Geçmişten Günümüze Türkiye'de Yeşil Çatılar 47
3.6.2 Yasal Çerçeve ve Teşvik Mekanizmaları 48
3.6.3 Türkiye'deki Uygulamalarda Karşılaşılan Zorluklar ve Fırsatlar 49

4 DEĞER MÜHENDİSLİĞİ 52

4.1 Değer Mühendisliğinin Tanımı ve Kapsamı 53
4.2 Değer Mühendisliğinin Tarihsel Gelişimi 55
4.3 Değer Mühendisliğinin Temel Kavramları: Fonksiyon ve Maliyet 57
4.3.1 Fonksiyon Kavramı ve Analizi 57
4.3.2 Maliyet Kavramı ve Yaşam Döngüsü Yaklaşımı 58
4.4 Değer Mühendisliği İş Planı ve Aşamaları 59
4.4.1 Bilgi Toplama Aşaması 60
4.4.2 Fonksiyon Analizi Aşaması 60
4.4.3 Yaratıcılık Aşaması 61
4.4.4 Değerlendirme Aşaması 61
4.4.5 Geliştirme Aşaması 62
4.4.6 Sunum Aşaması 62
4.5 Değer Mühendisliğinin Amaçları 62
4.6 Değer Mühendisliği ile Geleneksel Maliyet Yönteminin Karşılaştırılması 64
4.6.1 Odak Noktası (Fonksiyon vs. Bileşen) 65
4.6.2 Maliyet Anlayışı (LCC vs. İlk Maliyet) 65
4.6.3 Zamanlama (Proaktif vs. Reaktif) 65
4.6.4 Süreç Yönetimi (Çok Disiplinli vs. Silo) 65
4.7 Değer Mühendisliğinin Sağladığı Yararlar 66
4.7.1 Ekonomik Yararlar: Maliyet Optimizasyonu ve Yaşam Döngüsü Tasarrufu 66
4.7.2 Teknik, Kalite ve Performans Yararları 67
4.7.3 İnovasyon ve Yaratıcılığın Teşvik Edilmesi 67
4.7.4 Yönetimsel ve Sosyal Yararlar 67
4.7.5 Sürdürülebilirlik Hedeflerine Katkı 68

4.8 Değer Mühendisliği Takım Elemanları ve Karar Vermede Etkileri 68

4.8.1 Moderatör (Kolaylaştırıcı) ve Süreç Yönetimi 69
4.8.2 Teknik Disiplin Temsilcileri ve Sinerjik Etki 69
4.8.3 Maliyet Uzmanının Analitik Rolü ve Ekonomik Gerçeklik 70
4.8.4 İşveren Temsilcisi ve Değerin Tanımlanması 70

4.9 Değer Mühendisliğinin Malzeme Seçiminde Kullanılması 70

5 YEŞİL ÇATILARDA KULLANILACAK MALZEMELERİN DEĞER MÜHENDİSLİĞİ YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ 73

5.1 Araştırmanın Metodolojisi ve Uygulama Çerçevesi 74

5.1.1 Temel Vaka (Benchmark Case) Tanımlanması 74
5.1.2 Karşılaştırmalı Senaryoların Tanımlanması 75
5.1.3 Araştırma ve Modelin İş Akışı 76

5.2 Aşama 1: Bilgi Toplama- Vaka Verilerinin ve Maliyet Parametrelerinin Belirlenmesi 77

5.2.1 Performans Verilerinin, Hedeflerin ve Kısıtların Belirlenmesi 77
5.2.2 Maliyet Verilerinin Belirlenmesi: İlk Yatırım Maliyeti ve LCC Parametreleri 78

5.3 Aşama 2: Fonksiyon Analizi Aşaması 82

5.3.1 Senaryoların ve Bileşenlerin Fonksiyonel Tanımları 83
5.3.2 Yeşil Çatı Sistemi FAST Diyagramı Kurgusu 84
5.3.3 Fonksiyon- Maliyet Analizi ve Hedef Tespiti 84

5.4 Aşama 3: Yaratıcılık Aşaması 86

5.4.1 Drenaj Fonksiyonu İçin Alternatif Arayışları 87
5.4.2 Substrat Fonksiyonu İçin Alternatif Arayışları 87
5.4.3 Yalıtım Fonksiyonu İçin Alternatif Arayışları 88
5.4.4 Bitkilendirme Yöntemi Alternatifleri 89

5.5 Aşama 4: Değerlendirme Aşaması 90

5.5.1 Değerlendirme Kriterlerinin Ağırlıklandırılması 90
5.5.2 Alternatiflerin Puanlanması ve Karar Matrisleri 92
5.5.3 Değerlendirme Sonucu ve Kısa Liste 98

5.6 Aşama 5: Geliştirme Aşaması ve Nihai Sistem Önerisi 99
5.6.1 Önerilen Ponza Esaslı Hibrit Sistem Kesiti ve Detayları 99
5.6.2 Teknik Doğrulama ve Risk Analizi (Statik ve Termal Tahkik)..... 100
5.6.3 Nihai Maliyet ve Değer Karşılaştırma Tablosu 101
5.6.4 Yatırımın Geri Dönüşü (ROI) ve Sonuç Yorumu..... 102
5.7 Aşama 6: Sunum Aşaması 103
5.7.1 Yönetici Özeti Raporu: Neden Bu Sistem Seçilmeli? 103
5.7.2 Uygulama Yol Haritası ve Öneriler 104
6 SONUÇ **106**
6.1 Genel Değerlendirme 106
6.2 Savunulan Yaklaşımlar 106
6.2.1 Maliyet Kavramının Yetersizliği 106
6.2.2 Değer Mühendisliği Bir Ucuzlatma Değildir..... 107
6.2.3 İthalat Bağımlılığına Karşı Yerelleşme 107
6.3 Vaka Analizi Sonucunda Elde Edilen Bulgular..... 107
6.3.1 Ekonomik Bulgular: LCC ve Maliyet Avantajı..... 107
6.3.2 Teknik ve Malzeme Bulgular 108
6.3.3 Metodolojik Bulgular: Değer Artışı..... 109
6.4 Tartışma ve Sektörel Çıkarımlar..... 109
6.5 Öneriler 109
6.6 Sonuç..... 110
KAYNAKÇA **112**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **117**

SİMGE LİSTESİ

N	Analiz Süresi / Ekonomik Ömür (Yıl)
w_i	Bileşenin Fonksiyona Katkı Oranı (Ağırlık)
C_i	Bileşenin Maliyeti
γ	Birim Hacim Ağırlığı
V	Değer (Value)
C_f	Fonksiyonun Toplam Maliyeti
F	Function (Fonksiyon)
λ	Isı İletkenlik Katsayısı (Lambda)
R	Isıl Direnç Değeri
U	Isıl Geçirgenlik Katsayısı
r	İskonto Oranı
CO_2	Karbondioksit
Kg	Kilogram
Kg/m^2	Kilogram bölü metrekare (Yük/Ağırlık birimi)
Kg/m^3	Kilogram bölü metreküp (Yoğunluk birimi)
C	Maliyet (Cost)
m	Metre
m^2	Metrekare
mm	Milimetre
P	Performans
TL	Türk Lirası

KISALTMA LİSTESİ

AVM	Alışveriş Merkezi
ASTM	American Society for Testing and Materials (Uluslararası Standartlar Örgütü)
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
B.E.S.T.	Binalarda Ekolojik ve Sürdürülebilir Tasarım
BEP	Binalarda Enerji Performansı
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Method
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism (Sınırda Karbon Düzenleme Mekanizması)
CVS	Certified Value Specialist (Sertifikalı Değer Uzmanı)
CAM	Crassulacean Acid Metabolism (Sedum bitkilerinin fotosentez mekanizması)
ÇEDBİK	Çevre Dostu Yeşil Binalar Derneği
DM	Değer Mühendisliği
EKB	Enerji Kimlik Belgesi
EPDM	Ethylene Propylene Diene Monomer (Sentetik Kauçuk Membran)
XPS	Extruded Polystyrene (Ekstrüde Polistiren Köpük)
FLL	Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (Alman Peyzaj Araştırma, Geliştirme ve İnşaat Topluluğu)
FAST	Function Analysis System Technique (Fonksiyon Analiz Sistem Tekniği)
HVAC	Heating, Ventilating and Air Conditioning (Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme)
HDPE	High Density Polyethylene (Yüksek Yoğunluklu Polietilen)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli)
IEA	International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)
İYM	İlk Yatırım Maliyeti
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design

LCA	Life Cycle Assessment (Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi)
LCC	Life Cycle Cost (Yaşam Döngüsü Maliyeti)
LID	Low Impact Development (Düşük Etkili Kalkınma)
nZEB	nearly Zero Energy Building (Neredeyse Sıfır Enerjili Bina)
NPV	Net Present Value (Net Bugünkü Değer)
PP	Polipropilen
PVC	Polyvinyl Chloride (Polivinil Klorür)
ROI	Return on Investment (Yatırımın Geri Dönüşü)
SAVE	Society of American Value Engineers (Uluslararası Değer Mühendisleri Derneği)
SDGs	Sustainable Development Goals (Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları)
SUDS	Sustainable Urban Drainage Systems (Sürdürülebilir Kentsel Drenaj Sistemleri)
TPO	Thermoplastic Polyolefin (Termoplastik Poliolefin)
UNEP	United Nations Environment Programme (Birleşmiş Milletler Çevre Programı)
UHI	Urban Heat Island (Kentsel Isı Adası)
VA	Value Analysis (Değer Analizi)
VE	Value Engineering (Değer Mühendisliği)
VECP	Value Engineering Change Proposal (Değer Mühendisliği Değişiklik Önerisi)
VM	Value Management (Değer Yönetimi)
WCED	World Commission on Environment and Development (Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Sürdürülebilirlik Venn Şeması. **14**
Şekil 3.1 Babil'in Asma Bahçeleri **29**
Şekil 3.2 Geleneksel Çim Çatılar **30**
Şekil 3.3 Ekstensif Yeşil Çatı **34**
Şekil 3.4 İntensif Yeşil Çatı **35**
Şekil 3.5 Yeşil Çatı Katmanları **40**
Şekil 4.1 Değer Mühendisliği Aşamaları **60**

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Sürdürülebilir Kalkınma Kavramının Tarihsel Gelişimi **13**
Tablo 2.2 Zayıf ve Güçlü Sürdürülebilirlik yaklaşımlarının temel farkları. **19**
Tablo 2.3 Başlıca Yeşil Bina Sertifika Sistemlerinin Karşılaştırılması **24**
Tablo 3.1 Yeşil Çatıların Tarihsel Gelişim Süreci ve Dönüm Noktaları. **32**
Tablo 5.1 Değerlendirme Kriterleri ve Ağırlıkları **91**
Tablo 5.2 Alternatif A1 İthal Substrat Değerlendirme Tablosu **92**
Tablo 5.3 Alternatif A2 Yerel Ponza Karışımı Değerlendirme Tablosu **93**
Tablo 5.4 Alternatif A3 Geri Dönüşümlü Tuğla Kırığı Değerlendirme Tablosu . **94**
Tablo 5.5 Alternatif B1 İthal HDPE Levha Değerlendirme Tablosu **95**
Tablo 5.6 Alternatif B2 Yerel Ponza Dolgu Değerlendirme Tablosu **96**
Tablo 5.7 Alternatif B3 Entegre Geokompozit Değerlendirme Tablosu **97**
Tablo 5.8 Değer Mühendisliği Karar Özeti ve Seçilen Malzemeler Tablosu **98**
Tablo 5.9 3 Senaryo İçin Nihai Maliyet ve Değer Karşılaştırma Analizi Tablosu **101**

ÖZET

Sürdürülebilir Yapılarda Yeşil Çatılarda Kullanılacak Malzemelerin Değer Mühendisliği Yöntemi ile Belirlenmesi

Ahmet Eren ÇELİK
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Şenay ATABAY

Küresel iklim değişikliği ve kontrolsüz kentsel yapılaşma, inşaat sektörünü çevresel sorumluluklar ile ekonomik kısıtlar arasında bir denge arayışına itmektedir. Kentsel ısı adası etkisini hafifletme, yağmur suyu yönetimi ve enerji verimliliği sağlama gibi çok yönlü ekolojik faydalar sunan yeşil çatı sistemleri, modern kentler için vazgeçilmez bir çözümdür. Ancak, sektördeki yüksek ilk yatırım maliyeti algısı ve ithal malzemelere dayalı uygulamalar, bu sistemlerin yaygınlaşmasını engellemektedir. Bu tez çalışması, Değer Mühendisliği (DM) metodolojisi ile Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC) analizini entegre ederek, maliyet bariyerlerini aşmayı ve yeşil çatıların ekonomik uygulanabilirliğini somut verilerle kanıtlamayı amaçlamaktadır. Araştırma kapsamında, Balıkesir ilinde 2.000 m² teras alanına sahip bir Alışveriş Merkezi (AVM) projesi vaka analizi olarak detaylıca incelenmiştir. Çalışmada; "Geleneksel Çatı", "Standart (İthal) Yeşil Çatı" ve DM süreciyle geliştirilen "Optimize Edilmiş (Yerel) Yeşil Çatı" senaryoları teknik ve ekonomik açılardan karşılaştırılmıştır. DM İş Planı'nın fonksiyon analizi aşamasında, maliyet artışına neden olan ithal plastik drenaj levhaları ve torf esaslı substratlar yerine, bölgenin zengin yerel kaynağı olan Balıkesir Ponzası (Bims)

ikame edilerek yenilikçi bir hibrit sistem tasarlanmıştır. Gözenekli yapısı sayesinde yüksek su tutma kapasitesi ve ısı yalıtımı sağlayan Bims, karbon ayak izini düşürmüş ve standart ithal yeşil çatıya kıyasla %42 oranında İlk Yatırım Maliyeti tasarrufu sağlamıştır. 40 yıllık LCC analizlerinde; enerji tasarrufu ve su yalıtım ömrünün uzaması dikkate alındığında, önerilen sistemin Geleneksel Çatıdan dahi daha ekonomik olduğu ve kendini 6-7 yıl içerisinde amorti ettiği saptanmıştır. Sonuç olarak bu çalışma, Değer Mühendisliği yaklaşımının, yeşil çatıları lüks bir mimari öğe olmaktan çıkarıp; yerel kaynaklarla optimize edilmiş, sürdürülebilir ve yüksek katma değerli bir yatırıma dönüştürdüğünü ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Yeşil Çatılar, Değer Mühendisliği, Sürdürülebilirlik, Yaşam Döngüsü Maliyeti, Maliyet Yönetimi.

ABSTRACT

Determining The Materials to Be Used in Green Roofs of Sustainable Buildings Through Value Engineering Method

Ahmet Eren ÇELİK

Department of Civil Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Doç. Dr. Şenay ATABAY

Global climate change and uncontrolled urban sprawl drive the construction industry to seek a balance between environmental responsibilities and economic constraints. Green roof systems, offering multifaceted ecological benefits such as mitigating urban heat island effects, stormwater management, and ensuring energy efficiency, are an indispensable solution for modern cities. However, the prevailing perception of high initial investment costs and practices based on imported materials hinder their widespread adoption. This thesis aims to overcome existing cost barriers and prove the economic viability of green roofs with concrete data by integrating Value Engineering (VE) methodology and Life Cycle Cost (LCC) analysis. A Shopping Mall project in Balıkesir province with a 2,000 m² terrace area was examined in detail as a case study. Three scenarios namely "Traditional Roof", "Standard (Imported) Green Roof", and "Optimized (Local) Green Roof" developed through the VE process, were compared in terms of technical and economic aspects. During the function analysis phase of the VE Job Plan, an innovative hybrid system was designed by substituting Balıkesir Pumice (Bims), a rich local resource, for imported plastic drainage plates and peat-based substrates

that increase costs. Using Pumice, which provides high water retention and thermal insulation due to its porous structure, not only reduced the carbon footprint from transportation but also provided a 42% Initial Investment Cost saving compared to the standard imported green roof. In LCC analyses over a 40-year economic life, considering parameters like energy savings and extended waterproofing life, the proposed system was determined to have a lower total cost than even the Traditional Roof, amortizing within 6-7 years. Consequently, this study reveals that Value Engineering transforms green roofs from luxury architectural elements into ecologically and economically sustainable, high value-added investments optimized with local resources.

Keywords: Green Roofs, Value Engineering, Sustainability, Life Cycle Cost, Cost Management.

1
GİRİŞ

1.1 Problem Tanımı ve Çalışmanın Arka Planı

21. yüzyılın ilk çeyreğinde insanlık, sanayileşme ve hızlı kentleşmenin tetiklediği küresel iklim krizi ile doğal kaynakların tükenmesi tehdidi arasında kritik bir eşikte durmaktadır. IEA (2021)'e göre bu krizin merkezinde ise, küresel enerji tüketiminin yaklaşık %36'sından ve karbon emisyonlarının %39'undan sorumlu tutulan inşaat sektörü yer almaktadır. Sektörün üzerindeki bu çevresel baskı, "sürdürülebilir yapılar" kavramını bir tercih olmaktan çıkarıp bir zorunluluğa dönüştürmüştür. Bu bağlamda, binaların beşinci cephesi olarak nitelendirilen çatıların, atıl beton yüzeyler olmaktan çıkarılıp yaşayan ekosistemlere dönüştürülmesi, yani yeşil çatı sistemleri, kentsel ısı adası etkisini azaltma ve enerji verimliliği sağlama potansiyeli ile en etkili çözüm stratejilerinden biri olarak öne çıkmaktadır.

Ancak, teorik olarak faydaları tartışılmaz olan yeşil çatı sistemleri, pratikte özellikle Türkiye gibi gelişmekte olan ekonomilerde beklenen yaygınlığa ulaşamamaktadır. Bu durumun temel nedeni, sektörde hâkim olan sürdürülebilirlik pahalıdır algısı ve geleneksel çatı sistemlerine kıyasla yüksek görünen İlk Yatırım Maliyetleridir. Yatırımcılar ve karar vericiler, genellikle projenin sadece ihale bedeline odaklanmakta, ithalata dayalı pahalı malzeme çözümleriyle (drenaj levhaları, ithal substratlar vb.) tasarlanan yeşil çatıları "lüks bir peyzaj öğesi" olarak görerek projeden çıkarma eğilimi göstermektedirler. Oysa bir yapının gerçek maliyeti, inşa edildiği gün değil, 40-50 yıllık ekonomik ömrü boyunca harcanan enerji, bakım ve yenileme giderleri ile, yani Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC) ile ölçülmelidir.

Mevcut sorun, teknik bir yetersizlikten ziyade, bir yönetim ve optimizasyon sorunudur. Geleneksel maliyet düşürme yöntemleri (kaliteden ödün verme) yerine; fonksiyonu koruyarak maliyeti optimize eden, performansı artıran ve yerel

kaynakları devreye sokan sistematik bir yaklaşıma ihtiyaç duyulmaktadır. Bu noktada Değer Mühendisliği (DM) metodolojisi, ekoloji ile ekonomi arasındaki çatışmayı çözecek stratejik bir araç olarak devreye girmektedir.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Küresel iklim değişikliğiyle mücadele ve sürdürülebilir kentleşme hedefleri doğrultusunda, yapı sektörünün çevresel ayak izini azaltmak günümüzün en kritik mühendislik problemlerinden biri haline gelmiştir. Bu bağlamda yeşil çatı sistemleri, kentsel ısı adası etkisini azaltma, yağmur suyu yönetimi ve enerji verimliliği gibi çok boyutlu faydalarıyla öne çıkmaktadır. Ancak, bu sistemlerin Türkiye inşaat sektöründe yaygınlaşmasının önündeki en büyük engel, yatırımcılar ve karar vericiler tarafından algılanan "yüksek ilk yatırım maliyeti" bariyeridir. Bu tez çalışmasının temel amacı; söz konusu maliyet bariyerini, sistematik bir problem çözme disiplini olan Değer Mühendisliği (DM) metodolojisi ve yerel malzeme kullanımı stratejisi ile aşarak, yeşil çatıların sadece ekolojik değil, aynı zamanda ekonomik açıdan da en rasyonel seçenek olduğunu ortaya koymaktır. Çalışma, literatürdeki boşluğu doldurarak “Sürdürülebilirlik, yerel kaynakların akılcı kullanımı ve doğru mühendislik yönetimiyle ekonomik hale getirilebilir” hipotezini kanıtlamayı hedeflemektedir.

Bu temel amaç doğrultusunda çalışmanın kapsamı, mevcut sorunları tespit etmekten çözüm önerisi geliştirmeye ve bu öneriyi doğrulamaya kadar uzanan çok katmanlı bir yapı üzerine kurgulanmıştır. Kapsamın ilk aşamasında; yeşil çatı sistemini oluşturan su yalıtımı, drenaj, filtre, substrat (bitki taşıyıcı ortam) ve bitki örtüsü katmanlarının her biri ayrı ayrı ele alınarak detaylı fonksiyonel analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sayesinde, sistemin maliyetini artıran ancak performansa katkısı sınırlı olan, diğer bir deyişle düşük değerli alanlar tespit edilmiştir. Özellikle sektörde yaygın olarak kullanılan ithal ve petrol türevi drenaj levhaları ile ithal torf esaslı substratların, sistemin maliyet yapısındaki dengesizliğin ana kaynağı olduğu belirlenmiştir. Bu tespiti takiben çalışmanın kapsamı, alternatif malzeme arayışına odaklanmıştır. İthalata dayalı tedarik zincirine bir alternatif olarak, Türkiye'nin jeolojik zenginliği olan ve dünya rezervlerinin büyük kısmını barındırdığı Balıkesir Ponzası (Bims) gibi yerel ve

doğal malzemelerin yeşil çatı katmanlarında kullanım potansiyeli araştırılmıştır. Yerel malzemelerin teknik performansı ile ekonomik avantajları entegre edilerek hibrit bir sistem modeli geliştirilmiştir.

Çalışmanın uygulama ve doğrulama aşamasında ise, geliştirilen bu modelin gerçek dünya koşullarındaki performansını ölçmek amacıyla Balıkesir ili Merkez ilçesinde yer alan, geniş çatı alanına ve yüksek enerji tüketimine sahip bir Alışveriş Merkezi (AVM) projesi vaka analizi olarak seçilmiştir. Analiz kapsamında, karşılaştırmalı bir değerlendirme yapabilmek adına; mevcut piyasa standardı olan Geleneksel Çatı, sektördeki mevcut şartnamelere dayalı Standart (İthal) Yeşil Çatı ve bu tez kapsamında Değer Mühendisliği ile geliştirilen Optimize Edilmiş (Yerel) Yeşil Çatı olmak üzere üç farklı senaryo kurgulanmıştır. Son olarak, bu senaryoların ekonomik değerlendirmesi, yanıltıcı olabilen "İlk Yatırım Maliyeti" yerine, yapının ekonomik ömrünü kapsayan bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır. Senaryolar, Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC) analizi yöntemiyle 40 yıllık bir projeksiyon üzerinden karşılaştırılmıştır. Bu analiz kapsamında; bakım, onarım, yenileme giderleri ve en önemlisi enerji tasarrufu verileri hesaplanarak, önerilen sistemin yatırım geri dönüş süreleri (ROI) ve uzun vadeli kârlılığı somut verilerle ortaya konulmuştur.

1.3 Çalışmanın Yöntemi

Bu tez çalışmasında, yeşil çatı sistemlerinin maliyet ve performans optimizasyonunu sağlamak amacıyla, nitel ve nicel veri analiz yöntemlerini bir arada kullanan Değer Mühendisliği (DM) metodolojisi esas alınmıştır. Araştırmanın metodolojik omurgasını, uluslararası SAVE International standartlarında tanımlanan ve birbirini takip eden altı aşamalı (Bilgi, Fonksiyon Analizi, Yaratıcılık, Değerlendirme, Geliştirme, Sunum) Değer Mühendisliği İş Planı oluşturmaktadır.

Yöntem süreci, kapsamlı bir literatür taraması ve pazar araştırması ile başlamıştır. Yeşil çatı katmanlarını (su yalıtımı, drenaj, substrat vb.) oluşturan malzemelerin teknik özellikleri, birim fiyatları ve çevresel etkileri, hem Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı verilerinden hem de sektördeki uygulayıcı firmalardan

toplanan güncel piyasa verileriyle derlenmiştir. Elde edilen veriler ışığında, Fonksiyon Analiz Sistem Tekniği (FAST) diyagramları oluşturularak, sistem bileşenleri arasındaki "nasıl-neden" ilişkisi haritalandırılmış ve maliyet-fonksiyon uyumsuzlukları tespit edilmiştir.

Çalışmanın uygulama aşamasında, teorik modelin doğrulanması için Vaka Analizi (Case Study) yöntemi kullanılmıştır. Balıkesir iklim verileri ve bölgesel malzeme potansiyeli (Ponza rezervleri) dikkate alınarak, seçilen AVM projesi üzerinde simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen alternatif sistem önerilerinin ekonomik değerlendirmesinde ise statik bir yöntem olan İlk Yatırım Maliyeti (İYM) analizi yerine; paranın zaman değerini, enerji enflasyonunu ve bakım giderlerini dikkate alan dinamik Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC) analizi yöntemi uygulanmıştır. ASTM E917 standartlarına uygun olarak yapılan LCC hesaplamaları, 40 yıllık bir projeksiyon üzerinden Net Bugünkü Değer (NPV) yöntemiyle gerçekleştirilmiş ve senaryolar arası kıyaslama bu somut finansal veriler üzerinden sağlanmıştır.

1.4 Çalışmanın Önemi ve Özgün Değeri

Literatürde yeşil çatıların çevresel faydalarına odaklanan pek çok çalışma bulunmakla birlikte; bu sistemlerin maliyet optimizasyonunu Değer Mühendisliği disiplini ile ele alan ve bunu yerel malzeme potansiyeli ile birleştiren çalışmalar sınırlıdır. Bu tez, ithalata dayalı "kopyala-yapıştır" yeşil çatı şartnameleri yerine; yerel, ekonomik ve yüksek performanslı hibrit bir model önerisi getirmesiyle özgün bir nitelik taşımaktadır. Çalışmanın sonuçları, sadece akademik literatüre değil, aynı zamanda yatırımcılara, tasarımcılara ve politika yapıcılara; "yeşil çatıların lüks değil, kârlı bir mühendislik yatırımı olduğu" yönünde somut, sayısal ve uygulanabilir bir yol haritası sunmaktadır.

2
SÜRDÜRÜLEBİLİR YAPILAR

Küresel ölçekte meydana gelen ekolojik krizler ve doğal kaynakların hızla tükenmesi gibi problemlerin kaçınılmaz hale gelmesiyle birlikte geleneksel kalkınma modellerinin sorgulanmasını zorunlu hale getirmiştir. Yapı sektörü, küresel ölçekte enerji tüketiminin yaklaşık %36'sından ve enerji kaynaklı karbondioksit emisyonlarının neredeyse %39'undan sorumlu tutulmaktadır (IEA, 2021; UNEP, 2020). Bu nedenle yapı sektörü, hem bu problemin en önemli kaynaklarından biri olarak hem de bu problemlerin çözümünde en kritik aktör olarak öne çıkmaktadır. Sektördeki bu devasa çevresel ayak izine bir yanıt olarak geliştirilen sürdürülebilir yapılar kavramı, günümüz mimarlık, mühendislik ve yapı işletmesi disiplinlerinin temel parçalarından biri haline gelmiştir.

Sürdürülebilir yapılar bölümü, tezin ilerleyen aşamalarında incelenecek olan yeşil çatı sistemlerinin ve değer mühendisliği metodolojisinin üzerine oturtulacağı teorik zemini hazırlamayı amaçlamaktadır. Bu amacı gerçekleştirmek için bölüm iki ana eksende ilerleyecektir. İlk olarak, sürdürülebilir yapılar kavramının felsefi ve teorik altyapısını oluşturan sürdürülebilirlik kavramı ve tarihçesi incelenecektir. Ardından, bu genel çerçeveden özele inilerek sürdürülebilir yapılar kavramı; tasarım ilkeleri, sertifika sistemleri ve Türkiye'deki durumu özelinde detaylandırılacaktır.

2.1 Sürdürülebilirlik Kavramı Tanımı

Sürdürülebilirlik kavramı, 20. yüzyılın son çeyreğinden itibaren küresel gündemin merkezine yerleşmiştir. Ancak üzerinde tam anlamıyla kavramsal bir uzlaşma sağlanamamış, karmaşık ve çok katmandan oluşan bir olgudur. Günümüzde

bilimsel araştırmalardan politik söylemlere, kurumsal stratejilerden günlük yaşam pratiklerine kadar hemen her alanda sıkça karşımıza çıkmakta olan bu kavram, genellikle farklı bağlamlarda farklı anlamlara gelecek şekilde kullanılmaktadır. Bu yaygın kullanım, kavramın zaman zaman içinin boşaltılması veya farklı gruplar tarafından sadece yeşil imaj yaratmak için daraltılarak kendi çıkarları doğrultusunda yorumlanması riskini de beraberinde getirmektedir (Redclift, 2005, s. 213-215).

Aslında kavramın özünde yatan temel ilkeler ve etik çerçevesi oldukça nettir. Sürdürülebilirliğin tanımlanmasındaki çeşitlilik, aslında kavramın ekoloji, ekonomi, sosyoloji, siyaset bilimi, mühendislik vb. farklı disiplinler tarafından ele alınmasından ve her disiplinin kendi önceliklerini ön planda tutmasından kaynaklanmaktadır (Hopwood, Mellor, & O'Brien, 2005, s. 40). Ancak tüm bu farklı yaklaşımların birleştiği noktada, insanlığın yeryüzündeki süregelen varlığını ve refahını, gezegenin ekolojik sistemlerinin bütünlüğünü bozmadan uzun vadede güvence altına alma arayışı bulunmaktadır.

Kavramın modern anlamdaki en yaygın kabul gören ve uluslararası alanda bir referans noktası haline gelen tanımı, şüphesiz Birleşmiş Milletler bünyesinde kurulan Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu'nun (World Commission on Environment and Development- WCED) 1987 yılında yayımladığı "Ortak Geleceğimiz" İngilizce ifadesiyle "Our Common Future" başlıklı raporda yer almaktadır. Sıklıkla "Brundtland Raporu" olarak isimlendirilen bu belge, sürdürülebilir kalkınmayı insanlığın bugün mevcut olan gereksinimlerinin, gelecek kuşakların kendi gereksinimlerini karşılama yeteneklerinden ödün vermeden karşılanabilmesidir şeklinde tanımlamıştır (WCED, 1987, s. 43).

Bu tanım, yalın görüntüsünün ardında, çevre ve kalkınma arasında 1970'lerde var olan çevre mi, kalkınma mı ikileminin keskin karşıtlığını aşmayı hedefleyen, adalet ve ekoloji temelli bütüncül bir etik çerçeve sunmaktadır. Brundtland raporunda yapılan kesin tanımlamanın ve genel olarak sürdürülebilirlik anlayışının merkezinde, kuşak içi eşitlik, kuşaklar arası eşitlik ve ekolojik sınırlılıklar olmak üzere üç temel ilke bulunmaktadır.

Kavramın ilk etik boyutu, kuşak içi eşitlik ilkesidir ve bu ilke Brundtland Raporu'nda bulunan "gereksinimler" vurgusuyla doğrudan ilişkilendirilmektedir.

Brundtland Raporu, özellikle dünyadaki yoksul kesimlerin gıda, temiz su, barınma, sağlık, eğitim, enerji vb. temel ihtiyaçlarının karşılanmasına öncelikli bir önem verilmesi gerektiğini açıkça belirtmektedir (WCED, 1987, s. 43). Bu vurgu, sürdürülebilirliğin sadece zengin ülkelerin çevresel endişeleriyle sınırlı olmadığını, tam tersine küresel yoksullukla mücadele ve temel insan haklarının güvence altına alınması gibi kalkınmanın sosyal ve ekonomik boyutlarını da merkezine aldığını göstermektedir. Kavram, insanların sınırsız olabilen istekleri ile temel yaşam için gerekli olan ihtiyaçları arasında örtük fakat kritik bir ayrım yapmaktadır. Bu ayrım sürdürülebilir bir dünya vizyonu, herkesin temel gereksinimlerinin karşılandığı ancak kaynakları tüketen aşırı tüketmenin ve israfın sınırlandırıldığı bir dengeyi hedeflemektedir (Dobson, 1998, s. 38-40).

Brundtland Raporu, yoksulluğun hem bir neden hem de bir sonuç olarak çevresel bozulmalar ile doğrudan ilişkili olduğunu vurgulamaktadır. (WCED, 1987, s. 49-50). Yoksul olan topluluklar, hayatta kalabilmek amacıyla çoğu zaman ormanları kesmek, marjinal toprakları işlemek veya kirletici sanayilere ev sahipliği yapmak gibi çevresel olarak sürdürülemez yollara başvurmak zorunda kalabilmektedir. Aynı şekilde, küresel eşitsizlikler, gelişmiş ülkelerin tarihsel olarak yarattığı iklim değişikliği gibi çevresel yüklerin ve günümüzdeki aşırı kaynak tüketiminin, bu sorunlarda en az payı olan yoksul ülkelerin orantısız bir şekilde etkilenmesine neden olmaktadır (Keleş, 2012, s. 85-88).

Agyeman, Bullard ve Evans (2003, s. 5-10), sürdürülebilirliğin çevresel adalet boyutuyla olan güçlü ilişkisine dikkat çekerek, çevresel risklerin ve faydaların toplum içinde adil bir şekilde dağıtılmasının kuşak içi eşitliğin temel bir gereği olduğunu savunmaktadır. Dolayısıyla, sürdürülebilirlik, kalkınmanın nimetlerinin ve çevresel sorumlulukların bugünkü nesiller arasında adil bir şekilde paylaşılmasını gerekli gören güçlü bir adalet anlayışını benimsemektedir.

Tanımın ikinci temel direği, gelecek kuşakların kendi ihtiyaçlarını karşılayabilme yeteneklerini tehlikeye atmamaktır. Bu, “kuşaklar arası eşitlik ilkesi” olarak bilinmekte ve sürdürülebilirlik kavramının zamansal boyutunu oluşturmaktadır. Bu ilkeye göre, mevcut neslin, gezegeni ve onun sunduğu kaynakları en azından devraldığı kadar iyi bir durumda, hatta mümkünse devraldığından daha iyi bir durumda gelecek nesillere bırakma ahlaki sorumluluğu bulunmaktadır. Bu sorumluluk, sadece petrol, doğalgaz veya mineraller gibi yenilenemeyen

kaynakların adil bir şekilde gelecek nesillere de pay bırakılmasını değil, daha temel olarak, temiz hava, temiz su, verimli topraklar, istikrarlı bir iklim, ozon tabakası ve zengin bir biyoçeşitlilik gibi ekolojik sistemlerin sağladığı yaşamsal destek sistemlerinin bütünlüğünün korunmasını da içermektedir. Edith Brown Weiss (1990, s. 18-21), bu sorumluluğu "gezegen vekilliği" ifadesiyle açıklamakta ve her kuşağın gezegeni gelecek nesiller adına bir vekil gibi yönetmesi gerekliliğini savunmaktadır. Bu vekillik, gelecek nesillerin kaynak çeşitliliğini koruması, gezegenin kalitesinin korunması ve kaynaklara adil erişim hakkının güvence altına alınması gibi yükümlülükleri beraberinde getirmektedir. Bu ilke, bugünkü eylemlerimizin uzun vadeli sonuçlarını düşünmemiz ve kısa vadeli ekonomik kazançlar veya politik çıkarlar uğruna geleceğimizi ipotek altına almaktan kaçınmamız gerektiğini belirtmektedir.

Brundtland tanımının ve tüm sürdürülebilirlik tanımlarının son kritik unsuru ise, gezegenin ekolojik sınırlarının veya taşıma kapasitesinin tanınmasıdır. Rapordaki "sınırlılıklar" ifadesi, çevrenin ihtiyaçları karşılama yeteneğinin bir sınırı olduğunu kabul eder (WCED, 1987, s. 43). Bu ifade, gezegenin ekolojik sistemlerinin sonsuz kaynaklar sunmadığını ve insan faaliyetlerinin yarattığı atıkları ve kirliliği absorbe etme kapasitesinin bir sınırı olduğunu vurgular. Bu sınır, ekoloji biliminde bir ekosistemin, yapısı bozulmadan uzun süre destekleyebileceği maksimum faaliyet yoğunluğunu ifade eder. Bu fikir, ilk olarak "Büyümenin Sınırları" raporuyla (Meadows vd., 1972) geniş kitlelere ulaşmış ve sınırsız ekonomik büyümenin sonlu bir gezegendeki fiziksel imkansızlığını vurgulamıştır. Ekolojik iktisatçılar, insan ekonomisinin doğanın bir alt sistemi olduğunu ve bu nedenle ekolojik yasalara (örneğin termodinamik yasaları) tabi olduğunu savunurlar (Daly, 1990, s. 1-2). Bu perspektiften bakıldığında sürdürülebilirlik, insan ekonomisinin ölçeğini, gezegenin biyofiziksel sınırları içinde kalacak şekilde yönetmeyi gerektirir. Rockström ve arkadaşlarının (2009, s. 472) gezegensel sınırlar çerçevesi, bu ekolojik sınırları bilimsel olarak tanımlamaya ve ölçmeye yönelik önemli bir adımdır ve insanlığın güvenli operasyon alanı dışına çıktığı alanları (iklim değişikliği, biyoçeşitlilik kaybı vb.) işaret eder.

Brundtland Raporunda yapılan tanımlama, kapsayıcılığı ve dengeli yaklaşımı nedeniyle geniş kitlelerce kabul görmüş olsa da zaman içinde çeşitli eleştirilere de maruz kalmıştır. Bazı eleştirmenler, tanımın merkezine aldığı "kalkınma"

kavramının yeterince sorgulamadığını ve mevcut ekonomik büyüme odaklı modeli temelden değiştirmek yerine onu sadece "yeşillendirmeye" çalıştığını savunmuşlardır. Redclift (2005, s. 218), "sürdürülebilir kalkınma" teriminin kendiyle çelişen bir ifade olup olmadığını sorgulamış ve asıl hedefin büyüme değil, ekolojik sınırlar içinde dengeye ulaşmış olan sürdürülebilir bir toplum olması gerektiğini ileri sürmüşlerdir. Diğerleri ise bu tanımlamanın fazla genel ve muğlak olduğunu, farklı aktörlerin kendi çıkarlarına göre yorumlamasına oldukça açık olduğunu ve pratikte nasıl ölçülüp uygulanacağına dair yeterli rehberlik sunmadığını belirtmişlerdir (Robinson, 2004, s. 375).

Türkiye'deki akademik literatürde de sürdürülebilirlik kavramı, bu küresel tanımlar ışığında ancak hızlı kentleşme, enerji bağımlılığı, bölgesel eşitsizlikler vb. ülkenin özgün koşulları bağlamında yorumlanabilmiştir. Örneğin, Ertürk (2010, s. 15-18), sürdürülebilirliği ekolojik dengeyi koruyarak ekonomik büyüme ve sosyal gelişmeyi sağlama çabası olarak tanımlarken, Türkiye'nin enerji ve su gibi kaynaklar üzerindeki baskısına dikkat çekmiştir. Şenel (2010, s. 25-30), yapı sektörü özelinde sürdürülebilirliği, kaynakların etkin kullanılması, çevresel etkinin azaltılması ve sağlıklı yaşam alanları yaratılması olarak yorumlamaktadır. Aras (2019, s. 471-475) ise kentsel sürdürülebilirlik kapsamında yeşil altyapıların rolünü incelemiş, kavramın yerel yönetimler düzeyindeki uygulamalarına odaklanmıştır.

Sonuç olarak bakıldığında sürdürülebilirlik kavramının tek ve kesin bir tanımı olmasa da farklı tanımların ortak paydasında; insan refahını artırırken gezegenin ekolojik bütünlüğünün korunması, bugünkü ve gelecek nesiller arasında adaletin sağlanması ve insan faaliyetlerinin biyofiziksel sınırlar içinde tutulması hedefi yatmaktadır. Bu, ekolojik, ekonomik ve sosyal boyutları birbirinden ayrılamaz bir bütün olarak gören, disiplinler arası ve dinamik bir yaklaşımdır. Robinson (2004, s. 378), sürdürülebilirliğin bir varış noktası olmadığını, sürekli devam eden bir öğrenme, müzakere ve uyum süreci olduğunu vurgulayarak kavramın dinamik doğasının altını çizmektedir. Bu tez kapsamında sürdürülebilirlik kavramı, bu bütüncül, adalet odaklı, ekolojik sınırları gözeten ve dinamik anlayış çerçevesinde ele alınacak ve yeşil çatı malzemelerinin seçilmesinde bu ilkelerin nasıl gözetilebileceği araştırılacaktır.

2.2 Sürdürülebilirliğin Tarihsel Gelişimi

Sürdürülebilirlik kavramı, 1980'li yıllarda yayımlanan Brundtland Raporu ile küresel bir terim haline gelmiş olsa da altında yatan felsefe ve pratikler insanlık tarihi kadar eskiye dayanmaktadır. Kavramın modern formuna kavuşması, çevresel krizlere, toplumsal hareketlere ve bilimsel uyarılara bir tepki olarak gelişen, evrimsel bir sürecin sonucunda ortaya çıkmıştır. Bu tarihsel gelişim, doğayla uyum içinde yaşama pratiklerinden, sanayileşmenin yarattığı tahribata ve nihayetinde küresel bir eylem planına dönüşen bir farkındalık seyrini izlemektedir.

Kavramın erken dönem izleri, tarımsal üretime dayalı ilk medeniyetlerde dahi görülebilmektedir. Toprağın verimliliğinin korunması amacıyla uygulanan nadas sistemi veya Mezopotamya'daki karmaşık sulama kanallarının yönetimi, doğal kaynakların kendini yenileme kapasitesini gözeten ilkel sürdürülebilirlik pratikleri olarak yorumlanabilmektedir (Aras, 2019, s. 472).

Antik Yunan'da Aristoteles'in kullanım değeri (fayda) ile değişim değeri (piyasa fiyatı) arasında yaptığı ayrım, tüketimin ihtiyaç temelli olması gerektiğine dair felsefi bir temel oluşturmuştur (Topçu, 2020, s. 15-16). Orta Asya Türk toplumlarında suyun ve meraların adil paylaşımına dayalı geleneksel (töre) uygulamaları da sınırlı olan kaynakların korunmasına yönelik sosyal normlar olarak görülebilmektedir. Benzer şekilde, 18. yüzyıl Alman ormancılığında, ormanların yok olmasını engellemek amacıyla geliştirilen ve kelime anlamıyla "süreklilik" veya "sürekli verim" anlamına gelen "Nachhaltigkeit" ilkesi, doğal bir kaynaktan (orman), ancak o kaynağın kendini yenileyebileceği miktarda (ağaç) alınması gerektiğini savunmuştur (Grober, 2012, s. 85-90). Bu ilke, sürdürülebilirliğin "yenilenebilir kaynakların tükenme hızından daha yavaş tüketilmesi" yönündeki modern ekolojik tanımlanmasının ilk bilimsel formülasyonlarından biri olarak kabul görmektedir.

Ancak, sürdürülebilirliğin küresel bir zorunluluk olarak ortaya çıkması, 18. yüzyılda Sanayi Devrimi ile başlayan ve doğa ile insan arasındaki dengeyi kökten bozan süreçle doğrudan ilişkilidir. Buhar makinesinin icat edilmesi, kömürün yoğun kullanılması, fabrikalaşma ve fosil yakıtlara dayanan ekonomik model, daha önce görülmemiş bir üretim ve refah artışı yaratmıştır (Meadows vd., 1972, s. 30-35). Ancak bu "sonsuz büyüme" paradigması, aynı zamanda hava kirliliği,

ormanların tahribatı, su kaynaklarının kirletilmesi ve kontrolsüz kentleşme gibi devasa çevresel maliyetleri de beraberinde getirmiştir (Redclift, 2005, s. 214). Bu dönemde, büyümenin ekolojik ve sosyal sınırları olduğu fikri, 19. yüzyılda Thomas Malthus'un nüfus artışının gıda üretimini aşacağı yönündeki tezleri veya John Stuart Mill'in "durağan durum ekonomisi" fikri gibi erken dönem eleştirilerle de dile getirilmiştir.

Kavramın modern tarihçesi ise, 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren, özellikle İkinci Dünya Savaşı sonrası yaşanan "Büyük Hızlanma" dönemindeki çevresel krizlere bir yanıt olarak başlamıştır (Steffen, Crutzen, & McNeill, 2007). 1960'lı yıllar, bu farkındalığın toplumsallaştığı bir dönüm noktası olmuştur. Rachel Carson'ın 1962'de yayımlanan "Sessiz Bahar" adlı eseri, DDT (tam adıyla Dikloro Difenil Trikloroetan olan, 1940'lı yıllardan itibaren tarımda böcek ilacı (insektisit) olarak ve sıtma, tifüs gibi hastalıkları taşıyan sinek/böceklerle mücadelede çok yaygın kullanılmış, ancak daha sonra çevreye ve insan sağlığına ciddi zararları kanıtlanınca yasaklanmış sentetik bir kimyasaldır.) gibi sentetik pestisitlerin besin zincirine girerek ekosistemleri nasıl zehirlediğini çarpıcı bir dille ortaya koymuş ve modern çevre hareketini tetiklemiştir (Carson, 1962). Carson'ın bu çalışması, çevresel sorunların artık sadece kaynakların tükenmesi değil, aynı zamanda teknolojik ilerlemenin yarattığı kirlilik ve ekolojik bozulma olduğunu da gözler önüne sermiştir.

Bu toplumsal uyanışı, 1970'li yıllarda bilimsel ve politik bir çerçeve izlemiştir. 1972 yılında Roma Kulübü (Club of Rome) tarafından yayımlanan "Büyümenin Sınırları" (The Limits to Growth) raporu, adeta bir deprem etkisi yaratmıştır. MIT (Massachusetts Teknoloji Enstitüsü) bilim insanları tarafından hazırlanmış olan bu raporda bilgisayar modellemeleri kullanılarak, dünya nüfusu, sanayileşme, kirlilik, gıda üretimi ve kaynakların tükenmesi arasındaki ilişki incelenmiştir. Raporun vardığı sonuç, mevcut büyüme eğilimlerinin devam etmesi halinde 21. yüzyıl içinde gezegenin var olan fiziksel sınırlarına çarpılacağı ve bunun da ekolojik ve ekonomik bir çöküşe yol açacağı yönündedir (Meadows vd., 1972, s. 23-24). Bu rapor, "sınırsız ekonomik büyüme" yaklaşımını bilimsel olarak sorgulayan ilk kapsamlı çalışma olmuştur.

Aynı yıl, 1972'de, Birleşmiş Milletler öncülüğünde Stockholm'de düzenlenen İnsan Çevresi Konferansı'yla beraber çevre sorunları ilk kez küresel politika gündemine

taşınmıştır (United Nations, 1972). Bu konferans, aynı zamanda sürdürülebilirlik tartışmalarının merkezinde temel bir gerilim olarak yer alacak olan "Kuzey-Güney" (gelişmiş-gelişmekte olan ülkeler) ayrımı da su yüzüne çıkarmıştır. Gelişmiş ülkeler öncelikle sanayileşmenin neden olduğu kirlilik sorunlarına odaklanırken, Hindistan Başbakanı Indira Gandhi'nin öncülüğündeki gelişmekte olan ülkeler, "Yoksulluk en büyük kirleticidir" teziyle, kendi önceliklerinin yoksullukla mücadele ve kalkınma olduğunu belirtmişlerdir (Keleş, 2012, s. 80-82).

Bu "çevre mi, kalkınma mı?" ikilemini aşma ve iki kavramı bütünleştirme arayışı, 1987 yılında yayımlanan ve bir önceki alt başlıkta detaylıca incelenen Brundtland Raporu ile sonuçlanmıştır (WCED, 1987). Raporun dehası, "sürdürülebilir kalkınma" kavramını popülerleştirerek, çevresel korumanın ekonomik büyümeye bir engel değil, tam aksine uzun vadeli kalkınmanın bir ön koşulu olması gerektiğini savunmasında yatmaktadır (Redclift, 2005, s. 215). Bu rapor hem gelişmiş ülkelerin çevresel kaygılarına hem de gelişmekte olan ülkelerin kalkınma önceliklerine hitap ederek, Stockholm'de aşılamayan politik açmazı ortadan kaldırmakla beraber, sonraki tüm küresel müzakereler için ortak bir dil ve kavramsal çerçeve sunmuştur.

Brundtland Raporu'nun yarattığı ivme, 1992 yılında Brezilya'da düzenlenen Rio Yeryüzü Zirvesi (UNCED) ile küresel bir eylem planına dönüşmüştür. Rio Zirvesi, sürdürülebilirlik gündemini üç temel alanda somutlaştırmıştır: (1) 21. yüzyıl için sürdürülebilir kalkınma yol haritası olan "Gündem 21" (Agenda 21), (2) Rio Deklarasyonu (ortak fakat farklılaştırılmış sorumluluklar ilkesi gibi), (3) Üç büyük küresel sözleşme: İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC), Biyoçeşitlilik Sözleşmesi (CBD) ve Çölleşmeyle Mücadele Sözleşmesi (UNCCD) (United Nations, 1992). Bu zirve, sürdürülebilirliğin sadece devletlerin değil, yerel yönetimlerin ("Yerel Gündem 21") ve sivil toplumun da sorumluluğu olduğunu vurgulamıştır.

21. yüzyıla gelindiğinde, sürdürülebilirlik gündemi 2000 yılındaki Binyıl Kalkınma Hedefleri (MDGs) ve onun devamı niteliğindeki 2015 tarihli Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDGs) ile daha da somut ve bütüncül bir çerçeveye kavuşmuştur. 17 amaç ve 169 hedeften oluşmakta olan SDG'ler, bizlere yoksullukla mücadeleden iklim eylemine, sürdürülebilir şehirlerden sorumlu üretim ve tüketime kadar sürdürülebilirliğin tüm boyutlarını kapsayan evrensel bir yol haritası sunmaktadır (United Nations, 2015).

Genel olarak sürdürülebilirlik, tarihsel süreçte yerel ve geleneksel kaynak yönetimi uygulamalarında doğmuştur. Sanayi Devrimi'nin yarattığı ekolojik krizlerle bilimsel bir temele oturmuş olup 20. yüzyılın sonunda küresel bir politik yaklaşım haline gelmiştir.

Aşağıda Tablo 2.1'de Sürdürülebilir Kalkınma Kavramının Tarihsel Gelişimi incelenmiştir.

Tablo 2.1 Sürdürülebilir Kalkınma Kavramının Tarihsel Gelişimi

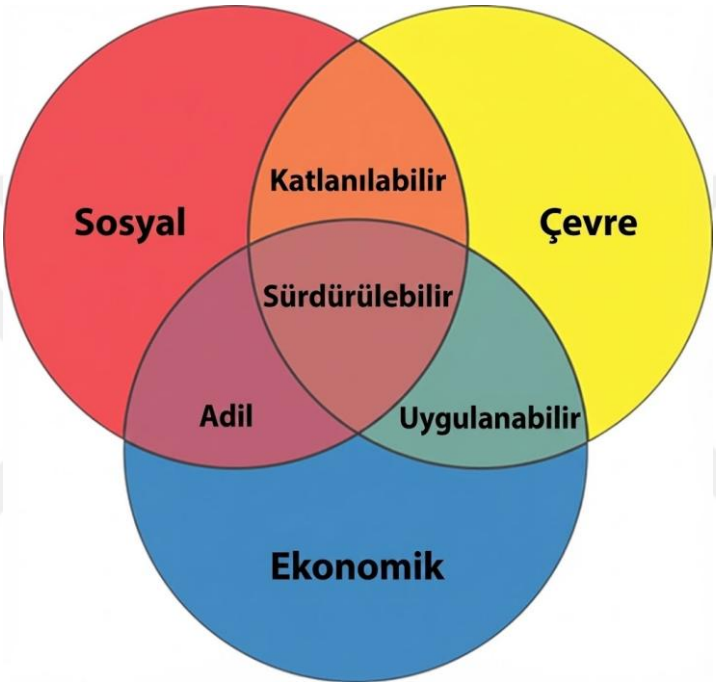
Yıl	**Olay / Rapor**	**Temel Vurgu ve Etki**
1713	Carlowitz- Sylvicultura Oeconomica	"Nachhaltigkeit" ilkesi: Kaynakların yenilenme hızına göre tüketimi.
1962	Rachel Carson- Sessiz Bahar	Pestisitlerin ekolojik etkileri ve modern çevre hareketinin başlangıcı.
1972	Roma Kulübü- Büyümenin Sınırları	Sınırlı bir gezegende sınırsız büyümenin imkansızlığı.
1972	Stockholm Konferansı (BM)	Çevre sorunlarının küresel politik gündeme alınması.
1987	Brundtland Raporu (Ortak Geleceğimiz)	Sürdürülebilir kalkınmanın modern tanımı ve kuşaklararası eşitlik vurgusu.
1992	Rio Yeryüzü Zirvesi	Gündem 21, İklim Değişikliği ve Biyoçeşitlilik Sözleşmeleri.
2015	BM Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDGs)	2030 yılına kadar ulaşılması hedeflenen 17 evrensel amaç.

2.3 Sürdürülebilirliğin Boyutları

Sürdürülebilirlik kavramının tanımında ve tarihsel gelişiminde görüldüğü üzere, bu olgu tek bir boyuta indirgenemeyecek kadar geniş ve çok katmanlı bir olgudur. Brundtland Raporu'nun (WCED, 1987) çevre ve kalkınmayı bütünleştirme çabası, literatürde kavramın genellikle çevresel (ekolojik), ekonomik ve sosyal üç temel boyut veya sütun üzerinden incelenmesine yol açmıştır. Bu model, John Elkington (1997) tarafından kurumsal dünyaya "Üçlü Bilanço" (Triple Bottom Line) olarak tanıtılmıştır. Üçlü bilanço modeli, bir kuruluşun veya projenin başarısının sadece

finansal kâr (Ekonomik boyut) ile değil, aynı zamanda gezegen (Çevresel boyut) ve insanlar (Sosyal boyut) üzerindeki etkileriyle de ölçülmesi gerektiğini savunmaktadır.

Bu üç boyut, sıklıkla "üç ayaklı tabure" benzetmesiyle açıklanmaktadır. Taburenin dengede durabilmesi için her üç ayağın da eşit derecede güçlü ve birbiriyle dengede olması gerekmektedir. Bir ayaktaki zayıflık veya çöküş, tüm sistemin sürdürülemez hale gelmesine yol açacaktır (Giddings, Hopwood, & O'Brien, 2002, s. 188).



Şekil 2.1 Sürdürülebilirlik Venn Şeması Kaynak: WCED (1987) temel alınarak yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 2.1'de yer alan ve literatürde temel referans kabul edilen Venn şeması, sürdürülebilirliğin üç ana boyutu arasındaki dinamik ilişkiyi somut hale getirmektedir. Bu çerçevede, ekonomik büyüme ile çevresel korumanın dengelendiği kesişim alanı "Uygulanabilir" olarak nitelendirilmektedir. Bir projenin ekonomik kârlılığı ile çevresel yasalara uyumu bu alanda sağlanıyor olsa da sosyal boyutun eksikliği toplumsal kabulü zorlaştırabilmektedir. Benzer şekilde, ekonomik refahın toplumun geneline yayıldığı "Adil" alan, gelir dağılımı adaleti ve erişilebilirliği temsil etmekle beraber, çevresel etkilerin göz ardı edilmesi durumunda uzun vadeli bir başarı vaat etmemektedir. Toplumun sağlıklı bir çevrede

yaşama hakkını esas alan “Yaşanabilir/Katlanılabilir” kesişim noktasında ise insan sağlığı ve ekolojik denge uyum içindedir; ancak burada da ekonomik sürdürülebilirliğin sağlanamaması sistemin finansal devamlılığını riske atmaktadır. Sonuç olarak, gerçek anlamda bir sürdürülebilirlikten söz edebilmek için çevresel sınırların korunduğu, ekonomik refahın sağlandığı ve toplumsal adaletin gözetildiği ideal denge noktası olan merkezdeki “Sürdürülebilir” alana ulaşılması gerekmektedir. Bu bölümde söz konusu üç boyut ayrı başlıklar altında detaylıca incelenecek, ardından bu boyutların birbiriyle olan ilişkisi “zayıf” ve “güçlü” sürdürülebilirlik teorileri çerçevesinde tartışılacaktır.

2.3.1 Çevresel Sürdürülebilirlik

Çevresel sürdürülebilirlik, sürdürülebilirlik kavramının en temel ve yaygın olarak anlaşılan boyutu olarak öne çıkmaktadır. Özünde, insan faaliyetlerinin gezegenin ekolojik sistemlerinin kendini yenileme, dengeleme ve yaşamı destekleme kapasitesini aşmamasını sağlamayı hedeflemektedir. Bu yaklaşım, “ekolojik sınırlar” ve “taşıma kapasitesi” fikirlerini temel almaktadır (Meadows vd., 1972). Çevresel sürdürülebilirlik, doğanın bir kaynak deposu ve atık çukuru olarak görülmesinden vazgeçilip, insanlığın da bir parçası olduğu karmaşık ve hassas bir yaşam destek sistemi olarak kabul edilmesi gerektiğini belirtmektedir. Çevresel sürdürülebilirliğin temel ilkeleri şunlardır:

2.3.1.1 Kaynak Yönetimi

Herman Daly (1990), kaynak yönetimi için üç kural önermektedir: (1) Yenilenebilir kaynakların tüketim hızı, yenilenme hızını geçmemelidir. (2) Yenilenemeyen kaynakların tükenme hızı, ikame edilebilir yenilenebilir kaynakların yaratılma hızından yavaş olmalıdır. (3) Atık üretim hızı, doğanın absorbe etme kapasitesini aşmamalıdır.

2.3.1.2 Ekosistem Hizmetlerinin Korunması

Temiz hava, su ve tozlaşma gibi hayati önemde olan “ekosistem hizmetlerinin” devamlılığı esastır. Costanza ve arkadaşları (1997), bu hizmetlerin ekonomik değerinin küresel gayri safi yurtiçi hasıladan daha fazla olduğunu ortaya koymuştur.

2.3.1.3 Biyoçeşitlilik ve İklim

Habitat kaybı ve iklim değişikliği, ekolojik sistemlerin çökme riskini artırmaktadır (Rockström vd., 2009). Paris Anlaşması (2015), bu tehdide karşı küresel sıcaklık artışını 1,5°C ile sınırlandırmayı hedefleyerek fosil yakıtlardan uzaklaşmayı zorunlu kılmıştır

Yapı sektörü, bu boyutun en kritik aktörlerinden biridir. Binalar, küresel enerji tüketiminin yaklaşık %36'sından, enerji kaynaklı CO2 emisyonlarının ise %39'undan sorumlu olması nedeniyle kritik bir aktördür (IEA, 2021). Bu bağlamda, Türkiye'de de yapı sektörünün çevresel sürdürülebilirliğe olan katkısı, enerji verimliliği (BEP Yönetmeliği vb.), yerel ve düşük gömülü enerjili malzeme kullanımı (Şenel, 2010, s. 78-85), suyun etkin kullanımı ve atık yönetimi gibi konular üzerinden tartışılmaktadır. Bu tezin odak noktası olan yeşil çatılar, tam da bu noktada devreye girer; kentsel ısı adası etkisini azaltarak, yağmur suyunu yöneterek ve binaların enerji performansını iyileştirerek çevresel sürdürülebilirliğe doğrudan katkı sağlayan doğa tabanlı çözümlerdir (Külekçi, 2017, s. 19-21).

2.3.2 Ekonomik Sürdürülebilirlik

Ekonomik sürdürülebilirlik, genellikle en yanlış anlaşılan boyut olarak karşımıza çıkmakta ve sıklıkla "sürekli ekonomik büyüme" veya "kârlılık" ile karıştırılmaktadır. Halbuki sürdürülebilir bir ekonomik model, kısa vadeli finansal kârları maksimize etmek yerine, uzun vadeli ve kapsayıcı bir refah yaratmayı amaçlamaktadır. Ekonomik sürdürülebilirlik geleneksel modelde dışsallık olarak görülen çevresel ve sosyal maliyetlerin aksine bu maliyetlerin içselleştirilmesini savunmaktadır (Pearce, Markandya, & Barbier, 1989). Bu boyutun temelinde, "al-yap-at" modeline dayalı doğrusal ekonomiden, kaynakların döngü içinde tutulduğu döngüsel ekonomi modeline geçiş yatmaktadır (Stahel, 2016).

Yapı sektöründe ekonomik sürdürülebilirliğin en önemli aracı Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC) analizi olarak karşımıza çıkmaktadır. Yaşam Döngüsü Maliyeti, binanın sadece ilk yatırım maliyetini değil; işletme, bakım, onarım ve bertaraf maliyetlerini de hesaba katan bir sistemdir. (Ortiz vd., 2009). Bu analiz, ilk yatırımı yüksek görünse de yeşil çatılar gibi enerji verimli sistemlerin uzun vadede daha

ekonomik olduğunu kanıtlar. Bu yaklaşım, Değer Mühendisliği metodolojisinin temelini oluşturan yaklaşımlardandır.

Türkiye bağlamında bakıldığında ekonomik sürdürülebilirlik, özellikle enerji verimliliği üzerinden kritik bir önem taşımaktadır. Enerjide büyük ölçüde dışa bağımlı olan Türkiye ekonomisi için binalarda sağlanacak enerji tasarrufu, sadece çevresel bir kazanım değil, aynı zamanda ulusal cari açığın azaltılması için de stratejik bir hedeftir. Son yıllarda Türkiye'de gelişen "yeşil finansman" uygulamaları ve bankaların sürdürülebilirlik odaklı olan yeşil binalar vb. projelere yönelik sunduğu krediler de bu boyutun finansal altyapısının geliştiğini göstermektedir (Çakır, 2023, s. 70-75).

2.3.3 Sosyal Sürdürülebilirlik

Sosyal sürdürülebilirlik, sürdürülebilirlik boyutlarının genellikle en az somutlaştırılan ve en çok ihmal edileni olarak görülse de (Hopwood vd., 2005, s. 44-45), sistemin bütünlüğü için en az diğerleri kadar hayati öneme sahiptir. Bu boyut, insanı merkeze almakta ve toplumların refahını, sağlığını, güvenliğini, eşitliğini ve yaşam kalitesini güvence altına almayı hedeflemektedir. Sadece bugünkü toplumların değil, gelecek toplumların da sosyal sermayesinin korunmasını ve geliştirilmesini amaçlamaktadır. Sosyal sürdürülebilirliğin temel bileşenleri aşağıda detaylandırılmaktadır.

2.3.3.1 Eşitlik ve Adalet

Toplumun tüm kesimlerinin gelir, cinsiyet, etnik köken, yaş veya engel durumuna bakılmaksızın sağlık, eğitim, temiz su vb. tüm temel hizmetlere erişim hakkının güvence altına alınmasıdır (WCED, 1987).

2.3.3.2 Katılım

Toplulukların ve bireylerin, kendilerini ve yaşam alanlarını etkileyen karar alma süreçlerine aktif olarak katılmalarının sağlanmasıdır. Bu, şeffaflık, hesap verebilirlik ve demokratik yönetişim ilkelerini gerektirmektedir (Sachs, 1999, s. 25-30).

2.3.3.3 Sağlık ve Yaşam Kalitesi

İnsanların sadece ekonomik olarak değil, fiziksel, zihinsel ve sosyal olarak da iyi olma halidir. Güvenli yaşam çevreleri, kirlilikten arındırılmış bir ortam, rekreasyon alanlarına erişim ve sağlıklı binalar bu kapsamda değerlendirilmektedir.

2.3.3.4 Kültürel Çeşitlilik ve Sosyal Uyum

Yerel kimliklerin, kültürel mirasın ve toplumsal çeşitliliğin korunması ve geliştirilmesidir. Küreselleşmenin yarattığı tek tipleşmeye rağmen yerel değerlerin korunması, toplumsal bağlılık ve uyum için önemlidir.

Yapı sektörü, sosyal sürdürülebilirlik başlığıyla doğrudan ilişkilidir. Türkiye'deki kentsel dönüşüm projeleri, sosyal sürdürülebilirlik için kritik test alanıdır. Yerel halkın sosyo-ekonomik yapısını gözetmeksizin yapılan bu projeler, soylulaştırma ve yerinden edilme gibi sorunlara yol açabilmektedir (Topçu, 2020).

2.3.4 Boyutların Bütünleştirilmesi: Zayıf ve Güçlü Sürdürülebilirlik

Sürdürülebilirliğin boyutları arasındaki ilişki, doğal sermaye ile insan yapımı sermayenin ikame edilebilirliği üzerinden iki farklı teoriyle açıklanabilmektedir:

2.3.4.1 Zayıf Sürdürülebilirlik

Neoklasik ekonomi teorisine dayanmaktadır. Doğal sermaye ile insan yapımı sermayenin birbirinin yerine geçebileceğini savunmaktadır. Önemli olan toplam sermaye stoğunun azalmamasıdır; tükenen doğal kaynağın yerini teknoloji alabilir (Neumayer, 2013).

2.3.4.2 Güçlü Sürdürülebilirlik

Ekolojik ekonomi disiplinine dayanmaktadır. Doğal sermayenin insan yapımı teknolojiyle ikame etmenin mümkün olmadığını yani “Kritik Doğal Sermaye” kavramını savunmaktadır (Daly, 1990).

Bu tez çalışması, yeşil çatıları doğal sermaye olan bitki örtüsünü insan yapımı sermaye olan bina ile bütünleştiren tamamlayıcı bir strateji olarak ele almakta ve dolayısıyla felsefi olarak güçlü sürdürülebilirlik yaklaşımına yakın durmaktadır.

Aşağıda Tablo 2.2'de Zayıf ve Güçlü Sürdürülebilirlik yaklaşımlarının temel farkları incelenmiştir.

Tablo 2.2 Zayıf ve Güçlü Sürdürülebilirlik yaklaşımlarının temel farkları.

Özellik	**Zayıf Sürdürülebilirlik**	**Güçlü Sürdürülebilirlik**
Teorik Temel	Neoklasik Ekonomi	Ekolojik Ekonomi
İkame Edilebilirlik	Tam ikame mümkündür.	İkame sınırlıdır veya imkansızdır.
Odak Noktası	Toplam sermaye stokunun korunması.	Doğal sermaye stokunun ayrı olarak korunması.
Teknoloji Algısı	Teknolojik iyimserlik: Çözüm üretir.	İhtiyatlılık ilkesi: Doğanın sınırları vardır.

2.4 Dünyada ve Türkiye'de Sürdürülebilirlik

Sürdürülebilirlik kavramı, 20. yüzyılın son çeyreğinde küresel bir ilke olarak benimsenmesinden günümüze dek, uluslararası politikalardan ulusal stratejilere ve yerel uygulamalara kadar geniş bir yelpazede somut eylem planlarına dönüşmüştür. Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDGs) ve Paris Anlaşması gibi küresel çerçeveler, ülkeler için ortak bir hedef belirlerken, her ülkenin bu hedeflere ulaşma biçimi kendi ekonomik yapısı, coğrafi koşulları, politik öncelikleri ve tarihsel bağlamına göre farklılık göstermektedir. Bu bölümde, sürdürülebilirlik politikalarının dünyadaki öncü uygulamaları ile Türkiye'nin bu küresel gündemdeki konumu, benimsediği politikalar ve karşılaştığı temel zorluklar karşılaştırmalı olarak incelenecektir.

2.4.1 Dünyada Sürdürülebilirlik Politikaları ve Uygulamaları

21. yüzyılda sürdürülebilirlik kavramı, uluslararası ilişkilerin ve küresel ekonominin belirleyici dinamiklerinden biri haline gelmiştir. Bu dönüşümün öncü aktörlerinden olan Avrupa Birliği, 2019 yılında açıkladığı Avrupa Yeşil Mutabakatı ile "yeşil dönüşümü" bir ekonomik büyüme stratejisi olarak benimsemiştir. Yeşil Mutabakat, 2050 yılına kadar Avrupa'yı dünyanın ilk iklim-nötr kıtası yapmayı

amaçlamakta olan kapsamlı bir yol haritasıdır (European Commission, 2019). Bu paket; Döngüsel Ekonomi Eylem Planı, “Tarladan Çatala” stratejisi ve özellikle yapı sektörü için kritik olan “Yenileme Dalgası” gibi stratejileri içermektedir. Yenileme Dalgası, mevcut yapı stokunun enerji verimliliğini artırmayı ve yeşil çatılar gibi doğa tabanlı çözümlemeleri yaygınlaştırmayı hedeflemektedir. Ayrıca, Sınırda Karbon Düzenleme Mekanizması (CBAM) ile Avrupa Birliği, kendi yeşil standartlarını küresel ticaret ortakları için de mali bir zorunluluk haline getirmektedir.

Amerika Birleşik Devletleri ise 2022 yılında yürürlüğe giren Enflasyonu Düşürme Yasası (IRA) ile farklı bir yol izlemiştir. Avrupa Birliği'nin düzenleme odaklı yaklaşımının aksine Enflasyonu Düşürme Yasası; temiz enerji teknolojileri, elektrikli araçlar ve karbon yakalama sistemlerini geliştirmeye yönelik devasa kamu teşvikleri sunan bir endüstri politikası paketidir (IEA, 2023).

Asya-Pasifik bölgesinde Çin, dünyanın en büyük sera gazı salınımı yapan ülkesi olmasına rağmen, yenilenebilir enerji teknolojilerinin de en büyük üreticisi konumundadır. Çin'in 2060 "karbon nötr" hedefi, küresel iklim dengesi için hayati önem taşımaktadır. Japonya ise “Toplum 5.0” vizyonuyla sürdürülebilir şehirleşmeyi teşvik etmektedir. Tüm bu politikaların bilimsel dayanağını ise Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) raporları oluşturmaktadır (IPCC, 2023).

2.4.2 Türkiye’de Sürdürülebilirlik Politikaları ve Yapısal Zorluklar

Türkiye Akdeniz Havzası'nda yer alması nedeniyle kuraklık, sel vb. iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine karşı oldukça kırılgan bir coğrafyada bulunmaktadır. Bu çevresel riskler ve en büyük ticaret ortağı olan Avrupa Birliği'nin Yeşil Mutabakatı'ndan kaynaklanan ekonomik zorunluluklar, Türkiye'nin sürdürülebilirlik gündemini son yıllarda hızlandırmıştır.

Bu alandaki en önemli kilometre taşı, Türkiye'nin 2021 yılında Paris Anlaşması'nı onaylaması ve hemen akabinden 2053 yılı için “Net Sıfır Emisyon” (Net Zero Emission) hedefini beyan etmesidir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021). Bu iddialı hedef, ülkenin kalkınma modelini kökten değiştirecek

bir dönüşümün başlangıcı olarak kabul edilmektedir. Bu hedef doğrultusunda çeşitli ulusal strateji ve politikalar geliştirilmiş veya güncellenmiştir.

2.4.2.1 Ulusal Eylem Planları

Türkiye'nin İklim Değişikliği Ulusal Eylem Planı, Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (2017-2023), Sıfır Atık Yönetmeliği ve Döngüsel Ekonomi Eylem Planı gibi belgeler, ilgili sektörlerde yol haritaları sunmaktadır.

2.4.2.2 Sıfır Atık Projesi

Cumhurbaşkanlığı himayesinde yürütülen ve 2017'de başlayan bu proje, atıkların kaynağında ayrıştırılması, geri dönüştürülmesi ve israfın önlenebilmesi konularında toplumsal bir farkındalık yaratmayı ve uygulama altyapısını kurmayı amaçlamaktadır.

2.4.2.3 Yapı Sektörü Düzenlemeleri

Yapı sektörü, Türkiye'nin toplam nihai enerji tüketimindeki yüksek payı nedeniyle bu dönüşümün merkezinde yer almaktadır. Bu bağlamda, Binalarda Enerji Performansı (BEP) Yönetmeliği sürekli güncellenmekte ve "Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar (nZEB)" konseptine geçiş için yasal altyapı güçlendirilmektedir. Bu düzenlemeler, yalıtım standartlarının artırılmasını, enerji verimli sistemlerin kullanılmasını ve yenilenebilir enerji entegrasyonunu zorunlu kılarak, bu tezin konusu olan yeşil çatılar gibi pasif/aktif sistemlerin önemini artırmaktadır (Şenel, 2010, s. 40-45).

2.4.2.4 Yeşil Finansman

Türkiye'de bankacılık sektörü ve finansal kuruluşlar da bu dönüşüme ayak uydurmakta, yeşil binalara, yenilenebilir enerji projelerine ve enerji verimliliği yatırımlarına yönelik "yeşil tahviller" veya "sürdürülebilirlik odaklı krediler" gibi yeni finansman modellemeleri geliştirmektedir (Çakır, 2023, s. 80-85).

Ancak bu atılan olumlu adımlara rağmen, Türkiye'de ciddi yapısal zorluklar bulunmaktadır. İnşaat sektörünün ekonomik büyümenin lokomotifi olarak

görülmesi, genellikle çevresel maliyetlerin göz ardı edildiği hızlı ve plansız bir kentleşmeye yol açmaktadır (Özdemir, 2011, s. 275-278).

Kentsel yayılma, verimli arazilerin kaybına ve ısı adası etkisinin artmasına neden olurken; kentsel dönüşüm projeleri sıklıkla sadece fiziksel yenilemeye odaklanmaktadır (Keleş, 2012, s. 110-115). Ayrıca, enerji üretiminde ithal fosil yakıtlara olan yüksek bağımlılık hem cari açık hem de karbon emisyonları açısından çifte problemler ortaya çıkartmaktadır.

2.5 Sürdürülebilir Yapılar

Sürdürülebilirlik kavramının mimarlık, mühendislik disiplinlerindeki somut yansıması, "sürdürülebilir yapılar" veya daha popüler adıyla "yeşil binalar" olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapı sektörü, küresel enerji tüketiminin yaklaşık %36'sından ve enerjiyle ilişkili olan karbondioksit emisyonlarının %39'undan sorumlu tutulmaktadır (IEA, 2021; UNEP, 2020). Bu yüksek oranlar, sektörü iklim değişikliğiyle mücadelenin ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmanın en kritik aktörlerinden biri haline getirmektedir. Bu doğrultuda sürdürülebilir yapılar, geleneksel yapı üretim uygulamalarının yarattığı olumsuz çevresel, ekonomik ve sosyal etkileri en aza indirmeyi hedefleyen bütüncül bir yaklaşımdır.

Literatürde Berardi (2013), "yeşil bina" teriminin genellikle çevresel performans ve kaynak verimliliğine odaklandığını; "sürdürülebilir yapı" teriminin ise bu hedeflere ek olarak ekonomik canlılık ve sosyal refah boyutlarını da kapsadığını belirtmektedir. Ancak uygulamada bu iki terim sıklıkla birbirinin yerine kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında sürdürülebilir yapı; Kibert'in (2016) tanımına paralel olarak, kaynakları verimli kullanan, sağlıklı bir çevre yaratan ve tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkileri en aza indiren bir yapı olarak incelenecektir. Geleneksel parçalı tasarım yaklaşımının aksine, sürdürülebilir yapılar bütünleşik tasarım süreci gerektirmektedir. İşveren, mimar, mühendis ve işletmecinin erken aşamada bir araya geldiği bu süreç, binayı bir bütün olarak optimize etmeyi sağlamaktadır (Garde, 2009).

2.5.1 Sürdürülebilir Tasarım Temel İlkeleri

Sürdürülebilir yapıların tasarımı, çok kriterli bir optimizasyon sürecidir. Bu ilkeler, yeşil bina sertifika sistemleri tarafından da kullanılan ana kategoriler etrafında şekillenmektedir (Ding, 2008, s. 452-455)

2.5.1.1 Sürdürülebilir Arazi Kullanımı ve Ekoloji

Binanın sadece kendi sınırları içindeki performansına değil, ekosistem üzerindeki etkisine odaklanır. Tarım arazileri yerine, dönüştürülen alanların kullanımı teşvik edilir. Özellikle kentsel ısı adası (UHI) etkisinin azaltılması için yansıtıcılığı yüksek yüzeyler veya yeşil çatılar kullanılması kritiktir (Berardi, 2015). Ayrıca, Düşük Etkili Kalkınma (LID) stratejileriyle yağmur suyunun yerinde yönetilmesi hedeflenir.

2.5.1.2 Su Verimliliği

Su kıtlığı tehdidine karşı iki temel strateji uygulanır: (1) Tüketimi azaltmak (verimli armatürler, kurakçıl peyzaj) ve (2) Alternatif su kaynaklarını (yağmur suyu hasadı, gri su geri kazanımı) kullanmak.

2.5.1.3 Enerji ve Atmosfer

Amaç, önce pasif tasarım ile enerji talebini düşürmek, ardından kalan ihtiyacı verimli sistemlerle karşılamaktır. Pasif Stratejiler; doğru yönlendirme, yüksek yalıtım, doğal havalandırma ve termal kütle kullanımıdır. Yeşil çatılar, sağladıkları yalıtım ve evaporatif serinletme ile bu stratejinin önemli bir parçasıdır (Esin & Yüksek, 2009). Aktif Stratejiler ise verimli HVAC sistemleri, otomasyon ve fotovoltaik paneller gibi yenilenebilir enerji üretimini içermektedir.

2.5.1.4 Malzeme ve Kaynaklar

Malzeme seçiminde “Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi” (LCA) esastır. Bu analiz, malzemenin hammaddeden bertarafa kadar olan (beşikten mezara) çevresel etkisini ölçer (Ortiz vd., 2009). Yerel, geri dönüştürülmüş ve düşük gömülü enerjili malzemeler tercih edilmektedir.

2.5.1.5 İç Mekân Çevre Kalitesi (IEQ)

Kullanıcıların sağlığı ve verimliliği için iç mekân hava kalitesi, termal konfor, görsel konfor (gün ışığı) ve akustik konforun sağlanması olarak yorumlanmaktadır.

2.5.2 Yeşil Bina Değerlendirme ve Sertifika Sistemleri

Sürdürülebilir yapıların performansını ölçmek ve doğrulamak amacıyla uluslararası sertifika sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler, binaları belirli kriterlere göre puanlayarak derecelendirir. Aşağıda Tablo 2.3'te Başlıca Yeşil Bina Sertifika Sistemlerinin Karşılaştırılması incelenmiştir.

Tablo 2.3 Başlıca Yeşil Bina Sertifika Sistemlerinin Karşılaştırılması

Sertifika Sistemi	Menşei	Odak ve Metodoloji	Tezle İlişkisi
LEED	ABD	Pazar odaklı ve puan bazlıdır. Enerji verimliliği ve malzeme kategorileri baskındır.	Yeşil çatılar; Sürdürülebilir Araziler ve Su Verimliliği kredilerinde yüksek puan kazandırır.
BREEAM	İngiltere	Dünyanın ilk sistemidir. Yönetim süreçlerine, ekolojiye ve kirliliğe daha fazla vurgu yapar.	Ekoloji ve arazi kullanımı kriterleri daha katıdır.
DGNB	Almanya	Sürdürülebilirliğin üç boyutunu eşit değerlendirir. LCC (Yaşam Döngüsü Maliyeti) analizini zorunlu tutar.	Tezin "Değer Mühendisliği" boyutu için en uygun referans sistemdir.
B.E.S.T.	Türkiye	ÇEDBİK tarafından geliştirilen, Türkiye'nin iklim ve yönetmeliklerine (BEP) uyarlanmış yerel sistemdir.	Yerel malzeme ve su yönetimi konularında Türkiye gerçeklerini yansıtır.

2.5.3 Türkiye'de Sürdürülebilir Yapılar ve Yeşil Çatılara Geçiş

Türkiye'de sürdürülebilir yapı süreci, özellikle 2009 tarihli "Binalarda Enerji Performansı (BEP)" Yönetmeliği ile yasal bir zemine oturmuştur. 2025 itibarıyla "Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar" standardına geçiş hedeflenmektedir (Şenel,

2010). Büyük metropollerde LEED ve BREEAM sertifikalı projelerin sayısı artsa da sektördeki asıl dinamik kentsel dönüşümdür. Ancak mevcut dönüşüm projeleri genellikle yoğunluk artışına odaklanmakta, çevresel fırsatlar yeterince değerlendirilememektedir (Topçu, 2020).

Sonuç olarak; enerji tasarrufu, su koruma ve sağlıklı iç mekanlar sunan entegre sistemler olarak tanımlanan sürdürülebilir yapılar içerisinde; bu tezin ana odağını oluşturan yeşil çatılar, bahsi geçen sürdürülebilirlik ilkelerinin birçoğunu tek bir sistemde birleştiren çok fonksiyonlu ve stratejik bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Yeşil çatılar; kentsel ısı adası etkisini azaltarak ve biyoçeşitliliği destekleyerek sürdürülebilir arazi kullanımına katkı sunarken, yağmur suyunu yerinde tutma kapasitesiyle şebeke yükünü hafifleterek su verimliliğini artırmaktadır. Buna ek olarak, sağladıkları yüksek yalıtım değeri sayesinde binaların ısıtma ve soğutma enerji yüklerini düşürmekte ve akustik yalıtım özelliğiyle iç mekân çevre kalitesini iyileştirmektedir. Sürdürülebilirliğin çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlarına aynı anda hitap eden bu sistemler, takip eden bölümde türleri, teknik bileşenleri ve uygulama detaylarıyla kapsamlı bir şekilde ele alınacaktır.

3
YEŞİL ÇATILAR

Sürdürülebilir yapılaşma hedefleri doğrultusunda, binaların "beşinci cephesi" olarak nitelendirilen çatılar; kullanışsız yüzeyler olmaktan çıkarılıp yaşayan ekosistemlere dönüşebilmektedir. Yeşil çatılar, bu dönüşümün merkezinde yer alan ve kentsel ölçekte çevresel, ekonomik ve sosyal faydalar sağlayan en etkili doğa tabanlı çözümler ve yeşil altyapı bileşenlerinden biri olma özelliğini taşımaktadır.

Bu bölümde, yeşil çatı sistemlerinin kavramsal, tarihsel ve teknik boyutları incelenecektir. Bölüm içeriğinde sırasıyla; sistemin tanımı ve tarihsel evrimi ele alınacak, farklı uygulama tiplerine göre sınıflandırması yapılacak ve sağladığı çok boyutlu faydalar analiz edilecektir. Son olarak, sistemi oluşturan teknik katmanlar ve malzeme alternatifleri detaylandırılarak, çalışmanın ilerleyen aşamalarında uygulanacak olan Değer Mühendisliği analizi için gerekli olan teknik altyapı oluşturulacaktır.

3.1 Yeşil Çatıların Tanımı

En kapsamlı akademik tanımıyla yeşil çatılar, bir binanın mevcut çatı yüzeyinin tamamının veya belirli bir bölümünün, su yalıtımı üzerine yerleştirilen, birbirleriyle bütünleşik çalışacak şekilde tasarlanmış olan özel mühendislik katmanları aracılığıyla canlı bir bitki örtüsü ile kaplanması esasına dayanan sürdürülebilir bir yapı sistemidir (Oberndorfer vd., 2007, s. 823).

Literatürde "vejetatif çatılar", "ekolojik çatılar" veya Almanca teknik terminolojik ifadesiyle "Gründach"" olarak da anılan bu sistemler; saksılar veya bağımsız bitki kapları kullanılarak oluşturulan geleneksel "çatı bahçesi" kavramından yapısal ve fonksiyonel olarak kesin çizgilerle ayrılmaktadır (Magill vd., 2011, s. 228). Snodgrass ve Snodgrass (2006, s. 15) bu ayrımı netleştirerek; çatı bahçelerinin

genellikle bina strüktüründen bağımsız, taşınabilir ve insan odaklı estetik-rekreasyonel alanlar olduğunu; modern yeşil çatıların ise binanın ayrılmaz bir yapı bileşeni olarak tasarlandığını, yapı kabuğu ile bütünleştiğini ve estetikten öte ekolojik performans hedeflerine hizmet ettiğini belirtmektedir. Bu bağlamda yeşil çatılar, kentleşmenin yarattığı geçirimsiz yüzeylerin neden olduğu çevresel sorunlara karşı geliştirilen "Doğa Tabanlı Çözümler" ve "Yeşil Altyapı" stratejilerinin en kritik uygulama araçlarından biri olarak kabul edilmektedir (Benedict & McMahon, 2006, s. 12).

Sistemin sahip olduğu çok disiplinli yapı, yeşil çatı tanımının mimarlık, ekoloji, mühendislik ve yapı fiziği gibi farklı perspektiflerin katkısıyla zenginleşmesini sağlamaktadır. Mimari perspektiften bakıldığında, Le Corbusier'in modern mimarlığın beş temel ilkesinden biri olarak ortaya koyduğu "çatı bahçeleri" kavramının çağdaş bir yorumu olarak karşımıza çıkan bu sistemler; binanın "beşinci cephesi" olarak nitelendirilen çatı yüzeyini âtıl bir alan olmaktan çıkarmaktadır. Sutton'ın (2014, s. 120) da belirttiği üzere, bu dönüşüm sayesinde çatılar, kentsel peyzajla bütünleşen estetik ve fonksiyonel bir katman haline gelmektedir. Ekolojik açıdan değerlendirildiğinde ise sistem, kent merkezlerindeki yoğun yapılaşma sonucu tahrip edilen doğal dokunun dikey düzlemde ikame edilmesi işlevini üstlenmektedir. Francis ve Lorimer (2011, s. 1432), bu işlevi "uzlaşma ekolojisi" kapsamında ele alarak, yeşil çatıların yaban hayatı ve polinatörler (arılar, kuşlar, kelebekler vb. tozlayıcı hayvanlar) için yeni yaşam alanları oluşturduğunu ve böylece kentsel biyoçeşitliliği artırdığını vurgulamaktadır.

İnşaat mühendisliği ve hidroloji disiplinleri açısından sistem, "Sürdürülebilir Kentsel Drenaj Sistemleri"nin (SUDS) hayati bir parçası olarak konumlanmaktadır. Mentens ve arkadaşlarının (2006, s. 21) yaptığı kapsamlı analizler; yeşil çatıların, geleneksel geçirimsiz yüzeylerin aksine, yağmur suyunu tutma ve şebekeye deşarjını geciktirme yetenekleri sayesinde kentsel sel riskini önemli ölçüde azalttığını kanıtlamaktadır. Son olarak bina kabuğu ve yapı fiziği açısından ele alındığında, yeşil çatılar pasif bir iklimlendirme teknolojisi olarak tanımlanmaktadır. Castleton ve arkadaşları (2010, s. 1586), bitki ve toprak katmanının sağladığı ilave termal kütle ile evapotranspirasyon (terleme-buharlaşma) mekanizmasının, çatı yüzey sıcaklıklarını düşürerek binanın soğutma

yüklerini azalttığını belirtmektedir. Santamouris (2014, s. 684) ise bu etkinin sadece bina ölçeğinde kalmadığını, aynı zamanda kentsel ısı adası (UHI) etkisinin hafifletilmesinde de kritik bir rol oynadığını ifade etmektedir. Türkiye literatüründe de Mansuroğlu (2011, s. 115) ve Tavşan ile Sönmez (2015, s. 45), sistemi benzer şekilde yapısal ve bitkisel katmanların entegrasyonu olarak tanımlarken, sistemin yerel iklim koşullarındaki performansına dikkat çekmektedir.

Bir yeşil çatı sisteminin teknik anatomisi incelendiğinde, bu sistemin rastgele bir toprak yığınının çatıya serilmesinden ibaret olmadığı görülür. Dünya genelinde kabul gören Alman Peyzaj Araştırma, Geliştirme ve İnşaat Topluluğu (FLL, 2018, s. 16) standartlarına göre bir yeşil çatı, her biri belirli bir işlevi yerine getiren standartlaştırılmış katmanların hiyerarşik bir düzenle bir araya gelmesinden oluşur. Sistemin temelinde, binayı su hasarlarına karşı koruyan ve kök dayanımı sağlanmış (veya ayrı bir kök koruma bariyeri ile desteklenmiş) su yalıtım membranı yer almaktadır (Herman, 2003, s. 15). Bu membranın üzerinde, mekanik hasarları önleyen koruyucu şilteler ve sistemdeki fazla suyun tahliyesini sağlarken bitki kökleri için gerekli hava boşluğunu oluşturan drenaj levhaları bulunmaktadır (Vijayaraghavan, 2016, s. 740). Drenaj katmanının üzerini örten filtre geotekstili, ince partiküllerin aşağı sızarak sistemi tıkamasını engeller. Sistemin en üstünde ise bina statiğine aşırı yük bindirmemek amacıyla hafif agregalarla (ponza, perlit vb.) üretilen "bitki taşıyıcı ortam" (substrat) ve seçilen iklim koşullarına uygun vejetasyon yer almaktadır (Ampim vd., 2010, s. 245). Sonuç olarak, Yapı İşletmesi ve bu tezin temelini oluşturan Değer Mühendisliği disiplini açısından yeşil çatı; Bianchini ve Hewage'nin (2012, s. 430) de belirttiği gibi, performansı ölçülebilir ve yaşam döngüsü maliyeti (LCC) optimize edilebilir karmaşık bir yapı sistemi olarak tanımlanmaktadır.

3.2 Yeşil Çatıların Tarihsel Gelişimi

Bitkilendirilmiş çatıların tarihi, estetik ve fonksiyonel ihtiyaçlar doğrultusunda binlerce yıl öncesine dayanıyor olsa da günümüzde kullandığımız teknik standartlara sahip modern sistemlerin gelişimi çok daha yenidir. Bu tarihsel süreç, geleneksel ampirik uygulamalardan modern mühendislik standartlarına doğru kronolojik bir evrimi temsil etmektedir. Modern sistemlerin asıl fonksiyonel ataları

ise İskandinavya (Norveç, İzlanda), Kuzey Avrupa ve Kuzey Amerika'nın bazı bölgelerinde yüzyıllardır kullanılan geleneksel çim çatılar olarak bilinmektedir.

3.2.1 Geleneksel Kökler ve Kavramsal Öncüler

Çatıların bitkilendirilmesine dair bilinen en eski ve en çok dile getirilen örnek, M.Ö. 600 civarında inşa edildiği düşünülen Babil'in asma bahçeleridir. Antik dünya mühendisliğinin bir harikası kabul edilen bu yapı, bitkilerin su geçirmez zift ve kurşun katmanları içeren karmaşık teraslar üzerine yerleştirildiği bir strüktürdü (Osmundson, 1999, s. 17). Ancak bu yapı, modern yeşil çatıların ekolojik ve bütünleşik yapısından ziyade; muazzam bir mühendislik ve sulama sistemi gerektiren, yapı şekli itibariyle karmaşık bir teras bahçeciliği uygulaması olarak kabul edilmektedir. Aşağıda Şekil 3.1'de Babil'in Asma Bahçeleri görseli paylaşılmıştır.



Şekil 3.1 Babil'in Asma Bahçeleri Kaynak: Heemskerck, 2012.

Modern sistemlerin asıl fonksiyonel ataları ise İskandinavya (Norveç, İzlanda), Kuzey Avrupa ve Kuzey Amerika'nın bazı bölgelerinde yüzyıllardır kullanılan geleneksel çim çatılar olarak bilinmektedir. Aşağıda Şekil 3.2'te geleneksel çim çatılar görsel örneği paylaşılmıştır.



Şekil 3.2 Geleneksel Çim Çatılar Kaynak: GZT, t.y.

Bu çatılarda su yalıtımı için temel malzeme olarak genellikle üst üste bindirilmiş huş ağacı kabukları kullanılırken; üzerine koruyucu bir katman olarak yerleştirilen çim blokları veya toprak ise hem mükemmel bir ısı yalıtımı sağlamakta hem de ağaç kabuklarının rüzgârda uçmasını engellemekteydi (Dunnett & Kingsbury, 2008, s. 12). Bu geleneksel uygulamaların temel motivasyonu estetik kaygılar değil; tamamen kışın sıcak, yazın serin tutma gibi fonksiyonel ihtiyaçlar ve yerel malzemelerin verimli kullanımıydı. Bu durum, yeşil çatıların ısı yalıtım faydasının ampirik olarak binlerce yıldır bilindiğini göstermektedir.

20. yüzyılın başlarında modern mimarinin öncüleri de çatıların kullanımı fikrini yeniden ele almıştır. Le Corbusier'nin 1920'lerde geliştirdiği mimarinin beş İlkesinden biri, binanın kapladığı zemini çatıya taşıyan "çatı bahçesi" kavramıydı (Villa Savoye, 1929). Ancak Le Corbusier'nin yaklaşımı, tıpkı Babil örneğinde olduğu gibi ekolojik bir faydadan ziyade; kentsel alanda yaşayan insan için yeni bir rekreasyon alanı yaratmaya odaklanmıştı. Bu erken dönem modern uygulamalar, günümüz yeşil çatılarının drenaj, kök koruma vb. teknik altyapısından yoksun olduğu için sıklıkla ciddi su yalıtım sorunlarına yol açmaktaydı.

3.2.2 Modern Yeşil Çatıların Doğuşu ve Standartlaşması: Almanya Ekolü (1960-1980'ler)

Günümüzde kullandığımız çok katmanlı, teknik, güvenilir ve yüksek performanslı yeşil çatı sistemlerinin doğuşu, standartlaşması ve kitlesel olarak yaygınlaşması 1960'lı ve 1970'li yıllarda Almanya'da gerçekleşmiştir. Bu dönüşüm, tek bir nedene bağlı olmaktan ziyade, çevresel ve ekonomik faktörlerin bir araya gelmesiyle tetiklenmiştir. İkinci Dünya Savaşı sonrası hızla sanayileşen Batı Almanya'da artan "geçirimsiz yüzeyler", Büyümenin Sınırları raporu (Meadows vd., 1972, s. 23) dönemindeki küresel çevre hareketleriyle birleşince yeni arayışları beraberinde getirmiştir. Özellikle kentlerdeki geçirimsiz yüzeylerin artması sonucu ani yağışlarda kanalizasyon sistemlerinin yetersiz kalması ve sellerin oluşması, yağmur suyu yönetimi krizini doğurmuştur. Altyapıyı büyütmenin yüksek maliyeti karşısında yeşil çatılar; yağmur suyunu tutma ve yavaşça salma kabiliyetleri sayesinde, altyapı yükünü hafifleten merkezi olmayan bir mühendislik çözümü olarak benimsenmiştir (Peck & Kuhn, 2003, s. 4). Buna ek olarak, 1970'lerdeki petrol krizleri enerji maliyetlerini artırarak yalıtımı stratejik bir öncelik haline getirirken; Alman planlama yasalarındaki "ekolojik tazminat" ilkesi de kaybedilen yeşil alanların çatılarda telafi edilmesini yasal bir zorunluluğa dönüştürmüştür (Köhler, 2006, s. 381).

Bu ihtiyaçlar doğrultusunda geliştirilen FLL Yönergeleri (Peyzaj Geliştirme ve Peyzaj İnşaatı Araştırma Topluluğu), yeşil çatıları basit bir bahçecilik faaliyeti olmaktan çıkarıp güvenilir bir inşaat bileşeni haline getirmiştir. FLL standartları ile; su yalıtımını bitki köklerinden koruyan "Kök Dayanımı Testi" zorunlu kılınmış, ağır bahçe toprağı yerine hafif ve drenaj kabiliyeti yüksek volkanik kökenli "Mühendislik Substratları" tanımlanmış ve sistem katmanlarının asgari performans kriterleri belirlenmiştir. Bu teknik standartlaşma, sektör paydaşlarının ve sigorta şirketlerinin sisteme güven duymasını sağlayarak yeşil çatıları riskli bir deney olmaktan çıkarıp, performansı garantili bir mühendislik sistemine dönüştürmüştür (Getter & Rowe, 2006, s. 1279).

3.2.3 Küresel Yaygınlaşma (1990'lar ve Sonrası)

Almanya'da geliştirilen ve “de facto” küresel standart haline gelen FLL normları, modern yeşil çatı endüstrisinin dünyaya yayılmasının temelini oluşturmuştur. Avrupa'da İsviçre ve Avusturya, 1990'larda bu modeli ilk benimseyen ülkeler olmuş; özellikle İsviçre'nin Basel kenti, yeşil çatıları doğrudan biyoçeşitlilik aracı olarak kullanarak yeni binalarda zorunlu hale getirmiştir. Kuzey Amerika'da (ABD ve Kanada) ise 2000'li yıllarda LEED sertifikasyon sisteminin etkisiyle büyük bir ivme kazanılmıştır. LEED'in “Yağmur Suyu Yönetimi” ve “Isı Adası Etkisi” kategorilerinde sağladığı puanlar, yeşil çatıları prestijli projeler için stratejik bir gereklilik haline getirmiştir (Oberndorfer vd., 2007, s. 825). Chicago, Portland ve Toronto gibi şehirler, bu dönüşüme yasal zorunluluklar ve teşviklerle öncülük etmiştir. Asya-Pasifik bölgesinde (Singapur, Japonya) ise yoğun nüfus ve kısıtlı alan nedeniyle sistemler, öncelikle kentsel ısı adasıyla mücadele ve kaybedilen yeşil alanın telafisi amacıyla benimsenmiştir. Tablo 3.1’te Yeşil Çatıların Tarihsel Gelişim Süreci ve Dönüm Noktaları incelenmiştir.

Tablo 3.1 Yeşil Çatıların Tarihsel Gelişim Süreci ve Dönüm Noktaları.

Dönem	**Odak Noktası**	**Temel Özellikler / Örnekler**
Antik Dönem	Prestij ve Estetik	Babil'in Asma Bahçeleri (Karmaşık teras bahçeciliği).
Geleneksel Dönem	Isı Yalıtımı ve Fonksiyonellik	İskandinav “Çim Çatılar” (Huş ağacı kabuğu + Çim blokları).
Erken Modern (1920'ler)	Rekreasyon ve Mimari Dil	Le Corbusier'in “Çatı Bahçesi” ilkesi (Villa Savoye). Teknik altyapı yetersiz.
Modern Dönem (1970-80'ler)	Ekoloji, Standartlaşma, Yağmur Suyu	Almanya (FLL Standartları). Kök dayanımı, hafif substratlar, sistem garantisi.
Küresel Yaygınlaşma (2000+)	Sertifikasyon (LEED/BREEAM), Biyoçeşitlilik	Kuzey Amerika, Asya. Yasal zorunluluklar ve teşvikler (Toronto, Singapur).

3.3 Yeşil Çatı Sistemlerinin Sınıflandırılması

Yeşil çatı sistemleri, monolitik ve tek tip bir uygulama olmaktan ziyade; bina tipolojisi, strüktürel taşıma kapasitesi, iklim koşulları, bütçe kısıtları ve hedeflenen ekolojik koruma, rekreasyon, su yönetimi vb. fonksiyonel faydalar doğrultusunda çeşitlilik gösteren esnek çözümlerdir. Bu sistemlerin doğru sınıflandırılması; projenin hedeflerine uygun seçimin yapılması, maliyetlerin gerçekçi analiz edilmesi ve Değer Mühendisliği sürecinin etkin yürütülebilmesi adına temel bir gerekliliktir. Literatürde çeşitli sınıflandırma kriterleri bulunsa da en yaygın ve küresel ölçekte kabul gören yaklaşım; sistemin katman derinliğine, ağırlığına, bitki tipine ve bakım gereksinimine odaklanan Alman FLL standartlarıdır (Getter & Rowe, 2006, s. 1278). Bu standartlar, yeşil çatıları temel olarak Ekstensif (sığ katmanlı) ve İntensif (derin katmanlı) olmak üzere iki ana kategoriye ayırırken; bu iki uç arasında yer alan Yarı-İntensif sistemler de ara bir çözüm olarak uygulanmaktadır (Dunnett & Kingsbury, 2008, s. 20). Ayrıca Yapı İşletmesi perspektifinden, sistemin şantiyedeki kurulum yöntemine göre yapılan Yerinde Serilme ve Modüler ayrımı da maliyet ve süre analizleri açısından kritik önem taşımaktadır.

3.3.1 Ekstensif (Sığ Katmanlı) Yeşil Çatılar

Genellikle "ekolojik koruma örtüsü" olarak tanımlanan ekstensif yeşil çatılar; erişilebilir bir rekreasyon alanı yaratmaktan ziyade, yağmur suyu yönetimi, kentsel ısı adası etkisinin azaltılması ve biyoçeşitlilik gibi çevresel faydaları maksimize etmeyi amaçlar (Peck & Kuhn, 2003, s. 30). İsimlerindeki "ekstensif" (yaygın) ifadesi, sistemin geniş alanlara yayılabilme potansiyeline, düşük bakım gereksinimine ve kendi kendine yetebilme kabiliyetine atıfta bulunmaktadır.

Teknik açıdan bu sistemlerin en belirleyici özelliği, genellikle 6 cm ile 20 cm arasında değişen sığ substrat derinliğidir. Bu sığ yapı, sistemin suya doymuş haldeki ağırlığının 60 kg/m² ile 150 kg/m² gibi düşük seviyelerde kalmasını sağlar (FLL, 2018). Düşük ağırlık, ekstensif sistemlerin en büyük avantajıdır; zira bu sayede mevcut binaların güçlendirme gerektirmeden yenilenmesinde veya hafif çelik/ahşap çatılarda güvenle kullanılabilirler. Ancak sığ substrat derinliği, bitki seçimini sınırlar. Bu sistemlerde ağırlıklı olarak kuraklığa dayanıklı, sığ köklü ve

minimum bakım gerektiren Sedum (damkoruğu) türleri, yosunlar ve dayanıklı otlar tercih edilir (Dunnett & Kingsbury, 2008, s. 145).

Maliyet ve işletme profili açısından incelendiğinde, ekstensif sistemler en ekonomik seçenektir. Daha az malzeme kullanımı ve düşük strüktürel yük, ilk yatırım maliyetini düşürürken; yılda sadece bir-iki kez yapılan bakım ve kurulum aşaması haricinde kalıcı sulama gerektirmemesi, Yaşam Döngüsü Maliyetini (LCC) optimize eder (Esin & Yüksek, 2009, s. 183). Aşağıda Şekil 3.3'te Ektensif Yeşil Çatı görseli paylaşılmıştır.



Şekil 3.3 Ekstensif Yeşil Çatı Kaynak: Akpınar Külekçi, E., 2017

3.3.2 İntensif (Derin Katmanlı) Yeşil Çatılar

İntensif yeşil çatılar, geleneksel zemin seviyesindeki parklara veya bahçelere benzer, kullanıcıların üzerinde dolaşabildiği aktif peyzaj alanları yaratmayı hedefler. "İntensif" (yoğun) terimi hem tasarım olanaklarının zenginliğine hem de gerektirdikleri yüksek bakım, enerji ve strüktürel yük yoğunluğuna işaret eder (Mansuroğlu, 2011, s. 121).

Bu sistemler, 20 cm'den başlayıp ağaç dikimi için 1 metreye kadar ulaşabilen derin bir toprak profili gerektirir. Derin substrat ve barındırdığı bitki yükü, sistemin ağırlığını 180 kg/m²'den 1000 kg/m² seviyelerine kadar çıkarabilir (FLL, 2018). Yapı İşletmesi açısından bu durum, sistemin mevcut binalara sonradan eklenmesini

neredeyse imkânsız kılar; projenin en başından itibaren binanın statik sisteminin bu yüklere göre tasarlanması zorunludur. Ancak bu teknik zorluk, tasarımcılara çim alanlardan çalılara ve büyük ağaçlara kadar geniş bir bitki çeşitliliği sunma imkânı verir. İntensif sistemler, düzenli sulama, gübreleme ve budama gerektiren yüksek maliyetli yatırımlardır; ancak mülke kattıkları estetik değer ve rekreasyon fonksiyonu ile gayrimenkul değerini artırarak farklı bir ekonomik getiri sağlarlar (Berardi, 2015, s. 28). Aşağıda Şekil 3.4'te İntensif Yeşil Çatı görseli paylaşılmıştır.



Şekil 3.4 İntensif Yeşil Çatı Kaynak: Net Yapı, t.y.

3.3.3 Yarı-İntensif (Karma) Sistemler

İki ana kategori arasında bir köprü görevi gören yarı-intensif sistemler, genellikle 15-25 cm substrat derinliğine sahiptir. Ekstensif sistemlerden daha zengin bir bitki çeşitliliğine olanak tanırken, intensif sistemler kadar ağır ve bakımı yoğun değildirler. Genellikle periyodik sulama ile desteklenen bu sistemler, estetik görünümün ekolojik faydalar kadar önemsendiği ancak tam bir çatı bahçesi bütçesinin veya statiğinin sağlanamadığı projelerde tercih edilmektedir.

3.3.4 Yapım Yöntemine Göre Sınıflandırma

Yeşil çatıların sınıflandırılmasında kullanılan bir diğer kritik kriter, sistemin şantiyedeki kurulum yöntemidir. Bu ayrım, Yerinde Serilme ve Modüler sistemler olarak ikiye ayrılır.

Geleneksel yöntem olan Yerinde Serilme Sistemler, katmanların (kök koruma, drenaj, filtre, substrat) şantiye sahasında çatı yüzeyine sırayla serilmesi prensibine dayanır. Bu yöntem, her türlü çatı formuna ve detayına uyum sağlayan yüksek bir tasarım esnekliği sunar ve genellikle malzeme maliyeti daha düşüktür. Ancak uygulama süreci işçilik yoğundur, hava koşullarına bağımlıdır ve şantiye ortamında kalite kontrolü daha zordur.

Buna karşılık Modüler Sistemler, fabrika ortamında önceden hazırlanmış, içeresinde drenaj, substrat ve bitkiyi barındıran kasetlerin şantiyede yan yana dizilerek kilitlenmesiyle oluşturulur. Bu yöntem, anında yeşil bir görünüm sağlar, montajı çok hızlıdır ve fabrika üretimi sayesinde kalite standardı yüksektir. Ayrıca sızıntı durumunda modüllerin kaldırılıp onarım yapılması kolaydır. Ancak modüler sistemlerin ilk yatırım maliyeti genellikle daha yüksektir ve modüller arasındaki derz çizgileri monolitik görünümü bölebilir.

Bu sınıflandırmaların anlaşılması, tezin ilerleyen bölümlerindeki Değer Mühendisliği analizi için hayati önem taşmaktadır. Örneğin; minimum maliyetle maksimum ekoloji hedefleyen bir senaryoda ekstensif-yerinde serilme sistem öne çıkarken; hız ve düşük risk odaklı bir senaryoda modüler sistemlerin maliyet farkına değip değmeyeceği analiz edilecektir.

3.4 Yeşil Çatı Sistemlerinin Faydaları

Daha önceki bölümlerde teknik sınırları çizilen yeşil çatılar, sadece estetik bir mimari tercih olmanın çok ötesinde sürdürülebilirlik hedeflerine doğrudan katkı sağlayan çok fonksiyonlu mühendislik sistemleridir. Bu sistemlerin sağladığı faydalar tek bir alanda yoğunlaşmaz; aksine çevresel, ekonomik ve sosyal kazanımların birbirini desteklediği bütünleşik bir yapı sergiler (Getter & Rowe, 2006, s. 1279). Literatürde çoklu fayda sağlamak olarak tanımlanan bu özellik, yeşil

çatıları kentsel alanlardaki en etkili doğa tabanlı çözümlerden biri yapmaktadır. Bu faydaların kategorik olarak anlaşılması, tezin ilerleyen bölümlerinde gerçekleştirilecek Değer Mühendisliği analizi için hayati önem taşır. Çünkü "değer" kavramı, sadece maliyetin (payda) düşürülmesiyle değil, aynı zamanda sağlanan fonksiyon ve performansın (pay) artırılmasıyla optimize edilmektedir. Bir yeşil çatı sisteminin değeri, onun sağladığı enerji tasarrufu, çatı ömrünü uzatması veya yağmur suyu yönetimi kapasitesi gibi somut çıktılarla doğrudan ilişkilidir.

3.4.1 Çevresel (Ekolojik) Faydalar

Çevresel faydalar, yeşil çatıların benimsenmesindeki birincil ve en yaygın araştırılan motivasyon kaynağıdır. Bu faydalar hem binanın kendi mikro çevresinde hem de kentsel ölçekte belirgin etkiler yaratmaktadır.

Kentsel alanlardaki en kritik sorunlardan biri olan Yağmur Suyu Yönetimi konusunda yeşil çatılar, merkezi olmayan ve etkin bir çözüm sunar. Beton ve asfalt gibi geçirimsiz yüzeylerin neden olduğu ani yüzeysel akış kanalizasyon sistemlerini zorlayarak kentsel sellere yol açmaktadır (Peck & Kuhn, 2003, s. 25). Yeşil çatılar ise bitki taşıyıcı ortam ve drenaj katmanları sayesinde bir sünger gibi çalışarak yağmur suyunu ilk düştüğü anda yakalar. Suyun bir kısmı bitkilerin kullanımı için depolanırken, kalan kısmı çok daha yavaş bir hızda şebekeye deşarj edilir (Berndtsson, 2010, s. 1278). Araştırmalar, ekstensif bir sistemin yıllık yağışın %50 ila %90'ını tutabildiğini ve ani sağanaklarda zirve akış yükünü %75'e varan oranlarda azalttığını göstermektedir (Getter, Rowe, & Andresen, 2007, s. 1280).

Bir diğer kritik çevresel katkı, Kentsel Isı Adası (UHI) Etkisinin Azaltılmasıdır. Şehir merkezlerinin kırsal alanlara göre daha sıcak olması durumu (Oke, 1982), enerji tüketimini ve hava kirliliğini artırmaktadır. Yeşil çatılar bu soruna iki mekanizma ile yanıt verir: Bitki örtüsünün sağladığı gölgeleme ve yansıtıcılık etkisi ile terleme-buharlaşma süreci. Evapotranspirasyon, ortamdan ısı çeken endotermik bir reaksiyon olarak doğal bir klima etkisi yaratır ve hem çatı yüzeyinin hem de ortam havasının sıcaklığını düşürmesine olanak sağlar (Saadatian vd., 2013, s. 157; Berardi, 2015, s. 26).

Bina ölçeğinde ise Enerji Verimliliği ön plana çıkar. Yeşil çatılar, bina kabuğunun pasif bir yalıtım katmanı olarak çalışır. Kışın ısı kaybını azaltırken, yazın

evapotranspirasyon ve termal kütle etkisiyle ısı kazancını engeller. Bu durum, özellikle az katlı binalarda soğutma enerjisi tüketimini %25 ila %75 arasında azaltarak doğrudan karbon ayak izini düşürür (Esin & Yüksek, 2009, s. 183). Ayrıca sistem, Biyoçeşitlilik açısından kent içinde "ekolojik basamak taşları" oluşturarak polinatörler ve kuşlar için yeni habitatlar sağlar (Oberndorfer vd., 2007, s. 826). Havadaki partikül maddeleri ve yağmur suyundaki ağır metalleri filtreleyerek hava ve su kalitesini iyileştirmesi de (Getter & Rowe, 2006, s. 1281) önemli bir ekolojik katkıdır.

3.4.2 Ekonomik Faydalar

Yeşil çatıların ilk yatırım maliyeti geleneksel sistemlere göre yüksek olsa da Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC) analizinde sağladıkları uzun vadeli tasarruflar sistemi daha ekonomik hale getirmektedir.

Bu bağlamda en önemli ancak en az bilinen fayda, çatı su yalıtım membranının ömrünün uzamasıdır. Geleneksel çatılarda membranlar UV radyasyonu, aşırı sıcaklık farkları ve fiziksel hasarlara açık haldedir. Yeşil çatı katmanları ise membranı neredeyse bir zırh gibi koruyarak bu etkileri yok etmektedir (Peck & Kuhn, 2003, s. 39). Bu koruma, geleneksel bir çatıda 15-20 yıl olan membran ömrünü 40-60 yıla çıkarabilmektedir (Getter & Rowe, 2006, s. 1281). Çatı yenileme maliyetlerinin yüksekliği düşünüldüğünde, bu durum muazzam bir LCC tasarrufu anlamına gelir.

Buna ek olarak, enerji tasarrufu doğrudan işletme bütçesine yansır; ısıtma ve soğutma faturalarındaki düşüş, sistemin geri ödeme süresini kısaltan somut bir veri olarak karşımıza çıkmaktadır (Saadatian vd., 2013, s. 161). Makro ölçekte ise yağmur suyu yönetimi sayesinde belediyelerin altyapı maliyetleri azalır ve bazı ülkelerde bina sahiplerine vergi indirimleri sağlanır (Berndtsson, 2010, s. 1283). Ayrıca, binaya kattığı estetik ve fonksiyonel değer, mülk değerini artırmakta ve yapıyı kolay kiralanabilir hale getirmektedir (Berardi, 2015, s. 29).

3.4.3 Sosyal Faydalar

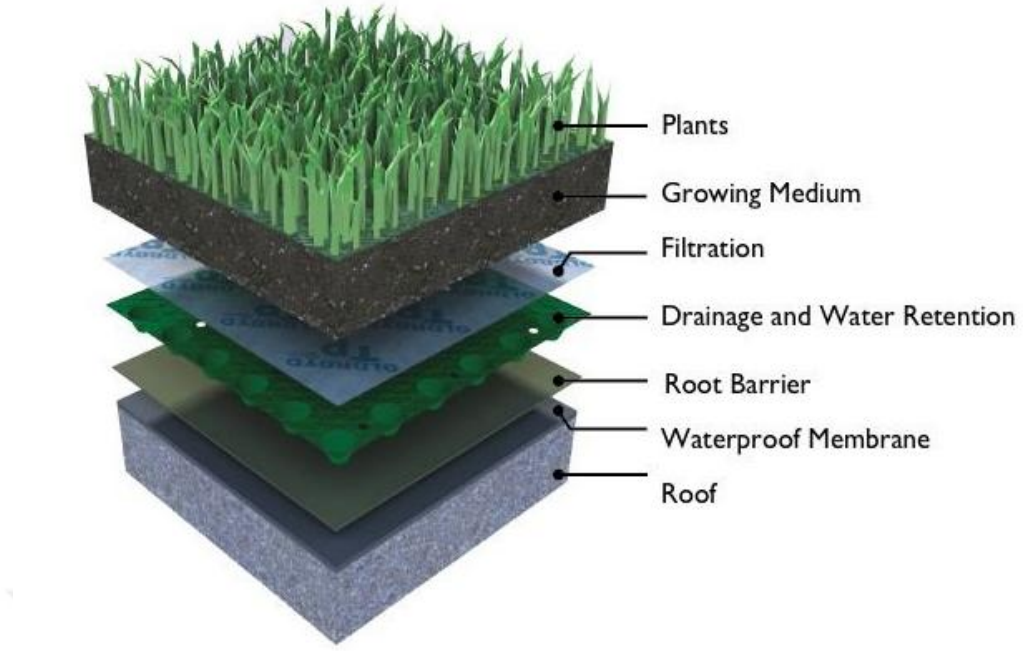
Parasal olarak ölçülmesi zor olsa da toplumun yaşam kalitesi üzerindeki etkileri yadsınamaz olan sosyal faydalar, yeşil çatıların üçüncü boyutunu oluşturmaktadır.

Özellikle intensif sistemler, kent sakinleri için rekreasyonel alanlar sunarak sosyal etkileşimi artırır. Ekstensif çatılar ise erişilebilir olmasalar bile, "beşinci cephe" estetiği ile kentsel görüntü kirliliğini azaltmaktadır (Osmundson, 1999, s. 132). Bilimsel çalışmalar, yeşille temasın stresi azalttığını ve İnsan Sağlığı ile Refahını pozitif yönde etkilediğini kanıtlamaktadır (Ulrich, 1984; Kaplan & Kaplan, 1989). Fiziksel konfor açısından ise sistem, sesi sönümleyerek hem iç mekân akustik konforunu artırmakta hem de kentsel gürültü kirliliğini azaltmaktadır (Esin & Yüksek, 2009, s. 183). Son olarak yeşil çatılar, kentsel tarım uygulamaları ile yerel gıda üretimine olanak sağlayarak topluluk bilincini ve gıda güvenliğini desteklemektedir.

3.5 Yeşil Çatı Sistemi Katmanları ve Malzemeleri

Yeşil çatıların, önceki bölümde sıralanan çevresel, ekonomik ve sosyal faydaları sağlayabilmesi, estetik bir unsur olmaktan çıkıp uzun ömürlü bir mühendislik sistemine dönüşebilmesi, onu oluşturan katmanların doğru tasarlanmasına ve bu katmanlarda doğru malzemelerin tercih edilmesine bağlıdır. Bir yeşil çatı, tek bir ürün değil; her biri belirli bir fonksiyonu yerine getirmek üzere tasarlanmış, birbiriyle entegre çalışan çok katmanlı bir sistem bütünüdür. Bu katmanlardan herhangi birindeki bir hata (örneğin yanlış filtre seçimi nedeniyle drenajın tıkanması) veya bir malzemenin fonksiyonunu yitirmesi (örneğin su yalıtımının kökler tarafından delinmesi), tüm sistemin başarısız olmasına ve geri dönülmesi zor, yüksek maliyetli tamiratlara yol açabilir (Peck & Kuhn, 2003, s. 46).

Bu nedenle, modern bir yeşil çatı sistemini oluşturan katmanlar; binanın taşıyıcı strüktüründen başlayarak bitki örtüsüne kadar, aşağıdan yukarıya doğru bir hiyerarşi içinde incelenmelidir. Aşağıdaki analizler, modern yeşil çatı endüstrisinin teknik temelini oluşturan Alman FLL Yönergeleri (FLL, 2018) ve uluslararası ASTM standartları referans alınarak hazırlanmıştır (Getter & Rowe, 2006, s. 1279). Aşağıda Şekil 3.5'da Yeşil Çatı Katmanları görseli paylaşılmıştır.



Şekil 3.5 Yeşil Çatı Katmanları Kaynak: Yeşil Gazete, t.y.

3.5.1 Yapısal Çatı Döşemesi (Strüktür)

Yeşil çatı sisteminin bileşenleri arasında teknik olarak bir katman gibi görünmese de sistemin üzerine inşa edildiği temel zemin olması ve projenin uygulanabilirliğini belirleyen birincil kısıt olması nedeniyle Yapısal Çatı Döşemesi, tasarım sürecinin başlangıç noktasını oluşturmaktadır. Bu bileşenin temel fonksiyonu; sadece bitki, substrat ve drenaj katmanlarından oluşan sabit yükleri (ölü yük) değil; aynı zamanda sistem suya tam doygun hale geldiğinde oluşan maksimum ağırlığı, kar ve rüzgâr gibi çevresel yükleri ve bakım sırasında oluşacak insan veya ekipman ağırlıklarını (hareketli yükler) güvenle karşılamaktır. Strüktür, bu karmaşık yük kombinasyonlarını sönümleyerek binanın dikey taşıyıcı elemanlarına (kolonlar, perdeler) ve oradan temellere güvenli bir şekilde aktarmakla yükümlüdür (Osmundson, 1999, s. 145).

Mühendislik açısından en kritik performans kriteri, döşemenin yük taşıma kapasitesidir. Bu kapasite, binada hangi tip yeşil çatının uygulanabileceğini (veya uygulanamayacağını) dikte eden en belirleyici faktördür.

Ekstensif Sistemler genellikle hafif yapıya sahip oldukları için mevcut binaların yenilenmesinde veya taşıyıcı sistemi narin (hafif çelik veya ahşap) çatılarda tercih

edilirler. FLL (2018, s. 22) standartlarına göre, ekstensif bir sistemin suya doymuş haldeki ağırlığı genellikle 60 kg/m² ile 150 kg/m² arasında değişmektedir. Bu değer, geleneksel bir çakıl balastlı çatının yüküne eşdeğer olduğu için statik açıdan genellikle ek bir güçlendirme gerektirmez.

İntensif Sistemler ise çok daha derin toprak profili ve büyük bitkiler barındırdığı için, betonarme döşemelerin daha kalın ve donatı oranlarının daha yüksek olmasını gerektirir. Mansuroğlu'nun (2011, s. 121) belirttiği üzere, intensif sistemlerin yükleri 180 kg/m² seviyelerinden başlar; ağaçların, sert zeminlerin (yürüyüş yolları) ve su ögelerinin eklenmesiyle 500 kg/m² veya çok daha yüksek değerlere ulaşabilir.

Bu bağlamda, yeni binalar ile mevcut binalar arasında keskin bir ayrım yapmak gerekmektedir. Yeni tasarlanan binalarda, hedeflenen yeşil çatı tipine uygun yükler statik hesaplara en baştan dahil edilerek döşeme optimize edilebilir. Ancak mevcut binalarda, binanın orijinal statik projesi incelenmeli ve strüktürün bu ek doygun yükü taşıyıp taşıyamayacağı mutlaka uzman bir inşaat mühendisi tarafından analiz edilmelidir. Yapısal kapasitenin yetersiz olduğu durumlarda, ya sistem daha hafif bir ekstensif çatıya dönüştürülmeli ya da yapısal güçlendirme maliyetleri de bütçeye dahil edilmelidir.

3.5.2 Su Yalıtım Membranı

Tüm yeşil çatı sisteminin en stratejik ve kritik bileşeni olan su yalıtım katmanı, binayı su sızıntılarına karşı mutlak surette ve uzun vadeli olarak korumakla yükümlüdür. Bir yeşil çatı sistemi peyzaj açısından ne kadar başarılı tasarlanırsa tasarlansın; su yalıtım katmanının işlevini yitirmesi, üzerindeki tonlarca ağırlığındaki bitki ve toprak katmanının kaldırılmasını gerektirecek, dolayısıyla sistemin tamamen sökülmesine yol açacak tolere edilemez bir risktir (Peck & Kuhn, 2003, s. 47). Bu nedenle bu katman, yeşil çatı sisteminin sigortası olarak nitelendirilmektedir.

Bu katmanın sağlaması gereken performans kriterleri, geleneksel çatılardan çok daha zorludur. Aşağıda bu performans kriterlerine yer verilmiştir.

3.5.2.1 Mutlak Sızdırmazlık

Özellikle parapet dönüşleri, süzgeç detayları ve membran bindirme noktalarında tam bir bütünlük sağlanmalıdır.

3.5.2.2 Mekanik ve Fiziksel Dayanım

Membran; üzerine serilecek drenaj ve toprak katmanlarının yarattığı statik basınca, inşaat sırasındaki yaya/ekipman trafiğinin yaratacağı delinme riskine ve binanın çalışmasından kaynaklanan termal şoklara karşı yüksek esneklik ve mukavemet göstermelidir.

3.5.2.3 Kök Dayanımı

Bu, yeşil çatılar için en hayati ve ayırt edici kriterdir. Membran, agresif bitki köklerinin malzemeyi delmesine veya ek yerlerinden sızmasına karşı mutlak dirence sahip olmalıdır. Bu dayanıklılık, sadece üretici beyanıyla değil; uluslararası kabul görmüş FLL Yönergeleri (Almanya) veya TS EN 13948 standardına göre laboratuvar ortamında (genellikle 2-4 yıllık testler sonucunda) kanıtlanmış ve sertifikalandırılmış olmalıdır (FLL, 2018, s. 29).

Malzeme teknolojileri açısından incelendiğinde, sektörde kullanılan temel alternatifler şunlardır:

3.5.2.4 Bitümlü Membranlar

İnşaat sektöründe en yaygın kullanılan, polimer modifiyeli (APP veya SBS katkılı) ve polyester keçe taşıyıcılı örtülerdir. Genellikle çift kat (3mm + 4mm) uygulanarak sağlam bir kalınlık oluştururlar. Ancak, standart bitümlü membranlar organik yapıları gereği bitki kökleri tarafından kolayca delinebilir. Bu nedenle yeşil çatılarda, mutlaka üretim aşamasında harcına kök itici kimyasallar katılmış “Anti-Root” serisi bitümlü membranlar kullanılmalıdır (Herman, 2003, s. 16). Ayrıca bitümlü sistemlerde sızdırmazlık, tamamen işçilik kalitesine bağlıdır.

3.5.2.5 Sentetik Membranlar (Termoplastikler- PVC ve TPO)

Modern yeşil çatı uygulamalarında giderek daha fazla tercih edilen membranlardır. Türleri aşağıda detaylıca işlenmektedir.

- **PVC (Polivinil Klorür)**

Ekonomik ve yaygın bir çözümdür. Ek yerlerinin sıcak hava robotları ile kaynaklanması, insandan bağımsız homojen bir birleşim sağlar. Çoğu PVC membran yapısal olarak kök dayanımına sahiptir, ancak zamanla içerisindeki plastikleştiricilerin kaybolması ve çevresel etkileri (klor gazı) tartışma konusudur.

- **TPO (Termoplastik Poliolefin)**

PVC'nin uygulama kolaylığını (sıcak hava kaynağı), kauçuğun dayanıklılığı ile birleştiren yeni nesil membrandır. Klor ve plastikleştirici içermediği için çevre dostudur ve kimyasal yapısı gereği doğal olarak kök dayanımına sahiptir (Dunnett & Kingsbury, 2008, s. 265).

- **EPDM (Sentetik Kauçuk) Membranlar**

%300'ü aşan elastikiyeti ve yüksek UV direnci ile bilinir. Genellikle büyük parçalar halinde serilir, bu da ek yeri sayısını azaltır. Ancak EPDM'in ek yerleri kaynakla değil, özel yapıştırıcılar ve bantlarla birleştirilir. Bitki kökleri bu yapıştırıcıları aşındırıp ek yerlerinden sızabildiği için, EPDM membranlar genellikle tek başına kök dayanımlı değildir ve mutlaka ek bir kök bariyeri ile birlikte kullanılmalıdır (Snodgrass & Snodgrass, 2006, s. 68).

- **Sürme Esaslı Yalıtımlar (Poliüretan / PUA)**

Özellikle çok sayıda tesisat çıkışının olduğu, girintili çıkıntılı karmaşık çatı formlarında tercih edilir. Ek yersiz bir yüzey oluşturması büyük avantajdır. Ancak uygulamanın doğru kalınlıkta yapılması ve ürünün mutlaka FLL kök dayanım sertifikasına sahip olması kritik öneme sahiptir.

3.5.3 Kök Koruma Katmanı

Yeşil çatı tasarımında, eğer seçilen su yalıtım membranı standart bitümlü membran veya EPDM gibi kendiliğinden FLL sertifikalı bir kök dayanımına sahip değilse, bu katmanın kullanılması teknik bir zorunluluktur. Bu katmanın temel fonksiyonu,

bitki köklerinin yalıtım malzemesine fiziksel olarak ulaşmasını ve delmesini engelleyerek su yalıtım sisteminin bütünlüğünü korumaktır. Köklerin su kaynağına ulaşmak için en ufak bir çatlak veya boşluktan sızma eğilimi göz önüne alındığında, bu katmanın kökler tarafından delinmeye karşı mutlak dirence, kimyasal stabiliteye ve uzun ömürlülüğe sahip olması gerekmektedir (Snodgrass & Snodgrass, 2006, s. 68).

Malzeme alternatifleri incelendiğinde, en yaygın kullanılan çözüm Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) levhalardır. Genellikle 0.5 mm ile 1 mm kalınlığında üretilen bu levhalar, sert ve mukavemetli yapılarıyla etkin bir fiziksel bariyer oluşturur. Daha esnek detaylar için "Düşük Yoğunluklu Polietilen" (LDPE) örtüler tercih edilebilir. Ayrıca, fiziksel bariyerin yanı sıra yavaş salınımlı herbisitler içeren kimyasal katkılı örtüler de bulunmakla birlikte, çevresel etkileri nedeniyle kullanımları tartışmalıdır. Uygulamada en kritik nokta, levha ek yerleridir; FLL (2018, s. 34) standartlarına göre ek yerlerinin en az 1,5 metre bindirilmesi veya sıcak hava kaynağı ile birleştirilerek sızdırmaz hale getirilmesi şarttır.

3.5.4 Koruma ve Nem Tutucu Katman

Genellikle kök koruma bariyerinin veya doğrudan kök dayanımlı su yalıtımının üzerine serilen bu katman, mekanik koruma ve su yönetimi açısından çift yönlü bir işleve sahiptir. Birinci işlevi, üst katmanlarda kullanılan drenaj levhalarının sert yapısının veya keskin agregaların, alttaki yalıtım membranını zedelemesini engellemektir. İkinci ve ekolojik açıdan kritik işlevi ise, yapısındaki yoğun lif dokusu sayesinde drenajdan süzülen suyun bir kısmını emerek, kurak dönemlerde bitki köklerine difüzyon yoluyla geri vermek üzere depolamaktır.

FLL yönergelerine göre bu katmanın, m² başına en az 3 ila 5 litre su tutma kapasitesine sahip olması önerilir. Malzeme olarak genellikle çürümeye dayanıklı, geri dönüştürülmüş sentetik liflerden (Polipropilen- PP veya Polyester- PES) iğneleme yöntemiyle üretilmiş, 300 gr/m² ile 1000 gr/m² ağırlığında kalın geotekstil koruyucu keçeler kullanılmaktadır.

3.5.5 Drenaj Katmanı

Sistemin ciğerleri olarak nitelendirilebilecek drenaj katmanı, bitki sağlığı ve yapısal güvenlik için hayati öneme sahiptir. Temel görevi, yağmur veya sulama sonrası substratın tutamadığı fazla suyu tahliye ederek köklerin çürümesini engellemek, yapı üzerindeki hidrostatik basıncı düşürmek ve kök bölgesinde hava sirkülasyonu sağlamaktır (Berndtsson, 2010, s. 1279).

Geleneksel uygulamalarda çakıl, kiremit kırığı veya lav taşı gibi mineral 5-10 cm kalınlığındaki dolgular kullanılsa da bu malzemeler sisteme 150-200 kg/m² gibi ciddi bir ölü yük bindirmekte ve su tahliye hızları sınırlı kalmaktadır. Modern mühendislik uygulamalarında ise, geri dönüştürülmüş plastikten (HDPE veya Polistiren) üretilen, yumurta kartonu formundaki sentetik drenaj levhaları endüstri standardı haline gelmiştir. Bu levhalar çok hafiftir (1-2 kg/m²) ve "çift kademeli" çalışırlar: Levhanın çukur kısımları yağmur suyunu depolar; levhanın üst seviyesini aşan su ise deliklerden kanallara geçerek hızla tahliye edilir (Molineux vd., 2009, s. 1510).

3.5.6 Filtre Katmanı (Sistem Filtresi)

Drenaj katmanının hemen üzerine serilen filtre katmanı, sistemin tıkanmasını önleyen güvenlik bariyeridir. Bitki taşıyıcı ortamdaki kil, silt, humus gibi ince partiküllerin yağmur suyuyla yıkanarak aşağı sızmasını ve drenaj levhasının gözeneklerini tıkamasını engeller.

Bu katman için kritik performans gereksinimi dengedir: Gözenekler ince partikülleri tutacak kadar küçük, ancak suyun dikey akışına izin verecek kadar büyük olmalıdır. Bu amaçla genellikle 100-150 gr/m² ağırlığında, ısıl işlemle birleştirilmiş örgüsüz polipropilen geotekstiller kullanılır. Örgülü jeotekstiller, gözenekleri çabuk tıkandığı ve köklerin doku arasına girerek tıkama riski olduğu için tercih edilmez (FLL, 2018, s. 45).

3.5.7 Bitki Taşıyıcı Ortam (Substrat)

Yeşil çatının "toprağı" olan bu katman, geleneksel bahçe toprağından tamamen farklı, özel bir mühendislik ürünüdür. Doğal tarla toprağı; aşırı ağırlığı, ıslandığında

çamurlaşarak hava gözeneklerini kapatması ve kuruduğunda betonlaşarak kökleri boğması nedeniyle çatılarda kullanılmaz (Ampim vd., 2010, s. 245).

Yeşil çatı substratları, hafiflik, yüksek su tutma kapasitesi ve yapısal stabilite sağlamak üzere tasarlanmış karışımlardır.

3.5.7.1 Mineral Bileşenler (%70-90):

İskelet yapısını oluşturan, zamanla ayrışmayan, drenajı sağlayan inorganik malzemelerdir. Türkiye koşullarında Ponza, ekonomik ve yerel bir kaynak olarak en yaygın kullanılan malzemedir. Ayrıca Lav Taşı, Perlit ve Genleştirilmiş Kil de kullanılır (Mansuroğlu, 2011, s. 122).

3.5.7.2 Organik Bileşenler (%10-30)

Bitki besinini sağlayan kısımdır. Genellikle kaliteli kompost kullanılır. Sürdürülebilirlik açısından, karbon yutaklarını yok ettiği gerekçesiyle Torf kullanımı uluslararası standartlarda sınırlandırılmakta; yerine Hindistan cevizi lifi gibi yenilenebilir alternatifler önerilmektedir.

3.5.8 Bitki Örtüsü

Sistemin en üst, yaşayan ve görünen katmanıdır. Bitki seçimi, sadece estetik bir tercih değil, çatının tipine ve iklimsel zorluklara (rüzgâr, don, kuraklık) dayalı teknik bir karardır.

Ekstensif sistemlerde çatı koşulları, doğal zemine göre çok daha serttir. Bu nedenle, yapraklarında su depolayabilen, cam (crassulacean acid metabolism) fotosentezi yaparak gündüz gözeneklerini kapatıp su kaybını önleyen sedum türleri idealdir. Sedumlar sığ köklüdür, yatay yayılır ve biçilme/sulama gerektirmez (Getter & R owe, 2006, s. 1278).

İntensif Sistemler: Derin toprak profili sayesinde, çim alanlardan çalılara ve ağaçlara kadar geniş bir bitki yelpazesi kullanılabilir.

Uygulama Yöntemleri: Maliyet ve zaman dengesine göre; tohum serpme, fide dikimi veya bitki halısı serme yöntemleri tercih edilebilir (Dunnett & Kingsbury, 2008, s. 185).

3.6 Yeşil Çatı Sistemlerinin Türkiye Uygulamaları ve Yasal Çerçeve

Yeşil çatı sistemleri, önceki bölümlerde incelenen küresel tarihsel gelişime paralel olarak, Türkiye'de de özellikle 2000'li yılların ortalarından itibaren tanınmaya ve uygulanmaya başlanmıştır. Almanya veya Kuzey Amerika'daki gibi köklü bir geçmişe ve yaygınlığa henüz sahip olmasa da Türkiye'deki uygulamalar, artan sürdürülebilirlik bilinci, yasal düzenlemeler ve pazar talepleri doğrultusunda istikrarlı bir şekilde artmaktadır. Bu başlık altında, yeşil çatıların Türkiye'deki durumu, bu uygulamaları teşvik eden veya kısıtlayan yasal çerçeve ve sektörün karşılaştığı zorluklar incelenecektir.

3.6.1 Geçmişten Günümüze Türkiye'de Yeşil Çatılar

Türkiye'de modern yeşil çatı uygulamalarının ilk örnekleri, büyük ölçüde uluslararası sürdürülebilir yapı hareketinin ve yeşil bina sertifika sistemlerinin (özellikle LEED) ülkeye girmesiyle ortaya çıkmıştır (Esin & Yüksek, 2009, s. 180). 2000'li yılların sonlarından itibaren, özellikle İstanbul, Ankara ve İzmir gibi büyük metropollerde inşa edilen yüksek profilli ticari projeler (ofis binaları, alışveriş merkezleri, oteller) ve bazı lüks konut projeleri, uluslararası yeşil bina sertifikası alabilmek ve kurumsal imajlarını güçlendirmek amacıyla yeşil çatı sistemlerini tercih etmişlerdir. Başlangıçta bu sistemler, estetik bir lüks veya bir pazarlama aracı olarak konumlandırılmış; sistemin ekolojik/ekonomik faydalarından çok, yeşil etiket sağlama fonksiyonu ön plana çıkmıştır.

Ancak zamanla, akademik çalışmaların ve uluslararası örneklerin etkisiyle, yeşil çatıların Bölüm 3.4'te detaylandırılan somut faydaları Türkiye bağlamında da anlaşılmaya başlanmıştır. Aras (2019, s. 479), kentsel sürdürülebilirlik kapsamında yeşil çatıların Türkiye kentleri için yağmur suyu yönetimi, hava kalitesinin iyileştirilmesi ve kentsel ısı adasıyla mücadeledeki potansiyeline dikkat çekmektedir. Külekçi (2017, s. 20) de benzer şekilde, sistemlerin kentlere sağladığı ekolojik ve estetik katkıları vurgulamaktadır. Uygulamalar günümüzde iki ana koldan ilerlemektedir.

Özel sektör projelerinde genellikle sertifika (LEED/BREEAM/B.E.S.T.) hedefli, prestij ve mülk değerini artırma odaklı projelerdir. Bu projelerde, erişilebilir rekreasyon alanları yaratma amacıyla genellikle intensif veya yarı-intensif sistemler tercih edilmektedir.

Kamu ve belediye projelerinde son yıllarda, özellikle büyükşehir belediyelerinin iklim değişikliğine uyum stratejileri ve kentsel sel riskini azaltma hedefleri doğrultusunda, kamusal binalarda ekstensif yeşil çatı uygulamaları görülmeye başlanmıştır. Bu yaklaşım, sistemi bir lüks tüketim nesnesi olmaktan çıkarıp, kentsel altyapının fonksiyonel bir parçası "Yeşil Altyapı" olarak gören bir paradigma değişimini temsil etmektedir.

3.6.2 Yasal Çerçeve ve Teşvik Mekanizmaları

Türkiye'de, yeşil çatı uygulamasını doğrudan zorunlu kılan ulusal bir yasal düzenleme henüz bulunmamakla birlikte; çeşitli yönetmelikler ve planlama araçları, bu sistemlerin uygulanmasına zemin hazırlamakta ve dolaylı olarak teşvik etmektedir.

Bu kapsamda en önemli ulusal düzenleme, Binalarda Enerji Performansı (BEP) Yönetmeliğidir. 2009'da yürürlüğe giren bu yönetmelik, binalar için "Enerji Kimlik Belgesi (EKB)" almayı zorunlu kılmaktadır (Şenel, 2010, s. 42). Yeşil çatılar, sağladıkları yüksek ısı yalıtımı ve pasif soğutma etkisiyle binaların ısıtma-soğutma yüklerini azaltarak, BEP hesabında daha iyi bir U-değeri (ısıl geçirgenlik) elde edilmesine ve binanın enerji sınıfının yükselmesine doğrudan katkı sağlar. Özellikle 2025 yılından itibaren "Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar" standardına geçişin hedeflenmesi, yeşil çatılar gibi pasif verimlilik stratejilerini vazgeçilmez kılacaktır.

Yerel yönetimler düzeyinde ise İmar Yönetmelikleri önemli bir araçtır. İstanbul İmar Yönetmeliği gibi bazı düzenlemelerde "yeşil çatı" tanımı yer almakta ve bu sistemlerin çatı katı kullanımı veya emsal dışı alan hesaplamalarında avantajlar sağlamasına yönelik maddeler bulunmaktadır. Ayrıca, Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Emisyon hedefleri doğrultusunda hazırlanan İklim Değişikliği Eylem Planları; kentsel ısı adalarıyla mücadele ve yağmur suyu yönetimi için yeşil çatıları önerilen

stratejiler arasına dahil ederek, gelecekteki yasal zorunlulukların sinyalini vermektedir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021).

3.6.3 Türkiye'deki Uygulamalarda Karşılaşılan Zorluklar ve Fırsatlar

Türkiye'de yeşil çatı sektörünün gelişimi ve yaygınlaşması sürecinde, küresel pazarlardakine benzer dinamikler gözlemlense de ülkenin kendine özgü sosyo-ekonomik yapısından ve inşaat kültürü alışkanlıklarından kaynaklanan, yerel bağlamda farklılaşan bazı kritik zorluklar bulunmaktadır. Bu zorlukların doğru tanımlanması ve kök nedenlerinin analizi, tezin ilerleyen bölümlerinde gerçekleştirilecek olan Değer Mühendisliği çalışmasının hangi problemlere çözüm aradığını netleştirmesi açısından hayati önem taşımaktadır. Zira Değer Mühendisliği, sadece teknik bir hesaplama değil, aynı zamanda bu sektörel engelleri aşmak için geliştirilen bir strateji yönetimidir.

Sektörün önündeki en büyük ve en dirençli engel, şüphesiz yüksek ilk yatırım maliyeti algısıdır. Türkiye inşaat sektöründe hâkim olan "yap-sat" modeli, yatırımcıları ve müteahhitleri projenin toplam yaşam döngüsü performansından ziyade, ihale aşamasındaki ilk yapım maliyetine odaklanmaya itmektedir. Yatırımcılar, genellikle yeşil çatıların bina ömrü boyunca sağlayacağı enerji tasarrufu, su yalıtımının ömrünü 2-3 kat uzatması gibi uzun vadeli ekonomik getirileri göz ardı ederek; bu sistemleri geleneksel çatı kaplamalarına kıyasla "pahalı ve gereksiz bir lüks" olarak değerlendirme eğilimindedir. Bu kısa vadeli finansal bakış açısı, sürdürülebilir sistemlerin ekonomik rasyonalitesinin anlaşılmasını engellemekte ve yeşil çatıların yaygınlaşmasını frenlemektedir.

Finansal bariyerlerin yanı sıra, teknik kapasite eksikliği de önemli bir risk faktörüdür. "Teknik Bilgi ve Nitelikli İşgücü Eksikliği", hassas mühendislik detayları ve çok katmanlı bir yapı gerektiren yeşil çatı sistemlerinde ciddi uygulama hatalarına yol açabilmektedir. Mansuroğlu'nun (2011, s. 118) da vurguladığı üzere, yetersiz detay çözümleri veya eğitimsiz ekipler tarafından yapılan uygulamalar, su yalıtımında sızıntı risklerini artırmakta ve bitki örtüsünün sürdürülebilirliğini tehlikeye atmaktadır. Bu tür başarısız uygulamalar, sektörde "yeşil çatı akar" veya "bakımı zordur" gibi önyargıların oluşmasına neden olarak teknolojiye olan güveni sarsmaktadır.

Sektörün bir diğer yapısal sorunu ise dışa bağımlılıktır. Yeşil çatı sistemlerinde kullanılan yüksek performanslı bileşenlerin, özellikle kök tutucu bariyerler ve drenaj levhalarının büyük bir kısmının ithal olması, döviz kurundaki dalgalanmalara karşı maliyetleri hassas hale getirmektedir. Ayrıca, ulusal düzeyde bağlayıcı bir standardın (TS) ve teknik şartnamenin eksikliği, piyasada kalite tutarsızlıklarına neden olmakta; doğru malzeme ile yanlış malzemenin rekabet ettiği haksız bir ortam yaratmaktadır.

Ancak, tüm bu zorlukların yanında Türkiye pazarı, doğru stratejilerle değerlendirildiğinde sektörü dönüştürebilecek muazzam Fırsatlar da barındırmaktadır. Bu fırsatların başında, Türkiye'nin jeolojik zenginliği gelmektedir. Türkiye, yeşil çatı substratlarında (bitki taşıyıcı ortam) temel bileşen olarak kullanılan ve ideal gözenekli yapısıyla su tutma kapasitesini artıran Ponza (Bims) rezervleri açısından dünyanın en zengin ülkelerinden biridir. İthal ve pahalı substrat karışımları yerine, yerel, ucuz ve kolay erişilebilir olan ponza ve lav taşı gibi volkanik tüflerin kullanımı; sistem maliyetlerini radikal bir şekilde düşürme ve nakliye kaynaklı karbon ayak izini azaltma potansiyeli taşımaktadır. Bu durum, “yerel malzeme” kullanımını teşvik eden uluslararası sertifika sistemlerinde de (LEED, BREEAM) avantaj sağlamaktadır.

Buna ek olarak, ülkenin en büyük kentsel gündemi olan Kentsel Dönüşüm süreci, yeşil çatıların yaygınlaşması için tarihi bir fırsat penceresi sunmaktadır. Milyonlarca metrekarelik riskli yapı stokunun yenilenmesi süreci, sadece binaların depreme dayanıklı hale getirilmesi değil, aynı zamanda iklim değişikliğine dirençli, enerji verimli ve yeşil çatılarla donatılmış sürdürülebilir kentlerin inşası için de bir zemin oluşturmaktadır (Topçu, 2020, s. 114).

Sonuç olarak; Türkiye pazarının kendine özgü ekonomik dinamikleri, iklimsel çeşitliliği ve malzeme tedarik süreçlerindeki kısıtlar bütüncül bir gözle değerlendirildiğinde; yeşil çatı uygulamalarında yalnızca “en düşük ilk yatırım maliyetini” hedefleyen geleneksel ve statik yaklaşımların sürdürülebilir olmadığı açıkça görülmektedir. Sektörün sağlıklı gelişimi, ithalata dayalı ezberlerin bozulmasına ve yerel potansiyellerin devreye sokulmasına bağlıdır. Bu noktada kritik olan ihtiyaç; maliyet ile teknik performansı dengeleyen, yerel kaynakları (ponza vb.) mühendislik hesaplarıyla sisteme entegre eden ve yatırımcıya en yüksek "değeri" sunan sistem bileşenlerinin bilimsel bir yöntemle belirlenmesidir. Bu

bağlamda, tezin bir sonraki bölümünü oluşturan “Değer Mühendisliği”; söz konusu optimizasyon problemini çözmek, maliyet-fonksiyon dengesini kurmak ve Türkiye şartlarına en uygun, ekonomik ve sürdürülebilir yeşil çatı sistemini kurgulamak adına ihtiyaç duyulan sistematik, analitik ve rasyonel çerçeveyi sunacaktır.

4
DEĞER MÜHENDİSLİĞİ

Yapı sektörü, doğası gereği yüksek maliyetli, karmaşık, çok paydaşlı ve uzun süreli projelerden oluşmaktadır. Bu projelerin yönetiminde başarı, geleneksel olarak "proje yönetim üçgeni" olarak bilinen maliyet, zaman ve kalite kısıtlarının dengelenmesiyle ölçülmüştür. Ancak, küresel rekabetin artması, kaynakların kıtlaşması ve sürdürülebilirlik hedeflerinin projeler üzerinde yarattığı baskı, bu geleneksel denge anlayışının yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Sıklıkla, bütçe kısıtlarına uymak adına maliyet odaklı kararlar alınmakta; bu durum projelerin kalitesinden, performansından veya uzun vadeli sürdürülebilirliğinden ödün verilmesine yol açmaktadır. Sonuç olarak, en ucuz çözümün aslında en iyi çözüm olmadığı, aksine yüksek yaşam döngüsü maliyetlerine veya fonksiyonel yetersizliklere neden olduğu bir kısır döngü ortaya çıkmaktadır.

İşte bu noktada Değer Mühendisliği, proje yönetimine radikal bir bakış açısı değişikliği sunmaktadır. Değer Mühendisliği, bir projenin veya ürünün sadece maliyetine değil, değerine odaklanmaktadır. Bunu yaparken de odağı, projenin fiziksel bileşenlerinden bu bileşenlerin yerine getirdiği fonksiyonlara kaydırmaktadır. Dell'Isola (2016, s. 4) ve SAVE International (2017) standartlarına göre Değer Mühendisliği; bir projenin gerekli fonksiyonlarını, istenilen kalite, performans, güvenilirlik ve sürdürülebilirlik standartlarından ödün vermeden, en düşük yaşam döngüsü maliyeti (LCC) ile sağlamayı amaçlayan sistematik, organize ve çok disiplinli bir problem çözme metodolojisidir.

Bu bölüm, tezin metodolojik omurgasını oluşturan Değer Mühendisliği kavramını derinlemesine incelemeyi amaçlamaktadır. Bölüm kurgusu içerisinde; öncelikle "değer" kavramının felsefi ve ekonomik kökenlerinden mühendislikteki işlevsel tanımına kadar olan evrimi ele alınacak; ardından Değer Mühendisliği'nin tanımı, kapsamı ve geleneksel maliyet düşürme yöntemlerinden farkları ortaya

konulacaktır. Metodolojinin İkinci Dünya Savaşı'ndaki doğuşundan inşaat sektörüne uzanan tarihsel gelişimi izlenecektir. Daha sonra ise metodolojinin kalbi olan fonksiyon analizi, FAST diyagramı ve yaşam döngüsü maliyeti gibi temel kavramlar detaylandırılacaktır. Bu teorik altyapı, Bölüm 5'te sunulacak olan uygulama modeline zemin hazırlayacaktır.

4.1 Değer Mühendisliğinin Tanımı ve Kapsamı

Değer Mühendisliği metodolojisinin kuramsal çerçevesini oluşturmadan önce, metodolojinin odağında yer alan "değer" kavramının anlamsal sınırlarını ve bağlamını netleştirmek oldukça önemlidir. Değer kavramı; soyut, göreceli ve öznel doğası gereği günlük dilde farklı anlamlara gelebilmekle birlikte, Değer Mühendisliği terminolojisinde teknik ve ölçülebilir bir tanıma sahiptir. Özellikle yapı işletmesi disiplininde fiyat, maliyet ve değer kavramları sıklıkla birbirinin yerine kullanılsa da Zimmerman ve Hart (1982), bu kavramlar arasında kesin ayrımlar bulunduğunu belirtmektedir. Bu bağlamda maliyet, bir yapıyı inşa etmek veya ürünü ortaya koymak için harcanan kaynakların üretici odaklı parasal karşılığı iken; fiyat, piyasa koşullarında arz ve talep dengesiyle belirlenen ve alıcının ödediği bedeli ifade etmektedir. Değer ise bu iki kavramdan ayrılarak tamamen kullanıcı odaklı bir perspektif sunar; bir ürün veya hizmetin, belirli bir maliyet karşılığında kullanıcının ihtiyaç ve beklentilerini karşılama yeteneğinin bir ölçüsüdür.

Değer kavramının fayda ve maliyet eksenindeki bu çift yönlü yapısı, köklerini felsefi ve ekonomik teorilerden almaktadır. Antik Yunan'da Aristoteles, malların bir ihtiyacı karşılama yeteneğini "kullanım değeri", pazardaki değişim bedelini ise "değişim değeri" olarak tanımlayarak kavramın ikili doğasını ortaya koyan ilk düşünürlerden olmuştur. İlerleyen dönemlerde Adam Smith ve David Ricardo gibi klasik iktisatçılar değeri üretimdeki emek miktarı ile açıklarken, Marshall gibi neoklasik iktisatçılar tüketici tatmini üzerine odaklanmıştır. Değer Mühendisliği'nin kurucusu Lawrence D. Miles, bu teorik tartışmaları mühendislik pratiğine uyarlayarak değer kavramını; bir fonksiyonu en düşük maliyetle güvenilir bir şekilde yerine getirme yeteneği olarak somutlaştırmıştır (Miles, 2015). Miles'ın bu tanımı, metodolojinin temel aksiyomu olan şu denklemi doğurmuştur:

$$Değer = \frac{Fonksiyon}{Maliyet} \quad (4.1)$$

Bu denklem (4.1) ışığında Değer Mühendisliği, değer artışını sağlamak için beş temel strateji öngörmektedir. Bunlar;

- Fonksiyon artarken maliyetin sabit kalması,
- Fonksiyon sabitken maliyetin azalması,
- Fonksiyon artarken maliyetin azalması,
- Fonksiyonun maliyet artışından daha yüksek oranda artması,
- Fonksiyonun maliyetten daha az oranda azalması,

olarak öne çıkmaktadır.

Dolayısıyla Değer Mühendisliği, literatürde Dell'Isola'nın (2016) da vurguladığı üzere, salt bir maliyet düşürme tekniği değil, maliyet ve performans arasındaki en uygun dengeyi arayan bir optimizasyon sürecidir.

Metodoloji kapsamında projedeki gereksiz maliyetlerin kök nedenlerini tespit edebilmek amacıyla değer; Kullanım Değeri, İtibar Değeri, Maliyet Değeri ve Değişim Değeri olmak üzere alt türlere ayrılmıştır. Dikmeoğlu ve Atabay'ın (2018) çalışmalarında detaylandırdığı üzere; Kullanım Değeri, bir kolonun yük taşıması veya çatının su yalıtımı sağlaması gibi ürünün temel fonksiyonunu ifade eden objektif bir değerdir. Buna karşın İtibar Değeri ise estetik kaygılar, prestij veya marka algısıyla ilgili sübjektif nitelikleri kapsar. Değer Mühendisliği çalışmalarında temel amaç, projenin temel Kullanım Değeri'nden ödün vermeden, maliyeti gereksiz yere artıran ve fonksiyona katkısı olmayan İtibar Değeri unsurlarını veya verimsiz tasarım kararlarını optimize etmektir.

Bu kavramsal temeller üzerine inşa edilen Değer Mühendisliği, uluslararası standart kuruluşları tarafından sistematik bir yönetim tekniği olarak tanımlanmıştır. SAVE International (2017), metodolojiyi; performans, güvenilirlik ve kaliteden ödün vermeden, fonksiyonların analizi yoluyla değeri artırmayı hedefleyen "bilinçli ve düzenli bir çaba" olarak nitelendirir. İnşaat sektörü özelinde ise Dell'Isola (2016), tanımı "Yaşam Döngüsü Maliyeti" (LCC) eksenine oturtarak, metodolojinin sadece ilk yatırım maliyetine değil, yapının tüm ömrü boyunca oluşacak işletme ve bakım maliyetlerine odaklandığını vurgular.

Son olarak, metodolojinin kapsamını ve uygulama zamanlamasını netleştirmek adına değer analizi, değer mühendisliği ve değer kavramları arasındaki ayrıma dikkat çekmek gerekmektedir. Tarihsel olarak Miles'ın geliştirdiği ilk yöntem olan DM, genellikle mevcut bir ürüne veya sürece uygulanan reaktif bir yaklaşımı ifade ederken; DM, tasarım aşamasında maliyetler henüz kesinleşmeden uygulanan proaktif süreci tanımlar. Kelly, Male ve Graham (2014) tarafından belirtildiği üzere DY ise, bu teknikleri de kapsayan ve proje paydaşlarının hedeflerini bütünleştiren daha geniş, stratejik bir yönetim felsefesidir. Bu çalışma kapsamında "Değer Mühendisliği" terimi, ağırlıklı olarak tasarım aşamasında uygulanan proaktif metodolojiyi ifade etmek üzere kullanılacaktır.

4.2 Değer Mühendisliğinin Tarihsel Gelişimi

Değer Mühendisliği metodolojisinin ortaya çıkışı, II. Dünya Savaşı'nın yarattığı olağanüstü ekonomik koşullar ve küresel hammadde krizleriyle doğrudan ilişkilidir. Savaş döneminde yaşanan ciddi malzeme sıkıntısı, kalifiye işgücü yetersizliği ve tedarik zincirindeki aksamalar, endüstriyel üretimi tehdit eden kritik bir darboğaz oluşturmuştur. Bu süreçte, General Electric (GE) firmasında Satınalma Müdürü olarak görev yapan Harry Erlicher, üretim için hayati önem taşıyan bazı bileşenlerin temin edilemediğini fark etmiş; bu sorunu aşmak için mühendislerinden mevcut malzemelere alternatifler geliştirmelerini istemiştir. Yapılan zorunlu tasarım değişiklikleri ve ikame malzeme kullanımları sonucunda, şaşırtıcı bir şekilde, alternatiflerin çoğu zaman orijinal malzemeden daha düşük maliyetli olduğu, ancak performans açısından daha iyi veya eşdeğer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir (Miles, 1972, s. 3).

Bu tesadüfi başarıyı sistematik bir mühendislik disiplinine dönüştürme görevi, 1947 yılında GE mühendislerinden Lawrence D. Miles'a verilmiştir. Miles, o güne kadar uygulanan parça odaklı maliyet düşürme yöntemlerini reddederek, ürünlerin ne olduklarına değil ne yaptıklarına odaklanan devrimci bir yaklaşım geliştirmiştir. Miles'ın "Değer Analizi" adını verdiği bu teknik, parçaların maliyetini düşürmekten ziyade, ürünün işlevini sorgulayarak gereksiz maliyetleri elimine etmeyi hedeflemiştir. Miles'ın çalışmaları, bir ürünün değerinin, o ürünün

fonksiyonel performansı ile maliyeti arasındaki ilişkiyle tanımlanabileceğini ortaya koymuş ve bu yaklaşım kısa sürede General Electric bünyesinde büyük mali tasarruflar sağlamıştır.

Metodolojinin özel sektörden kamu ve savunma sanayisine geçişi, yaygınlaşmasındaki en önemli kırılma noktasıdır. 1954 yılında ABD Deniz Kuvvetleri Gemi İnşa Bürosu, maliyetleri optimize etmek amacıyla bu yöntemi GE'den transfer etmiştir. Ancak askeri yetkililer, "Analiz" kelimesinin sadece bir inceleme veya muhasebe işlemi gibi algılanmasından çekinerek, sürecin teknik ve mühendislik boyutunu vurgulamak adına metodolojinin ismini "Değer Mühendisliği" olarak değiştirmiştir (Younker, 2003, s. 12). Bu dönemde elde edilen başarılar üzerine, 1961 yılında ABD Savunma Bakanı Robert McNamara, Değer Mühendisliği hükümlerinin tüm askeri tedarik sözleşmelerine dahil edilmesini zorunlu kılmıştır.

Metodolojinin kurumsal bir kimlik kazanması ve standartlaşması ise 1959 yılında "Society of American Value Engineers" (SAVE) derneğinin kurulmasıyla gerçekleşmiştir. Bugün SAVE International olarak bilinen bu kuruluş, metodolojinin prensiplerini belirlemiş ve dünya genelinde uygulanabilir standart iş planını geliştirmiştir. 1960'ların sonuna gelindiğinde, Değer Mühendisliği sadece imalat sanayisinde değil, Alphonse J. Dell'Isola'nın öncü çalışmalarıyla inşaat sektöründe de kendine yer bulmaya başlamıştır. Dell'Isola, metodolojiyi inşaat projelerinin karmaşık yapısına uyarlayarak, binalarda yaşam döngüsü maliyetlerinin düşürülmesinde büyük başarılar elde etmiştir. Bu gelişmeler ışığında, 1972 yılında ABD Mimarlar Enstitüsü (AIA) ve Kamu Binaları Servisi (PBS), inşaat yönetimi hizmetlerine Değer Mühendisliği şartlarını ekleyerek, metodolojinin yapım sektöründeki yasal altyapısını oluşturmuştur (Dell'Isola, 1997, s. 2).

Türkiye'de ise Değer Mühendisliği kavramı, 1990'lı yılların sonlarına doğru akademik çalışmalarla literatüre girmeye başlamış, ancak uygulamadaki yaygınlığı batı ülkelerine kıyasla daha sınırlı kalmıştır. Başlangıçta sadece büyük ölçekli uluslararası projelerde yabancı firmalar aracılığıyla uygulanan yöntem, zamanla yerel literatürde ve teknik şartnamelerde yer bulmaya başlamıştır. Günümüzde, kamu kaynaklarının verimli kullanımı ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda,

Türk inşaat sektöründe de proje yönetim süreçlerinin bir parçası olarak değerlendirilmeye başlanmıştır.

4.3 Değer Mühendisliğinin Temel Kavramları: Fonksiyon ve Maliyet

Değer Mühendisliği metodolojisini geleneksel maliyet düşürme tekniklerinden ve diğer yönetim yaklaşımlarından ayıran en temel özellik, problemleri ele alış biçimindeki köklü paradigmadır. Geleneksel mühendislik yaklaşımları genellikle nesnelerin kendisine, yani parçalara ve bileşenlere odaklanırken; Değer Mühendisliği tamamen fonksiyon kavramı üzerine inşa edilmiştir. Metodolojinin başarısı, fonksiyonun doğru tanımlanmasına ve bu fonksiyonun maliyet ile olan ilişkisinin, özellikle yaşam döngüsü perspektifinden doğru analiz edilmesine bağlıdır. Bu nedenle, metodolojinin kalbini oluşturan fonksiyon ve maliyet kavramlarının teorik çerçevesinin net bir şekilde çizilmesi gerekmektedir.

4.3.1 Fonksiyon Kavramı ve Analizi

Değer mühendisliği literatüründe fonksiyon; bir ürünün, projenin veya sürecin yerine getirmesi beklenen asıl görevi veya müşteri tarafından talep edilen performans karakteristiği olarak tanımlanmaktadır (SAVE International, 2017). Metodolojinin kurucusu Lawrence D. Miles'ın geliştirdiği yaklaşıma göre, bir nesnenin ne olduğu değil ne yaptığı asıl odak noktasıdır. Bu bakış açısı, mühendislerin ve tasarımcıların zihinlerindeki kalıplaşmış malzeme ve detay çözümlerinden sıyrılarak, aynı işi yapacak alternatif ve yaratıcı çözümlere yönelmelerini sağlamaktadır. Miles (2015), bu zihinsel ayrışmayı sağlamak ve çözümden bağımsız düşünebilmek için fonksiyonların “aktif bir fiil ve ölçülebilir bir isim” olmak üzere sadece iki kelime ile tanımlanması zorunluluğunu getirmiştir. Bu kurala göre; bir ampulün fonksiyonu ışık vermek gibi genel bir ifade yerine ışık yaymak şeklinde; bir dış duvarın fonksiyonu ise duvar örmek yerine dış ortamı ayırmak veya ısı transferini engellemek şeklinde tanımlanır. Bu iki kelimelik soyutlama, zihni örneğin cam, beton veya çelik vb. belirli bir malzemeden uzaklaştırarak sadece amaca odaklanmayı sağlar. Böylece dış ortamı ayırmak

fonksiyonu için beton duvara alternatif olarak cam paneller veya kompozit sistemler gibi farklı çözümlerin de değerlendirilmesine olanak tanınır.

Fonksiyonlar, projedeki önem derecelerine ve müşterinin beklentilerine göre temel ve ikincil fonksiyonlar olmak üzere iki ana kategoride incelenmektedir (Dell'ısola, 2016). Temel fonksiyon, ürünün veya projenin var oluş nedenidir ve bu fonksiyon ortadan kalktığında ürünün değeri ile kullanım amacı tamamen kaybolur. Örneğin bir kalemin temel fonksiyonu işaret bırakmaktır ve bu özellik, müşterinin bedel ödemeye razı olduğu asıl değerdir. Buna karşın ikincil veya destekleyici fonksiyonlar, temel fonksiyonun gerçekleşmesini sağlayan ancak tek başına bir değer ifade etmeyen veya ürünü daha estetik ve konforlu hale getiren özelliklerdir. Bir kalemin mürekkep depolamak veya prestij sağlamak gibi özellikleri bu kapsamdadır. Değer mühendisliği çalışmalarının temel hedefi, temel fonksiyonu garanti altına alırken; maliyetlerin büyük bir kısmını oluşturan ancak performansa doğrudan katkısı düşük olan gereksiz ikincil fonksiyonları optimize etmektir.

4.3.2 Maliyet Kavramı ve Yaşam Döngüsü Yaklaşımı

Metodolojinin diğer kritik bileşeni olan maliyet kavramı, değer mühendisliğinde geleneksel inşaat yönetiminden çok daha geniş bir perspektifle ele alınır. Buradaki maliyet, sadece bir yapının inşası veya bir ürünün üretimi için harcanan ilk yatırım maliyetini değil, yapının ekonomik ömrü boyunca ortaya çıkacak tüm harcamaları kapsayan Yaşam Döngüsü Maliyeti'ni (LCC) ifade etmektedir.

Geleneksel süreçlerde kararlar genellikle tasarım ve ihale aşamasındaki ilk yapım maliyetlerine göre verilirken; Kelly, Male ve Graham (2014), bir binanın 30-40 yıllık ömrü boyunca işletme, bakım, onarım ve enerji maliyetlerinin toplamının, ilk yapım maliyetinin 3 ila 5 katına ulaşabildiğini belirtmektedir. Bu durum, sadece ilk maliyete odaklanmanın uzun vadede yanıltıcı ve pahalı sonuçlar doğurabileceğini göstermektedir.

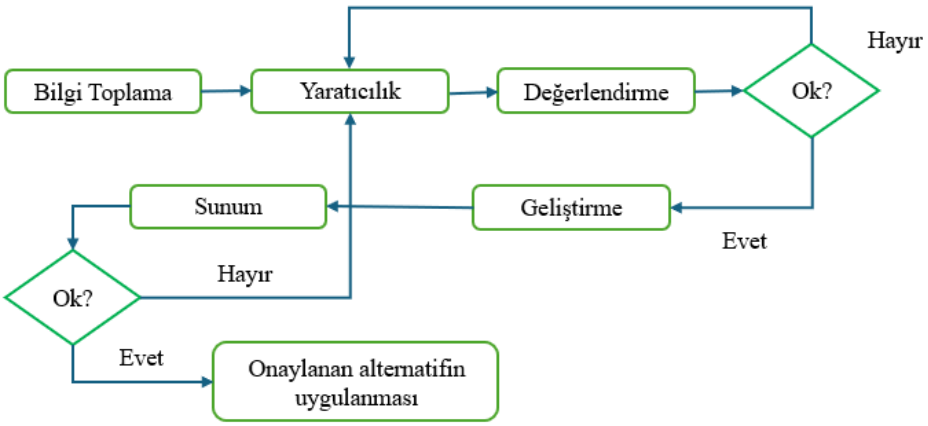
Bu nedenle değer mühendisliği, karar verme sürecinde arazi, tasarım ve inşaat giderlerini kapsayan ilk yatırım maliyetinin yanı sıra; enerji tüketimi, personel giderleri, periyodik bakımlar, onarımlar ve yapı ömrünü tamamladığında gerçekleşecek elden çıkarma veya yıkım maliyetlerini de bütüncül bir yaklaşımla ele alır. ASTM E917 standardına göre yapılan LCC analizleri, üretilen alternatif

önerilerin değerlendirilmesinde belirleyici faktördür (ASTM International, 2020). Bu yaklaşıma göre, ilk yatırım maliyeti geleneksel bir çözüme göre daha yüksek olan bir alternatif; uzun vadede enerji ve bakım tasarrufu sağlayarak toplam maliyeti düşürüyorsa, değer mühendisliği açısından daha değerli kabul edilmektedir. Bu bütüncül maliyet yönetimi anlayışı, metodolojinin sürdürülebilirlik ilkeleriyle olan doğrudan ve güçlü ilişkisini de ortaya koymaktadır.

4.4 Değer Mühendisliği İş Planı ve Aşamaları

Değer Mühendisliği (DM), rastgele yapılan bir beyin fırtınası seansı veya basit bir maliyet azaltma toplantısı değildir; aksine metodolojinin başarısı, kanıtlanmış, yapılandırılmış ve sistematik bir iş planının titizlikle takip edilmesine bağlıdır. SAVE International (2017) tarafından metodolojinin yol haritası olarak tanımlanan bu plan, bir Değer Mühendisliği atölye çalışmasının nasıl yürütüleceğini, hangi soruların hangi mantıksal sırayla sorulacağını ve analiz sürecinin sınırlarını belirler.

Tarihsel olarak Lawrence D. Miles (2015) tarafından geliştirilen ve zamanla ASTM E1699 gibi standartlarla güncellenen modern DM iş planı, birbirini takip eden altı temel aşamadan oluşmaktadır. Bu sistematik akış, DM ekibinin düşünce sürecini belirli bir disiplin içinde yönlendirir; süreç “Sorun nedir?” (Bilgi aşaması) sorusuyla başlar, “Sorun gerçekte nedir?” (Fonksiyon analizi aşaması) sorgulamasıyla derinleşir, “Başka nasıl çözülebilir?” (Yaratıcılık aşaması) sorusuyla genişler ve nihayetinde “Hangi çözüm en iyisidir?” (Değerlendirme aşaması), “Bu çözüm nasıl uygulanır?” (Geliştirme aşaması) ve “Karar vericiler nasıl ikna edilir?” (Sunum aşaması) sorularına yanıt aranarak tamamlanır. Aşağıda Şekil 4.1’de Değer Mühendisliği Aşamaları görseli paylaşılmıştır.



Şekil 4.1 Değer Mühendisliği Aşamaları Kaynak: İMO İzmir (2021) temel alınarak yazar tarafından oluşturulmuştur.

4.4.1 Bilgi Toplama Aşaması

Atölye çalışmasının temelini oluşturan bu ilk aşama, "Mevcut durum nedir?" sorusuna odaklanarak DM ekibinin projeyi tüm boyutlarıyla kavramasını hedefler. Dell'Isola'nın (2016) da belirttiği üzere, analiz sürecinin başarısı, bu aşamada toplanan verinin kalitesi ve kapsamı ile doğru orantılıdır. Ekip bu süreçte; mimari, statik ve mekanik projeleri içeren tasarım belgelerini; detaylı metraj ve birim fiyat analizlerini içeren maliyet verilerini; işverenin bütçe, zaman ve kalite beklentilerini içeren proje kısıtlarını bir araya getirir. Özellikle LEED sertifikası, akustik konfor veya yasal zorunluluklar gibi performans hedeflerinin netleştirilmesi, ilerleyen aşamalarda yapılacak önerilerin geçerliliği için kritiktir. Bu aşamanın nihai amacı, ekibin sadece "ne" yapıldığını değil, tasarımcıların mevcut çözümleri "neden" seçtiğini, yani tasarımın arkasındaki gerekçeleri tam olarak anlamasını sağlamaktır.

4.4.2 Fonksiyon Analizi Aşaması

Değer Mühendisliği'ni diğer maliyet yönetim tekniklerinden ayıran en kritik evre, metodolojinin kalbi sayılan "Fonksiyon Analizi" aşamasıdır. Bu aşamada ekip, bilgi toplama evresinde elde ettiği fiziksel bileşenleri, Zimmerman ve Hart'ın (1982) tanımladığı prensipler doğrultusunda soyut fonksiyonlara dönüştürür. Analiz sürecinde öncelikle projenin veya incelenen bileşenin tüm fonksiyonları, "Aktif Fiil + Ölçülebilir İsim" kuralına göre tanımlanır ve bu fonksiyonlar "Temel"

ve “İkincil” olarak sınıflandırılır. Ardından, fonksiyonlar arasındaki “Nasıl?” ve “Neden?” ilişkisini görselleştirmek ve projenin mantıksal kurgusunu çözümlemek amacıyla FAST Diyagramı oluşturulur. Eldeki maliyet verilerinin bu fonksiyonlara atanmasıyla oluşturulan Fonksiyon-Maliyet Matrisi sayesinde, maliyetin fonksiyona kıyasla orantısız olduğu, yani “Değer İndeksi” düşük kaldığı alanlar tespit edilir.

4.4.3 Yaratıcılık Aşaması

Sorunların ve hedeflerin netleştiği bu aşama, “Bu fonksiyonları başka nasıl yerine getirebiliriz?” sorusuna yanıt aranan yapılandırılmış bir beyin fırtınası seansıdır. Miles (2015), bu aşamada asıl amacın fikir kalitesinden ziyade “nicelik” olduğunu, yani mümkün olduğunca çok sayıda alternatif üretilmesi gerektiğini vurgular. Sürecin en önemli kuralı, eleştirinin kesinlikle yasak olmasıdır; hiçbir fikir pahalı, imkânsız veya saçma olarak yargılanmaz. Çünkü absürt görünen bir fikir, başka bir ekip üyesinin aklına uygulanabilir ve yenilikçi bir çözüm getirebilir. Örneğin, "suyu tahliye etmek" fonksiyonu için sadece geleneksel drenaj levhaları değil; çakıl, genleştirilmiş kil, eğimin artırılması veya farklı kompozit malzemeler gibi tüm olasılıklar listelenir. Yargılamanın ertelenmesi, ekibin zihinsel engelleri aşarak yaratıcı potansiyelini en üst düzeye çıkarmasını sağlar.

4.4.4 Değerlendirme Aşaması

Yaratıcılık aşamasında üretilen geniş fikir havuzunun mantık süzgecinden geçirildiği bu evre, “Hangi fikirler en iyisidir?” sorusunun sorulduğu analitik bir süreçtir. Öncelikle benzer nitelikteki fikirler gruplandırılır ve teknik uygulanabilirlik, yasal zorunluluklar ve işveren beklentileri gibi kritik kriterlere göre hızlı bir elemeden geçirilir. Kalan uygulanabilir fikirler için avantajlar ve dezavantajlar listelenerek, her biri için ön Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC) hesaplamaları yapılır. Kelly, Male ve Graham’ın (2014) önerdiği üzere, fikirler sadece maliyet ekseninde değil; performans, güvenilirlik, uygulama kolaylığı ve sürdürülebilirlik gibi kriterlerin de yer aldığı ağırlıklı bir Değerlendirme Matrisi üzerinden puanlanır. Bu sistematik eleme sonucunda, bir sonraki aşamada detaylandırılmak üzere en yüksek potansiyele sahip az sayıda alternatif belirlenir.

4.4.5 Geliştirme Aşaması

Seçilen “en değerli” fikirlerin, soyut birer öneri olmaktan çıkıp uygulanabilir teknik çözümlere dönüştüğü aşama geliştirme aşamasıdır. Bu süreçte uzmanlar, seçilen alternatif için detaylı teknik çizimler, spesifikasyonlar ve hesaplamalar hazırlar. Mevcut tasarım (Orijinal) ile önerilen alternatif (Öneri) arasında detaylı bir teknik ve ekonomik karşılaştırma yapılır. Bu karşılaştırma, sadece ilk yatırım maliyetini değil, detaylı LCC analizini, geri ödeme sürelerini ve olası riskleri de kapsar. Ayrıca, önerinin hayata geçirilmesi durumunda ortaya çıkabilecek risklerin nasıl yönetileceği ve uygulamanın kim tarafından yapılacağını içeren bir eylem planı oluşturulur. Bu çalışmanın nihai çıktısı, karar vericilere sunulmaya hazır hale getirilmiş resmi “Değer Mühendisliği Değişiklik Önerisi” (VECP) belgesidir.

4.4.6 Sunum Aşaması

İş planının son halkası olan sunum aşaması, tüm çalışmanın işveren veya üst yönetime aktarıldığı iletişim sürecidir. DM ekibi, hazırladıkları değer mühendisliği değişiklik önerisi belgelerini (VECP) içeren kapsamlı bir nihai rapor sunarak, önerilen değişikliklerin projeye katacağı değeri kanıtlamaya çalışır. Bu sunumda sadece mali tasarruflar değil, aynı zamanda fonksiyonların, kalitenin ve performansın nasıl korunduğu veya iyileştirildiği vurgulanır. Zimmerman ve Hart (1982), sunumun başarısının, önerilerin sağlam verilere ve özellikle uzun vadeli LCC analizlerine dayandırılmasına bağlı olduğunu belirtir. Nihai karar yetkisi işverende olup, önerilerin kabulü, reddi veya revizyonuyla süreç tamamlanır.

4.5 Değer Mühendisliğinin Amaçları

Değer mühendisliği uygulamasının temel amacı, endüstride sıklıkla yanlış yorumlandığı üzere salt bir maliyet minimizasyonu veya bir ucuzlatma operasyonu değildir; aksine metodoloji, performans, kalite, güvenilirlik ve maliyet parametreleri arasındaki optimum dengeyi kurmayı hedefleyen çok boyutlu bir optimizasyon sürecidir. Metodolojinin kurucusu Lawrence D. Miles’ın da vurguladığı gibi, nihai hedef "değeri artırmaktır" ve bu artış, maliyetlerin

düşürülmesiyle sağlanabileceği gibi, aynı maliyetle fonksiyonel performansın iyileştirilmesi yoluyla da gerçekleştirilebilir.

Bu bağlamda değer mühendisliği; projenin belirlenen fonksiyonlarını yerine getirmeyen, kaliteye, kullanım ömrüne, estetiğe veya müşteri memnuniyetine herhangi bir katkı sağlamayan gereksiz maliyetlerin sistematik olarak tespit edilmesini ve elimine edilmesini amaçlar. Bu gereksiz maliyetler genellikle teknolojik alışkanlıklar, bilgi eksikliği, zaman baskısı altında alınan hatalı kararlar veya aşırı güvenli tasarım yaklaşımlarından kaynaklanmaktadır.

Metodolojinin bir diğer kritik amacı, proje kalitesinden ve kullanıcı beklentilerinden ödün vermeden kaynakların verimli kullanımını sağlamaktır. Geleneksel maliyet düşürme yöntemleri genellikle malzeme kalitesini düşürerek veya kapsamı daraltarak tasarruf sağlamaya çalışırken; Değer Mühendisliği, kalitenin korunmasını, hatta mümkünse artırılmasını bir ön koşul olarak kabul eder. Amaç, tasarımın karmaşıklığını azaltarak uygulanabilirliği artırmak ve bakım kolaylığı sağlamaktır. Bu süreçte, projenin sadece ilk yatırım maliyeti değil, tüm ekonomik ömrü boyunca oluşacak işletme, bakım ve enerji maliyetleri yani yaşam döngüsü maliyetlerinin dikkate alınarak, uzun vadeli ekonomik verimlilik hedeflenir. Özellikle inşaat projelerinde, tasarım aşamasında yapılan müdahalelerle projenin “inşa edilebilirlik” seviyesinin artırılması ve potansiyel uygulama hatalarının henüz proje aşamasındayken önlenmesi, metodolojinin proaktif amaçları arasındadır.

Teknik ve ekonomik hedeflerin yanı sıra, değer mühendisliğinin örgütsel ve iletişimsel amaçları da bulunmaktadır. İnşaat projeleri doğası gereği çok disiplinli ve karmaşık süreçlerdir; mimarlar, mühendisler, yükleniciler ve işverenler genellikle birbirinden kopuk “silo” mantığıyla çalışabilmektedir. Değer Mühendisliği atölye çalışmaları, bu farklı disiplinleri ortak bir amaç ve "fonksiyon dili" etrafında bir araya getirerek iletişimi güçlendirmeyi, disiplinler arası çatışmaları çözmeyi ve ortak bir proje kültürü oluşturmayı hedefler. Yaratıcı düşünceyi teşvik eden bu ortam, katılımcıların standart çözümlerin ötesine geçerek inovatif alternatifler üretmesini sağlar. Sonuç olarak metodoloji; kaynakların en etkin şekilde kullanıldığı, fonksiyonel gerekliliklerin tam olarak karşılandığı ve tüm paydaşların mutabık kaldığı sürdürülebilir bir proje çıktısı elde etmeyi amaçlamaktadır.

4.6 Değer Mühendisliği ile Geleneksel Maliyet Yönteminin Karşılaştırılması

Yapı işletmesi disiplininde maliyet, projenin başarısını belirleyen en temel kısıtlardan biridir. Proje bütçesini kontrol altında tutmak hem işveren hem de müteahhit için hayati önem taşır. Ancak, maliyeti kontrol etme yaklaşımı, farklı metodolojiler arasında köklü felsefi ayrımlar barındırır. Geleneksel proje yönetiminde yaygın olarak kullanılan yaklaşım, genellikle "maliyet kontrolü" veya daha reaktif bir ifadeyle "maliyet kesintisi" olarak adlandırılır. Değer mühendisliği ise, maliyeti bir sonuç olarak değil, fonksiyonel bir optimizasyonun girdisi olarak ele alan proaktif bir yaklaşım sunar (Urhan, 2004, s. 34). Bu iki yaklaşım arasındaki temel fark, projenin değerini nasıl tanımladıkları ve hangi soruları sordukları ile ilgilidir.

Geleneksel maliyet yöntemleri, genellikle bütçenin aşıldığı veya aşılma riskinin doğduğu durumlarda devreye giren reaktif bir süreçtir. Bu yaklaşım, çoğunlukla yalnızca harcamaların azaltılmasına, yani bütçe kısıtlarının sağlanmasına odaklanır. Süreç, genellikle projenin fonksiyonları ve kullanıcıya sağladığı uzun vadeli faydalar dikkate alınmadan, en ucuz alternatifi bulmaya veya mevcut tasarımdaki bazı bileşenleri ucuzlatmaya yöneliktir (Ornek, 2003, s. 218). Örneğin, bütçeyi denkleştirmek için daha düşük performanslı bir yalıtım malzemesi seçmek veya cephedeki kaliteli bir kaplamayı daha ucuz bir muadili ile değiştirmek, bu yaklaşımın tipik sonuçlarıdır. Dell'Isola (2016, s. 10), bu tür maliyet kesintilerinin projenin ilk yatırım maliyetini anlık olarak düşürse de uzun vadede artan işletme maliyetleri, sık bakım gereksinimleri ve düşük kullanıcı memnuniyeti gibi ciddi kalite kayıplarına yol açarak projenin toplam değerini düşürdüğünü vurgulamaktadır.

Buna karşın değer mühendisliği, maliyetleri fonksiyonlarla birlikte değerlendiren proaktif ve bütüncül bir yaklaşım sunar. Bu yöntem, yalnızca harcamaları kısmak yerine, projenin temel fonksiyonlarını optimum düzeyde yerine getirmesini sağlamak için gereksiz maliyetlerin elimine edilmesine odaklanır (Miles, 2015, s. 25). Böylece Değer Mühendisliği, maliyet azaltımı sağlarken aynı zamanda

kaliteyi, performansı ve işlevselliği korur, hatta çoğu durumda geliştirir (Zimmerman & Hart, 1982, s. 47).

İki yaklaşım arasındaki temel farklar, dört ana eksen üzerinden analiz edilebilmektedir.

4.6.1 Odak Noktası (Fonksiyon vs. Bileşen)

Geleneksel maliyet kontrolü, projenin bileşenlerine odaklanır ve "Bu nedir? Bunu nasıl ucuzlatırız?" sorusunu sorar. Değer Mühendisliği ise fonksiyonlara odaklanır ve "Bu ne işe yarar? Bu fonksiyonu başka nasıl sağlarız?" sorusunu sorar. Kelly, Male ve Graham (2014, s. 49), bu fonksiyonel odaklanmanın ekibi sadece malzemeyi ucuzlatmak yerine, yenilikçi alternatifleri değerlendirmeye sevk ettiğini belirtmektedir.

4.6.2 Maliyet Anlayışı (LCC vs. İlk Maliyet):

Geleneksel yöntemler neredeyse tamamen ilk yatırım maliyetine odaklanarak buzdağının su altındaki devasa işletme ve bakım maliyetlerini göz ardı eder (Dell'Isola, 1997, s. 39). Değer Mühendisliği ise projenin gerçek maliyetinin yaşam döngüsü maliyeti (LCC) olduğunu savunur ve uzun vadeli ekonomik verimliliği esas alır.

4.6.3 Zamanlama (Proaktif vs. Reaktif):

Geleneksel maliyet kesintisi, genellikle tasarımın son aşamalarında bütçe aşıldığında devreye giren bir panik müdahalesidir. Değer Mühendisliği ise, ideal olarak tasarımın henüz kilitlenmediği en erken aşamalarda uygulanan proaktif bir yöntemdir. Proje maliyetinin %80'inin tasarımın ilk %20'lik diliminde belirlendiği gerçeği, bu erken müdahalenin önemini artırmaktadır (Dell'Isola, 2016, s. 10).

4.6.4 Süreç Yönetimi (Çok Disiplinli vs. Silo):

Geleneksel kontrol genellikle tek yönlü bir muhasebe faaliyeti iken; Değer Mühendisliği, mimar, mühendis ve maliyet uzmanlarından oluşan çok disiplinli ekiplerin atölye çalışması ile yürüttüğü kolektif bir süreçtir.

Sonuç olarak; geleneksel yöntemler maliyetin kendisine odaklanırken, Değer Mühendisliği değere odaklanır. Bu bütüncül yaklaşım, özellikle yüksek ilk yatırım maliyetine karşın yüksek uzun vadeli fayda sunan yeşil çatılar gibi sürdürülebilir yapı sistemlerinde doğru stratejik kararların alınabilmesi için değer mühendisliğini vazgeçilmez kılmaktadır (Dikmeoğlu & Atabay, 2018, s. 20).

4.7 Değer Mühendisliğinin Sağladığı Yararlar

Değer Mühendisliği'nin, proje yaşam döngüsünün erken aşamalarında ve sistematik bir şekilde uygulanması, projelere, işverenlere ve tüm paydaşlara çok boyutlu ve stratejik yararlar sağlamaktadır. Bu yararlar, genellikle metodolojinin en popüler sonucu olan "maliyet tasarrufu" ile sınırlandırılamayacak kadar geniştir. Kelly, Male ve Graham (2014, s. 52) tarafından vurgulandığı üzere asıl başarı; projenin toplam "değerini" oluşturan performans, kalite, güvenilirlik ve sürdürülebilirlik unsurlarının, maliyet optimizasyonu ile eş zamanlı olarak iyileştirilmesinde yatmaktadır. Bu başlık altında metodolojinin sağladığı temel kazanımlar; ekonomik, teknik, yönetimsel ve sürdürülebilirlik boyutlarıyla analiz edilecektir.

4.7.1 Ekonomik Yararlar: Maliyet Optimizasyonu ve Yaşam Döngüsü Tasarrufu

Değer Mühendisliği'nin en somut ve ölçülebilir yararı, şüphesiz ekonomik kazanımlardır. Ancak bu kazanımlar, geleneksel maliyet kesintisinden farklı olarak, projenin fonksiyonlarından ödün verilmeden elde edilir. Metodolojinin birincil ekonomik hedefi, Miles'ın (2015, s. 28) gereksiz maliyetler olarak tanımladığı unsurların elimine edilmesidir. Fonksiyon-maliyet analizi sayesinde; gereğinden fazla tasarım, gereksiz ikincil fonksiyonlar veya altın kaplama olarak adlandırılan ve sadece prestij değeri taşıyan pahalı detaylar tespit edilir. Uluslararası raporlar, iyi yönetilen bir DM çalışmasının, projenin ilk yatırım maliyetinde %5 ila %15 arasında net tasarruf sağladığını göstermektedir (Dell'Isola, 2016, s. 14).

Ancak DM'nin asıl ekonomik gücü, Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC) üzerinde yarattığı etkidir. Bölüm 4.3.2'de detaylandırılan "buzdağı" modeli uyarınca, projenin gerçek maliyeti işletme, bakım ve enerji giderleridir. DM, LCC analizini

zorunlu kılarak; ilk yatırım maliyeti biraz daha yüksek olsa bile, uzun vadede (30-50 yıl) çok daha düşük işletme maliyeti sunan alternatiflerin seçilmesini sağlar. SAVE International verilerine göre, Değer Mühendisliği çalışmalarına harcanan her 1 birim kaynak, projeye 10 ila 30 birim arasında bir Yatırım Geri Dönüşü (ROI) sağlamaktadır (SAVE International, 2017).

4.7.2 Teknik, Kalite ve Performans Yararları

Geleneksel yöntemlerin aksine Değer Mühendisliği, kaliteyi bir maliyet kalemi olarak değil, optimize edilmesi gereken bir fonksiyon olarak görür. Süreç, "Kalite nedir?" sorusunu sormaya zorlayarak paydaşların proje için neyin gerçekten değerli olduğunu tanımlamasını sağlar. Böylece kullanıcı için öncelikli olmayan alanlarda maliyet tasarrufu yapılırken, kritik fonksiyonlardaki kalite korunur veya artırılır (Ornek, 2003, s. 222).

Ayrıca atölye çalışmaları, tasarımcıların genellikle göz ardı ettiği "İşletme ve bakım" sorunlarına odaklanır. "Bu sistemin bakımı nasıl yapılacak?" sorusunun erken aşamada sorulması; gereksiz karmaşık sistemler yerine, daha basit, kanıtlanmış ve bakımı kolay alternatiflerin tercih edilmesini sağlar. Bu durum, projenin teknik güvenilirliğini artırır ve uzun vadeli bakım risklerini minimize eder.

4.7.3 İnovasyon ve Yaratıcılığın Teşvik Edilmesi

İnşaat sektörü, doğası gereği "bu detayı hep böyle çizeriz" alışkanlığına dayalı muhafazakâr bir yapıya sahiptir. Değer Mühendisliği, bu statükoyu sorgulayan yapılandırılmış bir inovasyon sürecidir. Metodolojinin yaratıcılık aşaması, tasarım ekibini kalıpların dışına çıkmaya zorlar. Örneğin, suyu yalıtmak fonksiyonu için sadece geleneksel membranlar değil; belki de daha yeni teknolojiler olan TPO veya sürme esaslı sistemler tartışmaya açılır (Bytheway, 2007, s. 55). Disiplinler arası etkileşim, mimar, mühendis, müteahhit vb. farklı bilgi birikimini birleştirerek projenin teknolojik olarak güncel kalmasını sağlar.

4.7.4 Yönetimsel ve Sosyal Yararlar

Metodolojinin belki de en az ölçülebilen ancak en kalıcı yararı, proje ekibi üzerindeki yönetimsel etkisidir. VE atölye çalışması, normalde proje döngüsünde

birbirinden kopuk çalışan paydaşları (mimarlar, mühendisler, maliyet uzmanları, işletmeciler) aynı masaya oturtarak “iletişim silolarını” yıkar. Ortak bir “fonksiyon dili” oluşturulması, disiplinler arası empatiyi artırır ve çatışmaları çözer (Ornek, 2003, s. 224). Ayrıca kararların “kanaat” yerine “veri” (LCC, fonksiyon analizi) ile alınması, karar alma süreçlerini rasyonel, şeffaf ve savunulabilir hale getirir. Erken aşamada yapılan bu analizler, potansiyel hataları inşaat başlamadan çözdüğü için, maliyetli değişiklik emirlerini ve hukuki anlaşmazlıkları büyük ölçüde azaltır.

4.7.5 Sürdürülebilirlik Hedeflerine Katkı

Değer Mühendisliği, sürdürülebilirliğin ekonomik ayağını güçlendiren en önemli araçtır. Yeşil bina uygulamalarının (örneğin yeşil çatılar) önündeki en büyük engel olan "yüksek ilk yatırım maliyeti" algısı, DM'nin LCC analizi ile kırılır. Metodoloji, bu sistemlerin uzun vadede (enerji tasarrufu, çatı ömrü uzaması) geleneksel sistemlerden daha ekonomik olduğunu parasal olarak kanıtlayarak, işvereni sürdürülebilir yatırıma ikna eder (Dikmeoğlu & Atabay, 2018, s. 20). Ayrıca, gereksiz maliyetlerin ve dolayısıyla gereksiz malzeme/enerji kullanımının önlenmesi, doğrudan kaynak verimliliği ve atık azaltımı hedeflerine hizmet eder.

4.8 Değer Mühendisliği Takım Elemanları ve Karar Vermede Etkileri

Değer Mühendisliği metodolojisinin başarısı, kullanılan fonksiyon analizi, LCC vb. analitik araçlar kadar, bu araçları kullanan ekibin yapısına ve çalışma dinamiklerine de bağlıdır. DM, tek bir uzmanın tek başına yürütebileceği bir masa başı faaliyeti değildir. Aksine, metodolojinin özü; projenin geleneksel “silo” yapısını kıran, çok disiplinli bir ekip tarafından, yapılandırılmış bir atölye çalışması formatında yürütülen yoğun bir iş birliği sürecidir (Dell'Isola, 2016, s. 46). Bu ekip, projenin değerini maksimize etmek için farklı bakış açılarını, uzmanlıkları ve yaratıcı fikirleri tek bir hedefe, yani fonksiyon optimizasyonuna yönlendirir (Miles, 2015, s. 31).

Geleneksel proje yönetiminde, tasarım kararları genellikle mimar ve mühendisler tarafından alınır, maliyet kontrolü satın alma departmanı tarafından yapılır ve

işletme sorunları ancak bina bittikten sonra dile getirilir. Bu parçalı yaklaşım, çatışmalara, maliyet aşımlarına ve optimum olmayan (düşük değerli) çözümlere yol açar. Değer Mühendisliği ekibi ise, tüm bu kilit paydaşları henüz tasarım kâğıt üzerindeyken aynı masaya oturtarak bu sorunları proaktif olarak çözmeyi hedefler (Zimmerman & Hart, 1982, s. 62).

4.8.1 Moderatör (Kolaylaştırıcı) ve Süreç Yönetimi

Değer Mühendisliği çalışmasının merkezinde, süreci teknik içerikten ziyade metodolojik disiplinle yöneten moderatör veya literatürdeki adıyla "Kolaylaştırıcı" bulunmaktadır. Genellikle uluslararası akreditasyona sahip bir Sertifikalı Değer Uzmanı (CVS) olan bu kişi, projenin teknik kararlarına doğrudan müdahale etmez; bunun yerine Değer Mühendisliği İş Planı'nın aşamalarının doğru, eksiksiz ve zamanında uygulanmasından sorumludur. moderatörün karar verme sürecindeki en hayati rolü, takım içerisindeki iletişim engellerini kaldırmak ve "psikolojik güvenlik" ortamını sağlamaktır. İnşaat projelerinde sıklıkla görülen baskın karakterlerin, diğer disiplinlerin fikirlerini bastırmasını engellemek moderatörün görevidir. Dell'Isola (2016), moderatörün varlığının, teknik uzmanların kendi disiplinlerine aşırı odaklanma eğilimini kırdığını ve onları sürekli olarak "Bu parçanın maliyeti nedir?" sorusundan "Bu fonksiyonun değeri nedir?" sorusuna yönlendirdiğini belirtir.

4.8.2 Teknik Disiplin Temsilcileri ve Sinerjik Etki

Takımın entelektüel sermayesini ve teknik çekirdeğini; projenin niteliğine göre özenle seçilen mimar, inşaat mühendisi, makine mühendisi, elektrik mühendisi ve peyzaj mimarı gibi disiplin temsilcileri oluşturur. Kelly, Male ve Graham (2014), bu üyelerin etkisinin sadece kendi teknik alanlarıyla sınırlı kalmaması gerektiğinin altını çizer. Değer Mühendisliği'nin en güçlü inovasyon kaynağı "çapraz döllenme" ilkesidir; yani bir disiplinin probleminin, başka bir disiplinin bakış açısıyla çözümlenmesidir. Örneğin, bir makine mühendisinin mekanik hacmi azaltmak için önerdiği radikal bir iklimlendirme çözümü, mimarın alan kullanım kararlarını değiştirebilir. Bu nedenle takım üyeleri, sadece kendi alanlarının savunucusu değil, projenin bütününün tasarımcısı gibi hareket ederler. Bu multidisipliner etkileşim,

sıradan bir tasarım toplantısında ortaya çıkması mümkün olmayan hibrit çözümlerin doğmasını sağlar.

4.8.3 Maliyet Uzmanının Analitik Rolü ve Ekonomik Gerçeklik

Değer mühendisliğinin, soyut bir beyin fırtınasından somut bir iş planına dönüşmesini sağlayan, sürecin "ekonomik vicdanı" olarak nitelendirilebilecek aktör maliyet uzmanıdır. Yaratıcılık aşamasında üretilen yüzlerce fikrin ekonomik olarak uygulanabilir olup olmadığı, maliyet uzmanının sağlayacağı anlık ve gerçekçi piyasa verilerine bağlıdır. Maliyet uzmanının sorumluluğu sadece ilk yapım maliyetini hesaplamakla sınırlı değildir; aynı zamanda önerilen sistemlerin bakım, onarım ve enerji tüketimi giderlerini içeren yaşam döngüsü maliyeti (LCC) analizlerini de yürütür. Karar matrislerinde ekonomik puan genellikle en yüksek ağırlığa sahip olduğundan, maliyet uzmanının sunduğu veriler, bir fikrin elenip elenmeyeceğini belirleyen en kritik faktördür.

4.8.4 İşveren Temsilcisi ve Değerin Tanımlanması

Son olarak, İşveren (Yatırımcı) veya Kullanıcı Temsilcileri, sürecin sadece izleyicisi değil, özellikle hedef belirleme ve karar kriterlerini ağırlıklandırma aşamalarının en belirleyici aktörüdür. Değer kavramı öznel bir doğaya sahiptir ve bir proje için neyin değerli olduğuna karar verecek nihai otorite işverendir. İşveren temsilcisi, çalışmanın başında projenin stratejik hedeflerini takıma aktarır ve alternatiflerin değerlendirileceği ağırlıklı değerlendirme matrisindeki kriterleri (örneğin Estetik %20, Maliyet %40, Sürdürülebilirlik %30 gibi) belirler. Dolayısıyla teknik ekip alternatifleri üretip analiz etse de pusulanın yönünü belirleyen mekanizma işveren beklentileridir. İşverenin sürece aktif katılımı, ortaya çıkan önerilerin sahiplenilmesini ve hayata geçirilme olasılığını artırır.

4.9 Değer Mühendisliğinin Malzeme Seçiminde Kullanılması

İnşaat projelerinin maliyet yapısı incelendiğinde, toplam bütçenin %50 ila %60'ını oluşturan malzeme giderleri, projenin ekonomik başarısını belirleyen en kritik kalemlerin başında gelmektedir. Bu nedenle Değer Mühendisliği metodolojisinin en sık ve en etkin uygulandığı alan, tasarım aşamasındaki malzeme seçimi ve spesifikasyonların belirlenmesi sürecidir. Geleneksel tasarım süreçlerinde malzeme

kararları genellikle tasarımcının geçmiş alışkanlıklarına, estetik tercihlerine veya sınırlı tedarikçi kataloglarına dayanarak verilirken; DM bu süreci fonksiyonel gereklilikler ve performans kriterleri eksenine oturtarak rasyonelleştirir.

Dell'Isola (2016), malzeme seçiminde Değer Mühendisliği yaklaşımının temel prensibini; belirli bir markayı veya ürünü değil, o ürünün sağlaması gereken dayanım, ısı geçirgenliği, akustik yalıtım vb. performans özelliklerini tanımlanması olarak açıklamaktadır. Bu yaklaşım, "marka bağımlı" şartnameler yerine "performans esaslı" şartnamelerin hazırlanmasını teşvik eder. Böylece yüklenicilerin, aynı teknik özellikleri sağlayan ancak daha ekonomik, daha verimli veya temini daha kolay alternatif malzemeleri önermesine yasal ve teknik bir zemin hazırlanır.

Değer Mühendisliği kapsamında malzeme seçimi yapılırken, sadece birim fiyat odaklı sığ bir karşılaştırma yapılmaz; malzeme, projenin bütününe olan etkisi ve yaşam döngüsü performansı ile bütüncül olarak değerlendirilir. Örneğin, bir zemin kaplama malzemesi seçilirken sadece ilk satın alma maliyeti değil; temizlik kimyasallarına dayanıklılığı, bakım sıklığı, kaydırmazlık özelliği, estetik ömrü ve yenilenme maliyeti gibi faktörler bir arada analiz edilir.

Kelly, Male ve Graham (2014), bu çok kriterli karar verme sürecinin yönetilebilmesi için Değer Mühendisliği atölyelerinde "Ağırlıklı Değerlendirme Matrisi" tekniğinin kullanıldığını belirtir. Bu matris sayesinde; estetik, dayanıklılık, temin süresi, yerellik ve sürdürülebilirlik gibi parasal olmayan nitel kriterler sayısal verilere dönüştürülür. Takım üyeleri, alternatif malzemeleri bu kriterlere göre puanlayarak, hangi malzemenin maliyet ve kalite dengesi açısından en yüksek performansı sunduğunu objektif bir şekilde tespit eder. Bu yöntem, sübjektif tartışmaları elimine ederek, kararların veriye dayalı olmasını sağlar.

Metodolojinin malzeme seçimindeki bir diğer kritik boyutu, "ikame" kavramı ile "kalite düşürme" kavramı arasındaki kesin çizgidir. Değer Mühendisliği çalışmaları sonucunda önerilen bir malzeme değişikliği, asla projenin temel fonksiyonlarından veya kalitesinden ödün verilmesi anlamına gelmez. Amaç, Miles'ın (2015) tanımladığı gibi, fonksiyonu aynı güvenilirlik seviyesinde yerine getiren daha ekonomik bir çözüm bulmaktır. Örneğin, görünmeyen bir altyapı detayında ithal ve yüksek maliyetli bir paslanmaz çelik yerine, aynı korozyon direncine sahip yerli

üretim galvanizli bir malzemenin kullanılması, fonksiyonu koruyarak değeri artıran tipik bir Değer Mühendisliği uygulamasıdır.

Günümüzde bu süreç, "çevresel etki" parametresinin de denkleme girmesiyle daha karmaşık bir hal almıştır. Sürdürülebilir yapılar için malzeme seçiminde; malzemenin karbon ayak izi, geri dönüştürülmüş içerik oranı ve yerel temin edilebilirliği gibi faktörler, maliyet kadar belirleyici hale gelmiştir. Sonuç olarak Değer Mühendisliği, malzeme seçimini statik bir katalog taramasından çıkarıp; maliyet, performans, estetik ve sürdürülebilirlik parametrelerinin optimize edildiği dinamik bir mühendislik sürecine dönüştürmektedir.

Bu bölümde incelenen teorik çerçeve göstermektedir ki; Değer Mühendisliği, özellikle yeşil çatılar gibi yüksek ilk yatırım maliyetine sahip, çok katmanlı ve sürdürülebilirlik odaklı sistemlerde malzeme seçimi için ideal bir metodolojidir. Yöntem, karar sürecini "en ucuz malzemeyi seçme" basitliğinden, "en yüksek değeri sağlayan fonksiyonel çözümü bulma" analizine yükseltmektedir.

Bir sonraki bölümde, önceki bölümlerde teknik detayları verilen yeşil çatı sistemleri ile metodolojik altyapısı kurulan Değer Mühendisliği yaklaşımı birleştirilecektir. Bu kapsamda, teorik bilgiler somut bir modele dönüştürülerek, yeşil çatı bileşenlerinin malzeme seçiminde değer esaslı bir karar destek modelinin nasıl uygulanacağı adım adım ortaya konulacaktır.

5
YEŞİL ÇATILARDA KULLANILACAK MALZEMELERİN DEĞER MÜHENDİSLİĞİ YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ

Bu tez çalışmasının önceki bölümlerinde, konunun teorik ve teknik altyapısı literatürdeki güncel çalışmalar ışığında kapsamlı bir şekilde ortaya konulmuştur. Bölüm 2'de sürdürülebilirlik kavramı ve ilkeleri; Bölüm 3'te yeşil çatı sistemlerinin teknik katmanları ve malzeme alternatifleri; Bölüm 4'te ise tezin metodolojik omurgasını oluşturan Değer Mühendisliği kavramı, temel araçları ve standart iş planı detaylıca incelenmiştir.

İçinde bulunduğumuz Bölüm 5, tezin özgün katkısını oluşturan ve tüm teorik bilgilerin somut bir modele dönüştürüldüğü uygulama bölümüdür. Bu bölümün temel amacı; önceki bölümlerde ayrı ayrı ele alınan yeşil çatı teknolojisi ile Değer Mühendisliği metodolojisini sentezleyerek tezin ana araştırma sorusuna yanıt vermektir. Bu doğrultuda, Bölüm 4'te teorisi anlatılan metodoloji, yeşil çatı sistemlerinin en kritik karar aşaması olan "malzeme seçimi" problemine uygulanacaktır.

Bu uygulamanın yapılmasındaki temel amaç; Türkiye inşaat sektöründe yaygın olan "en düşük ilk yatırım maliyeti" odaklı geleneksel karar verme anlayışının yerine, "en yüksek değeri" hedefleyen sistematik bir model önerilmesidir. Bu tez kapsamında "Değer" kavramı, aşağıdaki formülasyon ile tanımlanmakta ve tüm analizler bu denklem (5.1) üzerine kurulmaktadır:

$$Değer = \frac{Fonksiyon + Kalite}{Yaşam\ Döngüsü\ Maliyeti\ (LCC)} \tag{5.1}$$

Geliştirilecek olan bu analitik model, sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda yeşil çatı malzemelerinin teknik performansını ve yaşam döngüsü maliyetini bir arada optimize edecek rasyonel bir karar verme çerçevesi sunacaktır. Modelin

uygulanması sürecinde, standart Değer Mühendisliği İş Planı (Bilgi, Fonksiyon Analizi, Yaratıcılık, Değerlendirme, Geliştirme) tez problemine uyarlanarak adım adım takip edilecek ve örnek bir vaka analizi (Balıkesir'de bir AVM çatısı) üzerinden somutlaştırılacaktır.

5.1 Araştırmanın Metodolojisi ve Uygulama Çerçevesi

Bu çalışmanın metodolojik omurgası, Yapı İşletmesi disiplininde karmaşık problemlerin çözümü için yaygın olarak kullanılan ve uluslararası standartlarla (SAVE International, 2017; ASTM International, 2020) çerçevesi çizilmiş olan Değer Mühendisliği (DM) İş Planı'nın, yeşil çatı malzeme seçimi problemine uyarlanmasına dayanmaktadır.

Geliştirilen bu analitik model, yeşil çatı sistemlerini sadece estetik veya çevresel bir öğe olarak değil, fonksiyonel ve ekonomik bir yatırım aracı olarak ele alır. Metodoloji, kalitatif veriler (fonksiyon tanımları, paydaş öncelikleri, estetik beklentiler) ile kantitatif verileri (maliyet analizi, teknik performans puanları, ısı iletkenlik katsayıları) entegre ederek, çok kriterli bir karar verme problemini (MCDM) rasyonel bir zemine oturtmayı hedeflemektedir. Bölüm 4'te teorik altyapısı detaylandırılan Değer Mühendisliği İş Planı'nın altı temel aşaması (Bilgi, Fonksiyon Analizi, Yaratıcılık, Değerlendirme, Geliştirme, Sunum), bu bölümde bir vaka analizi üzerinden adım adım uygulanarak, "Türkiye koşullarında en değerli yeşil çatı sistemi hangisidir?" sorusuna yanıt aranacaktır.

5.1.1 Temel Vaka (Benchmark Case) Tanımlanması

Geliştirilecek modelin uygulanabilirliğini test etmek ve farklı sistem alternatiflerini adil bir zeminde karşılaştırabilmek amacıyla, spesifik ve gerçekçi verilere dayalı bir "Temel Vaka" kurgulanmıştır. Bu kapsamda yapı tipolojisi olarak; geniş ve genellikle âtıl durumda olan düz çatı alanlarına sahip olmaları, yüksek soğutma yükleri nedeniyle enerji tüketimlerinin yoğunluğu ve kentsel ısı adası etkisine olan olumsuz katkıları nedeniyle Alışveriş Merkezi (AVM) yapısı tercih edilmiştir.

Vaka analizinin lokasyonu olarak ise Balıkesir ili Merkez ilçesi belirlenmiştir. Bu seçimin temelinde iki stratejik neden yatmaktadır. İlk olarak Balıkesir; Marmara ve

Ege bölgeleri arasında bir geçiş kuşağında yer alarak tipik Akdeniz iklimi özellikleri göstermektedir. Yazların sıcak ve kurak, kışların ise ılık ve yağışlı geçtiği bu iklim profili, yeşil çatı sisteminin hem yaz aylarındaki "soğutma/enerji tasarrufu" performansının hem de kış aylarındaki "yağmur suyu yönetimi" kapasitesinin test edilmesi için zengin bir veri seti sunmaktadır. İkinci olarak ise bölge, hızla gelişen sanayi ve ticaret hacmiyle, sürdürülebilir yapı uygulamaları için henüz doyuma ulaşmamış yüksek potansiyelli bir pazar niteliği taşımaktadır.

Analize konu olan çatı; toplam 2.000 m² alana sahip, erişilebilir, %2 eğimli, düz bir betonarme teras çatıdır. Yapının henüz tasarım aşamasında olduğu varsayıldığından, taşıyıcı sistemin hem hafif ekstensif yüklere hem de ağır intensif yüklere göre optimize edilebileceği kabul edilmiştir. İşveren beklentileri noktasında ise öncelikli hedef, enerji maliyetlerini düşürmek ve sürdürülebilir bir kurumsal imaj yaratmaktır. Yatırımcı tarafında ilk yatırım maliyeti konusunda bütçe hassasiyeti bulunmakla birlikte, yatırımın geri dönüş süresinin (ROI) makul olması durumunda bütçe esnekliği sağlanabileceği varsayılmıştır.

5.1.2 Karşılaştırmalı Senaryoların Tanımlanması

Tanımlanan bu temel vaka üzerinde, Değer Mühendisliği metodolojisinin analiz gücünü ortaya koymak amacıyla üç farklı çatı sistemi senaryosu kurgulanmıştır. Aşağıda bu senaryolar detaylandırılmıştır.

5.1.2.1 Senaryo 1: Geleneksel Çatı (Kontrol Grubu)

Türkiye inşaat pazarındaki standart, yeşil olmayan uygulamayı temsil eder. Fonksiyonu sadece suyu engellemek ve ısıyı yalıtmaktır. Katmanları; betonarme döşeme, eğim betonu, standart bitümlü su yalıtımı, XPS ısı yalıtımı (ters çatı) ve koruyucu çakıl katmanından oluşur. Bu senaryo, diğer alternatiflerin maliyet ve performans açısından kıyaslanacağı referans noktasını oluşturacaktır.

5.1.2.2 Senaryo 2: Ekstensif (Sığ) Yeşil Çatı

Önceki bölümlerde teknik detayları verilen, düşük bakım gerektiren ve erişilemeyen ekolojik koruma örtüsüdür. Temel fonksiyonları; suyu engellemek, enerjiyi yönetmek ve habitat sağlamaktır. Genellikle kesiti; kök dayanımlı yalıtım,

koruma keçesi, drenaj levhası, filtre, 10-15 cm hafif (ponza bazlı) substrat ve Sedum bitki örtüsünden oluşur. Minimum yaşam döngüsü maliyeti ile maksimum ekolojik faydayı hedefleyen "yüksek performans" alternatifidir.

5.1.2.3 Senaryo 3: İntensif (Derin) Yeşil Çatı:

Önceki bölümlerde tanımlanan, erişilebilir ve yüksek bakım gerektiren "çatı parkı" modelidir. AVM çatısının bir bölümünün rekreasyon alanı olarak kullanılacağı varsayılır. Temel fonksiyonu; alan yaratmak, estetik değer katmak ve prestij sağlamaktır. Kesiti; ağır hizmet tipi yalıtım, su depolamalı drenaj, 30-50 cm derin substrat, çim, çalılar ve sulama sistemini içerir. Yüksek ilk yatırım ve bakım maliyetine karşılık, yüksek "itibar değeri" sunan alternatiftir.

5.1.3 Araştırma ve Modelin İş Akışı

Bu bölümde uygulanan metodoloji, 6 aşamalı Değer Mühendisliği İş Planı'nı takip eden sistematik bir akışa sahip olacaktır. Süreç, Bilgi Toplama (Aşama 1) ile başlar; bu aşamada üç senaryo için Balıkesir koşullarına uygun detaylı maliyet (İYM ve LCC) ve teknik performans verileri toplanacak ve ardından Fonksiyon Analizi (Aşama 2) ile her senaryonun fonksiyonları (Fiil + İsim) tanımlanır ve maliyetler bu fonksiyonlara atanarak "düşük değerli" alanlar tespit edilecektir.

Tespit edilen problemlere çözüm aranan Yaratıcılık (Aşama 3) evresinde, özellikle drenaj ve substrat katmanları için yerel ve yenilikçi malzeme alternatifleri listelenecektir. Bu alternatifler, Değerlendirme (Aşama 4) sürecinde AVM işvereninin önceliklerine göre ağırlıklandırılmış kriterlerle (Maliyet, Performans, Sürdürülebilirlik vb.) puanlanır ve "Değer İndeksi" hesaplanır ve son olarak Geliştirme ve Sunum (Aşama 5-6) evresinde, en yüksek puanı alan bileşenler bir araya getirilerek optimum sistem önerisi oluşturulacaktır. Geleneksel Çatı ile karşılaştırmalı olarak raporlanacak ve bu akış, "Balıkesir'deki bir AVM için en değerli çözüm nedir?" sorusuna, sezgisel değil, matematiksel ve kanıta dayalı bir yanıt verilmesini sağlayacaktır.

5.2 Aşama 1: Bilgi Toplama- Vaka Verilerinin ve Maliyet Parametrelerinin Belirlenmesi

Değer Mühendisliği İş Planı'nın temelini oluşturan Bilgi Toplama aşaması, sonraki evrelerde yapılacak fonksiyonel ve ekonomik analizlerin doğruluğunu belirleyen en kritik süreçtir. Dell'Isola (2016), bu aşamadaki veri eksikliğinin veya hatalı varsayımların, tüm çalışmayı "Çöp İçeri, Çöp Dışarı" kısır döngüsüne sokacağı konusunda uyarmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada, Balıkesir AVM vaka analizi için sadece genel proje bilgileri değil; iklimsel zorluklar, işveren hedefleri, teknik kısıtlar ve piyasa gerçeklerini yansıtan detaylı maliyet parametreleri (İYM ve LCC) çok boyutlu bir matris içerisinde toplanmıştır. Toplanan bu veriler, ilerleyen bölümlerde su yalıtımı, drenaj ve substrat gibi her bir bileşenin ayrı ayrı analize tabi tutulacağı "Bileşen Bazlı Değer Mühendisliği" yaklaşımının temel girdilerini oluşturmaktadır.

5.2.1 Performans Verilerinin, Hedeflerin ve Kısıtların Belirlenmesi

Yeşil çatı Değer analizi, sadece maliyete odaklanan tek boyutlu bir süreç değil, fonksiyonun ne düzeyde yerine getirildiğini irdeleyen performans odaklı bir metodolojidir. Bu nedenle, maliyet analizinden önce, tasarımın başarısını ölçecek teknik ve çevresel performans kriterlerinin netleştirilmesi gerekmektedir.

Yeşil çatı bileşenlerinin performansını belirleyen en temel dış faktör, projenin yer aldığı coğrafyanın iklimsel verileridir. Vaka analizi için seçilen Balıkesir ili, Köppen İklim Sınıflandırmasına göre Akdeniz iklimi ile karasal iklim arasında bir geçiş kuşağında yer almaktadır. Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) verilerine göre, bölgenin yazları sıcak ve kurak (Temmuz-Ağustos> 30°C), kışları ise ılık ve yağışlıdır. Bu spesifik iklimsel profil, yeşil çatı analizi için iki kritik performans göstergesi sunmaktadır:

Yaz performansı için yüksek sıcaklıklar binanın soğutma enerjisi ihtiyacını artırmakta, bu durum yeşil çatıların enerji tasarrufu ve serinletme fonksiyonlarının değerini maksimize etmektedir.

Kış performansında kış aylarında yoğunlaşan yağışlar, yağmur suyu yönetimi ve drenaj kapasitesinin, kentsel sel riskini azaltmadaki önemini vurgulamaktadır. Ancak yaz kuraklığı, özellikle İntensif sistemler için kalıcı bir sulama ihtiyacı

doğurmakta, bu da işletme maliyetlerini artıran bir kısıt olarak analize dahil edilmektedir.

Analizin bir diğer sacayağı, AVM yatırımcısının beklenti ve hedefleridir. Projenin birincil ekonomik hedefi, yaz aylarındaki yüksek soğutma yüklerini minimize etmektir. Sosyal ve pazarlama hedefi olarak, LEED veya BREEAM gibi sertifikasyon süreçlerine katkı sağlayacak sürdürülebilir bir kurumsal imaj yaratılması amaçlanmaktadır. Fonksiyonel açıdan ise, İntensif sistem alternatifi için çatının bir kısmının ziyaretçilere açık bir rekreasyon alanına dönüştürülerek ek ticari gelir elde edilmesi hedeflenmektedir. Bu hedeflere ulaşılırken, İlk Yatırım Maliyeti konusunda bütçe disiplininin sağlanması temel bir kısıttır; ancak Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC) analizinde uzun vadeli ekonomik avantajların kanıtlanması durumunda, başlangıç bütçesinde esneklik sağlanabileceği varsayılmıştır.

Teknik kısıtlar ve performans verileri ise FLL (2018) Yeşil Çatı Yönergeleri ve TS EN standartlarına dayandırılmıştır. Taşıyıcı sistemin Ekstensif (150 kg/m²) veya İntensif (500 kg/m²) yüklere göre optimize edilmesi durumunda ortaya çıkacak ek strüktürel maliyetler LCC analizine dahil edilmiştir.

5.2.2 Maliyet Verilerinin Belirlenmesi: İlk Yatırım Maliyeti ve LCC Parametreleri

Değer Analiz süreci, salt ilk yapım maliyetine odaklanan geleneksel yaklaşımın aksine, önceki bölümlerde teorik çerçevesi çizilen Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC) ilkelerine ve ASTM E917 standartlarına göre kurgulanmıştır.

5.2.2.1 Analiz Parametreleri:

- **Analiz Süresi (N)**

Ticari bir yapı olan AVM'nin ekonomik ömrü ve çatı su yalıtım sistemlerinin yenilenme döngüleri dikkate alınarak 40 yıl olarak belirlenmiştir. Getter ve Rowe (2006) tarafından belirtildiği üzere; geleneksel bir çatının ortalama 20 yıllık ömrü nedeniyle analiz süresi boyunca en az bir kez tamamen yenilenmesi gerekirken, yeşil çatı katmanlarıyla korunan bir su yalıtımının 40 yılı aşan ömrü sayesinde yenileme gerektirmemesi bu sürenin seçimindeki temel matematiksel gerekçedir.

- **İskonto Oranı (r)**

Gelecekteki nakit akışlarının bugünkü değere indirgenmesi sürecinde, Türkiye'nin ekonomik dinamikleriyle uyumlu olarak %8 reel iskonto oranı tercih edilmiştir. Türkiye gibi yüksek enflasyonist süreçlerden geçen ekonomilerde nominal oranların sergilediği aşırı oynaklık, projenin uzun vadeli verimlilik analizini saptırabilmektedir. Bu nedenle, çalışmada kullanılan tüm nakit akışları enflasyon etkisinden arındırılarak sabit fiyatlarla ele alınmış; buna paralel olarak iskonto oranı da paranın zaman tercihini ve "enflasyon üzeri" reel getiri beklentisini yansıtacak şekilde belirlenmiştir. Belirlenen %8'lik oran, gelişmekte olan piyasalara özgü ülke risk primini (CDS) ve sermaye maliyetini kapsarken, aynı zamanda Dünya Bankası ve IMF gibi uluslararası kuruluşların benzer pazarlar için öngördüğü %5-10 aralığındaki sosyal iskonto oranı standartlarıyla da tam uyum sağlamaktadır. Bu metodolojik yaklaşım, makroekonomik dalgalanmaların yarattığı belirsizlikleri elimine ederek yatırımın gerçek katma değerinin objektif bir biçimde analiz edilmesine olanak tanımıştır.

- **İskonto Maliyet Baz Yılı**

Analiz kapsamındaki tüm hesaplamalar, 2024/2025 yılı Türk Lirası (TL) piyasa fiyatlarına endekslenmiştir. Çalışmada ekonomik öngörülebilirlik ve tutarlılığı sağlamak amacıyla, tablolar ve projeksiyonlar genelinde ABD doları kuru sabit 40 TL/USD kabul edilerek hesaplamalar bu baz değer üzerinden yürütülmüştür.

5.2.2.2 İlk Yatırım Maliyeti (İYM) Veri Seti ve Senaryo Analizleri

Analizin temel girdisi olan İlk Yatırım Maliyeti (İYM) veri tabanı, piyasa gerçekliğini ve resmi geçerliliği sağlamak adına hibrit bir yöntemle oluşturulmuştur. Betonarme imalatlar, eğim şapları ve standart yalıtım kalemleri için Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın güncel "Yapı İşleri Birim Fiyatları" esas alınırken; Bakanlık poz listelerinde bulunmayan spesifik yeşil çatı bileşenleri (drenaj levhaları, kök koruma folyoları, özel substrat karışımları) için sektörde faaliyet gösteren uzman uygulayıcı firmalardan alınan ortalama piyasa teklifleri kullanılmıştır. Bu maliyet verileri ışığında senaryoların finansal profilleri şu şekilde yapılandırılmıştır:

- **Senaryo 1 (Geleneksel Çatı)**

Analizlerde referans noktası olarak kabul edilen Senaryo 1, Türkiye inşaat sektöründeki standart "ters teras çatı" detayına sahiptir. Bu senaryoda maliyet yapısı; betonarme döşeme üzerine uygulanan eğim betonu, herhangi bir kök dayanım özelliği aranmayan standart bitümlü su yalıtım örtüleri, ısı yalıtımı sağlayan XPS levhalar ve sistemi UV ışınlarından koruyan dere çakılı balast katmanından oluşur. Kullanılan malzemelerin yaygınlığı (emtia ürünler olması) ve işçilik kolaylığı nedeniyle bu seçenek, en düşük ilk yatırım maliyetine sahip alternatiftir.

- **Senaryo 2 (Ekstensif Yeşil Çatı)**

Ekstensif yeşil çatı, Geleneksel çatıya kıyasla bir maliyet artışı içerir; ancak bu artış, sistemin performansını yükselten teknik katmanlardan kaynaklanır. Burada standart su yalıtımı yerine, FLL sertifikalı kök dayanımına sahip, yüksek performanslı sentetik (PVC veya TPO) membranlar kullanılması zorunludur. Ayrıca, sistemin öhidrolojik dengesini sağlayan nem tutucu keçeler ve polistiren drenaj levhaları maliyete eklenir. Sistemin en üst katmanında ise, binaya binen statik yükü minimize etmek (yaklaşık 100-150 kg/m²) amacıyla, yerel ve ekonomik bir hammadde olan ponza taşı esaslı 10-15 cm'lik hafif substrat ve kuraklığa dayanıklı Sedum bitki örtüsü tercih edilmiştir. Bu senaryo, maliyet ve ekolojik fayda dengesini gözeten orta yol seçeneğidir.

- **Senaryo 3 (İntensif Yeşil Çatı)**

En yüksek maliyet profilini çizen Senaryo 3 (İntensif Yeşil Çatı) ise sadece bir peyzaj uygulaması değil, ciddi bir inşaat yatırımıdır. Bu senaryoda maliyetleri yukarı çeken ana etken, 30-50 cm derinliğindeki toprak yükü ve yoğun bitki örtüsünün (çim, çalı, ağaççık) getirdiği 500 kg/m²'yi aşan ağırlıktır; bu durum çatı döşemesinde ciddi bir yapısal güçlendirme maliyeti (ek donatı ve beton kalınlığı) doğurabilmektedir. Ayrıca, sistemin su ihtiyacını karşılayacak tam otomatik sulama otomasyonu, su depolama kapasiteli özel drenaj sistemleri ve yürüyüş yolları gibi sert zemin imalatları, ilk yatırım bütçesini geleneksel çatının katbekat üzerine çıkarmaktadır.

5.2.2.3 Yaşam Döngüsü Maliyet (LCC) Parametrelerinin Detaylandırılması

Analizin ikinci ve belirleyici bileşeni olan Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC) veri seti; Balıkesir'in karakteristik sıcak iklim özellikleri ve çatı sistemlerinin yapısal dayanıklılık farkları ekseninde kurgulanmıştır. Bu kapsamda, analizin nihai ekonomik sonucu olan Değer İndeksini tayin eden enerji verimliliği, işletme/bakım giderleri ve yenileme senaryolarına ait temel parametreler aşağıda detaylandırılmıştır.

- **Enerji maliyetleri**

Geleneksel çatı yüzeylerinin, özellikle yaz aylarında güneş radyasyonunu absorbe ederek 60-70°C gibi ekstrem yüzey sıcaklıklarına ulaşması, bina kabuğundan içeriye sızan ısı akısını artırarak soğutma yüklerini maksimize etmektedir. Buna karşın yeşil çatı sistemlerinin sunduğu gölgeleme, bitkisel terleme (evapotranspirasyon) ve toprak tabakasının sağladığı yüksek termal kütle etkisi, bu ısı transferini dramatik şekilde yavaşlatmaktadır. Çalışmada kullanılan %20 (ekstensif) ve %35 (intensif) yıllık enerji tasarrufu öngörüleri; benzer Akdeniz-Ege geçiş iklim kuşağındaki binalar üzerinde yapılan ampirik çalışmalar, ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) enerji modelleme rehberleri ve enerji simülasyon yazılımlarından elde edilen veriler referans alınarak belirlenmiştir. Bu tasarruf miktarları, bölgedeki güncel ticari/mesken elektrik birim fiyatları (kWh) üzerinden hesaplanarak LCC analizine bir gider kalemi olarak değil, sistemin sağladığı bir "negatif maliyet" (finansal kazanç) olarak işlenmiştir.

- **İşletme giderleri (OpEx)**

Yaşam döngüsü maliyet analizinin işletme safhasında, senaryolar arasındaki maliyet ayrışmaları 2024/2025 yılı Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı birim fiyatları, yerel su tarifeleri ve güncel enerji maliyetleri temel alınarak modellenmiştir. Geleneksel ve ekstensif sistemler, minimum bakım ihtiyacı ve kurulum sonrası sulama gerektirmeyen bitki yapıları sayesinde düşük bir maliyet profili sergilerken; bu kalemler piyasadaki standart teknik rehberler referans alınarak analize dahil edilmiştir. Buna karşın intensif sistemler, Balıkesir'in kurak yaz aylarındaki yüksek buharlaşma (evapotranspirasyon) oranlarına bağlı olarak yoğun sulama ve pompa enerjisi tüketimi gerektirmekte; ayrıca düzenli bahçıvanlık

hizmeti (budama, gübreleme, bitki sağlığı) ihtiyacı nedeniyle LCC tablosunda en yüksek operasyonel gider kalemini oluşturmaktadır. Bu metodolojik yaklaşım, sistemlerin 40 yıllık analiz süresince tüketeceği kaynakların Türkiye'nin mevcut ekonomik konjonktürüyle uyumlu ve objektif bir biçimde karşılaştırılmasını sağlamıştır.

- **Yenileme maliyetleri**

Analiz kapsamında sistemlerin yenileme döngüleri, yapı malzemelerinin fiziksel yaşlanma süreçlerini inceleyen ampirik çalışmalar ve FLL (Landscape Development and Landscaping Research Society) gibi uluslararası otoritelerin teknik standartları çerçevesinde belirlenmiştir. Geleneksel çatılarda su yalıtım membranının; doğrudan UV radyasyonuna ve gece-gündüz arasındaki keskin sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan termal şoklara maruz kalması nedeniyle 20. yılda ekonomik ömrünü tamamlayacağı ve sistemin tamamen yenilenmesi gerektiği varsayılmıştır. Yeşil çatı sistemlerinde ise bitki ve substrat katmanlarının membranı bu dış etkenlerden koruyan bir "biyo-zırh" görevi görmesi, yalıtım tabakasının fiziksel bütünlüğünü koruyarak ömrünü yaklaşık iki katına çıkarmaktadır. Bu koruyucu etki sayesinde, 40 yıllık analiz periyodu boyunca yeşil çatılarda büyük ölçekli bir yenileme maliyeti oluşmayacağı kabul edilmiştir. Toplanan bu veri seti, alternatiflerin sadece başlangıçtaki yatırım maliyetleriyle değil, yaşam döngüsü boyunca sergileyecekleri finansal performansın sayısal temelini oluşturarak toplam mülkiyet maliyetinin objektif bir biçimde değerlendirilmesini sağlamıştır.

5.3 Aşama 2: Fonksiyon Analizi Aşaması

Değer mühendisliği iş planının bilgi toplama aşamasını takiben, metodolojinin kalbi olarak nitelendirilen ve değer mühendisliğini diğer tüm maliyet yönetimi veya kalite kontrol tekniklerinden ayıran Fonksiyon Analizi aşamasına geçilmiştir. Geleneksel mühendislik yaklaşımları genellikle parçalar, malzemeler ve bunların maliyetleri üzerine odaklanırken (örneğin; "XPS yalıtımın m² fiyatı nedir?"); Fonksiyon Analizi, odağı radikal bir şekilde değiştirerek "Bu bileşen ne işe yarar?" ve "Bu fonksiyonun maliyeti nedir?" sorularını merkeze almaktadır (Miles, 2015).

Bu tez çalışmasının bu aşamadaki temel amacı; Balıkesir AVM vaka çalışması özelinde tanımlanan üç farklı çatı senaryosunun (Geleneksel, Ekstensif, İntensif) ve

bu sistemleri oluşturan alt bileşenleri fonksiyonel bir dille tanımlamak, maliyetleri bu fonksiyonlara atamak ve böylece sistemin düşük değerli bileşenlerini objektif verilerle tespit etmektir. Bu tespitler, bir sonraki yaratıcılık aşamasında hangi katmanlarda (örneğin substrat veya drenaj) yerel malzeme değişikliğine gidileceğini belirleyen stratejik bir yol haritası sunacaktır.

5.3.1 Senaryoların ve Bileşenlerin Fonksiyonel Tanımları

Analizin ilk adımı, her bir çatı senaryosunun ve bu senaryoları oluşturan katmanların temel varoluş amaçlarını, değer mühendisliği literatüründe belirtilen "Aktif Fiil + Ölçülebilir İsim" kuralına göre tanımlamaktır. Bu kural, zihni belirli bir malzeme kalıbından (örneğin "çakıl" demekten) kurtarıp, o malzemenin işlevine (örneğin "yük oluşturmak" veya "drenaj sağlamak") odaklanmayı sağlayacaktır.

Geleneksel çatı için kurgulanan Senaryo 1 incelendiğinde, sistemin oldukça sınırlı bir fonksiyonel kümeye sahip olduğu görülmüştür. Sistemin temel fonksiyonu binayı yağmurdan koruyacak şekilde suyu engellemek ve enerji kaybını önleyebilmek adına ısıyı yalıtmaktır. Bu senaryoda kullanılan çakıl katmanının fonksiyonu ise UV etkisine karşı yalıtımı korumak ve rüzgâr emilimine karşı balast görevi olması adına yük oluşturmak olarak tanımlanmıştır.

Ekstensif yeşil çatı için kurgulanan senaryo 2 ele alındığında, fonksiyonel yapı daha karmaşık ve zengin bir hale gelecektir. Temel anlamda suyu engellemek fonksiyonuna ek olarak; bitki katmanı için habitat sağlamak ve görsel etki yaratmak; substrat katmanı ise bitkiyi beslemek ve suyu tutmak; drenaj katmanı ise tahliye etmek ve depolamak adına suyu yönetmek fonksiyonlarını üstlenmektedir. Bu senaryoda fonksiyonel odak, ekolojik performans ve düşük bakım gereksinimi olarak karşımıza çıkmaktadır.

İntensif yeşil çatı için kurgulanan senaryo 3 analiz edildiğinde, fonksiyonel hiyerarşinin tamamen değiştiği görülmektedir. Bu sistemde suyu engellemek hala teknik bir zorunluluk olsa da AVM yönetimi açısından sistemin asıl temel fonksiyonu rekreasyon alanı yaratmak ve kafe/restoran alanı oluşturarak gelir sağlamak haline gelecektir. Bu ayrım, ilerleyen aşamalardaki maliyet analizinde,

intensif sistemin yüksek maliyetinin bir yalıtım gideri olarak değil, bir gayrimenkul yatırımı olarak değerlendirilmesini sağlayacaktır.

5.3.2 Yeşil Çatı Sistemi FAST Diyagramı Kurgusu

Fonksiyonlar tanımlandıktan sonra, bu fonksiyonların birbirleriyle olan neden-sonuç ilişkisini görselleştirebilmek amacıyla "Fonksiyon Analiz Sistemi Tekniği" (FAST) diyagramı mantığı kullanılmıştır. Balıkesir'de yapılacak olan AVM projesi için kurgulanan mantıksal akışta, kritik yol şu şekilde ilerleyecektir: binayı koruyabilmek amacıyla sorulan "Nasıl?" sorusuna verilen yanıt; çevresel etkilere direnmek için suyu engellemek amacıyla yere membran sermek adımlarıyla ilerleyecektir. Ancak yeşil çatı sistemlerinde bu ana yola ek olarak dikey eksende gelişen destekleyici fonksiyonlar kritiktir.

Örneğin; sürdürülebilirliği artırma hedefi, enerjiyi yönetmek ve suyu yönetmek fonksiyonları ile desteklenecektir. Suyu yönetmek fonksiyonu ise alt bileşenlerde drenaj levhası kullanmak veya substrat katmanı sermek gibi yöntemlerle gerçekleştirilir. Bu diyagramatik analiz, projenin hangi fonksiyonlarının temel yani vazgeçilmez olduğunu, hangilerinin ikincil yani estetik veya destekleyici olduğunu netleştirmekte, bu sayede maliyetin doğru hedeflere yönlendirilip yönlendirilmediğini sorgulamaya olanak tanımaktadır.

5.3.3 Fonksiyon- Maliyet Analizi ve Hedef Tespiti

Fonksiyon Analizi aşamasının en kritik ve sayısal çıktısı, önceki bölümlerde toplanan ilk yatırım maliyeti verilerinin, bu bölümde tanımlanan fonksiyonlara atanmasıyla elde edilen "Fonksiyon-Maliyet Matrisidir". Bu analiz, AVM yatırımcısının parasının gerçekte hangi işlevi satın almak için harcandığını ortaya koyacak ve düşük değer alanlarını işaret edecektir.

Matematiksel olarak bir fonksiyonun maliyeti (C_f), o fonksiyonu yerine getiren bileşenlerin maliyetlerinin toplamına eşittir. Eğer bir bileşen birden fazla fonksiyona hizmet ediyorsa (örneğin Substrat hem bitkiyi besler hem yük oluşturur), maliyeti ağırlıklandırılarak dağıtılır.

$$C_f = \sum_{i=1}^{n} (C_i x\ w_i) \quad (5.2)$$

- C_f**:** Fonksiyonun Toplam Maliyeti.
- C_i: i. Bileşenin Maliyeti.
- w_i: i. Bileşenin ilgili fonksiyona katkı oranı (%).

Yapılan analiz sonucunda Balıkesir AVM projesi için, özellikle iyileştirme potansiyeli en yüksek olan Senaryo 2 (Ekstensif Çatı) özelinde şu çarpıcı veriler elde edilmiştir:

5.3.3.1 Geleneksel Çatı

Toplam maliyetin %100'ü, sadece binayı korumak (su/ısı yalıtımı) için harcanmaktadır. Başka bir katma değer üretilmemektedir.

5.3.3.2 Ekstensif Yeşil Çatı

Toplam maliyetin yaklaşık %52'si, habitat sağlamak ve bitkiyi beslemek fonksiyonlarını yerine getiren substrat ve bitki katmanlarına harcanmaktadır. Maliyetin yaklaşık %17'si ise suyu yönetmek fonksiyonunu üstlenen drenaj ve filtre katmanlarına gitmektedir. Suyu engellemek (yalıtım) fonksiyonunun payı ise %31 civarındadır.

5.3.3.3 İntensif Yeşil Çatı

Toplam maliyetin %76'sı, "alan yaratmak" ve "peyzaj oluşturmak" fonksiyonlarını yerine getiren derin substrat, sulama sistemi, sert zeminler, bitki bileşenlerine harcanmaktadır.

5.3.3.4 Değerlendirme ve Hedef Belirleme

Bu veriler ışığında, değer mühendisliği çalışmasının yaratıcılık aşamasında odaklanması gereken birincil hedefler netleşmiştir. Ekstensif sistemin maliyetinin yarısından fazlasını (%52) oluşturan substrat katmanı, en büyük "düşük değer"

potansiyeline sahiptir. Çünkü mevcut piyasa koşullarında bu fonksiyon, genellikle torf, ithal kiremit kırığı vb. ithal ve pahalı malzemelerle sağlanmaktadır.

Eğer bu fonksiyon, yerel ve daha ekonomik bir malzeme (örneğin Balıkesir ponzası) ile aynı performansta sağlanabilirse, projenin değeri radikal şekilde artacaktır. Benzer şekilde, %17'lik paya sahip drenaj katmanı da ithal plastik levhalar yerine alternatif çözümlerle optimize edilmeye açık bir alandır.

Dolayısıyla, bir sonraki aşama olan "Yaratıcılık" aşamasında, tüm sistemin değil, spesifik olarak "Su Yalıtımı", "Drenaj" ve "Substrat" bileşenlerinin her biri için ayrı ayrı alternatif malzeme ve yöntem arayışına gidilecektir.

5.4 Aşama 3: Yaratıcılık Aşaması

Değer Mühendisliği (DM) metodolojisinin analizden senteze geçişini temsil eden Yaratıcılık Aşaması, Fonksiyon Analizi evresinde tespit edilen verimsizliklerin ve yüksek maliyet odaklarının çözümüne yönelik fikirlerin üretildiği en dinamik süreçtir. Önceki aşamada gerçekleştirilen Fonksiyon-Maliyet analizi, Balıkesir AVM vaka çalışması özelinde "Düşük Değer" alanlarını net bir şekilde ortaya koymuştur. Analiz sonuçlarına göre, Senaryo 2'de kurgulanan ekstensif çatının maliyetinin %52'si "Habitat Sağlamak" ve %17'si "Suyu Yönetmek" fonksiyonlarına harcanmaktadır. Ayrıca sistemin en kritik teknik bileşeni olan su yalıtımı, işçilik ve malzeme yoğunluğu nedeniyle potansiyel bir optimizasyon alanı olarak belirlenmiştir.

Dell'Isola'nın (2016) da belirttiği üzere, bu aşamanın temel amacı; belirlenen bu fonksiyonel hedefleri yerine getirebilecek alternatif yöntem ve malzemelerin sayısını maksimize etmektir. Metodolojinin kurucusu Lawrence D. Miles (2015), bu süreçte başarının anahtarının yargılamayı ertelemek olduğunu vurgular. Yani, üretilen fikirler bu aşamada pahalı, uygulanamaz veya riskli diye elenmez; temel amaç nitelikten ziyade niceliği artırarak çözüm havuzunu genişletmektir.

5.4.1 Drenaj Fonksiyonu İçin Alternatif Arayışları

Projenin mevcut tasarımında öngörülen ithal HDPE kabarcıklı drenaj levhaları, yüksek hidrolik performansa sahip olsa da petrol türevi olmaları ve ithalat maliyetleri nedeniyle değer kaybına uğramaktadır. DM ekibi bu fonksiyon için şu alternatifleri geliştirmiştir:

5.4.1.1 Yerel Mineral Agregalar

Balıkesir bölgesinin jeolojik avantajı kullanılarak, bölgede bolca bulunan Ponza (Bims) veya Lav Taşı (Cüruf) kullanımı önerilmiştir. Bu malzemeler gözenekli yapıları sayesinde su tutma kapasitesine sahiptir ve geleneksel çakıla göre çok daha hafiftir. Ayrıca mineral dolgular, plastik levhaların aksine çatıya ek bir ısı direnci (R değeri) kazandırma potansiyeline sahiptir.

5.4.1.2 Döngüsel Malzemeler

Sürdürülebilirlik ilkesi çerçevesinde, inşaat yıkıntı atıklarından elde edilen temizlenmiş tuğla ve kiremit kırıklarının drenaj katmanı olarak kullanılması fikri kayda geçmiştir.

5.4.1.3 Entegre Geokompozitler:

İşçilik maliyetlerini düşürmek amacıyla, filtre katmanının fabrikasyon olarak drenaj levhasına yapışık üretildiği entegre ürünler önerilmiştir.

5.4.1.4 Radikal Çözümler:

Çatının %2'lik eğim avantajı kullanılarak, drenaj levhasının tamamen kaldırılması ve sadece geotekstil üzerinden serbest akışın sağlanması gibi "maliyet sıfırlayıcı" ancak teknik risk içeren fikirler de listeye eklenmiştir.

5.4.2 Substrat Fonksiyonu İçin Alternatif Arayışları

Sistemin %52 ile en büyük maliyet kalemi olan ve ilk proje tasarımında ithal, torf bazlı, FLL sertifikalı hazır karışım olarak öngörülen substrat katmanı, yerelleşme

potansiyelinin en yüksek olduğu alandır. Değer mühendisliği ekibi bu alanda şu stratejileri geliştirmiştir:

5.4.2.1 Tamamen Yerel Karışım

İthalata dayalı tedarik zincirini kırmak amacıyla, Balıkesir/Bigadiç bölgesinden temin edilecek inorganik Ponza ile yerel tesislerden sağlanacak organik Kompostun belirli oranlarda karıştırılması fikridir. Bu yöntem, nakliye kaynaklı karbon emisyonlarını da minimize etmektedir.

5.4.2.2 Geri Dönüşümlü Substrat:

Kentsel dönüşüm atıklarının (tuğla/beton kırığı) belirli granülometride öğütülerek karışıma inorganik bileşen olarak dahil edildiği modeldir. (Not: Beton kırığı kullanımında pH kontrolü kritik önem taşımaktadır).

5.4.2.3 Endüstriyel Alternatifler

Hafifliği garanti altına alan Genleştirilmiş Kil (Leca) kullanımı veya toprak yükünü tamamen ortadan kaldıran Hidroponik (topraksız) sistemler inovatif alternatifler olarak sunulmuştur.

5.4.3 Yalıtım Fonksiyonu İçin Alternatif Arayışları

Mevcut tasarımda “Çift Katlı Bitümlü Membran + Ayrı Kök Koruma Folyosu” detayı, üç ayrı işçilik adımı gerektiren yoğun bir süreçtir. Değer mühendisliği ekibi bu alanda “Fonksiyonların Entegrasyonu” ilkesini benimseyerek şu alternatifleri üretmiştir.

5.4.3.1 Kök Dayanımlı Tek Katmanlı Sistemler

Doğası gereği kök girişine dirençli olan, sıcak hava kaynağı ile birleştirilen FLL sertifikalı TPO veya PVC sentetik membranlar. Bu çözüm, ayrı bir kök koruma katmanına olan ihtiyacı ortadan kaldırarak işçilik ve malzeme maliyetinde %30'a varan tasarruf potansiyeli sunar.

5.4.3.2 Kimyasal Katkılı Bitüm

Bitümün içine özel herbisitler veya bakır sülfat katılarak kök dayanımı kazandırılmış, böylece folyo ihtiyacını kaldıran sistemler.

5.4.3.3 Likit Sistemler

Karmaşık çatı geometrilerinde ek yeri riskini minimize eden sürme esaslı Poliüretan/Polyurea sistemler.

5.4.4 Bitkilendirme Yöntemi Alternatifleri

Yeşil çatının görsel yüzü olan bitki örtüsünün oluşturulması konusunda, ilk proje tasarımındaki "Hazır Sedum Halısı" (anında yeşil etki ancak yüksek maliyet) yöntemine karşı şu alternatifler geliştirilmiştir:

5.4.4.1 Tohum Serpme

En ekonomik çözümdür, ancak bitkilerin çatıyı kaplaması 1-2 yıl sürer ve rüzgar erozyonu riski taşımaktadır.

5.4.4.2 Fide Dikimi

m^2'ye 15-20 adet fide dikilerek yapılan, maliyet ve kaplama hızı açısından orta yol çözümüdür.

5.4.4.3 Çelikleme

Sedum türlerinin koparılan parçalarının doğrudan toprağa serpilmesi yöntemidir. Tohumdan daha hızlı, fideden daha ucuz bir yöntemdir.

5.4.4.4 Hibrit Yöntem

Çatının erozyon riski taşıyan eğimli kenarlarında hazır halı, düz iç bölgelerinde ise tohumlama veya fideleme yapılarak maliyetin optimize edildiği yöntemdir.

5.5 Aşama 4: Değerlendirme Aşaması

Bir önceki bölüm olan Yaratıcılık aşamasında ortaya konulan geniş fikir ve yöntem havuzu, henüz bir karar verme aracı niteliği taşımayıp sadece teknik olasılıkları temsil etmektedir. Değer Mühendisliği metodolojisinin en analitik evresi olan Değerlendirme Aşaması, bu olasılık havuzunu projenin spesifik hedefleri, kısıtları ve risk faktörleri doğrultusunda objektif bir süzgeçten geçirerek, uygulanabilir ve yüksek değer potansiyeli taşıyan bir kısa listeye dönüştürme sürecidir (Dell'Isola, 2016).

Bu aşamanın temel amacı, Bölüm 5.1'de tanımlanan "Değer İndeksi" kavramını somut bir karar mekanizmasına dönüştürmektir. Kelly, Male ve Graham'ın (2014) belirttiği üzere, bu süreç sadece maliyet odaklı bir eliminasyon değil; performans, kalite, sürdürülebilirlik, risk ve uygulanabilirlik gibi çoklu kriterlerin eş zamanlı ele alındığı "Çok Kriterli Karar Verme" sürecidir. Balıkesir AVM vaka çalışması özelinde bu süreç; proje hedeflerine dayalı ağırlıklı kriterlerin belirlenmesi, drenaj ve substrat gibi kritik katmanlar için alternatiflerin bu kriterlere göre puanlanması ve nihai değer indeksinin hesaplanması adımlarını takip etmektedir.

5.5.1 Değerlendirme Kriterlerinin Ağırlıklandırılması

Yaratıcılık aşamasında geliştirilen alternatiflerin adil, şeffaf ve rasyonel bir zeminde karşılaştırılabilmesi için öncelikle projeye özgü "Kritik Başarı Faktörleri" tanımlanmıştır. Değer Mühendisliği metodolojisinin temelini oluşturan bu aşamada, kriterlerin ağırlıklandırılması sürecinde sektörde deneyimli uzmanlar (mimarlar, inşaat mühendisleri ve AVM işletme yöneticileri) ile gerçekleştirilen bir uzman görüşü (Expert Judgment) çalışması esas alınmıştır. Katılımcılara, yeşil çatı sistemlerinin bir AVM projesindeki temel fonksiyonları ve işveren beklentileri doğrultusunda hangi kriterlerin öncelikli olduğu sorulmuş; alınan yanıtlar Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) mantığına dayanan ikili karşılaştırma matrisleri aracılığıyla sentezlenmiştir.

Bu metodolojik yaklaşım sonucunda ortaya çıkan ağırlık dağılımı, projenin sadece bugünkü maliyetini değil, gelecekteki performansını da odağa alan 8 temel kriter belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, ekonomik sürdürülebilirliğin en güçlü göstergesi olan Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC), %30 ile en yüksek ağırlığa sahip

kriter olarak belirlenmiştir. Uzmanlar, yüksek enflasyonist ortamda ilk yatırım maliyetinden ziyade, 40 yıllık süreçte sağlanacak enerji tasarrufu ve minimize edilen yenileme giderlerinin yatırımın geri dönüşü (ROI) açısından kritik olduğunu teyit etmiştir. Bütçe disiplinini temsil eden İlk Yatırım Maliyeti (İYM) ile sistemin işlevsel güvenilirliğini temsil eden Teknik Performans kriterleri ise %20'şer pay ile ikinci derecede önemli faktörler olarak öne çıkmıştır. Bu dağılım, tezin ana savunusu olan "uzun vadeli değer" yaklaşımını rasyonel bir temel üzerine inşa ederek Tablo 5.1'de detaylandırılmıştır.

Tablo 5.1 Değerlendirme Kriterleri ve Ağırlıkları

Kriter Kodu	Değerlendirme Kriteri	Tanım ve Kapsam	Ağırlık (W_i)
K1	Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC)	Malzemenin İYM'si + 40 yıllık işletme, bakım, yenileme ve enerji tasarrufu/maliyetinin bugünkü değeri.	**30%**
K2	İlk Yatırım Maliyeti (İYM)	Malzemenin tedarik, nakliye ve montaj dahil bugünkü birim maliyeti.	**20%**
K3	Teknik Performans	Malzemenin ana fonksiyonunu (su tutma, drenaj, kök dayanımı) yerine getirme kapasitesi ve standartlara uygunluğu.	**15%**
K4	Enerji Verimliliğine Katkı	Malzemenin ısı yalıtım değeri veya termal kütle etkisiyle binanın enerji yükünü azaltma potansiyeli.	**10%**
K5	Dayanıklılık ve Ömür	Malzemenin fiziksel ömrü, bozulma direnci ve bakım ihtiyacı.	**10%**
K6	Yerellik ve Sürdürülebilirlik	Malzemenin yerel kaynaklı olması (karbon ayak izi) ve geri dönüştürülmüş içerik oranı.	**5%**
K7	Ağırlık (Statik Yük)	Malzemenin binanın taşıyıcı sistemine getirdiği ek yük ve statik uygunluğu.	**5%**
K8	Uygulama Kolaylığı	İşçilik hızı, hata yapma riski ve nitelikli eleman gereksinimi.	**5%**
TOPLAM			**100%**

5.5.2 Alternatiflerin Puanlanması ve Karar Matrisleri

Bu aşamada, sistemin en yüksek maliyet kalemlerini oluşturan ve fonksiyon analizine göre iyileştirmeye açık bulunan iki temel bileşen grubu olan substrat ve drenaj için geliştirilen alternatifler puanlanmıştır. Her bir alternatif için oluşturulan tablolarda; kriterin ağırlığı (W), verilen ham puan (R) ve nihai ağırlıklı puan (S) açıkça gösterilmiştir. Puanlama işlemi, "1-5 Likert Ölçeği" üzerinden (1: Çok Kötü, 5: Çok İyi/Mükemmel) gerçekleştirilmiş ve matematiksel olarak her bir alternatifin "Toplam Ağırlıklı Puanı" (S_{total}) şu formül (5.3) ile hesaplanmıştır:

$$S_{total} = \sum_{i=0}^{n} (R_i \times W_i) \tag{5.3}$$

Burada: R_i: i. kriter için verilen Ham Puan (1-5), R_i: i. kriterin Ağırlık Katsayısıdır.

5.5.2.1 Substrat (Bitki Taşıyıcı Ortam) Alternatiflerinin Değerlendirilmesi

Maliyetin %52'sini oluşturan substrat katmanı için üç farklı senaryo analiz edilmiştir. Karşılaştırılan alternatifler:

- **Alternatif A1: İthal Hazır Karışım**

Piyasadaki standart uygulamayı temsil eder. Genellikle Almanya veya Hollanda menşeli, FLL sertifikalı, volkanik tüf ve torf içeren, "Big Bag" çuvallarla ithal edilen üründür (Yüksek performans, yüksek maliyet). Aşağıda Tablo 5.2'de Alternatif A1 (İthal Substrat) Değerlendirme Tablosu paylaşılmıştır.

Tablo 5.2 Alternatif A1 İthal Substrat Değerlendirme Tablosu

Kriter Kodu	Değerlendirme Kriteri	Ağırlık (W)	Ham Puan (R) (1-5)	Ağırlıklı Puan (W×R)
K1	Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC)	0,30	**2**	0,60
K2	İlk Yatırım Maliyeti (İYM)	0,20	**1**	0,20
K3	Teknik Performans	0,15	**5**	0,75

Tablo 5.2 Alternatif A1 İthal Substrat Değerlendirme Tablosu (devamı)

K4	Enerji Verimliliğine Katkı	0,10	**3**	0,30
K5	Dayanıklılık ve Ömür	0,10	**5**	0,50
K6	Yerellik ve Sürdürülebilirlik	0,05	**2**	0,10
K7	Ağırlık (Statik Yük)	0,05	**4**	0,20
K8	Uygulama Kolaylığı	0,05	**5**	0,25
TOPLAM		**1,00**		**2,90**

Analiz (A1): A1 alternatifi, Teknik Performans (K3) açısından kusursuzdur (5 Puan); bitki gelişimi garantidir. Ancak, Döviz kurlarına bağlı olması ve nakliye maliyetleri nedeniyle İlk Yatırım Maliyeti (K2) çok yüksektir (1 Puan). Ayrıca, nakliye kaynaklı karbon ayak izi nedeniyle Sürdürülebilirlik (K6) puanı düşüktür. Toplamda 2,90 puanla "Yüksek Kalite / Düşük Değer" profili çizmektedir.

- **Alternatif A2: Yerel Ponza Karışım (Öneri 1)**

Balıkesir/Bigadiç bölgesinden temin edilen elenmiş Ponza (%70), yerel kompost (%20) ve tarım toprağı (%10) karışımıdır. Nakliye mesafesi 50 km'nin altındadır. Aşağıda Tablo 5.3'te Alternatif A2 (Yerel Ponza Karışımı) Değerlendirme Tablosu incelenmiştir.

Tablo 5.3 Alternatif A2 Yerel Ponza Karışımı Değerlendirme Tablosu

Kriter Kodu	**Değerlendirme Kriteri**	**Ağırlık (W)**	**Ham Puan (R) (1-5)**	**Ağırlıklı Puan (W×R)**
K1	Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC)	0,30	**5**	1,50
K2	İlk Yatırım Maliyeti (İYM)	0,20	**5**	1,00
K3	Teknik Performans (Su/Hava)	0,15	**4**	0,60

Tablo 5.3 Alternatif A2 Yerel Ponza Karışımı Değerlendirme Tablosu (devamı)

K4	Enerji Verimliliğine Katkı	0,10	**5**	0,50
K5	Dayanıklılık ve Ömür	0,10	**5**	0,50
K6	Yerellik / Sürdürülebilirlik	0,05	**5**	0,25
K7	Ağırlık (Statik Yük)	0,05	**5**	0,25
K8	Uygulama Kolaylığı	0,05	**3**	0,15
TOPLAM		**1,00**		**4,75**

Analiz: A2, yerel hammadde olduğu için maliyet kriterlerinde (K1 ve K2) tam puan almıştır. Ponzanın gözenekli yapısı mükemmel bir ısı yalıtımı sağladığı için Enerji Verimliliği (K4) puanı 5'tir. Teknik performansı ithal ürün kadar standardize olmasa da yeterli seviyededir (4 Puan). Tek dezavantajı, şantiyede karıştırma işlemi gerektirebileceği için Uygulama Kolaylığı (K8) puanının biraz düşük olmasıdır. Toplam 4,75 puanla en başarılı alternatif olarak öne çıkmaktadır

- **Alternatif A3: Geri Dönüşümlü Tuğla Kırığı (Öneri 2)**

Kentsel dönüşüm yıkıntılarından elde edilen tuğla ve kiremitlerin kırılarak agrega haline getirilmesi (%60) ve kompost (%40) ile karıştırılmasıdır (Atık geri kazanımı). Aşağıda Tablo 5.4'te Yeşil Çatı Malzeme Seçimi İçin Değerlendirme Kriterleri ve Ağırlıklandırma Matrisi Tablosu (Balıkesir AVM Vakası) incelenmiştir.

Tablo 5.4 Alternatif A3 Geri Dönüşümlü Tuğla Kırığı Değerlendirme Tablosu

Kriter Kodu	**Değerlendirme Kriteri**	**Ağırlık (W)**	**Ham Puan (R) (1-5)**	**Ağırlıklı Puan (W×R)**
K1	Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC)	0,30	**4**	1,20
K2	İlk Yatırım Maliyeti (İYM)	0,20	**5**	1,00
K3	Teknik Performans	0,15	**3**	0,45

Tablo 5.4 Alternatif A3 Geri Dönüşümlü Tuğla Kırığı Değerlendirme Tablosu (devamı)

K4	Enerji Verimliliğine Katkı	0,10	**3**	0,30
K5	Dayanıklılık ve Ömür	0,10	**3**	0,30
K6	Yerellik / Sürdürülebilirlik	0,05	**5**	0,25
K7	Ağırlık (Statik Yük)	0,05	**2**	0,10
K8	Uygulama Kolaylığı	0,05	**3**	0,15
TOPLAM		**1,00**		**3,75**

Analiz: A3, en çevreci ve "atık yönetimi" odaklı çözümdür (K6: 5 Puan). Malzeme maliyeti neredeyse sıfırdır, sadece işleme maliyeti vardır (K2: 5 Puan). Ancak tuğla kırığının zamanla donma-çözülme etkisiyle ufalanma riski (Dayanıklılık K5) ve ponzaya göre daha ağır olması (Ağırlık K7), toplam puanını düşürmüştür. 3,75 puanla iyi bir alternatif olsa da A2'nin gerisinde kalmıştır.

5.5.2.2 Drenaj Katmanı Alternatiflerinin Değerlendirilmesi

Drenaj fonksiyonu için plastik ve mineral bazlı çözümler karşılaştırılmıştır.

- **Alternatif B1: İthal HDPE Levha**

Petrol türevi, yumurta kartonu formunda, ithal plastik levhalardır. Aşağıda Tablo 5.5'te Alternatif B1 (HDPE Levha) Değerlendirme Tablosu incelenmiştir.

Tablo 5.5 Alternatif B1 İthal HDPE Levha Değerlendirme Tablosu

Kriter Kodu	Değerlendirme Kriteri	Ağırlık (W)	Ham Puan (R) (1-5)	Ağırlıklı Puan (W×R)
K1	Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC)	0,30	**3**	0,90
K2	İlk Yatırım Maliyeti (İYM)	0,20	**2**	0,40
K3	Teknik Performans	0,15	**5**	0,75

Tablo 5.5 Alternatif B1 İthal HDPE Levha Değerlendirme Tablosu (devamı)

K4	Enerji Verimliliğine Katkı	0,10	**1**	0,10
K5	Dayanıklılık ve Ömür	0,10	**5**	0,50
K6	Yerellik / Sürdürülebilirlik	0,05	**1**	0,05
K7	Ağırlık (Statik Yük)	0,05	**5**	0,25
K8	Uygulama Kolaylığı	0,05	**5**	0,25
TOPLAM		**1,00**		**3,20**

Analiz: B1, Uygulama Hızı (K8) ve Hafiflik (K7) açısından rakipsizdir; rulo halinde serilir. Teknik olarak su tahliyesi mükemmeldir. Ancak petrol türevi olması (K6: 1 Puan) ve ısı yalıtımına hiçbir katkısının olmaması (K4: 1 Puan), toplam değer puanını 3,20 seviyesinde tutmuştur.

- **Alternatif B2: Yerel Ponza Dolgu (Öneri 1)**

Drenaj katmanına 5-7 cm kalınlığında serilen iri taneli (20-40 mm) Balıkesir ponzasıdır. Aşağıda Tablo 5.6'da Alternatif B2 (Yerel Ponza Dolgu) Değerlendirme Tablosu incelenmiştir.

Tablo 5.6 Alternatif B2 Yerel Ponza Dolgu Değerlendirme Tablosu

Kriter Kodu	**Değerlendirme Kriteri**	**Ağırlık (W)**	**Ham Puan (R) (1-5)**	**Ağırlıklı Puan (W×R)**
K1	Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC)	0,30	**5**	1,50
K2	İlk Yatırım Maliyeti (İYM)	0,20	**5**	1,00
K3	Teknik Performans (Su/Hava)	0,15	**4**	0,60
K4	Enerji Verimliliğine Katkı	0,10	**5**	0,50
K5	Dayanıklılık ve Ömür	0,10	**5**	0,50

Tablo 5.6 Alternatif B2 Yerel Ponza Dolgu Değerlendirme Tablosu (devamı)

K6	Yerellik / Sürdürülebilirlik	0,05	**5**	0,25
K7	Ağırlık (Statik Yük)	0,05	**2**	0,10
K8	Uygulama Kolaylığı	0,05	**2**	0,10
TOPLAM		**1,00**		**4,55**

Analiz: B2, malzemenin ucuzluğu sayesinde maliyette tam puan alır. En büyük avantajı, ponza katmanının "ikinci bir ısı yalıtım levhası" gibi çalışarak binanın Enerji Verimliliğine (K4) yaptığı katkıdır. Ancak malzemenin dökme olarak serilmesi ve çatıda taşınması işçiliği artırdığı için Uygulama Kolaylığı (K8) ve Ağırlık (K7) puanları düşüktür. Buna rağmen 4,55 puanla en yüksek değerli seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır.

- **Alternatif B3: Entegre Geokompozit (Öneri 2)**

Filtre tabakası ile birleşik üretilmiş ince drenaj levhalarıdır. Aşağıda Tablo 5.7'de Alternatif B3 (Entegre Geokompozit) Değerlendirme Tablosu paylaşılmıştır.

Tablo 5.7 Alternatif B3 Entegre Geokompozit Değerlendirme Tablosu

Kriter Kodu	**Değerlendirme Kriteri**	**Ağırlık (W)**	**Ham Puan (R) (1-5)**	**Ağırlıklı Puan (W×R)**
K1	Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC)	0,30	**4**	1,20
K2	İlk Yatırım Maliyeti (İYM)	0,20	**3**	0,60
K3	Teknik Performans (Su/Hava)	0,15	**4**	0,60
K4	Enerji Verimliliğine Katkı	0,10	**1**	0,10
K5	Dayanıklılık ve Ömür	0,10	**4**	0,40
K6	Yerellik / Sürdürülebilirlik	0,05	**2**	0,10

Tablo 5.7 Alternatif B3 Entegre Geokompozit Değerlendirme Tablosu (devamı)

K7	Ağırlık (Statik Yük)	0,05	**5**	0,25
K8	Uygulama Kolaylığı	0,05	**5**	0,25
TOPLAM		**1,00**		**3,50**

Analiz: B3, özellikle Uygulama Kolaylığı (K8) açısından en iyi çözümdür; işçilik maliyetlerini düşürür. Ancak malzeme birim fiyatının yüksekliği ve enerji tasarrufuna katkısının olmaması nedeniyle, ponza dolgunun gerisinde kalarak 3,50 puanda kalmıştır.

5.5.3 Değerlendirme Sonucu ve Kısa Liste

Yaratıcılık aşamasında üretilen çok sayıda fikir, bu bölümde uygulanan Ağırlıklı Değerlendirme Matrisleri ve Değer İndeksi hesaplamaları neticesinde elenmiş ve uygulanabilirliği kanıtlanmış bir kısa listeye indirgenmiştir.

Yapılan matematiksel analizler, Balıkesir AVM projesi özelinde "Değer" kavramının; ithal ve yüksek maliyetli hazır çözümlerde değil, yerel, erişilebilir ve çok fonksiyonlu malzemelerde saklı olduğunu göstermiştir. Özellikle Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC) ve Enerji Verimliliği kriterleri, karar sürecinin belirleyici faktörleri olmuştur.

Analiz sonucunda, Geliştirme Aşamasında (Aşama 5) detaylandırılmak ve nihai sistem kesitini oluşturmak üzere seçilen bileşenler ve seçim gerekçeleri Tablo 5.8'de özetlenmiştir.

Tablo 5.8 Değer Mühendisliği Karar Özeti ve Seçilen Malzemeler Tablosu

Yapı Bileşeni	Geleneksel / Mevcut Çözüm (Elenen)	Değer Mühendisliği Seçimi (Kısa Liste)	Sağlanan Temel Fayda
1. Substrat	İthal Hazır Karışım	Yerel Ponza Karışımı	%60 Maliyet Tasarrufu + Yerellik
2. Drenaj	Plastik (HDPE) Levha	İri Taneli Ponza Dolgu	Ekstra Isı Yalıtımı + Doğallık

Tablo 5.8 Değer Mühendisliği Karar Özeti ve Seçilen Malzemeler Tablosu (devamı)

3. Su Yalıtımı	Çok Katmanlı Bitüm	Tek Katmanlı TPO	İşçilik ve Zaman Tasarrufu
4. Bitkilendirme	Hazır Çim Halısı	Tohum ve Fide (Hibrit)	Düşük İlk Yatırım Maliyeti

Sonuç olarak bakıldığında bu kısa liste, projenin sadece maliyetini düşürmekle kalmamış, aynı zamanda teknik profilini de değiştirmiştir. Geleneksel plastik ve ithal toprak ağırlıklı yeşil çatı sistemi; yerini mineral esaslı ve yerel bir sisteme bırakmıştır. Seçilen bu malzemeler, bir sonraki aşama olan geliştirme aşamasında bir araya getirilerek teknik detay kesitleri oluşturulacak ve sistemin toplam performansı simüle edilecektir.

5.6 Aşama 5: Geliştirme Aşaması ve Nihai Sistem Önerisi

Değer Mühendisliği İş Planı'nın beşinci adımı olan Geliştirme Aşaması; Değerlendirme evresinde “En Değerli” olarak seçilen ve Kısa Liste'ye alınan alternatiflerin bir araya getirilerek teknik detaylarının çözümlendiği, risk analizlerinin yapıldığı ve nihai sistem önerisinin oluşturulduğu süreçtir.

Bu aşamada amaç; Balıkesir AVM projesi için seçilen yerel ve mineral esaslı malzemelerin (Ponza substrat ve drenaj), bir yapı sistemi olarak birbiriyle uyumlu çalışıp çalışmayacağını doğrulamak ve bu yeni sistemin Geleneksel Çatı ve Standart (İthal) Yeşil Çatı ile kıyaslamalı nihai ekonomik tablosunu ortaya koymaktır.

5.6.1 Önerilen Ponza Esaslı Hibrit Sistem Kesiti ve Detayları

Yapılan analizler sonucunda, ithal ve plastik malzemelerin domine ettiği klasik yeşil çatı katmanlaşması reddedilmiş; yerine “Sürdürülebilirliğin Yerelleşmesi" ilkesine dayalı yeni bir hibrit kesit geliştirilmiştir. Geliştirilen bu sistem, hem Senaryo 2 (Ekstensif) hem de Senaryo 3 (İntensif) uygulamaları için temel oluşturmaktadır.

Önerilen sistemin teknik katmanları alttan üste doğru şu şekilde revize edilmiştir:

5.6.1.1 Su Yalıtımı ve Kök Koruma (Entegre)

İşçilik maliyetlerini ve uygulama hatası riskini düşürmek amacıyla; ayrı bir kök koruma folyosu gerektirmeyen, Tek Katmanlı, FLL Sertifikalı TPO Membran kullanılmıştır.

5.6.1.2 Koruyucu Katman

300 gr/m^2 ısıl işlem görmüş geotekstil keçe (Mekanik koruma ve nem tutucu).

5.6.1.3 Drenaj Katmanı (Mineral Esaslı)

İthal plastik levhalar yerine; Balıkesir bölgesinden temin edilen 5-7 cm kalınlığında İri Taneli (20-40 mm) Ponza serilmiştir. Bu katman, sadece suyu tahliye etmekle kalmaz, gözenekli yapısı sayesinde "Isı Yalıtım Plağı" gibi çalışarak sistemin enerji performansını artırır.

5.6.1.4 Filtre Katmanı

İnce malzemelerin drenajı tıkamasını önleyen sistem filtresi.

5.6.1.5 Substrat Katmanı (Yerel Karışım)

İthal torf yerine; %70 İnce Ponza + %20 Yerel Kompost + %10 Tarım Toprağı karışımı kullanılmıştır. (Ekstensif için 10-12 cm, İntensif için 30-50 cm derinlik).

5.6.1.6 Bitkilendirme

Ekstensif Alanlar İçin: Hazır çim halısı yerine Tohum (Hydroseeding) + Fide (Plug) karma yöntemi.

İntensif Alanlar İçin: Yerel fidanlıklardan temin edilen, kurakçıl peyzaj (xeriscape) prensibine uygun çalı ve ağaççıklar.

5.6.2 Teknik Doğrulama ve Risk Analizi (Statik ve Termal Tahkik)

Malzeme değişikliğine gidildiği için (Plastikten Minerale), sistemin teknik yeterliliği sayısal olarak doğrulanmıştır:

5.6.2.1 Statik Yük Tahkiki

Mineral drenaj kullanımı çatı yükünü artırma riski taşır. Ancak yapılan hesaplamada, suya doygun ponzanın birim hacim ağırlığı ($\gamma \approx 900\ kg/m^3$) baz alındığında; Ekstensif sistemin toplam yükü ~135 kg/m² olarak hesaplanmıştır. Bu değer, standart bir betonarme AVM çatısının taşıma kapasitesi (hareketli yük + ölü yük $\approx 350 - 500\ kg/m^2$) sınırları içerisinde güvenli bölgededir.

5.6.2.2 Termal Performans (R Değeri) Analizi

Plastik drenaj levhalarının ısı iletkenlik katsayısı ihmal edilebilir düzeydeyken (hava boşluğu hariç), ponza taşının ısıl iletkenlik değeri (λ) 0.12 W/mK civarındadır. 7 cm'lik ponza drenaj katmanı, çatıya ek bir ısı direnci (R) kazandırarak, yaz aylarında ısı geçişini geciktirmekte (faz kayması) ve enerji tasarrufu öngörüsünü doğrulamaktadır.

5.6.3 Nihai Maliyet ve Değer Karşılaştırma Tablosu

Değer Mühendisliği çalışmasının başarısını kanıtlayan en somut veri, 3 farklı senaryonun ekonomik performansının karşılaştırılmasıdır. Aşağıdaki Tablo 5.9'da 2.000 m²'lik referans çatı alanı için İlk Yatırım Maliyeti (İYM) ve 40 yıllık Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC) verilerini, güncel kur ($1 = 40 TL) üzerinden özetlemektedir.

Tablo 5.9 3 Senaryo İçin Nihai Maliyet ve Değer Karşılaştırma Analizi Tablosu

Analiz Parametreleri	**Senaryo 1: Geleneksel Çatı (Baz Durum)**	**Senaryo 2: Ekstensif Yeşil Çatı (VE ile Optimize)**	**Senaryo 3: İntensif Yeşil Çatı (VE ile Optimize)**
Sistem Tanımı	XPS Isı Yalıtımı + Çakıl Balast	12 cm Yerel Substrat + Sedum (Bakımsız)	40 cm Yerel Substrat + Bahçe (Rekreasyon)
A. İlk Yatırım Maliyeti (İYM)	$50,000	$72,500	$160,000
Geleneksele Göre Fark	-	+ $22,500	+ $110,000
B. İşletme ve Enerji (40 Yıl-NPV)	$140,000 (Enerji Kaybı)	$80,000 (Tasarruf Sonrası Net Gider)	$175,000 (Sulama + Bakım)

Tablo 5.9 3 Senaryo İçin Nihai Maliyet ve Değer Karşılaştırma Analizi Tablosu (devamı)

C. Yenileme Maliyeti (20. Yıl)	$40,000 (Sök-Yap)	$0 (Membran Korunuyor)	$25,000 (Bitki/Sulama)
TOPLAM LCC (A+B+C)	$230,000	**$152,500**	$360,000
LCC Tasarrufu (Senaryo 1'e Göre)	-	%34 Tasarruf ($77,500)	-%56 (Ekstra Maliyet)
Fonksiyonel Performans Puanı	40 (Sadece Koruma)	85 (Ekoloji + Enerji)	95 (Ekoloji + Sosyal Alan)
DEĞER İNDEKSİ	1,00 (Baz)	**3,20** (En Yüksek)	1,52 (Sosyal Değer)

*Not: İntensif çatıda su yalıtımı yenilenmese de 20. yılda sulama otomasyonu ve büyük bitkilerin yenilenmesi için bütçe ayrılmıştır.

5.6.4 Yatırımın Geri Dönüşü (ROI) ve Sonuç Yorumu

Tablo 5.13'te paylaşılan veriler ışığında, 2.000 m²'lik toplam proje alanı üzerinden yapılan finansal analiz şu sonuçları doğurmuştur:

5.6.4.1 Ekonomik Şampiyon (Senaryo 2)

Değer Mühendisliği uygulanmış Ekstensif Yeşil Çatı, $152,500'lık LCC değeri ile Geleneksel Çatıdan ($230,000) ömür boyu maliyet bazında $77,500 (yaklaşık 3.1 Milyon TL) daha ucuzdur.

5.6.4.2 Geri Ödeme Süresi (Amortisman)

Senaryo 2 için başlangıçta ödenen fazladan $22,500'lık fark sağlanan yıllık enerji tasarrufu ve bakım avantajlarıyla yaklaşık 6-7 yıl içerisinde kendini amorti etmektedir. 40 yıllık bina ömrü düşünüldüğünde bu süre oldukça makuldür.

5.6.4.3 Sosyal Yatırım (Senaryo 3)

İntensif Çatı, yüksek bakım ve su giderleri nedeniyle en pahalı seçenektir ($360,000). Ancak, eğer AVM yönetimi bu alanı bir Kafe veya Restoran olarak

kiralayacaksa, elde edilecek ticari gelir LCC tablosuna eklendiğinde bu senaryo da kârlı hale geçebilir. Ancak saf maliyet analizi açısından lüks tüketim sınıfına girmektedir.

Sonuç olarak bakıldığında bu tez çalışmasının vaka analizi göstermiştir ki; Senaryo 2 (Optimize Edilmiş Ekstensif Çatı), hem ekonomik hem de çevresel açıdan 3,20 puanla en yüksek değer indeksine sahip sistemdir ve Balıkesir AVM projesi için önerilen nihai çözüm olarak belirlenmiştir.

5.7 Aşama 6: Sunum Aşaması

Değer Mühendisliği metodolojisinin son halkası olan Sunum Aşaması; Geliştirme evresinde teknik ve ekonomik detayları olgunlaştırılan Ponza Esaslı Hibrit Yeşil Çatı önerisinin, karar verici mercilere (Vaka analizindeki AVM Yatırımcısı/Yönetimi) sunulduğu süreçtir. Bu aşamanın temel amacı, mühendislik verilerini ve hesaplamalarını, işverenin anlayacağı yatırım diline çevirmek ve projenin onaylanmasını sağlamaktır (Miles, 2015).

Bu kapsamda, Balıkesir AVM projesi için hazırlanan Değer Mühendisliği Önerisi, aşağıdaki "Yönetici Özeti Raporu" başlıkları altında sistematize edilmiştir.

5.7.1 Yönetici Özeti Raporu: Neden Bu Sistem Seçilmeli?

Mevcut tasarım (Geleneksel Çatı) ve alternatif senaryolar üzerinde yapılan çok kriterli analizler sonucunda, yatırımcıya Senaryo 2 (Optimize Edilmiş Ekstensif Sistem) önerilmektedir. Bu önerinin kabul edilmesi için temel gerekçeler şunlardır:

5.7.1.1 Finansal Rasyonalite ve LCC Avantajı

Önerilen sistem, ithal bileşenlere dayalı standart yeşil çatı çözümlerine kıyasla ilk yatırım maliyetinde önemli bir tasarruf sağlamaktadır. Ancak asıl çarpıcı sonuç, Geleneksel Çatı (XPS + Çakıl) ile kıyaslandığında ortaya çıkmaktadır. Enerji tasarrufu ve yalıtım ömrünün uzaması sayesinde, 40 yıllık projeksiyonda $77,500 (Net LCC Tasarrufu) gibi ciddi bir ekonomik avantaj sunulmaktadır.

5.7.1.2 Yatırımın Geri Dönüşü (ROI)

Yeşil çatı uygulaması için başlangıçta harcanacak ek bütçe ($22,500), binanın soğutma maliyetlerindeki düşüş ve su yalıtımının yenilenme ihtiyacının ortadan kalkmasıyla 6-7 yıl içerisinde kendini amorti etmektedir. Geriye kalan 33 yıl boyunca sistem, işletmeye "kâr" yazan bir yatırım aracı olarak çalışacaktır.

5.7.1.3 Teknik Güvenlik

Seçilen sistemde kullanılan yerel ponza malzemesi, hafifliği sayesinde statik yük sınırlarını aşmamakta (~135 kg/m²) ve mevcut betonarme yapıya risk oluşturmamaktadır. Aksine, ponzanın ısı iletkenlik direnci sayesinde çatının termal performansı artırılmıştır.

5.7.1.4 Kurumsal Prestij ve Sertifikasyon

Proje, %100 yerel malzeme kullanımı ve enerji verimliliği özellikleri sayesinde, hedeflenen LEED/BREEAM sertifikasyon süreçlerinde "Yerel Malzeme", "Enerji Performansı" ve "Yağmur Suyu Yönetimi" kredilerinden tam puan alınmasını garanti altına almaktadır.

5.7.2 Uygulama Yol Haritası ve Öneriler

Değer Mühendisliği çalışmasının başarıyla hayata geçirilebilmesi ve öngörülen tasarrufların realize edilebilmesi amacıyla işverene sunulan aksiyon planı, tedarik sürecinden işletme aşamasına kadar kapsamlı bir yol haritası içermektedir.

Öncelikle tedarik zinciri yönetiminde maliyet etkinliğini sağlamak adına, drenaj ve substrat malzemeleri için ithal markaların distribütör marjları elimine edilerek Balıkesir/Bigadiç bölgesindeki yerel maden ocakları ile doğrudan anlaşmalar yapılmalıdır. Uygulama safhasına geçilmeden önce teknik riskleri minimize etmek için, önerilen ponza-kompost karışımından numuneler alınmalı; bu numunelerin su tutma, hava kapasitesi ve pH değerleri gibi kritik FLL standartlarına uygunluğu akredite bir laboratuvarda test edilerek doğrulanmalıdır. Maliyet optimizasyonu kapsamında tercih edilen tohumlama yöntemi için bitkilendirme takvimi, geçici sulama maliyetlerini artırma riski taşıyan yaz ayları yerine, Balıkesir iklim koşullarına en uygun olan sonbahar veya erken ilkbahar dönemlerine

planlanmalıdır. Son olarak, sistemin uzun ömürlü ve sürdürülebilir olması için işletme ekibine gerekli talimatlar aktarılmalı; özellikle köklenme sürecini kapsayan ilk iki yılın bakım açısından kritik önem taşıdığı, bu sürenin ardından bakım periyodunun yılda 1-2 kontrole kadar düşeceği vurgulanmalıdır.

Sonuç olarak, bu vaka çalışması ile Değer Mühendisliği metodolojisinin sadece teorik bir kavram olmadığı; doğru uygulamalarla bütünleştiğinde yeşil çatı gibi yüksek maliyetli sistemleri dahi ekonomik ve uygulanabilir hale getirebildiği kanıtlanmıştır. Geleneksel yap-sat mantığındaki ucuz malzeme arayışının aksine, fonksiyon ve performans odaklı değer arayışının, gelecekte projeye çok daha büyük kazançlar sağladığı ortaya konulmuştur. Bir sonraki bölümde konu ile ilgili çıkarımlar yapılacak ve edinilen bilgiler daha detaylı yorumlanacaktır.

6
SONUÇ

6.1 Genel Değerlendirme

İnşaat sektörü, 21. yüzyılda çevresel zorunluluklar ile ekonomik kısıtlar arasında sıkışmış bir paradoks yaşamaktadır. Bu tez çalışması, yeşil çatı sistemlerinin yaygınlaşmasının önündeki en büyük engel olan "yüksek maliyet algısını", Değer Mühendisliği (DM) metodolojisi aracılığıyla yıkarak, sürdürülebilirliğin ekonomik olarak da en rasyonel seçenek olduğunu kanıtlamayı hedeflemiştir.

Çalışma boyunca, yeşil çatıların sadece ekolojik bir tercih değil, bir yapı fiziği gerekliliği olduğu savunulmuş; Balıkesir AVM vaka analizi üzerinden yapılan simülasyonlarla da bu sav matematiksel bulgularla kanıtlanmıştır. Bu bölümde, tezin teorik olarak savunduğu yaklaşımlar ile uygulama sonucunda elde edilen somut bulgular detaylıca irdelenmiştir.

6.2 Savunulan Yaklaşımlar

Bu tez çalışması, literatür taraması ve metodolojik kurgu aşamalarında temel olarak şu üç ana argümanı savunmuştur:

6.2.1 Maliyet Kavramının Yetersizliği

Geleneksel inşaat yönetimindeki "İlk Yatırım Maliyeti" (İhale Bedeli) odaklı yaklaşımın, yatırımcıyı yanıltan eksik bir veri olduğu savunulmuştur. Teze göre gerçek maliyet, binanın 40-50 yıllık ömrü boyunca harcanan enerjiyi, bakım giderlerini ve yenileme masraflarını kapsayan Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC)'dir.

Bir çatı sistemi, ilk gün ucuz olsa bile, ömür boyu pahalıya mal oluyorsa düşük değerli olarak kabul edilmektedir.

6.2.2 Değer Mühendisliği Bir Ucuzlatma Değildir

Değer Mühendisliği'nin (DM), sektörde yanlış bilindiği gibi sadece malzemeyi kalitesizleştirerek maliyeti düşürme işlemi olmadığı; aksine fonksiyonu koruyarak performansı artıran bir optimizasyon disiplini olduğu savunulmuştur. Bu bağlamda, "Yeşil çatı pahalıysa yapmayalım" düşüncesi yerine "Yeşil çatıyı fonksiyonel olarak nasıl daha değerli hale getiririz?" düşüncesi merkeze alınmıştır.

6.2.3 İthalat Bağımlılığına Karşı Yerelleşme

Yeşil çatı sektöründeki yüksek maliyet algısının, sistemin kendisinden değil, kopyala-yapıştır şartnamelerle dayatılan ithal ve petrol türevi malzemelerden kaynaklandığı iddia edilmiştir. Türkiye'nin zengin mineral kaynaklarının (Ponza, Perlit vb.) ithal ürünlerin yerini alabileceği ve bunun sistemi ekonomik hale getireceği savunulmuştur.

6.3 Vaka Analizi Sonucunda Elde Edilen Bulgular

Tezin bir önceki uygulama bölümünde Balıkesir'deki AVM projesi için kurgulanan 3 farklı senaryo (Geleneksel, Ekstensif Yeşil Çatı, İntensif Yeşil Çatı) üzerinde yapılan analizler, savunulan argümanları doğrulayan şu çarpıcı bulguları ortaya koymuştur:

6.3.1 Ekonomik Bulgular: LCC ve Maliyet Avantajı

Yapılan Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC) hesaplamaları, sektördeki genel kanının aksine finansal gerçekliğin çok farklı olduğunu gözler önüne sermiştir.

6.3.1.1 Geleneksel Çatı Yanılgısı

İlk yatırım maliyeti $50,000 ile en ucuz görünen Geleneksel Çatının; 40 yıllık süreçte enerji kayıpları ve su yalıtımının 20. yılda yenilenme zorunluluğu nedeniyle toplamda $230,000 ile en yüksek maliyetli sistem olduğu bulunmuştur.

6.3.1.2 Yeşil Çatının Ekonomik Zaferi

Değer Mühendisliği ile optimize edilen Senaryo 2'de kurgulanan Yeşil Çatı, başlangıçta neredeyse %45 daha pahalı olmasına ($72,500) rağmen, sağladığı enerji tasarrufu ve bakım avantajlarıyla toplam ömür boyu maliyeti $152,500 seviyesine çekmiştir.

Sonuç olarak yeşil çatı yatırımı, kendini 6-7 yıl içinde amorti etmekte ve kalan 33 yıl boyunca yatırımcıya net kazanç sağlamaktadır.

6.3.2 Teknik ve Malzeme Bulgular

Malzeme düzeyinde yapılan Fonksiyon Analizi ve Değerlendirme çalışmaları şu teknik gerçekleri ortaya çıkarmıştır:

6.3.2.1 Plastik vs. Mineral

Drenaj katmanında kullanılan ithal plastik levhaların ısı yalıtımına hiçbir katkısı olmadığı ($\lambda \approx 0$); buna karşın yerel Ponza taşının gözenekli yapısı sayesinde sisteme ekstra ısı direnci kazandırdığı ve enerji verimliliğini artırdığı saptanmıştır.

6.3.2.2 Substrat Maliyeti:

Sistemin en pahalı kalemi olan ithal toprak karışımı yerine, Balıkesir Ponzası ve yerel kompost kullanılması, bitki gelişiminden ödün vermeden malzeme maliyetini %60 oranında düşürmüştür.

Sonuç olarak bakıldığında "İthal malzeme daha kalitelidir" algısı çürütülmüş; yerel malzemelerin doğru mühendislik (granülometri ayarı) ile ithal ürünlerden daha yüksek "Değer İndeksi" sağladığı kanıtlanmıştır.

6.3.3 Metodolojik Bulgular: Değer Artışı

Matematiksel olarak hesaplanan Değer İndeksi ($V = P/C$) sonuçları, uygulanan metodolojinin başarısını somutlaştırmıştır:

- Geleneksel sistemin değeri "1,0" (Baz) kabul edildiğinde, ithal malzemeli standart yeşil çatının değeri sadece "1,25" puana çıkabilmiştir.
- Ancak yerel malzemeler ve değer mühendisliği metodolojisi ile kurgulanan sistemin değeri "3,20" olarak hesaplanmıştır. Bu bulgu, sürdürülebilirliğin yerel kaynaklarla birleştiğinde 3 kattan fazla katma değer yarattığını göstermektedir.

6.4 Tartışma ve Sektörel Çıkarımlar

Bu çalışmanın bulguları, Türkiye inşaat sektörü için şu anlamları taşımaktadır:

- Sürdürülebilirlik Bir Lüks Değildir: Yeşil çatılar, sadece prestijli projelerin bütçe fazlasıyla yaptığı bir süs değil; doğru tasarlandığında her türlü ticari yapıda uygulanabilecek en ekonomik çatı çözümüdür.
- Şartname Sorunu: Sektördeki yüksek maliyet sorununun kökeni, kopyala-yapıştır mantığıyla hazırlanan ve ithal ürünleri zorunlu kılan şartnamelerdir. Bu tez, marka tarifli şartnamelerden, performans esaslı şartnamelere geçilmesinin zorunluluk olduğunu göstermiştir.
- Yatırımcı Dili: Mimarlar ve mühendisler, işverenleri ikna etmek için çevreyi koruyalım gibi soyut argümanlar yerine; bu tezde kullanılan Yatırım Geri Dönüş Süresi (ROI) ve LCC Tasarrufu gibi somut finansal verileri kullanmalıdır.

6.5 Öneriler

Tezin bulguları ışığında sektöre ve akademiye yönelik somut öneriler şunlardır:

- Kamu Otoritelerine: Yeşil çatı teşvikleri verilirken sadece yeşil alan m²'si değil, kullanılan yerel malzeme oranı da bir kriter olmalıdır.
- Yüklenicilere: İthal drenaj levhaları yerine, şantiyeye yakın ocaklardan temin edilecek volkanik tüf (ponza/cüruf) kullanımı standart hale getirilmelidir.
- Gelecek Çalışmalara: Bu çalışma ılıman olan Balıkesir ikliminde yapılmıştır. Gelecek araştırmalar, çok soğuk (Erzurum) veya çok sıcak (Antalya) iklimlerde yerel malzemelerin performans değişimini laboratuvar ortamında test etmelidir.

6.6 Sonuç

Bu tez çalışması, küresel iklim krizinin gölgesinde sürdürülebilir çözümler arayan inşaat sektörü için; "ekonomik kısıtlar" ile "çevresel sorumluluklar" arasındaki çatışmanın çözümsüz olmadığını, aksine Değer Mühendisliği (DM) disiplini ile yönetilebilir bir "optimizasyon fırsatı" olduğunu bilimsel olarak ortaya koymuştur.

Çalışmanın teorik çerçevesinde savunulan ve vaka analizi (Balıkesir AVM) ile ampirik olarak doğrulanan bulgular, yeşil çatı uygulamalarına dair yerleşik algıları temelden sarsacak niteliktedir. Geleneksel yaklaşımların aksine, bir yapının gerçek maliyetinin ihale gününde değil, yapının ekonomik ömrü boyunca (LCC) ölçülmesi gerektiği gerçeği, bu çalışmanın en temel dayanağı olmuştur. Yapılan analizler, ilk yatırımda "ucuz" görünen geleneksel çatıların, enerji verimsizliği ve sık yenileme döngüleri nedeniyle uzun vadede yatırımcıya en büyük finansal yükü getirdiğini tartışmaya yer bırakmayacak şekilde kanıtlamıştır.

Öte yandan, yeşil çatıların yaygınlaşmasını engelleyen "yüksek maliyet" bariyerinin, teknolojinin kendisinden değil, ithalata dayalı malzeme seçimlerinden ve ezbere dayalı şartnamelerden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bu tezde geliştirilen model; Türkiye'nin zengin yerel kaynaklarının (Balıkesir Ponzası vb.), Değer Mühendisliği metodolojisiyle doğru granülometride işlendiğinde, ithal ve petrol türevi muadillerinden çok daha yüksek bir "Değer İndeksi" sağladığını matematiksel olarak ispatlamıştır. Yerel malzeme kullanımı, projeyi sadece %40'a

varan oranda ucuzlatmakla kalmamış, aynı zamanda karbon ayak izini düşürerek ekolojik performansı maksimize etmiştir.

Sonuç olarak bu akademik çalışma, sektöre şu temel mesajı vermektedir: "Sürdürülebilirlik bir lüks değil, akılcı bir mühendislik zorunluluğudur." Yeşil çatılar, doğru tasarım ve değer odaklı malzeme seçimi ile birleştiğinde, sadece doğayı koruyan bir örtü değil, yatırımın geri dönüşünü hızlandıran kârlı bir yapı sistemi haline gelmektedir.

Bu tez; mimarları, mühendisleri ve yatırımcıları, maliyeti kısmak (Cost Cutting) sığlığından kurtulup, "değeri yönetmek" vizyonuna davet etmektedir. Geleceğin yapıları, ne kadar ucuza mal edildikleriyle değil, yaşam döngüleri boyunca çevreye ve ekonomiye ne kadar değer kattıklarıyla ölçülecektir. Bu çalışma, söz konusu dönüşümde Değer Mühendisliği'nin vazgeçilmez bir kılavuz olduğunu literatüre ve sektöre somut verilerle sunmaktadır

KAYNAKÇA

Agyeman, J., Bullard, R. D., & Evans, B. (2003). Just Sustainabilities: Development in an Unequal World. MIT Press.

Ampim, P. A., Sloan, J. J., Cabrera, R. I., Harp, D. A., & Jaber, F. H. (2010). Green Roof Growing Substrates: Types, Ingredients, Composition and Properties. Journal of Environmental Horticulture, 28(4), 244-252.

Aras, Y. (2019). Sürdürülebilir Kentsel Gelişme Kapsamında Yeşil Çatıların Değerlendirilmesi. Kent Akademisi, 12(4), 470-485.

ASTM International. (2020). ASTM E917-17: Standard Practice for Measuring Life-Cycle Costs of Buildings and Building Systems. West Conshohocken, PA.

ASTM International. (2020). ASTM E1699-10: Standard Practice for Performing Value Engineering (VE)/Value Analysis (VA) of Projects, Products and Processes. West Conshohocken, PA.

Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2006). Green Infrastructure: Linking Landscapes and Communities. Island Press.

Berardi, U. (2013). Clarifying the New Interpretations of the Concept of Sustainable Building. Sustainable Cities and Society, 8, 72-78.

Berardi, U. (2015). The Energy Saving Potential of Green Roofs in Different Climates. Energy, 135, 25-36.

Berndtsson, J. C. (2010). Green Roof Performance towards Management of Runoff Water Quantity and Quality: A Review. Ecological Engineering, 36(4), 351-360.

Bianchini, F., & Hewage, K. (2012). Probabilistic Lifecycle Assessment of Green Roofs. Building and Environment, 48, 420-430.

Bytheway, C. W. (2007). FAST: Creativity and Innovation. J. Ross Publishing.

Carson, R. (1962). Silent Spring. Houghton Mifflin.

Castleton, H. F., Stovin, V., & Beck, S. B. (2010). Green Roofs as a Passive Cooling Technique to Reduce Building Energy Loads. Building and Environment, 45(12), 2712-2720.

Çakır, S. (2023). Türkiye'de Yeşil Finansman ve Sürdürülebilir Bankacılık Uygulamaları. Finans Politik & Ekonomik Yorumlar, 60(664), 65-85.

Daly, H. E. (1990). Toward Some Operational Principles of Sustainable Development. Ecological Economics, 2(1), 1-6.

Dell'Isola, A. J. (1997). Value Engineering: Practical Applications for Design, Construction, Maintenance and Operations. RSMeans.

Dell'Isola, A. J. (2016). Value Engineering in the Construction Industry (3rd ed.). Construction Publications.

Dikmeoğlu, Ç., & Atabay, S. (2018). İnşaat Projelerinde Değer Mühendisliği Uygulamaları ve Sürdürülebilirlik İlişkisi. Politeknik Dergisi, 21(1), 15-24.

Ding, G. K. (2008). Sustainable Construction: The Role of Environmental Assessment Tools. Journal of Environmental Management, 86(3), 451-464.

Dobson, A. (1998). Justice and the Environment: Conceptions of Environmental Sustainability and Theories of Distributive Justice. Oxford University Press.

Dunnett, N., & Kingsbury, N. (2008). Planting Green Roofs and Living Walls. Timber Press.

Elkington, J. (1997). Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business. Capstone.

Ertürk, H. (2010). Sürdürülebilir Kalkınma ve Çevre. Beta Yayınları.

Esin, T., & Yüksek, İ. (2009). Yeşil Çatı Sistemlerinin Çevresel ve Ekonomik Sürdürülebilirlik Açısından Değerlendirilmesi. Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 10(2), 175-185.

European Commission. (2019). The European Green Deal. Brussels: COM(2019) 640 final.

FLL. (2018). Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL). Bonn, Germany.

Francis, R. A., & Lorimer, J. (2011). Urban Reconciliation Ecology: The Potential of Living Roofs and Walls. Journal of Environmental Management, 92(6), 1429-1437.

Garde, A. (2009). Sustainable by Design? Insights from U.S. LEED-ND Pilot Projects. Journal of the American Planning Association, 75(4), 424-440.

Getter, K. L., & Rowe, D. B. (2006). The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development. HortScience, 41(5), 1276-1285.

Getter, K. L., Rowe, D. B., & Andresen, J. A. (2007). Quantifying the Effect of Slope on Extensive Green Roof Stormwater Retention. Ecological Engineering, 31(4), 225-231.

Giddings, B., Hopwood, B., & O'Brien, G. (2002). Environment, Economy and Society: Fitting Them Together into Sustainable Development. Sustainable Development, 10(4), 187-196.

Grober, U. (2012). Sustainability: A Cultural History. Green Books.

GZT. (t.y.). İskandinavya'nın masaldan fırlamış yemyeşil evleri [Fotoğraf]. Erişim adresi: https://www.gzt.com/gztmzt/iskandinavyanin-masaldan-firlamis-yemyesil-evleri-2481515

Heemskerck, M. (2012, 26 Nisan). Hanging Gardens of Babylon [İllüstrasyon]. World History

Encyclopedia. https://www.worldhistory.org/image/77/hanging-gardens-of-babylon/

Herman, R. (2003). Green Roofs in Germany: Yesterday, Today and Tomorrow. Proceedings of the 1st North American Green Roof Conference, Chicago, 14-15.

Hopwood, B., Mellor, M., & O'Brien, G. (2005). Sustainable Development: Mapping Different Approaches. Sustainable Development, 13(1), 38-52.

IEA (International Energy Agency). (2021). Global Status Report for Buildings and Construction. Paris.

IEA (International Energy Agency). (2023). Energy Technology Perspectives 2023. Paris.

İMO İzmir. (2021, Ocak). İnşaat Projelerinde Değer Mühendisliği Uygulamaları [Şema]. Erişim adresi: https://bulten.imoizmir.org/2021/01/insaat-projelerinde-deger-muhendisligi-uygulamalari/

IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva.

Kelly, J., Male, S., & Graham, D. (2014). Value Management of Construction Projects (2nd ed.). Wiley-Blackwell.

Keleş, R. (2012). Kentleşme Politikası. İmge Kitabevi.

Kibert, C. J. (2016). Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery (4th ed.). Wiley.

Köhler, M. (2006). Long-term Vegetation Research on Two Extensive Green Roofs in Berlin. Urban Ecosystems, 9, 3-15.

Külekçi, E. A. (2017). Yeşil Çatıların Kentsel Sürdürülebilirliğe Katkıları Üzerine Bir İnceleme. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 48(1), 18-25.

Magill, J. D., Midden, K., Groninger, J., & Therrell, M. (2011). A History and Definition of Green Roof Technology with Recommendations for Future Research. Southern Illinois University Carbondale Research Papers, 91-105.

Mansuroğlu, S. (2011). Çatı Bahçeleri ve Yeşil Çatılar: Tarihçesi, Sınıflandırılması ve Teknik Özellikleri. Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 24(2), 115-122.

Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. (1972). The Limits to Growth. Universe Books.

Mentens, J., Raes, D., & Hermy, M. (2006). Green Roofs as a Tool for Solving the Rainwater Runoff Problem in the Urbanized 21st Century? Landscape and Urban Planning, 77(3), 217-226.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM). (2023). Balıkesir İli İklim Verileri (1990-2023). Ankara.

Miles, L. D. (1972). Techniques of Value Analysis and Engineering (2nd ed.). McGraw-Hill.

Miles, L. D. (2015). Techniques of Value Analysis and Engineering (3rd ed.). Lawrence D. Miles Value Foundation.

Molineux, C. J., Fentiman, C. H., & Gange, A. C. (2009). Characterising Alternative Recycled Waste Materials for Use as Green Roof Growing Media in the UK. Ecological Engineering, 35(10), 1507-1513.

Net Yapı. (t.y.). Maxidrain İntensif Yeşil Çatı Sistemleri [Ürün Görseli]. Erişim adresi: https://www.netyapi.com/maxidrain-intensif-yesil-cati-sistemleri

Neumayer, E. (2013). Weak versus Strong Sustainability: Exploring the Limits of Two Opposing Paradigms (4th ed.). Edward Elgar Publishing.

Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., ... & Rowe, B. (2007). Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. BioScience, 57(10), 823-833.

Ortiz, O., Castells, F., & Sonnemann, G. (2009). Sustainability in the Construction Industry: A Review of Recent Developments Based on LCA. Construction and Building Materials, 23(1), 28-39.

Ornek, A. (2003). İnşaat Sektöründe Değer Mühendisliği ve Uygulama Sorunları. İMO Teknik Dergi, 14(3), 215-230.

Osmundson, T. (1999). Roof Gardens: History, Design, and Construction. W.W. Norton & Company.

Özdemir, H. (2011). Türkiye'de Sürdürülebilir Kentleşme ve İnşaat Sektörünün Rolü. Mevzuat Dergisi, 14(160), 270-285.

Pearce, D. W., Markandya, A., & Barbier, E. B. (1989). Blueprint for a Green Economy. Earthscan.

Peck, S., & Kuhn, M. (2003). Design Guidelines for Green Roofs. Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC).

Redclift, M. (2005). Sustainable Development (1987-2005): An Oxymoron Comes of Age. Sustainable Development, 13(4), 212-227.

Robinson, J. (2004). Squaring the Circle? Some Thoughts on the Idea of Sustainable Development. Ecological Economics, 48(4), 369-384.

Rockström, J., et al. (2009). A Safe Operating Space for Humanity. Nature, 461, 472-475.

Saadatian, O., Sopian, K., Salleh, E., Lim, C. H., Riffat, S., & Saadatian, E. (2013). A Review of Energy Aspects of Green Roofs. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 23, 155-168.

Sachs, W. (1999). Planet Dialectics: Explorations in Environment and Development. Zed Books.

Santamouris, M. (2014). Cooling the Cities – A Review of Reflective and Green Roof Mitigation Technologies to Fight Heat Island and Improve Comfort in Urban Environments. Solar Energy, 103, 682-703.

SAVE International. (2017). Value Methodology Standard. SAVE International Certification Board.

Snodgrass, E. C., & Snodgrass, L. L. (2006). Green Roof Plants: A Resource and Planting Guide. Timber Press.

Stahel, W. R. (2016). The Circular Economy. Nature, 531(7595), 435-438.

Steffen, W., Crutzen, P. J., & McNeill, J. R. (2007). The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature? Ambio, 36(8), 614-621.

Sutton, R. K. (2014). Green Roof Ecosystems. Springer.

Şenel, A. (2010). Türkiye'de Sürdürülebilir Yapılar ve Enerji Verimliliği. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Tavşan, C., & Sönmez, E. (2015). Sürdürülebilir Mimarlıkta Yeşil Çatı Sistemlerinin İncelenmesi. Yapı Dergisi, 402, 44-50.

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2021). Türkiye İklim Değişikliği Ulusal Eylem Planı. Ankara.

Topçu, E. (2020). Türkiye'de Kentsel Dönüşüm ve Sosyal Sürdürülebilirlik İlişkisi. Kentsel Politika Araştırmaları, 5(2), 110-125.

UNEP (United Nations Environment Programme). (2020). 2020 Global Status Report for Buildings and Construction.Nairobi.

United Nations. (1972). Report of the United Nations Conference on the Human Environment. Stockholm.

United Nations. (1992). Rio Declaration on Environment and Development. Rio de Janeiro.

United Nations. (2015). Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. New York.

Urhan, V. (2004). Yapım Yönetiminde Değer Mühendisliği ve Bir Uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Vijayaraghavan, K. (2016). Green Roofs: A Critical Review on the Role of Components, Benefits, Limitations and Trends. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 57, 740-752.

WCED (World Commission on Environment and Development). (1987). Our Common Future. Oxford University Press.

Weiss, E. B. (1990). In Fairness to Future Generations. Environment: Science and Policy for Sustainable Development, 32(3), 6-31.

Yeşil Gazete. (t.y.). İklim değişikliğine karşı yeşil çatılar [Fotoğraf]. Erişim adresi: https://yesilgazete.org/iklim-degisikligine-karsi-yesil-catilar/

Younker, D. L. (2003). Value Engineering: Analysis and Methodology. Marcel Dekker.

Zimmerman, L. W., & Hart, G. D. (1982). Value Engineering: A Practical Approach for Owners, Designers, and Contractors. Van Nostrand Reinhold.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Çelik, A. E. ve Atabay, Ş. (2026, 7-9 Ocak). Determination of materials used in green roofs in sustainable structures via value engineering method [Konferans bildirisi]. International Energy Transition and Sustainability Conference (ETSC'26), İstanbul, Türkiye.