
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

YAŞAM DÖNGÜSÜ SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ANALİZİNİN EVRENSEL TASARIM GÖSTERGELERİYLE GELİŞTİRİLMESİ

Seher DEMİR

DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİYEL TASARIM MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KASIM 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Seher DEMİR

26/11/2025

YAŞAM DÖNGÜSÜ SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ANALİZİNİN EVRENSEL TASARIM GÖSTERGELERİYLE GELİŞTİRİLMESİ

(Doktora Tezi)

Seher DEMİR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2025

ÖZET

Günümüz koşullarında sürdürülebilirlik değerlendirmeleri, ürün sistemlerinin çevresel, ekonomik ve sosyal etkilerinin bütüncül biçimde ele alınmasını gerektirir. Bu tezde, sürdürülebilir ürün tasarımı bağlamında Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Analizi (LCSA) kullanılarak çevresel (LCA), ekonomik (LCC) ve sosyal (SLCA) boyutlar tek ve izlenebilir bir iş akışında birleştirilmiştir. Sosyal boyutun hâlen gelişme aşamasında olması ve geçerli/ölçülebilir gösterge setlerinin sınırlılığı, LCSA çıktılarının bütüncül yorumunu güçleştirmektedir. Bu sınırlılığa yönelik olarak, Evrensel Tasarım (UD) ilkeleri SLCA'ya ölçülebilir göstergeler olarak entegre edilmiş ve LCA, LCC ile SLCA sonuçlarının birlikte incelenmesini sağlayan yeni bir çerçeve önerilmiştir. Bu çalışmada, OpenLCA 2.0.3 yazılımı ile ecoinvent 3.7.1 ve Soca v2. veri tabanları kullanılarak Mutfak Dolapları ile Hava Veri Ölçüm İstasyonu olmak üzere iki örnek olay üzerinde test edilmiştir. Mutfak dolaplarında sürdürülebilirlik etkisini en fazla belirleyen sıcak noktaların tanımlanmasına odaklanılmış; Hava Veri Ölçüm İstasyonu'nda ise batarya seçimine bağlı iki senaryo karşılaştırılmıştır. Bulgular, Mutfak Dolapları'nda tedarik ve üretimin iklim değişikliği ve kaynak kıtlığı kategorilerinde başlıca etkiyi oluşturduğunu göstermektedir. Hava Veri Ölçüm İstasyonu'nda Senaryo-2, diğer seçeneğe kıyasla iklim değişikliği ve toksisite göstergelerinde daha yüksek olumsuz etki göstermiştir. LCC sonuçları, her iki sistemde malzeme alımı ve işçiliğin toplam maliyete anlamlı katkı yaptığını göstermektedir. UD temelli göstergeler, erişilebilirlik ve algılanabilir bilgi alanlarında kullanıcı odaklı performans üzerinde yüksek düzeyde etki göstermiştir. Önerilen çerçeve, LCSA çıktılarının tutarlı biçimde birlikte okunmasını mümkün kılmakta ve yalın bir çok ölçütlü değerlendirme adımı (TOPSIS) aracılığıyla tasarım ve tedarik seçimlerinin nesnel olarak gerekçelendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Bilim Kodu	:	81002
Anahtar Kelimeler	:	Sürdürülebilirlik için tasarım, kapsayıcı tasarım ve kullanılabilirlik, tasarım ve teknolojileri: malzeme ve üretim, ürün tasarımı
Sayfa Adedi	:	163
Danışman	:	Prof. Dr. Veysel ÖZDEMİR

ENHANCING LIFE CYCLE SUSTAINABILITY ASSESSMENT WITH UNIVERSAL DESIGN INDICATORS

(Ph. D. Thesis)

Seher DEMİR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2025

ABSTRACT

Contemporary sustainability assessments require a holistic evaluation of the environmental, economic, and social impacts of product systems. This dissertation used Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) to integrate environmental Life Cycle Assessment (LCA), Life Cycle Costing (LCC), and Social Life Cycle Assessment (SLCA) within a single, traceable workflow. Because the social dimension is still developing and valid, measurable indicator sets remain limited, the holistic interpretation of LCSA outputs is challenging. To address this, Universal Design (UD) principles were integrated into SLCA as measurable indicators, and a reproducible framework was proposed to enable combined evaluation of LCA, LCC, and SLCA results. The framework was tested on two case studies, Kitchen Cabinets and an Air Data Measurement Station, using OpenLCA 2.0.3 with the ecoinvent 3.7.1 and Soca v2 databases. The Kitchen Cabinets case identified hotspots that most strongly shape sustainability performance, while the station case compared two alternatives that differ by battery choice. The findings show that procurement and manufacturing are the main contributors to climate change and resource scarcity in Kitchen Cabinets. In the station system, Scenario-2 showed higher impacts than the alternative in climate change and toxicity indicators. The LCC results indicate that materials procurement and labor contribute significantly to total cost in both systems. UD based indicators permit quantitative comparison of user oriented performance in domains such as accessibility and perceptible information. The proposed framework enables consistent joint reading of LCSA outputs and, through a concise multicriteria evaluation step (TOPSIS), provides objective support for design and sourcing decisions.

Science Code	:	81002
Key Words	:	Design for sustainability, inclusive design and usability, design & technologies: materials and manufacturing, product design
Page Number	:	163
Supervisor	:	Prof. Dr. Veysel ÖZDEMİR

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın hazırlanmasında bana rehberlik eden danışmanım Prof. Dr. Veysel ÖZDEMİR'e tüm destekleri, sabrı ve hoşgörüsü için teşekkürlerimi sunarım. Tez İzleme Komitesi üyeleri Prof. Dr. Hüdayim BAŞAK ve Dr. Öğr. Üyesi Güven MERAL'e; yapıcı değerlendirmeleri, yönlendirici önerileri ve titiz geri bildirimleriyle çalışmanın olgunlaşmasına sağladıkları katkılar için teşekkür ederim.

Veri toplama ve doğrulama aşamalarında destek veren Levent ÖZARSLAN'a ve Özarslan Mobilya çalışanlarına; gösterdikleri misafirperverlik ve sağladıkları değerli destek için teşekkür ederim. Yine veri toplanmasında yardımcı olan Muhammet Tahir DEMİR'e, veri temini ve iş birliği için minnettarım.

Sürecin her aşamasında desteğini hissettiren yol arkadaşlarım Özge, Cemile, Ceren ve Vas'a; ayrıca tez sürecinden dolaylı olarak etkilenen sevgili öğrencilerime ve iş arkadaşlarıma anlayışları ve destekleri için teşekkür ederim.

Son olarak, bu uzun ve zorlu süreçte bana her zaman sevgi, sabır ve motivasyonla destek olan aileme en içten teşekkürlerimi sunarım. Onların varlığı olmadan bu çalışma mümkün olmazdı.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ ix

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xii

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK YAKLAŞIMI VE YAŞAM DÖNGÜSÜ DÜŞÜNCESİ 9

2.1. Sürdürülebilirliğin Temel Kuramsal Yaklaşımları 10

2.1.1. Üçlü sorumluluk modeli (Triple Bottom Line, TBL) 10

2.1.2. Sürdürülebilir kalkınma amaçları (SKA) 12

2.2. Yaşam Döngüsü Düşüncesi 14

2.2.1. Yaşam döngüsü analizi (LCA) 15

2.2.2. Yaşam döngüsü maliyetlendirme (LCC) 16

2.2.3. Sosyal yaşam döngüsü analizi (SLCA) 18

2.2.4. Yaşam döngüsü sürdürülebilirlik analizi (LCSA) 22

3. EVRENSEL TASARIM 25

Sayfa

3.1. Evrensel Tasarımın Gelişimi 25
3.2. Evrensel Tasarım İlkeleri 27
3.3. Sürdürülebilirlik ve Evrensel Tasarım İlişkisi 33
4. YÖNTEM 41
4.1. Araştırma Deseni 41
4.2. Kullanılan Yazılım ve Veri Kaynakları 45
4.3. Evrensel Tasarımın SLCA'ya uyarlanması 47
5. ÖRNEK OLAY 1: MUTFAK DOLAPLARI 51
5.1. Amaç ve Kapsam Tanımı 52
5.2. Envanter Analizi 55
5.2.1. Verilerin toplanması 56
5.2.2. Verilerin düzenlenmesi 58
5.2.3. Verilerin işlenmesi 60
5.3. Etki Değerlendirme 66
5.3.1. Çevresel bulgular 67
5.3.2. Ekonomik bulgular 76
5.3.3. Sosyal bulgular 77
5.3.4. Normalizasyon ve ağırlıklandırma 80
5.4. Yorumlama 83
6. ÖRNEK OLAY 2: HAVA VERİ ÖLÇÜM İSTASYONU 89
6.1. Amaç ve Kapsam Tanımı 90
6.2. Envanter Analizi 95
6.2.1. Verilerin toplanması 96
6.2.2. Verilerin düzenlenmesi 99
6.2.3. Verilerin işlenmesi 101
6.3. Etki Değerlendirme 104

Sayfa

6.3.1. Çevresel bulgular 105
6.3.2. Ekonomik bulgular 107
6.3.3. Sosyal bulgular 109
6.4. Yorumlama 112
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 117
KAYNAKLAR 121
EKLER 133
EK-1. Etik kurul raporu 134
EK-6. Örnek olay-1 Monte Carlo Simülayon grafikleri 148
EK-7. Hava veri ölçüm istasyonu senaryo-1 için sisteme girilen veriler 150
EK-8. Hava veri ölçüm istasyonu senaryo-2 için sisteme girilen veriler 152
EK-9. Örnek olay-2 evrensel tasarım ilkeleri için sezgisel kontrol listesi 154
EK-10. Örnek olay-2 Senaryo-1 Monte Carlo Simülasyon grafikleri 159
EK-11. Örnek olay-2 Senaryo-2 Monte Carlo Simülasyon grafikleri 161
ÖZGEÇMIŞ 163

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. S-LCA'da paydaş kategorileri ve etki alt kategoriler 20

Çizelge 3.1. UD ilkeleri ile SKA eşleştirmesi 36

Çizelge 5.1. Örnek Olay-1 için süreç–sosyal gösterge eşleşmesi 64

Çizelge 5.2. Örnek olay-1 için çevresel etki kategorisi sonuçları 68

Çizelge 5.3. Örnek olay-1 için karar matrisi (ham değerler) 83

Çizelge 5.4. Örnek olay-1 için TOPSIS yakınlık katsayıları 84

Çizelge 5.5. Örnek Olay-1 için duyarlılık analizi sonuçları 85

Çizelge 6.1. Örnek olay-2 için karar matrisi (ham değerler) 112

Çizelge 6.2. Örnek olay-2 için TOPSIS yakınlık katsayıları 113

Çizelge 6.3. Örnek olay-2 için duyarlılık analizi sonuçları 113

Çizelge 6.4. Senaryolara ait monte carlo simulasyonu sonuçları 114

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Üçlü Sorumluluk (TBL) kavramının temel boyutları ve kesişim kümeleri ... 11

Şekil 2.2. Sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ait düğün pastası modeli [26] 13

Şekil 3.1. Paydaş gruplarının "Kelebek Modeli" ile Temsili 39

Şekil 4.1. Pedigree Matrix Türkçeleştirilmiş 50

Şekil 5.1. Örnek olay-1 için ürün sistemi ve sistem sınırı. 54

Şekil 5.2. Örnek olay-1 için karasal ekotoksisteye en çok etki eden 5 akış 69

Şekil 5.3. Örnek olay-1 için arazi kullanımına en çok etki eden 5 akış 70

Şekil 5.4. Örnek olay-1 için insan toksisitisine (kanserojen olmayan) en çok etki eden 5 akış 71

Şekil 5.5. Örnek olay-1 için iklim değişikliğine en çok etki eden 5 akış 72

Şekil 5.6. Örnek olay-1 için fosil yakıtların tükenmesine en çok etki eden 5 akış..... 73

Şekil 5.7. Örnek olay-1 için iyonlaştırıcı radyasyona en çok etki eden 5 akış 74

Şekil 5.8. Örnek olay-1 için insan toksisitesi: kansorejene en çok etki eden 5 akış..... 75

Şekil 5.9. Örnek Olay-1'e ait pareto grafiği 76

Şekil 5.10. Örnek olay-1 için SWIM+UD etki sonuçları 78

Şekil 5.11. Örnek olay-1 ısı haritası 82

Şekil 5.12. Örnek olay-1 duyarlılık analizine ait radar grafiği 86

Şekil 6.1. Hava veri ölçüm istasyonu ürün sistemi ve sistem sınırı 93

Şekil 6.2. Örnek olay-2 için ReCiPe midpoint 2016 (H) etki yöntemi sonuçları 106

Şekil 6.3. Örnek olay-2 için sosyal bulgulara ait sunburst grafiği 109

Şekil 6.4. Örnek olay-2 için paydaş bazında alan grafiği 111

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
°C	Santigrat derece
CO_2	Karbon dioksit
Ni	Nikel
V	Vanadyum
Cr	Krom
kg 1,4-DCB-eq	Kilogram 1,4-diklorobenzen eşdeğeri
m^2·yıl crop-eq	Metrekare-yıl tarım eşdeğeri
g CO_2-eq	Gram karbon dioksit eşdeğeri
kg oil-eq	Kilogram petrol eşdeğeri
kBq Co-60 eq	Kilobekquerel Kobalt-60 eşdeğeri
kg N-eq	Kilogram nitrojen eşdeğeri
kg CFC-11-eq	Kilogram kloroflorokarbon-11 eşdeğeri
kg NOx-eq	Kilogram nitrojen oksit eşdeğeri
kg Cu-eq	Kilogram bakır eşdeğeri

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
3P	Üçlü sorumluluk (İnsan, gezegen, kâr)
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ADA	Engelli Amerikalılar Yasası
ANSI	Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü
BM	Birleşmiş Milletler
CSR	Kurumsal Sosyal Sorumluluk
CUD	Evrensel Tasarım Merkezi
EIDD	Avrupa Tasarım ve Engellilik Enstitüsü
EIPRO	Ürünlerin Çevresel Etkileri

Kısaltmalar	Açıklamalar
ILCD	Uluslararası Yaşam Döngüsü Veri Sistemi
IPCC	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli
ISO	Uluslararası Standardizasyon Örgütü
JRC	Avrupa Komisyonu Ortak Araştırma Merkezi
KHK	Kanun Hükmünde Kararname
LCA	Yaşam Döngüsü Analizi
LCC	Yaşam Döngüsü Maliyetlendirme
LCI	Yaşam Döngüsü Envanteri
LCIA	Yaşam Döngüsü Etki Analizi
LCSA	Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Analizi
LCT	Yaşam Döngüsü Düşüncesi
NIDRR	Ulusal Engellilik ve Rehabilitasyon Araştırma Enstitüsü
PSILCA	Ürün Sosyal Etki Yaşam Döngüsü Analizi Veritabanı
REPA	Kaynak ve Çevre Profil Analizi
RER	Ortalama Avrupa Verisi
RoW	Dünyanın Geri Kalanı
SKA	Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları
SETAC	Çevre Toksikolojisi ve Kimyası Derneği
SHBD	Sosyal Sıcak Nokta Veritabanı
SIWM	Sosyal Etkiler Ağırlıklandırma Yöntemi
SLCA	Sosyal Yaşam Döngüsü Analizi
TBL	Üçlü Alt Çizgi
TOPSIS	İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Sıralama Tekniği
UD	Evrensel Tasarım
UDA	Evrensel Tasarım Analizi
UNDP	Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı
UNEP	Birleşmiş Milletler Çevre Programı
WBCSD	Sürdürülebilir Kalkınma için Dünya İş Konseyi

1. GİRİŞ

Son yıllarda iklim değişikliğinin etkilerinin belirginleşmesi, küresel sıcaklık artışının geri dönüşü olmayan eşiklere yaklaşması, doğal kaynakların tükenme hızının artması ve sosyo-ekonomik eşitsizliklerin derinleşmesi sürdürülebilir kalkınmayı insanlık için kaçınılmaz bir hedef haline getirmiştir. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC, 2023) tarafından yayımlanan son rapor, küresel sıcaklık artışını 1,5°C ile sınırlama hedefine ulaşmanın eşiğinde olduğunu ve geri döndürülemez değişiklikler riskinin arttığını ortaya koymaktadır [1]. Ayrıca, doğal kaynakların yenilenme hızını aşan tüketim oranları ve artan atık üretimi, ekosistem hizmetlerini ciddi şekilde tehdit etmektedir [2].

Çevresel krizlerin yanı sıra, dünyanın farklı bölgelerinde yaşanan çatışmalar tarihte kaydedilen en yüksek mülteci ve zorla yerinden edilmiş insan sayılarına yol açmakta; COVID-19 pandemisi ise başta eğitim, sağlık ve istihdam alanlarında olmak üzere pek çok sektörde mevcut kırılganlıkları derinleştirmektedir [3]. Dünya Bankası ve Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı (UNDP) verileri, sosyo-ekonomik eşitsizliklerin küresel ölçekte arttığını ve bu durumun sürdürülebilir kalkınma çabalarını ciddi biçimde tehdit ettiğini göstermektedir [4].

Birleşmiş Milletler'in (BM) belirlediği 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA), bu çok boyutlu krizlerin üstesinden gelmek için bütüncül bir yaklaşım benimsenmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Özellikle Amaç 9: Sanayi, Yenilikçilik ve Altyapı, Amaç 12: Sorumlu Üretim ve Tüketim ve Amaç 13: İklim Eylemi, ürün tasarım süreçlerinin çevresel ve sosyal sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda yeniden şekillenmesini zorunlu kılmaktadır.

Tüm bu gelişmeler ışığında, ürün tasarımcıları değişimi yönlendirme ve sürdürülebilirlik ilkelerini tasarım kararlarına entegre etme konusunda kritik bir role sahiptir. Artan çevresel baskılar ve toplumların değişen değer yargıları, tasarım süreçlerinde yalnızca estetik ve işlevselliğin değil, aynı zamanda çevresel ve sosyal sorumluluğun da temel belirleyiciler haline gelmesine neden olmuştur. Tasarımcılar, en geniş kullanıcı kitlesinin ihtiyaçlarını karşılamakla birlikte, çevreye duyarlı ve toplumsal faydayı gözeten ürün çözümleri geliştirmekle yükümlüdür.

Tasarım kararlarının ne ölçüde sürdürülebilir olduğunu değerlendirebilmek için, yalnızca sezgisel ya da yüzeysel gözlemler değil, yaşam döngüsü boyunca izlenebilir ve karşılaştırılabilir veriler temel alınmalıdır. Ürünlerin çevresel etkilerinin, ekonomik maliyetlerinin ve sosyal sonuçlarının sistemli bir şekilde analiz edilebilmesi, sürdürülebilirlik kavramının somut tasarım kararlarına dönüşmesi açısından kritik önem taşımaktadır. Bu nedenle, sürdürülebilirliğin ürün düzeyinde nasıl değerlendirileceği sorusu, kavramın ortaya çıktığı ilk dönemlerden itibaren tasarım araştırmalarının önemli başlıklarından biri olmuştur.

Sürdürülebilirliğin farklı boyutlarını değerlendirebilmek amacıyla, zamanla birbirini tamamlayan çeşitli analiz yöntemleri ortaya çıkmıştır. Ekolojik sürdürülebilirlik için Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) [5], ekonomik sürdürülebilirlik için Yaşam Döngüsü Maliyetlendirme (LCC) [6] ve sosyal sürdürülebilirlik için Sosyal Yaşam Döngüsü Analizi (SLCA) [7] yaklaşımları bu bağlamda öne çıkan yöntemlerdir. Bu yöntemler, ürünlerin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini, ekonomik maliyetlerini ve sosyal etkilerini ayrı ayrı analiz etmeye olanak tanımaktadır. Uygulama alanı bakımından değerlendirildiğinde, LCA'nın hem akademik hem de kurumsal çevrelerde en yaygın ve metodolojik olarak en çok standartlaşmış yaklaşım olduğu söylenebilir. LCC, çoğunlukla maliyet analizi odaklı projelerde LCA ile birlikte kullanılmakta, karar vericiler açısından tamamlayıcı bir araç olarak değerlendirilmektedir. SLCA ise görece daha yeni bir yöntem olup, sosyal etkilerin değerlendirilmesine yönelik kapsamlı bir çerçeve sunmakla birlikte, göstergelerin seçimi ve veri toplama süreçleri henüz tam anlamıyla standartlaşmamıştır [8]. Bu nedenle, SLCA uygulamalarında kullanılan ölçütlerin çoğu hâlâ nitel verilere dayalıdır ve kantitatif veri elde etme konusunda çeşitli zorluklar bulunmaktadır. Bu durum, sosyal sürdürülebilirliğin değerlendirilmesini diğer iki boyuta göre daha sınırlı hale getirmekte, analizlerin karşılaştırılabilirliğini zorlaştırmaktadır.

Söz konusu yöntemlerin birbirinden bağımsız uygulanması, özellikle çok boyutlu karar verme süreçlerinde tekrar eden değerlendirmelere, veri uyumsuzluklarına ve yorum farklılıklarına neden olabilmektedir. Bu bağlamda, sürdürülebilirliğin üç boyutunu eş zamanlı olarak ele almayı hedefleyen Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Analizi (LCSA) yöntemi önerilmiştir [9]. LCSA; LCA, LCC ve SLCA verilerinin bütüncül bir yapıda bir araya getirilmesine olanak tanıyarak, ürün sistemlerinin genel sürdürülebilirlik performansının daha tutarlı bir biçimde değerlendirilmesine zemin hazırlar. Bu yöntem

sayesinde, her bir boyutun güçlü ve zayıf yönleri birlikte ele alınabilir ve farklı değerlendirme çıktıları arasındaki tutarsızlıklar daha net bir şekilde ortaya konulabilir.

Ancak, LCSA'da özellikle sosyal boyutun değerlendirilmesi, yöntemsel çeşitlilik ve gösterge temelli belirsizlikler nedeniyle diğer boyutlara kıyasla nispeten zayıf bir konumda yer almaktadır. Bu SLCA'nın karşılaştırılabilirliğini ve pratik uygulanabilirliğini zorlaştırmaktadır [8].

SLCA, ürün ve hizmetlerin yaşam döngüsü boyunca çeşitli paydaşlar üzerindeki sosyal etkilerini değerlendirmeye yönelik bir çerçeve sunar. UNEP/SETAC tarafından geliştirilen 2009 tarihli rehberde SLCA'nın temel paydaş kategorileri; işçiler, toplum, tüketiciler, değer zinciri aktörleri ve yerel topluluklar olarak belirlenmiştir [7]. 2020 yılında yayımlanan güncel rehberle birlikte bu listeye "çocuklar" gibi özel savunmasız gruplar da dahil edilmiştir [10].

Ancak mevcut SLCA göstergeleri incelendiğinde, erişilebilirlik, kapsayıcılık, eşit kullanım ve estetik gibi tasarıma doğrudan etki eden kullanıcı temelli sosyal göstergelerin yeterince temsil edilmediği görülmektedir. Özellikle ürünlerin son kullanıcı üzerindeki sosyal etkileri, SLCA'nın mevcut gösterge sisteminde ya dolaylı olarak ele alınmakta ya da tamamen dışarıda bırakılmaktadır. Bu durum, SLCA'nın kullanıcı merkezli sosyal sürdürülebilirlik boyutunu ölçmede sınırlı kalmasına yol açmaktadır [11].

Bu çalışma, SLCA'nın sosyal gösterge sistemini daha kapsayıcı ve kullanıcı odaklı hale getirmek amacıyla, Evrensel Tasarım (UD) ilkelerini SLCA yapısına entegre etmeyi önermektedir. Evrensel Tasarım; mümkün olan en geniş kullanıcı grubunun fiziksel, bilişsel ve kültürel farklılıkları gözetilerek ürünleri eşit, onurlu ve bağımsız biçimde kullanabilmesini hedefleyen bir tasarım yaklaşımıdır [12]. UD'nin yedi temel ilkesi sosyal sürdürülebilirlik açısından doğrudan ölçülebilir çıktılar üretme potansiyeline sahiptir.

Bu tez kapsamında, Evrensel Tasarım ilkeleri SLCA'nın "tüketici", "toplum" ve "çocuklar" gibi paydaş kategorileri ile ilişkilendirilerek gösterge seviyesine indirgenmiş ve OpenLCA platformu üzerinde uygulanabilir hale getirilmiştir. Her bir UD ilkesi alt başlıklarıyla birlikte birer sosyal etki göstergesi olarak yapılandırılmış; SLCA sistemine entegre edilmiştir. Bu

yaklaşım sayesinde, SLCA çıktıları daha nicel, yeniden üretilebilir ve kapsayıcı hale getirilmiş, sosyal etki değerlendirmelerinde tasarıma özgü katkılar netleştirilmiştir.

Problem durumu

Sürdürülebilirlik analizlerinin ürün ölçeğinde sistemli biçimde gerçekleştirilmesi amacıyla geliştirilen LCSA, çevresel (LCA), ekonomik (LCC) ve sosyal (SLCA) etkileri bütüncül bir çerçevede değerlendirmeyi hedeflemektedir. Ancak bu yöntemin bileşenlerini oluşturan analiz araçları gelişmişlik düzeyleri bakımından önemli farklılıklar göstermektedir. LCA, hem kurumsal hem akademik düzeyde kapsamlı biçimde standartlaştırılmış, ve geniş veri tabanlarıyla desteklenen bir yapıdadır. LCC, genellikle maliyet odaklı karar verme süreçlerinde LCA ile entegre şekilde kullanılan, daha sınırlı bir uygulama geçmişine sahip olsa da karar vericiler için tamamlayıcı rol oynamaktadır. Buna karşın SLCA, sosyal etkilerin değerlendirilmesi konusunda önemli bir çerçeve sunsa da gösterge seçiminde nesnellik, veri toplama yöntemlerindeki tutarsızlıklar ve kurumsal standardizasyon eksikliği gibi nedenlerle hâlen gelişim aşamasındadır.

SLCA'nın mevcut uygulamalarında, sosyal göstergeler çoğunlukla işçi hakları, tedarik zinciri ilişkileri ve topluluk üzerindeki etkiler gibi yapısal konulara odaklanmakta; ancak ürünlerin nihai kullanıcılar üzerindeki etkileri, özellikle erişilebilirlik, eşitlik, kapsayıcılık ve estetik deneyim gibi tasarıma doğrudan etki eden sosyal çıktılar, değerlendirme dışı kalmaktadır. Oysa sürdürülebilir ürün tasarımı, yalnızca çevresel ve ekonomik verimlilik değil, aynı zamanda farklı kullanıcı gruplarının onurlu, bağımsız ve eşit biçimde ürüne erişebilmesi gibi sosyal hedefleri de içermelidir. Bu eksiklik, LCSA'nın sunduğu bütüncül değerlendirme çerçevesini sosyal boyutta zayıflatmakta, ürün tasarımı bağlamında analizlerin kapsayıcılığını sınırlamaktadır.

Kullanıcı temelli sosyal çıktılara odaklanan göstergelerin SLCA yapısına entegre edilmesi, LCSA yönteminin sosyal boyutunu güçlendirmek ve özellikle tasarım süreçlerine katkı sunmak adına önemli bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, Evrensel Tasarım (UD) ilkeleri; farklı yaş, cinsiyet, fiziksel ve bilişsel yetkinliğe sahip kullanıcıların eşit kullanım deneyimini gözeten bir tasarım felsefesi olarak, SLCA göstergelerini niteliksel açıdan zenginleştirme potansiyeline sahiptir. UD' nin yedi temel ilkesi sosyal sürdürülebilirlik göstergelerine ölçülebilir ve sistematik bir temel sunmaktadır.

Ürün tasarımı alanında LCSA yaklaşımı ile yapılan çalışmaların sayısı oldukça sınırlıdır [13]. Özellikle sosyal göstergelerin tasarım tabanlı yeniden yapılandırılmasına yönelik uygulamalı metodolojik örnekler yok denecek kadar azdır. Önceki çalışmalarda, LCSA'nın ürün geliştirme sürecine entegrasyonunun teorik düzeyde kaldığı; özellikle SLCA'nın tasarım kararlarını yönlendirecek şekilde yapılandırılmadığı görülmektedir. Bu tez çalışması, daha önce yürütülen araştırma kapsamında tespit edilen bu eksiklikler ışığında şekillenmiş olup, SLCA'ya entegre edilen Evrensel Tasarım göstergeleriyle, kullanıcı temelli sosyal sürdürülebilirlik analizlerinin uygulanabilirliğini artırmayı hedeflemektedir. Tez kapsamında geliştirilen bu sistem, iki farklı ürün örneği üzerinden test edilmiş; böylece hem göstergelerin somut çıktılar üretip üretmediği değerlendirilmiş hem de LCSA yöntemi içinde SLCA'nın yapısal olarak nasıl güçlendirilebileceği ortaya konmuştur.

Araştırmanın amacı

Bu araştırmanın temel amacı, sürdürülebilir tasarım ve Evrensel Tasarım ilkelerine uygun ürün tasarımı yapılabilmesi için, tasarım sürecinde Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Analizi (LCSA) yönteminin uygulanabilirliğini ortaya koymak ve özellikle sosyal boyutun değerlendirilmesinde yeni bir gösterge yapısı önererek metodolojik katkı sağlamaktır.
Bu kapsamda; LCA, LCC ve SLCA bileşenlerinin entegre edildiği bir sistem oluşturularak, SLCA'nın kullanıcı temelli sosyal göstergeler bakımından eksik kalan yönleri Evrensel Tasarım ilkeleri ile desteklenmiş; bu yapının geçerliliği ise iki farklı ürün örneği üzerinden test edilmiştir.

Araştırmanın önemi

Bu çalışma, sürdürülebilir tasarım ve Evrensel Tasarım kavramlarını bir araya getirerek sosyal sürdürülebilirlik değerlendirmelerine kullanıcı odaklı bir bakış açısı kazandırmayı hedeflemektedir. SLCA göstergelerine Evrensel Tasarım temelli ölçütlerin entegre edilmesi, yöntemin kapsayıcılığını artırmak açısından önemlidir. Ayrıca, literatürde sınırlı sayıda yer bulan ürün tasarımı süreçlerinde LCSA uygulamalarına örnek oluşturması bakımından da değer taşımaktadır.

Varsayımlar

- Tasarımcıların ürün tasarımı sürecinde verdikleri kararlar, ürünün çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik performansını doğrudan etkiler. Tasarım sürecinde alınan malzeme seçimi, üretim yöntemi, kullanım kolaylığı gibi kararlar, ürünün tüm yaşam döngüsüne yansıyan etkileri belirler.
- Sürdürülebilir Tasarım ile Evrensel Tasarım kavramları birbiriyle örtüşen kaygılar barındırmakta olup birlikte değerlendirilebilir. Her iki yaklaşım da kullanıcı çeşitliliğine duyarlı, uzun ömürlü ve sosyal fayda sağlayan tasarım çözümleri üretmeyi hedeflemektedir.
- Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Analizi (LCSA) yönteminin tasarım sürecine entegre edilmesi, sürdürülebilirlik ve kapsayıcılık ilkelerine daha uygun ürünlerin geliştirilmesine katkı sağlar.
- Evrensel Tasarım ilkeleri, SLCA yönteminde kullanılan bazı paydaş kategorileriyle doğrudan ilişkilendirilebilir ve sosyal göstergeler düzeyinde değerlendirilebilir.
- OpenLCA yazılımı, SLCA sistemine entegre edilen Evrensel Tasarım göstergelerinin modellenmesi ve değerlendirilmesi için uygun bir araçtır.

Sınırlılıklar

Bu tez çalışması, sürdürülebilirlik değerlendirmesini ürün tasarımı ölçeğinde ele almakta ve sosyal boyutu SLCA yöntemi ile yapılandırılmış göstergeler üzerinden değerlendirmektedir. Bu bağlamda, çalışmanın kavramsal kapsamı sistem ya da hizmet tasarımı gibi farklı düzeylerdeki uygulamaları içermemektedir. Evrensel Tasarım ilkeleri, SLCA göstergelerine entegre edilerek özgün bir katkı sunulmuş olmakla birlikte, farklı kapsayıcı tasarım yaklaşımlarıyla karşılaştırmaya gidilmemiştir. Ayrıca, çalışma yalnızca iki örnek olay üzerinden yürütüldüğü için, elde edilen bulguların daha geniş bağlamlara genellenmesi sınırlı olabilir.

Yöntemsel açıdan, SLCA değerlendirmesi için Soca veritabanı kullanılmış ve analizler OpenLCA yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu araçların sahip olduğu teknik yapı ve gösterge formatı, çalışmanın yürütülmesinde belirli bir metodolojik çerçeve oluşturmuş, ancak analiz seçeneklerini bazı yönlerden sınırlamıştır. Kullanılan veriler doğrulanabilir ve

yeniden üretilebilir nitelikte olmakla birlikte, her modellemede olduğu gibi yorum farklılıkları oluşturabilecek bazı varsayımlar içermektedir.

2. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK YAKLAŞIMI VE YAŞAM DÖNGÜSÜ DÜŞÜNCESİ

Sürdürülebilirlik kavramı, literatürde sıklıkla 1987 tarihli Brundtland Raporu ile anılsa da, bu düşüncenin temelleri yüzyıllar öncesine uzanan uygulamalı deneyimlere dayanmaktadır. 18. yüzyılın başlarında Almanya'da yaşanan orman tahribatı ve odun kıtlığı, bu alanda sürdürülebilir bir yönetim anlayışının gelişmesine zemin hazırlamıştır. Saksonya'da maden endüstrisinin odun ihtiyacını karşılamakla görevli olan Hans Carl von Carlowitz, 1713 yılında yayımladığı Sylvicultura Oeconomica adlı eserinde, yalnızca doğanın kendini yenileyebileceği ölçüde ağaç kesilmesini savunmuş ve bu yaklaşımı "Nachhaltigkeit" (sürdürülebilirlik) terimiyle tanımlamıştır [14][15]. Carlowitz'in ortaya koyduğu bu ilke, yalnızca ormanların korunmasını değil, aynı zamanda doğal kaynakların sosyal ve ekonomik süreklilik gözetilerek yönetilmesini esas alan bütüncül bir anlayışı temsil etmektedir. Bu yaklaşım zamanla Avrupa'dan Hindistan'a ve Amerika Birleşik Devletleri'ne kadar yaygınlık kazanarak, modern sürdürülebilir orman yönetimi anlayışının temelini oluşturmuştur [2].

Sürdürülebilirlik kavramının genel kabul görmesi özellikle 20. yüzyılın ikinci yarısına denk gelmektedir. 1960'lı yıllarda çevre sorunlarının belirginleşmesi, doğanın kendini yenileyebilme kapasitesinin sorgulanmasına neden olmuştur. Özellikle Çernobil nükleer kazası (1986) ve Hindistan'daki Bhopal gaz faciası (1984) gibi önemli çevre felaketleri, toplumların çevre ve insan sağlığı arasındaki ilişkiyi daha fazla düşünmelerine yol açmıştır. Bu sorgulama süreci, 1972 yılında Roma Kulübü tarafından yayımlanan Ekonomik Büyümenin Sınırları (The Limits to Growth) raporuyla daha sistematik hale gelmiştir [16]. Bu rapor, ekonomik büyümenin çevresel sınırlarla karşı karşıya olduğunu bilimsel modellerle ortaya koyan ilk önemli çalışmadır. Takip eden yıllarda, çevresel kaygılar; sosyal adalet, eşitlik ve ekonomik kalkınma gibi taleplerle birleşerek daha kapsamlı bir sürdürülebilirlik anlayışına evrilmiştir.

1987 yılında Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu tarafından hazırlanan ve Brundtland Raporu olarak bilinen Ortak Geleceğimiz (Our Common Future) raporu, sürdürülebilir kalkınma kavramını ilk kez evrensel düzeyde resmen tanımlamıştır [17]. Rapora göre sürdürülebilir kalkınma, "gelecek kuşakların kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğini tehlikeye atmadan, bugünkü kuşakların ihtiyaçlarını karşılayan kalkınma" şeklinde ifade

edilmiştir. Böylelikle sürdürülebilirliğin sadece çevresel boyutuyla değil, ekonomik ve sosyal boyutlarıyla da ele alınması gerektiği açıkça belirtilmiştir.

1990'lı yıllar, sürdürülebilirlik kavramının kurumsallaştığı ve ölçülebilir hedeflerle desteklenmeye başlandığı bir dönemdir. Birleşmiş Milletler' in 1992 yılındaki Rio Zirvesi'nde, sürdürülebilirliğin politik ve küresel bir eylem planına dönüştürülmesi amaçlanmış ve "Gündem 21" (Agenda 21) kabul edilmiştir [18]. Aynı dönemde iş dünyası da bu sürece katılarak, sürdürülebilirlik ilkelerini kapsayan Kurumsal Sosyal Sorumluluk (Corporate Social Responsibility - CSR) kavramını benimsemiştir [19].

2.1. Sürdürülebilirliğin Temel Kuramsal Yaklaşımları

Sürdürülebilirlik, insanlığın çevresel, ekonomik ve toplumsal sorunlarla karşı karşıya kaldığı modern çağda, farklı disiplinlerin kesişiminde şekillenen çok boyutlu ve dinamik bir kavramdır. Kavramın günümüze ulaşan teorik çerçevesi; endüstriyel devrim sonrası yaşanan çevre krizleri, kaynakların tükenme endişesi, artan eşitsizlikler ve küresel kalkınma arayışlarının etkisiyle sürekli evrilmiştir. 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren, sürdürülebilirlik yalnızca çevreci bir duyarlılıktan çıkarak; ekonomik büyüme, toplumsal refah ve ekosistem dengesi arasında kurulan karmaşık ilişkiler ağına dayanan, bütüncül bir yaklaşım olarak ele alınmaya başlanmıştır. Bu bölümde, sürdürülebilirliğin literatürde en çok kabul gören temel kuramsal yaklaşımları ayrıntılı biçimde sunulmaktadır. Özellikle Üçlü Sorumluluk modeli, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları ve zayıf-güçlü sürdürülebilirlik tartışmaları, kavramın güncel teorik omurgasını oluşturan başlıca yaklaşımlar olarak öne çıkmaktadır.

2.1.1. Üçlü sorumluluk modeli (Triple Bottom Line, TBL)

Üçlü Sorumluluk Yaklaşımı, John Elkington tarafından 1997 yılında geliştirilmiş olup, sürdürülebilirliğin üç temel boyutta ele alınmasını öngörür: çevresel bütünlük (Planet), sosyal adalet ve refah (People), ekonomik kalkınma ve kârlılık (Profit) [20]. Bu yaklaşım, kurumların ve toplumların uzun vadede sürdürülebilir olabilmesi için yalnızca ekonomik çıktılara odaklanmanın yetersiz olduğunu, çevresel ve sosyal boyutların da eşit öneme sahip olduğunu vurgular. TBL modeli; özellikle işletmelerin ve kamu kuruluşlarının performansını değerlendirirken, çevresel etkiler, toplumsal fayda ve ekonomik verimliliği

birlikte gözeten bir ölçüt seti sunar. Bu sayede, karar alma süreçlerinde tek boyutlu kârlılık hedefi yerine, çok boyutlu ve dengeli bir sürdürülebilirlik yaklaşımı benimsenir [20].



Şekil 2.1. Üçlü Sorumluluk (TBL) kavramının temel boyutları ve kesişim kümeleri [21]

Bu modelin en çok kabul gören temsili ise, Şekil 2.1.'deki üçlü kesişim diyagramında (Venn şeması) görsel olarak ortaya konmaktadır. Şemada çevresel (Planet), sosyal (People) ve ekonomik (Profit) boyutların hem ayrı ayrı hem de kesişim kümeleri üzerinden sürdürülebilirliğin nasıl bütünleştiği açıkça gösterilmektedir. Özellikle iki boyutun kesişiminden doğan katlanabilir (bearable), adil (equitable), yaşanabilir (viable) alanları, sürdürülebilirliğin yalnızca üç ayrı boyuttan ibaret olmadığını; bu boyutlar arasındaki etkileşim, denge ve sinerjinin de kavramsal bütünlük açısından merkezi öneme sahip olduğunu vurgulamaktadır. Tüm boyutların ortak kesişim noktası ise 'sürdürülebilirlik' olarak adlandırılır. Böylece görsel temsil, sürdürülebilirliğin çok boyutlu doğasını hem bütüncül hem de karşılıklı ilişkiler ağında konumlandırır [21].

TBL, sürdürülebilirliğin çevresel, sosyal ve ekonomik boyutlarını teorik bir çerçeveye oturturken, bu yaklaşım Birleşmiş Milletler'in küresel politika araçlarında somutlaşır. Özellikle TBL'nin vurguladığı denge ve bütüncül bakış, 2015 yılında kabul edilen Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) ile doğrudan örtüşmekte; SKA'lar,, TBL'nin soyut

ilkelerini 17 somut hedef ve 169 alt hedef üzerinden eyleme dönüştürerek, ülkeler ve kurumlar için ölçülebilir bir yol haritası sunar. Bu bağlamda, TBL'nin kavramsal temeli, SKA'ların uygulama odaklı yapısıyla birleşerek sürdürülebilirlik tartışmalarını hem teorik hem de pratik düzeyde zenginleştirir [22].

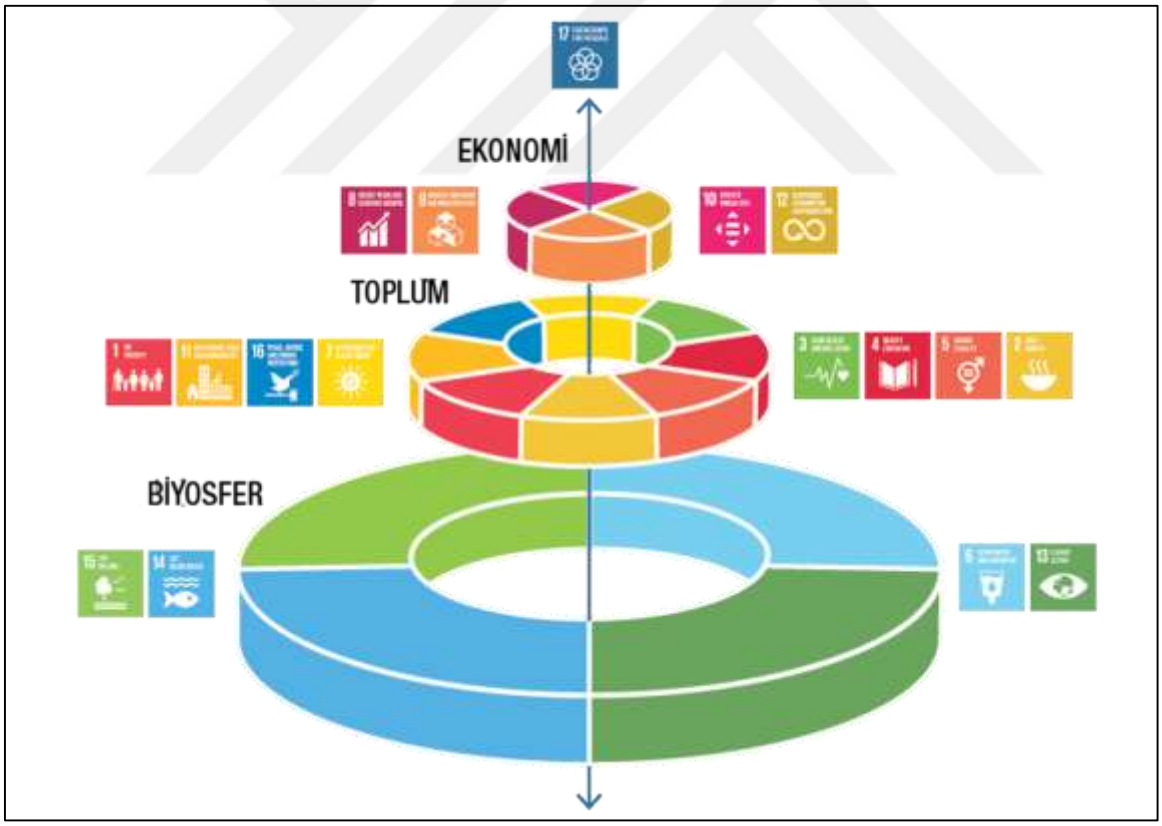
2.1.2. Sürdürülebilir kalkınma amaçları (SKA)

Birleşmiş Milletler tarafından 2015 yılında ilan edilen Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları, sürdürülebilir kalkınmanın uluslararası ölçekte izlenmesi, değerlendirilmesi ve yönlendirilmesi amacıyla oluşturulmuş, çok katmanlı ve küresel uzlaşıya dayanan bir politika çerçevesidir [23][24]. SKA'lar, toplam 17 ana hedef ve 169 alt hedeften oluşmakta olup, yoksulluğun sona erdirilmesinden eşitsizliklerin azaltılmasına, nitelikli eğitimden iklim eylemine kadar çok geniş bir sürdürülebilirlik yelpazesinde somut hedefler belirlemektedir. Aşağıda isimleriyle birlikte sıralanan 17 SKA, küresel ölçekte ortak bir vizyon sunarken, ülkelerin kendi önceliklerine göre aksiyon planlarını uyarlamalarına olanak tanır [3]:

1. Yoksulluğa Son (No Poverty)
2. Açlığa Son (Zero Hunger)
3. Sağlık ve Kaliteli Yaşam (Good Health and Well-Being)
4. Nitelikli Eğitim (Quality Education)
5. Toplumsal Cinsiyet Eşitliği (Gender Equality)
6. Temiz Su ve Sanitasyon (Clean Water and Sanitation)
7. Erişilebilir ve Temiz Enerji (Affordable and Clean Energy)
8. İnsana Yakışır İş ve Ekonomik Büyüme (Decent Work and Economic Growth)
9. Sanayi, Yenilikçilik ve Altyapı (Industry, Innovation and Infrastructure)
10. Eşitsizliklerin Azaltılması (Reduced Inequalities)
11. Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar (Sustainable Cities and Communities)
12. Sorumlu Üretim ve Tüketim (Responsible Consumption and Production)
13. İklim Eylemi (Climate Action)
14. Sudaki Yaşam (Life Below Water)
15. Karasal Yaşam (Life on Land)
16. Barış, Adalet ve Güçlü Kurumlar (Peace, Justice and Strong Institutions)
17. Amaçlar için Ortaklıklar (Partnerships for the Goals)

SKA'ların uygulanmasında, her ülkenin ekonomik, sosyal ve kültürel koşulları göz önünde bulundurularak yerel stratejiler geliştirilmektedir. Birleşmiş Milletler ve ilgili kuruluşlar, üye ülkelere teknik ve finansal desteklemekte, teşvik programları ve izleme araçları sağlamaktadır. Türkiye'de SKA'lar, 11. Kalkınma Planı, Yeşil Mutabakat Eylem Planı ve ilgili bakanlık politikaları ile uyumlu şekilde ulusal düzeye adapte edilmiştir. Kamu kurumları, özel sektör ve sivil toplumun katılımı ile izleme ve raporlama süreçleri yürütülmektedir [25].

SKA'ların başarı düzeyini ve ilerlemeyi izlemek amacıyla Birleşmiş Milletler ve Stockholm Dayanıklılık Merkezi tarafından geliştirilen, katmanlı yapıdaki SKA endeksleri ve gösterge tabloları hem ulusal hem de küresel düzeyde şeffaflık ve karşılaştırılabilirlik sağlamaktadır [26][24]. Şekil 2.2.'de, SKA'ların biyosfer, toplum ve ekonomi katmanları çerçevesinde nasıl bütüncül olarak yapılandığı kavramsal olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ait düğün pastası modeli [26]

Bu katmanlı yaklaşım, literatürde genellikle düğün pastası (wedding cake) modeli olarak adlandırılmakta ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin birbirine bağımlı, çok düzeyli

yapısını yansıtmaktadır. Modelde en geniş katmanı biyosfer oluşturur. Bu katman, karasal ve sudaki yaşam, iklim eylemi, temiz su ve sanitasyon gibi çevresel hedefleri kapsar. Biyosferin üzerindeki toplum katmanı; sağlık, eğitim, eşitlik, sürdürülebilir şehirler ve güçlü kurumlar gibi sosyal hedefleri içerir. En üstte ise ekonomik büyüme, yenilikçilik, sanayi ve altyapı, sorumlu üretim ve tüketim ile ortaklıklar gibi hedefleri temsil eden ekonomi katmanı yer alır.

Bu yapı, sürdürülebilirliğin hem BM SKA sisteminde hem de 3P yaklaşımında sürdürülebilirliğin üç boyutu temelinde şekillendiğini ortaya koymaktadır. Nitekim, 3P yaklaşımında olduğu gibi, SKA'ların temeli çevresel bütünlük (Planet/biyosfer), toplumsal refah ve adalet (People/toplum) ile ekonomik gelişme ve refah (Profit/ekonomi) unsurlarının bir arada ve dengeli biçimde yönetilmesine dayanmaktadır. Bu benzerlik, sürdürülebilir kalkınma alanında kuramsal yaklaşımlar ile küresel politika uygulamalarının aynı bütüncül çerçevede buluştuğunu göstermektedir. [20, 23, 26].

2.2. Yaşam Döngüsü Düşüncesi

Yaşam döngüsü düşüncesi (Life Cycle Thinking, LCT), bir ürünün, hizmetin veya sürecin çevresel, ekonomik ve sosyal etkilerinin, tüm yaşam evreleri boyunca kapsamlı ve sistematik biçimde değerlendirilmesini temel alan bir yaklaşımdır. Uluslararası Standartlar Örgütü'ne (ISO) göre, yaşam döngüsü; "ham madde çıkarımından, üretime, dağıtıma, kullanıma, yeniden kullanım, geri dönüşüm ve nihai bertarafa kadar bir ürün sistemine ilişkin ardışık ve birbirine bağlı aşamalar dizisi" olarak tanımlanır [5].

Bu yaklaşım, ürünün yalnızca üretim etkilerini değil; hammadde temini, enerji kullanımı, dağıtım, kullanım ömrü, bakım, yeniden kullanım ve ömrü sonunda bertaraf süreçlerini de kapsayacak şekilde genişletilmiştir. "Beşikten mezara" (cradle to grave) ve "beşikten beşiğe" (cradle to cradle) gibi sistem sınırları, yaşam döngüsü boyunca ürün sisteminin hangi aşamalara kadar takip edileceğini belirtir. Beşikten mezara yaklaşımı, bir ürünün ham madde çıkarımından başlayarak üretim, dağıtım, kullanım ve nihai bertaraf aşamasına kadar tüm etkilerinin dikkate alınmasını ifade eder. Beşikten beşiğe yaklaşımında ise, ürünün yaşamı nihai bertarafla sona ermez; atık, başka bir ürün/sürecin ham maddesi olarak tekrar döngüye kazandırılır. Böylece döngüsel ekonomi ve geri dönüşüm süreçleri de yaşam döngüsü analizinin kapsamına dahil edilir [5].

Günümüzde yaşam döngüsü düşüncesi, özellikle yaşam döngüsü analizi (LCA) başta olmak üzere, yaşam döngüsü maliyetlendirmesi (LCC), sosyal yaşam döngüsü değerlendirmesi (S-LCA) ve yaşam döngüsü sürdürülebilirlik değerlendirmesi (LCSA) gibi yöntemlerle bilimsel karar destek aracı olarak uygulanmaktadır. Bu yöntemler, sürdürülebilir tasarım, üretim optimizasyonu, politika geliştirme, yeşil satın alma ve ürün geliştirme gibi alanlarda çok disiplinli bir çerçevede karar vericilere şeffaf ve karşılaştırılabilir veri sağlamaktadır [27, 9].

2.2.1. Yaşam döngüsü analizi (LCA)

Yaşam Döngüsü Analizi (LCA), bir ürünün, sürecin veya hizmetin çevresel etkilerini, hammadde temininden başlayarak üretim, dağıtım, kullanım ve nihai bertaraf aşamasına kadar geçen tüm yaşam döngüsü boyunca sistematik olarak değerlendiren nicel ve bilimsel bir yöntemdir. LCA'nın temel amacı; enerji ve malzeme kullanımlarını, salınımları ve çevresel yükleri objektif şekilde ortaya koymak ve iyileştirme fırsatlarını bilimsel dayanaklarla belirlemektir [27][28][29].

LCA yönteminin kökenleri 1960'lı yılların sonlarına, endüstriyel sistemlerin enerji ve kaynak tüketimini analiz etmeye yönelik ilk çalışmalara uzanır. Özellikle ABD'de Franklin Associates, Ltd. tarafından geliştirilen Kaynak ve Çevre Profil Analizi (Resource and Environmental Profile Analysis, REPA) yöntemiyle Coca-Cola gibi şirketler için 1970'li yıllarda yapılan içecek ambalajı karşılaştırmaları LCA'nın öncüllerindendir [30-32]. Avrupa'da ise, 1980'lerden itibaren LCA çalışmaları yaygınlaşmıştır. İlk örnekler, enerji ve kaynak girdilerinin ve atıkların takip edilmesine odaklanırken, 1980'lerin ikinci yarısından itibaren salınımların çevresel etkileri de analiz kapsamına dahil edilmiştir [33, 34].

1990'larda çevre politikalarının, eko-etiketlemenin ve kamu satın alma programlarının yaygınlaşması ile LCA, uluslararası ölçekte yaygın bir çevresel değerlendirme aracı haline gelmiştir. Bilimsel ve terminolojik standardizasyon süreci ise 1991'de SETAC rehber ilkeleriyle başlamış; 1997'de ISO 14040 ve 14044 standartlarıyla kurumsallaşmıştır [35-37].

ISO 14040 ve literatüre göre, LCA dört ana aşamadan oluşur:

- Amaç ve kapsam tanımı (goal and scope definition): Analizin amacı, fonksiyonel birim, sistem sınırları ve varsayımlar tanımlanır.

- Yaşam döngüsü envanter analizi (life cycle inventory, LCI): Tüm girdiler (hammadde, enerji) ve çıktılar (ürün, emisyon, atık) nicel olarak derlenir.
- Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi (life cycle impact assessment, LCIA): Envanterdeki girdiler ve çıktılar çevresel etki kategorilerine dönüştürülür (ör. iklim değişikliği, asidifikasyon, toksisite).
- Sonuçların yorumlanması (interpretation): Sonuçlar bütüncül biçimde değerlendirilir, belirsizlik ve iyileştirme fırsatları ortaya konur. Bu aşamalar karşılıklı etkileşim içinde ve sistematik bir çerçevede yürütülür. Özellikle kapsam tanımı ve sistem sınırlarının doğru belirlenmesi, analiz sonuçlarının güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir [35].

LCA yalnızca çevresel etkilerin hesaplanmasıyla sınırlı değildir. Ürün geliştirme, tasarım optimizasyonu, çevresel etiketleme (eko-etiketler, Çevresel Ürün Beyanları), yeşil kamu tedariki ve sürdürülebilir politika geliştirme gibi çok farklı bağlamlarda kullanılmaktadır [38][9]. Kurumsal düzeyde ise, iş stratejilerinde, tedarik zinciri yönetiminde ve atık yönetimi yatırımlarında karar destek aracı olarak yaygınlaşmıştır [37, 39].

LCA'nın tarihsel gelişiminde ve metodolojik evriminde yapılan önemli çalışmalar arasında; Hunt, Sellers & Franklin'in 1974 yılında gerçekleştirdiği içecek kabı karşılaştırma çalışması [32], SETAC'ın 1991 tarihli rehber ilkeleri [36] ve Fava ve arkadaşlarının metodolojiye kazandırdığı sistematik yapı [33], Guinée ve arkadaşlarının (2002) [28] ile Heijungs ve Suh'un (2002) [40] analitik ve matematiksel model geliştirmeleri, ayrıca Hauschild ve diğerlerinin (2018) [29] güncel çevresel etki kategorileri ve uygulama alanları üzerine yaptığı çalışmalar referans niteliğindedir.

Yöntemin yaygınlaşmasında ve güvenilirliğinde, SimaPro, GaBi, OpenLCA gibi yazılım tabanlı LCA araçları ve Ecoinvent gibi veri tabanlarının gelişimi de önemli rol oynamıştır [37, 29]. LCA günümüzde sürdürülebilirlik odaklı ürün ve süreç tasarımında, bilimsel şeffaflık, sistematiklik ve karşılaştırılabilirlik ilkeleriyle, uluslararası literatürde ve uygulamada vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir [35, 9].

2.2.2. Yaşam döngüsü maliyetlendirme (LCC)

Yaşam Döngüsü Maliyetlendirmesi (LCC), bir ürünün, sistemin veya hizmetin tüm yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan toplam finansal maliyetin analiz edilmesini amaçlayan nicel

bir değerlendirme yöntemidir. LCC, sadece ürünün ilk yatırım maliyetini değil, kullanım, bakım, onarım, bertaraf ve olası yeniden kullanım gibi süreçlerde oluşan tüm maliyet kalemlerini kapsayarak, en uygun maliyetli çözümü seçmek için karar vericilere bütüncül bir bakış açısı sunar [41-42].

LCC'nin kökeni, geleneksel maliyet analizlerinden daha eskiye dayansa da, yaşam döngüsü yaklaşımı ile birlikte anılması ve metodolojik olarak olgunlaşması 20. yüzyılın ikinci yarısında olmuştur. Özellikle altyapı yatırımları, köprüler, otoyollar ve büyük ölçekli mühendislik projelerinde uzun vadeli maliyet planlaması ve karar desteği için yaygın biçimde kullanılmıştır [43-45]. Zaman içinde bireysel ürünler ve endüstriyel uygulamalara da adapte edilmiş; günümüzde sürdürülebilir tasarım, yeşil satın alma ve kaynak optimizasyonu başta olmak üzere pek çok alanda önemli bir karar destek aracı haline gelmiştir [46, 47].

LCC, toplam maliyetleri doğrudan parasal birimlerle ifade eder ve karar verici, yatırımcı ya da kullanıcı perspektifinden değerlendirme yapar. LCC'nin temel amacı; sadece piyasa fiyatına dahil olmayan maliyetler de dahil olmak üzere (örneğin, kullanım, bakım, bertaraf gibi) ürünün tüm yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan maliyetleri belirlemek ve alternatifler arasında en düşük toplam maliyete sahip çözümü ortaya çıkarmaktır [48].

LCC maliyetleri temel olarak iki gruba ayrılır: iç maliyetler ve dış maliyetler. İç maliyetler doğrudan yaşam döngüsü sürecinde ortaya çıkan ve ilgili paydaş tarafından ödenen maliyetlerdir (ör. üretim, bakım, kullanım maliyetleri). Dış maliyetler ise, piyasa veya devlet düzenlemeleriyle üreticiye veya kullanıcıya doğrudan yansıtılmayan, genellikle çevresel ve sosyal etkilerin parasal karşılıkları olarak tanımlanır [49, 50]. Dışsallıkların analizi çoğunlukla LCA veya S-LCA gibi yöntemlerle tamamlanır.

LCC'nin uluslararası düzeyde kabul görmüş temel metodolojik çerçevesi, ISO 15686-5:2017 standardı ile belirlenmiştir. Bu standarda göre LCC analizi; bir varlık, tesis, ürün veya sistemin ekonomik ömrü boyunca doğrudan ve dolaylı tüm maliyetlerinin, analiz süresi içinde ve bugünkü değerle dikkate alınarak sistematik biçimde hesaplanmasını içerir [45]. LCC'nin aşamaları, büyük ölçüde LCA ile paralellik göstermektedir:

- Amaç ve kapsam tanımı (goal and scope definition): Analizin hedefleri, alternatifler ve sistem sınırları belirlenir.
- Maliyet envanteri (cost inventory): Yatırım, bakım, işletme, bertaraf ve olası yeniden kullanım gibi tüm maliyet kalemleri detaylandırılır.
- Maliyetlerin bugünkü değere indirgenmesi ve toplam yaşam döngüsü maliyetinin hesaplanması.
- Sonuçların değerlendirilmesi ve yorumlanması.

SETAC çalışma grubuna göre LCC metodolojisi üç başlık altında kategorize edilir: geleneksel LCC, çevresel LCC (Environmental LCC, eLCC) ve toplumsal LCC. Geleneksel LCC, yatırım ve kullanım alternatiflerini karşılaştırmak için kullanılan klasik finansal analizdir. Çevresel LCC, LCA ile entegre biçimde yürütülerek, ekonomik ve çevresel analizlerin ortak veri ve modelle mukayese edilmesini sağlamayı amaçlar [51][52][53]. Toplumsal LCC ise sosyal dışsallıkları ve toplum üzerindeki parasal etkileri analiz etmeyi hedefler, ancak bu yaklaşım bu bölümün kapsamı dışındadır.

LCC'nin uygulanmasında tipik adımlar; alternatiflerin tanımlanması, zaman planlamasının yapılması, maliyetlerin tahmini (üretici, kullanıcı ve diğer ilgili paydaşlar için ayrı ayrı), toplam yaşam döngüsü maliyetinin hesaplanması ve sonuçların analiz edilmesidir [54]. LCC hem sahip olma maliyetlerini hem de kullanım maliyetlerini kapsayarak, projelerin veya ürünlerin tüm ekonomik ömrü boyunca en rasyonel seçimin yapılmasını sağlar.

Bununla birlikte, literatürde LCC'nin yaygın uygulama standartlarının ve güvenilir veri tabanlarının henüz LCA kadar gelişmiş olmadığı, bu nedenle uygulama çeşitliliği ve mukayesede sorunlar yaşandığı belirtilmektedir [47]. Yine de LCA ile entegre edilen LCC modellerinin sürdürülebilir ürün geliştirme, endüstriyel uygulama ve politika geliştirme süreçlerinde bütüncül karar desteği sunma potansiyeli önem kazanan noktalarıdır [52].

2.2.3. Sosyal yaşam döngüsü analizi (SLCA)

Sosyal Yaşam Döngüsü Analizi (S-LCA), ürünlerin ve hizmetlerin tüm yaşam döngüsü boyunca sosyal etkilerini değerlendirmeye yönelik sistematik bir yöntemdir. S-LCA, bir ürünün hammadde elde edilmesinden bertarafına kadar geçen tüm aşamalarda ortaya çıkan

sosyal etkileri ortaya koymayı amaçlar ve bu yönüyle sürdürülebilirlik değerlendirmesinde tamamlayıcı bir rol üstlenir [9].

Sosyal sorumluluk kavramı, 1970'li yıllarda iş dünyasında yaygın olarak kullanılmaya başlanmış olsa da, işçi hakları, adil işletme uygulamaları ve insan hakları gibi sosyal konuların kökeni çok daha eskidir. 1980'lerden itibaren yaşam döngüsü boyunca sosyal etkilerin değerlendirilmesine yönelik yaklaşımlar literatürde tartışılmaya başlanmıştır. 1990'ların başında Öko Enstitüsü ve SETAC gibi kuruluşlar, yaşam döngüsü analizinin çevresel ve sosyal yönlerinin birleştirilmesi için çerçeve çalışmalar yapmıştır [9]. 2000'li yıllardan itibaren S-LCA, sürdürülebilir kalkınma, insan hakları ve kurumsal sosyal sorumluluk gündemleriyle birlikte küresel ölçekte daha fazla ilgi görmüştür [55].

2000'li yıllarda S-LCA alanındaki önemli literatür gelişmeleri hem kavramsal çerçevenin netleşmesini hem de uygulama örneklerinin artmasını sağlamıştır. Brent ve Labuschagne (2004), S-LCA'nın sürdürülebilirlik stratejileriyle entegrasyonunu vurgulayarak yöntemin karar destek süreçlerindeki rolünü tartışmıştır [56]. Dreyer ve arkadaşları (2006), S-LCA'da paydaşlara dayalı etki kategorilerinin tanımlanmasına ve pratik uygulama zorluklarına dikkat çekmiş [57]; Griesshammer ve arkadaşları (2006), ürünlerin toplumsal etkilerinin karşılaştırmalı analizinde gösterge setlerinin geliştirilmesine katkı sağlamıştır (Griesshammer vd., 2006). Jørgensen ve arkadaşları (2008) ise, S-LCA'nın teorik temelleri ve metodolojik sınırlılıkları üzerine odaklanarak, yöntemin paydaş, gösterge ve veri toplama çerçevesini tartışmışlardır [59]. Bu literatürün rehberliğinde, S-LCA metodolojisinin standardizasyonu ve yaygınlaşması 2009 yılında UNEP/SETAC Yaşam Döngüsü İnisiyatifi (Life Cycle Initiative) tarafından yayımlanan Ürünler için Sosyal Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Kılavuzu (Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products) ile yeni bir aşamaya taşınmıştır [7]. Bu belge, S-LCA'nın ilk standardizasyon girişimi olma özelliği taşır [7]. Ayrıca, ISO 26000 (2010) standardının da katkısıyla, S-LCA metodolojisinin temel aşamaları ve değerlendirme çerçevesi uluslararası literatürde daha açık biçimde tanımlanmıştır [60, 61].

S-LCA, nicel ve nitel verileri birleştiren bütüncül bir değerlendirme yaklaşımı sunar. LCA'dan farklı olarak yalnızca çevre üzerindeki etkileri değil; işçi hakları, toplumsal cinsiyet eşitliği, adil ücret, insan hakları, çocuk işçiliği, yerel topluluklara etkiler ve güvenli çalışma koşulları gibi çok boyutlu sosyal konuları da analiz etmeye odaklanır. Bu bağlamda,

S-LCA metodolojisi paydaşlar üzerinden yapılandırılmıştır. Geleneksel olarak paydaş kategorileri çalışanlar, toplum, tüketiciler, yerel toplum ve değer zinciri aktörleri olmak üzere beş ana grupta toplanmıştır [7]. Her paydaş grubu için farklı etki alt kategorileri ve göstergeler tanımlanmış, böylece ürünlerin ve hizmetlerin yaşam döngüsü boyunca farklı sosyal aktörler üzerindeki etkilerinin sistematik biçimde değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Literatürde paydaşların tanımlanmasında uzun süre "çocuklar" kategorisine hiç yer verilmemiş; yalnızca işçiler, toplum, tedarik zinciri aktörleri ve tüketiciler temel paydaş grubu olarak değerlendirilmiştir. Ancak, ilk kez 2020 tarihli UNEP/SETAC S-LCA rehberinde "çocuklar" bağımsız bir paydaş kategorisi olarak açıkça tanımlanmıştır. Bu ekleme, S-LCA'nın toplumsal kapsayıcılık, çocuk hakları ve sosyal sürdürülebilirlik alanlarındaki kapsamını genişletmiş; çocukların maruz kaldığı özel sosyal risklerin ve hak ihlallerinin yaşam döngüsü perspektifinden değerlendirilmesini mümkün kılmıştır [62]. Çizelge 2.1. 'de tanımlanan paydaş kategorileri ve onlarla ilişkili etki alt kategoriler bir arada verilmiştir.

Çizelge 2.1. S-LCA'da paydaş kategorileri ve etki alt kategoriler (UNEP/SETAC, 2020)

Paydaş Kategorileri	Alt Kategoriler	
Çalışanlar	• Sendika ve toplu pazarlık özgürlüğü • Çocuk işçiliği • Adil ücret • Çalışma saatleri • Zorla çalıştırma • Eşit fırsatlar / ayrımcılık	• Sağlık ve güvenlik • Sosyal yardımlar / güvenlik • İstihdam ilişkisi • Cinsel taciz • Küçük üreticiler
Yerel Topluluklar	• Maddi kaynaklara erişim • Maddi olmayan kaynaklara erişim • Taşınma ve göç • Kültürel miras • Güvenli ve sağlıklı yaşam koşulları	• Yerli halkların haklarına saygı • Topluluk katılımı • Yerel istihdam • Güvenli yaşam koşulları
Değer Zinciri Aktörleri	• Adil rekabet • Sosyal sorumluluğun teşviki • Tedarikçi ilişkileri	• Fikri mülkiyet haklarına saygı • Varlıkların/ servetin dağılımı
Tüketiciler	• Sağlık ve güvenlik • Geri bildirim mekanizması • Tüketici gizliliği	• Şeffaflık • Ömrü sonu sorumluluğu
Toplum	• Sürdürülebilirlik konularına kamu taahhütleri • Ekonomik kalkınmaya katkı • Silahlı çatışmaların önlenmesi ve etkilerinin azaltılması	• Teknoloji geliştirme • Yolsuzluk • Hayvanların etik muamelesi • Yoksulluğun azaltılması
Çocuklar	• Yerel toplulukta verilen eğitim • Tüketici olarak çocukların sağlık sorunları • Pazarlama uygulamalarına ilişkin çocuk endişeleri	

Çizelge 2.1.'de gösterilen paydaş ve alt kategoriler, sosyal yaşam döngüsü analizinin çok boyutlu yapısını açıkça ortaya koymaktadır. Farklı paydaş gruplarına özgü sosyal göstergelerin ayrı ayrı tanımlanması, değerlendirme sürecinde hem sektörler hem de tedarik zinciri boyunca risklerin ve etkilerin daha sistematik şekilde izlenmesini mümkün kılar. Özellikle "çocuklar" başlığının bağımsız bir paydaş kategorisi olarak eklenmiş olması, S-LCA'nın toplumsal kapsayıcılık ve güncel sosyal sürdürülebilirlik yaklaşımlarına uyum sağlama çabasını göstermektedir. Tablodaki kapsamlı yapı, sosyal etkilerin sadece tek bir aktörle sınırlı olmadığını, ürün veya hizmetin tüm yaşam döngüsü boyunca birçok farklı grubu etkilediğini net biçimde ortaya koymaktadır.

S-LCA metodolojisi, LCA ile benzer şekilde dört temel aşamadan oluşur:

- Amaç ve kapsam tanımı,
- Sosyal yaşam döngüsü envanteri,
- Sosyal yaşam döngüsü etki değerlendirmesi,
- Yorumlama.

Uygulamalarda veri toplama hem nicel hem de nitel göstergeler üzerinden yapılır. Temel göstergeler arasında iş kazası oranı, cinsiyet ücret farkı, çocuk işçi oranı, sendikalaşma oranı, sağlık ve güvenlik uygulamaları, adil ücret, eğitim seviyesi, toplumsal katılım, sosyal güvenlik ve hukuki hakların varlığı gibi unsurlar yer alır. Değerlendirme sonuçları ise genellikle sistematik raporlamalar ve grafiklerle karar vericilere sunulur. Son yıllarda S-LCA uygulamalarında, veri tabanı ve yazılım desteği önemli bir yer tutmaya başlamıştır. Özellikle Social Hotspots Database (SHDB), Product Social Impact Life Cycle Assessment (PSILCA) ve Soca gibi özel veri tabanları, tedarik zinciri boyunca sosyal risklerin ve etkilerin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Buna ek olarak, OpenLCA, SimaPro ve GaBi gibi yaşam döngüsü analiz yazılımları da sosyal göstergelerin entegrasyonu ve sonuçların raporlanmasında SLCA uygulamalarını desteklemektedir [63, 64].

Öte yandan, literatürde S-LCA'nın uygulama standartlarının ve gösterge sistemlerinin LCA kadar netleşmediği, ülkeler ve sektörler arası karşılaştırılabilirliğin hâlâ tartışmalı olduğu belirtilmektedir. Göstergelerin seçimi, veri güvenilirliği, paydaş temsili ve özellikle

"çocuklar" gibi sonradan eklenen paydaş kategorilerinin kapsayıcılığı, yöntemin eksik kalan yönleri arasında sayılmaktadır [59][65][10]. Evrensel Tasarım gibi sosyal kapsayıcılığa yönelik kriterlerin S-LCA sistematiğine entegrasyonu ise, mevcut literatürde çoğunlukla göz ardı edilen ve henüz kapsamlı biçimde ele alınmamış bir eksikliktir. Bu durum, ilk kez bu tez kapsamında ele alınarak, ilerleyen bölümlerde Sosyal Sürdürülebilirlik ve Evrensel Tasarım çerçevesinde özgün şekilde tartışılacaktır.

S-LCA, LCA ve LCC ile birlikte entegre biçimde de kullanılabilir. Bu bütüncül yaklaşım, yaşam döngüsü sürdürülebilirlik değerlendirmesi (LCSA) olarak adlandırılır ve ürünlerin hem çevresel, ekonomik hem de sosyal etkilerinin sistematik ve karşılaştırılabilir biçimde analiz edilmesine olanak tanır [9].

2.2.4. Yaşam döngüsü sürdürülebilirlik analizi (LCSA)

Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Analizi (LCSA), sürdürülebilirliğin çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlarının bütüncül bir çerçevede değerlendirilmesini amaçlayan, günümüzde disiplinler arası en kapsamlı yaklaşımlardan biridir. LCSA, ürünlerin, süreçlerin ve hizmetlerin tüm yaşam evrelerinde çevresel etkilerin (LCA), ekonomik maliyetlerin (LCC) ve sosyal risklerin (S-LCA) sistematik olarak analiz edilmesini sağlar [66][67]. LCSA kavramı, sürdürülebilir kalkınmanın çok boyutlu doğasına yanıt olarak gelişmiştir. Kloepffer (2008), LCSA'yı üçlü bir yapıda tanımlamış ve formülünü "LCSA = LCA + LCC + S-LCA" şeklinde ortaya koymuştur. Bu yaklaşım, geleneksel çevresel yaşam döngüsü analizine ekonomik ve sosyal boyutların eklenmesini sağlamış ve disiplinler arası sürdürülebilirlik analizlerinin temelini oluşturmuştur [68]. Finkbeiner ve ark. (2010) ise LCSA'nın çok boyutlu ve etkileşimli bir analiz sunduğunu vurgulamış, bu yöntemi "çevresel, ekonomik ve sosyal yaşam döngüsü değerlendirme yöntemlerinin entegrasyonu ve sürdürülebilirliğin üç boyutunun birlikte analiz edilmesine olanak sağlayan bir çerçeve" olarak tanımlamıştır [66].

LCSA'nın tarihsel gelişimi çok sayıda kilometre taşı niteliğinde uluslararası rapor, rehber ve makalenin etkisiyle şekillenmiştir. 1990'lı yılların sonlarından itibaren UNEP, SETAC ve Avrupa Komisyonu (European Commission) gibi kuruluşların hazırladığı rehberlerde sürdürülebilirlik üçlüsünün entegrasyonuna işaret edilmeye başlanmış, ancak LCSA'nın adının ve kavramsal bütünlüğünün ilk kez vurgulanması 2000'li yılların başlarına rastlamaktadır. 2002 yılında Sürdürülebilir Kalkınma için Dünya İş Konseyi (World

Business Council for Sustainable Development, WBCSD), sürdürülebilirlik değerlendirmesinin üç ayağının eş zamanlı olarak ele alınması gerektiğini belirtmiştir. Ardından, 2006 yılında Avrupa Komisyonu'nun yayınladığı Ürünlerin Çevresel Etkileri (Environmental Impact of Products, EIPRO) raporu ile yaşam döngüsü odaklı sürdürülebilirlik değerlendirmelerinin önemi vurgulanmıştır. LCSA'nın akademik literatüre net biçimde tanıtılması ise Klöpffer'in (2008) "LCSA = LCA + LCC + S-LCA" formülasyonuyla olmuştur [68]. Bu dönemde, çevresel ve ekonomik analizlerin ön planda olduğu erken LCA ve LCC çalışmalarına, sosyal yaşam döngüsü analizi (S-LCA) boyutunun eklenmesiyle, sürdürülebilirliğin bütüncül şekilde değerlendirilmesine yönelik paradigmada köklü bir değişim gerçekleşmiştir [68][66]. 2011 yılında Swarr ve arkadaşlarının yayınladığı LCSA tanımı, yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerin azaltılması, ekonomik verimliliğin artırılması ve sosyal sorumluluğun teşvik edilmesini bütüncül bir çerçevede birleştiren ilk kapsamlı çerçeve olarak literatürde öne çıkmıştır [51]. Bunu takiben, Guinée ve Heijungs (2011) hem disiplinler arası çerçeveyi hem de LCSA'nın modelleme boyutunu güçlendiren yaklaşımlar ortaya koymuş [67]; Zamagni ve arkadaşları (2013) ise sürdürülebilirlik performansının tüm yaşam döngüsü boyunca entegre analiz edilmesinin gerekliliğini vurgulamıştır [69]. Son yıllarda, Avrupa Komisyonu Ortak Araştırma Merkezi (European Commission Joint Research Centre, JRC) tarafından yayınlanan rehberlerde ve UNEP/SETAC girişimlerinde LCSA'nın pratik uygulamalarına, göstergelerin belirlenmesine ve metodolojik uyuma dair güncel öneriler öne çıkmıştır [66, 70, 71].

LCSA'nın metodolojik yapısı; amaç ve kapsam tanımı, uygun göstergelerin ve veri kaynaklarının belirlenmesi, çevresel (LCA), ekonomik (LCC) ve sosyal (S-LCA) analizlerin yürütülmesi, sonuçların karşılaştırılması ve entegrasyonu ile karar vericilere raporlama aşamalarını içerir [66, 65]. Burada göstergelerin bütüncül ve karşılaştırılabilir biçimde seçilmesi, özellikle çok boyutlu analizlerde ortaya çıkan karşıt etkilerin (trade-off) şeffaf bir şekilde ortaya konması önem taşır.

LCSA'nın uygulama alanları zaman içinde çeşitlenmiş ve başta inşaat, enerji, kimya, otomotiv, tarım, ürün tasarımı ve çevre yönetimi olmak üzere birçok sektörde vaka çalışmaları ile test edilmiştir [29, 13 ,72]. Literatürde, inşaat ve enerji sektörlerinde LCSA kullanımının yaygınlaştığı, ürün tasarımı alanında ise uygulama oranının görece düşük kaldığı rapor edilmektedir [13]. Son yıllarda LCSA uygulamalarında Yapı Bilgi Modellemesi (Building Information Modeling, BIM), çok kriterli karar verme (Multi-

Criteria Decision Making, MCDM), bulanık mantık, Pareto optimizasyonu, makine öğrenmesi ve sezgisel yöntemlerin kullanıldığı ileri analiz teknikleri yaygınlaşmıştır [73-75]. Bununla birlikte, LCSA uygulamalarında en büyük zorluk sosyal verilerin azlığı, göstergelerde standardizasyon eksikliği ve sektörler arası veri karşılaştırılabilirliğidir [66, 67, 76, 13]. Özellikle ürün tasarımı alanında LCSA'nın erken aşamalarda entegre edilmesi, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için kritik görülmektedir. Sektörel incelemeler, LCSA'nın inşaat ve enerji sektörlerinde yoğun kullanıldığını, kimya, otomotiv ve çevre alanlarında ise gelişmekte olduğunu; ürün tasarımı ve hizmet sektörlerinde ise yaygınlık oranının düşük kaldığını göstermektedir.

Sonuç olarak LCSA, sürdürülebilirliğin üç ana boyutunu yaşam döngüsü perspektifinde bir araya getiren, sektörel uygulamalara ve disiplinler arası analizlere olanak tanıyan bir yaklaşımdır. Yöntemin yaygınlaştırılması için sektörlere özgü veri altyapısının güçlendirilmesi, sosyal göstergelerin standardize edilmesi ve bütüncül analiz tekniklerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu noktada, sosyal göstergelerde kapsayıcılığın ve Evrensel Tasarım ilkelerinin dikkate alınması, LCSA'nın uygulama potansiyelini daha da artıracaktır.

3. EVRENSEL TASARIM

Toplumda her birey; yaş, coğrafya, kültür, eğitim ve fiziksel-bilişsel özellikler bakımından benzersizdir. Bireyler yaşamları boyunca; yaşlanma, yorgunluk, hamilelik, hastalık, geçici sakatlıklar, ağır nesne taşıma, farklı hava koşulları veya yüksek ses gibi çok çeşitli durumlarda kalıcı ya da geçici sınırlılıklar yaşayabilmektedir. Yani toplumda tam fiziksel ve bilişsel yeterliliğe sahip olmak, geçici bir durumdur [77]. Bu farklılıklar ve kısıtlılıklar, ürün, mekân ve çevrelerin yalnızca belirli bir "ortalama kullanıcı" profiline göre tasarlanmasının yetersiz ve dışlayıcı sonuçlar doğurmasına sebep olmaktadır. Standart çözümler çok sayıda bireyi dışarıda bırakırken, kişiye özel uyarlamalar ise ayrıştırıcı ve maliyetli olabilmektedir.

Evrensel tasarım yaklaşımı; ürün, mekân ve çevrelerin, farklı yaş, beceri, yeterlilik ve koşullardaki insanların mümkün olan en geniş kesimi tarafından herhangi bir adaptasyona ya da özel bir tasarıma gerek duyulmadan kullanılabilmesini hedeflemektedir [78]. Bu felsefe, toplumun tüm üyelerinin bağımsız, eşit ve güvenli şekilde toplumsal yaşama katılımını sağlamayı amaçlamaktadır. Böylece evrensel tasarım yalnızca engelli bireyleri değil, yaşlılar, çocuklar, hamileler, geçici veya kalıcı herhangi bir engel yaşayanlar ile farklı kültürel ve bireysel geçmişlere sahip herkesi kapsayan bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır.

Evrensel tasarım; sadece erişilebilirlik değil, aynı zamanda adalet, kapsayıcılık ve sürdürülebilirlik ilkeleriyle de yakından ilişkilidir. Bu yaklaşımın tarihsel gelişimi ve temel ilkeleri, bir sonraki başlıklarda ayrıntılı olarak incelenecektir.

3.1. Evrensel Tasarımın Gelişimi

Evrensel tasarımın gelişimi, toplumsal, teknolojik ve yasal değişimlerin etkisiyle şekillenmiş, çok boyutlu ve evrimsel bir süreçtir [77, 79]. 1950'li yıllarda engellilik konusunun kamu politikalarında ve toplumsal farkındalıkta daha görünür hale gelmesiyle birlikte, "engelsiz tasarım" ve "erişilebilir tasarım" kavramları öne çıkmıştır. Bu dönemde, fiziksel engellere sahip bireyler için kamusal alanlarda erişimin sağlanması temel hedef olarak benimsenmiş ve Amerika Birleşik Devletleri (ABD) başta olmak üzere birçok ülkede yasal düzenlemeler yapılmıştır [80]. 1961'de yayımlanan ANSI A117.1 standardı, Amerikan Ulusal Standardı olarak kabullenilen ilk erişilebilirlik kriterlerini içermektedir [81]. 1968

yılında kabul edilen Mimari Engeller Kanunu, federal fonlu kamusal binaların erişilebilir olmasını zorunlu kılmıştır [82]. Benzer şekilde Avrupa ve Japonya'da da kamusal erişilebilirliğe ilişkin standartlar geliştirilmiştir.

Ancak, 1970'li yıllara gelindiğinde engelsiz ve erişilebilir tasarımın sunduğu çözümlerin, çoğunlukla ayrı ve bireye özgü uygulamalarla sınırlı kaldığı, kimi zaman damgalayıcı ve ayrıştırıcı olduğu görülmüştür [79]. Bu yaklaşımın yetersizlikleri, normalizasyon ve toplumsal entegrasyon kavramlarının ön plana çıkmasına yol açmıştır. Bu durum farklı kullanıcıların eşit şekilde faydalanabileceği, kapsayıcı tasarım çözümleri arayışına neden olmuştur. Sadece fiziksel çevreyle sınırlı kalmayan yeni bir anlayış ihtiyacı doğmuştur. Bu noktada, "herkes için tasarım" veya "kapsayıcı tasarım" yaklaşımları gelişmeye başlamıştır [83].

Evrensel tasarım terimini ilk kullanan kişi Amerikalı mimar Ronald Mace'tir. Mace, 1991 yılında yayınladığı "Evrensel Tasarım, Herkes için Engelsiz Ortamlar" adlı kitabında Evrensel Tasarımı, "Uyarlama ve özel tasarım ihtiyacı olmaksızın tüm insanlar tarafından mümkün olan en geniş boyutta kullanılabilen ürünlerin ve ortamların tasarımı" olarak tanımlamıştır [78]. Ayrıca, "evrensel" teriminin ideal bir kavram olmadığını, hiçbir ürünün gerçekten tüm kullanıcılar için tamamen erişilebilir olamayacağını; fakat tasarımların sürekli geliştirilerek daha fazla insan için erişilebilir ve kullanılabilir hale getirilebileceğini vurgulamıştır [78]. Evrensel tasarım böylece, teknik bir hedef olmaktan ziyade, gelişen ve dönüşen bir süreç olarak ele alınmıştır.

Literatürde Evrensel Tasarım çok sayıda farklı araştırmacı tarafından tanımlanmıştır. Steinfeld ve Maisel (2012), evrensel tasarımı "insan performansını, sağlığını, sıhhatini ve sosyal katılımını artırarak farklı bir nüfusa olanak sağlayan ve güçlendiren bir süreç" olarak ifade etmiştir [83]. Preiser ve Ostroff (2001), Evrensel Tasarımın ekstra çok az maliyetle ya da ekstra maliyet gerektirmeden, daha fazla birey tarafından daha kolay kullanılabilen ürünler, iletişimler ve çevreler oluşturmayı hedeflediğini belirtmektedir [84]. Liu ve Hou (2010), Evrensel Tasarımın bireylerin yaşam kalitesini artırmak ve toplumsal uyumu desteklemekle birlikte, tercihler, özgüven, ekonomi ve konfor gibi temel bileşenleri kapsadığını vurgulamıştır [85]. Evcil (2014) ise, Evrensel Tasarımın yalnızca teknik bir standartlar veya kontrol listesi değil; içselleştirilen, benimsenen ve toplumsal duyarlılıkla şekillenen bir felsefe olduğuna dikkat çekmiştir [79].

1970'li ve 1980'li yıllarda demografik yapının değişmesi (yaşlı nüfusun ve engelli bireylerin artışı), yaşam süresinin uzaması, yardımcı teknolojilerin sınırlılıklarının anlaşılması ve toplumsal eşitlik arayışı Evrensel Tasarım yaklaşımının hızla yaygınlaşmasını sağlamıştır [83]. 1990 yılında ABD'de kabul edilen Engelli Amerikalılar Yasası (Americans with Disabilities Act, ADA), erişilebilirlik ve ayrımcılıkla mücadele açısından dönüm noktası olmuştur. ADA ile birlikte farklı ülkelerde ve Türkiye'de mevzuata giren çeşitli düzenlemeler Evrensel Tasarımın yasal dayanağını oluşturmuştur [86][87]. Türkiye'de 1997 yılında kurulan Özürlüler İdaresi Başkanlığı ve ilgili KHK'lar ile erişilebilirlik, hak temelli bir yaklaşımla desteklenmiştir [88].

Endüstriyel ve ekonomik alanda ise üretim sistemlerinde yaşanan dönüşümler de Evrensel Tasarım yaklaşımının ortaya çıkmasında belirleyici olmuştur. 1930–1960 yılları arasında yaygın olan Fordist seri üretim anlayışı, kitlesel ve standart ürünlere dayanmaktaydı [89]. Ancak, Post-Fordist dönemde küçük ölçekli, farklılaşmış ve kullanıcı ihtiyaçlarını önceleyen üretim modelleri benimsenmiştir. Bu değişim, sadece teknik standartlar değil, toplumsal değerler, sürdürülebilirlik ve kullanıcı merkezli tasarım anlayışının yükselmesine zemin hazırlamıştır [79]. Çevre dostu ürün ve üretim teknikleri, kullanıcı ihtiyaçlarının tasarım sürecinin merkezine alınmasıyla birleşerek, Evrensel Tasarım kavramının günümüzdeki bütüncül karakterini şekillendirmiştir. Sonuç olarak, Evrensel Tasarım; teknik, sosyal, ekonomik ve kültürel boyutları olan, sürekli gelişen bir süreçtir [83][79]. Günümüzde sadece engelliler için değil; toplumun tüm bireyleri için adil, erişilebilir, sürdürülebilir ve kullanıcı odaklı bir yaşam çevresi oluşturmanın anahtar kavramı olarak kabul edilmektedir.

3.2. Evrensel Tasarım İlkeleri

Evrensel tasarım kavramı, henüz ilkeleri oluşturulmadan önce, bir tasarımın nasıl herkesin kullanımına olanak sağlayacağını betimleyecek, önceden tanımlanmış bir ölçüt olmamasının eksikliğini yaşamıştır. Bu eksiklik, çoğunlukla gerekli özelliklerin somut açıklamaları olmadan, kavramın bazı yönlerini gösteren örneklerin sunumu ile giderilmeye çalışılmıştır. Bu süreçte başta ADA, ANSI ve ISO tarafından çıkarılan erişilebilirlik ile ilgili kanun ve yönetmeliklerden yararlanılmıştır.

1994'ten 1997'ye kadar Evrensel Tasarım Merkezi (The Center for Universal Design, CUD), ABD Eğitim Bakanlığı'na bağlı Ulusal Engellilik ve Rehabilitasyon Araştırma

Enstitüsü (National Institute on Disability and Rehabilitation Research, NIDRR) tarafından finanse edilen "Evrensel Tasarımın Geliştirilmesine Yönelik Çalışmalar" başlıklı bir araştırma ve tanıtım projesi yürütmüştür (proje no. H133A40006). Projenin amaçlarından biri, Evrensel Tasarım için kapsamlı kılavuz ilkeler geliştirmektir [90]. Kuzey Carolina'daki merkez ofiste, farklı disiplinlerden 10 profesyonel ile yapılan toplantıda Evrensel Tasarımın temel kuralları ve kavramsal çerçevesi netleştirilmiştir.

İlkeler, 1995 yılında üç farklı taslak üzerinden değerlendirilmiş ve "eşit kullanım" kavramı özellikle vurgulanmıştır. Nihai şekliyle 1 Nisan 1997 tarihinde yedi temel ilke tanımlanmış ve bugün de tüm disiplinlerde geçerli sayılmaktadır [12]:

1. Eşit kullanım (equitable use)
2. Esnek kullanım (flexible use)
3. Basit ve sezgisel kullanım (simple and intuitive use)
4. Algılanabilir bilgi (perceptible information)
5. Hata toleransı (tolerance for error)
6. Düşük fiziksel güç (low physical effort)
7. Yaklaşım ve kullanım için yeterli alan (size and space for approach and use)

Bu ilkeler, Evrensel Tasarım kavramını sistematik ve bütüncül biçimde tanımlamak; tasarım sürecine rehberlik etmek, tasarımların sistematik olarak değerlendirilmesini sağlamak ve hem tasarımcıları hem kullanıcıları daha kullanışlı, erişilebilir çözümler üretmek konusunda bilinçlendirmek amacıyla geliştirilmiştir [90][79]. Buradaki ilkeler, tasarıma doğrudan müdahale eden kurallar değildir; bir kontrol listesi olarak ele alınmamalı, tasarımcı tarafından özümsenip içselleştirilerek sürece yansıtılmalıdır [79]. Aşağıda, Evrensel Tasarımın yedi ilkesi tanım ve rehber maddeleriyle birlikte detaylı olarak açıklanmıştır:

<u>İlke 1: eşit kullanım (Equitable Use)</u>

Tasarım, farklı yetenekleri olan kişilerce kullanılabilir ve satın alınabilir olmalıdır. Hiçbir kullanıcı grubu için dezavantaj oluşturmamalı, ayrımcılık ya da damgalama yaratmamalıdır.

Rehber:

- Tüm kullanıcılara mümkün olduğunca benzer, mümkün olmayan durumlarda eşdeğer uygulamalar ile aynı kullanım kolaylığı sunulmalıdır.
- Herhangi bir kullanıcıyı ayırmaktan ya da damgalamaktan kaçınılmalıdır. Tüm kullanıcılara eşit derecede mahremiyet, güvenlik ve emniyet sağlanmalıdır.
- Tasarım, tüm kullanıcılar için ilgi çekici ve kabul edilebilir olmalıdır.

Eşit kullanım ilkesi, tasarımın dezavantaj ya da ayrımcılık yaratmadan, farklı yeteneklere sahip tüm kullanıcılar tarafından eşit şekilde kullanılabilmesini ve erişilebilir olmasını hedefler. Bu nedenle, kamu binalarında engelli ve engelsiz bireylerin aynı giriş kapısını kullanabilmesi, yalnızca engellilere özel bir "arka kapı" yerine tüm topluma eşit bir katılım ortamı sağlar ve ayrımcılık riskini ortadan kaldırır. Bankamatiklerin hem oturan (tekerlekli sandalye kullanan) hem de ayakta kullanıcılar için uygun yükseklikte yerleştirilmesi, hizmete erişimde fiziksel ayrımcılığı engeller ve finansal kapsayıcılığı artırır. Düşük tabanlı otobüsler ise yaşlı, engelli veya bebek arabasıyla binen yolcuların merdiven veya ek rampa ihtiyacı olmadan güvenli ve hızlı şekilde toplu taşımaya katılımını mümkün kılar; böylece toplu ulaşımda fırsat eşitliği sağlanır [83][88].

<u>İlke 2: esnek kullanım (Flexible Use)</u>

Tasarım, çok çeşitli bireysel tercihlere ve yeteneklere uygun olmalıdır. Kullanıcılar arasında fiziksel, bilişsel ve yöntemsel çeşitliliği destekler.

Rehber:

- Kullanım yöntemleri arasında seçme olanağı sunulmalıdır.
- Sağ ve sol elin erişim ve kullanımına imkân tanınmalıdır.
- Kullanıcı doğruluğu ve hassasiyeti kolaylaştırılmalıdır. Kullanıcının hızına uygunluk sağlanmalıdır.

Esnek kullanım ilkesi, tasarımın farklı kullanıcı tercihleri, yöntemleri ve yeteneklerine kolayca uyum sağlayabilmesini esas alır. Hem sağ hem sol elle kullanılabilen makaslar,

yalnızca azınlıkta kalan solak bireylerin dışlanmasını önleyip ürünün herkes tarafından verimli kullanılmasına olanak verir. Ayarlanabilir yükseklikte sandalyeler veya masa sistemleri, kullanıcının boyu, vücut ölçüsü veya fiziksel durumu ne olursa olsun, konforlu ve ergonomik bir oturma/çalışma deneyimi sağlar. Bankamatiklerde hem tuşlu hem dokunmatik hem de sesli yönlendirme seçeneklerinin sunulması, görme veya işitme engelli bireylerin finansal işlemleri bağımsız ve kolay bir şekilde gerçekleştirmesini mümkün kılarak hizmetlerde fırsat eşitliği yaratır [84][80].

İlke 3: basit ve sezgisel kullanım (Simple and Intuitive Use)

Tasarım, kullanıcının deneyimi, bilgisi, dil becerileri ya da mevcut konsantrasyon seviyesine bakılmaksızın anlaşılır ve kolay kullanılabilir olmalıdır.

Rehber:

- Gereksiz karmaşıklıktan kaçınılmalıdır.
- Tasarım, kullanıcının beklenti ve sezgileri ile tutarlı olmalıdır.
- Farklı okuma-yazma ve dil düzeylerine hitap etmelidir. Bilgi önem sırasına göre düzenlenmeli, süreçte etkin geribildirim sağlanmalıdır.

Basit ve sezgisel kullanım ilkesi, tasarımın karmaşıklıktan uzak, kolay anlaşılır ve kullanıcı deneyiminden bağımsız olarak sezgisel biçimde kullanılabilir olmasını öngörür. Akıllı telefonlardaki ikonlar ve sade menü düzenleri, farklı yaş ve teknoloji düzeyine sahip kullanıcıların rahatlıkla işlevlere erişmesini kolaylaştırır. Toplu taşımadaki renkli, sembolik yönlendirmeler; okuma yazma bilmeyenler veya farklı dili konuşanlar için ulaşımda hata yapma riskini azaltır. Otomatik açılan musluklar ise hangi yaşta, hangi fiziksel yeterlilikte olursa olsun herkesin hijyen gereksinimini hızlı ve hatasız biçimde karşılamasını sağlar [83, 84].

İlke 4: algılanabilir bilgi (Perceptible Information)

Tasarım, ortam koşullarından veya kullanıcının duyusal yeteneklerinden bağımsız olarak gerekli bilgileri etkili şekilde iletebilmelidir.

Rehber:

- Gerekli bilgileri sunmak için görsel, işitsel ve dokunsal farklı modlar kullanılmalıdır.
- Okunabilirliği ve ayırt edilebilirliği en üst düzeye çıkarmalıdır.
- Duyusal sınırlamaları olan bireyler için yardımcı teknikler veya cihazlarla uyumluluk sağlanmalıdır.

Algılanabilir bilgi ilkesi, tasarımın kullanıcıların duyusal ve bilişsel farklılıklarına bakılmaksızın gerekli tüm bilgileri etkili biçimde iletebilmesini hedefler. Trafik ışıklarında renkli sinyallerle beraber sesli uyarı sistemleri kullanılması, renk körü bireylerin veya görme engellilerin karşıdan karşıya güvenle geçebilmesini mümkün kılar. Asansörlerde kat numarasının hem sesli hem dijital gösterge ile bildirilmesi, görme ya da işitme engellilerin binayı bağımsız kullanmasına olanak verir. İlaç ambalajlarında Braille işaretlemesinin yer alması, görme engelli bireylerin ilaca güvenli erişimini sağlar. Yangın alarmı sistemlerinde hem ışıklı hem sesli uyarıların birlikte kullanılması, duyusal engeli olan kullanıcıların acil durumda anında bilgi almasını güvence altına alır [12][90].

İlke 5: hata toleransı (Tolerance for Error)

Tasarım, tehlikeleri ve yanlışlıkla yapılan eylemlerin olumsuz sonuçlarını en aza indirecek şekilde düzenlenmelidir.

Rehber:

- Elemanlar tehlike ve hata riskini en aza indirecek şekilde yerleştirilmelidir.
- Tehlikelere ve hatalara karşı uyarıcılar sağlanmalı, hata yapmayı önleyecek önlemler alınmalıdır.
- Hassasiyet gerektiren işlemlerde bilinçsiz hareketler engellenmelidir.

Hata toleransı ilkesi, tasarımın kullanıcı hatalarından veya istenmeyen durumlarından kaynaklanabilecek risk ve olumsuzlukları en aza indirmeye yönelik önlemler içermesini gerektirir. Mikrodalga fırınlarda kapı kapalı olmadan cihazın çalışmaması, özellikle çocuklu veya yaşlı kullanıcıların yanma ve kaza riskini azaltır. Asansör kapısının bir engele

çarptığında tekrar açılması, hem çocukların hem hareket kısıtlılığı olan bireylerin sıkışma riskini önler. Yazılımda “geri al” veya “geri dönüşüm kutusu” özelliği, kullanıcıların yanlışlıkla yaptığı işlemleri telafi etmesini sağlar. Bankamatiklerde işlem tamamlanmadan kartı iade etmeyen sistemler, kullanıcıların kart unutma ve dolandırıcılık riskini önler [80, 91, 87].

İlke 6: düşük fiziksel güç (Low Physical Effort)

Tasarım, kullanıcıların minimum eforla, konforlu ve verimli şekilde kullanabileceği biçimde olmalıdır.

Rehber:

- Kullanıcıların doğal vücut pozisyonunu korumalarına olanak verilmelidir.
- Gereken fiziksel kuvvet makul düzeyde olmalı, tekrarlayan hareketler ve sürekli çaba en aza indirilmelidir.

Düşük fiziksel güç ilkesi, tasarımın kullanıcıdan minimum fiziksel efor talep edecek şekilde kolay, konforlu ve verimli kullanım sunmasını amaçlar. Otomatik kapılar, yalnızca hareket kısıtlılığı olanlar için değil, yaşlılar, çocuklar veya yük taşıyan herkes için giriş-çıkışta kolaylık ve zaman tasarrufu sağlar. Sensörle çalışan musluk ve sabunluklar, elini kullanamayan ya da kas gücü düşük olan bireylerin temizlik ve hijyen gereksinimini karşılamasını kolaylaştırır. Ergonomik kapı ve pencere kolları, el gücü zayıf çocuk veya yaşlılar için hem güvenli hem de pratik kullanım sunar. Market arabalarının hafif ve kolay sürülebilir olması, alışverişte farklı yaş ve güçteki bireylerin bağımsız hareket edebilmesini destekler [79, 77].

İlke 7: yaklaşım ve kullanım için yeterli alan (Size and Space for Approach and Use)

Kullanıcının beden ölçüsü, pozisyonu veya hareket kabiliyeti ne olursa olsun, erişim, işlem ve kullanım için yeterli boyut ve alan sağlanmalıdır.

Rehber:

- Ayakta ya da oturan kullanıcılar için net görüş hattı ve rahat ulaşım sağlanmalıdır.
- Tasarım, farklı el ve kavrama boyutlarına uygun olmalı, yardımcı teknolojilerin kullanımı için yeterli alan bırakılmalıdır.

Bu ilke, her türlü beden ölçüsü, hareket kabiliyeti ve yardımcı araç kullanan bireylerin rahatça erişimine ve etkileşimine imkân tanıyacak şekilde uygun alan ve düzenlemelerin sağlanmasını hedefler. Tekerlekli sandalye veya çocuk arabasıyla rahatça dönülebilecek geniş tuvalet kabinleri, hem fiziksel engellilerin hem ailelerin özel gereksinimlerini karşılar. Asansörlerin iç hacminin hem oturan hem ayakta kullananlar için uygun olması, tüm kullanıcıların binada bağımsız hareket edebilmesine olanak tanır. Alışveriş merkezleri ve kamu binalarında geniş giriş kapıları ve koridorlar, sadece engelliler için değil, yaşlılar, hamileler ve büyük eşyalar taşıyan herkes için erişilebilirlik sağlar. Otoparklarda engelli araçları için ayrılmış ve genişletilmiş park alanları, sadece fiziksel erişimi değil, toplumsal katılımı ve bağımsızlığı da destekler [86][88].

Günümüzde hızla değişen toplumsal ihtiyaçlar, dijitalleşen yaşam ve sürdürülebilirlik ekseninde, Evrensel Tasarım ilkelerinin sürekli gözden geçirilmesi ve geliştirilmesi gerekmektedir. Son yıllardaki bilimsel çalışmalar ve tasarım uygulamaları, klasik yedi ilkenin ötesine geçilerek, özellikle toplumsal kapsayıcılık, çevresel ve sosyal sürdürülebilirlik gibi yeni kriterlerin evrensel tasarım rehberlerine dahil edilmesinin önemini göstermektedir [92][85]. Evrensel tasarım, artık yalnızca erişilebilirlik değil, sosyal bütünleşme ve sürdürülebilir bir yaşam çevresi oluşturma hedefiyle yeniden düşünülmelidir. Bu nedenle, izleyen bölümde evrensel tasarımın sosyal sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi ve bu bağlamda güncel ihtiyaçlara nasıl yanıt verebileceği kapsamlı biçimde ele alınacaktır.

3.3. Sürdürülebilirlik ve Evrensel Tasarım İlişkisi

Evrensel Tasarım ile sürdürülebilirlik arasındaki ilişki son yirmi yılda daha görünür hale gelmiştir [93]. Literatürde her iki kavramın da eşitlik, kapsayıcılık, toplumsal katılım ve bağımsız yaşam gibi ortak temalar etrafında kesiştiği görülmekle birlikte, bu ilişkinin bütüncül ve sistematik bir çerçevede tanımlandığını söylemek mümkün değildir. Bu çalışma,

mevcut literatürde dağınık biçimde yer alan bu kesişimleri bir araya getirerek iki kavram arasındaki bağlantıyı ilk kez bütünleşik bir yapı içinde açıklığa kavuşturmaktadır.

Bu bütünleşik yaklaşımın gelişimini anlamak için, öncelikle erişilebilirlik ve sürdürülebilirlik kavramlarının paralel evrimine bakmak gerekir. 1990'lardan itibaren erişilebilirlik yalnızca fiziksel engellilerin haklarının korunmasıyla sınırlı kalmamış, toplumsal eşitlik ve adaletin anahtarı olarak sürdürülebilir kalkınma söyleminin merkezine yerleşmiştir. Birleşmiş Milletlerin Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) ve EIDD Stockholm Deklarasyonu (2004), erişilebilirliği sosyal sürdürülebilirliğin vazgeçilmez bir koşulu olarak tanımlar [94, 95]. Bu dönemde mimarlık ve kentsel planlama literatüründe de, engellilikten çok daha geniş bir çerçevede toplumsal çeşitlilik ve kapsayıcılık ön plana çıkmıştır [96, 97].

Evrensel Tasarım, bu gelişmelerin etkisiyle yalnızca engelli kullanıcıların ihtiyaçlarını değil, yaş, cinsiyet, sağlık durumu ve kültürel/bilişsel çeşitliliğe sahip tüm kullanıcıların bağımsız ve eşit erişimini hedefleyen bir ilke seti olarak uluslararası standartlara girmiştir [83]. Ürün ve çevrelerin yaşam döngüsünün her aşamasında kapsayıcı, adil ve esnek kullanımın amaçlanması, "herkes için tasarım" anlayışının sosyal sürdürülebilirlikle bütünleşmesini sağlamıştır [98, 99].

Güncel ulusal ve uluslararası literatür ise klasik yedi ilkenin ötesine geçilmesi gerektiğini açıkça vurgulamaktadır. Özellikle pandemi sonrası dönemde, dijital erişim, psikososyal refah, toplumsal dayanıklılık, iklim değişikliğine uyum, göç ve yaşlanma gibi yeni başlıklar Evrensel Tasarımın temel bileşenleri arasında yer almaya başlamıştır [100,101,94,95].

Dolap (2016), özellikle Braun Prize tasarım yarışmaları üzerinden yaptığı analizde, klasik Evrensel Tasarım ilkelerine ek olarak "insan sağlığı ve doğal çevre", "işlevsel ve estetik entegrasyon", "sosyal bütünleşme ve katılım", "dayanıklılık ve ekonomi" ile "bireyin hoşnutluğu" gibi yeni ilke ve kriterlerin de artık öne çıktığını göstermektedir. Bu bulgular, uluslararası literatürdeki eğilimlerle de uyumlu şekilde, Evrensel Tasarım yaklaşımının yalnızca fiziksel erişilebilirlikten ibaret olmadığını, toplumsal refah, çevresel sürdürülebilirlik ve bireysel yaşam kalitesi gibi yeni sosyal göstergeleri de kapsaması gerektiğini ortaya koymaktadır [102].

Steinfeld, Maisel & Paquet (2021), katılımcılık, duygusal refah ve psikososyal erişilebilirliğin de Evrensel Tasarımın güncellenen çerçevesine dâhil edilmesi gerektiğini savunurken [103]; Boys (2023) toplumsal kapsayıcılığın yalnızca engelli bireylere değil, yaşlılara, göçmenlere ve kriz anlarında tüm topluma yönelik yeni ilke ve uygulamaların gerekliliğini vurgular [104]. Ayrıca UN-Habitat (2020) ve Avrupa Engelilik Forumu (2023) raporlarında, Evrensel Tasarım ilkelerinin sürdürülebilirlik, sosyal bütünleşme ve dirençli toplumlar için tekrar gözden geçirilmesi ve yeni göstergelerle desteklenmesi gerektiği uluslararası politika düzeyinde dile getirilmektedir [94, 95].

Bu tartışmalar, Evrensel Tasarımın sürdürülebilirlikle ilişkisinin yalnızca kavramsal düzeyde değil, aynı zamanda küresel politika hedefleriyle de somut biçimde incelenmesini gerekli kılmaktadır. Bu noktada SKA, Evrensel Tasarımın sürdürülebilirlik bağlamındaki konumunun sistematik olarak değerlendirilebileceği ortak bir referans çerçevesi sunmaktadır. SKA, çevresel, toplumsal ve ekonomik boyutları birlikte ele alan bütüncül bir sürdürülebilirlik yaklaşımı benimsemektedir. Özellikle eşitlik, kapsayıcılık, erişilebilirlik ve toplumsal katılım gibi temalar sosyal sürdürülebilirliğin temel bileşenleri olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda, Evrensel Tasarım ilkelerinin SKA ile hangi ölçüde ve hangi düzeyde örtüştüğünün incelenmesi, iki kavram arasındaki ilişkinin açık biçimde ortaya konması açısından önem taşımaktadır.

SKA'ların Rockström ve Sukhdev tarafından geliştirilen Düğün Pastası modeli (Bknz. Şekil 2.2.) çerçevesinde sınıflandırılması, bu ilişkiyi daha görünür kılmaktadır [26]. Söz konusu modelde sürdürülebilir kalkınma hedefleri üç katmanlı bir yapı içerisinde ele alınmakta; çevresel hedefler temel katmanı, toplumsal hedefler ikinci katmanı (People), ekonomik hedefler ise üst katmanı oluşturmaktadır. Evrensel tasarım ilkelerinin eşleştirildiği SKA hedeflerinin tamamının bu modelin toplumsal katmanında yer alması, Evrensel Tasarımın sürdürülebilirliğin özellikle sosyal boyutuyla yapısal bir ilişki içerisinde olduğunu göstermektedir. Başka bir ifadeyle, Evrensel Tasarım ilkeleri çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlikle dolaylı etkileşimler kurmakla birlikte, doğrudan karşılık buldukları alan sosyal sürdürülebilirliktir.

Bu çalışma kapsamında yapılan eşleştirme, literatürde dağınık biçimde ele alınan Evrensel Tasarım–sürdürülebilirlik ilişkisini görünür kılmakta ve Evrensel Tasarımın sürdürülebilirlik çatısı altında hangi konumda değerlendirilmesi gerektiğine ilişkin açık bir

çerçeve sunmaktadır. Aşağıda yer alan çizelge, Evrensel Tasarım ilkelerinin ilişkili olduğu SKA hedeflerini ve bu hedeflerin Düğün Pastası modeli içerisindeki konumunu özetlemektedir.

Çizelge 3.1. UD ilkeleri ile SKA eşleştirmesi

UD İlkesi	Doğrudan İlişkili SKA	Alt Hedef	Açıklama	Düğün Pastası Katmanı
Eşit Kullanım	10. Eşitsizliklerin Azaltılması	10,2	Ürün ve hizmetlerin ayrım gözetmeden herkes tarafın dan aynı koşullarda kullanılabilmesi sosyal dışlanmayı azaltır.	Toplum
	11. Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar	11,2	Kamusal ulaşım ve kentsel altyapının eşit kullanılabilir olması mekânsal kapsayıcılığı destekler.	Toplum
Esnek Kullanım	8. İnsana Yakışır İş ve Ekonomik Büyüme	8,5	Farklı çalışma biçimleri ve bireysel kapasiteleri destekleyen iş ortamları esnek kullanım ilkesini yansıtır.	Toplum
Basit ve Sezgisel Kullanım	4. Nitelikli Eğitim	—	Basit ve sezgisel tasarım, bilişsel engelleri azaltarak bilgi ve becerilere erişimi kolaylaştırır.	Toplum
	16. Barış, Adalet ve Güçlü Kurumlar	16.10	Kamu hizmetlerinin ve bilgi sistemlerinin anlaşılır olması bilgiye erişimi güçlendirir.	Toplum
Algılanabilir Bilgi	11. Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar	11.7	Kamusal alanlarda bilginin çok duyulu sunulması güvenli ve kapsayıcı mekânları destekler.	Toplum
	3. Sağlık ve Refah	3,8	Sağlık bilgilerinin görsel, işitsel ve yazılı biçimlerde sunulması herkes için anlaşılabilirliği artırır.	Toplum
Hata Toleransı	3. Sağlık ve Refah	3,6	Kullanıcı hatalarını tolere eden tasarımlar kaza ve yaralanma risklerini azaltır.	Toplum
Düşük Fiziksel Çaba	11. Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar	11,7	Minimum fiziksel efor gerektiren tasarımlar kamusal alanlara erişimi kolaylaştırır.	Toplum
Yaklaşım ve Kullanım için Boyut ve Alan	11. Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar	11,7	Farklı beden ölçüleri ve hareket kabiliyetleri için yeterli alan sağlanması kapsayıcı erişimi mümkün kılar.	Toplum

Çizelge 3.1.'de sunulan eşleştirmeler, Evrensel Tasarım ilkelerinin SKA ile doğrudan ilişki kurabildiği sınırlı ve seçici alanları ortaya koymaktadır. Bu nedenle her SKA için alt hedef belirtme zorunluluğu gözetilmemiş; yalnızca Evrensel Tasarım ilkelerinin kapsayıcılık, adil erişim, bağımsız yaşam ve güvenli kullanım gibi temel özellikleriyle açık biçimde örtüşen hedefler tabloya dahil edilmiştir.

Eşit kullanım, yaklaşım ve kullanım için uygun boyut ve alan ile düşük fiziksel çaba gibi ilkelerin özellikle SKA 10 ve SKA 11 ile eşleşmesi, Evrensel Tasarımın kamusal alanlar, kentsel altyapılar ve ortak kullanım sistemleri üzerinden toplumsal eşitsizliklerin azaltılmasına doğrudan katkı sunduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, basit ve sezgisel kullanım ile algılanabilir bilgi ilkelerinin SKA 4, SKA 16 ve SKA 3 ile ilişkilendirilmesi,

bilgiye erişim, öğrenme süreçleri ve sağlıkla ilgili hizmetlerin herkes için anlaşılabilir ve kullanılabilir olmasının, sosyal sürdürülebilirliğin temel bileşenlerinden biri olduğunu ortaya koymaktadır. Esnek kullanım ilkesinin özellikle SKA 8 kapsamında ele alınması ise, farklı kullanıcı kapasitelerine ve çalışma biçimlerine uyarlanabilen tasarım çözümlerinin, kapsayıcı ve adil çalışma yaşamını destekleyen önemli bir tasarımsal araç olduğunu göstermektedir.

Çizelgede dikkat çeken bir diğer önemli bulgu, Evrensel Tasarım ilkeleriyle doğrudan ilişkilendirilen tüm SKA'ların Düğün Pastası modelinde toplum katmanında yer almasıdır. Bu durum, evrensel tasarımın çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik boyutlarıyla dolaylı ilişkileri bulunmakla birlikte, doğrudan etki alanının sosyal sürdürülebilirlik olduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır. Dolayısıyla Evrensel Tasarım, sürdürülebilirlik çerçevesi içinde tüm boyutları kapsayan bir üst kavram olarak değil; sosyal sürdürülebilirliği tasarım ölçeğinde somutlaştıran, ölçülebilir ve değerlendirilebilir bir araç seti olarak konumlanmaktadır.

Bu yorum, çizelgede sunulan eşleştirmenin yalnızca kavramsal bir ilişkilendirme olmadığını; aynı zamanda Evrensel Tasarımın sürdürülebilirlik çerçevesi içindeki doğru konumuna ilişkin metodolojik bir tartışmayı da açtığını göstermektedir. Literatürde bazı çalışmalar Evrensel Tasarımın klasik ilkelerine sürdürülebilirlik, çevresel sorumluluk veya kaynak verimliliği gibi yeni ilkeler eklenmesini önermektedir. Ancak bu yaklaşım, Evrensel Tasarımı kendi başına genişleyen bir üst çerçeve olarak ele alma riskini taşımaktadır. Bu çalışma ise, Evrensel Tasarımın sürdürülebilirlikten bağımsız yeni ilkelerle genişletilmesi yerine, sürdürülebilirliğin özellikle sosyal boyutu içinde konumlandırılması gerektiğini savunmaktadır. Çizelgede ortaya konan seçici eşleştirmeler, Evrensel Tasarımın çevresel ve ekonomik boyutlarla dolaylı ilişkileri bulunmakla birlikte, doğrudan etki alanının sosyal sürdürülebilirlik olduğunu açık biçimde göstermektedir. Bu bağlamda Evrensel Tasarım, sürdürülebilirliği kapsayan bir üst kavram hâline getirilmekten ziyade; sürdürülebilirliğin sosyal boyutunu tasarım ölçeğinde somutlaştıran, ölçülebilir ve değerlendirmeye açık bir araç seti olarak ele alınmaktadır. Bu yaklaşım, Evrensel Tasarım ilkelerinin sosyal yaşam döngüsü değerlendirme (SLCA) yöntemlerine neden ve nasıl entegre edilmesi gerektiğine dair kavramsal ve metodolojik zemini güçlendirmektedir.

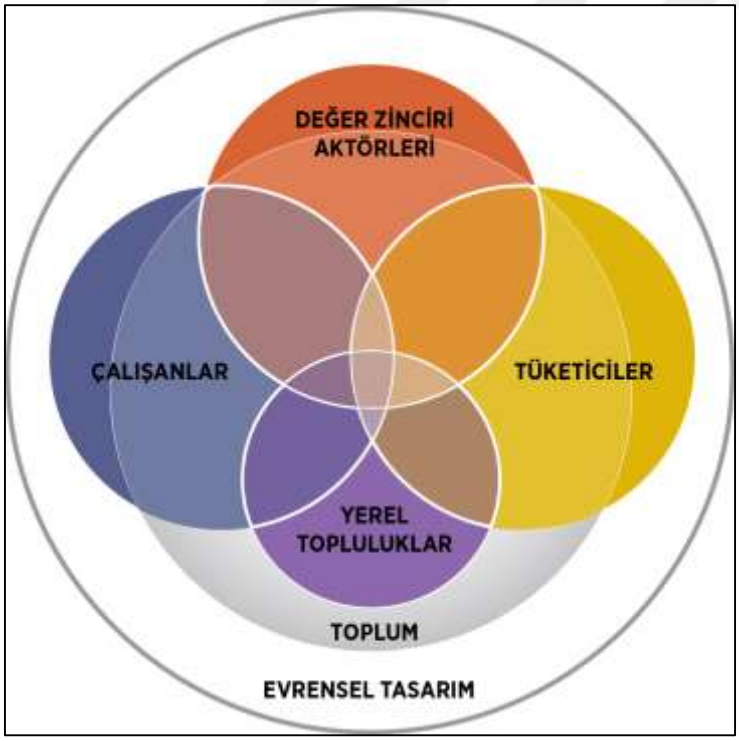
Bu çerçevede, Evrensel Tasarımın sürdürülebilirliğin özellikle sosyal boyutu içinde konumlandırılması, yalnızca kavramsal bir tercih değil; aynı zamanda son yıllarda gelişen değerlendirme yaklaşımlarıyla da uyumlu bir yönelimi ifade etmektedir. Nitekim bu bütünleşmenin akademik temeli, özellikle son on yılda sürdürülebilirlik değerlendirme yöntemlerinin (LCA, S-LCA) toplumsal boyutlarının güçlendirilmesiyle belirginleşmiştir [105,106]. SLCA yöntemlerinde sadece olumsuz sosyal risklerin değil, aynı zamanda kapsayıcı tasarım, toplumsal katılım ve adil erişim gibi pozitif sosyal katkıların sistematik biçimde ölçülmesi gerektiği vurgulanmaktadır [107]. Yeni nesil SLCA uygulamalarında klasik risk temelli göstergelere ek olarak, paydaş haritalarına çocuk, yaşlı veya kırılgan gruplar gibi farklı kullanıcı kategorilerinin dahil edilmesi, analizlerin toplumsal çeşitliliği ve adaleti daha doğru yansıtmasına imkan vermektedir [108]. Örneğin, erişilebilir ve kapsayıcı tasarımın yaşam döngüsü boyunca daha uzun ömür, daha az müdahale, enerji ve kaynak verimliliği gibi avantajlar sağladığı; toplumsal refah, sağlık ve bağımsız yaşam üzerinde olumlu etkiler yarattığı gösterilmiştir [109,110,111]. SLCA literatürü de, pozitif sosyal çıktılar olarak erişilebilirlik, toplumsal katılım, esnek kullanım gibi kavramların sistematik olarak değerlendirilmesinin, toplumsal fırsat ve değerlerin de görünür kılınmasını sağladığına dikkat çeker [105,106].

Ancak Evrensel Tasarım uygulamalarının değerlendirilmesinde nesnellik ve karşılaştırılabilirlik açısından hâlâ belirgin eksikler bulunmaktadır. Welch ve Ostroff (1995), Steinfeld ve Maisel (2012) gibi kaynaklar, kontrol listeleri ve kullanıcı/uzman odaklı puanlama sistemlerinin genellikle öznel ve duruma göre değişen sonuçlar ürettiğini; bu nedenle farklı bağlamlarda karşılaştırmalı analiz için nesnelliğin sınırlı kaldığını belirtmektedir [91,83]. Türkiye bağlamında Duman ve Asilsoy (2022), betimleyici ve uzman yorumu ağırlıklı yöntemlerin sistematik ve nesnel ölçüm konusunda kısıtlı kaldığını vurgular [97]. SLCA gibi yaşam döngüsü temelli, nicel yöntemlerin ise, pozitif sosyal çıktıları ve kapsayıcılığı sayısal göstergelerle analiz ederek daha nesnel ve karşılaştırılabilir değerlendirmelere olanak sağladığı yakın dönemde literatürde tartışılmaktadır [105,106].

Bu noktada, Evrensel Tasarımın teorik çerçevesi ile SLCA'nın analitik yaklaşımı arasında güçlü bir entegrasyon ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Evrensel Tasarım ilkelerinin sosyal yaşam döngüsü değerlendirme yöntemlerine dâhil edilmesi, hem pozitif sosyal etkilerin görünür kılınması hem de paydaşlar arası karmaşık etkileşimlerin daha net analiz edilebilmesi açısından kritik bir fırsat sunmaktadır. Bu bağlamda, farklı paydaş kategorilerinin birbiriyle

kesişen, kapsayan ve bazen de hiyerarşik olarak iç içe geçmiş yapılarının görsel ve kavramsal olarak ortaya konması, yalnızca göstergelerin optimizasyonu açısından değil, aynı zamanda sosyal sürdürülebilirlik politikalarının daha hedefli ve kapsayıcı biçimde tasarlanabilmesi için de önemlidir. Bu ihtiyacı karşılamak üzere bu tez kapsamında geliştirilen "Kelebek (Butterfly) Modeli" Şekil 3.1.'de sunulmuştur.

Kelebek modeli, sosyal yaşam döngüsü analizi (SLCA) literatüründe yaygın olarak görülen, paydaş gruplarını keskin biçimde ayrılmış kategoriler halinde sunan geleneksel şemalara alternatif olarak geliştirilmiştir. Burada, paydaşlar arasındaki çakışan ve kapsayan ilişkiler sistematik biçimde tanımlanmakta ve özellikle toplumu oluşturan alt gruplar (örneğin, toplum kategorisi içinde yer alan yerel topluluklar) arasındaki hiyerarşik yapı, örtüşen alanlar aracılığıyla görsel olarak ortaya konmaktadır. Bu yaklaşım, literatürde [10][71][65] vurgulanan, paydaşlar arası ilişkilerin çoğu zaman tekil ve izole biçimde ele alınmasının kavramsal eksikliğini gidermeye yöneliktir.



Şekil 3.1. Paydaş gruplarının "Kelebek Modeli" ile Temsili

Model ayrıca, gerçek dünyada tek bir bireyin eşzamanlı olarak birden fazla paydaş rolü üstlenebileceğini de yansıtır. Örneğin, bir kişi hem çalışan hem tüketici olabilir; aynı

zamanda yerel topluluk üyesi ve daha geniş anlamda toplumun bir parçası olabilir. Bu çoklu rol yapısı, sosyal etki göstergelerinde gözlenen mükerrerliğin temel nedenlerinden biridir. Nitekim, "iş sağlığı ve güvenliği" göstergesinin hem çalışanlar hem de yerel topluluklar için tanımlanması veya "kapsayıcı ürün/hizmet erişimi" göstergesinin hem tüketiciler hem de toplum kategorisinde yer alması, bu olgunun somut örnekleridir.

Toplum kategorisi dışında konumlanan belirli paydaş alt grupları da modelde temsil edilmektedir. Bu gruplar arasında, yurt dışında ikamet eden çalışanlar, coğrafi veya işlevsel olarak toplumsal bağlardan uzak konumlanan tedarikçiler ve yurt dışına ihraç edilen ürünleri kullanan tüketiciler yer almaktadır.

Modelin merkezinde oluşan ve 'kelebek' (butterfly) formunu andıran yoğun bölge, tüm paydaş gruplarının kesişen ilgi alanlarını, karşılıklı etkileşimlerini ve Evrensel Tasarım ilkeleri bağlamında paylaşılan sosyal sorumluluk alanlarını simgeler. Böylece model, sosyal sürdürülebilirlik değerlendirmelerinde mükerrerliklerin azaltılması, göstergelerin optimize edilmesi ve paydaşlar arası yoğun etkilerin analitik biçimde incelenebilmesi için hem kuramsal hem de görsel bir çerçeve sunar.

Bu görsel temsil, izleyen bölümde ele alınacak nicel analizlerin kavramsal temelini oluşturur. Yani, paydaş ilişkilerinin bu bütüncül haritası, ileride tartışılacak göstergelerin seçimi, ölçümü ve yorumlanmasında doğrudan bir referans noktası işlevi görür. Böylece, kavramsal model ile analitik uygulama arasında doğrudan ve tutarlı bir ilişki kurulabilmektedir.

Sonuç olarak, sürdürülebilir kalkınmanın sosyal boyutunu güçlendirmek için Evrensel Tasarım ilkelerinin yaşam döngüsü değerlendirme araçlarında daha görünür ve sistematik bir biçimde yer alması kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, tez kapsamında OpenLCA yazılımı ile yapılan nicel analizlerin, Evrensel Tasarımın değerlendirilmesinde nesnellik ve sistematiklik açısından literatürdeki önemli bir boşluğu dolduracağı değerlendirilmektedir.

4. YÖNTEM

Bu tezde, sürdürülebilir ürün tasarımının çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlarını yaşam döngüsü yaklaşımıyla bütüncül olarak değerlendirmek amacıyla, LCSA yöntemi temel alınmıştır. LCSA; çevresel etkiler için LCA, ekonomik etkiler için LCC ve sosyal etkiler için S-LCA yöntemlerinin entegre biçimde kullanılmasını sağlar [9,112,7]. Çalışmanın yöntemsel çerçevesi, ISO 14040/14044 standartları ile UNEP/SETAC yaşam döngüsü kılavuzları esas alınarak oluşturulmuştur [27,7].

Çalışmada, ürün tasarımı süreçlerinde sürdürülebilir ve erişilebilir kararların alınabilmesi amacıyla, iki farklı ürün sistemi üzerinde LCSA analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler, OpenLCA yazılımı üzerinden, çevresel etkiler için Ecoinvent ve sosyal göstergeler için Soca veri tabanları kullanılarak yürütülmüştür. Özellikle SLCA kapsamında, Evrensel Tasarımın yedi temel ilkesi gösterge düzeyinde tanımlanmış ve OpenLCA yazılımı ile sosyal değerlendirme sistemine entegre edilmiştir. Bu gösterge seti, yazılım ortamında çalışan ve sayısal çıktı üretebilen bir yapıya sahip olup, yalnızca sosyal risk temelli göstergelerin değil, erişilebilirlik ve kapsayıcılık gibi pozitif sosyal etkilerin de değerlendirilmesine imkân tanımaktadır. Literatürde sınırlı örneği bulunan bu yaklaşımın, ürün tasarımı alanında SLCA uygulamalarına katkı sunması amaçlanmaktadır.

Bu bölümde sırasıyla; araştırmanın genel deseni ve yaklaşımı, veri kaynakları ve kalite güvencesi süreçleri, kullanılan yazılım ve veritabanlarının yapısı, sosyal ve Evrensel Tasarım göstergelerinin sisteme entegrasyonu, hesaplama mantığı ve çok ölçütlü değerlendirme stratejileri ile sonuçların yorumlanmasında izlenen yöntem açıklanacaktır. Örnek olaylara ilişkin uygulama adımları, analiz süreçleri ve detaylı değerlendirme ise sonraki bölümlerde kapsamlı şekilde sunulacaktır.

4.1. Araştırma Deseni

Araştırma desenleri, bilimsel bir çalışmanın hangi yaklaşım ve yöntemlerle yürütüleceğini sistematik şekilde belirleyen metodolojik yapılardır [113, 114]. Bu tezde, ürünlerin yaşam döngüsü boyunca çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik boyutlarını bütüncül olarak analiz edebilmek amacıyla, karma yöntem (mixed method) ve çoklu örnek olay (multiple case study) deseni birlikte uygulanmıştır. Araştırmada, iki farklı ürün sisteminin (mutfak

dolapları ve hava veri ölçüm istasyonu) çevresel, ekonomik ve sosyal etkileri; hem nicel (LCA, LCC, SLCA analizleri) hem de nitel (gösterge seçimi, yorumlama) yöntemlerle, OpenLCA yazılımı ve ilgili veri tabanları kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmanın özgün yönü, SLCA sistemine Evrensel Tasarım göstergelerinin entegrasyonu ve her iki ürünün kapsamlı analizinin yapılmasıdır.

Bu yöntemsel yapı sayesinde, ürün tasarımında çevresel, ekonomik ve sosyal etkilerin bağlama özgü ve çok boyutlu olarak değerlendirilmesi mümkün olmuştur. Karma yöntem ile çoklu örnek olay deseninin tercih edilme nedeni, sürdürülebilir ürün tasarımı alanında her bir ürün sisteminin yaşam döngüsü boyunca çok çeşitli ve bağlama özgü çevresel, ekonomik ve sosyal etkiler üretiyor olmasıdır. Özellikle tasarım, üretim ve kullanım süreçlerinin gerçek dünyada farklı koşullara ve dinamiklere bağlı olarak şekillenmesi, bu süreçlerin bütüncül ve detaylı şekilde analiz edilmesini gerektirmektedir. Çoklu örnek olay deseni, özellikle karmaşık, çok boyutlu ve gerçek hayattaki uygulamaların derinlemesine analiz edilmesi gereken durumlar için literatürde önerilmektedir [114,113]. Ayrıca bu yöntemsel yaklaşım, LCA, LCC ve SLCA gibi süreç tabanlı ve yazılım destekli analizlerin entegrasyonuna olanak tanımakta; veri toplama ve değerlendirme aşamalarında hem nitel hem de nicel yöntemlerin birlikte kullanılmasına imkân vermektedir.

Bu tezde, sürdürülebilir ürün tasarımının çok boyutlu olarak değerlendirilmesi amacıyla, yaşam döngüsü sürdürülebilirlik analizi (LCSA) yöntemi temel alınmıştır. LCSA yaklaşımının tercih edilme nedeni, ürünlerin çevresel, ekonomik ve sosyal etkilerini aynı platformda bütüncül ve karşılaştırılabilir biçimde analiz etmeye olanak sağlamasıdır. Özellikle, sosyal yaşam döngüsü analizi (SLCA) kapsamına Evrensel Tasarım (UD) ilkelerinin özgün göstergeler olarak entegre edilmesi, literatürde nadiren rastlanan, sosyal sürdürülebilirlik ve kapsayıcılığa yönelik metodolojik bir yenilik sunmaktadır.

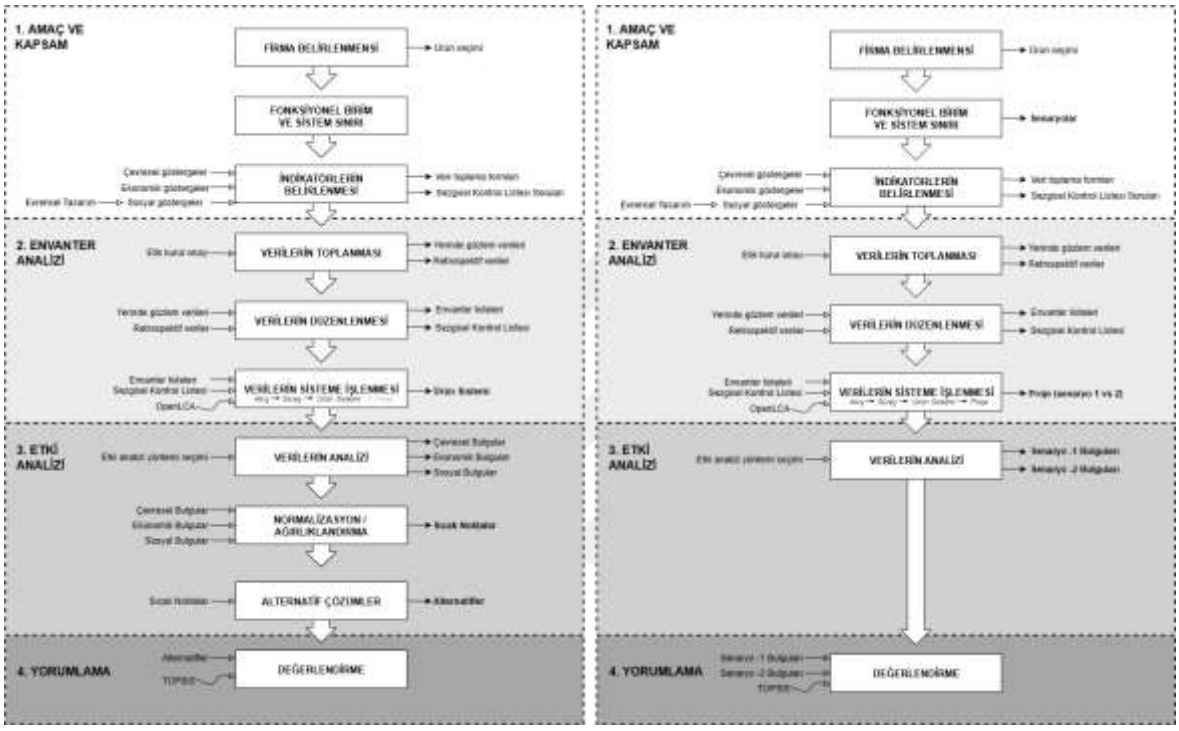
Araştırma, iki farklı sektörde faaliyet gösteren ürün sistemleri üzerinden yürütülmüştür: mutfak dolapları (mobilya sektörü) ve hava veri ölçüm istasyonu (bilişim/elektronik sektörü). Bu örnek olaylar, hem farklı üretim ve kullanım dinamiklerine sahip olmaları hem de sürdürülebilirlik göstergelerinin sektörler arası çeşitliliğini test etme olanağı sunduğu için seçilmiştir. Örnek olay seçiminde, birincil veri erişilebilirliği, firma iş birliği, ürünün temsil gücü ve açık kaynak yazılımlarla modelleme uygunluğu dikkate alınmıştır.

Veri toplama süreci, öncelikle birincil verilerin (firma kayıtları, üretim prosesleri, kullanıcı/uzman görüşleri, teknik dokümanlar) elde edilmesi ile başlatılmış; ancak, sektörel bilgi eksikliği veya doğrudan erişilemeyen süreçler için ikincil veri kaynaklarına (bilimsel literatür, veri tabanları) başvurulmuştur. Bu aşamada, verilerin kalite kontrolü ve geçerliliği, ISO 14044 standardında önerilen veri kalitesi değerlendirmesine uygun olarak, literatürde yaygın şekilde kullanılan Pedigree Matrix yöntemi ile sistematik olarak değerlendirilmiş; her bir veri girdisinin kaynak, zamansal ve coğrafi uygunluk, teknolojik temsil gibi kriterleri puanlanmıştır [28][115][9]. Puanlanan bu veriler ile envanter ve karakterizasyon belirsizliklerini nicel olarak değerlendirmek üzere Monte Carlo simülasyonu (n=1000) uygulanmıştır. Raporlama metrikleri ortalama, medyan, standart sapma, %5–%95 yüzdelikleri ve göreli belirsizlik (CV = std/mean) olarak belirlenmiştir. Karar kuralı olarak, senaryolar arasındaki farkın ilgili kategorinin %5–%95 güven bandının dışına taşması durumunda fark anlamlı kabul edilmiştir; band içinde kalan farklar kararsız sayılmıştır.

Modelleme ve analiz işlemleri, OpenLCA 2.0.3 yazılımı ile yürütülmüş; çevresel etkiler için Ecoinvent 3.7.1, sosyal etkiler için Soca veri tabanı kullanılmıştır. OpenLCA yazılımının tercih edilme sebebi, akış (flow), süreç (process), ürün sistemi (product system) ve proje (project) düzeyinde veri girişine ve özelleştirilebilir analizlere imkân tanıyan açık kaynak bir platform olmasıdır. SLCA kapsamında kullanılan Soca veri tabanının en önemli avantajı, kullanıcı tanımlı yeni göstergelerin sisteme entegre edilebilmesine olanak sağlamasıdır. Bu esneklik, Evrensel Tasarım'ın 7 temel ilkesinin 31 alt göstergeye dönüştürülerek yazılım ortamında gösterge olarak tanımlanmasını ve SLCA'ya bütüncül biçimde entegre edilmesini mümkün kılmıştır.

Her bir ürün sistemi için yaşam döngüsü modellemesi, "beşikten mezara" yaklaşımı temel alınarak, hammadde temininden üretim, kullanım ve bertaraf aşamalarına kadar tüm süreçleri kapsamaktadır. Ürünlerin fonksiyonel birimi ve sistem sınırları, sektörün tipik kullanım koşulları ve literatürdeki uygulamalar dikkate alınarak belirlenmiştir. Eksik veri veya sınırlı bilgi bulunan süreçler açıkça belirtilmiş, bu durum modelin genel güvenilirliğinin değerlendirilmesinde hesaba katılmıştır. Senaryo ve duyarlılık analizleri, özellikle HAVA VERİ ÖLÇÜM istasyonunda batarya ömrü üzerinden alternatif sistem tanımlarıyla yürütülmüş; böylece ürün yaşam döngüsünün farklı parametreler altında nasıl değiştiği test edilmiştir. Tüm süreç boyunca etik kurallar ve veri güvenliği ilke edinilmiş ve etik kurul izinleri alınmıştır.

Araştırmanın genel işleyiş akışı ve izlenen adımlar, aşağıda sunulan Şekil 4.1.'deki akış diyagramı ile özetlenmiştir. Bu akış diyagramı, ISO 14040/44 yapısına uygun olarak dört ana fazı (Amaç ve Kapsam, Envanter Analizi, Etki Analizi, Yorumlama) sistematik biçimde birbirine bağlamaktadır. Sol akış Örnek olay-1'deki tek bir ürün sistemi için tam döngüyü, sağ akış ise örnek olay-2'deki eşdeğer fonksiyonel birim altında tanımlanan alternatiflerin (Senaryo-1/Senaryo-2) karşılaştırmalı işleyişini göstermektedir.



Şekil 4.1. Akış diyagramı (örnek olay-1 solda, örnek olay-2 sağda)

Amaç ve Kapsam aşamasında, öncelikle analiz edilecek firma ve ürün sistemleri belirlenmiş; fonksiyonel birim ve sistem sınırları literatür ve sektör ihtiyaçları doğrultusunda tanımlanmıştır. Örnek Olay 2'de, farklı batarya kullanımlarına bağlı iki senaryo aynı fonksiyonel hizmet çıktısı korunarak oluşturulmuştur. Etki değerlendirmesinde kullanılacak çevresel, ekonomik ve sosyal göstergeler bu aşamada seçilmiş; çalışmanın özgün bileşeni olan Evrensel Tasarım ilkelerinin sosyal göstergelere dahil edilmesi bu kısımda başlamıştır. İndikatörlerin belirlenmesi ile bir sonraki aşamaya hazırlık için veri toplama formları ve sezgisel kontrol listelerine ait sorular belirlenmiştir.

Envanter Analizi fazında sosyal veriler için etik kurul onayı alınmış; firma görüşmeleri (ses kayıtları), yerinde gözlem ve retrospektif arşivlerden elde edilen ham veriler temizlenip

birimsel olarak standartlaştırılmıştır. Modelleme OpenLCA üzerinde ecoinvent 3.7.1 (cut-off, unit) arka plan modeliyle yürütülmüş; veriler akış (flow), süreç (process), ürün sistemi ve proje hiyerarşisine uygun şekilde yapılandırılmıştır. Evrensel Tasarım göstergeleri, uzman değerlendirmeleriyle puanlanmış ve Soca veri tabanının esnek gösterge altyapısı üzerinden SLCA katmanına eklenmiştir. Örnek Olay 1'de kıyaslama yapılmadığından modelleme ürün sistemi düzeyinde sonlandırılmış; Örnek Olay 2'de iki senaryonun karşılaştırması proje düzeyinde kurulmuştur.

Etki Analizi aşamasında, Örnek olay-1 için ürün sistemleri üzerinden, çevresel, ekonomik ve sosyal göstergeler hesaplanmış; Örnek olay-2'de ise proje üzerinden iki farklı senaryo kıyaslanmıştır. Analizlerde uluslararası veri tabanları ve etki değerlendirme yöntemleri (ör. ReCiPe, Soca, Ecoinvent) kullanılmıştır. Elde edilen bulgular, hem ürün sistemleri hem de Evrensel Tasarım entegrasyonu açısından ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Örnek olay-1'de elde edilen çok sayıdaki fark türdeki bulguların değerlendirilebilmesi için normalizasyon ve eşit ağırlıklandırma uygulanmıştır. Böylelikle süreçte en çok etkisi olan sıcak noktalar belirlenmiş ve alternatif senaryolar tanımlanmıştır. Örnek olay-2'de ise kıyaslama sonuçlarında tek taraf ağır bastığı için normalizasyona gerek duyulmamıştır.

Yorumlama aşamasında ise alternatif senaryolara çok ölçütlü değerlendirme yöntemlerinden olan TOPSIS uygulanmış ve en uygun seçenekler belirlenmiştir. Tüm bu süreçte, yöntemsel şeffaflık ve veri güvenliği ilkelerine azami özen gösterilmiştir. İzleyen alt başlıklarda her bir aşamanın detaylı uygulama adımları açıklanacaktır.

4.2. Kullanılan Yazılım ve Veri Kaynakları

Yaşam döngüsü analizleri ve sürdürülebilirlik değerlendirmeleri, son yıllarda çok boyutlu ve bütüncül yaklaşımların öne çıkmasıyla birlikte özel yazılım platformlarının ve kapsamlı veri tabanlarının kullanımını zorunlu hale getirmiştir. Bu alanda, piyasada hem açık kaynaklı hem de ticari pek çok farklı analiz yazılımı ve veri tabanı geliştirilmiştir. Yazılım ve veri tabanı seçimi, yapılan çalışmanın amacına, modelleme ihtiyacına, veri erişimine ve analiz kapsamına göre şekillenmektedir.

LCA uygulamaları için en yaygın kullanılan yazılımlar SimaPro, GaBi, OpenLCA, Umberto ve Brightway2'dir. SimaPro ve GaBi ticari ve güçlü raporlama ve görselleştirme

yeteneklerine sahip, kullanıcı dostu platformlardır. Fakat lisans maliyetleri yüksektir ve yazılım kapalı kaynaklıdır [116][117]. Umberto (ifu Hamburg, 2024), proses endüstrilerine özgü akış şeması modelleme avantajı sunarken [118], Brightway2 ise Python tabanlı, ileri düzeyde esnekliği ve veri manipülasyonu sağlayan açık kaynak bir alternatiftir [119].

Bu çalışmada tercih edilen OpenLCA ise, açık kaynak kodlu yapısı, düşük maliyetli ve özelleştirilebilir analiz imkânı sunması, modüler modelleme esnekliği ve geniş veri tabanı entegrasyonu ile öne çıkmaktadır [120]. LCA, LCC ve SLCA analizlerinin aynı platformda bütünleşik şekilde yapılmasına imkân verirken, kullanıcı tanımlı yeni göstergelerin ve özgün etki değerlendirme yöntemlerinin sisteme kolayca entegre edilebilmesini sağlamaktadır [120,121]. Bu özellikler, özellikle SLCA kapsamında Evrensel Tasarım göstergelerinin özgün olarak sisteme eklenmesi ve değerlendirilmesi açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Yaşam döngüsü analizlerinin başarısı büyük ölçüde kullanılan veri tabanlarının kapsamı ve güvenilirliğine bağlıdır. Dünya genelinde en çok kabul gören veri tabanları arasında Ecoinvent [122], GaBi Database [117], USLCI [123], ELCD [124] ve Agri-footprint [125] sayılabilir. Ecoinvent, İsviçre merkezli olup, binlerce süreç ve akış verisini yüksek kalite standartlarıyla, ISO 14040/44'e tam uyumlu şekilde sunar [122]. Farklı sektör ve coğrafyalar için güncel veri, şeffaf kaynak dokümantasyonu ve sürekli güncellenen içerik ile yaşam döngüsü analizlerinde altın standart olarak kabul edilir [126]. GaBi veritabanı, özellikle endüstriyel üretim süreçlerinde sektöre özgü detaylı veri sunarken, USLCI ve ELCD bölgesel odaklıdır; Agri-footprint ise tarım ve gıda sektöründe kullanılmaktadır.

Bu tez kapsamında çevresel ve ekonomik analizlerde Ecoinvent 3.7.1 veri tabanı kullanılmıştır. Ecoinvent'in küresel kapsama sahip olması, güncel ve şeffaf veri sunması, ISO standartları ile tam uyumlu yapısı ve OpenLCA ile tam entegrasyonu önemli avantajlar sunmuştur. Modelleme sırasında coğrafi ve zamansal uygunluk esasına göre veri seçilmesi, analizlerin güvenilirliğini artırmıştır [126].

Sosyal yaşam döngüsü değerlendirmelerinde ise PSILCA, Soca ve SHDB [127] veri tabanları öne çıkmaktadır. SHDB, özellikle ülke ve sektör bazında sosyal risklerin geniş kapsamlı ve karşılaştırmalı analizini mümkün kılan, kamuya açık ve sürekli güncellenen bir veri kaynağıdır. SHDB, süreç düzeyinde hızlı tarama, risk haritalama ve sosyal sıcak

noktaları (hotspot) belirleme işlevleriyle literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır [127]. PSILCA, küresel düzeyde sosyal risk göstergeleri ve etki kategorileri içerirken, süreç düzeyinde detaylı analiz imkanı sunar; ancak kullanıcı tanımlı yeni göstergelerin entegrasyonu daha sınırlı ve karmaşıktır [121]. Soca ise organizasyon düzeyinde sosyal kapasite analizi sunan, modüler ve esnek bir yapıya sahip olup, kullanıcıya bağlama özgü yeni göstergeler ve etki kategorileri tanımlama imkanı vermektedir [64].

Bu çalışma kapsamında, SLCA analizlerinde Soca v2. veri tabanı tercih edilmiştir. Soca'nın başlıca üstünlükleri, esnek gösterge tanımlama kapasitesi, özgün göstergelerin kolay entegrasyonu, organizasyonel düzeyde analiz imkanı ve OpenLCA ile tam uyumluluğudur. Evrensel Tasarım ilkeleri gibi özgün sosyal göstergelerin sisteme entegre edilmesini mümkün kılması, Soca'nın bu çalışmadaki uygulama başarısında belirleyici olmuştur.

Sonuç olarak, OpenLCA 2.0.3 yazılımı ile Ecoinvent 3.7.1. ve SOCA v2. veri tabanları, bu tez kapsamında çevresel, ekonomik ve sosyal boyutların bütünleşik ve etkileşimli olarak analiz edilmesine imkan sağlamıştır. Modüler ve esnek modelleme yapısı sayesinde, her üç boyutun ayrı ayrı ya da bütünleşik olarak değerlendirilmesi mümkün olmuştur. Bu özellik, analizlerin hem bilimsel hem de uygulamaya dönük güvenilirliğini artırmaktadır.

4.3. Evrensel Tasarımın SLCA'ya uyarlanması

SLCA, LCSA'nın sosyal boyutunu ele alan, metodolojik olarak henüz gelişmekte olan bir yaklaşımdır. SLCA, geleneksel olarak UNEP/SETAC (2009) kılavuzunda tanımlandığı biçimiyle beş temel paydaş kategorisi üzerinde yapılandırılmıştır: işçiler, değer zinciri aktörleri, yerel topluluklar, toplum ve tüketiciler [7]. Bu yapı, sosyal riskleri belirleme, olumsuz etkileri görünür kılma ve karar vericiler için öncelikli alanları ortaya koyma açısından yararlı olmakla birlikte, ürün ve hizmetlerin pozitif sosyal etkilerini değerlendirmede sınırlı kalmaktadır. Özellikle kapsayıcılık, erişilebilirlik ve eşit kullanım gibi tasarımın kullanıcı üzerindeki olumlu etkileri, mevcut sistemde risk temelli göstergelerin gölgesinde kalmakta, çoğu zaman ölçülebilir çıktılara dönüştürülememektedir.

Bu eksiklik, ulusal ve uluslararası literatürde de vurgulanmaktadır. Örneğin, UNEP (2022) güncellemesi ile "çocuklar" yeni bir paydaş kategorisi olarak sisteme eklenmiş, bu adım sosyal kapsayıcılık yönünde önemli bir ilerleme sağlamış olsa da [62], yaşlılar, engelliler ve

özel gereksinimli kullanıcılar gibi diğer gruplar hâlâ bağımsız ve bütüncül biçimde değerlendirilememektedir. Dolayısıyla, yalnızca risk odaklı ve paydaş kategorisi bazlı değerlendirme yerine, farklı kullanıcı gruplarını kapsayan kapsayıcı tasarım temelli bir değerlendirme alanının SLCA sistemine entegre edilmesi, hem metodolojik hem de uygulama açısından yenilikçi bir adım olarak görülebilmektedir.

Bu tez çalışmasında, söz konusu boşluğu gidermek ve sosyal sürdürülebilirliğin olumlu boyutlarını görünür kılmak amacıyla, Evrensel Tasarım ilkeleri SLCA sistematiğine bağımsız bir değerlendirme alanı olarak entegre edilmiştir. Evrensel Tasarım kavramı, ilk kez Mace (1998) tarafından "ürünlerin, mekânların ve hizmetlerin yaş, cinsiyet, yetkinlik veya engellilik durumu fark etmeksizin en geniş kullanıcı kitlesine erişilebilir, güvenli ve kullanılabilir biçimde tasarlanması" olarak tanımlanmış [80]; Story vd. (1998) tarafından ise yedi temel ilke ile sistematik hâle getirilmiştir [80]. Bu yedi ilke, akademik literatürde ve uluslararası standartlarda yaygın biçimde kabul görmüş olup şunlardır: Eşit Kullanım, Kullanımda Esneklik, Basit ve Sezgisel Kullanım, Algılanabilir Bilgi, Hatalara Karşı Tolerans, Düşük Fiziksel Çaba, Yaklaşım ve Kullanım için Yeterli Alan.

Bu çalışma kapsamında her bir ilke, literatürdeki rehber alt ilkeler dikkate alınarak ayrıntılı biçimde incelenmiş ve toplam 31 alt gösterge tanımlanmıştır. Alt göstergeler, sistematik takip ve yazılım entegrasyonu kolaylığı sağlamak amacıyla UD1a, UD1b, UD2a… biçiminde kodlanmıştır. Kodlama yapısında ilk iki harf paydaşı, sonraki rakam ilkeyi, en sondaki harf ise alt göstergenin sıra kodunu ifade etmektedir. Bu yapı, hem akademik raporlama hem de yazılım tabanlı veri analizi açısından şeffaf ve izlenebilir bir sistem sunmaktadır.

Göstergelerin SLCA sistemine entegrasyonu, Soca veri tabanının modüler ve esnek yapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. OpenLCA yazılımında "Universal Design" adıyla yeni bir paydaş kategorisi oluşturulmuş, tanımlanan her alt gösterge ilgili paydaş grubuyla eşleştirilmiştir.

Her alt gösterge için uyum seviyesi, literatürde yaygın biçimde kullanılan sezgisel kontrol listesi yöntemi ile değerlendirilmiştir [11][128]. Sezgisel kontrol listelerine dayalı değerlendirme sürecinde, Evrensel Tasarım ve iç mimari alanlarında akademik/mesleki deneyime sahip üç uzmanın görüşüne başvurulmuştur. Uzmanlar, farklı disiplinlerden

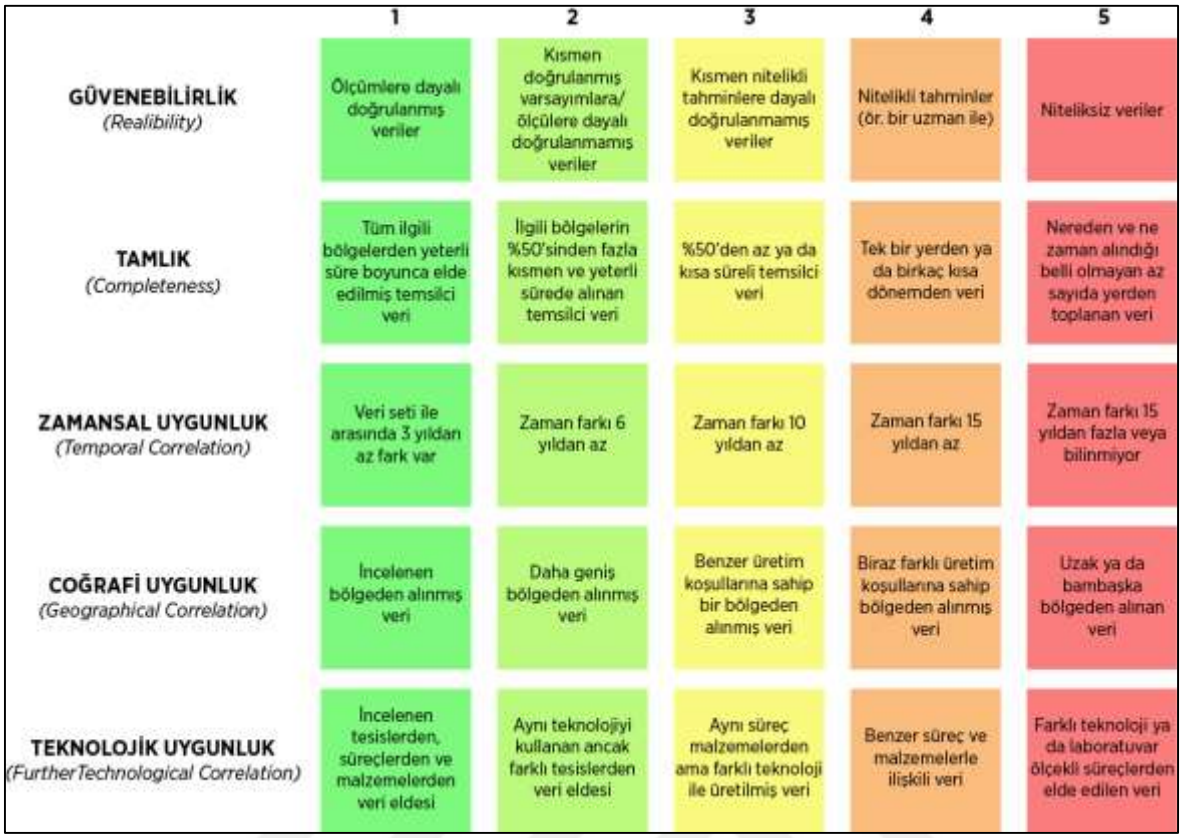
gelmekle birlikte Evrensel Tasarım ilkelerinin uygulanması ve değerlendirilmesi konusunda bilgi ve deneyime sahip kişiler arasından seçilmiştir. Bu çalışmada uzmanlar, temsil edici bir örneklem oluşturmak amacıyla değil; sezgisel değerlendirme yönteminin öznel yapısını ve yöntemler arası farklılıkları görünür kılmak amacıyla dahil edilmiştir. Bu bağlamda uzman değerlendirmesi, yöntemin geçerliliğini kanıtlamaya yönelik bir doğrulama aracı olarak değil; önerilen metodolojik çerçevenin nasıl uygulanabileceğini gösteren örnekleyici bir adım olarak ele alınmıştır.

Sezgisel değerlendirme ve kullanılabilirlik temelli kontrol listelerinde, az sayıda ancak alanında yetkin uzmanın değerlendirmesinin temel sorun alanlarını ortaya koymak için yeterli olduğu; özellikle 3–5 uzmanla yapılan uygulamaların yöntemsel olarak kabul edilebilir olduğu literatürde açıkça belirtilmektedir [129]–[131]. Bu doğrultuda çalışmada, Evrensel Tasarım ve erişilebilirlik alanlarında akademik ve/veya mesleki deneyime sahip üç uzmanın görüşü, genelleme amacı taşımayan ve önerilen metodolojik çerçevenin uygulanışını göstermeye yönelik nitel bir değerlendirme aracı olarak kullanılmıştır.

Sezgisel kontrol listesinde yer alan sorular “Evet”, “Hayır” veya “Kısmen” şeklinde yanıtlanmış, bu yanıtlar 0–1 arası ölçek değerlerine dönüştürülerek ham değer (raw value) hesaplanmıştır. Bu değerler, ürün sistemlerinin yaşam süresi boyunca (service life), activity variable katsayısı ile çarpılarak normalize edilmiş etki puanlarına dönüştürülmüştür.

Etki puanlarının hesaplanmasında, OpenLCA’da tanımlı risk seviyeleri (very high, high, medium, low, very low, no risk, no data) esas alınmış; her seviyeye karşılık gelen karakterizasyon faktörleri (100, 10, 1, 0.1, 0.01, 0) belirlenmiştir. Böylece, Soca veritabanındaki sosyal göstergeler ile kullanıcı tanımlı UD göstergeleri, aynı etki değerlendirme sistematiği içerisinde karşılaştırılabilir hâle gelmiştir.

Metodolojik sağlamlığı güçlendirmek amacıyla, her alt göstergeye ilişkin akademik veya standart temelli kaynaklar (ör. ISO 9241-210, Universal Design Handbook, ADAAG, DINED, Inclusive Design Toolkit) yazılımın “source” alanına eklenmiş; böylece göstergelerin bilimsel geçerliliği ve izlenebilirliği sağlanmıştır. Ayrıca, veri güvenilirliği UNEP/SETAC (2009) kılavuzunda önerilen Pedigree Matrix yöntemi ile değerlendirilmiştir. Bu yöntem, veri setlerinin güvenilirlik, tamlık, zamansal uygunluk, coğrafi uygunluk ve teknolojik uygunluk kriterlerine göre puanlanmasını sağlar.



	1	2	3	4	5
GÜVENEBİLİRLİK *(Realibility)*	Ölçümlere dayalı doğrulanmış veriler	Kısmen doğrulanmış varsayımlara/ ölçülere dayalı doğrulanmamış veriler	Kısmen nitelikli tahminlere dayalı doğrulanmamış veriler	Nitelikli tahminler (ör. bir uzman ile)	Niteliksiz veriler
TAMLIK *(Completeness)*	Tüm ilgili bölgelerden yeterli süre boyunca elde edilmiş temsilci veri	İlgili bölgelerin %50'sinden fazla kısmen ve yeterli sürede alınan temsilci veri	%50'den az ya da kısa süreli temsilci veri	Tek bir yerden ya da birkaç kısa dönemden veri	Nereden ve ne zaman alındığı belli olmayan az sayıda yerden toplanan veri
ZAMANSAL UYGUNLUK *(Temporal Correlation)*	Veri seti ile arasında 3 yıldan az fark var	Zaman farkı 6 yıldan az	Zaman farkı 10 yıldan az	Zaman farkı 15 yıldan az	Zaman farkı 15 yıldan fazla veya bilinmiyor
COĞRAFİ UYGUNLUK *(Geographical Correlation)*	İncelenen bölgeden alınmış veri	Daha geniş bölgeden alınmış veri	Benzer üretim koşullarına sahip bir bölgeden alınmış veri	Biraz farklı üretim koşullarına sahip bölgeden alınmış veri	Uzak ya da bambaşka bölgeden alınan veri
TEKNOLOJİK UYGUNLUK *(FurtherTechnological Correlation)*	İncelenen tesislerden, süreçlerden ve malzemelerden veri eldesi	Aynı teknolojiyi kullanan ancak farklı tesislerden veri eldesi	Aynı süreç malzemelerden ama farklı teknoloji ile üretilmiş veri	Benzer süreç ve malzemelerle ilişkili veri	Farklı teknoloji ya da laboratuvar ölçekli süreçlerden elde edilen veri

Şekil 4.1. Pedigree Matrix Türkçeleştirilmiş

Şekil 4.2'de, bu çalışmada kullanılan Türkçe'ye uyarlanmış Pedigree Matrix yer almakta olup, her kriter için 1–5 arası puanlama ölçeği ve buna karşılık gelen nitel tanımlar renk kodlarıyla gösterilmektedir. Puanlama sisteminde 1 en yüksek veri güvenilirliğini, 5 ise en düşük güvenilirliği ifade etmektedir. Renk kodları, görseldeki kriterlerin önem derecesini hızlıca kavramayı kolaylaştırırken, sayısal puanlar OpenLCA veri kalitesi değerlendirme modülünde doğrudan kullanılmıştır. Çalışmada, veri setlerinin analiz kapsamına dahil edilip edilmeyeceği veya veri iyileştirme ihtiyacı bu matristen elde edilen puanlar doğrultusunda belirlenmiştir.

Bu bütünleşik yaklaşım sayesinde, SLCA sistemine entegre edilen UD göstergeleri yalnızca olumsuz sosyal risklerin değil, aynı zamanda tasarımın yaratabileceği kapsayıcı, erişilebilir ve kullanıcı dostu çözümlerin de ölçülebilir ve karşılaştırılabilir hâle gelmesini sağlamıştır. Böylece çalışma, sosyal sürdürülebilirlik boyutunu genişleterek, literatürde nadir görülen pozitif sosyal etki analizi uygulamalarına bir örnek sunmaktadır. Bu yönüyle, hem metodolojik yenilik hem de uygulamaya dönük karar destek potansiyeli taşımaktadır.

5. ÖRNEK OLAY 1: MUTFAK DOLAPLARI

Bu örnek olay çalışmasında, Çorum ilinde faaliyet gösteren ve üretim portföyünün önemli bölümünü mutfak dolapları oluşturan bir mobilya firması ile iş birliği yapılmıştır. Firma, yeni tamamlanan bir villa projesinin zemin katındaki mutfak alanı için ölçü alma, alternatif tasarımlar geliştirme, kullanıcı onayı ve üretim–montaj süreçlerini yürütmüştür. Projenin seçilmesindeki temel nedenler şunlardır:

- Mutfak dolaplarının malzeme çeşitliliği (MDF, yonga levha, metal bağlantı elemanları, cam, plastik aksesuarlar vb.) ve farklı tedarik kanallarıyla sağlanan bileşenlerin üretim sürecinde bir araya gelmesi,
- Üretim zincirinin hem yerel (Çorum ve yakın iller) hem de küresel (ithal aksesuarlar) girdiler içermesi,
- İşçilik, enerji ve taşıma gibi çok boyutlu sürdürülebilirlik etkilerinin gözlemlenebilmesine elverişli olması,
- Ürünün kullanım ömrü boyunca çevresel, ekonomik ve sosyal etkilerinin ölçülebilir ve senaryo analizine uygun olması.

Metodolojik olarak çalışma, Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Analizi çerçevesinde yapılandırılmıştır. LCSA yaklaşımı, ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarına dayalı LCA adımlarının; süreç-temelli Yaşam Döngüsü Maliyetlendirme (LCC) ve UNEP/SETAC (2009) Sosyal Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (SLCA) yöntemleriyle bütünleşik olarak uygulanmasıyla oluşturulmuştur. Bu kapsamda:

- Çevresel boyut: ISO 14040/44 standartları izlenmiş, etki değerlendirmesinde ReCiPe 2016 Midpoint (H) yöntemi kullanılmıştır. Veri kaynağı olarak Ecoinvent veri tabanı ve firma verileri temel alınmıştır.
- Ekonomik boyut: ISO 15686-5 standartları ve Swarr et al. (2011) önerileri doğrultusunda süreç-temelli LCC yöntemi, “Net Cost” yaklaşımıyla uygulanmıştır.
- Sosyal boyut: UNEP/SETAC (2020) SLCA kılavuzu ve Soca veri tabanı temel alınmış, çalışmanın özgün katkısı olarak Evrensel Tasarım İlkeleri sosyal göstergelere entegre edilmiştir.

Analiz, mutfak dolaplarının hammadde temininden bertarafına kadar tüm yaşam döngüsü aşamalarını (beşikten mezara) kapsamaktadır. Sistem sınırları belirlenirken ham madde elde edilmesinden kullanım sonrasına kadar olan tüm aşamalar değerlendirmeye dahil edilmiştir. Bu örnek olay, yalnızca teknik üretim süreçlerini değil, aynı zamanda tasarımın kullanıcı çeşitliliğini karşılama düzeyini de analiz etmektedir. Bu amaçla, SLCA kapsamında geliştirilen özgün "UDA" etki değerlendirme yöntemi ile 7 temel Evrensel Tasarım ilkesi ve 31 alt gösterge modelleme sistemine entegre edilmiştir. Böylece, mutfak dolaplarının sürdürülebilirlik profili sadece çevresel ve ekonomik boyutlarda değil, erişilebilirlik ve kapsayıcılık gibi sosyal sürdürülebilirlik ölçütleri üzerinden de değerlendirilebilmektedir.

5.1.Amaç ve Kapsam Tanımı

Amaç ve kapsam tanımı, ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarında belirtildiği üzere, LCA çalışmalarının ilk ve metodolojik açıdan en kritik aşamasıdır [35] [132]. Bu aşamada çalışmanın amacı, hangi karar süreçlerine hizmet edeceği, sonuçların kimlere ve nasıl iletileceği açıkça tanımlanır. Ayrıca, teknik tanımlar (fonksiyonel birim, sistem sınırları, varsayımlar ve kısıtlar) ile değerlendirme kapsamı (etki kategorileri, kullanılacak LCIA yöntemleri, tahsis yaklaşımları vb.) netleştirilir [67].

Fonksiyonel birim:

Fonksiyonel birim, ürün veya hizmetin tanımlanan işlevlerini nicel olarak ifade eden ve çalışmanın karşılaştırılabilirlik ve tutarlılık düzeyini belirleyen temel referans ölçüsüdür. ISO 14040/44 standartlarına göre, iki veya daha fazla sistemin karşılaştırılması ancak aynı fonksiyonel birim üzerinden mümkündür. Fonksiyonel birim, ürünün daraltılmış fonksiyonlarını, faydalarını, fonksiyonun süresini, gerçekleştiği yeri ve yılı kapsamalıdır [35][62]. Açıkça tanımlanmış bir fonksiyonel birim, sistemlerin eşdeğer temelde değerlendirilmesini sağlar. Bu çalışmada fonksiyonel birim şu şekilde belirlenmiştir:

"Çorum'da bulunan bir konuttaki mutfak alanında, günlük kullanım koşullarında on yıl boyunca depolama ve düzenleme işlevlerini yerine getirecek şekilde, 11 modül ve 1 mutfak adasından oluşan mutfak dolaplarının üretimi."

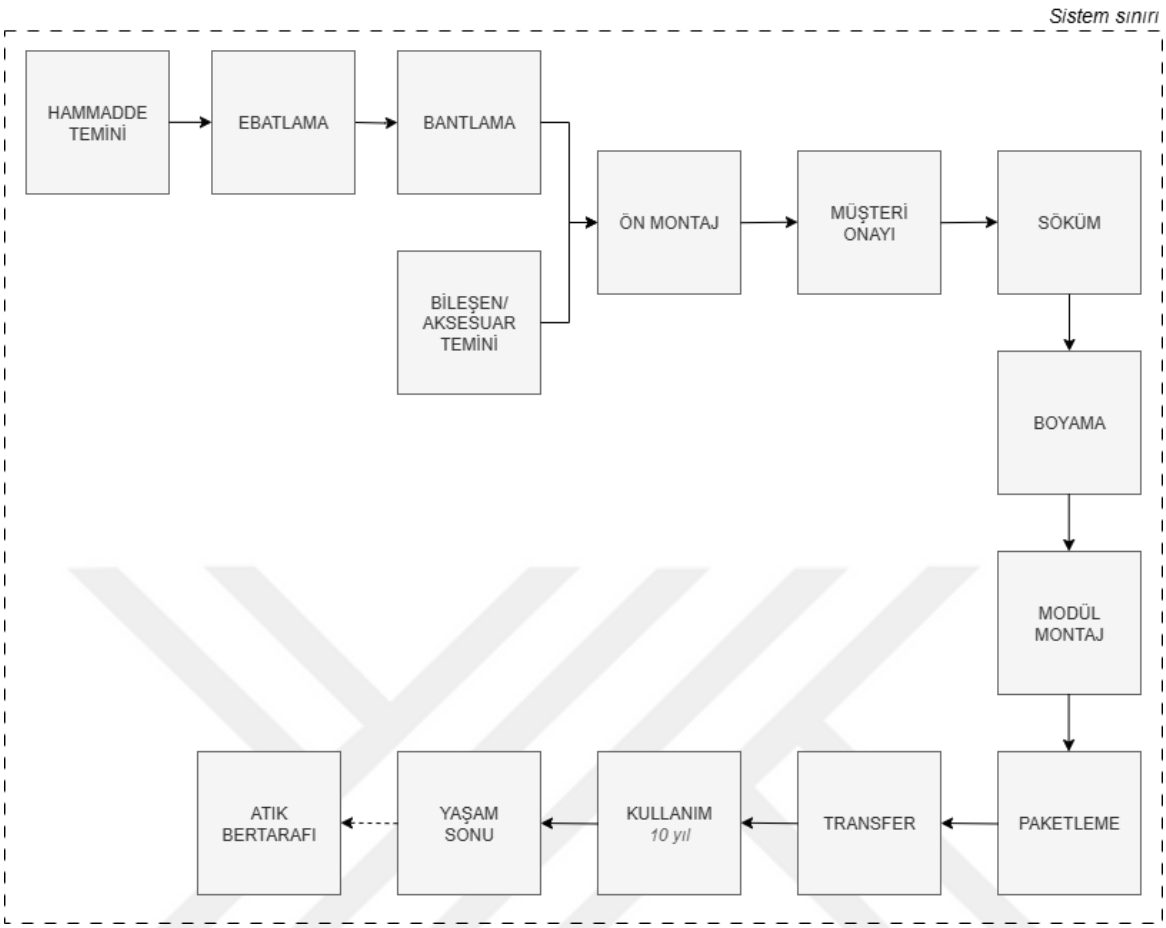
Fonksiyonel birimin tanımlanmasının ardından referans akışı belirlenmiş; bu akış, ürünün yaşam döngüsündeki girdiler ve çıktılarla ilişkilendirilerek envanter verilerinin tutarlı biçimde toplanmasına olanak sağlamıştır.

Ürün sistemi:

ISO 14040-14044'e göre ürün sistemi, ürünün yaşam döngüsündeki birbirine bağlı birim süreçlerin koleksiyonudur. Birim süreçler, ürün sisteminin girdilerini ve çıktıları tanımlamayı kolaylaştırmak için ayrıştırılmıştır. Bu çalışmada ürün sistemi; beşikten mezara yaklaşımı ile yani hammaddenin temininden bertarafına kadar tüm yaşam döngüsü aşamalarını kapsayacak şekilde belirlenmiştir.

Sistem sınırları:

Sistem sınırları, modele dahil edilecek birim süreçlerin tanımını ve kapsamını belirler. Bu çalışma kapsamında sistem sınırları; ham madde temini, ana imalat süreçleri (ör. ebatlama, kenar bantlama, boyama), lojistik ve montaj, kullanım, bakım, kullanım ömrü sonu bertaraf/geri dönüşüm aşamalarını içermektedir. Ayrıca, yakıt, elektrik ve ısı üretimi, yardımcı ürünlerin imalatı, süreç atıkları, ürün geri kazanımı ve atık yönetimi faaliyetleri de kapsam dahilindedir. Üretim sırasında oluşan ahşap atıklar, firmanın ısınma ihtiyacında kullanılmakta olup enerji geri kazanımı stratejisinin bir parçası olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5.1. Örnek olay-1 için ürün sistemi ve sistem sınırı.

Şekil 5.1. mutfak dolapları ürün sisteminin yaşam döngüsü boyunca izlediği aşamaları ve bu aşamalar arasındaki bağlantıları şematik olarak göstermektedir. Görselde, hammadde temini aşamasından başlayarak üretim süreçleri (ör. ebatlama, kenar bantlama, ön montaj), müşteri onayı, boyama, modül montajı, paketleme, transfer ve yerinde montaj aşamaları ile kullanım, geri kazanım/yeniden kullanım ve atık bertarafı süreçleri detaylandırılmıştır. Bu temsil, çalışmanın metodolojik sınırlarının görsel olarak anlaşılmasını kolaylaştırmakta, model kapsamına dahil edilen ve edilmeyen süreçleri net biçimde ortaya koymaktadır.

Sistem sınırlarının belirlenmesinde durdurma kriterleri (cut-off criteria) açıkça tanımlanmış; çalışmanın amacına ulaşma olasılığını etkilemeyecek önemsiz girdiler/çıktılar model dışında bırakılmıştır.

Varsayımlar:

Bu çalışmada kullanılan varsayımlar, modelin sınırlarını netleştirmek ve değerlendirme sonuçlarının yorumlanabilirliğini artırmak amacıyla belirlenmiştir. Seçilen varsayımlar, sektörel uygulamalar, veri kısıtları ve metodolojik gereklilikler doğrultusunda aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

- Ürün ömrü 10 yıl olarak kabul edilmiştir; bu süre, sektörde benzer ürünler için yaygın olarak kullanılan ömür beklentisine dayanmaktadır.
- Kullanım aşamasındaki enerji tüketimi ihmal edilmiştir; çünkü mutfak dolaplarının enerji tüketimi, yaşam döngüsü boyunca toplam çevresel etki içerisinde ihmal edilebilir düzeydedir. Bu nedenle malzeme özellikleri ile kullanım sonrası senaryolar analizde önceliklendirilmiştir.
- LCC hesaplamalarında 2022 yılı fiyatları baz alınmıştır. Bu seçim, çalışmanın saha verilerinin toplandığı döneme denk gelmekte ve ekonomik verilerin güncelliğini sağlamaktadır.
- Para birimi olarak USD tanımlanmıştır. OpenLCA sisteminin sorunsuz çalışması ve uluslararası karşılaştırılabilirliği artırmak amacıyla tercih edilmiştir.
- Tüm göstergeler için veri kalitesi değerlendirmesi, pedigree matrix yöntemi ile yapılmıştır; böylece veri güvenilirliği ve belirsizlikler sistematik şekilde analiz edilebilmiştir.

5.2. Envanter Analizi

Envanter analizi, LCA metodolojisinin temel ve en yoğun emek gerektiren aşamalarından biridir. ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarında belirtildiği üzere bu aşama, tanımlanan amaç ve kapsam doğrultusunda sistemin tüm girdileri (malzemeler, enerji, iş gücü vb.) ve çıktılarının (ürünler, emisyonlar, atıklar vb.) nicel olarak belirlenmesi, sınıflandırılması ve kaydedilmesini içerir [35, 132]. Avrupa Komisyonu tarafından yayımlanan Uluslararası Yaşam Döngüsü Veri Sistemi (ILCD) El Kitabı'nda (EC-JRC, 2010) ve Curran (2006) tarafından aktarıldığı üzere, bu süreç yalnızca veri toplama değil, aynı zamanda verilerin doğrulanması, tutarlılığının sağlanması ve sistem sınırlarına uygun şekilde modellenmesini de kapsar [115,133].

Envanter analizinin temel amacı, ürün sisteminin yaşam döngüsü boyunca çevresel, sosyal ve ekonomik etkilerin hesaplanmasına temel oluşturacak eksiksiz ve güvenilir bir veri tabanı oluşturmaktır. Bu nedenle veri toplama ve işleme süreci, amacın ve kapsamın gerektirdiği doğruluk düzeyine uygun şekilde planlanmalıdır. Sala vd. (2015) ve Paragahawewa vd. (2009) sosyal LCA (S-LCA) özelinde de aynı aşamanın geçerli olduğunu, ancak burada veri tiplerinin çevresel akışlardan ziyade sosyal göstergeler, paydaş gruplarına özgü göstergeler ve bölgesel/ulusal istatistikler olabileceğini vurgulamaktadır [112, 55].

Bu çalışmada envanter analizi, üç boyutlu sürdürülebilirlik yaklaşımı (LCA, LCC, S-LCA) kapsamında bütüncül bir yapıda yürütülmüştür. Çalışmanın ilk aşamasında, Ecoinvent ve Soca veri tabanlarından yararlanılarak ürün sistemindeki tüm süreçlerin giriş-çıkış verileri toplanmıştır. Çevresel boyut için malzeme, enerji ve emisyon verileri; ekonomik boyut için maliyet ve gelir verileri; sosyal boyut için ise paydaş gruplarına göre tanımlanan göstergelere ilişkin veriler envantere dahil edilmiştir. Veriler, OpenLCA yazılımında süreç bazlı olarak modellenmiş ve tüm alt süreçler sistem sınırları içinde bağlantılandırılmıştır.

5.2.1. Verilerin toplanması

Bu çalışmanın Yaşam Döngüsü Envanteri (Life Cycle Inventory - LCI) aşamasında kullanılan veriler, ürün sisteminin doğruluğunu ve modellemenin gerçeğe uygunluğunu sağlamak amacıyla çeşitli kaynaklardan temin edilmiştir. Veriler, ISO 14040 ve ISO 14044 standartları doğrultusunda birincil, ikincil ve tahmini veri olarak sınıflandırılmıştır.

Birincil veriler, üretici firma ile yapılan saha ziyareti sırasında doğrudan gözlem yoluyla, firma yetkilisi ile yapılan görüşmeden alınan ses kaydı ve retrospektif arşiv bilgileriyle elde edilmiştir. Üretim sürecine dair makinelerin isimleri, iş gücü süresi, enerji tüketimi gibi veriler yerinde gözlemlenmiş ve ölçülmüştür. Malzeme maliyetleri, donanım bileşenlerinin teknik özellikleri ve kullanım sıklıkları üreticiden sağlanan malzeme listelerine ve teklif dosyalarına dayanmaktadır.

Birincil verilerin yetersiz kaldığı veya doğrudan erişilemediği durumlarda, Ecoinvent 3.7.1 veritabanı kullanılarak ikincil verilerle sistem modeli desteklenmiştir. Özellikle elektriğin üretimi, ahşap ve metal malzemelerin endüstriyel üretimi, paketleme malzemeleri, iç nakliye gibi süreçlerde ikincil veriler kullanılmıştır. Bu veriler, ilgili süreç için en yakın coğrafi (TR,

RER, GLO) temsiliyete sahip olan veri setlerinden tercih edilmiştir. Ayrıca Soca veri tabanından elde edilen sosyal göstergeler de ikincil veri kapsamında değerlendirilmiştir.

Bazı durumlarda birincil ya da ikincil veri mevcut olmadığından, sistemdeki belirli akışlar tahmini verilerle temsil edilmiştir. Özellikle yurtdışından tedarik edilen kulp, menteşe, ray gibi donanım bileşenleri için üretici firma bilgileri, genel sektör verileri ve benzer LCA çalışmaları temel alınarak enerji tüketimi, transfer süreçleri ve fire oranları hakkında tahmini değerler oluşturulmuştur. Bu bileşenlerin üretim detaylarına ulaşılamayan durumlarda, hammaddelerine dayalı süreçlerin enerji tüketimleri esas alınarak modelleme yapılmıştır. Ayrıca çevresel etkisi düşük olan vidalar, şablon kalıpları veya destek elemanları gibi büyük sistemin toplam etkisi içinde oransal olarak çok düşük kaldığı varsayılan parçalar için sektör ortalaması referans alınarak tahmini veri girişi yapılmıştır.

Toplanan tüm veriler, OpenLCA 2.0.3 yazılımı içerisinde modüler bazda ayrı ayrı süreçler şeklinde modellenmiş, uygun birimler ve akış yönleri kullanılarak sistematik şekilde entegrasyonu sağlanmıştır. Bu kapsamda, toplanan veriler ayrıca çevresel, ekonomik ve sosyal olmak üzere üç ana başlık altında da değerlendirilmiştir.

Çevresel veriler

Çevresel veri seti, ürün sistemine giren hammaddelerin üretimi, taşınması ve işlenmesiyle ilgili süreçleri kapsayacak şekilde yapılandırılmıştır. Ham MDF, melamin kaplı yonga levha (suntalam), kenar bandı, metal donanım bileşenleri ve ambalaj malzemeleri gibi girdilerin üretim süreçleri için birincil veriler üretici firma ile yapılan görüşmeler ve saha gözlemleri yoluyla elde edilmiştir. Bu verilerin eksik kaldığı noktalarda Ecoinvent veritabanı referans alınarak en yakın coğrafi bölgeyi temsil eden (örn. RER, GLO) süreçlerle ikincil veri kullanımı sağlanmıştır.

Üretim sürecinde kullanılan enerji türleri, elektrik tüketimi, atık oluşumu ve bertaraf yöntemleri yine hem birincil gözlemler hem de literatür verileri ile desteklenmiştir. Fire oranları; özellikle kesim, delik açma, boyama ve montaj gibi işlemler için doğrudan atölye gözlemlerine ve firma çalışanlarının beyanlarına dayalı olarak tahmin edilmiştir. Bertaraf edilen veya yeniden değerlendirilen malzemelerin süreçleri, OpenLCA sistemine çevresel etkiyi yansıtacak biçimde entegre edilmiş ve "cut-off" sistem yaklaşımı benimsenmiştir.

Ekonomik veriler

Ekonomik veriler, ürün sistemine dahil olan tüm malzeme, enerji ve işçilik girdilerinin parasal karşılıklarını kapsayacak şekilde yapılandırılmıştır. Üretici firmanın sağladığı teklif dosyaları, malzeme listeleri ve fatura örnekleri kullanılarak birincil veri elde edilmiştir. Her bir bileşen için birim fiyatlar, üretim yılı olan 2022 yılı itibarıyla değerlendirilmiş ve Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası'nın yayımladığı 2022 yılı ortalama USD kuru baz alınarak Amerikan doları cinsine çevrilmiştir.

Taşıma, montaj ve üretim süreçlerine dair operasyonel giderler ve enerji maliyetleri; yerinde yapılan incelemeler, sektörel veriler ve literatür destekli ikincil kaynaklar yoluyla temin edilmiştir. Örneğin, enerji tüketim değerleri ile birlikte bu enerjilerin mali karşılıkları OpenLCA veri setlerinde tanımlı ekonomik akışlar üzerinden sistematik olarak modellenmiştir. Belirsizlik bulunan ya da net fatura verisi bulunamayan donanım bileşenleri için sektörel ortalamalara dayalı tahmini maliyet girişleri yapılmıştır.

Sosyal veriler

Soca veri tabanından elde edilen göstergelerle birlikte işçi sağlığı ve güvenliği, çalışanların sosyoekonomik durumu ve Evrensel Tasarım ilkeleri gibi sosyal etkiler değerlendirilmiştir. Evrensel Tasarım göstergeleri OpenLCA sistemine özel olarak tanımlanmış, her biri farklı kullanıcı profillerini kapsayacak şekilde yapılandırılmıştır. Değerlendirme sürecinde uluslararası literatüre dayanan bir sezgisel kontrol listesi oluşturulmuş, bu listeye dayalı olarak nitel ve nicel verilerle ilişkilendirilmiş puanlamalar yapılmıştır. Ayrıca firma ve tedarikçilerin sahip olduğu ISO 14001 gibi çevresel yönetim sistemleri sertifikaları da dikkate alınmış, sosyal göstergelere ilişkin eksik veriler OECD raporları ve sektör dokümanları gibi ikincil kaynaklarla desteklenmiştir.

5.2.2. Verilerin düzenlenmesi

Veri düzenleme aşaması, Envanter Analizi sürecinde veri toplama ile modelleme arasında kritik bir köprü işlevi görür. ISO 14040 (2006) standardının 5.3.3 maddesinde belirtildiği üzere, veri toplamanın ardından veri doğrulama, verilerin birim süreçlere ilişkilendirilmesi ve verilerin fonksiyonel birimin referans akışına bağlanması adımlarının uygulanması

gerekmektedir [5]. Bu süreç, tanımlanan sistem için her bir birim süreç düzeyinde ve ürün sisteminin tamamı için güvenilir envanter sonuçlarının oluşturulmasını sağlar. Metodolojik olarak bu aşama, sadece verilerin birimsel olarak uyumlaştırılmasını değil, aynı zamanda sistem sınırları ve fonksiyonel birim ile tutarlı hale getirilmesini de kapsar [115].

Handbook on Life Cycle Assessment (Guinée, 2002) verilerin düzenlenmesinde şu adımların kritik olduğunu vurgular:

- Veri doğrulama: Veri kaynaklarının güvenilirliğinin, güncelliğinin ve temsil yeteneğinin kontrol edilmesi.
- Birim süreçlere ilişkilendirme: Toplanan verilerin ilgili olduğu üretim veya hizmet sürecine doğru şekilde atanması.
- Referans akışa bağlama: Verilerin fonksiyonel birim bazında normalize edilmesi, böylece farklı ölçeklerdeki verilerin karşılaştırılabilir hale gelmesi.

Bu çalışmada verilerin düzenlenmesi süreci, OpenLCA kılavuzundaki adımlar izlenerek, veri girişine hazırlık odaklı olarak gerçekleştirilmiştir [134]. Öncelikle, saha ölçümleri, işletme kayıtları, tedarikçi beyanları ve veri tabanı bilgileri çapraz kontrol edilerek veri doğrulama yapılmıştır. Bu doğrulama sürecinde, ürünün firma tarafından paylaşılan AutoCAD üretim çizimleri üzerinden kullanılan malzeme miktarı ve plakalara yerleşim ile fire oranı yaklaşık olarak hesaplanmıştır. Enerji kullanımı için, kullanılan makine ve teçhizatın manuel datalarından süre bazlı hesaplamalar yapılmıştır. Transfer süreçlerinde ise kullanılan araç bilgisi esas alınarak, Çorum şehir içi trafiğinde tahmini süre ve kilometre hesabı gerçekleştirilmiştir. Toplanan tüm veriler, OpenLCA girişine uygun hale getirilmiştir.

Malzeme ve ürün akışları ağırlık bazlı kilogram (kg) birimine çevrilmiş, enerji tüketimleri kilovat-saat (kWh) olarak ifade edilmiştir. Taşımaya ilişkin transfer verileri ise lojistik modellemede uluslararası kabul gören ton-kilometre (t·km) birimi ile sisteme işlenmiştir. Ayrıca, farklı kaynaklardan gelen maliyet verileri de para birimi açısından uyumlaştırılmış ve tek bir para birimine (USD) dönüştürülmüştür. Bu aşamada her proses için çalışan kişi sayısı bilgisi toplanarak, ilerleyen aşamalarda kullanılabilecek sosyal veriler belirlenmiştir.

Bu birim ve para birimi dönüşümleri, farklı kaynaklardan gelen verilerin ortak bir referans çerçevesinde uyumlu hale gelmesini, sosyal verilerle entegre edilmesini ve yazılımda hatasız

çalışmasını sağlamıştır. Enerji akışlarında kullanılan yakıt türleri ve elektrik kaynaklarının üretim, dönüşüm verimliliği ve dağıtım kayıpları dikkate alınmış; eksik bilgiler literatürden tamamlanmıştır. Bu süreç sonunda, tüm veriler fonksiyonel birim üzerinden oranlanmış ve veri girişine hazır Excel tabloları oluşturularak bir sonraki aşama olan 5.2.3. Verilerin İşlenmesi bölümüne altyapı sağlanmıştır.

5.2.3. Verilerin işlenmesi

Bu alt bölümde, 5.2.2'de düzenlenmiş ve birimsel olarak uyumlaştırılmış veri kümesinin, ISO 14044:2006'nın 5.3.3 maddesinde tarif edildiği üzere birim süreçlere yerleştirilmesi, fonksiyonel birimin referans akışıyla ilişkilendirilmesi ve ürün sistemi içinde tutarlı biçimde bağlanması ele alınmaktadır. ISO, veri hesaplama prosedürlerinin; toplanan verilerin güvenilirlik ve tutarlılık açısından doğrulanması, ilgili verilerin uygun birim süreçlere entegre edilmesi ve fonksiyonel birimin referans akışıyla açıkça ilişkilendirilmesi yoluyla envanterin hem birim süreç hem de ürün sistemi düzeyinde oluşturulması gerektiğini vurgular. Enerji akışlarında ise kullanılan yakıt ve elektrik kaynaklarının türleri, dönüşüm/verimlilik ve dağıtım kayıplarıyla birlikte ele alınması gereği belirtilir [5].

Bu çalışma kapsamında söz konusu adımlar openLCA 2.0.3 yazılımı kullanılarak, resmi kullanıcı kılavuzunda [134] önerilen iş akışına uygun biçimde gerçekleştirilmiştir. openLCA'da akış, bir sürecin giriş veya çıkışında yer alan nicel akışları (malzemeler, enerji, taşıma, atık, emisyon vb.) ifade eder; süreç ise bu akışları belirli bir fonksiyon için bir araya getiren ve miktarlandıran birim süreçtir. Ürün sistemi, süreçlerin birbirine bağlanmasıyla oluşturulan, değerlendirmelerin yapıldığı üst düzey modeldir. Bu modelde referans süreç, sistemin nihai çıktısını (1 takım mutfak dolabı) temsil eder. Project ise bir veya birden fazla ürün sistemini, seçilen yöntemler ve senaryolarla birlikte bir araya getirerek karşılaştırmaların veya duyarlılık çalışmalarının yürütüldüğü çalışma alanıdır [134].

Bu tezin uygulamasında, Şekil 5.1'de gösterilen ürün sistemi OpenLCA yazılımında "LCSA_KitchenCabinets" adıyla oluşturulmuş, süreçler P_[Süreç Adı] biçiminde adlandırılmış ve referans süreç P_End of Life olarak atanmıştır. Veri işleme aşamasında, EK-4 tablosunda özetlenen miktarlar, birimler ve maliyetler sürece Input/Output sekmesi üzerinden girilmiştir. Her giriş/çıkış için miktar ve birim alanları, düzenleme aşamasında standardize edildiği haliyle (kg, kWh, kg·km, h vb.) kullanılmış; maliyetler (USD) yalnızca

giriş tarafında tanımlanarak mükerrer yazımdan kaçınılmıştır. Süreçler arası akış sürekliliğinin sağlanması için, bir süreçte output olan akış bir sonraki sürecin input alanında seçilmiş ve provider olarak ilgili süreç atanmıştır.

Bu çalışmada maliyetlendirme hesaplamaları, süreç-temelli bir yaklaşım çerçevesinde Net Costs yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu yöntem, ürün sistemindeki her bir süreç için maliyetleri girdiler (inputs) üzerinden tanımlar; eğer gelir (revenue) girdileri belirtilmezse sistemin toplam doğrudan maliyetini verir. Böylece, çevresel ve sosyal göstergeler ile birlikte maliyet verileri aynı sistem sınırları içinde değerlendirilir. Her sürece ait maliyet verileri, malzeme, enerji, işçilik ve taşıma girdileri için ayrı ayrı belirlenmiştir. Malzeme ve enerji maliyetleri, tedarikçi veya piyasa fiyat listeleri kullanılarak kg veya kWh başına maliyet cinsinden tanımlanmıştır. Taşıma maliyetleri, taşıma türüne göre kg·km biriminde ifade edilmiş ve ilgili taşıma tarifeleri veya literatür verilerinden alınmıştır. İşçilik maliyetleri, günlük veya saatlik ücret üzerinden hesaplanmış; nitelikli, orta seviye ve vasıfsız işçilik için ayrı değerler tanımlanmıştır. Türkiye'nin 2022 yılı asgari ücret düzeyi dikkate alınmış ve gerekli durumlarda döviz kuru üzerinden USD'ye dönüştürülmüştür.

OpenLCA'da maliyet girişi akış düzeyinde yapılmıştır. Her bir malzeme, enerji veya hizmet girdisi için uygun akış türü (Product flow veya Elementary flow) seçilmiş, birimi tanımlanmış (kg, kWh, km vb.) ve maliyet bilgisi costs alanına girilmiştir. Taşıma süreçlerinde tahsis (allocation), taşınan kütle ve mesafe çarpımı (kg·km) üzerinden yapılmış, bu değer ilgili birim maliyet ile çarpılarak toplam taşıma maliyeti hesaplanmıştır. Döviz kuru farklılıkları önlemek amacıyla tüm maliyetler analiz öncesinde tek bir para birimine (USD) dönüştürülmüştür.

P_Wood Panel Production sürecinde, EK-4'te verilen ahşap panellere ilişkin iki ticari akış ("Medium density fiberboard (MDF), at MDF mill" ve "Melamine-faced particleboard") giriş olarak işlenmiş; bu tedariklerin birim fiyatları doğrudan üretici/tedarikçi beyanına dayalı olarak USD'ye çevrilmiş ve açıklama alanında köken bilgisi belirtilmiştir. Süreç çıkışında, bu girdilerin bileşkesi olan "Wood Panel Production" akışı, toplam kütle (983,27 kg) üzerinden tanımlanmıştır. P_Raw Material Supply sürecinde, panellerin iç lojistiği EK-4'teki taşıma girdisiyle modellenmiş; "transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3" akışı kg·km üzerinden işlenmiş ve açıklamada rota/şehir içi bilgisi belirtilmiştir.

P_Cutting sürecinde "Electricity, low voltage {RER}| market for" akışı 15,00 kWh olarak eklenmiş; kesim atıkları "Waste wood, untreated {RER}" olarak süreç çıkışına yazılmıştır. P_Edging sürecinde kenar bandı için "polyvinylchloride, bulk polymerised" girişi (1,99 kg) ve düşük voltaj elektriği (15,00 kWh) kullanılmış; çıkış "Edging" akışıdır.

P_Component Procurement sürecinde, çekmece rayı, ayak, kulp ve menteşe gibi bileşenlere ait kütle ve maliyet girişleri yapılmış; uluslararası ve yurtiçi taşıma gereksinimleri Ecoinvent'in ilgili lojistik akışlarıyla temsil edilmiştir. P_Pre-Assembly, P_Customer Approval, P_Disassembly, P_Painting, P_Module Assembly, P_Packaging, P_Transfer ve P_On-site Assembly süreçlerinde EK-4'teki saat bazlı istihdam girdileri ve ilgili malzeme/enerji/yardımcı akışları işlenmiştir. P_End of Life sürecinde kullanım süresi (10 yıl = 87672 saat) faaliyet değişkeni olarak tanımlanmış, geri dönüşüm/yeniden kullanım ve bertaraf çıktıları ilgili kütlelerle modellenmiştir.

Bu çalışmada sosyal verilerin işlenmesi, LCSA'nın sosyal boyutunu (SLCA) ürün sistemine sistematik ve izlenebilir biçimde entegre etmeyi amaçlamaktadır. İzlenen yaklaşım, ISO 14040/14044'ün veri yönetimi ve tutarlılık ilkeleriyle, UNEP/SETAC (2009) Sosyal LCA kılavuzunun paydaş temelli çerçevesiyle ve openLCA yazılımının "Social Aspects" arayüzünün alan mantığıyla uyumludur. Uygulama sırasında her süreç için göstergeler, ham değer (raw value), risk/fırsat düzeyi (risk level), faaliyet değişkeni (activity variable), veri kalitesi (data quality), açıklama (comment) ve kaynak (source) alanları doldurularak modele işlenmiş; bu kayıtlar EK-4'teki envanter girdileri ve EK-5'teki sezgisel kontrol listesiyle çapraz referanslanmıştır.

Sosyal göstergeler, Soca veri tabanının varsayılan dört paydaş kategorisi (Yerel Topluluklar, Toplum, Çalışanlar, Tedarik Zinciri Aktörleri) üzerine eklenmiş, kullanım safhasında kullanıcıyla doğrudan etkileşimi görünür kılmak için çalışmaya özgü bir üst çerçeve olarak UD dahil edilmiştir. Böylelikle tedarik ve üretim odaklı göstergeler (ör. sertifikasyon, emek ve sağlık-güvenlik koşulları) ile kullanıcı deneyimi odaklı göstergeler aynı ürün sistemi içinde bütünleşmiştir. Veri kaynakları, ISO'nun önerdiği üzere birincil (firma kayıtları, sertifikalar, saha notları), ikincil (standartlar, kılavuzlar, veri tabanı dokümantasyonu) ve gerekliyse tahmini (uzman yargısı, literatür interpolasyonu) olarak sınıflandırılmış; her girişte "Source" alanına kaynak künyesi, "Comment" alanına ise hesaplama/çıkarım mantığı ve varsayımlar açık biçimde yazılmıştır. Veri kalitesi yönetimi için openLCA'daki pedigree

matrisi kullanılmış; güvenilirlik, tamlık, zamansal, coğrafi ve teknolojik temsil boyutlarında 1–5 ölçeğinde puanlama yapılarak her gösterge için izlenebilirlik sağlanmıştır.

Göstergelerin operasyonelleştirilmesinde temel ilke, faaliyet değişkeninin nedensel bağlam ile uyumlu seçilmesidir. Kullanıcı etkileşimini ölçen UD göstergeleri zaman temelli olduğu için hizmet süresiyle ilişkilendirilmiştir. Buna karşılık tedarik/üretim odaklı göstergeler (ör. orman ayak izi, sertifikasyon kapsamı) miktar temelli olduğundan ürün kütlesi (kg) veya fonksiyonel birim üzerinden ifade edilmiştir. Bu ayrım, göstergelerin hatalı biçimde zamanla ölçeklenmesini ve sonuçların çarpıtılmasını önlemektedir. Risk/fırsat düzeyinin belirlenmesinde uyum skoru (0–1) temel alınmış; düşük uyum skorları risk kategorilerine, yüksek uyum skorları fırsat kategorilerine karşılık gelecek şekilde eşiklendirme yapılmıştır. Eşik değerleri ve yorum kuralları EK-5'te tablolaştırılmıştır; böylece farklı değerlendiriciler arasında tekrarlanabilirlik artırılmıştır.

Bu çalışmada, üç farklı alanın uzmanından projeye ait ölçülendirilmiş teknik çizimleri inceleyerek, EK-2'de tanımlanan UD kodlarına karşılık gelen sorulara 0 (kısıtlı) ile 1 (kapsayıcı) arasında puan vermesi istenmiştir. Her alt gösterge için verilen üç puanın aritmetik ortalaması alınmış ve oluşan ortalama değer, farklı risk düzeylerine dönüştürülmüştür: 0.00–0.20 = çok yüksek risk, 0.21–0.40 = yüksek risk, 0.41–0.60 = orta risk, 0.61–0.80 = düşük risk, 0.81–1.00 = çok düşük risk (yüksek fırsat). Ölçüyle doğrudan doğrulanamayan veya ürünün niteliği gereği değerlendirme dışı kalan maddeler NA işaretlenmiştir; bu kapsamda, ürünün doğrudan yazılı metin içermemesi nedeniyle UD3c, UD3d, UD4a, UD4c göstergeleri NA olarak girilmiştir. Uzman görüşleri ile hazırlanan sezgisel kontrol listesi EK-5'te paylaşılmıştır.

Çoklu uzman değerlendirmesinde ±0,50'yi aşan ayrışmalarda kısa bir uzlaşı turu yürütülerek tek bir nihai değer belirlenmiştir. Bu ortalamalar, openLCA'da P_Usage sürecine aktarılırken faaliyet değişkeni olarak kullanım ömrü (87672 saat) ile ilişkilendirilmiş; her kaydın Comment alanlarında ölçüm ve varsayım notları, veri kalitesi (pedigree 1–5) puanları ile birlikte kaydedilmiştir. Böylece, üç uzmandan alınan puanlar tek bir sayısal UD puan setine dönüştürülmüş ve sonuçlar, S-LCA bulguları ile birlikte yorumlanmak üzere ürün sistemine entegre edilmiştir.

Modelleme yazılımında sosyal veri girişi süreç-temelli yürütülmüştür. Her süreç açılarak Social Aspects sekmesinde ilgili paydaş kategorilerinin altına gösterge seçilmiş, ham değer girilmiş, risk veya fırsat düzeyi işaretlenmiş ve faaliyet değişkeni atanmıştır. “Data quality” alanına pedigree puanları yazılmış; “Source/Comment” alanlarında ise sertifika kodları, ölçüm protokolleri, saha gözlem notları, standarda atıflar ve varsa varsayım notları belirtilmiştir.

Çizelge 5.1. Örnek Olay-1 için süreç–sosyal gösterge eşleşmesi

Süreç Adı	Girdiler / Sosyal Göstergeler
P_Wood Panel Production	Certified EMS (FSC), Embodied forest area footprint
P_Component Procurement	Tedarikçi firmalara ait sertifikalar, sendikalaşma, UD etkisi
P_Pre-Assembly	İş güvenliği (non-fatal accidents), çalışma süresi
P_Customer Approval	Kullanıcı geri bildirimi, UD ile ilişkili göstergeler
P_Disassembly	Riskli işler için iş güvenliği, iş kazası verileri
P_Painting	VOC maruziyeti (uçucu organik bileşikler), PPE mevcudiyeti, iş güvenliği
P_Module Assembly	İş kazası oranları, kadın iş gücü, haftalık çalışma süresi
P_Packaging	Ergonomi, fiziksel efor gereksinimi (UD ilke 6)
P_Transfer	Lojistik sağlayıcıların sendikalaşma / sertifika durumu
P_Usage	Tüm UD göstergeleri, kullanıcıyla etkileşim

Çizelge 5.1’de Örnek Olay-1 için süreç–sosyal gösterge eşleşmesi sunulmuştur. Bu kapsamda P_Wood Panel Production-TR sürecinde tedarikçinin FSC Zincir-İzleme (CoC) sertifikası doğrulanmış ve “Sorumlu hammadde tedariki / orman sertifikasyonu (FSC)” göstergesi altında yüksek fırsat düzeyiyle kaydedilmiştir. Evrensel Tasarım (UD) göstergeleri kullanım evresine özgüdür; bu nedenle modellemede P_Usage sürecinde değerlendirilmiş, her bir ilke ve ilgili alt göstergeler için uyum skorları atanmıştır. Bu skorlar, tanımlı eşik kurallarıyla risk/fırsat düzeylerine dönüştürülmüş; faaliyet değişkeni olarak hizmet süresi kullanılmıştır. P_End of Life safhasında kullanıcı etkileşimi bulunmadığından UD değerlendirmesi yapılmamış; bunun yerine geri dönüşüm/bertarafla ilişkili sosyal göstergeler (ör. kayıt dışı çalışma riski, İSG uygulamaları, atık yönetimi sertifikasyonları) ele alınmıştır. UD göstergelerinin dayanakları ISO 9241-210, ADA Standards, Universal Design Handbook ve DINED antropometri veri tabanıyla desteklenmiştir.

Arka plan veri setleri Ecoinvent v3.7.1'den seçilmiştir. Veri kümesi adlarında yer alan RER (Regional Europe) kısaltması Avrupa bölgesel pazar/üretim karışımını, RoW (Rest of World) ise dünya geneli temsilini belirtmektedir. Bu çalışmada mümkün olan yerlerde RER tercih edilmiş, bölgesel temsil bulunmadığında RoW kullanılmıştır. Sistem modeli düzeyinde Cut-off yaklaşımı esas alınmıştır. Bu yaklaşımda geri kazanılmış/ikincil malzemeler yeni ürün sistemine sıfır yükle girer (recycled content varsayımı) ve ilk ürün sistemi geri dönüşüm kredisi almaz; buna karşılık atık bertaraf süreçlerinin yükleri atığı üreten ürün sistemine tahsis edilir. Taşıma, enerji ve malzeme arka plan zincirleri bu varsayımla tutarlı biçimde bağlanmıştır. SLCA çıktıları doğrudan sistem modeli seçimiyle hesaplanmamakla birlikte, arka plan akışlarının coğrafi/teknolojik temsili ve ölçekleme değişkenleri üzerinden dolaylı etkilenebildiğinden, seçilen veri setleri (RER/RoW) ve Cut-off varsayımı metin içinde açıkça beyan edilmiştir. Bu bağlamda RER/RoW ayrımı, UD dışındaki tedarik/üretim göstergelerinde coğrafi uygunluk puanlarına (pedigree) da yansıtılmıştır.

Uygulamada, süreç–gösterge eşleşmeleri P_Wood Panel Production, Component Procurement, Pre-Assembly, Customer Approval, Disassembly, Painting, Module Assembly, Packaging, Transfer ve End of Life zinciri boyunca oluşturulmuş ve EK-3'teki girdilerle birlikte kaydedilmiştir. Öznel puanlamanın kaçınılmaz olduğu UD göstergelerinde değerlendirici önyargısını azaltmak üzere, mümkün olan durumlarda çift puanlama/uzlaşı yöntemi uygulanmış; eşik değerlerinin ±0,05–0,10 aralığında duyarlılık analizi yapılarak risk kategorilerindeki olası geçişlerin sonuçlara etkisi incelenmiştir. Ayrıca para temelli normalizasyon (örneğin ha/$) içeren göstergelerde, LCC ile karışmayı ve döviz kuru kaynaklı ölçek sapmalarını önlemek amacıyla yıl ve kur bilgisi sabitlenmiş, tercihen fiziksel tabanlı (ha/kg ya da ha/FU) gösterime dönüştürme notu metne eklenmiştir.

Sonuç olarak, sosyal verilerin işlenmesi; paydaş temelli göstergelerin uygun faaliyet değişkeniyle ilişkilendirilmesi, risk/fırsat düzeyinin açık kurallarla türetilmesi, veri kalitesinin pedigree ile belgelenmesi ve tüm kayıtların EK-3/EK-4 ile çapraz referanslanması yoluyla yürütülmüştür. Bu yaklaşım, hem kullanıcı deneyimini merkeze alan UD göstergelerinin hem de tedarik–üretim zincirine ait klasik sosyal göstergelerin aynı ürün sistemi içinde tutarlı ve tekrarlanabilir biçimde değerlendirilmesine olanak vermekte; çevresel (LCA) ve ekonomik (LCC) çıktılarla birlikte yorumlandığında çalışmanın bütüncül sürdürülebilirlik analizini güçlendirmektedir.

5.3. Etki Değerlendirme

Bu bölümde yaşam döngüsü etki değerlendirmesi (LCIA), tanımlı bir referans ürün akışına dayalı ürün sistemi üzerinde yürütülmüş ve arka plan verileri ecoinvent 3.7.1 (cut-off, unit) modeline bağlanmıştır. Bu tercih, süreç düzeyinde izlenebilirliği korurken, geri dönüşüm ve kullanım sonu aşamalarında cut-off şemasının gerektirdiği muhasebe mantığını tutarlı biçimde sağlamaktadır.

Çevresel LCIA'da ana yöntem ReCiPe 2016 Midpoint (H)'tir. Mobilya bağlamında ahşap bazlı malzemeler, reçine/kaplama kimyası, enerji karması ve lojistik, orta-nokta göstergelerinde farklı duyarlılıklar üretir. ReCiPe'nin Hierarchist (H) perspektifi, kabul görmüş karakterizasyon faktörlerini kullanmakta ve göstergeleri tutarlı bir set olarak sunmaktadır. Envanter akışları, seçilen yöntem kapsamında etki kategorilerine sınıflandırılmış ve karakterizasyon faktörleriyle çarpılarak kategori bazlı sonuçlara dönüştürülmüştür. ReCiPe'nin seçilmesinin iki temel nedeni vardır. İlki, CML 2001, TRACI 2.1, ILCD 2011 ve EF 3.1 gibi yöntemlere kıyasla arazi kullanımı, toksisite ve iklim/oksidant/partikül göstergelerini aynı metodolojik aile içinde tutarlı biçimde sunmasıdır. İkincisi, Türkiye bağlamında erişilebilen RER/RoW arka plan verileriyle geniş kapsamlı eşleme olanağı sağlamasıdır.

Sosyal boyutu görünür kılmak için Social Impacts Weighting Method (SIWM) kullanılmıştır. SIWM, tedarik zincirindeki sektör-ülke risk profillerini çalışma saatleri gibi etkinlik değişkenleriyle ölçeklendirerek medium risk hours cinsinden skor üretir. Bu çalışma, SIWM sonuçlarını çevresel göstergelerle toplulaştırmamakta; karar destek için ayrı bir eksen olarak raporlamaktadır.

Örnek olayın tasarım odaklı niteliği nedeniyle Universal Design Assessment (UDA) başlığı altında, Evrensel Tasarım ilkelerini yansıtan bir performans endeksi geliştirilmiştir. UDA, çevresel LCIA ile aynı düzlemde olmadığından süreç envanterine zaman temelli girdiler ve tasarım karar noktalarına bağlanan parametreler olarak yerleştirilmiştir. Bu çalışmada UDA çıktıları, SIWM sonuçlarıyla ortak bir ölçeğe dönüştürülerek birleştirilmiş ve tek bir sosyal performans göstergesi olarak raporlanmıştır.

Modelleme tercihleri sonuçları doğrudan etkilediği için açıkça belirtilmiştir. Cut-off (unit) yaklaşımı, geri kazanım faydalarını aşağı akışa bırakır; bu çalışmada toplama/ayırma/arıtım yükleri hesaba dâhil edilmiştir. Bağlantılarda prefer default providers ilkesi izlenmiş, birden çok sağlayıcı adayı bulunan akışlarda bölgesel bağlama en yakın pazar süreçleri (çoğunlukla RER, gerektiğinde RoW) seçilmiştir. Taşımalar kg·km biriminde "market for transport" süreçleri üzerinden; elektrik girdileri düşük gerilim pazar karması ile modellenmiştir.

Hesaplamalar tekrarlanabilir bir iş akışıyla yürütülmüştür. Bağlama ve kontrol aşamalarında Lazy/On-demand hesaplama ile tutarlılık sağlanmış; nihai tablolar ve görselleştirmeler için Eager/All hesaplama uygulanmıştır. Ürün sistemi modelinde açık uçların düzenli taranması ve sağlayıcı uyumsuzluklarının giderilmesi sonuçların doğruluğunu artırmıştır.

Sonuç olarak, ReCiPe Midpoint (H) kullanımı, malzeme-kimya-enerji üçgeninde ortaya çıkan çok boyutlu çevresel baskıları ve su kıtlığı duyarlılığını aynı anda görünür kılmakta; SIWM ve UDA eksenleri ise sosyal ve kapsayıcı tasarım boyutlarını karar destek perspektifine dâhil etmektedir. Bu yapı, örnek olayın sonraki bölümünde sunulacak sayısal bulguların hem kategori düzeyinde hem de süreç katkıları bağlamında tutarlı biçimde yorumlanmasına olanak sağlayacaktır.

5.3.1. Çevresel bulgular

Bu alt bölüm, ReCiPe 2016 Midpoint (H) yöntemiyle elde edilen karakterizasyon sonuçlarının sunumuna ayrılmıştır. Hesaplamalar, cut-off (unit) sistem modeline dayalı arka plan veri setleriyle ve fonksiyonel birim olarak 1 takım mutfak dolabı üzerinden yürütülmüştür.

Çizelge 5.2.'de, ReCiPe 2016 Midpoint (H) yöntemi kullanılarak hesaplanan çevresel etki analiz sonuçlarını özetlemektedir. Bu yöntem, ürünün yaşam döngüsü boyunca (hammadde tedariki, üretim, kullanım ve atık yönetimi aşamaları dahil) çeşitli etki kategorilerindeki yükleri nicel olarak değerlendirmektedir. Sonuçlar, fonksiyonel birim başına eşdeğer birimlerde ifade edilmiştir.

Çizelge 5.2. Örnek olay-1 için çevresel etki kategorisi sonuçları

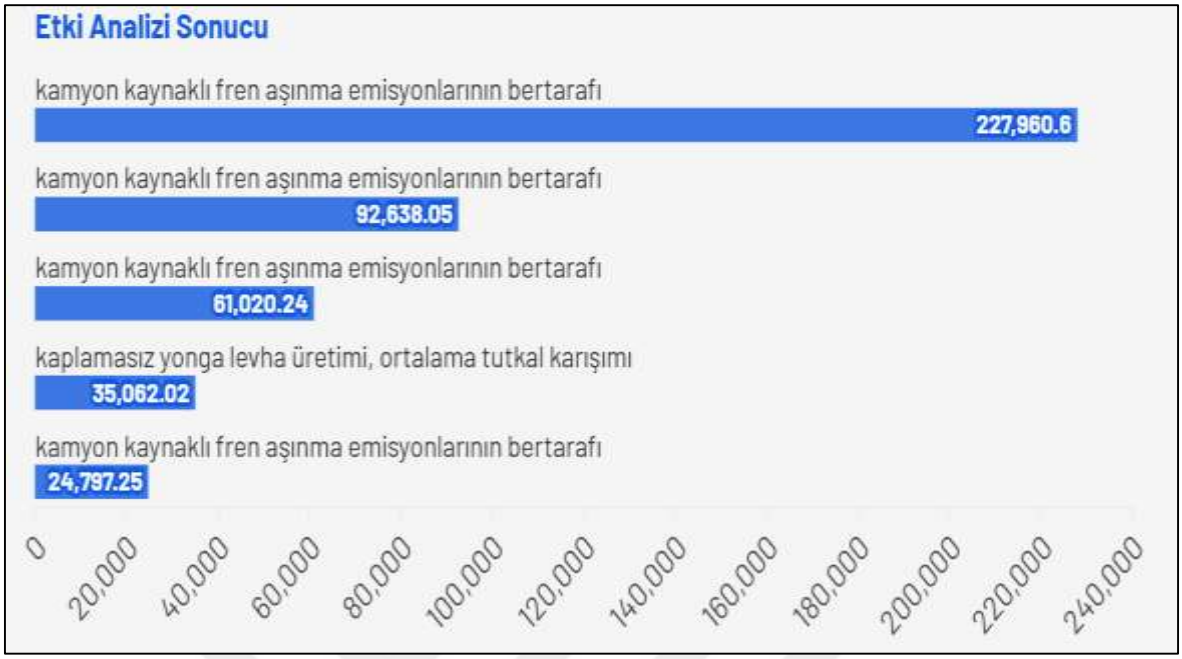
ReCiPe 2016 Midpoint (H) Etki Kategorisi	Etki Analizi Sonucu	Birim
Arazi Kullanımı	123001,78	m2*a crop-Eq
Asidifikasyon: Karasal	341,23	kg SO2-Eq
Ekotoksisite: Deniz	3664,90	kg 1,4-DCB-Eq
Ekotoksisite: Karasal	555327,53	kg 1,4-DCB-Eq
Ekotoksisite: Tatlı su	2499,70	kg 1,4-DCB-Eq
Enerji kaynakları: yenilenemez, fosil	61682,33	kg oil-Eq
Fotokimyasal oksidan oluşumu: insan sağlığı	873,08	kg NOx-Eq
İklim Değişikliği	79686,74	kg CO2-Eq
İnsan toksisitesi: kanserojen	18475,66	kg 1,4-DCB-Eq
İnsan toksisitesi: kanserojen dışı	125838,65	kg 1,4-DCB-Eq
İyonlaştırıcı radyasyon	17986,74	kBq Co-60-Eq
Maddi kaynaklar: metaller/mineraller	444,76	kg Cu-Eq
Ozon tabakasının incelmesi	0,05	kg CFC-11-Eq
Ötrofikasyon: deniz	15,57	kg P-Eq
Ötrofikasyon: tatlı su	57,62	kg P-Eq
Partikül madde oluşumu	136,70	kg PM2.5-Eq
Su kullanımı	3677,93	m3

Özellikle karasal ekotoksisite, insan toksisitesi kanserojen dışı ve iklim değişikliği kategorilerinde yüksek değerler gözlenmekte olup, bu alanlar öncelikli iyileştirme fırsatlarını işaret etmektedir. Arazi kullanımı ve fosil enerji kaynakları gibi kategoriler de önemli çevresel sıcak noktaları temsil eder. Bu bulgular, sürdürülebilirlik stratejilerinin odaklanması gereken kritik süreçleri (örneğin, taşımacılık, malzeme seçimi ve enerji tüketimi) vurgulamaktadır. Tablodaki göstergeler farklı birimlerle raporlanmaktadır (ör. kg CO_2-eq, kg 1,4-DCB-eq, $m^2 \cdot$yıl crop-eq, kg oil-eq, m^3). Dolayısıyla kategoriler arası sayısal büyüklükler doğrudan karşılaştırılamaz; bütüncül kıyaslama için sonuçların normalizasyon (ve gerekiyorsa ağırlıklandırma) yoluyla birimsiz ölçeğe taşınması gereklidir.

İzleyen alt başlıklar, ReCiPe 2016 Midpoint (H) kapsamındaki her etki kategorisini kısaca tanımlamakta ve model çıktılarında o kategoriye en çok katkı yapan ilk beş akışı sıralayıp yorumlamaktadır. Değerler kategoriye özgü birimlerde raporlandığı için değerlendirme kategori içi yapılmıştır; kategoriler arası önceliklendirme ise 5.3.4'te açıklanan normalizasyon adımıyla ele alınacaktır.

Karasal ekotoksisite

ReCiPe 2016 Midpoint (H) kapsamında karasal ekotoksisite göstergesi, toprak ekosistemlerinde toksik maruziyet potansiyelini kg 1,4-diklorobenzen eşdeğeri cinsinden ifade eder. Şekil5.4.'te karasal ekotoksisite kategorisine en çok etki eden ilk beş akış verilmiştir.



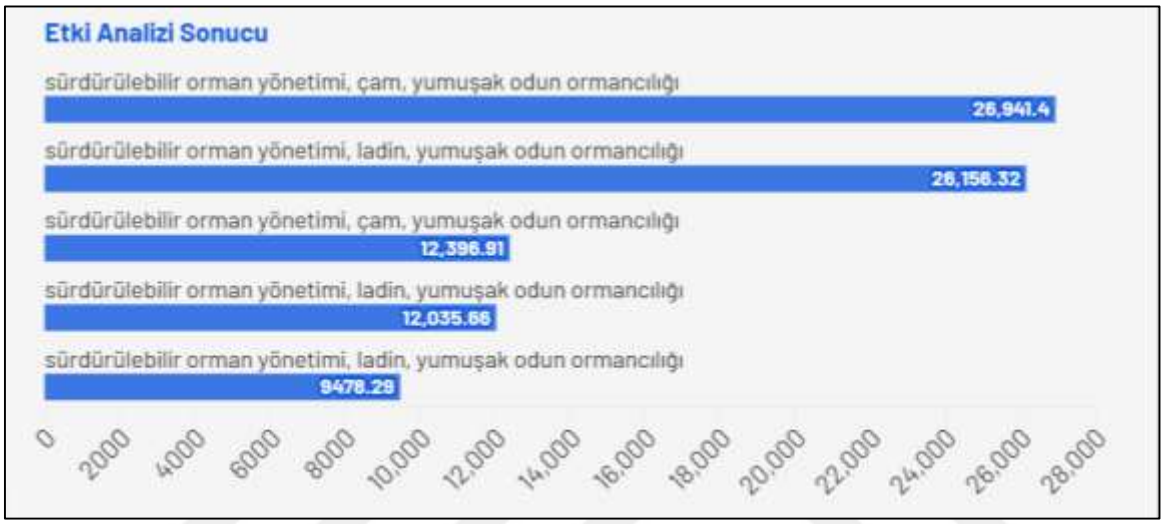
Şekil 5.2. Örnek olay-1 için karasal ekotoksisteye en çok etki eden 5 akış

Şekil 5.2.'de sunulan sonuçlar, toplam yükün belirgin biçimde karayolu taşımacılığına özgü fren aşınması emisyonları tarafından belirlendiğini göstermektedir. Grafikte en yüksek üç katkı, farklı "kamyon kaynaklı fren aşınma emisyonlarının bertarafı" süreçlerine aittir ve birlikte toplam etkinin büyük kısmını açıklamaktadır. Bu süreçler, ağır vasıta fren balatalarından çevreye saçılan bakır, çinko, antimon ve benzeri metal-zengin partiküllerin yol kenarı topraklarına transferini ve buna bağlı toksik etkileri temsil etmektedir. Bulgular, ürün sisteminin yaşam döngüsü içinde karayolu taşımalarının bu kategori üzerinde belirleyici bir etken olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

İkinci düzeyde bir katkı, yonga levha (particleboard) üretimi zincirinden gelmektedir. Bu katkı, doğrudan levha üretiminden çok, arka plan enerji arzı ve yan ürün/atık yönetimi (örneğin kül akımlarının arazi uygulaması) üzerinden toprağa taşınan metal içerikli akımların bir bileşkesi olarak okunabilir. Bununla birlikte, panel zincirinin katkısı fren aşınmasına kıyasla sınırlı kalmaktadır. Bu da iyileştirme önceliğinin süreç içi imalat operasyonlarından ziyade lojistik mimarisi ve taşıma teknolojisi üzerinde yoğunlaşması gerektiğine işaret eder.

Arazi kullanımı

İkinci büyük yük, ürünün orman bazlı malzeme talebinin bir sonucudur. ReCiPe'nin m^2·yıl crop-eq göstergesi doğrudan "biyoçeşitlilik kaybı"nı değil, alan-zaman işgalini ölçmektedir. Dolayısıyla sonuç, sistemin tedarik ettiği bakir lif miktarı ve malzeme verimliliği (kesim fireleri, panel reçine oranı vb.) ile yakından ilişkilidir.

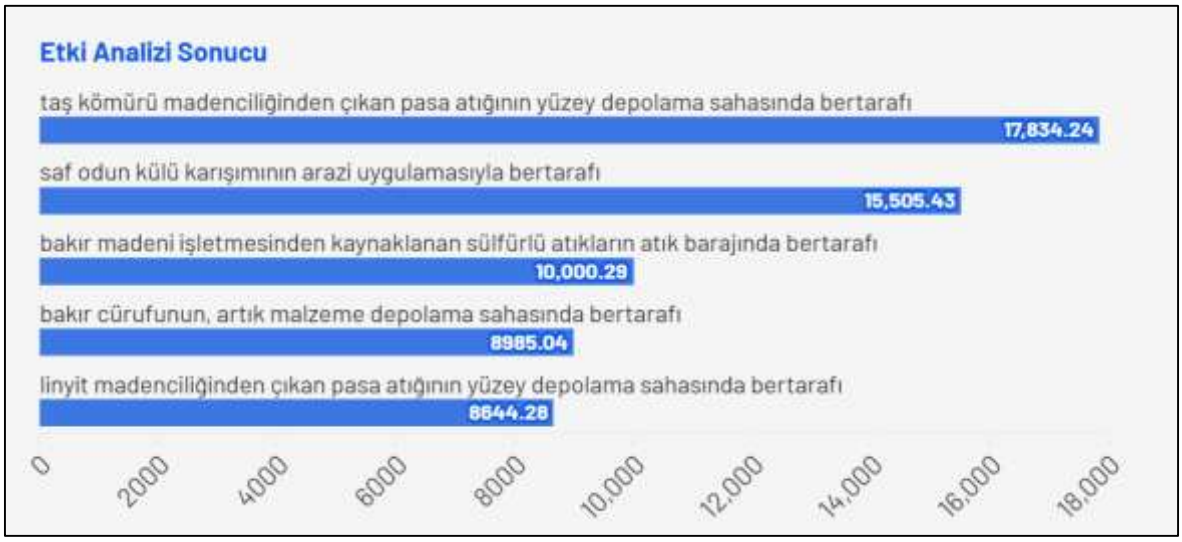


Şekil 5.3. Örnek olay-1 için arazi kullanımına en çok etki eden 5 akış

ReCiPe 2016 Midpoint (H) sonuçları, ürün sisteminin arazi kullanımı etkisinin ağırlıkla orman kökenli ham odun girdilerinden kaynaklandığını göstermektedir. Toplam etki yaklaşık 1.28×10^5 m^2·yıl crop-eq düzeyindedir; şekil 5.3.'te verilen grafikte ilk beş akım birlikte toplamın yaklaşık %65–70'ini oluşturmakta, kalan %30–35'lik kısım ise panel üretim zinciri boyunca dağılan daha küçük paylı odun/ara akımlar ile az sayıdaki yardımcı girdiden gelmektedir. Bu profil, bakir lif talebinin (MDF/MFC vb. panel bileşenleri) arazi işgali göstergesinde belirleyici olduğunu, buna karşılık imalat operasyonları, lojistik ve kimyasal yardımcı maddelerin bu kategoride ikincil kaldığını ortaya koymaktadır.

İnsan toksisitesi (kanserojen olmayan)

Kanser dışı toksisite yine kg 1,4-DCB eşdeğeri olarak raporlanmaktadır. Grafikte en büyük katkının linyit madeni döküntülerinin yüzey depolanması, ardından odun külü karışımının arazi uygulaması ve taşkömürü madeni döküntülerinin depolanması olduğu görülür. Bunları bakır madenciliğinden kaynaklı sülfitli artığın (tailings) baraj depolaması izler.



Şekil 5.4. Örnek olay-1 için insan toksisitisine (kanserojen olmayan) en çok etki eden 5 akış

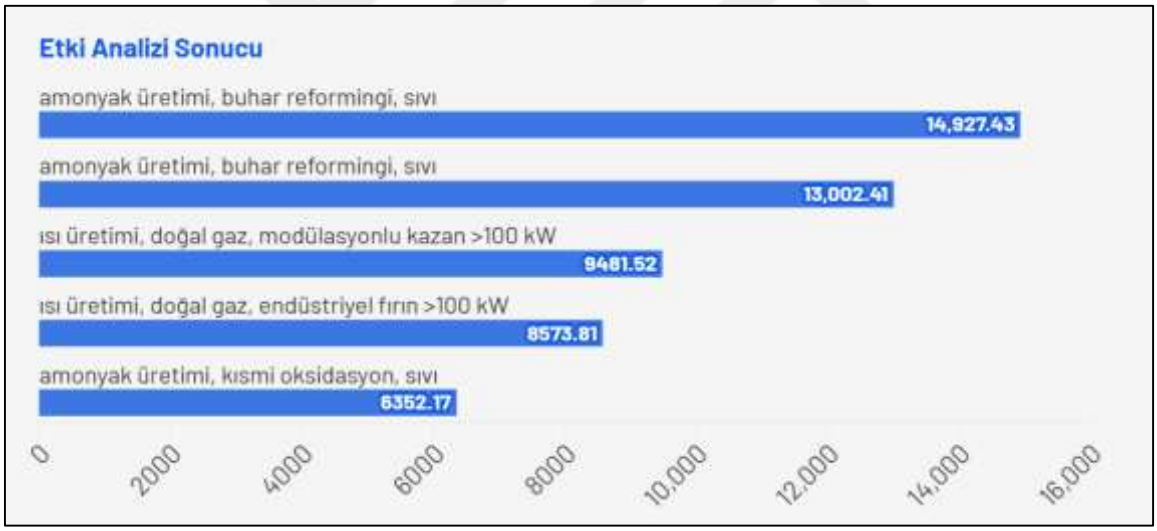
Şekil 5.4.'te gösterilen alt kategoriler sistemde anlamlı bir düzeydedir ve yük büyük ölçüde üç kaynaktan beslenmektedir. İlk olarak, çelik tedarik zincirine özgü elektrik ark ocağı (EAF) cürufu ve diğer yan ürünlerin depolanması/işlenmesi, ağır metal sızıntıları ve ince partikül taşıyıcılığı yoluyla toksisite göstergelerini yükseltmektedir. İkinci olarak, kömür ve linyit tabanlı enerji zincirinin "spoil/ash" akımlarının yüzeyde depolanması, metal ve metaloidlerin toprak-su ortamına geçişi nedeniyle hem kanserojen hem kanser-dışı bileşenlerde belirgin katkı oluşturmaktadır. Üçüncü olarak, üre-formaldehit reçineleri ve kaplama sistemlerinin arka plan üretimi, aldehitler ve aromatik/halojenli ara kimyasallar üzerinden toksisite envanterine ilave yük taşımaktadır. Bu desen, sonuçların yalnızca sahadaki imalat adımlarına değil, donanım/aksesuar metalleri ile reçine/kaplama kimyasallarının arka plan süreç kalitesine yüksek duyarlılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Öncelikli azaltım stratejileri: (i) Malzeme tedariki için EPD/üçüncü taraf doğrulamalı, düşük emisyon profilli çelik ve metal üreticilerine geçiş; cürufun depolama yerine ikincil inşaat malzemesi olarak değerlendirilmesini şart koşmak. (ii) Enerji karmasında kömür/linyit payını düşürmek, kül ve döküntü akımlarında kontrollü bertaraf ve sızıntı yönetimini (kaplama, sızdırmazlık, sızıntı suyu arıtımı) belgelemek. (iii) Kimyasal bileşenleri düşük formaldehit emisyon sınıfı (E0/E1), düşük-VOC ve/veya biyobazlı formülasyonlara kaydırmak; reçine/kapsam tüketimini proses optimizasyonu ile azaltmaktır. Bu üç müdahale

hattı birlikte ele alındığında, her iki toksisite alt kategorisinde de anlamlı düşüş sağlanması beklenir.

İklim değişikliği

İklim değişikliği göstergesi sera gazlarının ışınımsal zorlamaya katkısını kg CO_2-eq olarak toplayarak göstermektedir. Karakterizasyon faktörleri IPCC temellidir; kısa/uzun ömürlü bileşenler ortak bir iklim etkisine indirgenir. Elektrik karması (düşük/orta gerilim pazarları), panel/kimyasal üretimindeki ısı ve buhar, uzun mesafe karayolu ve demiryolu taşımaları başlıca sürücülerdir. Boya/astar ve PVC kantitatif olarak küçük görünse de upstream enerji yoğun üretimleri nedeniyle katkı verebilir. Biyojenik karbon stoklanması ReCiPe midpoint'te doğrudan kredilenmez; EoL yanma/ayrışma varsayımları yorumlamada ayrıca belirtilmelidir.



Şekil 5.5. Örnek olay-1 için iklim değişikliğine en çok etki eden 5 akış

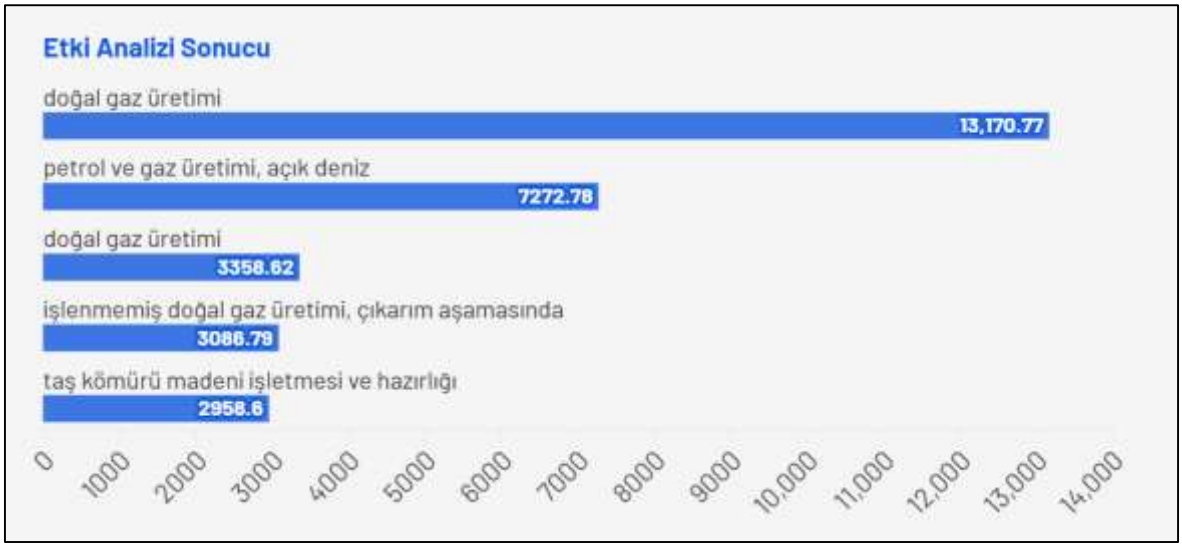
Şekil 5.5.'te verilen iklim değişikliği sonuçları, örnek olayın toplam sera gazı yükünün ağırlıklı olarak kimyasal ara ürünlerin üretimi ve ısıl enerji arzı kaynaklı olduğunu göstermektedir. En büyük beş katkı, grafikte görüldüğü üzere, sırasıyla şu arka plan süreçlerinden gelmektedir:

- Amonyak üretimi: Amonyak, üre reçinesi zincirinin temel girdisidir; doğal gaz bazlı reforming nedeniyle hem süreç içi CO_2 emisyonları hem de yakıt/elektrik gereksinimi yüksektir.
- Doğal gazdan ısı üretimi: Panellerin ve boyanın arka plan üretiminde, ayrıca kimya sektöründe yaygın ısıl enerji kullanımı, CO_2 yoğun bir profil oluşturur.
- Üre üretimi: amonyak + CO_2 senteziyle oluşan üre, MDF/MFC bağlayıcı reçine zincirinin doğrudan sürücüsüdür. Bu akım, yukarı akış emisyonlarını sisteme taşır ve toplam etki içinde kayda değer bir pay alır.

Grafikteki sütunların net toplamı pozitif bir iklim yükünü ifade eder; negatif (kaçınılan) bir çubuk bulunmamaktadır. Bu, EoL'deki yanma veya enerji geri kazanım kredilerinin ReCiPe midpoint'te bu sistem sınırlarında dikkate alınmadığını; cut-off şemasında geri kazanım faydalarının aşağı akışa bırakıldığını göstermektedir.

Enerji kaynakları: yenilenemez, fosil:

Fosil yakıt kullanımını "Kg oil-eq" bazında gösterir. Etkenler doğal gazın çıkarım-işleme-iletim zinciri ile off-shore petrol/gaz üretimi tarafından belirlenmektedir. Bu, hem ısıl proseslerin (kurutma/pres/kaplama kürleme) yakıt bağımlılığını hem de reçine/kimyasal girdilerin fosil kökenli ham maddelere dayandığını göstermektedir. Daha alt sıradaki kömür madenciliği katkısı da enerji karmasıyla tutarlıdır.



Şekil 5.6. Örnek olay-1 için fosil yakıtların tükenmesine en çok etki eden 5 akış

Azaltım için öncelikler; ısı talebinin düşürülmesi (ısı geri kazanımı, proses optimizasyonu), elektrifikasyon ve yenilenebilir elektrik, biyobazlı/ düşük fosil içerikli reçine ve kaplama sistemlerine geçiş ve lojistikte modal kaydırma/rota optimizasyonudur. Bu kategoride yapılan her enerji verimliliği müdahalesi, iklim değişikliği göstergesinde de eşzamanlı fayda üretmektedir.

İyonlaştırıcı radyasyon

İyonlaştırıcı radyasyon, radyolojik etkinin potansiyelini kBq Co-60 eşdeğeri olarak vermektedir. Grafik, ilk iki katkının uranyum cevheri öğütme artığı (tailing) arıtımı/bertarafı ile ilişkili olduğunu göstermektedir.



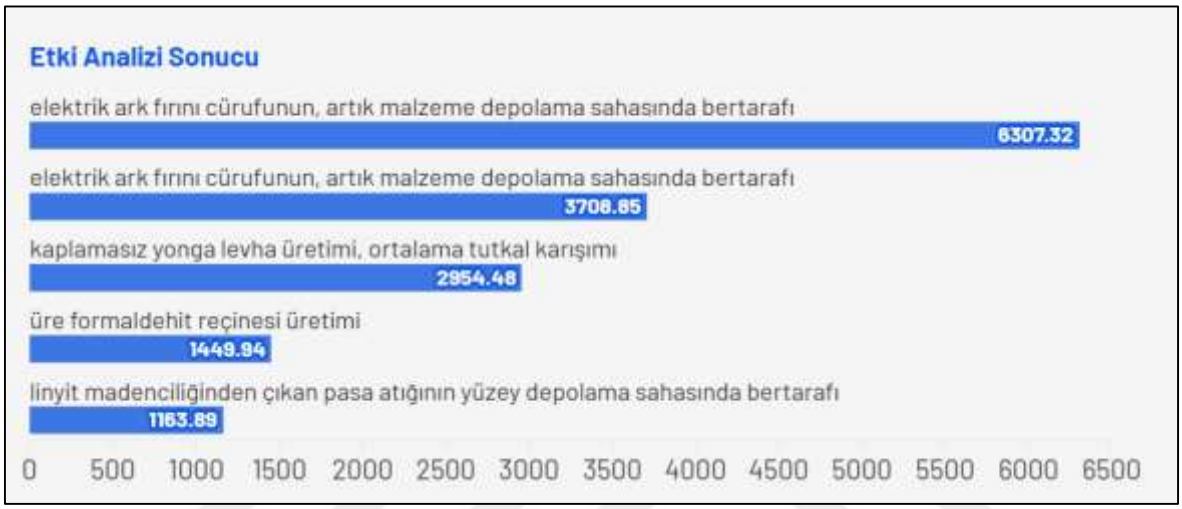
Şekil 5.7. Örnek olay-1 için iyonlaştırıcı radyasyona en çok etki eden 5 akış

Her iki kategori sistem profilinde ikincil önemdedir. Radyasyon yükü, elektrik karmasındaki nükleer pay ve nükleer yakıt çevrimi süreçlerinden; ozon tükenmesi ise çoğunlukla nitrik asit ve doğal gaz uzun mesafe iletim zincirlerindeki düşük ama ölçülebilir ODP'li akımlardan kaynaklanır. Her iki kategori, izleme amaçlı raporlanmakla birlikte öncelikli müdahale alanı değildir.

İnsan toksisitesi (kanserojen)

Bu gösterge, kanser riskiyle ilişkili kimyasal maruziyetleri kg 1,4-DCB-eq cinsinden toplamaktadır. Ağırlıklı olarak metal kökenli kirleticiler ile aromatik/halojenli ara kimyasalların salımlarına duyarlıdır. Şekil 5.10'da verilen grafikte ilk iki katkı çelik tedarik

zincirine ait yan ürünlerin (özellikle elektrik ark ocağı cürufu) depolanması ve bertarafından kaynaklanmaktadır. Cürufun yüzey/yer altı suyu ile temasında Cr(VI), Ni, V gibi kanserojen karakterli metallerin sızma potansiyeli bu kategoriyi büyütür. Bunu, yonga-levha/particleboard üretimi (uncoated; ortalama yapıştırıcı karışımı) ve üre-formaldehit (UF) reçinesi üretimi izler; burada yük, panel zincirinin UF reçine içeriği, nitrik asit/amin kimyası ve ısıl enerji gereksinimi üzerinden arka plan envanterine taşınmaktadır.



Şekil 5.8. Örnek olay-1 için insan toksisitesi: kansorejene en çok etki eden 5 akış

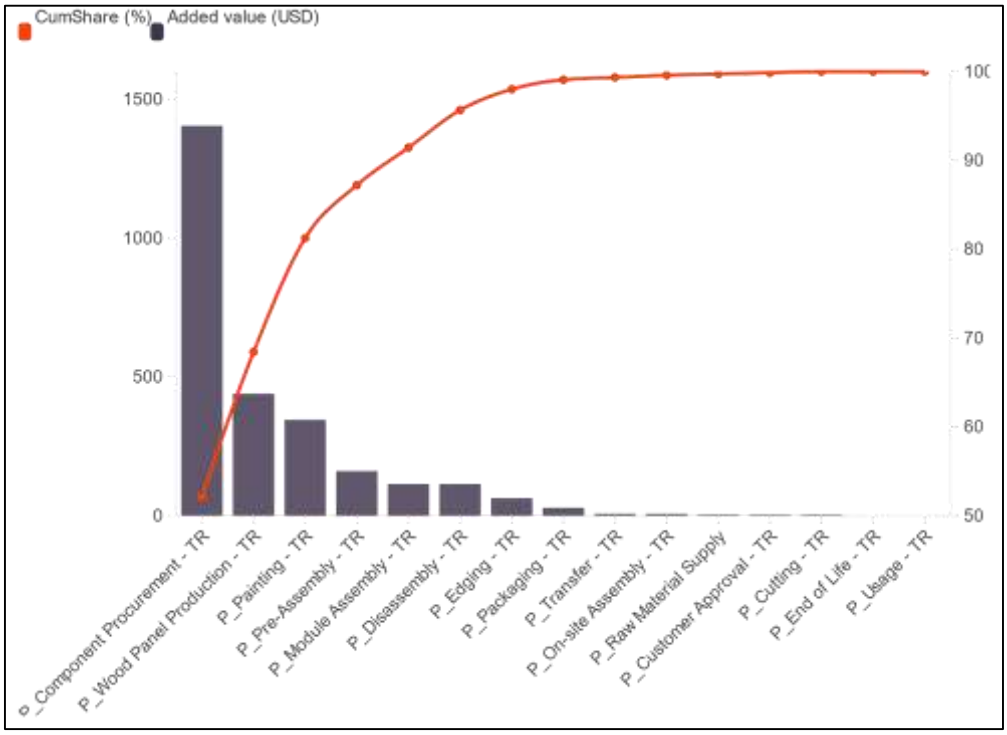
Listede yer alan linyit maden döküntülerinin yüzey depolanması ise elektrik ve ısı temininde kömür/linyit zincirinin atık akımlarını temsil eder. Sonuç olarak kanserojen toksisitede iki ana sürücü öne çıkar: (i) donanım/aksesuar metallerine bağlı çelik üretimi ve cüruf yönetimi ve (ii) panel–reçine kimya zinciridir.

Sonrasında yer alan kategoriler, sistemde ikincil ancak tutarlı bir yük profili sunmaktadır. Deniz ötrofikasyonu (kg N-eq) ağırlıkla azotlu kimya zinciri (özellikle üre/MDI) ve kömür-linyit madenciliği döküntülerinden gelen N türleriyle yükselir; kimyasal reçetenin N yükünü azaltmak ve kömür payını düşürmek etkilidir. Deniz ekotoksisitesi (kg 1,4-DCB-eq) bakır madenciliği tailings barajları ve kömür döküntü depolamasıyla sürüklenir; metal kütlesini düşürmek, geri dönük içerik oranını artırmak ve sorumlu madencilik uygulamalarına yönelmek önerilir. Stratosferik ozon tükenmesi (kg CFC-11-eq) düşük düzeydedir; katkılar nitrik asit ve doğal gaz iletim zincirinden gelir, düşük-ODP tedarik öncelenmelidir. Ozon oluşumu (kg NOx-eq) NOx/VOC emisyonlarına duyarlı olup dizel taşımacılık ve ısıl proseslerden beslenir; elektrifikasyon, düşük-NOx teknolojiler ve düşük VOC kaplamalar

ile modal kaydırma etkilidir. Mineral kaynak kıtlığı (kg Cu-eq) arka plan madencilik süreçlerine bağlıdır; malzeme verimliliği, parça sadeleştirme ve yüksek geri dönük içerikle düşürülebilir. Bu kategoriler genel olarak enerji karmasının karbondan arındırılması, metal/kimyasal tedarikinde izlenebilirlik ve lojistikte emisyon yönetimi eksenlerinde aynı yönlü iyileşme gösterir.

5.3.2. Ekonomik bulgular

Bu alt bölümde, ürün sistemine ilişkin yaşam döngüsü maliyetlendirmesi (LCC) sonuçları süreç düzeyinde yorumlanmaktadır. Analiz, openLCA'da Costs çıktısı ve Direct (foreground) katkı görünümü esas alınarak yürütülmüştür. böylece arka plan veri tabanındaki varsayılan fiyatlar (pazar fiyatları, gömülü maliyetler) yerine, modelde tanımlanan işçilik, malzeme ve taşıma kalemleri üzerinden belirlenen doğrudan maliyetler öne çıkarılmıştır. Para birimi tekilleştirilmiş, ürün sistemleri arasında fonksiyonel birim aynı tutulmuştur. Çok çıktılı süreçlerde, maliyetlerin yan ürünlere fiktif aktarımını önlemek için süreç-içi tahsis seçenekleri "as defined in processes"/uygun tahsis ile sınanmış; referans ürün geliri modele dâhil edilmemiştir. Bu kurgu, tesis içi muhasebe ile uyumlu bir "ön plan" LCC okuması sağlamaktadır.



Şekil 5.9. Örnek Olay-1'e ait pareto grafiği

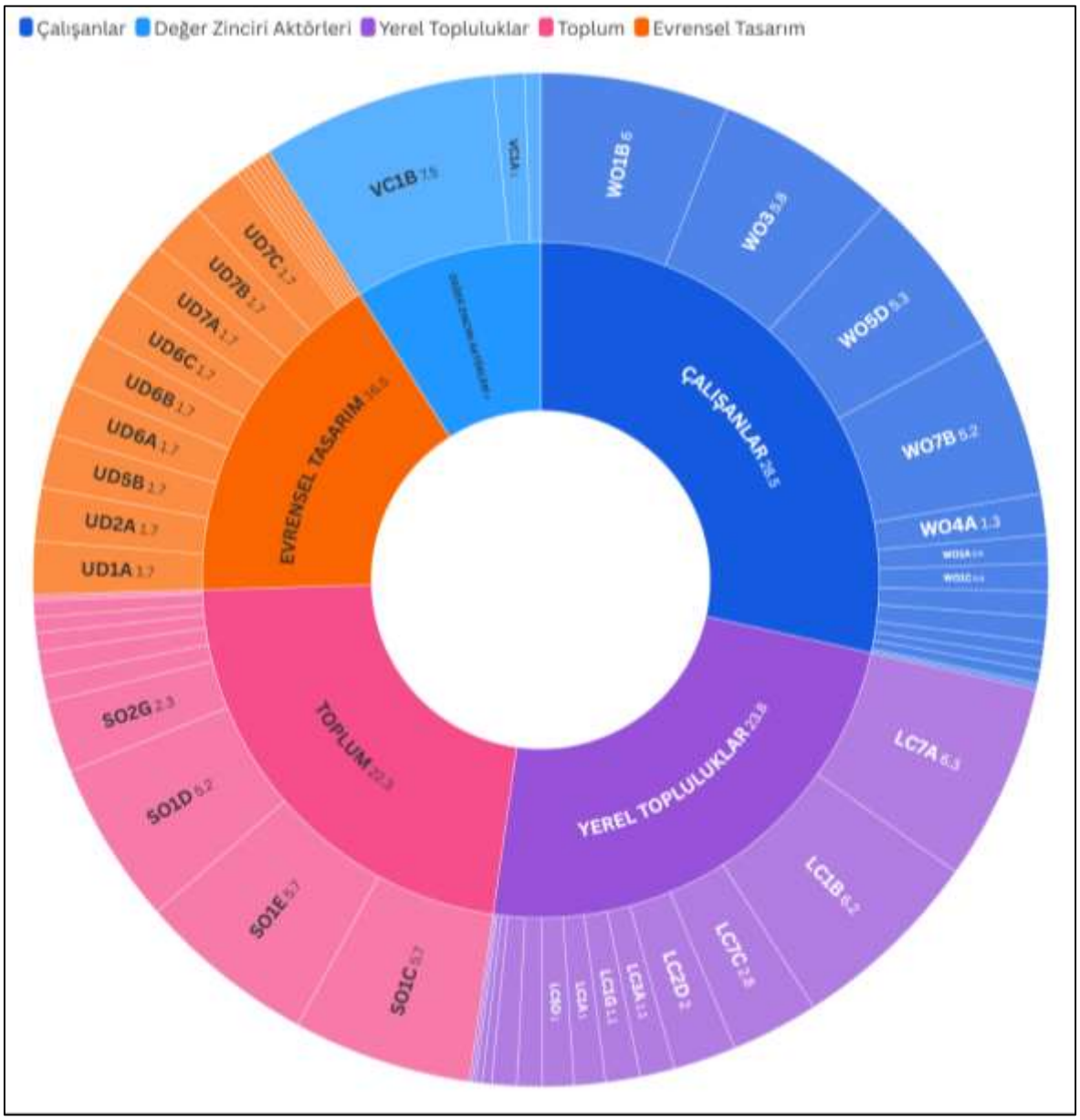
Şekil 5.9'daki Pareto grafiği, 1 takım mutfak dolabı için toplam eklenen maliyetin süreçlere dağılımını ve kümülatif payını göstermektedir. Sonuçlar tipik bir 80/20 desenindedir. Toplam maliyetin yaklaşık %90'ı ilk beş süreçte toplanır. Çok sayıdaki diğer süreç birlikte %10'dan daha az pay alır. En yüksek maliyet kalemi P_Component Procurement-TR'dir (bileşen/aksesuar tedariki). Tek başına toplamın yaklaşık %50'sini oluşturur. Bu durum, ray, menteşe, çekmece mekanizması ve bağlantı elemanı gibi metal yoğun ve birim fiyatı yüksek girdilerin LCC'de belirleyici olduğunu gösterir. İkinci sırada P_Wood Panel Production-TR (%16,3) yer alır. Buradaki maliyet, MDF/partikül levha ve yardımcı tahta ürünlerinde birim fiyat ile malzeme verimine (kesim fireleri) bağlıdır. Üçüncü sırada P_Painting-TR (%12,8) bulunur. Kaplama/astar sisteminde reçine ve solvent tüketimi ile transfer verimi temel etkenlerdir. Boyanın kg başına fiyatı ve VOC içeriği de birim maliyeti etkiler. P_Pre-Assembly-TR (%6) ve P_Module Assembly-TR (%4,2) dördüncü ve beşinci sıradadır. Bu iki süreçte maliyet daha çok yardımcı malzemeler ve atölye içi tüketimlerden kaynaklanır. Diğer süreçlerin (söküm, kenar bantlama, paketleme, transfer, saha montajı vb.) her biri 100 USD'nin altındadır. Kümülatif eğri %95 düzeyine ancak sekizinci–dokuzuncu süreçten sonra ulaşır.

Bu dağılım iki sonuca işaret eder. Birincisi, LCC profili esas olarak satın alınan girdiler (aksesuar, panel, kaplama) tarafından belirlenmektedir. Bu nedenle maliyet azaltımı için öncelik tedarik zinciri yönetimi ve malzeme verimi olmalıdır. İkincisi, işletme içi imalat adımları (ör. kenar bantlama, paketleme, saha montajı) toplam maliyet içinde ikincil kalmaktadır. Bu adımların iyileştirilmesi çevresel göstergeler açısından anlamlıdır; ancak LCC üzerindeki etkisi sınırlıdır.

5.3.3. Sosyal bulgular

Bu bölümde sosyal etki bulguları tedarik zincirindeki sosyal risklerin SIWM (Social Impacts Weighting Method) ile ağırlıklandırılmış göstergeler üzerinden değerlendirilmesi ile birlikte bu çalışmaya özel olarak geliştirilen UD etki göstergeleri bir arada değerlendirilmektedir. Bu değerlendirme için OpenLCA'da SIWM+UDA isimli yeni bir etki değerlendirme yöntemi geliştirilmiştir. SIWM, tedarik zincirindeki çalışma saatlerini (activity variable) ülke-/sektör-özel sosyal risk profilleri ile çarparak her bir gösterge için medium risk hours (mrh) cinsinden sonuç üretir. Yöntemde her gösterge için beş düzeyli bir risk sınıflaması (no/low/medium/high/very high) vardır; bu düzeylere artan şiddet katsayıları atanır ve

sonuçlar orta risk saatine eşdeğer (medrisk hour) bir ortak ölçekte toplanır. Böylece, farklı sosyal konular aynı ölçekte karşılaştırılabilir ve etki potansiyeli olarak tarama düzeyi bir sıcak-nokta (hotspot) resmi elde edilebilir.



Şekil 5.10. Örnek olay-1 için SWIM+UD etki sonuçları

Şekil 5.10.'da verilen sunburst grafiği, SIWM çerçevesindeki paydaş temelli sosyal performansı yüzdesel olarak dağıtımını göstermektedir. Toplam yük, iç halkada paydaş grupları, en dış halkada ise her paydaş için en çok etki eden alt göstergeleri vermektedir. Dağılım üç ana bulguya işaret ediyor: Çalışanlar (%28,5), Yerel Topluluklar (%23,8) ve

Toplum (%22,3) birlikte toplam yükün yaklaşık %74,6'sını oluşturmaktadır. Bu da sosyal iyileştirme için öncelikli müdahale alanlarının bu üç paydaşta olduğunu gösterir.

Çalışanlar alanında en yüksek alt göstergeler Erkek çocuk işçi oranı (WO1B, %6), Adil Ücret (WO3A, % 5,8), Sendika Yoğunluğu (WO5D, %5,3) ve Sosyal Güvenlik Harcamaları (WO7B, %5,2) kodlarıyla toplanmaktadır. Bunlar SIWM sözlüğünde çalışma koşulları ve ücret adaleti/öngörülebilir istihdam, iş sağlığı ve güvenliği, eşitlik-ayrımcılık yapmama/eşit fırsat ve beceri-eğitim/iş güvencesi temalarına karşılık gelmektedir. İSG yönetim sistemlerinin güçlendirilmesi, eşit fırsat ve taciz/ayrımcılık politikalarının kanıtlanabilir uygulanması, şeffaf ücret ve çalışma-süreleri yönetimi kategorilerinde iyileştirmeler yapılabilir.

Yerel topluluklarda yük Temiz içme suyu kapsamı (LC7A %6,3), Biyokitle çıkarımı (LC1B %6,2), Sanitasyon kapsamı (LC7C %2,8), Tehlike altındaki tür sayısı (LC2D %2,0) gibi göstergelerde yoğunlaşmaktadır. Bunlar tipik olarak çevresel/sağlık etkilerinin yerel düzeyde yönetimi, şikâyet mekanizmaları ve paydaş katılımı, altyapı ve yaşam kalitesi etkileri ve arazi-su erişimi başlıklarıdır. Resmî şikâyet mekanizması, proaktif yerel paydaş iletişimi ve yüksek riskli tedarik lokasyonları için İSG şartlarında iyileştirmeler yapılabilir.

Toplum paydaşında okuma yazma bilmeme oranları (SO1C-SO1E %3,9) ve Toplam sağlık harcaması (SO2G %3,7) göstergelerinin etkisi bulunmaktadır. Bunlar ahlaki iş uygulamaları/yolsuzlukla mücadele, adil rekabet ve kamu politikalarına uyum temalarını kapsar. Öncelik olarak tedarik ve satış süreçlerinde yolsuzluk karşıtı kontroller, rekabet hukuku ve vergi/düzenleme uyumunun kanıtlanması gerekmektedir.

Evrensel Tasarımın payı %16,5 ve alt göstergeler UD1A–UD7C arasında neredeyse eşit (%1,7) dağılmıştır. Bu, ürünün erişilebilirlik, algılanabilirlik, hata toleransı ve düşük fiziksel çaba ilkeleri bakımından dengeli fakat artırılabilir bir performansa sahip olduğunu gösterir. Alt gösterge düzeyinde en çok etkisi olan ilk beş alt gösterge:

- El ve kavrama boyutu çeşitliliğine uyum sağla (UD7c %1.7), farklı el boyutlarına uygun kavrama açıklığı, parmak boşluğu ve yüzey sürtünmesi parametrelerinin yetersizliği nedeniyle yüksek skor almıştır.

- Tüm kullanıcılar için aynı kullanım imkânı sağla (UD1a %1,7), sağ/sol yön öncelikleri ve kapak/çekmece yön seçeneklerinin standardize edilmemesi sebebiyle eşdeğer erişimi güvence altına alamamaktadır.
- Önemli unsurlar için net görüş hattı sağla (UD7a %1,7), oturarak ve ayakta kullanım senaryoları açısından kritik göstergelerin konum-yükseklik optimizasyonunun sınırlı kalması nedeniyle yüksektir.
- Makul işletme kuvveti kullan (UD6b %1,7), başlangıç/çekiş kuvvetini düşüren donanım sınıflarının tercih edilmemesi ve tutamak geometrisinin kaldıraç avantajı sunmaması nedeniyle yüksek etkilidir.
- Tehlike ve hata uyarıları sağla (UD5b %1,7), temas riski olan bölgelerde yüksek kontrastlı görsel-dokunsal uyarıların sistematik olarak uygulanmaması nedeniyle sınırlıdır.

Değer zinciri aktörleri %9,0 ile orta düzeydir; burada VC1B (7,5) açık ara öndedir ve tedarikçi sözleşmeleri, ödeme vadeleri ve sorumlu satın alma şartlarını temsil eder. Bu kategorideki iyileştirmeler için adil sözleşme/ödeme uygulamalarını standartlaştırma ve KOBİ tedarikçiler için kapasite geliştirme yapılabilir.

5.3.4. Normalizasyon ve ağırlıklandırma

Bu alt bölümde, çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlardaki göstergeleri bütüncül bir değerlendirmeye hazırlamak amacıyla normalizasyon ve ağırlıklandırma işlemleri uygulanmıştır. Farklı birimlerdeki göstergeler (örneğin, çevresel kategorilerde kg SO_2-eq gibi çevresel yük birimleri, ekonomik boyutta USD cinsinden maliyetler ve sosyal boyutta medium risk hours gibi risk ölçekleri), doğrudan karşılaştırılamaz niteliktedir. Bu nedenle, literatürde yaygın olarak önerilen min-max normalizasyon yöntemiyle veriler 0-1 aralığına ölçeklenmiştir [135][136]. Bu yaklaşım, göstergelerin birimsiz hale getirilmesini sağlar ve boyutlar arası karşılaştırmaya olanak tanır. Sosyal boyut risk temelli olduğundan (yüksek değer kötü anlamına gelir) ve çevresel ile ekonomik boyutlar da maliyet gibi düşük değerlerin tercih edildiği kriterler olduğundan, tüm boyutlar için aynı eşitlik uygulanmıştır:

$$r_{ij} = \frac{\max(A_j) - A_{ij}}{\max(A_j) - \min(A_j)} \quad (5.1)$$

Eş. 5.1, düşük değerleri 1'e yakın yaparak iyiyi yüceltir. Örneğin, yüksek bir risk veya maliyet değeri (kötü) 0'a yakın olurken, düşük değer (iyi) 1'e yaklaşmaktadır. Bu durum, boyutların doğal olarak karşılaştırılabilir olmasını sağlar. Eğer max = min olursa (tüm değerler eşitse), gösterge ayrım gücü taşımadığından r_{ij}= 0.5 atanmıştır. Bu, ÇKKV literatüründe önerilen bir yaklaşımdır [136].

Ağırlıklandırma, boyutlara eşit ağırlık (%33.3) atanarak yapılmıştır. Bu yaklaşım, sürdürülebilirliğin üç boyutunun eşit öneme sahip olduğu varsayımına dayanır ve boyutların toplam ağırlığının 1 olmasını sağlar [137]. Ağırlıklı değerler şöyle hesaplanır:

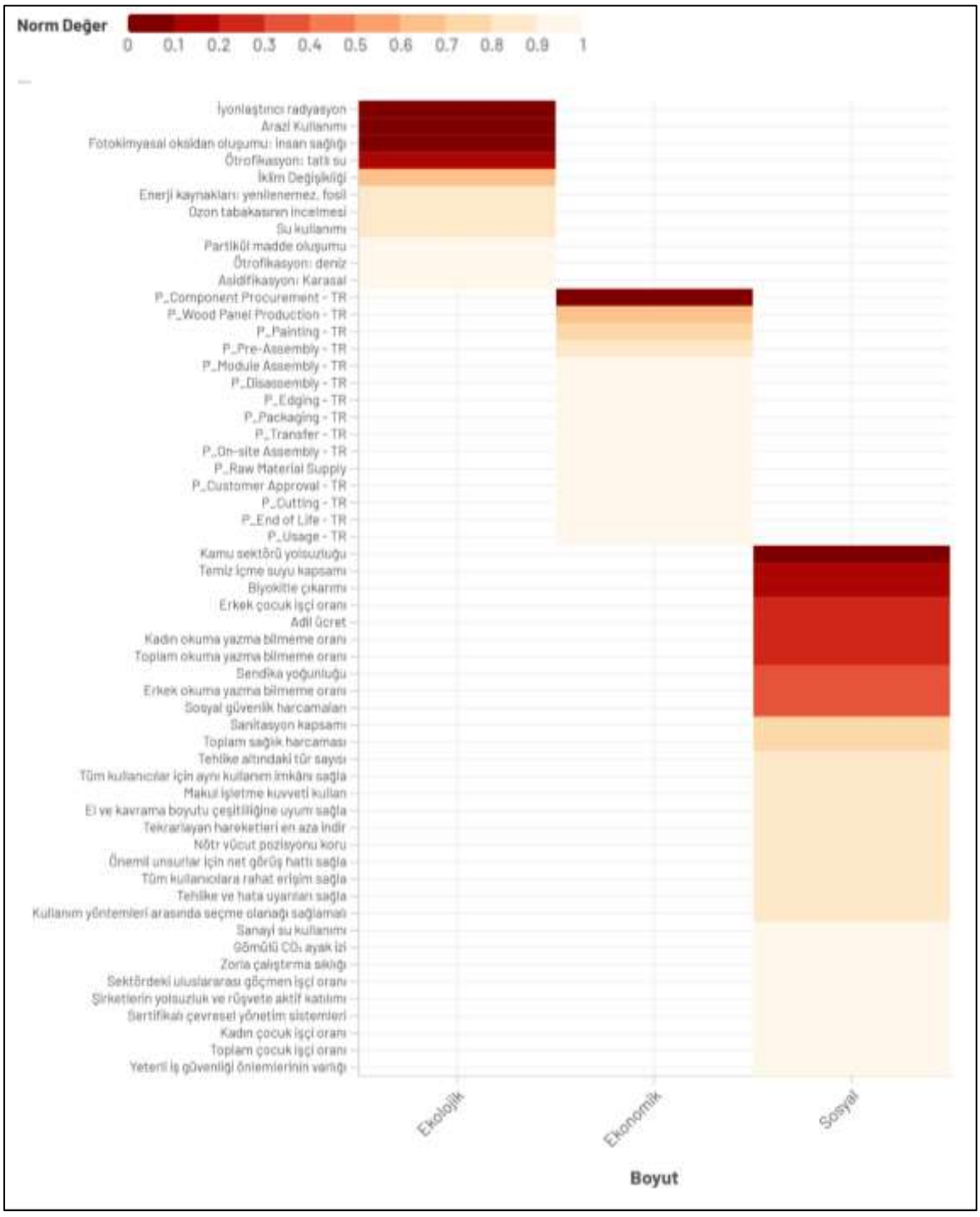
$$v_{ij} = w_j \times r_{ij} \tag{5.2}$$

Sıcak noktalar (hotspots), ağırlıklandırılmış normalize skorun v_{ij} ilgili boyuttaki toplam içinde ≥ %5 pay aldığı göstergeler olarak tanımlanmıştır. Bu eşik, Pareto mantığıyla, toplam yükün büyük bölümünü oluşturan sınırlı sayıdaki kritik alanı görünür kılar. Şekil 5.11'de verilen ısı haritası, min–max normalizasyon (0–1) ve eşit boyut ağırlıkları (ekolojik/ekonomik/sosyal = 1/3) uygulanarak elde edilen sonuçları göstermektedir. Haritadaki koyu tonlar, ekolojik ve ekonomik boyutlarda yüksek yük/maliyet, sosyal boyutta ise yüksek risk bulunan alanları işaret eder.

Ekolojik boyutta en belirgin sıcak noktalar "İyonlaştırıcı radyasyon" ve "Arazi kullanımı"dır. Bunları "Fotokimyasal oksidan oluşumu (insan sağlığı)" ve "Ötrofikasyon (tatlı su)" izlemektedir. Bu profil, elektrik karmasındaki nükleer pay, orman kökenli hammadde talebi ve fosil temelli ısıl süreçlerin etkisine duyarlıdır. İklim değişikliği ve fosil kaynak kullanımı orta-yüksek düzeydedir. Bunlar enerji verimliliği ve yakıt dönüşümleriyle birlikte düşürülebilecek alanlardır.

Ekonomik boyutta sıcak noktalar, bileşen/aksesuar tedariki, ahşap panel üretimi ve boya/kaplama süreçlerinde yoğunlaşmaktadır. Bu, maliyet azaltımı için önceliğin tedarik zinciri sözleşmeleri, birim fiyat/indeks yönetimi ve malzeme veriminde olduğunu göstermektedir.

Sosyal boyutta yük, değer zinciri aktörleri, yerel topluluklar ve çalışanlar paydaş gruplarında toplanmaktadır. Evrensel Tasarım alt göstergeleri yüksek eşik altında olduğu için ikinci kademede iyileştirme alanı olarak değerlendirilmelidir.



Şekil 5.11. Örnek olay-1 ısı haritası

Bu sıcak noktalara dayalı alternatifler, iyileştirme senaryoları olarak tanımlanmıştır:

- Mevcut Durum: Verilerdeki gibi.
- Alt1 (Çevresel): Fosil yakıt katkısı %20 azalt, arazi kullanımı %15 düşür (yenilenebilir malzeme ve enerji dönüşümü).
- Alt2 (Sosyal): Çocuk işçi oranları %25 azalt, UD göstergeleri %20 artır (eğitim programları ve tasarım optimizasyonu).
- Alt3 (Ekonomik): Maliyet %15 azalt (tedarik zinciri kısaltma ve verimlilik artışı, ancak çevresel yük %7 artır).

Bu alternatifler, izleyen yorumlama bölümünde TOPSIS ile değerlendirilecektir.

5.4. Yorumlama

Bu bölümde, Bölüm 5.3.4'te açıklanan normalizasyon ve ağırlıklandırma adımlarını temel alan bir çok ölçütlü karar analizi yürütülmüştür. Yöntem olarak TOPSIS kullanılmıştır. TOPSIS, maliyet türü (düşük değer tercih edilir) ve fayda türü (yüksek değer tercih edilir) göstergeleri birlikte değerlendirebilir ve alternatifleri ideal çözüme yakınlığına göre sıralar. Analiz, mevcut durumu ve üç iyileştirme senaryosunu içeren dört alternatif üzerinden yürütülmüştür. Çevresel ve ekonomik göstergeler maliyet türünde (düşük değer tercih edilir) ele alınmış; sosyal gösterge de SIWM'ye dayalı bir risk ölçütü olduğundan aynı biçimde maliyet türü olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 5.3. Örnek olay-1 için karar matrisi (ham değerler)

Alternatif	Çevresel (toplam katkı, %)	Ekonomik (USD)	Sosyal (mrh, normalleştirilmiş toplam)
Mevcut	561.00	2,694.79	592.66
Alt1	448.80	2,800.00	580.00
Alt2	577.83	2,600.00	444.50
Alt3	600.27	2,290.57	610.00

Çizelge 5.3.'te yer alan değerler, Bölüm 5.3.4'te tanımlanan normalizasyon öncesi ham (ölçeklenmemiş) çıktılardan derlenmiştir. Çevresel değer ReCiPe midpoint kategorilerinin toplam katkısını, ekonomik değer LCC "added value" toplamını, sosyal değer ise SIWM ve UDA normalleştirilmiş toplamını ifade etmektedir.

TOPSIS'in uygulanmasında sırasıyla aşağıdaki standart adımlar izlenmiştir:

- Vektör normalizasyonu: Bu adım, farklı büyüklük ve birimlerdeki kriterleri ortak bir ölçeğe taşıyarak doğrudan karşılaştırılabilir hale getirmiştir.
- Ağırlıklandırma: Temel senaryoda eşit ağırlık kullanılmıştır. Bu adım, kriter önem derecelerini skora yansıtır ve karar vericinin önceliklerini modele dahil etmektedir.
- İdeal çözümler: Tüm kriterler maliyet türü olduğundan pozitif ideal (en iyi) her sütunun minimi, negatif ideal (en kötü) ise maksimi olarak alınmıştır. Bu adım, alternatiflerin değerlendirilmesinde kullanılacak referans noktalarını tanımlamaktadır.
- Uzaklıklar: Bu adım, her alternatifin ideal ve anti-ideal çözümlere olan geometrik uzaklığını hesaplayarak performans farkını nicelleştirmektedir.
- Yakınlık katsayısı: Bu adım, uzaklıkları tek bir 0–1 göstergesinde birleştirir. Katsayı 1'e yaklaştıkça alternatif ideal çözüme daha yakındır ve tercih edilebilirliği artar.

Çizelge 5.4. Örnek olay-1 için TOPSIS yakınlık katsayıları

Alternatif	Yakınlık Katsayısı (c_i)	Sıralama
Mevcut	0.45	3
Alt1	0.62	1
Alt2	0.58	2
Alt3	0.42	4

Çizelge 5.4.'te raporlanan yakınlık katsayıları, alternatiflerin ideal çözüme yakınlığını nicel olarak ortaya koymaktadır. Çizelgeye göre yenilenebilir malzeme ve enerji dönüşümü içeren Alt1'i ilk sıraya yerleştirmektedir. Bu sıralama, Çizelge 5.2'deki karar matrisindeki bileşenlerle tutarlıdır. Alt1'de çevresel yükte anlamlı bir azalma (özellikle fosil bağımlılığı ve arazi kullanımıyla ilişkili bileşenlerde) elde edilirken, ekonomik maliyetteki artış sınırlı kalmış ve sosyal riskteki değişim düşük düzeyde seyretmiştir. Alt2, sosyal riskte belirgin bir iyileşme sağlamasına karşın çevresel göstergenin yükselmesi ve maliyetteki düşüşün sınırlı olması nedeniyle Alt1'in gerisinde kalmıştır. Alt3'te maliyet azalmakla birlikte çevresel ve sosyal göstergelerdeki artışlar toplam performansı zayıflatmış ve alternatifin son sırada yer almasına yol açmıştır.

Duyarlılık analizi, TOPSIS sonuçlarının ana varsayımlara karşı kararlılığını test etmek amacıyla yürütülmüştür. Bu adım, analizlerin güvenilirliğini artırır ve karar vericinin farklı önceliklerine göre sonuçların nasıl değiştiğini göstermektedir. [132]. İlk olarak, ağırlık seti

değiştirilmiştir. Temel senaryoda eşit ağırlık (%33.3) kullanılırken, her boyuta sırayla %50 ağırlık verilerek üç senaryo test edilmiştir:

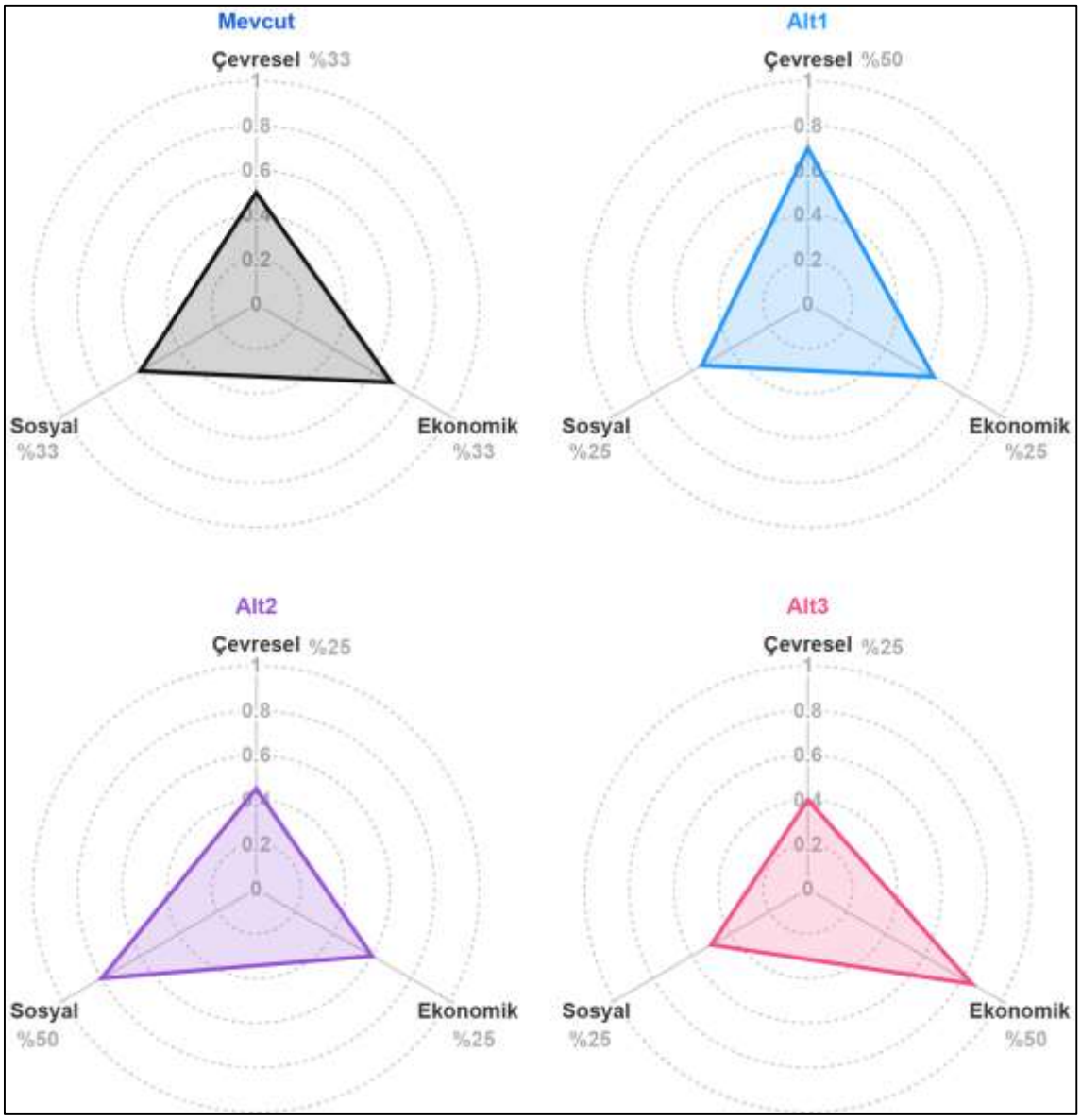
- Senaryo 1: Çevresel %50, Ekonomik %25, Sosyal %25
- Senaryo 2: Ekonomik %50, Çevresel %25, Sosyal %25
- Senaryo 3: Sosyal %50, Çevresel %25, Ekonomik %25

Çizelge 5.5. Örnek Olay-1 için duyarlılık analizi sonuçları

Alternatif	Senaryo 1 c_i (Çevresel %50)	Senaryo 2 c_i (Ekonomik %50)	Senaryo 3 c_i (Sosyal %50)	Ortalama c_i
Mevcut	0,42	0,48	0,45	0,45
Alt1	0,68	0,59	0,60	0,62
Alt2	0,55	0,56	0,63	0,58
Alt3	0,40	0,49	0,38	0,42

Çizelge 5.5.'te eşit ağırlıklandırma ile elde edilen yakınlık katsayıları ve sıralamalar sunulmuştur. Bunun devamı olarak, 5.3.4'te açıklanan normalizasyon ve ağırlıklandırma adımlarını koruyarak her panelde tek bir sürdürülebilirlik boyutuna %50 ağırlık verilmiş ve TOPSIS yakınlık katsayıları Şekil 5.12.'de görselleştirilmiştir. Eksenler 0–1 aralığında normalize edilmiş c_i değerlerini göstermektedir. Çokgenin dış sınıra yaklaşması, ilgili senaryoda alternatifin ideale daha yakın olduğunu ifade etmektedir.

Duyarlılık analizine ait bulgular, ağırlık yapısına bağlı performans desenini açık biçimde göstermektedir. Çevresel ağırlığın %50 olduğu Senaryo 1'de Alt1 (c_i= 0,68) liderdir. Çevresel iyileştirme bu senaryonun öncelikleriyle uyumlu olduğu için yakınlık katsayısını yükseltmektedir. Sosyal ağırlığın %50 olduğu Senaryo 3'te Alt2 (c_i = 0,63) öne çıkmaktadır. Sosyal fayda odaklı tercihler, çevresel yükte sınırlı bir artış pahasına göreli üstünlük sağlamaktadır. Eşit ağırlıklandırılmış temel durumla karşılaştırıldığında bu sıralama tutarlıdır. Sonuçlar ağırlık değişimlerine karşı kararlı, ancak sosyal ağırlık arttıkça Alt2 giderek daha rekabetçidir.



Şekil 5.12. Örnek olay-1 duyarlılık analizine ait radar grafiği

Toplamda, çevresel öncelikli bağlamlarda Alt1 en güçlü alternatiftir ve enerji dönüşümü ile karbonsuzlaşma adımlarının belirleyici rolünü teyit eder. Buna karşılık sosyal ağırlık arttıkça ortaya çıkan değiş-tokuşlar (çevresel kazançlara karşı sosyal maliyetler) karar sürecinde açıkça dikkate alınmalıdır. Sonuç olarak, ağırlık yapısı değişse de Alt1 dengeli profilini korur; sosyal öncelikli bağlamlarda Alt2, maliyet duyarlı durumlarda ise Alt3 tercih edilebilir.

Duyarlılık analizinin ardından, çevresel etki kategorilerindeki belirsizliğin sistem davranışı üzerindeki olası etkilerini değerlendirmek amacıyla 1000 iterasyonluk Monte Carlo simülasyonu uygulanmıştır. Bu simülasyon, her bir çevresel kategori için ortalama değerler,

dağılım aralıkları ve varyasyon katsayıları üzerinden sonuçların istatistiksel güvenilirliğini incelemeye olanak sağlamıştır. Çizelge 5.6.'da simülasyon sonuçları, EK-6'da ise simülasyon grafikleri verilmiştir.

Çizelge 5.6. Örnek Olay-1 için monte carlo simülasyon sonuçları

Etki Kategorisi	Birim	Ortalama	Std. Sapma	%5'lik dilim	%95'lik dilim	Belirsizlik CV (%)
İnsan toksisitesi kanserojen olmayan	kg 1,4-DCB-eq	$1{,}26\times10^{6}$	$3{,}47\times10^{6}$	$1{,}83\times10^{5}$	$2{,}58\times10^{6}$	275
İnsan toksisitesi - kanserojen	kg 1,4-DCB-eq	$1{,}40\times10^{5}$	$3{,}09\times10^{5}$	$6{,}04\times10^{4}$	$2{,}59\times10^{5}$	221
İyonize radyasyon	kg U-235-eq	$8{,}16\times10^{4}$	$1{,}57\times10^{5}$	$1{,}75\times10^{4}$	$2{,}13\times10^{5}$	192
Ekotoksisite tatlı su	kg 1,4-DCB-eq	$1{,}72\times10^{5}$	$1{,}39\times10^{5}$	$9{,}32\times10^{4}$	$3{,}17\times10^{5}$	81
Ekotoksisite deniz	kg 1,4-DCB-eq	$2{,}52\times10^{5}$	$1{,}99\times10^{5}$	$1{,}33\times10^{5}$	$4{,}55\times10^{5}$	79
Ötrofikasyon - tatlı su	kg 1,4-DCB eşd.	$2{,}17\times10^{3}$	$1{,}13\times10^{3}$	$1{,}09\times10^{3}$	$3{,}88\times10^{3}$	52
Arazi kullanımı	$m^2\cdot$yıl crop-eq	$3{,}40\times10^{5}$	$6{,}52\times10^{4}$	$2{,}43\times10^{5}$	$4{,}56\times10^{5}$	19
Fotokimyasal oksidan oluşumu insan sağlığı	kg NOx-eq	$1{,}93\times10^{3}$	$2{,}92\times10^{2}$	$1{,}57\times10^{3}$	$2{,}46\times10^{3}$	15,1
Fotokimyasal oksidan oluşumu karasal ekosistem	kg NOx-eq	$2{,}02\times10^{3}$	$2{,}95\times10^{2}$	$1{,}66\times10^{3}$	$2{,}56\times10^{3}$	14,6
Su kullanımı	m^3	$1{,}09\times10^{4}$	$1{,}48\times10^{3}$	$8{,}69\times10^{3}$	$1{,}36\times10^{4}$	13,6
Ozon incelmesi	kg CFC-11-eq	0,27	0,04	0,22	0,34	13,5
Ekotoksisite karasal	kg 1,4-DCB-eq	$1{,}80\times10^{6}$	$2{,}40\times10^{5}$	$1{,}48\times10^{6}$	$2{,}28\times10^{6}$	13,3
Ötrofikasyon deniz	kg N-eq	35,2	4,6	28,0	42,6	13,0
Malzeme kaynakları metaller/mineraller	kg Cu-eq	$1{,}99\times10^{3}$	$5{,}79\times10^{2}$	$1{,}26\times10^{3}$	$3{,}00\times10^{3}$	12,3
Partikül madde oluşumu	kg PM_{10}-eq	$7{,}91\times10^{2}$	$8{,}78\times10^{1}$	$6{,}66\times10^{2}$	$9{,}43\times10^{2}$	11,1
Asitleşme karasal	kg SO_2-eq	$1{,}85\times10^{3}$	$1{,}75\times10^{3}$	$1{,}60\times10^{3}$	$2{,}15\times10^{3}$	9,5
Enerji kaynakları fosil	MJ	$1{,}73\times10^{5}$	$1{,}45\times10^{4}$	$1{,}52\times10^{5}$	$1{,}98\times10^{5}$	8,4
İklim değişikliği	kg CO_2-eq	$4{,}35\times10^{5}$	$3{,}40\times10^{4}$	$3{,}83\times10^{5}$	$4{,}97\times10^{5}$	7,8

Çizelge 5.6.'da verilen Monte Carlo sonuçları çoğu kategoride dağılımın dar bir aralıkta toplandığını ve modelin genel olarak kararlı çıktılar ürettiğini göstermektedir. Bununla birlikte insan toksisitesi (kanserojen olmayan), iyonize radyasyon, deniz ekotoksisitesi ve tatlı su ötrofikasyonu kategorilerinde yüksek belirsizlik gözlenmiştir. Bu kategorilerdeki varyasyonun, arka plan süreçlerinde kullanılan kimyasallar, enerji üretim yapısı ve kaplama süreçlerindeki veri çeşitliliğinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Belirsizlik düzeyi düşük olan kategoriler ise iklim değişikliği, fosil enerji kullanımı, partikül madde oluşumu, arazi kullanımı ve asitleşme gibi mutfak dolapları sisteminin temel sıcak noktalarını oluşturan alanlardır. Bu göstergelerdeki dağılımın dar olması, sistemin çevresel etkilerinin büyük bölümünün istikrarlı biçimde modellendiğini göstermektedir. Dolayısıyla Monte Carlo analizi, belirsizlik bulunmasına rağmen kritik kategorilerde sapmaların sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır. Duyarlılık analizi sonuçlarının genel eğiliminin güvenilir olduğunu doğrulamaktadır.

Deterministik sıralama ile belirsizlik analizi birlikte ele alındığında, Monte Carlo dağılımlarının alternatifler arasındaki performans farklarını tersine çevirecek ölçüde bir değişiklik yaratmadığı görülmüştür. Bunun temel nedeni, TOPSIS karar matrisini belirleyen baskın çevresel kategorilerin düşük belirsizlik düzeyine sahip olması ve alternatifler arasındaki farkların özellikle Alt1 lehine belirgin olmasıdır. Ekonomik ve sosyal göstergelerde belirsizlik bulunmaması da sıralamanın kararlılığını güçlendirmektedir. Bu kapsamda, Alt1 hem deterministik hem stokastik analiz altında en dengeli alternatif olarak konumunu korumuştur. Sosyal ağırlığın daha yüksek olduğu bağlamlarda Alt2'nin göreli üstünlüğü artarken, maliyet odaklı değerlendirmelerde Alt3 nispi avantaj göstermektedir; ancak bu durum toplam sürdürülebilirlik performansını değiştirecek bir etki oluşturmamaktadır.

Genel olarak, yapılan analizler Alt1'in sürdürülebilirlik bakımından uygulanabilir ve dengeli bir iyileştirme alternatifi olduğunu; Alt2'nin özellikle sosyal öncelikli durumlarda dikkat çekici bir seçenek haline geldiğini; Alt3'ün ise maliyet avantajına karşın çevresel ve sosyal risklerdeki artış nedeniyle sınırlı uygulanabilirlik sunduğunu göstermektedir. Monte Carlo simülasyonu, modelin güvenilirliğini doğrulamış ve yorumlama aşamasında elde edilen sonuçların istatistiksel olarak desteklendiğini ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, Örnek Olay-1 için Monte Carlo simülasyonu modelin genel güvenilirliğini teyit etmekte, çevresel etkilerin çoğunun dar aralıkta toplandığını göstermektedir. Yüksek belirsizlik gösteren kategoriler, gelecekteki çalışmalar için veri kalitesinin artırılması ve kimyasal süreçlerin saha ölçümleriyle doğrulanması gereken alanları işaret etmektedir.

6. ÖRNEK OLAY 2: HAVA VERİ ÖLÇÜM İSTASYONU

Bu bölümde, Örnek Olay-2 kapsamında incelenen Hava Veri Ölçüm İstasyonu tanıtılmakta ve çalışmanın genel araştırma bağlamı açıklanmaktadır. Araştırma, Ankara'da bilişim sektöründe faaliyet gösteren bir firma ile iş birliği içinde yürütülmüştür. Firma yetkilileriyle yapılan görüşmeler sonucunda, Hava Veri Ölçüm istasyonunun hâlihazırda üretim sürecinde olduğu doğrulanmış ve bu nedenle söz konusu ürün, vaka çalışması olarak seçilmiştir. Hava Veri Ölçüm istasyonu; sıcaklık, bağıl nem, rüzgâr hızı ve yönü, barometrik basınç, yağış miktarı ve güneş radyasyonu gibi meteorolojik parametreleri sahada sürekli olarak ölçen, elde ettiği verileri kaydeden ve ileten kompakt bir meteoroloji sistemidir [138]. Bu tür istasyonlar, yalnızca hava durumunun anlık izlenmesi ve iklim eğilimlerinin takibi için değil; aynı zamanda tarımsal uygulamaların optimizasyonu, havaalanı operasyonlarının desteklenmesi ve çevre ile doğal kaynak yönetimine yönelik izleme süreçlerinde de yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu örnek olayın seçilme nedenleri aşağıda özetlenmiştir:

- İlk örnek olaya kıyasla elektronik sensör ve iletişim birimleri, fotovoltaik (PV) panel, akü ve mekanik bileşenlerin aynı sistem içinde yer alması; ayrıca kullanım aşamasındaki enerji gereksiniminin modelde belirgin bir şekilde temsil edilebilmesi,
- Beş yıllık kullanım süresi boyunca enerji tüketimi, bakım gereksinimleri ve bileşen değişimlerinin (örneğin akü veya sensör ikamesi) etkilerinin ölçülebilmesi,
- Batarya seçimine dayalı iki farklı senaryonun çevresel, ekonomik ve sosyal sonuçlarının, kapasite ve ömür varsayımları çerçevesinde sayısal olarak değerlendirilebilmesi,
- Enerji tedariki ve depolama boyutlandırması ile saha bakım periyotları gibi karar değişkenlerinin, sistemin sürdürülebilirlik performansı üzerindeki etkilerinin doğrudan bu vaka üzerinden test edilebilmesidir.

Çalışmada LCA, LCC ve SLCA yöntemleri entegre edilerek değerlendirme gerçekleştirilmiş; ürün sisteminin tasarım, tedarik, lojistik, kurulum ve kullanım evrelerine ilişkin etkiler kapsamlı biçimde analiz edilmiştir. Çevresel boyut ISO 14040 ilkeleri doğrultusunda, sosyal boyut ise UNEP/SETAC (2009) kılavuzundaki yaklaşım esas alınarak kurulmuştur [35][7]. Örnek Olay-1'de tanımlanan veri tabanı ve gösterge yapısı bu çalışmada da korunmuştur. LCC, bu çalışmada kapsamı sınırlı, destekleyici bir çerçeve olarak ele alınmıştır; hesaplama yaklaşımı temel düzeyde tutulmuş ve literatürde

tanımlandığı biçimde uygulanmıştır [51]. Bu bütünleşik yapı, farklı sürdürülebilirlik boyutlarından elde edilen bulguların tek bir vaka kapsamında birlikte değerlendirilmesine imkân tanımaktadır. Çalışma, dış karşılaştırma veya beyan amacı gütmemekte; tasarım ve işletim süreçlerine yönelik kararların iyileştirilmesine katkı sağlayacak içsel bir değerlendirme yaklaşımı benimsemektedir[9].

6.1. Amaç ve Kapsam Tanımı

ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarında da vurgulandığı gibi, yaşam döngüsü değerlendirmelerinde amaç ve kapsamın tanımlanması, yöntemin temelini oluşturan en kritik ilk aşamadır. Bu aşamada çalışmanın amacı, hangi karar süreçlerine veri sağlayacağı ve elde edilen sonuçların hangi paydaş gruplarına, ne tür bir formatta iletileceği açık biçimde tanımlanır. Ayrıca fonksiyonel birim, sistem sınırları ile varsayım ve kısıtlamalar gibi teknik çerçeveler belirlenerek değerlendirme kapsamı netleştirilir (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006). Bu araştırmada amaç; Hava Veri Ölçüm istasyonunun yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan çevresel etkileri, ekonomik maliyetleri ve sosyal risk–performans göstergelerini birlikte nicel olarak değerlendirip, sıcak noktaları tanımlamak ve bu bulguları tasarım ile işletim kararlarını yönlendirecek biçimde yorumlamaktır. Tüm amaç ve kapsam tanımları, ISO 14040/14044 standartlarının şeffaflık ve tutarlılık ilkeleri esas alınarak gerçekleştirilmiştir.

<u>Fonksiyonel birim:</u>

Bu çalışmada Hava Veri Ölçüm istasyonunun beş yıl boyunca kesintisiz biçimde ölçüm ve veri iletim hizmeti sunması, tüm hesaplamalar için ortak bir referans noktası olarak belirlenmiştir. Hizmete dayalı bu fonksiyonel birim, sistemin çıktısını yani sürekli meteorolojik verinin üretilmesi ve iletilmesi sürecini, sayısal olarak değerlendirilebilir bir performans göstergesiyle ilişkilendirmektedir. Bu yaklaşım sayesinde üretim, kurulum, lojistik ve özellikle kullanım evresinde ortaya çıkan enerji tüketimi ile bakım gereksinimleri, sağlanan hizmet miktarı üzerinden izlenebilmiştir. Bu kapsamda Hava Veri Ölçüm istasyonuna ait fonksiyonel birim aşağıda sunulmuştur:

“Ankara'da tarım faaliyetlerinin gerçekleştirildiği bir arazi üzerinde, beş yıl süresince hava kalitesi, sıcaklık, nem ve hava akış hızı gibi önemli meteorolojik parametrelerin sürekli olarak ölçülmesi. “

Bu tanım, istasyonun temel işlevi olan meteorolojik veri üretimi hizmetini ölçülebilir bir çıktıyla ilişkilendirir ve kurulum, enerji tedariki, veri iletimi ile bakım ve kalibrasyon süreçlerinde ortaya çıkan malzeme ile enerji akışlarının referans akış kapsamında değerlendirilmesine olanak sağlar. Tarımsal bağlamın tercih edilmesinin nedeni, meteorolojik değişkenlerin sulama, ilaçlama ve hasat zamanlaması gibi karar süreçleriyle doğrudan bağlantılı olmasıdır. Bu durum, kullanım aşamasının modele daha gerçekçi biçimde yansıtılmasını sağlamaktadır. Çalışmada iki farklı kullanım senaryosu dikkate alınmıştır. Birinci senaryoda Almanya kökenli, daha yüksek kalite ve uzun ömür profiline sahip bir batarya kullanılmış, beş yıllık fonksiyonel birim süresi boyunca batarya değişimi yapılmamıştır. İkinci senaryoda ise Çin kökenli, daha ekonomik ancak daha kısa ömürlü bir batarya kullanılmış ve aynı süre içinde bir kez batarya değişimi gerçekleştirilmiştir.

Ürün sistemi

ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarında tanımlandığı üzere ürün sistemi, yaşam döngüsü boyunca birbirine bağlı birim süreçlerin bütünüdür. Bu süreçler girdiler ve çıktılar temelinde tanımlanarak referans akış ile ilişkilendirilir. Bu çalışmada ürün sistemi, hammadde tedarikinden yaşam sonuna kadar uzanan kapsamda modellenmiştir. Model, hammadde temini, bileşen üretimi, sistem entegrasyonu ve paketleme, taşımacılık, yerinde kurulum, kullanım ve bakım ile söküm ve nihai bertaraf aşamalarını içermektedir. Modelleme süreci OpenLCA 2.0.3 yazılımı üzerinde yürütülmüş, çevresel veriler ecoinvent 3.7.1, sosyal veriler ise Soca veri tabanından alınmıştır. Ayrıca bu çalışmada Evrensel Tasarım ilkeleri sosyal göstergelere entegre edilmiştir.

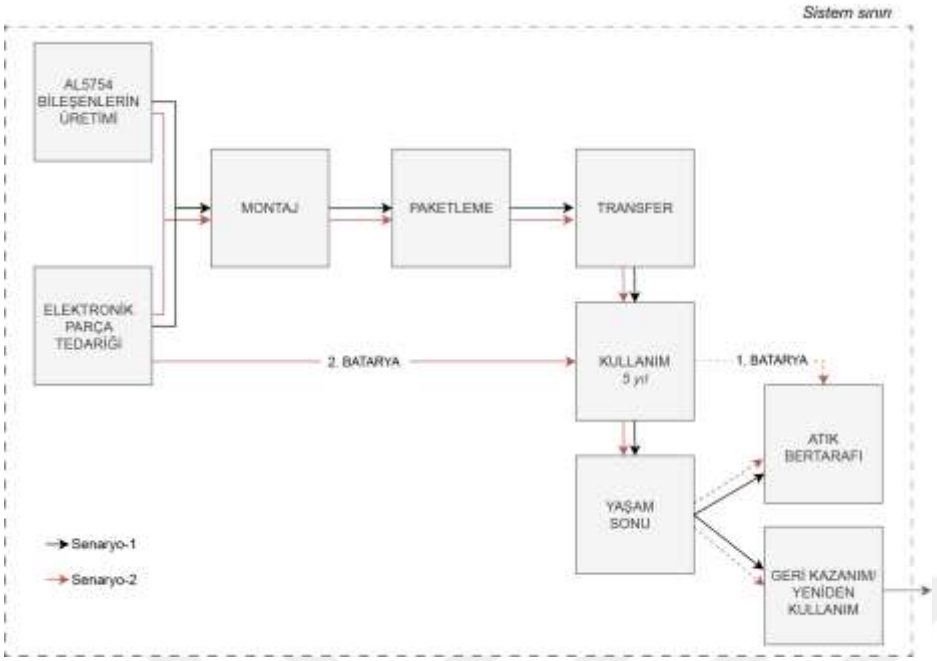
Batarya seçeneğine bağlı senaryolar ürün sistemine şu şekilde modellenmiştir: Birinci senaryoda Avrupa kökenli tek batarya kullanımına dayalı yapı ele alınmış; bataryanın üretim ve tedarik süreçleri bir kez tanımlanmış, beş yıllık kullanım süresi boyunca herhangi bir değişim planlanmamış ve yaşam döngüsünün sonunda gerçekleştirilecek işlemler tek batarya üzerinden yapılandırılmıştır. İkinci senaryoda ise Çin kökenli iki batarya kullanımına dayalı bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu durumda başlangıç bataryasına ek

olarak beş yıllık dönem içerisinde bir kez değişim yapılacağı kabul edilmiştir. İkinci bataryanın üretimi, ambalajlanması, taşınması ve kullanım sürecinde çıkarılan ilk bataryaya ilişkin ara yaşam sonu işlemleri envantere ayrı süreçler olarak dâhil edilmiştir. Tedarik bölgeleri arasındaki farklar, arka plan süreçlerinin seçimi ile taşımacılık modu ve mesafeleri üzerinden çevresel ve sosyal değerlendirmeye aktarılmıştır. Ekonomik boyutta ise ilk edinim maliyeti ve olası değişim maliyeti birbirinden bağımsız akışlar şeklinde izlenmiştir.

Sistem sınırları

Sistem sınırları, modele dâhil edilecek birim süreçlerin kapsamını ve bu süreçler arasındaki etkileşimlerin sınırlarını tanımlar. Bu çalışma kapsamında sistem sınırları; hammadde tedariki, ana üretim aşamaları olan ebatlama, kenar kaplama ve boyama işlemleri, taşımacılık ve montaj, kullanım, bakım ile kullanım ömrü sonunda gerçekleşen geri dönüşüm ve bertaraf faaliyetlerini kapsamaktadır. Ayrıca yakıt, elektrik ve ısı üretimi, yardımcı malzeme imalatı, süreç atıkları, ürün geri kazanımı ve atık yönetimine yönelik işlemler de model kapsamına dâhil edilmiştir. Üretim sürecinde ortaya çıkan ahşap atıklar, firmanın ısınma ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanılmakta olup bu uygulama enerji geri kazanımı stratejisinin bir parçası olarak değerlendirilmiştir.

Yaşam döngüsü değerlendirmesinde sistem sınırlarının açık ve tutarlı biçimde tanımlanması, envanterin kapsamını ve etki değerlendirmesi sonuçlarının nasıl yorumlanacağını doğrudan etkilemektedir. Bu çalışma kapsamında hava veri ölçüm istasyonunun ürün sistemine ait sınırlar belirlenmiş; temel akış yönleri ile senaryolara bağlı farklılıkların modelde hangi biçimde temsil edildiği açıklanmıştır.



Şekil 6.1. Hava veri ölçüm istasyonu ürün sistemi ve sistem sınırı

Şekil 6.1'de gösterilen ürün sistemi modeli, hava veri ölçüm istasyonunun üretimden yaşam sonuna kadar olan tüm süreç akışlarını kapsamaktadır. Sistemin başlangıcında, alüminyum alaşımı AL5754 bileşenlerinin üretimi ile elektronik parçaların tedariki gerçekleşmektedir. Bu iki akış montaj aşamasında birleştirilmekte, ardından ürün paketlenerek sevkiyata hazırlanmaktadır. Paketlemenin tamamlanmasıyla istasyon transfer sürecine geçmekte ve kullanım alanına ulaştırılmaktadır.

Kullanım aşaması beş yıllık bir dönemi temsil eder. Bu süre boyunca istasyonun enerji tüketimi, veri iletimi, bakım ve kalibrasyon işlemleri ile batarya performansı izlenmektedir. Modelde iki farklı batarya senaryosu tanımlanmıştır. İlk batarya kullanım süresini tamamladığında bertaraf akışına yönlendirilmektedir. İkinci batarya ise sistemin devam eden işlevselliğini sağlamak üzere kullanım sürecine ek giriş olarak dâhil edilmiştir.

Yaşam döngüsünün sonunda istasyonun bileşenleri iki olası yoldan birine yönelir. Birinci yol, malzemelerin geri kazanımı veya işlevsel olarak yeniden kullanımı süreçlerini; ikinci yol ise atık bertarafını temsil etmektedir. Her iki durumda da malzeme ve enerji akışları, yaşam döngüsü analizinde tersine lojistik ilişkileri dikkate alacak biçimde modele geri bağlanmıştır.

Varsayımlar

Varsayımlar, modelleme sürecinde alınan kararların kapsamını ve geçerlilik koşullarını açık biçimde tanımlamak için kullanılmıştır. Burada belirtilen kabuller, iki batarya senaryosunun karşılaştırılabilirliğini sağlamak üzere ortak bir referans oluşturmuştur. Seçilen varsayımlar, sektördeki uygulama örnekleri, mevcut veri sınırları ve yöntemsel gereklilikler dikkate alınarak aşağıda sunulmuştur:

- Sistem, fotovoltaik panel ve batarya kullanımıyla şebekeden bağımsız (off-grid) biçimde çalışmaktadır. Şarj–deşarj verimleri ve kapasite kaybı bu çalışmada ayrıntılı olarak modellenmemiş, sınırlılık olarak raporlanmıştır. Şebeke bağlantısı bulunmadığı kabul edilmiştir. Veri eksikliği nedeniyle derin deşarj eşiği ve sıcaklık etkileri modele dâhil edilmemiştir.
- Cihazın enerji tüketimi, teknik katalog bilgileri esas alınarak belirlenmiştir. Ortalama 3–4 W sürekli güç tükettiği varsayılmış ve beş yıllık toplam enerji kullanımı yaklaşık 175 kWh olarak hesaplanmıştır.
- Enerji kaynağı olarak 50 Wp gücünde bir güneş paneli kullanıldığı kabul edilmiştir. Ankara koşullarında günlük ortalama 6,7 saat etkin güneşlenme süresiyle yapılan hesaplamalar, sistemin enerji ihtiyacını karşılamaya yeterli düzeyde üretim sağladığını göstermektedir. Bu nedenle sistemin tamamen off-grid çalıştığı varsayılmıştır.
- Senaryo 2'de ikinci bataryanın üretimiyle birlikte ek ambalaj ve taşıma akışları modele dâhil edilmiştir. Kullanım sürecinde sistemden çıkarılan ilk batarya için ara yaşam sonu aşaması tanımlanmış; bu aşama, toplama ve işleme faaliyetlerini kapsamaktadır. Dönem sonunda ikinci bataryaya ait nihai yaşam sonu akışları ayrıca modele eklenmiştir. Coğrafi tedarik farkları ise arka plan süreçlerinin seçimi ve taşıma mesafeleri üzerinden değerlendirmeye yansıtılmıştır.
- Montaj aşamasında kullanılan vida, pul ve kauçuk conta gibi yardımcı elemanlar standart bileşen olarak kabul edilmiş ve ortalama değerlerle temsil edilmiştir.
- Ambalaj malzemeleri (karton, plastik film vb.) kullanım sonrası atık olarak modele dâhil edilmiştir. Bu malzemelerin geri dönüşüm veya yakma yöntemleriyle bertaraf edildiği kabul edilmiştir.
- Ekonomik veriler 2022 yılı piyasa değerleri üzerinden hesaplanmış, maliyetler Türk Lirası'ndan Amerikan Doları'na dönüştürülmüştür (1 USD = 16,57 TL).

- Sosyal göstergelerde literatürde öne çıkan risk düzeyleri temel alınmıştır. Batarya üretimi ve bertarafında işçi sağlığı, çocuk işçiliği ve ayrımcılık konularında yüksek risk bulunduğu kabul edilmiştir.

Bu varsayımlar, iki batarya seçeneğinin yaşam döngüsü sürdürülebilirlik analizi kapsamında adil, tekrarlanabilir ve karşılaştırılabilir biçimde değerlendirilmesini sağlamaktadır. Sonraki bölümde envanter kapsamı ile senaryolara özgü parametreler ayrıntılı olarak sunulacak, ardından etki değerlendirme bulguları paylaşılacaktır.

6.2. Envanter Analizi

Envanter analizi, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) metodolojisinin temel aşamalarından biri olup, sistemin çevresel, ekonomik ve sosyal etkilerinin hesaplanmasına doğrudan temel oluşturur. ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarında belirtildiği üzere bu aşama, amaç ve kapsamda tanımlanan ürün sistemine ait tüm girdilerin (malzemeler, enerji, iş gücü vb.) ve çıktılarının (ürünler, emisyonlar, atıklar vb.) nicel olarak belirlenmesi, kaydedilmesi ve sistem sınırları içinde modellenmesini içerir [35, 132].

Bu çalışmada envanter analizi, Hava Veri Ölçüm istasyonunun beş yıllık kullanımına dayalı olarak, üç boyutlu sürdürülebilirlik yaklaşımı çerçevesinde yürütülmüştür. Çalışmada kullanılan malzemeler, elektronik bileşenler, enerji girdileri, işçilik, ambalaj ve lojistik süreçleri dikkate alınmış; kullanım senaryolarında batarya değişimi, bakım faaliyetleri ve ömür sonu atık yönetimi de sisteme dahil edilmiştir. Çevresel boyutta malzeme ve enerji akışları; ekonomik boyutta maliyet verileri; sosyal boyutta ise paydaş gruplarına dayalı göstergeler envantere entegre edilmiştir.

Tüm veriler, Ecoinvent 3.7.1 ve Soca veri tabanları kullanılarak derlenmiş ve OpenLCA yazılımında süreç bazlı olarak modellenmiştir. Sistem sınırları dahilindeki tüm alt süreçler referans akışlarla ilişkilendirilmiş, veri eksikliği veya belirsizlikler varsayım ve sınırlılıklar bölümünde açıklanmıştır.

6.2.1. Verilerin toplanması

Bu çalışmanın Yaşam Döngüsü Envanteri (LCI) aşamasında kullanılan veriler, hava veri ölçüm istasyonunun gerçek üretim ve kullanım koşullarını temsil edecek şekilde birincil, ikincil ve tahmini veri olarak sınıflandırılarak derlenmiştir (ISO 14040/14044). Birincil veriler, üretici/monte eden firmadan temin edilen teklif dosyaları, malzeme listeleri ve atölye gözlemleri ile oluşturulmuştur: AL5754 gövde parçalarının kütleleri ve birim fiyatları, CNC kesim–büküm operasyonlarının süre ve fire oranları, montaj aşamasına ait işçilik süreleri ve kullanılan bağlantı elemanlarının (vida, somun, pul vb.) miktarları firma kayıtları ve yerinde incelemeler üzerinden belirlenmiştir. Elektronik bileşenler (çok parametreli sensör ünitesi, RS485/GSM veri iletim modülü, şarj kontrol cihazı, PV panel ve akü) için tedarikçi teknik kılavuzları ve ürün veri sayfalarından kütle/performans bilgileri; piyasa alım fiyatlarından ise ekonomik veriler toplanmıştır. Kullanım safhasına ilişkin enerji veri seti, Ankara koşulları için PV üretim yeterliliğinin kontrolüne dayandırılmış; 50 Wp PV panel ve 6,7 saat/gün etkin süre varsayımıyla yıllık üretim kapasitesi hesaplanmış, cihazın ortalama yükünden türetilen tüketim verisi ile tutarlılık sağlanmıştır.

İkincil veriler, öncelikle Ecoinvent v3.7.1 (Cut-off) arka plan süreçlerinden seçilmiştir. AL5754 için alüminyum yarı mamul/piyasası, elektrik için TR/RER uygun pazar karışımı, karton/plastik ambalaj, karayolu/deniz taşımacılığı ve ömür sonu (geri dönüşüm/bertaraf) zincirleri bu veri tabanından alınmıştır. Elektronik bileşenlerde veritabanında birebir ürün bulunmayan durumlarda, işlevsel olarak en yakın süreçler (ör. “electronics for control units”, “electronic component, active” vb.) proxy olarak kullanılmıştır. Sosyal göstergeler için Soca ve gerektiğinde EXIOBASE sektör temsilleri başvurulan ikincil kaynaklar arasındadır. Güneşlenme verileri ve PV üretim potansiyeli kontrolünde ulusal (MGM) ve uluslararası (PVGIS/Global Solar Atlas) kaynaklar referans alınmış, senaryo parametreleri buna göre belirlenmiştir.

Tahmini veriler, üreticiden birebir ölçüm veya veri sağlanamayan alt kalemlerde kullanılmıştır. Bağlantı elemanları (vida, somun, pul) toplam etkiye çok küçük katkı yaptığı için sektör ortalaması bileşimle temsil edilmiştir. Montajdaki elektrik tüketimi, işlem sürelerine göre tipik el aleti katsayıları kullanılarak hesaplanmıştır. Tesis–kullanım noktası arası dağıtım, kg·km temelli ve 30 km şehir içi mesafe varsayımıyla modele eklenmiştir. Yurt dışından tedarik edilen akü senaryolarında rota ve mesafe (ör. Kore–Mersin denizyolu,

Mersin–Ankara karayolu; Avrupa limanı–İstanbul denizyolu, İstanbul–Ankara karayolu) literatürdeki tipik hat uzunlukları ve taşıma araç karışımlarıyla eşleştirilmiştir. Tüm tahminlerde belirsizlik düzeyi not edilmiş, uygun olduğunda duyarlılık analizinde sınanmak üzere alt–üst bantlar tanımlanmıştır.

Toplanan veriler OpenLCA 2.0.3'te süreç bazında yapılandırılmadan önce birimsel uyum (kütle için kg, enerji için kWh, taşıma için t·km, işçilik için h) sağlanmış; fonksiyonel birim "1 adet hava veri ölçüm istasyonunun 5 yıllık kullanımı" olacak şekilde tüm girdiler/çıktılar bu referansa ölçeklenmiştir. Çevresel veriler alüminyum işleme, elektronik bileşen tedariki, ambalaj, taşıma, kullanımda PV'den elektrik beslemesi ve ömür sonu geri dönüşüm/bertaraf adımlarını kapsayacak biçimde derlenmiş; ekonomik veriler birim fiyatlardan toplam maliyete (USD,2022) dönüştürülerek yalnızca input tarafında tanımlanmıştır. Sosyal veriler paydaş kategorilerine göre (çalışanlar, tedarik zinciri aktörleri, toplum/yerel topluluk) süreçlere bağlanmış; veri kaynağı, açıklama ve pedigree puanları ile birlikte kaydedilmiştir. Sistem yaklaşımı Allocation, cut-off by classification olarak seçilmiş, böylece ikincil malzemelerin sisteme yükle girmemesi ve atık bertaraf yüklerinin üretici sisteme tahsis edilmesi sağlanmıştır. Bu çerçevede, Hava Veri Ölçüm İstasyonun ham madde tedariki, elektronik bileşen alımı, montaj, ambalajlama, taşıma, kullanım ve ömür sonu süreçlerine ilişkin tüm veri akışları doğrulanmış, kaynaklandırılmış ve modellemeye hazır hale getirilmiştir.

Toplanan veriler, OpenLCA 2.0.3 yazılımında modüler yapıda ayrı süreçler olarak tanımlanmıştır. Her süreç uygun birimlerle ifade edilmiş, girdiler ve çıktılar arasındaki akış yönleri belirlenmiştir. Bu adımlar sayesinde tüm süreçlerin sisteme tutarlı biçimde entegrasyonu sağlanmıştır. Elde edilen veriler, çevresel, ekonomik ve sosyal olmak üzere üç ana başlık altında ayrıca değerlendirilmiştir.

Çevresel veriler

Çevresel veri seti, ürün sistemine giren hammaddelerin üretimi, taşınması ve işlenmesiyle ilgili süreçleri kapsayacak şekilde yapılandırılmıştır. Ham MDF, melamin kaplı yonga levha (suntalam), kenar bandı, metal donanım bileşenleri ve ambalaj malzemeleri gibi girdilerin üretim süreçleri için birincil veriler üretici firma ile yapılan görüşmeler ve saha gözlemleri yoluyla elde edilmiştir. Bu verilerin eksik kaldığı noktalarda Ecoinvent veritabanı referans

alınarak en yakın coğrafi bölgeyi temsil eden (örn. RER, GLO) süreçlerle ikincil veri kullanımı sağlanmıştır.

Üretim sürecinde kullanılan enerji türleri, elektrik tüketimi, atık oluşumu ve bertaraf yöntemleri yine hem birincil gözlemler hem de literatür verileri ile desteklenmiştir. Fire oranları; özellikle kesim, delik açma, boyama ve montaj gibi işlemler için doğrudan atölye gözlemlerine ve firma çalışanlarının beyanlarına dayalı olarak tahmin edilmiştir. Bertaraf edilen veya yeniden değerlendirilen malzemelerin süreçleri, OpenLCA sistemine çevresel etkiyi yansıtacak biçimde entegre edilmiş ve "cut-off" sistem yaklaşımı benimsenmiştir.

Ekonomik veriler

Ekonomik veriler, ürün sistemine dahil olan tüm malzeme, enerji ve işçilik girdilerinin parasal karşılıklarını kapsayacak şekilde yapılandırılmıştır. Üretici firmanın sağladığı teklif dosyaları, malzeme listeleri ve fatura örnekleri kullanılarak birincil veri elde edilmiştir. Her bir bileşen için birim fiyatlar, üretim yılı olan 2022 yılı itibarıyla değerlendirilmiş ve Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası'nın yayımladığı 2022 yılı ortalama USD kuru baz alınarak Amerikan doları cinsine çevrilmiştir.

Bu çalışmanın Yaşam Döngüsü Envanteri (Life Cycle Inventory- LCI) aşamasında kullanılan veriler, hava veri ölçüm istasyonunun gerçek koşullara en uygun şekilde modellenmesini sağlamak amacıyla çeşitli kaynaklardan elde edilmiştir. ISO 14040 ve ISO 14044 standartları doğrultusunda veriler; birincil, ikincil ve tahmini veri olarak sınıflandırılmıştır.

Birincil veriler, hava veri ölçüm istasyonunun üretiminde kullanılan AL5754 alüminyum parçalar, elektronik bileşenler (sensör, modem, jel akü, güneş paneli, MPPT şarj kontrol cihazı ve koruma kutusu), bağlantı elemanları, işçilik süreleri ve enerji tüketim değerleri üzerinden temin edilmiştir. Bu veriler, üretici teklif dosyaları, teknik kataloglar ve piyasa verileri aracılığıyla elde edilmiş; parçaların ağırlıkları ve maliyetleri doğrudan üretici firmalardan alınan dokümanlara dayandırılmıştır.

İkincil veriler, Ecoinvent 3.7.1 ve SOCA veri tabanları kullanılarak sağlanmıştır. Özellikle elektrik üretimi, ambalajlama, taşıma, atık yönetimi, plastik ve kauçuk parçaların üretim

süreçleri için ikincil veri setleri kullanılmıştır. Veri setleri seçilirken, mümkün olduğunda Türkiye (TR), Avrupa bölgesi (RER) veya küresel (GLO) temsiliyete sahip süreçler tercih edilmiştir. Sosyal göstergeler için SOCA veri tabanı temel alınmış, risk seviyeleri ve paydaş gruplarına ilişkin göstergeler ikincil veri kapsamında değerlendirilmiştir.

Tahmini veriler ise doğrudan ölçülmesi veya tedarik edilmesi mümkün olmayan akışlar için kullanılmıştır. Özellikle batarya değişim senaryosunda bakım için gereken taşıma mesafesi, işçilik süresi ve enerji tüketimi literatür verileri ve benzer LCA çalışmalarından alınan ortalama değerler üzerinden belirlenmiştir. Ayrıca, montajda kullanılan düşük etkili bağlantı elemanları (vida, pul, klips vb.) ve veritabanlarında doğrudan yer almayan, genel başlık altında 'electronic component' olarak modellenmiş elektronik parçalar için sektörel ortalamalara ve benzer çalışmalara dayalı tahmini veriler kullanılmıştır.

Toplanan tüm veriler OpenLCA 2.0.3 yazılımında modüler süreçler halinde modellenmiş; çevresel, ekonomik ve sosyal boyutları kapsayacak şekilde entegrasyonu sağlanmıştır. Bu kapsamda:

- Çevresel veriler, malzeme ve enerji tüketimleri, üretim süreçleri, atık oluşumları ve bertaraf yöntemlerini;
- Ekonomik veriler, malzeme, enerji ve işçilik maliyetlerini;
- Sosyal veriler ise işçi sağlığı, sosyal risk göstergeleri ve Evrensel Tasarım ilkeleri ile ilgili parametreleri içerecek biçimde yapılandırılmıştır.

6.2.2. Verilerin düzenlenmesi

Hava Veri Ölçüm istasyonu için veri düzenleme süreci, toplanan bilgilerin modelleme öncesi standartlaştırılması ve bütünleştirilmesi amacıyla yürütülmüştür. ISO 14040 standardında belirtildiği üzere, veri toplamanın ardından verilerin doğrulanması, birim süreçlere atanması ve fonksiyonel birimin referans akışına bağlanması gerekmektedir. Bu aşama, sadece verilerin teknik olarak uyumlaştırılmasını değil, aynı zamanda sistem sınırları ve fonksiyonel birim ile metodolojik tutarlılığın sağlanmasını da kapsamaktadır.

Guinée (2002) tarafından aktarılan kılavuzlara uygun olarak veri düzenlemesinde üç temel adım izlenmiştir: (i) veri doğrulama, (ii) verilerin ilgili birim süreçlere atanması, (iii)

referans akış üzerinden normalize edilmesi. Bu çalışmada söz konusu adımlar, hava veri ölçüm istasyonu için OpenLCA yazılımına veri girişine hazırlık amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle, teknik kataloglardan, üretici tekliflerinden ve saha gözlemlerinden elde edilen birincil veriler, Ecoinvent ve Soca veri tabanlarından sağlanan ikincil verilerle çapraz kontrol edilerek doğrulanmıştır. Bu doğrulama sürecinde elektronik bileşenlerin katalog verileri ile AL5754 alüminyum parçaların üretici teklifleri kontrol edilmiş; ambalaj, lojistik ve atık yönetimine ilişkin eksik veriler ise ikincil kaynaklarla tamamlanmıştır. Veritabanlarında doğrudan yer almayan ve 'electronic component' başlığı altında modellenen sensör, modem ve MPPT şarj kontrol cihazı gibi bileşenler için benzer süreçlerden yararlanılmış; bu bileşenler ağırlık ve maliyetleri dikkate alınarak uygun kategorilere dağıtılmış ve bir sonraki aşama olan verilerin işlenmesi sürecinde ayrıntılı olarak ele alınmak üzere sisteme aktarılmıştır.

Malzeme ve ürün akışları ağırlık esas alınarak kilogram (kg) birimine, enerji tüketimleri kilovat-saat (kWh) birimine çevrilmiştir. Taşıma verileri lojistik modellemede uluslararası kabul gören ton-kilometre (t·km) birimi üzerinden sisteme işlenmiştir. Ekonomik veriler, farklı kaynaklardan elde edilen TL veya EUR cinsindeki fiyatların Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası'nın 2022 yılı ortalama kuru esas alınarak Amerikan doları (USD) cinsine dönüştürülmesiyle uyumlaştırılmıştır. İşçilik süreleri saat (h) birimine standardize edilmiştir.

Ayrıca, montaj ve bakım süreçlerinde çalışan işçi sayıları ve çalışma süreleri belirlenerek ilerleyen aşamalarda sosyal göstergelerin hesaplanmasına yönelik altyapı hazırlanmıştır. Enerji girdilerinde kullanılan elektrik akışları, şebeke ve fotovoltaik üretim ayrımına göre seçilmiş; dağıtım kayıpları ve dönüşüm verimlilikleri literatürden alınarak modele entegre edilmiştir.

Bu düzenlemeler sonucunda tüm veriler fonksiyonel birim esas alınarak uyarlanmış, Excel tabanlı tablolar oluşturularak OpenLCA'ya doğrudan aktarılabilecek formata getirilmiştir. Böylece, bir sonraki aşama olan 6.2.3 Verilerin İşlenmesi için gerekli altyapı hazırlanmıştır.

6.2.3. Verilerin işlenmesi

Bu alt bölümde, 6.2.2'de düzenlenmiş ve birimsel olarak uyumlaştırılmış veri kümesinin, ISO 14044:2006'nın 5.3.3 maddesinde tanımladığı biçimde birim süreçlere yerleştirilmesi, fonksiyonel birimin referans akışıyla ilişkilendirilmesi ve ürün sistemi içinde tutarlı olarak bağlanması ele alınmaktadır. Bu çalışmada söz konusu adımlar OpenLCA 2.0.3 yazılımı aracılığıyla, GreenDelta (2020) tarafından yayımlanan resmi kullanıcı kılavuzuna uygun biçimde yürütülmüştür. OpenLCA'da "flow" malzeme, enerji, taşıma veya atık gibi bir sürecin giriş ve çıkışlarını; "process" bu akışları belirli bir işlev için bir araya getiren birim süreci; "product system" ise bu süreçlerin bağlanmasıyla oluşturulan ve analizlerin yürütüldüğü üst düzey modeli ifade etmektedir. hava veri ölçüm istasyonu için oluşturulan ürün sistemi "LCSA_HVO" olarak adlandırılmış, süreçler HVO [Süreç Adı] formatında tanımlanmış ve nihai çıktı için referans süreç HVO_Usage olarak belirlenmiştir.

Veri işleme aşamasında, EK-7 ve EK-8'de özetlenen miktarlar, birimler ve maliyetler süreçlerin Input/Output alanlarına girilmiş; her bir girdi ve çıktı için Amount ve Unit alanları düzenleme aşamasında standardize edilen biçimiyle (kg, kWh, kg·km, h vb.) kullanılmıştır. Maliyetler yalnızca input tarafında tanımlanarak mükerrer kayıtların önüne geçilmiştir. Süreçler arası sürekliliğin sağlanması için, bir süreçte output olarak tanımlanan akış bir sonraki sürecin input alanına bağlanmış ve ilgili provider seçilmiştir. Bu bağlantı yapılmadığında etki değerlendirmesi aşamasında sıfır değerlerin ortaya çıkabileceği göz önünde bulundurulmuştur.

Hava veri ölçüm istasyonu için oluşturulan süreçler arasında gövde parçalarının alüminyum tedariki, elektronik bileşenlerin satın alınması, montaj, ambalajlama, taşıma, kullanım (tek batarya ve batarya değişimi senaryoları) ve ömür sonu aşamaları bulunmaktadır. Bu süreçlerde kullanılan veriler, birimlere çevrilmiş halleriyle işlenmiş; eksik kalan noktalarda ikincil veri setleri (Ecoinvent 3.8, Soca) kullanılmıştır. Enerji kullanımı, PV panel üretim ve tüketim dengesine göre modele dahil edilmiş, atık akışları için uygun bertaraf veya geri dönüşüm süreçleri eklenmiştir.

Bu aşamada ayrıca LCC kapsamında maliyet verileri "Net Costs" yaklaşımı ile süreç girdileri üzerinden girilmiş; malzeme, enerji, işçilik ve lojistik maliyetleri ayrı ayrı tanımlanmıştır. Sosyal veriler için ise Soca veri tabanı göstergeleri, Evrensel Tasarım ilkeleri

ve paydaş temelli göstergeler süreçlerin “Social Aspects” sekmesine kaydedilmiştir. Böylece çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlara ait veriler aynı sistem sınırları içinde entegre edilmiştir.

İlk olarak HVO_AL5754 Parts Manufacturing süreci tanımlanmıştır. Bu aşamada AL5754 alüminyum parçaların ağırlıkları, üretici tekliflerinden alınan maliyetlerle birlikte sisteme input olarak girilmiştir. Akışlar kilogram (kg) cinsine çevrilmiş, fire oranları %5 kabul edilerek modele dahil edilmiştir. Çıkış akışı “HVO AL5754 processed part” olarak tanımlanmıştır. Bu süreçte kullanılan elektrik girdisi için electricity, medium voltage akışı eklenmiş, birim kWh üzerinden maliyet ve tüketim miktarı girilmiştir.

Ardından HVO_Electronic Component Procurement süreci oluşturulmuştur. Bu süreçte sensör, modem, akü (VRLA jel ve $LiFePO_4$ alternatifleri), şarj kontrol cihazı, güneş paneli ve koruma kutusu gibi bileşenler işlenmiştir. Veritabanında doğrudan bulunmayan bileşenler için benzer süreçler (ör. electronics, for control units; electronic component, active) proxy olarak kullanılmıştır. Bileşenlerin ağırlıkları teknik kataloglardan, maliyetleri ise piyasa tekliflerinden alınarak USD cinsine dönüştürülmüştür. Senaryo 1’de Tracer $LiFePO_4$ akü, Senaryo 2’de ise Orbus VRLA jel akü modele dahil edilmiştir.
Montaj süreci (HVO_Assembly) altında alüminyum gövde ve elektronik bileşenler birleştirilmiştir. Montaj için yüksek beceri gerektiren işçilik girdisi saat (h) cinsinden eklenmiştir. Vida, pul ve somun gibi bağlantı elemanları polypropylene, granulate, synthetic rubber ve steel, low-alloyed akışları üzerinden temsil edilmiştir. Çıktı akışı “HVO_Assembled” olarak kaydedilmiştir.

Ambalajlama süreci (HVO_Packaging) için karton kutu ve plastik malzemeler input olarak girilmiş, ambalaj sonrası oluşan atıklar waste packaging paper ve waste plastic, mixture akışlarıyla çıktı olarak işlenmiş ve bertaraf/treatment süreçlerine yönlendirilmiştir. Taşıma süreci (HVO_Transport) iki farklı rotaya göre modellenmiştir. VRLA akü için rota Çin’den Mersin Limanı’na deniz taşımacılığı (~8000 km), buradan Ankara’ya kara taşımacılığı (~480 km) ve şehir içi dağıtım (~30 km) olarak belirlenmiştir. $LiFePO_4$ akü için rota Almanya içi kara taşımacılığı (~300 km) ile Hamburg Limanı’na, ardından İstanbul’a deniz taşımacılığı (~2200 km), Ankara’ya kara taşımacılığı (~450 km) ve şehir içi dağıtım (~30 km) şeklinde tanımlanmıştır. Tüm taşıma akışları ton-kilometre (t·km) birimi üzerinden hesaplanmış ve maliyetler kg·km başına USD değerleri ile modele eklenmiştir.

Kullanım aşaması (HVO_Usage) iki senaryo üzerinden modellenmiştir. Senaryo 2'de VRLA jel akü 2,5 yıl sonunda değiştirilecek şekilde sisteme girilmiş, atık batarya waste lead-acid battery çıktısı olarak eklenmiştir. Senaryo 1'de $LiFePO_4$ akü 5 yıl boyunca değiştirilmeden kullanılmıştır. Enerji ihtiyacının karşılanabilirliği Ankara'nın 2022–2027 dönemi güneşlenme verilerine dayalı olarak hesaplanmıştır [139]. 50 Wp panel için günlük 6,7 saatlik verimli kullanım üzerinden 5 yıl boyunca yaklaşık 611 kWh PV üretimi öngörülmüş, cihazın tüketimi (~175 kWh) ile karşılaştırıldığında yeterli olduğu görülmüştür. Bu nedenle şebeke beslemesi modele dahil edilmemiş, electricity by solar photovoltaic akışı 175 kWh olarak girilmiştir.

Son aşama olan HVO_End of Life sürecinde alüminyum parçalar geri dönüşüm, elektronik bileşenler e-atık bertaraf ve ambalaj malzemeleri geri dönüşüm/treatment süreçlerine yönlendirilmiştir. Çıkış akışı "End of Life" olarak tanımlanmıştır. Tüm süreçlerde veri girişleri fonksiyonel birim olan "1 adet hava veri ölçüm istasyonunun 5 yıllık kullanımı" esas alınarak yapılmıştır. Excel tablolarındaki Amount, Unit ve Cost alanları OpenLCA'ya uygun biçimde işlenmiş; maliyet, enerji ve sosyal göstergeler aynı sistem sınırları içinde bütünleşik olarak değerlendirilmiştir.

Hava veri ölçüm istasyonu için yapılan sosyal yaşam döngüsü değerlendirmesi kapsamında, üretim, montaj, kullanım ve bertaraf gibi süreçlere ilişkin sosyal etkiler çok paydaşlı bir yaklaşımla ele alınmıştır. Süreçler Soca veri tabanındaki risk seviyeleri ile eşleştirilmiş, gösterge düzeyindeki analizler için hem sayısal hem niteliksel girişler değerlendirme sistemine entegre edilmiştir. Özellikle farklı senaryolar yalnızca enerji tüketimi açısından değil, bakım sıklığı, kullanıcı etkileşimi, montaj kolaylığı ve erişilebilirlik gibi sosyal parametreler üzerinde de farklı etkilerin incelenmesine olanak tanır. Ayrıca, bataryaların farklı coğrafi konumlardan tedarik edilmesi, sosyal göstergelerde bölgesel farklılıklara yol açabilmektedir. Bataryanın üretiminin kent merkezine, köy alanına ya da tarım sahasına yakınlığı; istihdam olanakları, çocuk işçiliği riski, iş sağlığı ve güvenliği uygulamaları gibi göstergelerin etkilenme düzeyini değiştirebilmektedir. Bu nedenle değerlendirmeler yalnızca ortalama ülke verilerine değil, senaryoya özgü varyasyonlara da dayandırılmıştır.

Kullanım sürecinde insan-makine etkileşimi sınırlı görünse de, cihazın sunduğu veriler üzerinden dolaylı olarak sürdürülebilir kararlar alınabilmektedir. Bu nedenle, yalnızca doğrudan etkileşimli göstergeler değil, bilgiye erişim, geribildirim, esneklik, algılanabilirlik

gibi nitelikler de değerlendirme kapsamına alınmıştır. Bu doğrultuda EK-8'de sunulan "Örnek Olay–2: Evrensel Tasarım İlkeleri için Sezgisel Kontrol Listesi", hava veri ölçüm'nün kullanım ve bakım aşamalarındaki sosyal uygunluğunu 7 temel ilke altında analiz etmeyi amaçlamaktadır.

Her bir ilke, UD1'den UD7'ye kadar, farklı kullanıcı profillerine (ör. saha teknisyeni, çiftçi, son kullanıcı) göre uzmanlar tarafından değerlendirilmiştir. Örneğin:

- UD1a – Eşit Kullanım: Cihaz tüm kullanıcılar için aynı erişim yolunu sunmakta; ancak dijital araçlara erişimi olmayan kullanıcılar açısından bu eşitlik zayıflayabilmektedir.
- UD3a – Sezgisel Kullanım: Bilgi sunumu sade olsa da, düşük teknoloji okuryazarlığına sahip kullanıcılar için sezgisel erişim sınırlı kalmaktadır.
- UD5d – Hatalara Tolerans: Özellikle bakım aşamasında teknikerin yaptığı işlemlerde sistem geri alma desteği sağlamamaktadır, bu da hata yönetimi açısından risk doğurmaktadır.

Her bir alt gösterge için üç uzmandan alınan puanlar, OpenLCA sistemine uygun olarak normalize edilmiş, risk seviyesi ile çarpılarak karakterizasyon faktörü üzerinden sosyal etki değeri hesaplanmıştır. Bu analiz yöntemi sayesinde hem teknik hem sezgisel değerlendirmeler birleştirilmiş ve sosyal sürdürülebilirlik bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır. Tüm süreçlerde veri girişleri fonksiyonel birim olan "1 adet hava veri ölçüm istasyonunun 5 yıllık (43829 saat) kullanımı" esas alınarak yapılmıştır. Excel tablolarındaki Amount, Unit ve Cost alanları OpenLCA'ya uygun biçimde işlenmiş; maliyet, enerji ve sosyal göstergeler aynı sistem sınırları içinde bütünleşik olarak değerlendirilmiştir. EK-8'de yer alan sezgisel kontrol listesi, bu sürecin sosyal boyutunun uzman görüşü temelli, nicel bir yaklaşımla değerlendirilmesini sağlamaktadır.

6.3. Etki Değerlendirme

Bu bölümde Hava Veri Ölçüm istasyonunun yaşam döngüsü boyunca çevresel, ekonomik ve sosyal etkileri bütünleşik olarak değerlendirilmiştir. Fonksiyonel birim "1 adet Hava Veri Ölçüm istasyonunun 5 yıllık kullanımı" olarak tanımlanmış, tüm alt bölümlerde aynı sistem sınırları ve veri temelini korunmuştur. Modelleme OpenLCA üzerinde, süreç ve akış verileri Ecoinvent (cut-off) sistem modeli ile ve sosyal göstergeler Soca tabanlı veri setleriyle

yürütülmüştür. Tüm süreçlerde Excel tablolarındaki Amount, Unit ve Cost alanları OpenLCA'ya uygun biçimde işlenmiş; maliyet, enerji ve sosyal göstergeler aynı sistem sınırları içinde bütünleşik olarak değerlendirilmiştir. Senaryo analizi kapsamında, tek bataryalı (HVO_1) ve çift bataryalı (HVO_2) düzenekler karşılaştırılmıştır.

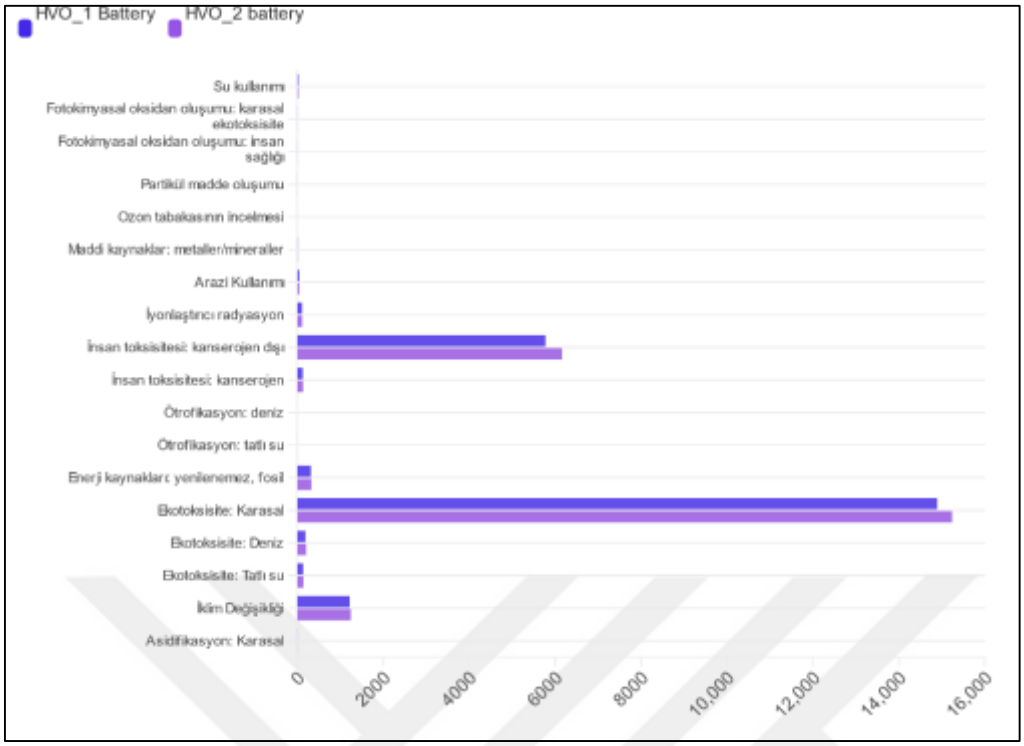
Çevresel değerlendirme için ReCiPe 2016 v1.03 Midpoint (H) yöntemi kullanılmış, normalizasyon ve ağırlıklandırma uygulanmamıştır (kategori sonuçları mutlak değerler üzerinden yorumlanacaktır). Detaylar ve kategori bazlı bulgular 6.3.1'de sunulacaktır.

Ekonomik değerlendirme (LCC) için Net costs yaklaşımı benimsenmiştir: ürün sistemindeki maliyet akışları (işçilik, malzeme, enerji, taşıma, montaj vb.) tek etkili kategori "maliyet (USD)" altında toplanmış ve sistem sonuçları toplam maliyet olarak raporlanacaktır. Para birimi dönüştürmeleri Excel'de belirlenen kur birliğine göre yapılmıştır. Detayları 6.3.2'de açıkça belirtilmiştir.

Sosyal değerlendirme (SLCA) için SWIM + UDA çerçevesi kullanılmıştır. Burada SWIM tabanlı sosyal alt kategori ve paydaş göstergeleri, çalışmaya özgü Evrensel Tasarım (UD) göstergeleri ile genişletilmiş; UD ilkeleri (kullanıcı tarafından tanımlanan gösterge seti) SLCA yöntemi içine ek bir gösterge ailesi olarak entegre edilmiştir. Puanlama/karakterizasyon mantığı ve senaryo karşılaştırmalarında izlenen adımlar 6.3.3'te detaylandırılacaktır.

6.3.1. Çevresel bulgular

HVO_Usage ürün sistemi için ReCiPe 2016 Midpoint (H) etki kategorilerinde (n=18) sonuçlar alınmış; "normalization & weighting: none" ve "allocation: process defaults" ayarları kullanılmıştır. Çıktılar, HVO_1 Battery ile HVO_2 battery senaryoları için kategori bazında karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.2. Örnek olay-2 için ReCiPe midpoint 2016 (H) etki yöntemi sonuçları

Şekil 6.2'de gösterildiği üzere mutlak büyüklük açısından en yüksek etkiler şu kategorilerde yoğunlaşmıştır:

- Ekotoksisite: karasal sonuçlarına göre tek batarya (HVO_1) seçeneğinde 14 889,40 kg 1,4-DCB-Eq karasal ekotoksisite gözlenirken, çift batarya (HVO_2) seçeneğinde değer 15 236,90 kg 1,4-DCB-Eq olup toplam yük büyüklüğü bakımından baskın kategoriyi oluşturmaktadır.
- İnsan toksisitesi: kanserojen dışı kategorisinde HVO_1 için 5 770,05 kg 1,4-DCB-Eq, HVO_2 için 6 155,98 kg 1,4-DCB-Eq hesaplanmış ve insan sağlığı açısından ikinci büyük yükü oluşturmuştur.
- İklim değişikliği kategorisinde HVO_1'de 1 220,48 kg CO_2-Eq, HVO_2'de 1 244,65 kg CO_2-Eq oluşmuş; bu kategori toplam sistem yüküne orta düzeyde katkı yapmıştır.
- Enerji kaynakları: yenilenemez (fosil) göstergesinde HVO_1 için 316,73 kg oil-Eq, HVO_2 için 323,89 kg oil-Eq elde edilmiş ve fosil kaynak talebinde sınırlı bir artış gözlenmiştir.

- Ekotoksisite: deniz kategorisinde HVO_1'de 192,93 kg 1,4-DCB-Eq, HVO_2'de 201,30 kg 1,4-DCB-Eq hesaplanmıştır. Sucul ekosistemler için orta düzey bir yük söz konusudur.

Şekil 6.2.'de görüldüğü üzere, hem insan toksisitesi (kanserojen dışı) hem de karasal ekotoksisite bu ürün sisteminde büyüklük olarak öne çıkan kategorilerdir; iklim değişikliği ve fosil kaynak kullanımı bunları izlemektedir. Çift bataryaya geçişin etkisi, tüm kategorilerde artış yönünde ve %1.05–%14.30 bandındadır; kategoriler genelinde ortalama artış %3.48'tir. Çizelge 6.1.'de göreli artışın en belirgin olduğu ilk beş kategori verilmiştir.

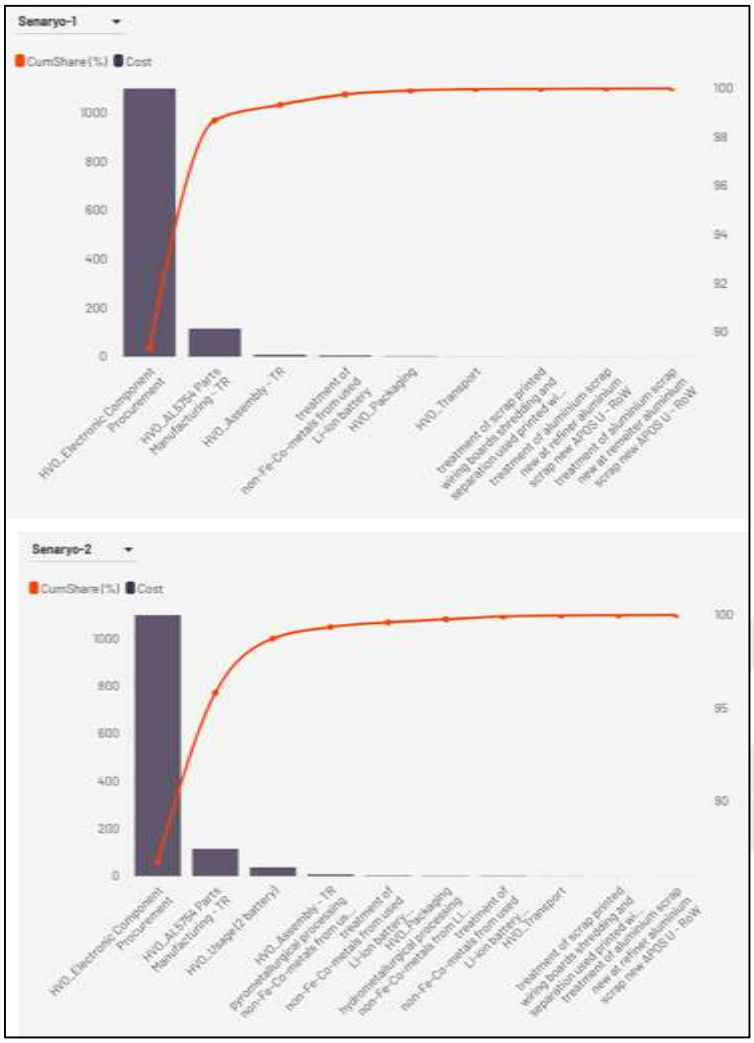
Çizelge 6.1. Senaryo-2'ye geçişin çevresel etkilere etkisi: ilk beş kategori için mutlak ve göreli farklar (ReCiPe 2016 Midpoint, H)

Kategori	Birim	HVO_1	HVO_2	Mutlak fark	Göreli fark (%)
Maddi kaynaklar: metaller/mineraller	kg Cu-Eq	9,00	10,29	1,29	14,30
İnsan toksisitesi: kanserojen dışı	kg 1,4-DCB-Eq	5 770,05	6 155,98	385,93	6,69
Asidifikasyon: karasal	kg SO_2-Eq	4,58	4,83	0,25	5,30
Ekotoksisite: tatlı su	kg 1,4-DCB-Eq	135,49	141,37	5,88	4,35
Ekotoksisite: deniz	kg 1,4-DCB-Eq	192,93	201,30	8,37	4,34

Çift bataryaya geçiş, ReCiPe midpoint kategorilerinin tamamında artışa neden olmaktadır. En belirgin fark metal/mineral kaynak talebi ve kanserojen dışı insan toksisitesi kategorilerindedir. Büyüklük açısından sistemin başlıca yükü karasal ekotoksisite ve kanserojen dışı insan toksisitesi kategorilerinde yoğunlaşmaktadır; iklim değişikliği katkısı bu iki kategoriye göre daha düşük düzeydedir ve çift bataryaya geçişle sınırlı artış göstermektedir.

6.3.2. Ekonomik bulgular

Ekonomik değerlendirme Net costs yaklaşımıyla gerçekleştirilmiştir. Fonksiyonel birim "1 adet Hava Veri Ölçüm istasyonunun 5 yıllık kullanımı" olup, sistem modeli Ecoinvent cut-off'tur. "Cost" verileri LCC sayfasından alınmış; karşılaştırma Senaryo-1 ve Senaryo-2 için aynı sistem sınırlarıyla yapılmıştır. Normalizasyon/ağırlıklandırma ekonomik boyutta uygulanmaz; sonuçlar tek etkili kategori "maliyet" olarak raporlanmıştır.



Şekil 6.3. Örnek olay-2 için pareto garfikleri: Senaryo-1 (üstte), Senayo-2 (altta)

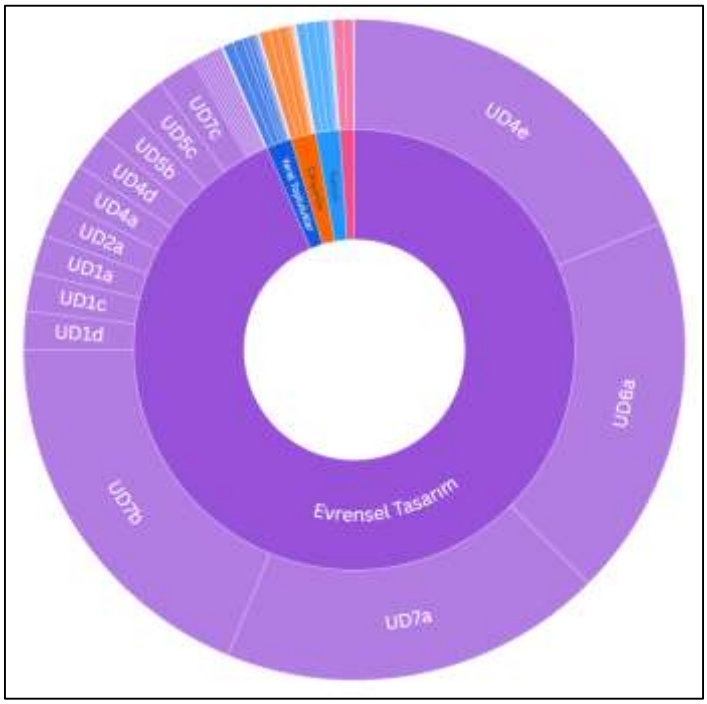
Senaryo-1'de HVO_Electronic Component Procurement kalemi 1 100,00 ile toplam maliyetin %89,35'ini oluştururken, HVO_AL5754 Parts Manufacturing - TR 115,00 ile %9,34 paya sahiptir; bu iki kalemin kümülatif payı %98,69'a ulaşmaktadır. Senaryo-2'de yine Electronic Component Procurement 1 100,00 ile %86,76, AL5754 Parts Manufacturing 115,00 ile %9,07 pay almıştır; Senaryo-2'ye özgü HVO_Usage (2 battery) kalemi 36,90 ile %2,91 ek katkı getirmiş; ilk üç kalemin kümülatif payı %98,74 olmuştur. Kalan süreçlerin her biri %1'in altında paya sahiptir (montaj: 7,83; Li-ion geri kazanım/treatment girdileri: 3,22 ve 2,02; paketleme: 2,03; taşıma: 0,63 vb.).

Senaryo-2, Senaryo-1'e göre 36,80 USD daha yüksek brüt maliyet üretmiştir; bu fark %2,99'luk bir artışa karşılık gelir. Farkın kaynağı, Senaryo-2'de yer alan HVO_Usage (2 battery) kaleminin 36,90'lık ilavesidir; diğer başlıca kalemlerde tutarlar aynıdır. Net

toplamlarda Senaryo-2'de 163,20 USD daha düşüktür. Pay grafikleri (Pareto) her iki senaryoda da ilk 2–3 kalemin toplam maliyetin %95–99'unu topladığını göstermektedir: Senaryo-1'de ilk iki kalem %98,69, Senaryo-2'de ilk iki kalem %95,83, ilk üç kalem %98,74 kümülatif paya ulaşmaktadır. Bu durum, ekonomik açıdan "sıcak noktalar"ın ağırlıklı olarak elektronik bileşen tedariki ve AL5754 parça imalatı etrafında yoğunlaştığını; Senaryo-2'de kullanım kaleminin sınırlı ama görünür bir ek yük getirdiğini teyit eder.

6.3.3. Sosyal bulgular

Sosyal etki değerlendirmesi, kullanıcı tanımlı bir LCIA yöntemi (LCSA_SD) altında SIWM (Social Impacts Weighting Method) + UD (Evrensel Tasarım) göstergelerinin birlikte ele alınmasıyla yürütülmüştür. Fonksiyonel birim "1 adet HVO istasyonunun 5 yıllık kullanımı" olup sistem modeli Ecoinvent cut-off'tur. SIWM göstergeleri paydaş temelli (Çalışanlar, Toplum, Değer Zinciri Aktörleri) yapılandırılmış; UD göstergeleri ise çalışmaya özgü olarak yöntem içine eklenmiş ve tek bir "UD" gösterge ailesi halinde değerlendirilmiştir. Normalizasyon/ağırlıklandırma bu yöntem içinde gösterge tanımlarının bir parçasıdır; ek bir dışsal normalizasyon uygulanmamıştır. Karşılaştırma Senaryo-1 ve Senaryo-2 için aynı sistem sınırlarıyla yapılmıştır.



Şekil 6.3. Örnek olay-2 için sosyal bulgulara ait sunburst grafiği

Sunburst grafikler, bileşik sosyal puanın büyük bölümünün UD gösterge ailesinde yoğunlaştığını; paydaş temelli SIWM göstergelerinin toplam içindeki payının ikincil düzeyde kaldığını göstermektedir. UD göstergeleri her iki senaryoda da kullanıcı grubu sabit olduğu için aynıdır; dolayısıyla senaryolar arası fark, esasen SIWM tarafındaki dağılımlardan kaynaklanmaktadır.

UD ailesi içinde özellikle farklı tekniklerle uyumluluk (UD4e), nötr vücut pozisyonu (UD6a), kritik unsurlar için net görüş hattı (UD7a) ve tüm kullanıcılara rahat erişim (UD7b) alt göstergelerinin ağırlığının belirgin olduğu görülmektedir. Bu yapı, HVO istasyonunun arayüz, erişim ve kullanım ergonomisine ilişkin tasarım ilkelerinin sosyal kabul/katılım boyutunu güçlü biçimde belirlediğine işaret eder. UD göstergeleri Senaryo-1 = Senaryo-2 olduğundan, bu aile içindeki dağılım ve büyüklükler senaryodan bağımsızdır.

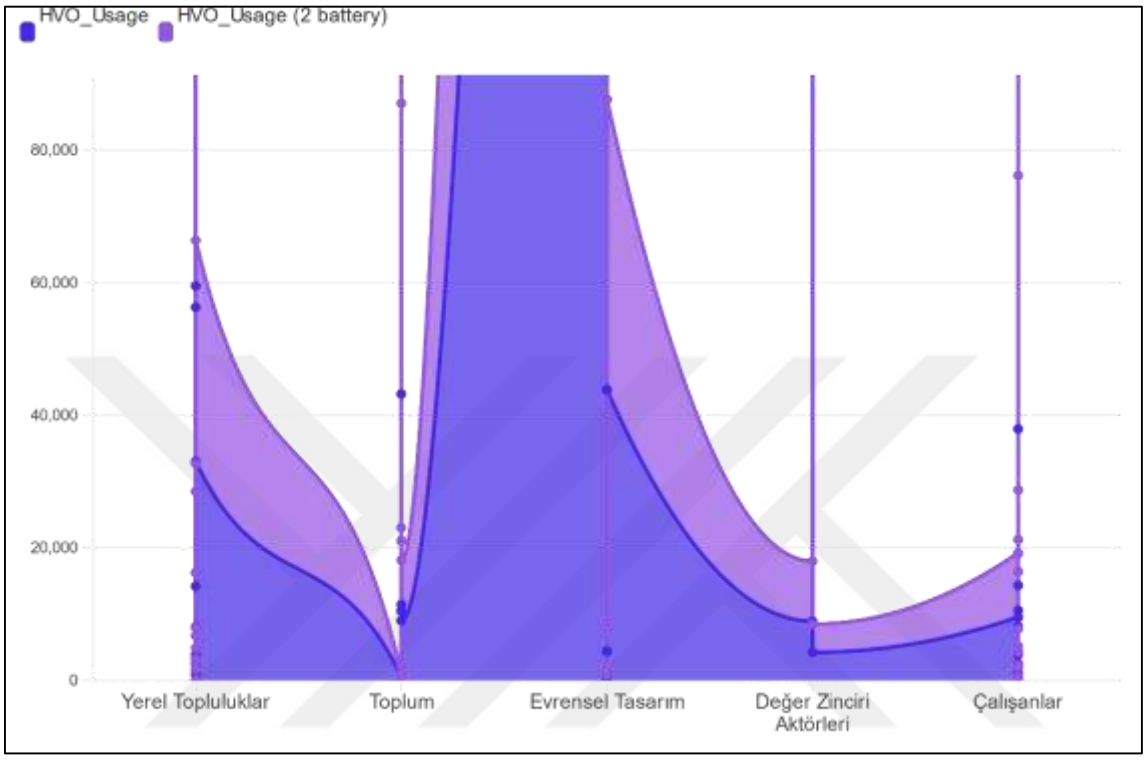
Çalışan paydaşında çocuk işçiliğiyle ilişkili alt göstergelerin (ör. WO1b), sendika yoğunluğu (WO5d) ve sosyal güvenlik harcamaları (WO7b) göstergelerinin baskın dilimler oluşturduğu izlenmektedir. Bu durum, tedarik zinciri bileşenleri (özellikle elektronik bileşenler ve metal bileşenler) kaynaklı sektör risklerinin sonuçlar üzerinde etkili olduğunu düşündürür. Senaryolar arası karşılaştırmada, UD sabit olduğundan çalışan göstergelerindeki farklılıklar görsel dağılımlarda ikincil düzeydedir; ana desen korunmaktadır.

Toplum paydaşında okuryazarlık göstergeleri (kadın/erkek ve toplam) en yüksek katkıyı vermektedir; toplam sağlık harcaması ve barış/istikrarla ilişkili göstergeler onları izlemektedir. Bu desen, istasyonun kurulum/işletim coğrafyasındaki makro-sosyal bağlamın (insani gelişmişlik, eğitim ve sağlık göstergeleri) bileşik sosyal puan üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koyar. Senaryo değişimi bu paydaşta da dağılımın yönünü değiştirmemekte, yalnızca küçük ölçekli oynamalar görülmektedir.

Bu paydaşta kamu sektörü yolsuzluğu ve haksız rekabet/tekel ihlali varlığı göstergelerinin payı öne çıkmaktadır; bu da tedarik pazarlarının kurumsal kalite ve rekabetçi yapı açısından geliştirilmesinin sosyal riskleri azaltmada etkili olacağını göstermektedir. Senaryolar arası farkların yapısal bir değişime yol açmadığı, dağılımın benzer kaldığı gözlenmektedir.

UD ailesi iki senaryo için değişmez olduğundan, Senaryo-2'nin (iki batarya) sosyal sonuçlar üzerindeki etkisi SIWM tarafındaki maruziyetler üzerinden okunur. Paydaş bazlı dağılımlar

benzer kalmakta; Senaryo-2'de gözlenen farklar mutlak büyüklüklerde sınırlı artışlar olarak görünmektedir. Bu, batarya sayısındaki artışın sosyal performansı yeniden dağıtmaktan ziyade mevcut desen üzerine küçük ek yükler bindirdiğini düşündürmektedir.



Şekil 6.4. Örnek olay-2 için paydaş bazında alan grafiği

Şekilde (SIWM+UD paydaş aileleri bazında toplam puan dağılımı) UD sütunu her iki senaryoda da en yüksek seviyededir ve eğriler çakışır; bu, UD'nin senaryodan bağımsız sabitliğini doğrular. Toplum ve Çalışanlar paydaşlarında Senaryo-2 eğrisi Senaryo-1'in biraz üzerinde seyreder; farklar mutlak büyüklükte küçük artışlar düzeyindedir. Değer Zinciri Aktörleri ve Yerel Topluluklar paydaşlarında senaryolar arası ayrışma ihmal edilebilir ölçektedir. Bu desen, batarya sayısındaki artışın sosyal performansı yeniden dağıtmadığını, mevcut yapının üzerine sınırlı ek yükler bindirdiğini gösterir.

Bu doğrultuda, örtüşen bulgular ve tasarım/strateji çıkarımları kapsamında (i) UD boyutu, bileşik sosyal puanda en yüksek olumsuz etkiyi temsil eden ana kolondur; dolayısıyla UD4e, UD6a, UD7a-b gibi göstergeler azaltım hedefli tasarım kararlarında öncelikli olarak ele alınmalı ve iyileştirilmelidir. (ii) SIWM tarafında iyileştirme için öncelik alanları, çalışan paydaşında sendika/sosyal güvenlik ve çocuk işçiliği riskinin azaltılması; değer zinciri

tarafında ise yolsuzlukla mücadele ve rekabetçi pazar uygulamalarıdır. (iii) Senaryo seçimi, sosyal sonuçların yapısını değiştirmemekte; bu nedenle sosyal performans optimizasyonu daha çok tedarikçi seçimi, sözleşme şartları ve izleme/denetim mekanizmalarıyla ilişkilidir.

6.4. Yorumlama

Bu örnek olayda, Senaryo 1 (Avrupa menşeli batarya, beş yıl boyunca değişimsiz kullanım) ile Senaryo 2 (Çin menşeli batarya, beş yıl içinde bir kez değişim) karşılaştırması yapılmış olup, Senaryo 2'nin çevresel etkilerde ortalama %3,48 oranında artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu artış özellikle metaller/mineraller kategorisinde %14,30 düzeyinde belirgin bir yükseliş göstermektedir. Ekonomik maliyetlerde %2,99 (36,80 USD brüt fark) ve sosyal risklerde %0,08 oranında artış da dikkate alındığında, batarya değişiminin tedarik zinciri, üretim ve yaşam sonu süreçlerinde ek yük oluşturduğu görülmektedir. Bu bulgular, ürün sisteminin yaşam döngüsü boyunca sürdürülebilirlik performansını etkileyen kritik unsurları ortaya koymakta ve tasarım kararlarının çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlardaki etkileşimlerini vurgulamaktadır.

LCSA bulgularını bütüncül bir biçimde yorumlamak amacıyla TOPSIS yöntemi uygulanmıştır. Bu yaklaşım, literatürde sürdürülebilirlik senaryolarını sıralamak için yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir. Kriterler olarak çevresel boyut, ekonomik boyut ve sosyal boyut seçilmiş; ağırlıklar eşit olarak belirlenmiş ve tüm kriterler minimize edilme esasına göre değerlendirilmiştir.

Çizelge 6.1.'de sunulan karar matrisi, ham değerleri göstermekte olup, çevresel normalize toplam, ekonomik maliyet ve sosyal risk saatlerini her iki senaryo için karşılaştırmalı olarak yansıtmaktadır. Bu matris, TOPSIS hesaplamalarının temelini oluşturmakta ve Senaryo A'nın tüm kriterlerde daha düşük değerlere sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 6.1. Örnek olay-2 için karar matrisi (ham değerler)

Alternatif	Çevresel (toplam etki)	Ekonomik (USD)	Sosyal (mrh toplam)
Senaryo 1	445,18	1,231	233,761
Senaryo 2	461,74	1,268	233,948

Çizelge 6.2.'de yer alan TOPSIS yakınlık katsayıları, senaryoların ideal çözüme göre sıralamasını belirtmekte olup, Senaryo A'nın 1,00 katsayısı ile mutlak üstünlüğünü vurgulamaktadır.

Çizelge 6.2. Örnek olay-2 için TOPSIS yakınlık katsayıları

Alternatif	Yakınlık Katsayısı	Sıralama
Senaryo 1	1,00	1
Senaryo 2	0,00	2

Çizelge 6.3.'te sunulan duyarlılık analizi sonuçları, ağırlık dağılımlarının (örneğin bir boyutun %50 ağırlık aldığı senaryolar) sıralamayı etkilemediğini göstermekte olup, sonuçların ağırlık varsayımlarına karşı dayanıklılığını teyit etmektedir.

Çizelge 6.3. Örnek olay-2 için duyarlılık analizi sonuçları

Alternatif	Çevresel %50 Ağırlık	Ekonomik %50 Ağırlık	Sosyal %50 Ağırlık	Ortalama
Senaryo 1	1,00	1,00	1,00	1,00
Senaryo 2	0,00	0,00	0,00	0,00

TOPSIS'te görülen uç değerler (Senaryo 1'in 1,00; Senaryo 2'nin 0,00 çıkması) kullanılan verilerin yapısından kaynaklanmaktadır. Senaryo 1, tüm kriterlerde diğer alternatifi açık biçimde geçtiği için, yöntem mesafe hesaplamasında doğal olarak bu kadar belirgin bir ayrım üretir. Bu durum ikili karşılaştırmalarda sık görülür ve veri setinin tutarlı olduğunu gösterir. Bununla birlikte, kriterlerdeki farkların aslında çok büyük olmaması (%3 civarında olması) pratikte daha dikkatli ve ayrıntılı bir yorum gerektirebilir. Duyarlılık analizi, ağırlıklar değişse bile sıralamanın bozulmadığını göstererek sonucun sağlam olduğunu doğrulamaktadır. Yine de gelecekte belirsizliği daha iyi yansıtan Fuzzy TOPSIS gibi yöntemlerle çalışma zenginleştirilebilir.

Monte Carlo simülasyonu, Örnek Olay-2'de çevresel göstergelerin istatistiksel güvenilirliğini belirlemek için uygulanmıştır. OpenLCA 2.0.3 yazılımında ecoinvent 3.7.1 veri tabanı kullanılarak 1000 iterasyon üzerinden yürütülen simülasyon, girdilerdeki olası varyasyonları dikkate alarak her bir etki kategorisi için sonuçların güven aralıklarını hesaplamıştır. Analiz sonucunda, iklim değişikliği, asitleşme, malzeme kaynak kullanımı ve su tüketimi gibi göstergelerde belirsizliğin düşük olduğu (CV<%15), buna karşın insan

toksisitesi ve ekotoksisite kategorilerinde varyasyonun yüksek olduğu (CV>%60) görülmüştür. Bu durum, metal üretimi ve atık bertarafı gibi arka plan süreçlerinde yer alan parametre belirsizliklerinden kaynaklanmaktadır. Senaryo 1 ve Senaryo 2 karşılaştırmasına ait Monte Carlo sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

Çizelge 6.4. Senaryolara ait monte carlo simulasyonu sonuçları

Etki Kategorisi	Birim	Ort. S1	Ort. S2	Std. Sapma S1	Std. Sapma S2	CV (%) S1	CV (%) S2	Fark (%)
İnsan toksisitesi kanserojen olmayan	kg 1,4-DCB eq	9 284,2	11 942,0	7 849,7	58 089,4	84,5	486,4	+28,6
Malzeme kaynakları metaller/mineraller	kg Cu eq	9,9	11,2	1,3	1,2	12,6	11,0	+12,8
Asitleşme karasal	kg SO_2 eq	5,2	5,4	0,7	0,7	13,5	12,2	+4,8
İnsan toksisitesi kanserojen	kg 1,4-DCB eq	343,0	357,4	971,0	1 034,0	283,0	289,3	+4,2
Arazi kullanımı	$m^2 \cdot$yıl tarım eq	54,6	56,8	13,0	14,4	23,8	25,4	+4,0
Fotokimyasal oksidan oluşumu insan sağlığı	kg NOx eq	3,9	4,0	0,6	0,6	15,7	14,6	+2,3
Fotokimyasal oksidan oluşumu karasal ekosistemler	kg NOx eq	4,0	4,1	0,6	0,6	15,4	14,4	+2,3
Su kullanımı	m^3	25,2	25,4	2,1	2,0	8,2	8,0	+0,9
Ötrofikasyon tatlı su	kg P eq	1,3	1,3	0,5	0,4	34,0	32,4	+0,4
Ekotoksisite karasal	kg 1,4-DCB eq	21 657,8	21 229,4	14 912,9	13 041,8	68,9	61,4	−2,0

Çizelge 6.4.'te verilen sonuçlara göre; Senaryo 2, 10 etki kategorisinin sekizinde ortalama değer bazında artış göstermiştir. Bu durum, ikinci bataryanın sisteme eklenmesinin malzeme ve enerji tüketimini artırarak çevresel yükü yükseltmiş olduğunu göstermektedir. Belirsizlik düzeyleri en yüksek olan kategoriler insan toksisitesi ve ekotoksisite olup, bu alanlarda güven aralıklarının genişlediği ve istatistiksel farkın temkinli yorumlanması gerektiği belirlenmiştir. Malzeme kaynakları kategorisinde %12,8, insan toksisitesi (kanserojen olmayan) kategorisinde ise %28,6 oranında artış kaydedilmiştir; bu farklar, ikinci bataryanın üretiminde kullanılan metal ve kimyasal bileşenlerin çevresel yükü artırdığını göstermektedir. Karasal ekotoksisite kategorisinde ise yaklaşık %2 oranında azalma gözlenmiş, bu da batarya bileşimindeki farklı hammaddelerin toksik etkileri kısmen azalttığını işaret etmektedir. Genel olarak, Monte Carlo analizi Senaryo 2'nin ortalama

etkilerinin artma eğiliminde olduğunu, ancak farkların birçoğunun belirsizlik aralıkları içinde kaldığını göstermiştir.

Performans/güvenilirlik gerekleri ikinci bataryayı zorunlu kılmıyorsa, Senaryo-1 çevresel yük ve brüt maliyet açısından daha tercih edilebilir görünmektedir. Sosyal profilde ise iki senaryo yakın seyretmektedir. Ekonomik açıdan, batarya birim fiyatının görece uygunluğu kısa vadede Senaryo-2'yi maliyet açısından cazip gösterebilir; ancak LCC perspektifinde toplam sahip olma maliyeti içinde batarya ömrü ve olası yenileme döngüleri, kapasite kaybına bağlı performans/işletme etkileri, bakım-izleme gereksinimleri ile bertaraf/geri kazanım (EoL) maliyetleri dikkate alındığında, uzun vadede bu cazibenin sürdürülebilir olmadığı değerlendirilmektedir; bu hüküm ilgili parametreler için yürütülecek duyarlılık analizi ile sınanmalıdır.

İkinci bataryanın süreklilik, yedeklilik veya saha koşulları nedeniyle teknik bir gereklilik olduğu durumlarda, Senaryo-2 seçilebilir; ancak bu durumda aşağıdaki azaltım seti birlikte uygulanmalıdır:

- Metal/mineral talebini düşürecek hafifletme ve geri dönük içerik kullanımı (örn. AL5754 kalınlık/işleme optimizasyonu, alternatif malzeme/tedarik),
- Elektronik tedarikte çalışma standartları ve yolsuzlukla mücadele şartlarını içeren sözleşmeler (sendika/sosyal güvenlik göstergeleri ve kurumsal kalite için denetim),
- İmalat ve montajda enerji karmasının iyileştirilmesi (yenilenebilir payının artırılması)
- Li-ion geri kazanım veriminin artırılmasına yönelik EoL stratejileri.

Sosyal tarafta UD göstergeleri en yüksek olumsuz katkıyı verdiğinden, erişilebilirlik–ergonomi tasarım kararlarının (ör. görüş hattı, erişim mesafeleri/kuvvet, montaj yüksekliği ayarlanabilirliği) iyileştirme hedefleri olarak belirlenmesi toplam sosyal yükün düşürülmesini destekleyecektir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez, sürdürülebilir Evrensel Tasarım odağında LCSA'yı uygulayarak çevresel, ekonomik ve sosyal boyutları aynı sistem sınırı ve fonksiyonel birim altında bütünleştirmiştir. Sosyal boyutun ölçülebilirliğini artırmak amacıyla Evrensel Tasarım ilkeleri SLCA'ya gösterge ailesi olarak entegre edilmiştir. Yöntem, OpenLCA 2.0.3 yazılımı ve ecoinvent 3.7.1 ile Soca v2 veritabanları kullanılarak Mutfak Dolapları (Örnek Olay-1) ve Hava Veri Ölçüm İstasyonu (Örnek Olay-2) üzerinde sınanmıştır. Elde edilen sonuçlar, çok ölçütlü karar verme bağlamında yalnızca karar desteği sağlamak üzere TOPSIS ile sentezlenmiştir. Bu araç ana katkının yerine geçmeden bulguların bütüncül yorumlanmasına yardımcı olmuştur.

Araştırmanın genel bulguları, çevresel etkilerin tekil bir operasyon yerine çoğunlukla arka plan tedarik zincirlerinde yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Özellikle enerji karması, metal ve kimyasal üretimi ile lojistiğin belirli etki kategorilerinde baskın olduğunu göstermektedir. Bu durum, tasarım ve mühendislik kararlarının yalnızca ürün bileşenleriyle sınırlı kalmaması; tedarik zinciri yönetişimi, izlenebilirlik ve süreç enerjisi gibi unsurları da kapsaması gerektiğini göstermektedir.

Mutfak dolapları örnek olayında ReCiPe 2016 Midpoint (H) yöntemiyle elde edilen sonuçlar, karasal ekotoksisite, fosil kaynak kullanımı, partikül madde oluşumu ve toksisite kategorilerinde tedarik zinciri süreçlerinin belirleyici olduğunu göstermiştir. Özellikle ağır vasıta lojistiğinde fren balatası aşınması ve yol tozu kaynaklı metal içerikli parçacıkların (Cu, Sb, Zn) karasal ekotoksisite yükünü artırdığı; panel, reçine ve yüzey kaplama kimyasallarının ise insan toksisitesi ve fotokimyasal ozon oluşumu gibi kategorilere anlamlı katkı yaptığı belirlenmiştir. Malzeme kütlesinin azaltılması, geri dönük içerik hedeflerinin tanımlanması, düşük emisyon profilli kaplama ve bağlayıcıların seçilmesi ile proses enerjisinin yenilenebilir kaynaklarla karşılanması, çevresel etkiler üzerinde en yüksek iyileştirme potansiyelini sunmaktadır.

Ekonomik açıdan Yaşam Döngüsü Maliyetlendirmesi (LCC) bulguları, toplam maliyetin ağırlıklı olarak bileşen ve aksesuar tedarikinden kaynaklandığını; bu nedenle ulaşım ağının kısaltılması, tedarikçilerin yerelleştirilmesi ve tedarik mesafelerinin azaltılmasının toplam

sahip olma maliyetini düşürmede modül standardizasyonu ve kütle azaltımına kıyasla daha belirleyici kaldıraçlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Düşük VOC içeren yüzey ve kaplama sistemleri, çevresel ve operasyonel riskleri azaltma potansiyeli sunarken; süreçlerin elektrifikasyonu, tedarikçi konsolidasyonu ve lojistik optimizasyonu stok ve taşıma maliyetlerinde iyileşme sağlamaktadır.

Sosyal boyutta gerçekleştirilen SLCA+UD değerlendirmesi, modül yerleşimleri, tezgâh ve raf yükseklikleri, kulp ve çekmece tasarımları, açma-kapama kuvvetleri ile algılanabilir işaretlemelerin farklı kullanıcı profilleri açısından eşdeğer erişimi sınırlandırabildiğini göstermiştir. 5–95 yüzdelik dilim ergonomik aralıkların gözetilmesi, düşük kavrama kuvveti gerektiren donanımların seçilmesi ve kontrast ile dokunsal geri bildirimin artırılması hâlinde sosyal risk düzeylerinin belirgin biçimde azaldığı görülmüştür. UD tabanlı göstergeler, projeye ait ölçülendirilmiş teknik çizimlerin üç farklı alan uzmanı tarafından bağımsız olarak 0–1 aralığında puanlanmasıyla nicelleştirilmiş ve çoklu değerlendirici kullanımı sonuçların tekrarlanabilirliğini artırmayı hedeflemiştir.

TOPSIS değerlendirmesi, Örnek Olay-1'de çevresel etkileri azaltmayı önceleyen alternatifin (Alt1) eşit ağırlık varsayımı altında en uygun seçenek olarak öne çıktığını göstermektedir. Sosyal ağırlığın artırılması durumunda UD göstergelerini iyileştiren alternatifin (Alt2) performansı artmakta; maliyet odaklı alternatif (Alt3) ise ekonomik avantajına karşın çevresel etkiler açısından dezavantajlı kalmaktadır. Bu sonuçlar, tasarım kararlarında çevresel önceliklerin belirleyici bir rol oynadığını ve karar sürecinin bu çerçevede yapılandırılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Hava Veri Ölçüm İstasyonu örnek olayında sonuçlar, etkilerin büyük ölçüde batarya ve elektronik bileşen talebi ile saha lojistiği kaynaklı arka plan süreçlerinde yoğunlaştığını göstermiştir. Senaryo karşılaştırmaları, Avrupa menşeli batarya ve beş yıllık işletim süresini içeren Senaryo 1'in ideal çözüme en yakın alternatif olduğunu; duyarlılık analizlerinin bu sonucun farklı ağırlık varsayımları altında da korunduğunu ortaya koymuştur. LCC bulguları, kısa vadede daha düşük birim maliyetli görünen batarya seçeneklerinin, yenileme sıklığı ve ömür-performans ilişkisi nedeniyle toplam sahip olma maliyetini artırabildiğini göstermektedir.

Çevresel açıdan ek batarya ve elektronik bileşen gereksinimi, metal ve mineral akışlarını büyüterek toksisite ve kaynak kullanımı odaklı etki kategorilerinde artış riskine yol açmaktadır. Sosyal değerlendirmede UD göstergelerinin entegrasyonu, erişim mesafeleri ve kuvvet gereksinimleri, görüş hattının korunması, kontrol elemanlarının konumu ve montaj sırasında ayarlanabilir çalışma yüksekliği gibi ergonomi merkezli kararların sosyal risk düzeyini belirgin biçimde etkilediğini göstermiştir. Bu bulgu, sosyal boyutun yalnızca çalışma koşulları gibi makro göstergelerle değil, ürünün kullanım pratikleriyle ilişkilendirilerek zenginleştirilebileceğini ortaya koymaktadır.

Çalışma bazı sınırlılıklar içermektedir. Arka plan verilerinin ecoinvent cut-off modeline ve sağlayıcı eşleştirmelerine dayanması, bölgesel farklılıkların tam olarak yansıtılamamasına neden olabilir. Örnek Olay-1'de normalizasyon ve ağırlıklandırma uygulanarak kategoriler arası karşılaştırma kolaylaştırılmış; Örnek Olay-2'de ise mutlak etkilerin bağlam-içi okunmasını korumak amacıyla bu adımlar tercih edilmemiştir. SLCA kapsamındaki UD puanlamaları, üç uzmanın teknik çizimler üzerinden yaptığı değerlendirmelere dayanmaktadır. Panel büyüklüğü ve uzman profiline bağlı belirsizliklerin azaltılması için ileriki çalışmalarda daha geniş uzman panelleri, uyum analizleri ile saha gözlemleri ve kullanıcı testleriyle kalibrasyon önerilmektedir. Çok ölçütlü karar verme adımında ağırlık seçiminin öznellik içermesi nedeniyle duyarlılık analizlerinin birlikte raporlanması önemlidir. Gelecek çalışmalarda, UD göstergelerinin saha verileriyle desteklenmesi, dinamik LCA/LCC uygulamalarıyla zaman içinde değişen enerji karması ve geri dönüşüm verimlerinin dikkate alınması, pil ve elektronik bileşenler için gerçek saha verilerine dayalı ömür-maliyet modellerinin geliştirilmesi ve farklı SLCA veri tabanlarıyla karşı-doğrulama yapılması önerilmektedir.

Araştırma bulgularına dayalı olarak şu öneriler geliştirilebilir: Tasarım aşamasında modül yerleşimleri ve kontrol elemanlarının konumları, farklı kullanıcı profilleri için eşdeğer erişim ve düşük kavrama kuvveti gereksinimi sağlayacak biçimde standardize edilmeli; 5–95 yüzdelik dilim ergonomik aralıklar proje başlangıcında hedef değerler olarak tanımlanmalıdır. Üretim ve operasyon yönetiminde süreç elektrifikasyonu ve yenilenebilir enerji kullanımını önceleyen dönüşüm planları hazırlanmalı; düşük emisyon profilli kaplama ve kimyasal alternatifleri tercih edilmelidir. Tedarik zincirinde EPD'li girdiler önceliklendirilmeli, izlenebilirlik koşulları sözleşmelere entegre edilmeli ve mod seçimi ile güzergâh planlaması yoluyla karayolu taşımacılığına özgü emisyonlar azaltılmalıdır. Saha

bakımına ihtiyaç duyan sistemlerde uzaktan izleme ve arıza önleyici bakım kurguları benimsenerek bakım aralıkları uzatılmalıdır. Döngüsellik açısından sökülebilir ve servis edilebilir tasarım, malzeme ayrışabilirliği, üretici iade-geri kazanım programları ve pil geri kazanım veriminin artırılması önceliklendirilmelidir. Kamu alımlarında erişilebilirlik ve yaşam döngüsü maliyeti odaklı şartnamelerin teşvik edilmesi ve kurum içi ürün geliştirme karar aşamalarında LCSA kontrol listelerinin zorunlu hâle getirilmesi uygun olacaktır.

Sonuç olarak bu tez, sürdürülebilirlik ve Evrensel Tasarım ilişkisini yaşam döngüsü perspektifinden ele alarak tasarım kararlarının çevresel, ekonomik ve sosyal etkilerinin bütüncül biçimde değerlendirilmesini sağlamıştır. Elde edilen bulgular, özellikle çevresel etkilerin ve bu etkilerle ilişkili tasarım kararlarının ürün geliştirme süreçlerinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bu çalışma, bilime aşağıdaki başlıklarda özgün katkılar sunmaktadır:

- Evrensel Tasarım ilkelerinin SLCA'ya ölçülebilir göstergeler olarak entegrasyonu: Kapsayıcı tasarım ilkeleri, sosyal boyut kapsamında nicel olarak izlenebilir hâle getirilmiş ve SLCA çerçevesine sistematik biçimde dâhil edilmiştir.
- Endüstriyel ürünlerin LCSA yöntemiyle analiz edilmesi: Literatürde sınırlı sayıda ele alınan endüstriyel ürünler, aynı sistem sınırı ve fonksiyonel birim altında LCA, LCC ve SLCA boyutlarıyla birlikte değerlendirilmiştir.
- UDA - Evrensel Tasarım Etki Değerlendirme Yönteminin geliştirilmesi: Evrensel Tasarım ilkelerine dayalı özgün bir etki değerlendirme yaklaşımı tanımlanarak, sosyal etkilerin tasarım kararlarıyla doğrudan ilişkilendirilmesi sağlanmıştır.
- Paydaş kategorileri arasındaki ilişkiyi açıklayan "Kelebek Modeli" gösterimi: Tasarım, üretim ve kullanım bağlamında paydaşlar arası etkileşimleri görünür kılan kavramsal bir model önerilmiştir.
- Yöntemsel çerçevenin iki farklı ürün sistemi üzerinde sınanması: Farklı özelliklere sahip iki ürün sistemi üzerinden yöntem test edilmiş; tasarım, üretim ve tedarik süreçlerine yönelik somut ve uygulanabilir öneriler geliştirilmiştir.

Araştırma çıktılarının tasarım, üretim, tedarik ve politika düzeylerinde eşzamanlı olarak devreye alınması hâlinde, incelenen örnek olaylar ve benzer ürün/hizmet sistemleri için kayda değer bir sürdürülebilirlik kazanımı potansiyeli sunulmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). Climate change 2023: Synthesis report. *IPCC.* Geneva, 35-115.

2. United Nations Environment Programme. (2022). Emissions gap report 2022: The closing window. *UNEP*. Nairobi, 11-23.

3. United Nations. (2024). The Sustainable Development Goals report 2024. *UN*. New York, 8-51.

4. World Bank Group. (2023). World development report 2023: Migrants, refugees, and societies. *World Bank.* Washington, DC, 43-89.

5. International Organization for Standardization. (2006). ISO 14040: Environmental management: Life cycle assessment: Principles and framework. *ISO.* Geneva, 1-20.

6. International Organization for Standardization. (2008). ISO 15686-5:2008 Buildings and constructed assets: Service life planning: Part 5: Life cycle costing. *ISO*. Geneva, 1-44.

7. Benoît, C., Mazijn, B. (Editörler). (2009). Guidelines for social life cycle assessment of products. *UNEP/SETAC Life Cycle Initiative.* Paris, 1-104.

8. Zamagni, A., Pesonen, H.-L., Swarr, T. (2011). From LCA to SLCA: Progress in social life cycle assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment,* 16(7), 637–646.

9. United Nations Environment Programme / Society of Environmental Toxicology and Chemistry Life Cycle Initiative. (2011). Towards a life cycle sustainability assessment: Making informed choices on products. *UNEP/SETAC Life Cycle Initiative.* Paris, 1-86.

10. United Nations Environment Programme / Society of Environmental Toxicology and Chemistry Life Cycle Initiative. (2020). Guidelines for social life cycle assessment of products and organizations (2020 revision). *UNEP/SETAC Life Cycle Initiative.* Paris, 1-136.

11. Ekener, E., Moberg, Å. (2013). Exploring the usefulness of the social LCA approach: A comparative case study of two vehicle seats. *International Journal of Life Cycle Assessment,* 18(5), 965–976.

12. İnternet: Evrensel Tasarım İlkeleri (Sürüm 2.0). URL: https://design.ncsu.edu/wp-content/uploads/2022/11/principles-of-universal-design.pdf Son Erişim Tarihi: 14.12.2025.

13. Demir, S., Özdemir, V. (2024). Sectorial investigation of life cycle sustainability assessment in the context of case studies. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji,* 12(3), 684–701.

14. von Carlowitz, H. C. (1713). *Sylvicultura oeconomica: Oder haußwirthliche Nachricht und naturmäßige Anweisung zur wilden Baum-Zucht*. (1.Baskı). Leipzig: Braun.

15. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2014). State of the world's forests 2014: Enhancing the socioeconomic benefits from forests. *FAO*. Rome, 17-40.

16. Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., Behrens, W. W., III. (1972). *The limits to growth*. New York: Universe Books.

17. World Commission on Environment and Development. (1987). Our common future. *WCED*. Oxford, 1-300.

18. United Nations. (1992). Agenda 21: Programme of action for sustainable development. *UN*. Rio de Janeiro, 1-351.

19. Carroll, A. B. (1999). Corporate social responsibility: Evolution of a definitional construct. *Business & Society*, *38*(3), 268–295.

20. Elkington, J. (1997). *Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business*. Oxford: Capstone Publishing, 1-23.

21. Dalibozhko, A., Krakovetskaya, I. (2018). *Youth entrepreneurial projects for the sustainable development of global community: Evidence from Enactus program*. In Proceedings of the 31st International Business Information Management Association Conference (IBIMA), Milan, 2775–2786.

22. Wu, T., Rocha, J. C., Berry, K., Chaigneau, T., Hamann, M., Lindkvist, E., Qiu, J., Schill, C., Shepon, A., Crépin, A.-S., Folke, C. (2024). Triple bottom line or trilemma? Global tradeoffs between prosperity, inequality, and the environment. *World Development*, 178, 106595.

23. United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. *UN*. New York, 1-35.

24. Sachs, J. D., Lafortune, G., Kroll, C., Fuller, G., & Woelm, F. (2022). *Sustainable development report 2022: From crisis to sustainable development*. Cambridge University Press.

25. T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2019). On Birinci Kalkınma Planı 2019–2023. Ankara, 157-171.

26. İnternet: The SDG wedding cake. URL: https://www.stockholmresilience.org/research/research-news/2016-06-14-the-sdgs-wedding-cake.html Son Erişim Tarihi: 14.12.2025.

27. International Organization for Standardization. (1997). ISO 14040: Environmental management: Life cycle assessment: Principles and framework. *ISO*. Geneva, 1-12.

28. Guinée, J. B., (Editörler). (2002). *Handbook on life cycle assessment: Operational guide to the ISO standards*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 395-675.

29. Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., ve Olsen, S. I. (Editörler). (2018). *Life cycle assessment: Theory and practice*. Dordrecht: Springer, 1-1216.

30. Matthews, H.S., Hendrickson, C.T., Matthews, D.H. (2020). *Yaşam döngüsü değerlendirmesi: Önemli kararlar için nicel yaklaşımlar* (Çev. Ed. N. H. Orak). Akademisyen Kitabevi. (Eserin orijinali 2006'da yayımlandı), 94-144.

31. Franklin Associates. (1974). Resource and environmental profile analysis of nine beverage container alternatives. *Prairie Village*, 163-177.

32. Hunt, R.G., Franklin, W.E., Sellers, S. (1974). Resource and environmental profile analysis of nine beverage container alternatives. In Proceedings of the Institute of Environmental Sciences. *Anaheim,* 116–125.

33. Fava, J. A. (1991). A technical framework for life-cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 1(1), 3–6.

34. Tillman, A.M. (2000). Significance of decision-making for LCA methodology. *Environmental Impact Assessment Review*, 20(1), 113–123.

35. International Organization for Standardization. (2006). ISO 14040:2006 Environmental management: Life cycle assessment: Principles and framework. *ISO.* Geneva. 15-20.

36. Society of Environmental Toxicology and Chemistry. (1991). A Technical Framework for Life-cycle Assessment. *SETAC*. Pensacola. 1-92.

37. Curran, M. A. (2012). *Life Cycle Assessment Handbook: A Guide for Environmentally Sustainable Products*. (1.Baskı). Hoboken, NJ: Wiley. 1-672.

38. Finkbeiner, M., Inaba, A., Tan, R., Christiansen, K., Mark, H. (2006). The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(2), 80–85.

39. Baumann, H., Tillman, A.-M. (2004). *The Hitch Hiker's Guide to LCA: An Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Application*. (1.baskı). Lund: Studentlitteratur, 230-234.

40. Heijungs, R., Suh, S. (2002). *The Computational Structure of Life Cycle Assessment*. (1.baskı). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 184-186.

41. Nilsson, J., Bertling, L. (2007). *Comparison of LCC and LCA for assessment of environmental impacts of network components*. In IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, 1–8.

42. Ribeiro, I., Peças, P., Silva, A., Henriques, E. (2008). Life cycle engineering methodology applied to material selection: A fender case study. *Journal of Cleaner Production*, 16(17), 1887–1899.

43. Gluch, P., Baumann, H. (2004). The life cycle costing (LCC) approach: A conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making. *Building and Environment*, 39(5), 571–580.

44. Woodward, D. G. (1997). Life cycle costing: Theory, information acquisition and application. *International Journal of Project Management*, 15(6), 335–344.

45. International Organization for Standardization. (2017). ISO 15686-5:2017 Buildings and constructed assets: Service life planning: Part 5: Life-cycle costing. *ISO*. Geneva. 1-44.

46. Norris, G. A. (2001). Integrating life cycle cost analysis and LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 6(2), 118–120.

47. Simões, C.L., De Sá, R.F., Ribeiro, C.J., Bernardo, P., Pontes, A. J., Bernardo, C. A. (2016). Environmental and economic performance of a car component: Assessing new materials, processes and designs. *Journal of Cleaner Production*, 118, 105–117.

48. Ribeiro, I., Mendes, A.F.S., de Castro, A.T. (2008). Life cycle cost analysis of the environmental impact of the rehabilitation of bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*, 4(4), 323–334.

49. Bovea, M.D., Vidal, R. (2004). Increasing product value by integrating environmental impact, costs and customer valuation. *Resources, Conservation and Recycling*, 41(2), 133–145.

50. Rebitzer, G., Hunkeler, D. (2003). Life cycle costing in LCM: Ambitions, opportunities, and limitations. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(5), 253–256.

51. Swarr, T.E., Hunkeler, D., Klöpffer, W., Pesonen, H.L., Ciroth, A., Brent, A.C., Pagan, R. (2011). Environmental life-cycle costing: A code of practice. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(5), 389–391.

52. Jeswani, H.K., Azapagic, A., Barlett, A.I. (2015). Integrated life cycle sustainability assessment: A review. *Sustainable Production and Consumption*, 2(1), 25–33.

53. Heijungs, R., Guinée, J., Swarr, T.E. (2013). Life cycle costing in LCM: A review of research and practice. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(5), 939–949.

54. United States Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Asset Management. (2002). Life-Cycle Cost Analysis Primer. *FHWA.* Washington. 1-74.

55. Paragahawewa, U., Blackett, P., Small, B. (2009). *Social life cycle analysis (S-LCA): some methodological ıssues and potential application to cheese production in new zealand*. AgResearch/SAI Platform. New Zealand. 1-43.

56. Brent, A. C., Labuschagne, C. (2004). *Sustainable life cycle management: Indicators to assess the sustainability of engineering projects and technologies.* In IEEE International Engineering Management Conference, (1), 99–103.

57. Dreyer, L.C., Hauschild, M.Z., Schierbeck, J. (2006). A framework for social life cycle impact assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(2), 88–97.

58. Grießhammer, R., Barthel, L.P., Dérennaux, B. (2006). Feasibility Study: Integration of Social Aspects into LCA. *2.-0 LCA Consultants.* Freiburg. 1-87.

59. Jørgensen, A., Hauschild, M., Dreyer, L.C., Wangel, A. (2008). Methodologies for social life cycle assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(2), 96–103.

60. Reitinger, C., Dumke, M., Barosevcic, M., Hillerbrand, R. (2011). A conceptual framework for impact assessment within SLCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(4), 380–388.

61. International Organization for Standardization. (2010). *ISO 26000: Guidance on social responsibility*. *ISO*. Geneva, 1-25.

62. United Nations Environment Programme / SETAC Life Cycle Initiative. (2022). Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations - 2020 Pilot. *UNEP/SETAC Life Cycle Initiative.* Paris. 1-164.

63. Ciroth, A., Eisfeld, L. (2016). *PSILCA: A product social ımpact life cycle assessment database*: *Methodology, Data and Case Studies*. GreenDelta. Berlin. 1-94.

64. İnternet: SOCA Social Life Cycle Assessment Database. URL: https://www.openlca.org/databases/soca-social-lca-database/ Son Erişim Tarihi: 14.12.2025

65. Traverso, M., Asdrubali, F., Francia, A., Finkbeiner, M. (2012). Towards life cycle sustainability assessment: An implementation to photovoltaic modules. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(8), 1068–1074.

66. Finkbeiner, M., Schau, E. M., Lehmann, A., Traverso, M. (2010). Towards life cycle sustainability assessment. *Sustainability*, 2(10), 3309–3322.

67. Guinée, J.B., Heijungs, R. (2011). Life cycle sustainability analysis: framing questions to approaches. *Journal of Industrial Ecology*, 15(5), 656–658.

68. Kloepffer, W. (2008). Life cycle sustainability assessment of products. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(2), 89–95.

69. Zamagni, A., Pesonen, H.L., Swarr, T. (2013). From LCA to Life Cycle Sustainability Assessment: Concept, practice and future directions. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(9), 1637–1641.

70. Manzini, E., Vezzoli, C. (2003). *Product–Service systems and sustainability: opportunities for sustainable solutions*. UNEP: Paris. 1-96.

71. United Nations Environment Programme. (2020). Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations (2020 Revision). *UNEP*. Paris. 1-164.

72. Santoyo-Castelazo, E., Gujba, H., Azapagic, A. (2011). Life cycle assessment of electricity generation in Mexico. *Energy,* 36(3), 1488–1499.

73. Llatas, C., Soust-Verdaguer, B., Hollberg, A., Palumbo, E., Quiñones, R. (2022). BIM-based LCSA application in early design stages using IFC. *Automation in Construction, 138,* 104259.

74. Navarro, I.J., Penadés-Plà, V., Martínez-Muñoz, D., Rempling, R., Yepes, V. (2020). Life cycle sustainability assessment for multi-criteria decision making in bridge design: A review. *Journal of Civil Engineering and Management,* 26(7), 690–704.

75. Onat, N.C., Kucukvar, M., Tatari, O., Zheng, Q.P. (2016). Combined application of multi-criteria optimization and life-cycle sustainability assessment for optimal distribution of alternative passenger cars in U.S. *Journal of Cleaner Production,* 112, 291–307.

76. Traverso, M., Asdrubali, V.S.R., Francia, G. (2012). Towards life cycle sustainability assessment: An implementation to photovoltaic modules. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(8), 1068–1079.

77. Sungur Ergenoğlu, A. (2013). *Mimarlıkta kapsayıcılık: Herkes için tasarım*. (1. Baskı). İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi Basım Yayın Merkezi, 133.

78. Mace, R.L., Hardie, G.J., Place, J.P. (1991). *Accessible Environments: Toward Universal Design*. The Center for Universal Design, North Carolina State University.

79. Evcil, A. N. (2014). *Herkes için tasarım: Evrensel tasarım*. (1. Baskı). İstanbul: Boğaziçi Yayınları. 190.

80. Story, M. F., Mueller, J. L., Mace, R. (1998). *The Universal Design File: Designing for People of All Ages and Abilities*. (1. Baskı). Raleigh: Center for Universal Design, 10-27.

81. İnternet: American National Standard Specifications for Making Buildings and Facilities Accessible to, and Usable by, the Physically Handicapped (ANSI A117.1-1961). URL: https://www.govinfo.gov/content/pkg/COMPS-10651/pdf/COMPS-10651.pdf. Son Erişim Tarihi: 14.12.2025

82. İnternet: Architectural Barriers Act of 1968 (Public Law 90-480). URL: https://www.govinfo.gov/content/pkg/COMPS-10651/pdf/COMPS-10651.pdf Son Erişim Tarihi: 14.12.2025

83. Steinfeld, E., Maisel, J. (2012). *Universal design: creating ınclusive environments*. (3. Baskı). Londra: John Wiley & Sons. 275.

84. Ostroff, E., Preiser, W. (2001). *Universal design handbook*. (1. Baskı). Ohio: McGraw-Hill. 157.

85. Liu, Y., Hou, Y. (2010). *Notice of retraction: "Green and harmony" idea study based on the sustainable universal design.* The 2nd Conference on Environmental Science and Information Application Technology, Wuhan, 17–18.

86. Akyol, E. (2009). *Endüstriyel tasarım eğitiminde evrensel tasarım algısı*. Yüksek Lisans Tezi. Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

87. Demir, S. (2019). *Evrensel tasarım yaklaşımı kapsamında otobüs durağı tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

88. Kaplan, H. (2010). Yerel yönetimler için ulaşılabilirlik temel bilgiler el kitabı. *T.C. Başbakanlık Özürlüler İdaresi Başkanlığı.* Ankara. 11-21.

89. Memduhoğlu, H. B. (2007). Post-fordist üretim örgütlenmeleri ve işgörenler üzerindeki etkileri. *Üniversite ve Toplum,* 7(4), 28-56.

90. Story, M. F. (2001). *Universal design handbook*, (1. Baskı). New York: McGraw-Hill. 12–18.

91. Welch, P. (1995). Strategies for teaching universal design. (1. Baskı). Raleigh: MIG Communications, 121-128.

92. Dolap, H. K., Tutal, O. (2016). Herkes için sürdürülebilir ürün tasarımı: Braun Prize Tasarım Yarışması analizi. *Yaşlı Sorunları Araştırma Dergisi*, 9(2), 15–20.

93. Kadir, S.A., ve Jamaludin, M. (2013). Universal design as a significant component for sustainable life and social development. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 85, 179–190.

94. İnternet: Universal design in the decade of action. URL: https://www.un.org/sustainabledevelopment/decade-of-action/ Son Erişim Tarihi:14.12.2025.

95. European Disability Forum ve CBM Global. (2023). Universal design: The key to disability inclusion in climate action and urban resilience. Brussels. 1-28.

96. Vavik, T., Keitsch, M. (2010). Exploring relationships between universal design and social sustainable development. *Sustainable Development*, 18(5), 327–337.

97. Duman, E., Asilsoy, B. (2022). Developing an evidence-based framework of universal design in the context of sustainable urban planning in Northern Nicosia. *Sustainability*, 14(20), 13377.

98. Abdul Kadir, S. R., Jamaludin, M. (2013). Universal design as a significant component for sustainable life and social development. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 101, 894–905.

99. Farage, M. A., Miller, K. W., Ajayi, F., Hutchins, D. (2012). Design principles to accommodate older adults. *Global Journal of Health Science*, 4(2), 2–25.

100. Korkmaz, S. C., Bozkurt, M. (2022). Revisiting universal design principles in the post-pandemic world. *Sustainability*, 14(15), 9272.

101. García-Almirall, P., López-Gay, A. (2021). Universal design for social inclusion in urban contexts. *Buildings*, 11(8), 347.

102. Dolap, H. K. (2016). *Evrensel tasarım ve sürdürülebilirlik kavramlarının Braun Prize ödülleri üzerinden analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.

103. Steinfeld, E., Maisel, J., Paquet, V. (2021). *Universal design: Creating inclusive environments for all*. (2. Baskı). New york: Routledge. 107.

104. Boys, J. (2023). *Disability, space, architecture: A reader*. (1. Baskı). New York: Routledge. 94-95.

105. Mármol, A., Valderrama, C., González, F., Romero, D. (2023). Social life cycle assessment for industrial product development: A comprehensive review and analysis. *Heliyon*, 9(4), e22861.

106. Gompf, K., Traverso, M., Gensch, C.-O., Finkbeiner, M. (2020). Towards social life cycle assessment of mobility services: Systematic literature review and the way forward. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25, 668–682.

107. United Nations Environment Programme / SETAC Life Cycle Initiative. (2020). Guidelines for social life cycle assessment of products and organizations (2020 revision). *UNEP/SETAC Life Cycle Initiative.* Paris. 8-15.

108. Hatipoğlu, A. (2024). Sürdürülebilirlik bağlamında herkes için tasarım: Konut alanlarında karşılaştırmalı bir değerlendirme. *Şura Akademi (Erişilebilirlik)*, 5, 51-66.

109. Alqahtani, A., El Diraby, T., Abdulrahman, B., Alotaibi, K. (2025). Toward sustainable inclusive construction: A comprehensive life cycle assessment of disability needs requirements in civil engineering projects. *Journal of Disability Research*, 15(1), 35–49.

110. Global Disability Innovation Hub. (2022). Inclusive design strategy. *GDI Hub.* London. 9-11.

111. Zhang, B., Wei, M., Liu, Z., Liu, J. (2009). *Study of sustainable factors in universal design.* IEEE 10th International Conference on CAD/Conceptual Design, 74–77. doi:10.1109/CAIDCD.2009.5374950

112. Sala, S., Vasta, A., Mancini, L., Dewulf, J., Rosenbaum, E. (2015). Social life cycle assessment: State of the art and challenges for supporting product policies. *Publications Office of the European Union*. Luxembourg, 12-18.

113. Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (4. Baskı). Thousand Oaks: SAGE Publications. 42-45.

114. Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6. Baskı). Thousand Oaks: SAGE Publications. 30-38.

115. European Commission Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability. (2010). ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. *JRC*. Luxembourg. 314-348.

116. İnternet: PRé Sustainability. URL**:** https://simapro.com/ Son Erişim Tarihi: 14.12.2025

117. İnternet: GaBi (LCA for Experts) - Life Cycle Assessment software and data. URL: https://sphera.com/solutions/product-stewardship/life-cycle-assessment-software-and-data/ Son Erişim Tarihi: 14.12.2025

118. İnternet: Umberto- LCA software for experts. URL: https://www.ipoint-systems.com/software/umberto/ Son Erişim Tarihi: 14.12.2025

119. Mutel, C. L. (2017). Brightway: An open source framework for life cycle assessment. *Journal of Open Source Software*, 2(12), 236. doi:10.21105/joss.00236

120. İnternet: openLCA & Databases. URL: https://www.openlca.org/ Son Erişim Tarihi: 14.12.2025

121. Ciroth, A., Franze, J. (2013). LCA of an Ecolabeled Notebook: Consideration of Social and Environmental Impacts Along the Entire Supply Chain. *GreenDelta.* Berlin. 8-12.

122. İnternet: Ecoinvent database. URL: https://ecoinvent.org/database/ Son Erişim Tarihi: 14.12.2025

123. İnternet: U.S. Life Cycle Inventory Database. URL: https://www.nrel.gov/analysis/lci Son Erişim Tarihi: 14.12.2025

124. İnternet: European Reference Life Cycle Database (ELCD). URL: https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/ Son Erişim Tarihi: 14.12.2025

125. İnternet: Agri-footprint. URL: https://blonksustainability.nl/agri-footprint Son Erişim Tarihi: 14.12.2025

126. Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): Overview and methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 1218–1230.

127. İnternet*:* Social Hotspots Database (SHDB). URL: https://www.socialhotspot.org/ Son Erişim Tarihi:14.12.2025

128. Arcese, G., Lucchetti, M. C., Merli, R. (2017). A systematic literature review on social life cycle assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23, 422–432. doi:10.1007/s11367-016-1054-5

129. Nielsen, J. (1994). Heuristic evaluation. In J. Nielsen, R.L. Mack (Editör), *Usability inspection methods*, New York: John Wiley & Sons, 25–62.

130. Nielsen, J., Molich, R. (1990). *Heuristic evaluation of user interfaces.* In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Seattle, 249–256.

131. Lewis, J. R. (2014). Usability: Lessons learned and yet to be learned. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 30(9), 663–684.

132. International Organization for Standardization. (2006). ISO 14044:2006: Environmental management: Life cycle assessment: Requirements and guidelines. *ISO*. Geneva. 7-12.

133. İnternet: Curran, M. A. (2006). *Life Cycle Assessment: Principles and Practice*. U.S. EPA(EPA/600/R-06/060). URL: https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1000L86.PDF?Dockey=P1000L86.PDF Son Erişim Tarihi: 14.12.2025

134. İnternet: GreenDelta. (2020). *openLCA 1.9 User Manual*. GreenDelta. URL: https://www.openlca.org/wpcontent/uploads/2020/12/openLCA_1.9_User_Manual.pdf Son Erişim Tarihi: 14.12.2025

135. Hwang, C.-L., ve Yoon, K. (1981). *Methods for multiple attribute decision making.* In Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications: A State of the Art Survey, Berlin: Springer-Verlag, 58–191.

136. Behzadian, M., Khanmohammadi Otaghsara, S., Yazdani, M., ve Ignatius, J. (2012). A state of the art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39(17), 13051–13069.

137. Zamagni, A., Guinée, J., Heijungs, R., Masoni, P., ve Raggi, A. (2012). Lights and shadows in consequential LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(7), 904–918.

138. U.S. Environmental Protection Agency. (2008). Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems, Volume IV: Meteorological Measurements (Version 2.0). *U.S. EPA*. Research Triangle Park, NC, 1–181.

139. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2022). İklim Verileri ve Güneşlenme Süreleri, Ankara Bölge Müdürlüğü Raporları. *MGM*. Ankara.

EKLER

EK-1. Etik kurul raporu

T.C.
HİTİT ÜNİVERSİTESİ
GİRİŞİMSEL OLMAYAN ARAŞTIRMALAR ETİK KURULU

Sayı : 2023-271 06/12/2023
Konu: Başvuru Değerlendirme Sonucu

Sayın Öğr. Gör. Seher DEMİR

Etik Kurulumuza yapmış olduğunuz başvurunuzla ilgili kurul kararımız ve ilgili bilgiler aşağıda yer almaktadır.

Bilgilerinize rica ederim.

Başvuru Numarası	2023-309
Sorumlu Araştırmacı	Öğr. Gör. Seher DEMİR
Araştırma Başlığı	Sürdürülebilir Evrensel Tasarım için Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi Yönteminin İncelenmesi
Toplantı Tarihi	01.12.2023
Karar Numarası	2023-19

☒ Araştırma başvurunuz etik açıdan uygun bulunmuştur.

☐ Araştırmaya Kurum İzni/İzinleri alındıktan sonra başlanması uygun bulunmuştur.

☐ Başvurunun, ekte belirtilen düzeltmelerin yapılması halinde tekrar değerlendirilmesine karar verilmiştir.*

☐ Araştırma projesi etik açıdan uygun olmadığından başvurunun reddine karar verilmiştir.

EK-2. Sosyal veri tabanlarının kullandığı göstergelerin karşılaştırması

Paydaş	Alt Kategori	Gösterge	PSILCA	Soca
Toplum	Ekonomik Gelişmeye Katkı	Genç okuma yazma bilmeme oranı , erkek	✓	✓
		Genç okuma yazma bilmeme oranı , kadın	✓	✓
		Genç okuma yazma bilmeme oranı , toplam	✓	✓
		Kamu eğitim harcamaları	✓	✓
		Yetişkin okuma yazma bilmeme oranı (15+), erkek	✓	✓
		Yetişkin okuma yazma bilmeme oranı (15+), kadın	✓	✓
		Yetişkin okuma yazma bilmeme oranı (15+), toplam	✓	✓
		Sektörün ekonomik gelişime katkısı		✓
		Toplam katma değer		✓
	Sağlık ve Güvenlik	Cepten sağlık harcaması	✓	✓
		Dış kaynaklı sağlık harcaması	✓	✓
		Kamu sağlık harcaması	✓	✓
		Toplam sağlık harcaması	✓	✓
		Doğuşta yaşam beklentisi	✓	✓
		Çatışmaların önlenmesi ve hafifletilmesi	✓	
		Küresel Barış Endeksi		✓
Yerel Topluluklar	Doğal Kaynak Kullanımı	Biyokütle çıkarımı (alan başına)	✓	✓
		Fosil yakıt çıkarımı	✓	✓
		Maden cevheri çıkarımı	✓	✓
		Sanayi ve inşaat minerali çıkarımı	✓	✓
	Kirlilik ve Altyapı	Sanitasyon (kanalizasyon) kapsamı	✓	✓
		Temiz içme suyu kapsamı	✓	✓
		Ülkenin kirlilik seviyesi	✓	✓
	Su Kullanımı	Sanayi su kullanım oranı (toplam çekişe göre)	✓	✓
	Tüketici Sağlığı ve Güvenliği	Sağlık ve güvenlik ihlallerini tespit eden komisyon/kurum varlığı	✓	
		Tüketici sağlığı ve güvenliğini değerlendirme önlemleri	✓	
	Yerel Halklar	Yerli haklarına saygı	✓	
		Yerli halk varlığı	✓	✓
		Yerli Halk Hakları Koruma Endeksi		✓
	Çevre Yönetimi	Çevresel yönetim sistemleri (ISO 14001 vb.)	✓	✓
	Çevresel Ayak İzleri	Sera gazı ayak izi	✓	
		Çevresel ayak izleri	✓	
		İş gücü ayak izleri	✓	
		Orman alanı ayak izi		✓
		Su ayak izi		✓
		Tarım alanı ayak izi		✓
		Tehlike altındaki tür sayısı		✓
		Gömülü CO_2 ayak izi		✓
		Gömülü CO_2-eşdeğer ayak izi		✓

EK-2. (devam) Sosyal veri tabanlarının kullandığı göstergelerin karşılaştırması

Yerel Topluluklar (devam)	İstihdam ve Göç	Net göç oranı	✓	✓
		Sektördeki uluslararası göçmen işçiler	✓	✓
		Uluslararası göçmen stoku	✓	
		Ülke işsizlik oranı	✓	✓
		Göç alma oranı		✓
		Göç etme oranı		✓
		Mülteci oranı (toplam nüfusa göre)		✓
		Uluslararası göçmen stoku		✓
Çalışanlar	Adil Ücret	Asgari ücret (aylık)	✓	✓
		Sektörel ortalama ücret (aylık)	✓	✓
		Yaşanabilir ücret (aylık)	✓	✓
		Yaşanabilir ücret alt sınırı		✓
		Yaşanabilir ücret üst sınırı		✓
	Ayrımcılık	Cinsiyete dayalı ücret farkı	✓	✓
		Kadınların iş gücündeki oranı (toplam)	✓	
		Sektörel iş gücünde kadın oranı	✓	✓
		Sektörde erkek oranı		✓
	Sosyal Yardımlar ve Hukuki Konular	Sosyal güvenlik harcamaları	✓	✓
		Yasa ve çalışma yönetmeliklerinin ihlali kanıtı	✓	✓
	Zorla Çalıştırma	Zorla çalıştırma ile üretilen mallar	✓	✓
		Zorla çalıştırma sıklığı	✓	✓
		İnsan ticareti ile ilgili sıralama (tier placement)	✓	✓
	Çalışan Hakları	Dernek kurma hakkı	✓	✓
		Grev hakkı	✓	✓
		Sendika yoğunluğu	✓	✓
		Toplu pazarlık hakkı	✓	✓
		Çalışma süresi	✓	
		Süreç bazlı çalışma süresi		✓
		Çalışan başına haftalık çalışma saati		✓
	Çocuk İşçiliği	Çalışan çocuklar, erkek	✓	✓
		Çalışan çocuklar, kadın	✓	✓
		Çalışan çocuklar, toplam	✓	✓
	İş Sağlığı ve Güvenliği	Doğal afetlerden etkilenen çalışanlar	✓	✓
		Kapalı/açık alan hava ve su kirliliğine bağlı DALY kaybı	✓	✓
		Yeterli iş güvenliği önlemlerinin varlığı	✓	✓
		İşyerinde kaza oranı	✓	✓
		İşyerinde ölümcül kaza oranı	✓	✓
		Zorunlu sağlık ve güvenlik standart ihlalleri		✓
Değer Zinciri Aktörleri	Adil Rekabet	Haksız rekabet veya tekel yasası ihlali	✓	✓
	Sosyal Sorumluluk	Sosyal sorumluluğu teşvik (tedarik zinciri üyeliği)	✓	✓
	Yolsuzluk	Kamu sektörü yolsuzluğu	✓	✓
		Şirketlerin yolsuzluk ve rüşvete aktif katılımı	✓	✓

EK-3. Soca göstergeleri (evrensel tasarım ilkeleri eklenmiş)

Paydaş	Alt Kategori	Kod	Gösterge	Ölçüm Metriği
Çalışanlar	Çocuk İşçiliği	WO1a	Kadın çocuk işçi oranı	%
		WO1b	Erkek çocuk işçi oranı	%
		WO1c	Toplam çocuk işçi oranı	%
	Ayrımcılık	WO2a	Cinsiyete dayalı ücret farkı	%
		WO2b	Sektörde erkek oranı	%
		Wo2c	Sektörde kadın oranı	%
	Adil Ücret	WO3a	Yaşanabilir ücret alt sınırı	USD
		WO3b	Yaşanabilir ücret üst sınırı	USD
		WO3c	Ortalama aylık yaşanabilir ücret	USD
		WO3d	Asgari ücret (aylık)	USD
		WO3d	Sektörel ortalama ücret	USD
	Zorla Çalıştırma	WO4a	Zorla çalıştırma sıklığı	‰
		WO4b	Zorla çalıştırma ile üretilen mallar	Ürün sayısı
		WO4c	İnsan ticareti (trafficking in persons)	Tier
	Örgütlenme ve Toplu Pazarlık	WO5a	Dernek kurma hakkı	0–3 puan
		WO5b	Toplu pazarlık hakkı	0–3 puan
		WO5c	Grev hakkı	0–3 puan
		WO5d	Sendika yoğunluğu	%
	Sağlık ve Güvenlik	WO6a	DALY (hava ve su kirliliği kaynaklı)	1.000 kişi başına DALY
		WO6b	Yeterli iş güvenliği önlemlerinin varlığı	100.000 çalışan başına vaka
		WO6c	Ölümcül iş kazası oranı	100.000 çalışan başına vaka
		WO6d	Ölümcül olmayan iş kazası oranı	100.000 çalışan başına vaka
		WO6e	Zorunlu sağlık ve güvenlik standart ihlalleri	oran
		WO6f	Doğal afetlerden etkilenen çalışanlar	%
	Sosyal Yardımlar ve Hukuki Konular	WO7a	Yasa ve çalışma yönetmeliği ihlali kanıtı	Vaka sayısı
		WO7b	Sosyal güvenlik harcamaları	GSYH %
	Çalışma Süresi	WO8a	Çalışan başına haftalık çalışma saati	Saat
		WO8b	Süreç bazlı çalışma süresi	Saat
Değer Zinciri Aktörleri	Yolsuzluk	VC1a	Şirketlerin yolsuzluk ve rüşvete aktif katılımı	%
		VC1b	Kamu sektörü yolsuzluğu	Puan
	Adil Rekabet	VC2a	Haksız rekabet / tekel ihlali varlığı	100.000 çalışan başına vaka
	Sosyal Sorumluluk	VC2b	Sosyal sorumluluk girişimine üyelik	Şirket sayısı

EK-3. (devam) Soca göstergeleri (evrensel tasarım ilkeleri eklenmiş)

Toplum	Ekonomik Gelişime Katkı	SO1a	Sektörün ekonomik gelişime katkısı	GSYH %
		SO1b	Toplam katma değer	$/$
		SO1c	Kadın okuma yazma bilmeme oranı	%
		SO1d	Erkek okuma yazma bilmeme oranı	%
		SO1e	Toplam okuma yazma bilmeme oranı	%
		SO1f	Kamu eğitim harcamaları	GSYH %
		SO1g	Genç kadın okuma yazma bilmeme oranı	%
		SO1h	Genç erkek okuma yazma bilmeme oranı	%
		SO1i	Toplam genç okuma yazma bilmeme oranı	%
	Sağlık ve Güvenlik	SO2a	Yurtiçi ve dış kaynaklı sağlık harcamaları	%
		SO2b	Yurtiçi genel kamu sağlık harcaması	%
		SO2c	Küresel Barış Endeksi	Puan
		SO2d	Dış kaynaklı sağlık harcaması	%
		SO2e	Cepten sağlık harcaması	%
		SO2f	Kamu sağlık harcaması	%
		SO2g	Toplam sağlık harcaması	GSYH %
		SO2h	Doğuşta yaşam beklentisi	Yıl
Yerel Topluluk	Kaynaklara Erişim	LC1a	Sertifikalı çevresel yönetim sistemleri	Sertifika sayısı
		LC1b	Biyokütle çıkarımı (alan başına)	t/km²
		LC1c	Biyokütle çıkarımı (nüfus başına)	t/kişi
		LC1d	Fosil yakıt çıkarımı	t/kişi
		LC1e	Sanayi ve inşaat minerali çıkarımı	t/kişi
		LC1f	Maden cevheri çıkarımı	t/kişi
		LC1g	Sanayi su kullanımı (yenilenebilir su kaynaklarına göre)	%
		LC1h	Sanayi su kullanımı (toplam çekişe göre)	%
	Çevresel Ayak İzleri	LC2a	Tarım alanı ayak izi	ha/$
		LC2b	Orman alanı ayak izi	ha/$
		LC2c	Su ayak izi	ha/$
		LC2d	Tehlike altındaki tür sayısı	Tür/$
	Sera Gazı Ayak İzleri	LC3a	Gömülü CO_2 ayak izi	t/$
		LC3b	Gömülü CO_2-eşdeğer ayak izi	t/$
	Yerel İstihdam	LC4a	Ülkedeki işsizlik oranı	%
	Göç	LC5a	Göç etme oranı	%
		LC5b	Göç alma oranı	%
		LC5c	Uluslararası göçmen stoku	%
		LC5d	Sektördeki uluslararası göçmen işçi oranı	%
		LC5e	Net göç oranı	‰
		LC5f	Mülteci oranı (toplam nüfusa göre)	%
	Yerli Halk Hakları	LC6a	Yerli Halk Hakları Koruma Endeksi	Puan
		LC6b	Yerli halk varlığı	E/H
	Güvenli ve Sağlıklı Yaşam Koşulları	LC7a	Temiz içme suyu kapsamı	%
		LC7b	Ülkenin kirlilik seviyesi	İndeks
		LC7c	Sanitasyon (kanalizasyon) kapsamı	%

EK-3. (devam) Soca göstergeleri (evrensel tasarım ilkeleri eklenmiş)

Evrensel Tasarım	Eşit Kullanım	UD1a	1a. Tüm kullanıcılar için aynı kullanım imkânı sağla	0-1 puan
		UD1b	1b. Ayrımcılığı veya damgalamayı önle	0-1 puan
		UD1c	1c. Gizlilik, güvenlik ve emniyet eşit sağlanmalı	0-1 puan
		UD1d	1d. Tasarımı tüm kullanıcılar için çekici hale getir.	0-1 puan
	Esnek Kullanım	UD2a	2a. Kullanım yöntemleri arasında seçme olanağı sağlamalı	0-1 puan
		UD2b	2b. Sağ ve sol elin erişim ve kullanımına imkan ver	0-1 puan
		UD2c	2c.Kullanıcının doğruluk ve hassasiyetini kolaylaştır	0-1 puan
		UD2d	2d. Kullanıcının hızına uyum sağla	0-1 puan
	Basit ve Sezgisel Kullanım	UD3a	3a. Gereksiz karmaşıklığı ortadan kaldır	0-1 puan
		UD3b	3b. Kullanıcı beklenti ve sezgilerine uygun ol	0-1 puan
		UD3c	3c. Geniş okuryazarlık ve dil becerilerine uyum sağla	0-1 puan
		UD3d	3d. Bilgiyi önem sırasına göre düzenle	0-1 puan
		UD3e	3e. Görev öncesi/sonrası geri bildirim sağla	0-1 puan
	Algılanabilir Bilgi	UD4a	4a. Farklı modlar (görsel, işitsel vb.) kullan	0-1 puan
		UD4b	4b. Bilgi ile çevresi arasında kontrast sağla	0-1 puan
		UD4c	4c. Temel bilgilerin okunabilirliğini artır	0-1 puan
		UD4d	4d. Öğeleri ayırt edilebilir kıl	0-1 puan
		UD4e	4e. Farklı tekniklerle uyumluluk sağla	0-1 puan
	Hata Toleransı	UD5a	5a. Tehlikeleri azaltacak düzenlemeler yap	0-1 puan
		UD5b	5b. Tehlike ve hata uyarıları sağla	0-1 puan
		UD5c	5c. Arızaya karşı güvenli özellikler sağla	0-1 puan
		UD5d	5d. Dikkat gerektiren görevlerde bilinçsiz eylemleri engelle	0-1 puan
	Düşük Fiziksel Çaba	UD6a	6a. Nötr vücut pozisyonu koru	0-1 puan
		UD6b	6b. Makul işletme kuvveti kullan	0-1 puan
		UD6c	6c. Tekrarlayan hareketleri en aza indir	0-1 puan
		UD6d	6d. Sürekli fiziksel çabayı en aza indir	0-1 puan
	Yaklaşım ve Kullanım Alanı	UD7a	7a. Önemli unsurlar için net görüş hattı sağla	0-1 puan
		UD7b	7b. Tüm kullanıcılara rahat erişim sağla	0-1 puan
		UD7c	7c. El ve kavrama boyutu çeşitliliğine uyum sağla	0-1 puan
		UD7d	7d. Yardımcı cihaz/kişisel yardım için alan sağla	0-1 puan

EK-4. Örnek olay-1 için düzenlenmiş veriler

Süreç	input/ output	Akış	Miktar	Birim	Maliyet ($)	Açıklama
P_Wood Panel Production	input	Medium density fiberboard (MDF),	364,11	kg	192,23	3 plaka 18 mm MDF ile 4 plaka 8 mm arkalık için yerel üretici verisi, doğrudan satın alma fiyatı.
	input	Melamine-faced particleboard	619,16	kg	75,44	9 plaka 18 mm Suntalam için yerel üretici verisi, doğrudan satın alma fiyatı.
	output	*Wood Panel Production*	983,27	*kg*	-	*Satın alınan ahşap plakalar*
P_Raw Material Supply	input	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3	9832,70	kg*km	3,86	MDF ve suntalam plakalarının Çorum içi tedarikçiden üretim tesisine karayolu ile taşınması
	input	Wood Panel Production	983,27	kg	-	MDF ve MFC üretiminden çıkan toplam ahşap plaka
	output	*Raw Material Supply*	983,27	*kg*	-	*Taşınmış ve üretim için hazır ahşap paneller*
P_Cutting	input	Electricity, low voltage {RER}|	15,00	kWh	1,49	CNC kesim işlemleri sırasında kullanılan düşük voltajlı elektrik enerjisi.
	input	Raw Material Supply	983,27	kg	-	Taşınmış ve üretim için hazır ahşap paneller
	output	*Waste wood, untreated {RER}*	74,29	*kg*	-	*Kesim sürecinden elde edilen odun atıklar, ısıtma amaçlı yakıt olarak kullanılmaktadır.*
	output	*Cutting*	908,98	*kg*	-	*Kesim ve delme işlemleri yapılmış montaja hazır parçalar*
P_Edging	input	Cutting	908,98	kg	-	Kesim ve delme işlemleri yapılmış montaja hazır parçalar
	input	Electricity, low voltage {RER}	15,00	kWh	1,494	T-EB 157 kenar bantlama makinesi, 15 kW toplam güçte çalışmaktadır.
	input	polyvinylchloride, bulk polymerised	1,99	kg	59,505	18 mm PVC kenar bandı: 10 TL/m, ~49.6 m/kg ⇒ ≈496 TL/kg → 986 TL toplam
	output	*Edging*	910,97	*kg*	-	*PVC kenar bant uygulanmış, boyaya hazır paneller*
P_Component Procurement	input	Drawer Slide Assembly	48,18	kg	1050,30	Çekmece rayı takımlarının toplam ağırlığı
	input	Foot Support Assembly	2,38	kg	41,05	Plastik baza ayaklarının toplam ağırlığı
	input	Handle Assembly	2,34	kg	120,70	Kapı ve çekmece kulplarının toplam ağırlığı
	input	Hinge Assembly	6,28	kg	181,07	Frenli menteşelerin toplam ağırlığı
	input	Transport, freight train {RER}|	11479	kg*km	4,50	Menteşe ve raylar, Höchst'teki üretim tesisinden demiryolu ile İstanbul'a tedarik edilmiştir.
	input	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro6 {RER}|	1462,00	kg*km	0,57	Kulp, İstanbul Sancaktepe'den karayolu ile Çorum'a tedarik edilmiştir.
	input	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro6 {RER}|	1436,00	kg*km	0,56	Plastik baza ayakları İstanbul Esenyurt'tan karayolu ile Çorum'a tedarik edilmiştir.
	input	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro6 {RER}|	34488	kg*km	312,20	Avusturya'dan gelen menteşe ve raylar, İstanbul'dan karayolu ile Çorum'a tedarik edilmiştir.
	output	*Component / Accessory Procurement*	59,18	*kg*	-	*Ön montaj için tedarik edilmiş tüm komponent ve aksesuarlar*

EK-4. (devam) Örnek olay-1 için düzenlenmiş veriler

Süreç	input/ output	Akış	Miktar	Birim	Maliyet ($)	Açıklama
P_Pre-Assembly	input	Component / Accessory Procurement	59,18	kg	-	Ön montaj için tedarik edilen tüm ahşap ve aksesuar parçalar
	input	Edging	910,97	kg	-	Ön montaj öncesi kenar bantlama işlemlerinde kullanılan malzemeler
	input	Employment hour: High-skilled	35	h	105,70	Ön montaj sürecinde teknik düzenlemeler yapan kalifiye eleman
	input	Employment hour: Low-skilled	35	h	54,25	Ön montaj sırasında fiziksel montaj desteği sağlayan yardımcı personel
	output	*Pre-Assembly*	*970,15*	*kg*	-	*Boya öncesi, tüm parçaların ahşap hâliyle monte edilmiş ve müşteri onayına sunulmuş hali.*
P_Customer Approval	input	Pre-Assembly	970,15	kg	-	Boya öncesi, tüm parçaların ahşap hâliyle monte edilmiş ve müşteri onayına sunulmuş hali.
	input	Employment hour: High-skilled	0,5	h	1,51	Ön montaj sürecinde teknik düzenlemeler yapan kalifiye eleman
	input	Employment hour: Medium-skilled	1	h	2,11	Projeden sorumlu çalışan
	output	*Customer Approval*	*970,15*	*kg*	-	*Müşteri onayı alınmış, boyaya geçmeden önce sökülecek modüller*
P_Disassembly	input	Customer Approval	970,15	kg	-	Müşteri onayı alınmış, boyaya geçmeden önce sökülecek modüller
	input	Employment hour: High-skilled	25	h	75,43	Söküm planlaması, kritik bağlantıların zarar vermeden sökülmesi, kalite kontrol ve etiketleme
	input	Employment hour: Low-skilled	25	h	37,71	Vida/cam-lock sökümü, parça ayırma ve boya alanına taşıma desteği
	output	*Disassembly*	*970,15*	*kg*	-	*Zımpara ve boya sürecine hazır, sökülmüş parça seti*
P_Painting	input	compressed air, 800 kPa gauge	51,87	Nm3	0,36	Yüzey temizleme için kullanılan basınçlı hava
	input	Disassembly	970,15	kg	-	Zımpara ve boya sürecine hazır, sökülmüş parça seti
	input	Electricity, low voltage {RER}|	14,24	kWh	1,42	Cilalama, kurutma ve zımpara makineleri için enerji
	input	Paint White Acrylic Undercoat dry mass - AU	2,37	kg	14,30	İlk astar katmanı için akrilik boya
	input	Paint White Acrylic Undercoat dry mass - AU	5,70	kg	34,37	İki kat boyama işlemi
	input	Tap water {RoW}| market for	5,00	kg	0,003	Temizlik için kullanılan su
	input	Employment hour: High-skilled	60	h	195,91	Boyama işlemlerinden sorumlu kalifiye eleman
	input	Employment hour: Low-skilled	60	h	97,95	Püskürtme destek, malzeme hazırlama, temizlikten sorumlu vasıfsız eleman
	output	Painting	983,22	kg	-	*Tamamlanmış boyalı ürün, montaj veya paketleme için hazır.*
P_Module Assembly	input	Painting	983,22	kg	-	Tamamlanmış boyalı ürün, montaj veya paketleme için hazır.
	input	Employment hour: High-skilled	25	h	75,44	Modül montajı (menteşe, ray, kulp vb.) için kalifiye eleman
	input	Employment hour: Low-skilled	25	h	37,72	Montaj destek işleri için vasıfsız eleman
	output	*Module Assembly*	*983,22*	*kg*	-	*Montajı tamamlanan modüller*

EK-4. (devam) Örnek olay-1 için düzenlenmiş veriler

Süreç	input/ output	Akış	Miktar	Birim	Maliyet ($)	Açıklama
P_Packaging	input	Module Assembly	*983,22*	kg	-	Montajı tamamlanan modüller
	input	Packaging film, low density polyethylene {RER}|	4,00	kg	13,28	Palet üstü sarım ve yüzey koruma için kullanılan streç film
	input	Employment hour: Medium-skilled	3	h	9,06	Paketleme organizasyonu, kalite kontrol ve sevkiyat evraklarının hazırlanması
	input	Employment hour: Low-skilled	6	h	6,34	Sarım, bantlama, köşe aparatlarının yerleştirilmesi, etiketleme ve iç lojistik desteği
	output	*Packaging*	*987,22*	*kg*	-	*Sevke hazır, paketlenmiş ürün*
P_Transfer	input	Packaging	987,22	kg	-	Sevke hazır, paketlenmiş ürün
	input	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 {RER}|	13,125	t*km	5,15	Çorum içi son sevkiyat; 0.987 t × ~13.3 km ≈ 13.125 t·km. (85.32 TL ÷ 16.57 = 5.15 USD)
	input	Employment hour: High-skilled	0,3	h	0,91	Montaj için giden kalifiye eleman
	input	Employment hour: Low-skilled	0,3	h	0,45	Destek elemanı
	input	Employment hour: Medium-skilled	0,3	h	0,63	Araç kullanabilen eleman
	output	*Transfer*	*987,22*	*kg*	-	*Tesisten müşteriye sevk edilmiş, montaja hazır yük*
P_On-site Assembly	input	Transfer	987,22	kg	-	Tesisten müşteriye sevk edilmiş, montaja hazır yük
	input	Employment hour: Low-skilled	1	h	1,51	Paket sökümü, taşıma ve yardımcı montaj işleri
	input	Employment hour: Medium-skilled	1	h	2,11	Montaj ekipmanı/forklift kullanımı, düzeltmeler
	input	Employment hour: High-skilled	1	h	3,02	Nihai yerinde montaj, ayar ve kontrol
	output	*On-site Assembly*	*983,22*	*kg*	-	*Yerinde montajı tamamlanmış ürün*
	output	*Waste plastic, mixture {RoW}|*	*4,00*	*kg*	-	*Ambalajın sahada sökülmesiyle oluşan LDPE/plastik karışık atık*
P_End of Life	input	On-site Assembly	983,22	kg	-	Yerinde montajı tamamlanmış ürün
	input	Usage	3653,00	d	-	Ürünün 10 yıl boyunca kullanılması
	output	Recycling / Reuse	365,03	kg	-	Geri dönüştürülen veya tekrar kullanılan kısım
	output	Waste Disposal	628,43	kg	-	Kullanılamaz atık

EK-5. Örnek olay-1 evrensel tasarım ilkeleri için sezgisel kontrol listesi

KOD	Soru	UZMAN GÖRÜŞÜ			Skor	Ham Değer	Risk Seviyesi	Karakterizasyon Faktörü	Etkinlik Değişkeni (h)	Sonuç
		1	2	3						
UD1a	Tüm kullanıcılar için aynı fiziksel erişim yolu mevcut mu? (örn. tek tip kulp, yön seçeneği)	0,5	0	0	0,2	0,28	Yüksek Risk	10,0	87672,0	876720,0
	Fonksiyon (örn. aç/kapa) için aynı hareket aralığı ve kuvvet gerekiyor mu?	0	0,5	0,5	0,3					
	Ürün bileşenleri farklı kullanıcı profilleri için aynı donanımla çalışabiliyor mu?	0	0,5	0,5	0,3					
UD1b	Tasarımda ayrımcı semboller, ifadeler veya ayrı kullanım yolları var mı?	1	0,5	1	0,8	0,83	Düşük Risk	0,1	87672,0	8767,2
	Engelli, yaşlı, çocuk gibi kullanıcı grupları için özel etiketleme/ayrıştırma yapılmış mı?	1	0,5	1	0,8					
	Kullanıcıların birbirinden ayrılmış hissetmesine yol açan bir sistem ögesi var mı?	1	0,5	1	0,8					
UD1c	Güvenlik öğeleri tüm kullanıcı profilleri için aynı şekilde sağlanmış mı? (örn. çocuk kilidi, kaymaz yüzey)	0	0,5	0,5	0,3	0,50	Orta Risk	1,0	87672,0	87672,0
	Tüm kullanıcılar için aynı düzeyde mahremiyet (ör. eşit korunaklılık) sunuluyor mu?	1	0,5	0,5	0,7					
	Kritik riskler veya tehlikeler belirli kullanıcılar için daha yüksek mi?	0,5	0,5	0,5	0,5					
UD1d	Ürün farklı yaş, kültür ve beceri düzeylerine hitap eden estetik seçenekler sunuyor mu?	1	0,5	0,5	0,7	0,61	Düşük Risk	1,0	87672,0	87672,0
	Form, doku ve renk dili kullanıcı çeşitliliğini kapsıyor mu?	1	0,5	0,5	0,7					
	Tasarım unsurları sadece tek tip bir yaşam tarzı ya da yaş grubunu hedefliyor mu?	0,5	0,5	0,5	0,5					
UD2a	Ürünün bir işlevine birden fazla erişim yöntemiyle ulaşılabiliyor mu? (örn. manuel, sensör, kumanda)	0	0,5	0,5	0,3	0,39	Yüksek Risk	10,0	87672,0	876720,0
	Alternatif kullanım yolları aynı işlevselliği sunuyor mu?	0	0,5	0,5	0,3					
	Kullanıcı farklı fiziksel veya bilişsel becerilere sahipse ürün yine kullanılabilir mi?	0,5	0,5	0,5	0,5					

EK-5. (devam) Örnek olay-1 evrensel tasarım ilkeleri için sezgisel kontrol listesi

KOD	Soru	UZMAN GÖRÜŞÜ			Skor	Ham Değer	Risk Seviyesi	Karakte-rizasyon Faktörü	Etkinlik Değişkeni (h)	Sonuç
		1	2	3						
UD2b	Ürün hem sağ hem sol elle kullanılabilecek şekilde tasarlanmış mı?	1	0,5	1	0,8	0,67	Düşük Risk	0,1	87672,0	8767,2
	Kullanıcı isterse erişim yönünü (açılma yönü vb.) değiştirebilir mi?	1	0,5	1	0,8					
	Kritik kontroller tek tarafa yerleştirilmiş mi yoksa çift taraflı mı erişilebilir?	0	0,5	0,5	0,3					
UD2c	Üründe kullanıcıyı yönlendiren hizalama, sabitleme veya sınırlandırma öğeleri mevcut mu?	1	0,5	0,5	0,7	0,72	Düşük Risk	0,1	87672,0	8767,2
	Hassas işlem gerektiren kullanımda hata payı bırakılmış mı? (örn. toleranslı ray sistemi)	1	0,5	1	0,8					
	Yanlış kullanımda oluşacak risk, ürün tarafından azaltılıyor mu?	1	0,5	0,5	0,7					
UD2d	Ürün sabit hız yerine kullanıcıya göre ayarlanabilen bir işlem süresi sunuyor mu?	1	0,5	0,5	0,7	0,67	Düşük Risk	0,1	87672,0	8767,2
	Kullanıcı isterse işlemi daha yavaş veya daha hızlı yapabiliyor mu?	1	0,5	0,5	0,7					
	Ürün etkileşimi sabit bir süreyle sınırlı mı yoksa esnek mi?	1	0,5	0,5	0,7					
UD3a	Ürün kullanımında gereksiz işlem adımları bulunuyor mu?	0	0,5	0,5	0,3	0,44	Orta Risk	10,0	87672,0	876720,0
	İşlevlerin gerçekleştirilmesi için minimum sayıda hareket yeterli mi?	1	0,5	0,5	0,7					
	Aynı işlev için birden fazla kafa karıştırıcı yol var mı?	0	0,5	0,5	0,3					
UD3b	Ürünün kullanım şekli kullanıcı sezgilerine uygun mu?	1	0,5	1	0,8	0,72	Düşük Risk	0,1	87672,0	8767,2
	Kullanıcı ürünü ilk gördüğünde nasıl çalıştığını anlayabiliyor mu?	1	0,5	0,5	0,7					
	Kullanıcı deneyimi geleneksel ürünlerle tutarlı mı?	1	0,5	0,5	0,7					
UD3c	Ürün kullanımında çoklu dil veya dil dışı (ikon, sembol) destek sağlanmış mı?	NA	1	0	0,5	0,58	Na	1,0	87672,0	87672,0
	Metin içeriği anlaşılır, kısa ve açık mı?	NA	0,5	0	0,3					
	Kullanıcılar düşük okuryazarlık seviyesinde ürünü kullanabiliyor mu?	1	1	1	1,0					
UD3d	Üzerindeki bilgi etiketleri önem sırasına göre konumlandırılmış mı?	NA	0,5	0,5	0,5	0,42	Na	0,0	87672,0	0,0
	Kritik bilgiler kolayca erişilebiliyor ve fark edilebiliyor mu?	NA	0,5	0	0,3					
	Bilgiler karışık ya da düzensiz şekilde sunulmuş mu?	NA	0,5	0,5	0,5					

EK-5. (devam) Örnek olay-1 evrensel tasarım ilkeleri için sezgisel kontrol listesi

KOD	Soru	UZMAN GÖRÜŞÜ			Skor	Ham Değer	Risk Seviyesi	Karakte-rizasyon Faktörü	Etkinlik Değişkeni (h)	Sonuç
		1	2	3						
UD3e	Ürün kullanım sırasında kullanıcıya görsel/sesli/hissel geri bildirim veriyor mu?	0,5	0,5	0,5	0,5	0,50	Orta Risk	1,0	87672,0	87672,0
	Kullanıcının işlem tamamladığını anlayabileceği bir sinyal var mı?	0,5	0,5	0,5	0,5					
	Geri bildirimler tüm kullanıcı profilleri tarafından algılanabilir mi?	0,5	0,5	0,5	0,5					
UD4a	Bilgiler hem görsel hem işitsel hem de dokunsal yollarla sunulmuş mu?	NA	0,5	0,5	0,5	0,50	Na	0,0	87672,0	0,0
	Tek bir bilgi (ör. uyarı) birden fazla kanalla iletiliyor mu? (örn. ikon + ses)	NA	0,5	0,5	0,5					
	Sunulan bilgi en az iki farklı algı kanalına hitap ediyor mu?	0,5	0,5	0,5	0,5					
UD4b	Bilgilerin arka planla kontrastı yeterli mi? (örn. etiket üzeri yazılar, ikonlar)	0,5	0,5	1	0,7	0,78	Düşük Risk	0,1	87672,0	8767,2
	Kritik metin ve simgeler düşük ışıkta da fark edilebilir mi?	1	0,5	1	0,8					
	Kontrast oranı ISO TR 22411'e göre ≥ 70% olarak sağlanmış mı?	1	0,5	1	0,8					
UD4c	Yazı tipi ve semboller kolay okunur, net ve sade mi?	NA	0,5	NA	0,5	0,50	Na	0,0	87672,0	0,0
	Yazı karakterleri yeterli büyüklükte ve kalınlıkta mı?	NA	0,5	NA	0,5					
	Bilgi sunumu okunabilirlik testlerinden geçebilir düzeyde mi?	NA	0,5	NA	0,5					
UD4d	Tasarım öğeleri kolayca tarif edilebilir mi? (örn. "sağ altta dönen düğme")	1	0,5	0,5	0,7	0,61	Düşük Risk	1,0	87672,0	87672,0
	Kullanıcıya yönlendirme yapılırken karmaşa yaşanmıyor mu?	1	0,5	0,5	0,7					
	Tasarımda açıklaması zor, belirsiz alanlar var mı?	0,5	0,5	0,5	0,5					
UD4e	Ürün ekranları, sesli yönlendirme veya yardımcı cihazlarla uyumlu mu?	1	0,5	0,5	0,7	0,61	Düşük Risk	1,0	87672,0	87672,0
	Tasarım ekran okuyucu, büyüteç, işaret dili desteği gibi sistemlerle çalışabilir mi?	NA	0,5	0,5	0,5					
	Engelli kullanıcılar için yardımcı teknoloji ile erişim sınaması yapılmış mı?	1	0,5	0,5	0,7					
UD5a	Sık kullanılan öğeler en erişilebilir konumlara yerleştirilmiş mi?	1	0,5	0,5	0,7	0,61	Düşük Risk	1,0	87672,0	87672,0
	Tehlikeli veya yanlışlıkla kullanılabilecek öğeler izole edilmiş mi?	0,5	0,5	0,5	0,5					
	Dikkat dağınıklığında bile güvenli kullanım devam edebiliyor mu?	1	0,5	0,5	0,7					

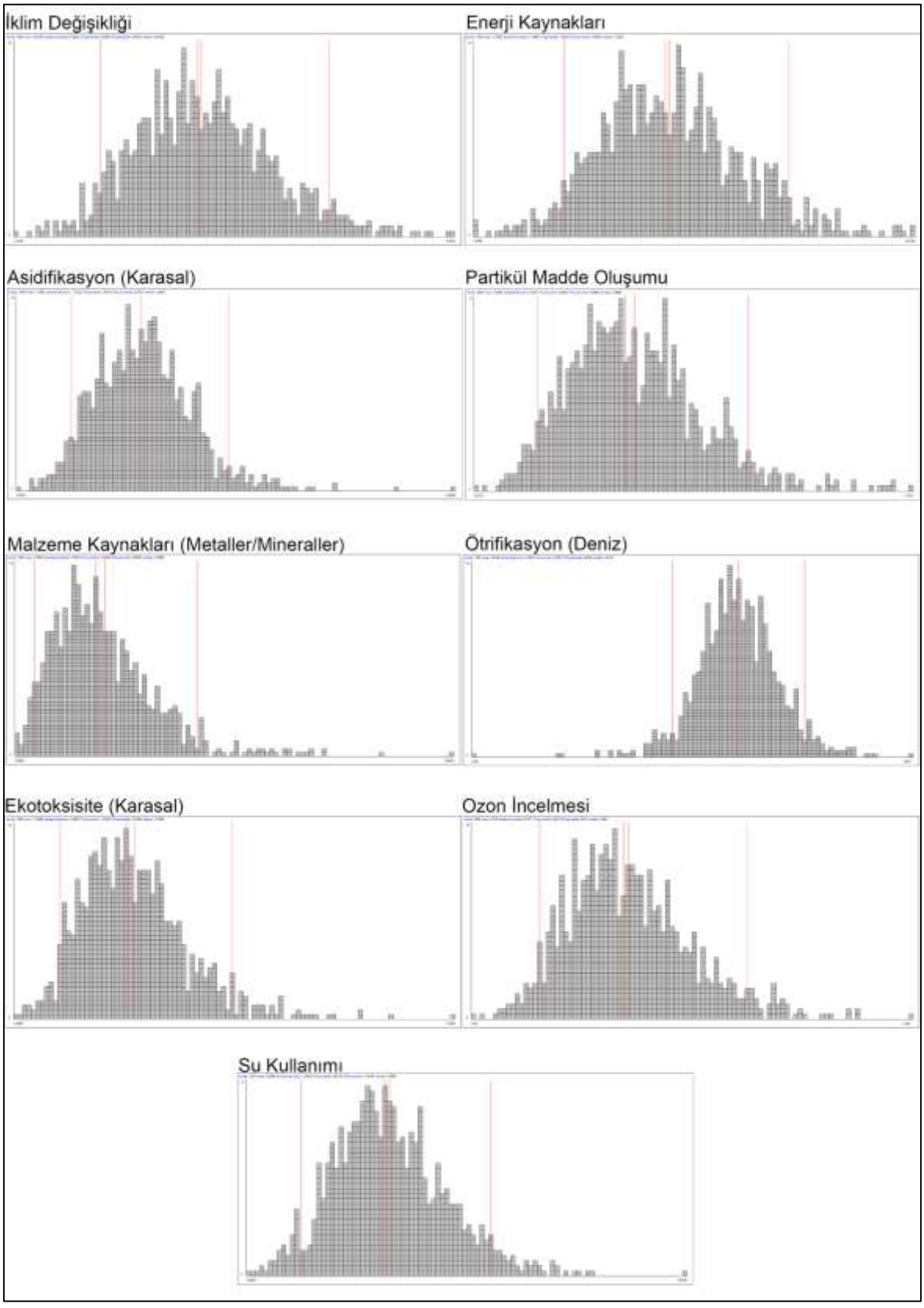
EK-5. (devam) Örnek olay-1 evrensel tasarım ilkeleri için sezgisel kontrol listesi

KOD	Soru	UZMAN GÖRÜŞÜ			Skor	Ham Değer	Risk Seviyesi	Karakte-rizasyon Faktörü	Etkinlik Değişkeni (h)	Sonuç
		1	2	3						
UD5b	Tehlike oluşturabilecek alanlar açıkça uyarı ile belirtilmiş mi?	0	0,5	0,5	0,3	0,33	Yüksek Risk	10,0	87672,0	876720,0
	Geri bildirimler veya etiketler kullanıcıyı olası hatalardan koruyacak düzeyde mi?	0	0,5	0,5	0,3					
	Uyarılar görsel, işitsel veya dokunsal olarak kullanıcıya sunuluyor mu?	0	0,5	0,5	0,3					
UD5c	Yanlış kullanım durumunda devreye giren güvenlik mekanizması var mı?	0	0,5	0,5	0,3	0,50	Orta Risk	1,0	87672,0	87672,0
	Sistem kritik bir işlem öncesinde doğrulama veya durdurma seçeneği sunuyor mu?	0,5	0,5	0,5	0,5					
	Kilit, emniyet şalteri, yavaşlatıcı gibi hata önleyici yapı var mı?	1	0,5	0,5	0,7					
UD5d	Kullanıcının istemsizce tehlikeli işlem yapması önlenmiş mi?	0,5	0,5	0,5	0,5	0,44	Orta Risk	10,0	87672,0	876720,0
	Zihinsel dikkat gerektiren alanlarda kullanıcı yönlendirmesi yeterli mi?	0,5	0,5	0,5	0,5					
	Riskli işlemler kolaylıkla fark edilmeden yapılamayacak şekilde tasarlanmış mı?	0,5	0,5	0	0,3					
UD6a	Ürün kullanımı sırasında kullanıcı nötr (doğal) vücut pozisyonunu koruyabiliyor mu?	0,5	0,5	0,5	0,5	0,39	Yüksek Risk	10,0	87672,0	876720,0
	Diz, omuz, el-bilek hizası ergonomik sınırlar içinde kalıyor mu?	1	0	0	0,3					
	Ürün yerleşimi aşırı eğilme, uzanma, çömelme gerektiriyor mu?	0	0,5	0,5	0,3					
UD6b	Ürünü çalıştırmak için gereken kuvvet (itme/çekme/basma) makul düzeyde mi?	1	0	0	0,3	0,28	Yüksek Risk	10,0	87672,0	876720,0
	Kapak, çekmece, düğme gibi elemanların kullanımı güç gerektiriyor mu?	0	0	0	0,0					
	Tüm kullanıcı profilleri (çocuk, yaşlı, zayıf) ürünü rahatça kullanabiliyor mu?	0,5	0,5	0,5	0,5					
UD6c	Aynı eylemin çok kez tekrarı gerekli mi? (örn. sürekli aç/kapa işlemi)	0	0,5	0,5	0,3	0,44	Yüksek Risk	10,0	87672,0	876720,0
	Ürün, tekrarlayan hareketler için kullanıcıyı destekleyen bir çözüm sunuyor mu?	0	1	1	0,7					
	Süreç otomasyonu veya kısayollar mevcut mu?	0	0,5	0,5	0,3					

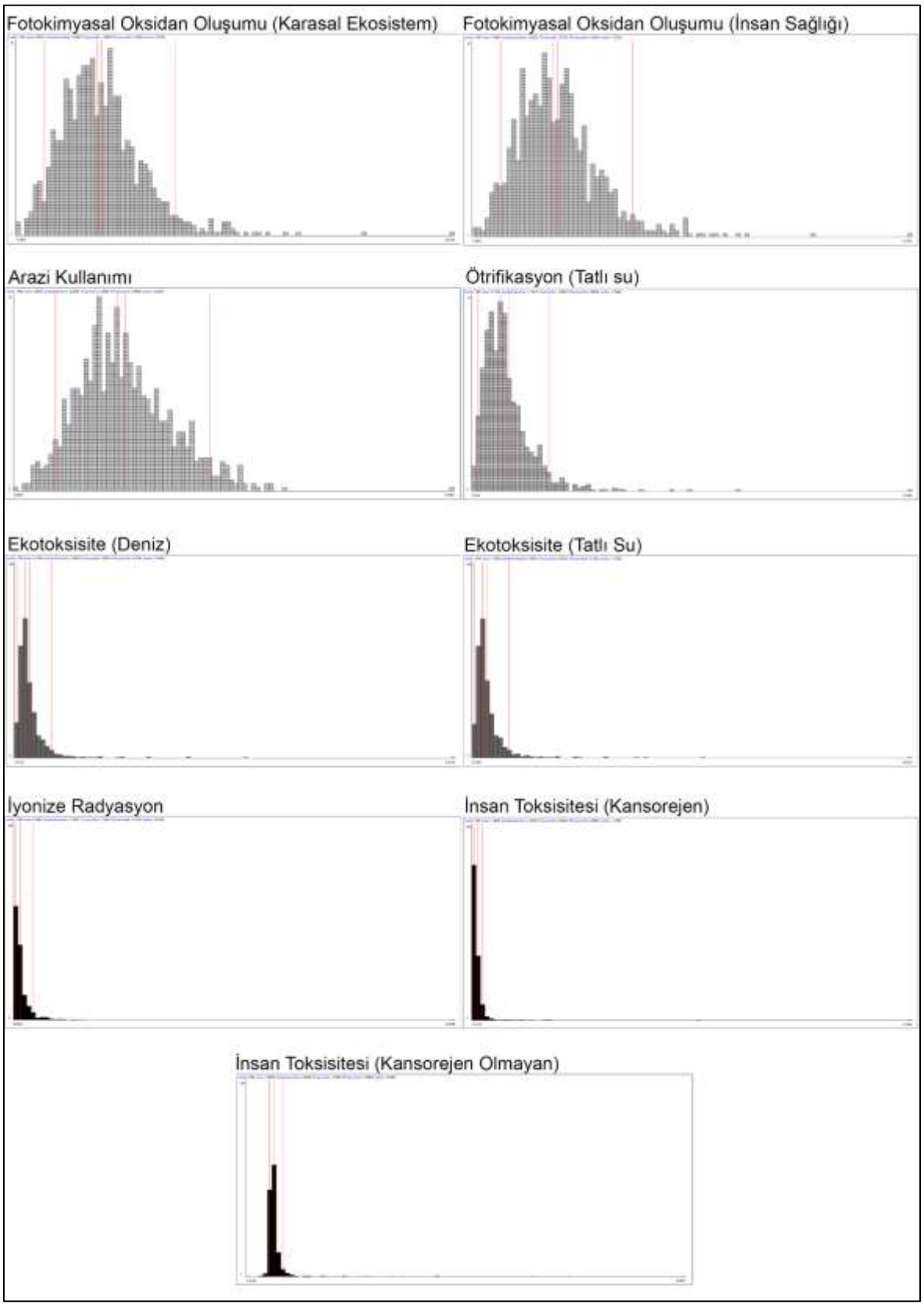
EK-5. (devam) Örnek olay-1 evrensel tasarım ilkeleri için sezgisel kontrol listesi

KOD	Soru	UZMAN GÖRÜŞÜ			Skor	Ham Değer	Risk Seviyesi	Karakte-rizasyon Faktörü	Etkinlik Değişkeni (h)	Sonuç
		1	2	3						
UD6d	Uzun süreli bir fiziksel çaba (itme, taşıma, yükleme) gerekiyor mu?	1	0,5	0,5	0,7	0,61	Düşük Risk	1,0	87672,0	87672,0
	Ürünü kullanırken belirli bir kas grubunun sürekli çalışması gerekiyor mu?	1	0,5	0,5	0,7					
	İşlem kullanıcıyı hızlıca yormadan tamamlanabiliyor mu?	0,5	0,5	0,5	0,5					
UD7a	Tasarım, hem oturan hem ayakta duran kullanıcı için net görüş hattı sağlıyor mu?	0	0,5	0,5	0,3	0,28	Yüksek Risk	10,0	87672,0	876720,0
	Görüntülenmesi gereken göstergeler, etiketler her yükseklikten okunabilir mi?	0	0,5	0	0,2					
	Görsel alan engeller (örtü, yansıma, yükseklik) ile bozuluyor mu?	0	0,5	0,5	0,3					
UD7b	Tüm ana kontroller hem oturan hem ayakta duran kullanıcılar için erişilebilir mi?	0	0,5	0,5	0,3	0,39	Yüksek Risk	10,0	87672,0	876720,0
	Ergonomik erişim alanı içinde (5–95 percentile) tasarlanmış mı?	0,5	0,5	0,5	0,5					
	Yüksek veya derin yerleşimler erişimi zorlaştırıyor mu?	0	0,5	0,5	0,3					
UD7c	Kulp, düğme gibi kontrol elemanları farklı el boyutlarına uygun mu?	0	0	0	0,0	0,22	Yüksek Risk	100,0	87672,0	8767200,0
	Tutma alanları çocuk, yaşlı, engelli kullanıcılar tarafından kolay kavranabiliyor mu?	0	0,5	0	0,2					
	Aşırı büyük ya da küçük kontroller kullanımı zorlaştırıyor mu?	0,5	0,5	0,5	0,5					
UD7d	Tekerlekli sandalye, baston gibi yardımcı cihazlarla kullanım alanı yeterli mi?	1	0,5	0,5	0,7	0,50	Orta Risk	1,0	87672,0	87672,0
	Yardımcı kişiyle birlikte kullanım (bakıcı vb.) için yeterli alan mevcut mu?	0	0,5	0,5	0,3					
	Alan, manevra yapmak veya yön değiştirmek için yeterli açıklığa sahip mi?	0,5	0,5	0,5	0,5					

EK-6. Örnek olay-1 Monte Carlo Simülayon grafikleri



EK-6. (devam) Örnek olay-1 Monte Carlo simülasyon grafikleri



EK-7. Hava veri ölçüm istasyonu senaryo-1 için sisteme girilen veriler

Süreç	input/output	Akış	Miktar	Birim	Maliyet	Açıklama
HVO_AL5754 Parts Manufacturing	input	Aluminium alloy, AlMg3	7,32	kg	159,32	%5 fireli giriş. 2640 tl (2022 dolar kuru 16.57 tl alınmıştır.)
	input	Electricity, medium voltage	3,5	kg	0,525	Üretim süreci harcanan enerjidir.
	output	Aluminium scrap, new	0,37	kg		*Alüminyum fireler*
	output	*HVO_AL5754 processed parts*	6,95	kg		*Montaja hazır gövde bileşenleri*
HVO_Electronic Component Procurement	input	battery, Li-ion, rechargeable, prismatic	3,2	kg	110	BP2624 - 12v 24Ah LiFePO4 Battery Pack
	input	electronic component, active, unspecified	0,53	kg	1144,6	HY-SA6E sensör (aktif bileşen)
	input	electronics, for control units	0,25	kg	151,04	TRB145 GSM modem
	input	electronics, for control units	1,6	kg	100,3	MPPT Şarj Kontrol Cihazı
	input	injection moulding	1	kg	17,7	ADAL Kutu MD9003
	input	photovoltaic panel, single-Si wafer	3,8	kg	59	TommaTech Güneş Paneli
	input	transport, freight, light commercial vehicle	0,09	t*km		Şehir İçi Dağıtım
	input	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6	1,35	t*km		Türkiye İçi Kara Taşımacılığı
	input	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6	0,9	t*km		Almanya İçi Kara Taşımacılığı
	input	transport, freight, sea, container ship	6,6	t*km		Deniz Taşımacılığı
	output	*HVO_Components*	*14,38*	*kg*		
HVO_Assembly	input	electricity, medium voltage	0,8	kWh	0,12	
	input	HVO_AL5754 processed parts	6,95	kg		
	input	HVO_Components	14,38	kg		
	input	Labour, skilled technician (TR, 2022)	2	h	6	montaj işçiliği
	input	polypropylene, granulate	0,035	kg	1,21	klips ve kablo bağı
	input	steel, low-alloyed, hot rolled	0,17	kg	3	
	input	synthetic rubber	0,02	kg	0,91	sızdırmazlık için conta
	output	*HVO_Assembled*	*21,555*	*kg*		

EK-7. (devam) Hava veri ölçüm istasyonu senaryo-1 için sisteme girilen veriler

Süreç	input/output	Akış	Miktar	Birim	Maliyet	Açıklama
HVO_Packaging	input	Cardboard box, at plant/RER U (ACYVIA)	0,7	kg	1,12	HVO için dış ambalaj kutusu
	input	HVO_Assembled	15,02	kg		Final assembled HVO module including all internal parts and fasteners
	input	Labour, unskilled (TR, 2022)	0,25	h		
	input	packaging film, low density polyethylene	0,1	kg	0,2	
	input	polyethylene, high density, granulate	0,2	kg*km	0,36	Reference Product
	output	*HVO_Packaged*	*59,18*	*kg*		
HVO_Transport	input	HVO_Packaged	16,02	kg		
	input	transport, freight, light commercial vehicle	0,2403,	t*km	0,63	Urban delivery from manufacturer to client in Ankara
	output	*HVO_Product*	*1*	*Item*		
HVO_Usage	input	Electricity by solar photovoltaic - TR	175	kWh		5 yıl boyunca 1 adet 50Wp panel ile üretilen toplam enerji (günlük ort. 6.7 saat verim ile) 611 kWh ediyor. Cihaz Tüketimi 175 kWh
	input	HVO_Product	1	Item		
	output	*Packaging*	*1*	*Item*		

EK-8. Hava veri ölçüm istasyonu senaryo-2 için sisteme girilen veriler

Süreç	input/output	Akış	Miktar	Birim	Maliyet	Açıklama
HVO_AL5754 Parts Manufacturing	input	Aluminium alloy, AlMg3	7,32	kg	159,32	%5 fireli giriş. 2640 tl (2022 dolar kuru 16.57 tl alınmıştır.)
	input	Electricity, medium voltage	3,5	kg	0,525	Üretim süreci harcanan enerjidir.
	output	*Aluminium scrap, new*	*0,37*	*kg*	-	*Alüminyum fireler*
	output	*HVO_AL5754 processed parts*	6,95	*kg*	-	*Montaja hazır gövde bileşenleri*
HVO_Electronic Component Procurement	input	battery, lead acid, rechargeable, stationary	7,2	kg	35,40	Orbus 12V 24Ah VRLA jel akü
	input	electronic component, active, unspecified	0,53	kg	1144,6	HY-SA6E sensör (aktif bileşen)
	input	electronics, for control units	0,25	kg	151,04	TRB145 GSM modem
	input	electronics, for control units	1,6	kg	100,3	MPPT Şarj Kontrol Cihazı
	input	injection moulding	1	kg	17,7	ADAL Kutu MD9003
	input	photovoltaic panel, single-Si wafer	3,8	kg	59	TommaTech Güneş Paneli
	input	transport, freight, light commercial vehicle	0,216	t*km	-	Şehir İçi Dağıtım
	input	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6	3,46	t*km	-	Türkiye İçi Kara Taşımacılığı
	input	transport, freight, sea, container ship	57,6	t*km	-	Almanya İçi Kara Taşımacılığı
	output	*HVO_Components*	*14,38*	*kg*	-	*Tedarik edilen elektronik parçalar*
HVO_Assembly_2	input	electricity, medium voltage	0,8	kWh	0,12	Montaj sırasında kullanılan elektrik
	input	HVO_AL5754 processed parts	6,95	kg	-	Montaja hazır gövde bileşenleri
	input	HVO_Components	14,38	kg	-	Tedarik edilen elektronik parçalar
	input	Labour, skilled technician (TR, 2022)	2	h	6	montaj işçiliği
	input	polypropylene, granulate	0,035	kg	1,21	klips ve kablo bağı
	input	steel, low-alloyed, hot rolled	0,17	kg	3	Vida vb. birleştirme parçaları
	input	synthetic rubber	0,02	kg	0,91	sızdırmazlık için conta
	output	*HVO_Assembled*	*21,555*	*kg*	-	*Montajı tamamlanan ürün*

EK-8. (devam)Hava veri ölçüm istasyonu senaryo-2 için sisteme girilen veriler

HVO_Packaging	input	Cardboard box, at plant/RER U (ACYVIA)	0,7	kg	1,12	HVO için dış ambalaj kutusu
	input	HVO_Assembled	15,02	kg	-	Montajı tamamlanan ürün
	input	Labour, unskilled (TR, 2022)	0,25	h	-	Paketleme işçiliği
	input	packaging film, low density polyethylene	0,1	kg	0,2	
	input	polyethylene, high density, granulate	0,2	kg*km	0,36	Reference Product
	output	*HVO_Packaged*	*59,18*	*kg*	-	
HVO_Transport	input	HVO_Packaged	16,02	kg	-	
	input	transport, freight, light commercial vehicle	0,2403,	t*km	0,63	Urban delivery from manufacturer to client in Ankara
	output	*HVO_Product*	*1*	*Item*	-	
HVO_Usage_2	input	battery, lead acid, rechargeable, stationary	3,2	kg	-	Orbus 12V 24Ah VRLA jel akü
	input	Electricity by solar photovoltaic - TR	175	kWh	-	5 yıl boyunca 1 adet 50Wp panel ile üretilen toplam enerji (günlük ort. 6.7 saat verim ile) 611 kWh ediyor. Cihaz Tüketimi 175 kWh
	input	HVO_Product	1	Item	-	
	input	Labour, skilled technician (TR, 2022)	0,5	h	-	montaj işçiliği
	input	transport, freight, light commercial vehicle	3,46	t*km	-	.2 kg × 30 km varsayımı → 0.0072 t × 30 = 0.216 t·km; 0.20 USD/t·km
	input	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6	57,6	t*km		
	input	transport, freight, sea, container ship	1	t*km		
	output	*HVO_End of Life*	*1*	*Item*		
	output	*scrap lead acid battery*	*7,2*	*kg*		

EK-9. Örnek olay-2 evrensel tasarım ilkeleri için sezgisel kontrol listesi

KOD	Soru	UZMAN GÖRÜŞÜ			Skor	Ham Değer	Risk Seviyesi	Karakterizasyon Faktörü	Etkinlik (h)	Sonuç
		1	2	3						
UD1a	Tüm kullanıcılar için aynı fiziksel erişim yolu mevcut mu? (örn. tek tip kulp, yön seçeneği)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,33	Yüksek Risk	10	43829	43829
	Fonksiyon (örn. aç/kapa) için aynı hareket aralığı ve kuvvet gerekiyor mu?	1,0	0,5	0,5	0,7					
	Ürün bileşenleri farklı kullanıcı profilleri için aynı donanımla çalışabiliyor mu?	0,0	0,5	0,5	0,3					
UD1b	Tasarımda ayrımcı semboller, ifadeler veya ayrı kullanım yolları var mı?	1,0	0,5	1,0	0,8	0,83	Çok Düşük Risk	0,01	43829	438,29
	Engelli, yaşlı, çocuk gibi kullanıcı grupları için özel etiketleme/ayrıştırma yapılmış mı?	1,0	0,5	1,0	0,8					
	Kullanıcıların birbirinden ayrılmış hissetmesine yol açan bir sistem ögesi var mı?	1,0	0,5	1,0	0,8					
UD1c	Güvenlik öğeleri tüm kullanıcı profilleri için aynı şekilde sağlanmış mı? (örn. çocuk kilidi, kaymaz yüzey)	0,0	0,5	0,0	0,2	0,28	Yüksek Risk	10	43829	438290
	Tüm kullanıcılar için aynı düzeyde mahremiyet (ör. eşit korunaklılık) sunuluyor mu?	0,5	0,0	0,5	0,3					
	Kritik riskler veya tehlikeler belirli kullanıcılar için daha yüksek mi?	0,0	0,5	0,5	0,3					
UD1d	Ürün farklı yaş, kültür ve beceri düzeylerine hitap eden estetik seçenekler sunuyor mu?	0,0	0,0	0,5	0,2	0,22	Yüksek Risk	10	43829	438290
	Form, doku ve renk dili kullanıcı çeşitliliğini kapsıyor mu?	0,0	0,5	0,5	0,3					
	Tasarım unsurları sadece tek tip bir yaşam tarzı ya da yaş grubunu hedefliyor mu?	0,5	0,0	0,0	0,2					
UD2a	Ürünün bir işlevine birden fazla erişim yöntemiyle ulaşılabiliyor mu? (örn. manuel, sensör, kumanda)	0,0	0,5	0,5	0,3	0,39	Yüksek Risk	10	43829	438290
	Alternatif kullanım yolları aynı işlevselliği sunuyor mu?	0,0	0,5	0,5	0,3					
	Kullanıcı farklı fiziksel veya bilişsel becerilere sahipse ürün yine kullanılabilir mi?	0,5	0,5	0,5	0,5					

EK-9. (devam) Örnek olay-2 evrensel tasarım ilkeleri için sezgisel kontrol listesi

KOD	Soru	UZMAN GÖRÜŞÜ			Skor	Ham Değer	Risk Seviyesi	Karakteri zasyon Faktörü	Etkinlik (h)	Sonuç
		1	2	3						
UD2b	Ürün hem sağ hem sol elle kullanılabilecek şekilde tasarlanmış mı?	1,0	0,5	1,0	0,8	0,83	Çok Düşük Risk	0,01	43829	438,29
	Kullanıcı isterse erişim yönünü (açılma yönü vb.) değiştirebilir mi?	1,0	0,5	1,0	0,8					
	Kritik kontroller tek tarafa yerleştirilmiş mi yoksa çift taraflı mı erişilebilir?	1,0	0,5	1,0	0,8					
UD2c	Üründe kullanıcıyı yönlendiren hizalama, sabitleme veya sınırlandırma öğeleri mevcut mu?	1,0	0,5	1,0	0,8	0,61	Düşük Risk	0,1	43829	4382,9
	Hassas işlem gerektiren kullanımda hata payı bırakılmış mı?	0,5	0,5	0,5	0,5					
	Yanlış kullanımda oluşacak risk, ürün tarafından azaltılıyor mu?	0,5	0,5	0,5	0,5					
UD2d	Ürün sabit hız yerine kullanıcıya göre ayarlanabilen bir işlem süresi sunuyor mu?	0,5	0,0	0,0	0,2	0,50	Orta Risk	1	43829	43829
	Kullanıcı isterse işlemi daha yavaş veya daha hızlı yapabiliyor mu?	1,0	0,5	0,5	0,7					
	Ürün etkileşimi sabit bir süreyle sınırlı mı yoksa esnek mi?	1,0	0,5	0,5	0,7					
UD3a	Ürün kullanımında gereksiz işlem adımları bulunuyor mu?	0,0	0,0	0,0	0,0	0,50	Orta Risk	1	43829	43829
	İşlevlerin gerçekleştirilmesi için minimum sayıda hareket yeterli mi?	1,0	1,0	0,5	0,8					
	Aynı işlev için birden fazla kafa karıştırıcı yol var mı?	1,0	0,5	0,5	0,7					
UD3b	Ürünün kullanım şekli kullanıcı sezgilerine uygun mu?	1,0	1,0	1,0	1,0	0,50	Orta Risk	1	43829	43829
	Kullanıcı ürünü ilk gördüğünde nasıl çalıştığını anlayabiliyor mu?	0,0	0,0	0,0	0,0					
	Kullanıcı deneyimi geleneksel ürünlerle tutarlı mı?	0,5	0,5	0,5	0,5					
UD3c	Ürün kullanımında çoklu dil veya dil dışı (ikon, sembol) destek sağlanmış mı?	1,0	1,0	1,0	1,0	0,61	Düşük Risk	0,1	43829	4382,9
	Metin içeriği anlaşılır, kısa ve açık mı?	0,5	0,5	0,5	0,5					
	Kullanıcılar düşük okuryazarlık seviyesinde ürünü kullanabiliyor mu?	5,0	0,5	0,0	1,8					
UD3d	Üzerindeki bilgi etiketleri önem sırasına göre konumlandırılmış mı?	0,0	0,5	0,5	0,3	0,44	Orta Risk	1	43829	43829
	Kritik bilgiler kolayca erişilebiliyor ve fark edilebiliyor mu?	1,0	0,5	0,0	0,5					
	Bilgiler karışık ya da düzensiz şekilde sunulmuş mu?	0,5	0,5	0,5	0,5					

EK-9. (devam) Örnek olay-2 evrensel tasarım ilkeleri için sezgisel kontrol listesi

KOD	Soru	UZMAN GÖRÜŞÜ			Skor	Ham Değer	Risk Seviyesi	Karakterizasyon Faktörü	Etkinlik (h)	Sonuç
		1	2	3						
UD3e	Ürün kullanım sırasında kullanıcıya görsel/sesli/hissel geri bildirim veriyor mu?	0,5	0,5	0,5	0,5	0,50	Orta Risk	1	43829	43829
	Kullanıcının işlem tamamladığını anlayabileceği bir sinyal var mı?	0,5	0,5	0,5	0,5					
	Geri bildirimler tüm kullanıcı profilleri tarafından algılanabilir mi?	0,5	0,5	0,5	0,5					
UD4a	Bilgiler hem görsel hem işitsel hem de dokunsal yollarla sunulmuş mu?	0,5	0,5	0,5	0,5	0,39	Yüksek Risk	10	43829	438290
	Tek bir bilgi (ör. uyarı) birden fazla kanalla iletiliyor mu? (örn. ikon + ses)	0,0	0,5	0,5	0,3					
	Sunulan bilgi en az iki farklı algı kanalına hitap ediyor mu?	0,5	0,5	0,0	0,3					
UD4b	Bilgilerin arka planla kontrastı yeterli mi? (örn. etiket üzeri yazılar, ikonlar)	0,5	0,5	1,0	0,7	0,78	Düşük Risk	0,1	43829	4382,9
	Kritik metin ve simgeler düşük ışıkta da fark edilebilir mi?	1,0	0,5	1,0	0,8					
	Kontrast oranı ISO TR 22411'e göre ≥ 70% olarak sağlanmış mı?	1,0	0,5	1,0	0,8					
UD4c	Yazı tipi ve semboller kolay okunur, net ve sade mi?	1,0	0,5	0,5	0,7	0,67	Düşük Risk	0,1	43829	4382,9
	Yazı karakterleri yeterli büyüklükte ve kalınlıkta mı?	0,5	1,0	0,5	0,7					
	Bilgi sunumu okunabilirlik testlerinden geçebilir düzeyde mi?	0,5	1,0	0,5	0,7					
UD4d	Tasarım öğeleri kolayca tarif edilebilir mi? (örn. "sağ altta dönen düğme")	0,0	0,0	0,5	0,2	0,21	Yüksek Risk	10	43829	438290
	Kullanıcıya yönlendirme yapılırken karmaşa yaşanmıyor mu?	0,5	0,5	0,5	0,5					
	Tasarımda açıklaması zor, belirsiz alanlar var mı?	0,0	0,0	0,0	0,0					
UD4e	Ürün ekranları, sesli yönlendirme veya yardımcı cihazlarla uyumlu mu?	0,0	0,0	0,0	0,0	0,17	Çok Yüksek Risk	100	43829	4382900
	Tasarım ekran okuyucu, büyüteç, işaret dili desteği gibi sistemlerle çalışabilir mi?	0,5	0,5	0,5	0,5					
	Engelli kullanıcılar için yardımcı teknoloji ile erişim sınaması yapılmış mı?	0,0	0,0	0,0	0,0					

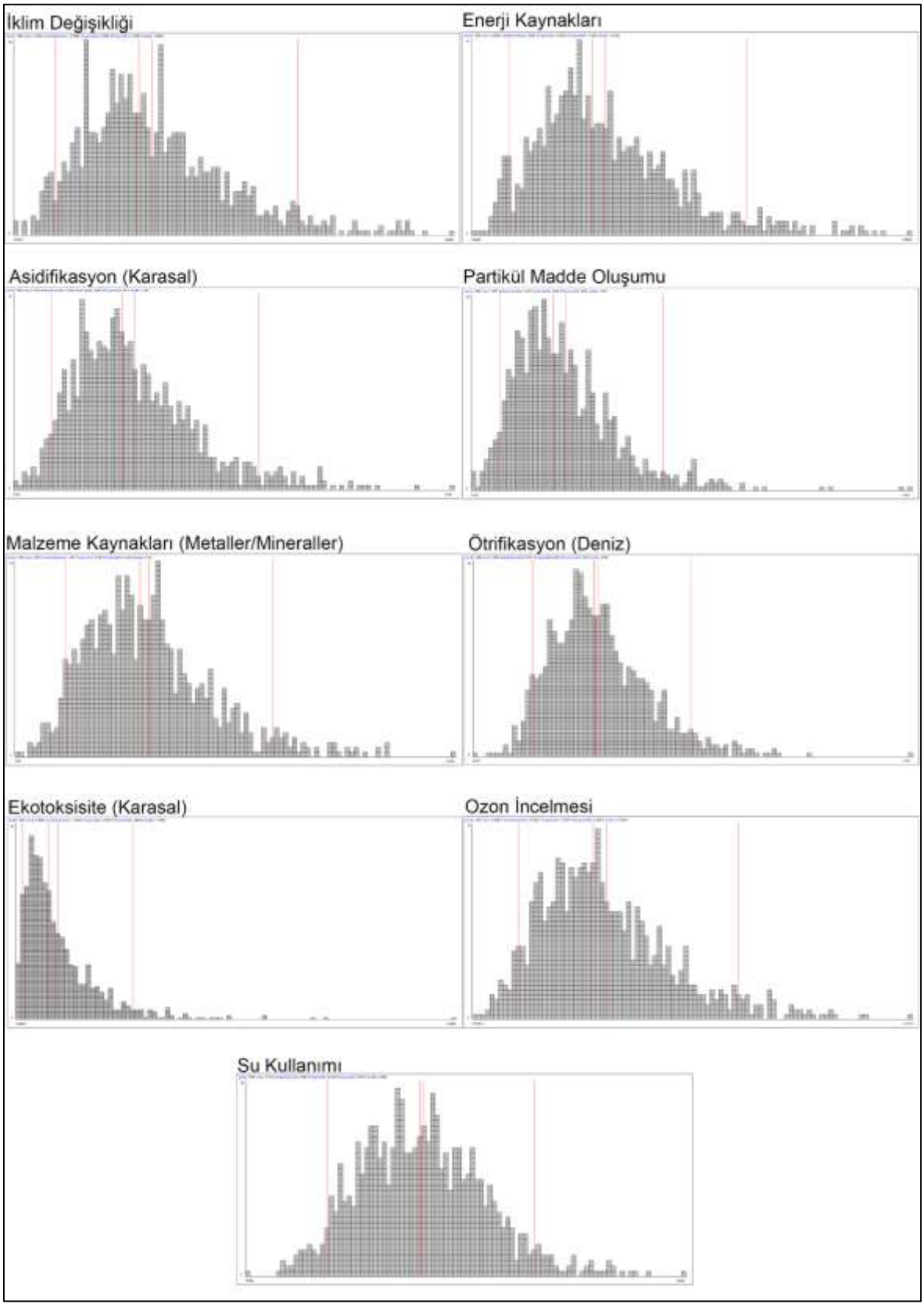
EK-9. (devam) Örnek olay-2 evrensel tasarım ilkeleri için sezgisel kontrol listesi

UD 5a	Sık kullanılan öğeler en erişilebilir konumlara yerleştirilmiş mi?	1,0	1,0	0,5	0,8	0,78	Düşük Risk	0,1	43829	4382,9
	Tehlikeli veya yanlışlıkla kullanılabilecek öğeler izole edilmiş mi?	0,5	0,5	0,5	0,5					
	Dikkat dağınıklığında bile güvenli kullanım devam edebiliyor mu?	1,0	1,0	1,0	1,0					
UD 5b	Tehlike oluşturabilecek alanlar açıkça uyarı ile belirtilmiş mi?	0,0	0,5	0,5	0,3	0,39	Yüksek Risk	10	43829	438290
	Geri bildirimler veya etiketler kullanıcıyı olası hatalardan koruyacak düzeyde mi?	0,0	0,5	0,5	0,3					
	Uyarılar görsel, işitsel veya dokunsal olarak kullanıcıya sunuluyor mu?	0,5	0,5	0,5	0,5					
UD 5c	Yanlış kullanım durumunda devreye giren güvenlik mekanizması var mı?	0,0	0,0	0,0	0,0	0,33	Yüksek Risk	10	43829	438290
	Sistem kritik bir işlem öncesinde doğrulama veya durdurma seçeneği sunuyor mu?	0,5	0,5	0,5	0,5					
	Kilit, emniyet şalteri, yavaşlatıcı gibi hata önleyici yapı var mı?	0,5	0,5	0,5	0,5					
UD 5d	Kullanıcının istemsizce tehlikeli işlem yapması önlenmiş mi?	0,0	0,5	0,0	0,2	0,39	Orta Risk	1	43829	43829
	Zihinsel dikkat gerektiren alanlarda kullanıcı yönlendirmesi yeterli mi?	0,5	0,5	0,5	0,5					
	Riskli işlemler kolaylıkla fark edilmeden yapılamayacak şekilde tasarlanmış mı?	0,5	0,5	0,5	0,5					
UD 6a	Ürün kullanımı sırasında kullanıcı nötr (doğal) vücut pozisyonunu koruyabiliyor mu?	0,5	0,5	0,5	0,5	0,17	Çok Yüksek Risk	100	43829	4382900
	Diz, omuz, el-bilek hizası ergonomik sınırlar içinde kalıyor mu?	0,0	0,0	0,0	0,0					
	Ürün yerleşimi aşırı eğilme, uzanma, çömelme gerektiriyor mu?	0,0	0,0	0,0	0,0					
UD 6b	Ürünü çalıştırmak için gereken kuvvet (itme/çekme/basma) makul düzeyde mi?	1,0	1,0	1,0	1,0	0,50	Orta Risk	1	43829	43829
	Kapak, çekmece, düğme gibi elemanların kullanımı güç gerektiriyor mu?	NA	1,0	NA	NA					
	Tüm kullanıcı profilleri (çocuk, yaşlı, zayıf) ürünü rahatça kullanabiliyor mu?	0,0	0,0	0,0	0,0					

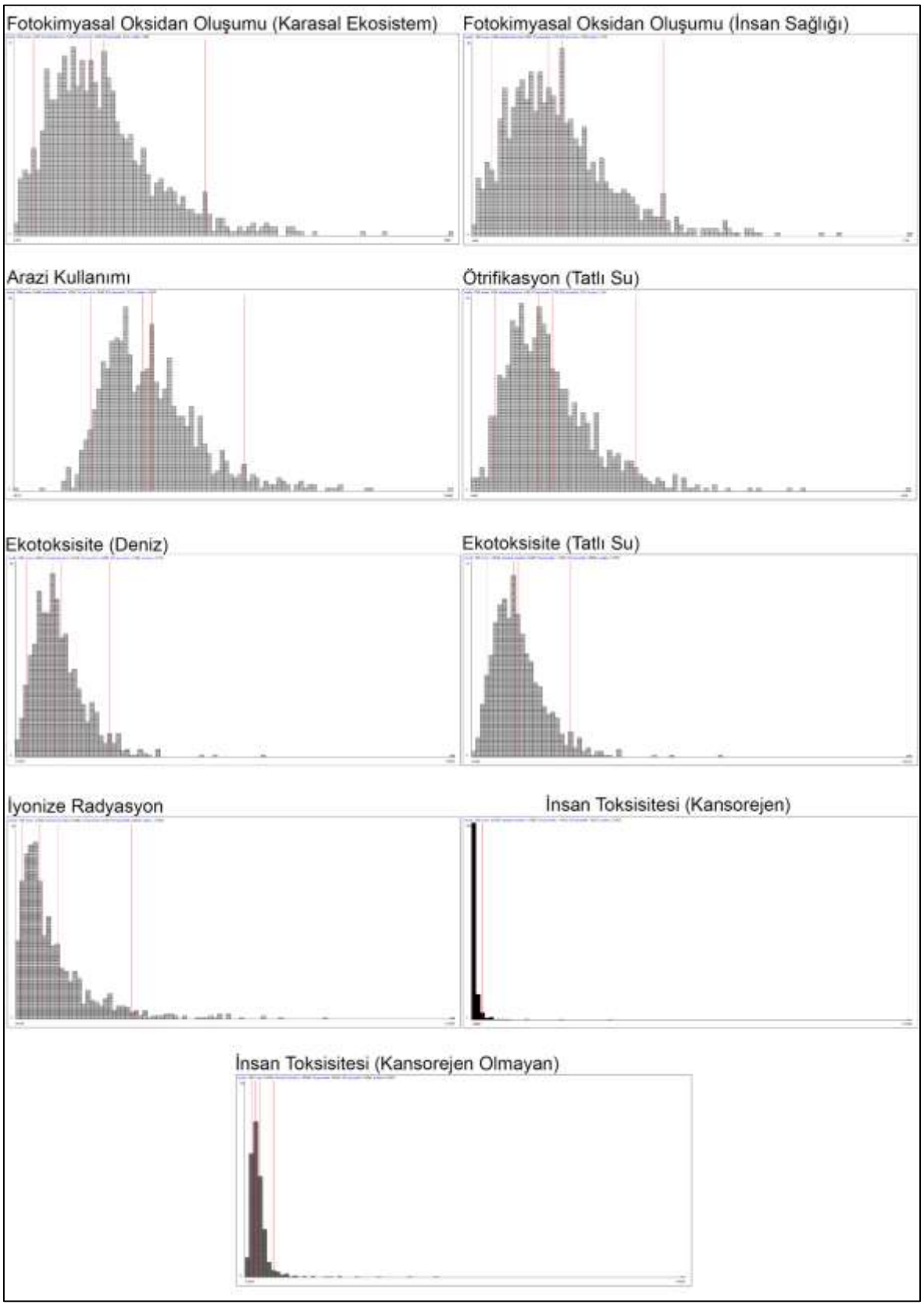
EK-9. (devam) Örnek olay-2 evrensel tasarım ilkeleri için sezgisel kontrol listesi

UD 6c	Aynı eylemin çok kez tekrarı gerekli mi? (örn. sürekli aç/kapa işlemi)	0,6	0,4	0,4	0,5	0,65	Düşük Risk	0,1	43829	4382,9
	Ürün, tekrarlayan hareketler için kullanıcıyı destekleyen bir çözüm sunuyor mu?	0,6	0,4	0,4	0,5					
	Süreç otomasyonu veya kısayollar mevcut mu?	1,0	1,0	1,0	1,0					
UD 6d	Uzun süreli bir fiziksel çaba (itme, taşıma, yükleme) gerekiyor mu?	1,0	1,0	1,0	1,0	0,94	Çok Düşük Risk	0,01	43829	438,29
	Ürünü kullanırken belirli bir kas grubunun sürekli çalışması gerekiyor mu?	1,0	1,0	1,0	1,0					
	İşlem kullanıcıyı hızlıca yormadan tamamlanabiliyor mu?	1,0	1,0	0,5	0,8					
UD 7a	Tasarım, hem oturan hem ayakta duran kullanıcı için net görüş hattı sağlıyor mu?	0,5	0,5	0,5	0,5	0,17	Çok Yüksek Risk	100	43829	4382900
	Görüntülenmesi gereken göstergeler, etiketler her yükseklikten okunabilir mi?	0,0	0,0	0,0	0,0					
	Görsel alan engeller (örtü, yansıma, yükseklik) ile bozuluyor mu?	0,0	0,0	0,0	0,0					
UD 7b	Tüm ana kontroller hem oturan hem ayakta duran kullanıcılar için erişilebilir mi?	0,0	0,0	0,0	0,0	0,06	Çok Yüksek Risk	100	43829	4382900
	Ergonomik erişim alanı içinde (5–95 percentile) tasarlanmış mı?	0,0	0,0	0,5	0,2					
	Yüksek veya derin yerleşimler erişimi zorlaştırıyor mu?	0,0	0,0	0,0	0,0					
UD 7c	Kulp, düğme gibi kontrol elemanları farklı el boyutlarına uygun mu?	NA	NA	0,0	NA	0,25	Yüksek Risk	10	43829	438290
	Tutma alanları çocuk, yaşlı, engelli kullanıcılar tarafından kolay kavranabiliyor mu?	0,0	0,0	0,0	0,0					
	Aşırı büyük ya da küçük kontroller kullanımı zorlaştırıyor mu?	0,5	0,5	0,5	0,5					
UD 7d	Tekerlekli sandalye, baston gibi yardımcı cihazlarla kullanım alanı yeterli mi?	0,0	0,0	0,0	0,0	0,56	Orta Risk	1	43829	43829
	Yardımcı kişiyle birlikte kullanım (bakıcı vb.) için yeterli alan mevcut mu?	0,5	0,5	1,0	0,7					
	Alan, manevra yapmak veya yön değiştirmek için yeterli açıklığa sahip mi?	1,0	1,0	1,0	1,0					

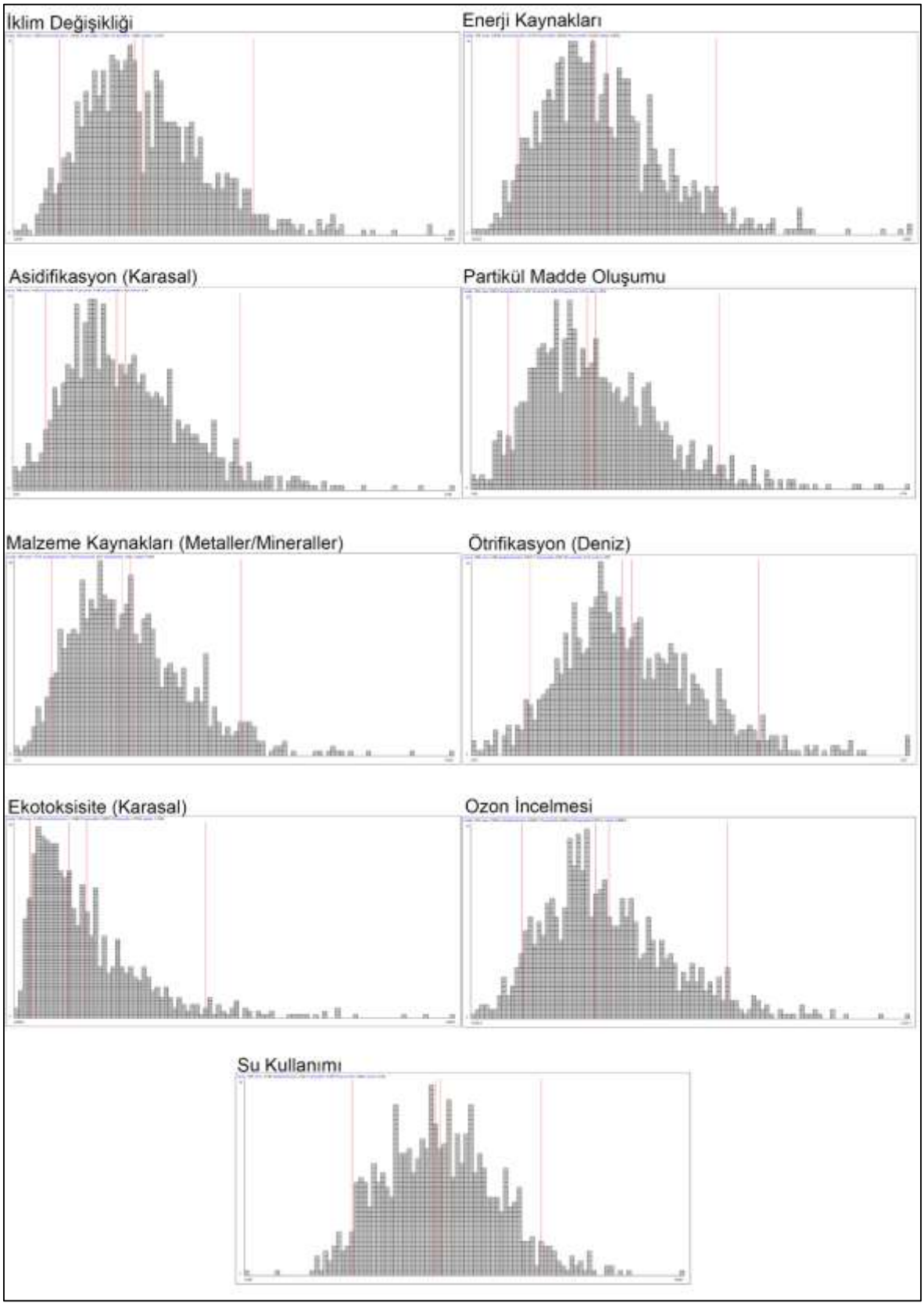
EK-10. Örnek olay-2 Senaryo-1 Monte Carlo Simülasyon grafikleri



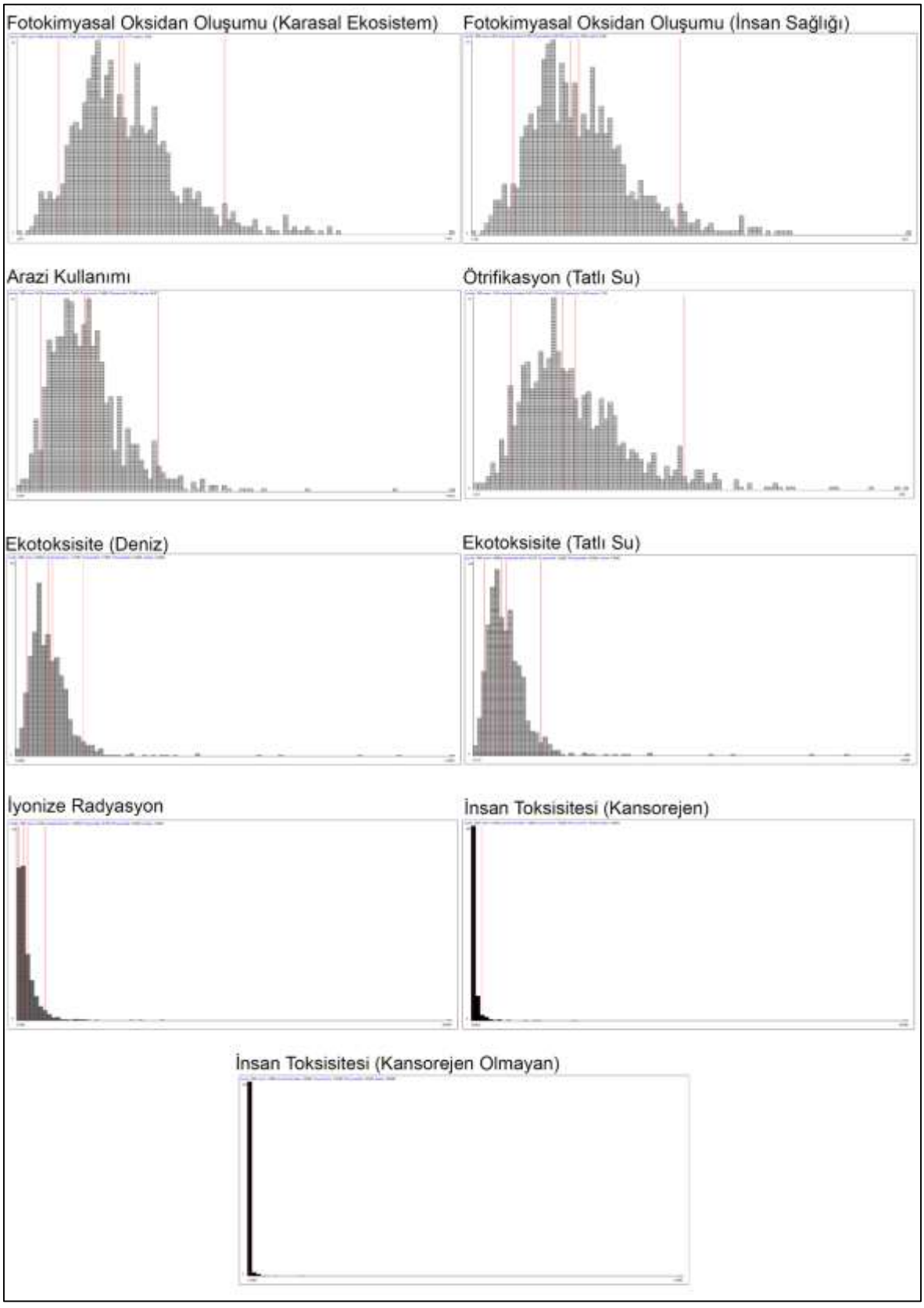
EK-10. (devam) Örnek olay-2 Monte Carlo simülasyon grafikleri



EK-11. Örnek olay-2 Senaryo-2 Monte Carlo Simülasyon grafikleri



EK-11. (devam) Örnek olay-2 Senaryo-2 Monte Carlo simülasyon grafikleri





Gazili olmak ayrıcalıktır