TÜRKİYE'DE DEMİRYOLU ULAŞIMININ YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ VE YAŞAM DÖNGÜSÜ MALİYETİ YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Alp ÖZDEMİR
Yüksek Lisans Tezi

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Eylül 2013

Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir. Proje No: 1209F145

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Alp Özdemir'in **"Türkiye'de Demiryolu Ulaşımının Yaşam Döngüsü Analizi ve Yaşam Döngüsü Maliyeti Yöntemleri ile Değerlendirilmesi"** başlıklı **Çevre Mühendisliği** Anabilim Dalındaki Yüksek Lisans Tezi 05.09.2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	**İmza**
Üye (Tez Danışmanı):	**Doç. Dr. Müfide BANAR**	**……**
Üye:	**Prof. Dr. Ö. Mete KOÇKAR**	**……**
Üye:	**Yrd. Doç. Dr. Aysun ÖZKAN**	**……**

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun …… tarih ve …… sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TÜRKİYE'DE DEMİRYOLU ULAŞIMININ YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ VE YAŞAM DÖNGÜSÜ MALİYETİ YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Alp ÖZDEMİR

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Müfide BANAR
2013, 166 Sayfa

Bu tez çalışmasında, ülkemizde karar vericilere bir girdi sağlaması amacıyla, demiryolu ulaşım sisteminin çevresel etkileri ile bu etkilerin ekonomik açıdan değerlendirilmesi Yaşam Döngüsü Analizi (Life Cycle Assessment, LCA) ve Yaşam Döngüsü Maliyet (Life Cycle Cost, LCC) yöntemleri ile birlikte yapılmıştır. LCA analizi lisanslı SimaPro 7.3.3 yazılımının CML 2 baseline 2000 yöntemi kullanılarak, LCC analizi de aynı yazılımda yeni bir maliyet modeli oluşturularak gerçekleştirilmiştir. LCA'daki etki kategorileri olarak abiyotik kaynakların tükenmesi, asidifikasyon, ötrofikasyon, küresel ısınma, toksisite, ozon tabakasının tükenmesi ve fotokimyasal sis; LCC'de ise içsel (enerji, malzeme, nakliye) maliyet ve dışsal (kirletici, kaza, gürültü) maliyet kategorileri incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, Yüksek Hızlı Tren (YHT) demiryolu hattının çevresel etkilerinin %58'i altyapı, %42'si işletme bileşenlerinden, Konvansiyonel Demiryolu'nun (KD) altyapı bileşeni %39, işletme bileşeni %61 seviyesinde çevresel etkiye neden olmakta ve KD-yük taşımasından oluşan çevresel etkilerin de %25'i altyapıdan, %75'i işletmeden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, demiryolu ulaşımı ile ilgili stratejilerin belirlenmesinde çevresel etkiler ve dışsal maliyetler mutlaka gözönüne alınmalı ve sürdürülebilir bir ulaşım stratejisi için tezde belirlenen çevresel etkiler ile maliyetleri en aza indirecek önlemler alınmalıdır.

Anahtar Kelimeler: Yaşam Döngüsü Analizi, Yaşam Döngüsü Maliyeti, Yüksek Hızlı Tren, Konvansiyonel Tren, Demiryolu Ulaşımının Çevresel Etkileri

ABSTRACT

Master of Science Thesis

DETERMINATION OF RAILWAY TRANSPORT IN TURKEY VIA LIFE CYCLE ASSESMENT AND LIFE CYCLE COST METHODS

Alp ÖZDEMİR

Anadolu University
Graduate School of Sciences
Environmental Engineering Program

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Müfide BANAR
2013, 166 pages

In this thesis, in order to provide input to decision makers in our country, the environmental impacts of railway transportation systems and the economic assessment of these impacts were carried out by using Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Cost (LCC) methods. LCA analysis was performed based on CML baseline 2000 method for selected impact categories (abiotic depletion, acidification, eutrophication, global warming, toxicity, ozone depletion and photochemical oxidation) by using licensed SimaPro 7.3.3. In LCC analysis was carried out creating to a new economic method for internal (energy, materials, transport) cost, and external cost (pollutant, accident, noise) categories by using the same software. According to findings obtained, the environmental of High Speed Train (HST) was caused by 58% infrastructure components and 42% operation components. The infrastructure components and operation components Conventional Railways (CR) caused 39%, 61% respectively. And also, the environmental impacts in freight transportation CR, caused by 25 percent of infrastructure components and 75 percent of operation components. Conclusions, in the determination of railway transportation strategies, it should be taken consider both environmental impacts and externalities cost. And also, for sustainable transportation strategy, it should be taken preventions to minimize both the environmental impacts and costs in this thesis.

Keywords: Life Cycle Assessment, Life Cycle Cost, High Speed Train, Conventional Train, Environmental Impacts of Railways Transportation

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasındaki katkılarından dolayı;

Bu tez çalışmasında olduğu gibi diğer çalışmalarımda da beni yönlendiren, çalışmamın her safhasında bilgi, yardım ve desteğini esirgemeyerek bu çalışmanın ortaya çıkmasını sağlayan, kendimi geliştirmemde en büyük paya sahip; yönlendiriciliği, model akademik kişiliği ve bana olan inancından dolayı değerli danışman hocam Doç.Dr. Müfide BANAR'a,

Yaşam Döngüsü Analizi yöntemi konusunda ve yine diğer çalışmalarımda benden desteğini, bilgisini ve hoşgörüsünü esirgemeyerek bana her zaman yardımcı olan, katı atık yönetimi araştırma grubu arkadaşlarım Yrd.Doç.Dr. Aysun ÖZKAN ve Araş.Gör.Dr. Zerrin ÇOKAYGİL'e;

Ayrıca çalışmam sırasında gerek teknik, gerekse manevi destekleriyle yanımda olan sevgili arkadaşlarım Araş.Gör. Akif ARI, Araş.Gör. Burcu ŞİMŞEK UYGUN, Derya ARIKÖK, Umut ULUTAŞ ve Seda CEYHAN'a,

Hayatimin her anında yanımda oldukları, beni desteklediklerini, bana güvendikleri, gösterdikleri büyük sevgi ve anlayışları için aileme; annem Şenel ÖZDEMİR'e, babam Yılmaz ÖZDEMİR'e, canım kardeşlerim Hilmi ve Alper ÖZDEMİR'e,

Bu tez çalışmasının gerçekleştirildiği 1209F145 no'lu Bilimsel Araştırma Projesi için Anadolu Üniversitesi Rektörlüğü ve Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığına,

sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Alp ÖZDEMİR

Eylül-2013

Annem'e

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **i**

ABSTRACT ..... **ii**

TEŞEKKÜR ..... **iii**

İÇİNDEKİLER ..... **iv**

ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **viii**

ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **x**

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xii**

1. GİRİŞ **1**

2. TÜRKİYE DEMİRYOLU ULAŞIMININ MEVCUT DURUMUNUN BELİRLENMESİ **4**

2.1. Demiryolu Altyapı Sistemi 4

2.1.1. Yüksek Hızlı Tren Demiryolu Altyapı Sistemi 6

2.1.2. Konvansiyonel Tren Demiryolu Altyapı Sistemi 11

2.2. Demiryolu İşletme Sistemi 13

2.2.1. Yüksek Hızlı Tren Demiryolu İşletme Sistemi 14

2.2.2. Konvansiyonel Tren Demiryolu İşletme Sistemi 15

3. YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ **18**

3.1. LCA Standartları 19

3.2. Kullanım Alanları ve Potansiyel Kullanıcı Grupları 21

3.2.1. Özel sektör uygulamaları 22

3.2.1.1. Ürün geliştirme 23

3.2.1.2. Pazarlama ve reklam 24
3.2.1.3. Proses seçimi ve modifikasyon 25
3.2.2. Kamusal uygulamaları 25
3.2.2.1. Kamusal uygulamalarda çevresel etiketleme 25
3.2.2.2. Diğer kamusal uygulamalar 26
3.3. LCA Yazılımları 26
3.4. Sistemin Yapısı 28
3.4.1. Hedef ve kapsamın belirlenmesi 28
3.4.1.1. Fonksiyonel birim 29
3.4.1.2. Sistem sınırları 29
3.4.1.3. Veri kalitesi 31
3.4.1.4. Kritik gözden geçirme 31
3.4.2. Envanter analizi/değerlendirmesi 32
3.4.3. Etki değerlendirmesi 33
3.4.3.1. Etki kategorilerinin tanımlanması/belirlenmesi 34
3.4.3.2. Sınıflandırma 35
3.4.3.3. Karakterizasyon 36
3.4.3.4. Normalizasyon 39
3.4.3.5. Ağırlıklandırma/değerlendirme 40
3.4.4. Yorum 40
3.5. Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC) Analizi 42
3.5.1. IEC-60300-3-3: Uygulama Kılavuzu 44
3.5.2. LCC analizinin faydaları ve kısıtları 45
3.5.3. LCC analizinin karar almada kullanımı 46
3.5.4. LCC Analiz Prosedürü 47
3.5.3.1 İçsel Maliyetler 51

3.5.3.2 Dışsal Maliyetler 53

4. KONUYLA İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR 55

4.1. LCA ile İlgili Yapılan Çalışmalar 55

4.2. LCC ile İlgili Yapılan Çalışmalar 58

4.3. LCA ve LCC Entegrasyonu 63

5. MATERYAL VE METOD 64

5.1 Çalışmada Kullanılan SimaPro 7.3.3. Yazılımı 65

5.2 Demiryolu Ulaşım Sistemi ve LCA Uygulaması 67

5.2.1. Hedef ve kapsam tanımı 67

5.2.2. Yaşam döngüsü envanter analizi 69

5.2.2.1 Veri toplama 69

5.2.2.1. Varsayımlar 70

5.2.2.2. Hesaplama prosedürü 71

5.2.3. Etki analizi 72

5.2.4. Yorum 72

5.3 Demiryolu Ulaşım Sistemi ve LCC Uygulaması 72

5.3.1. Hedef ve kapsam tanımı 73

5.3.2. Maliyet bileşenlerinin belirlenmesi 73

5.3.3. Maliyet verilerine ait envanterin oluşturulması 74

5.3.4. LCC modelinin oluşturulması ve analizinin yapılması 75

5.3.5. Yorum 78

6. BULGULAR 79

6.1. Demiryolu Ulaşımının LCA Sonuçları ve Değerlendirilmesi 79

6.2. Demiryolu Ulaşımının LCC Sonuçları ve Değerlendirme 91

6.3. LCA ve LCC Analizinin Birlikte Değerlendirilmesi 97

7. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER 99

KAYNAKLAR 102

EK-1 Demiryolu İle İlgili Tanımlamalar 108

EK-2 Yaşam Döngüsü Analizi Envanteri 110

EK-3 Yaşam Döngüsü Maliyet Envanteri..... 115

Ek-4. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi Çıktıları 121

ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1. Demiryolu hattı altyapı bileşenleri 5
2.2. Türkiye demiryollarının tarihsel gelişimi 5
2.3. Yüksek hızlı demiryolu hattı en kesiti 7
2.4. Konvansiyonel demiryolu hattı enkesiti 11
3.1. LCA aşamaları 18
3.2. Etki değerlendirmesinin bileşenleri 34
3.3. Yaşam döngüsü maliyet analizi uygulamaları … 47
3.4. Yaşam döngüsü maliyet prosedürü 48
3.5. Yaşam döngüsü maliyetinin bileşenlerinin gruplandırılması 49
3.6. Maliyet dağılım yapısı 51
4.1. LCA ve LCC entegre model yapısı 63
5.1. SimaPro 7.3.3 yazılımının yapısı 66
5.2. CML2 baseline 2000 yöntemi kullanılarak yapılan bir analizin yapısı 67
5.3. LCA analizindeki sistem sınırları 68
5.4. LCC model envanterinin oluşturulması 75
5.5. LCC metoduna etki kategorilerinin eklenmesi 76
5.6. Proseslere ait ekonomik veri girişi 77
5.7. LCC modelinin çalıştırılması 77
6.1. “1 yolcu-km” YHT demiryolu karakterizasyon sonuçları 82
6.2. “1 yolcu-km” KD karakterizasyon sonuçları 83
6.3. “Yük taşımacılığının karakterizasyon sonuçları 87
6.4. YHT demiryolu taşımacılığı normalizasyon sonuçları 89
6.5. KD yolcu taşımacılığı normalizasyon sonuçları 90
6.6. Yük taşımacılığı normalizasyon sonuçları 91
6.7. YHT demiryolu bileşenlerinin maliyet kategorilerine etkisi 93
6.8. Konvansiyonel demiryolu bileşenlerinin maliyet kategorilerine etkisi 94
6.9. Konvansiyonel demiryolu bileşenlerinin maliyet kategorilerine etkisi 96
6.10. Demiryolu ulaşımı içsel ve dışsal maliyetlerinin karşılaştırması 96
6.11. Demiryolu ulaşımı altyapı ve işletme bileşenlerinin karşılaştırılması 97
Ek-4.1. YHT’nin etki kategorilerine ait ağ görünümü 121

Ek-4.2. KD'nin etki kategorilerine ait ağ görünümü 130
Ek-4.3. Yük taşımacılığının etki kategorilerine ait ağ görünümü 139

ÇİZELGELER DİZİNİ

2.1. Yüksek hızlı tren ve konvansiyonel demiryolu hattının mevcut durumu…….. 6
2.2. Ray tiplerinin ölçüleri 8
2.3. B70 Monoblok tipi traversin ölçüleri 8
2.4. Türkiye'deki YHT hatlarının özellikleri 9
2.5. B58 tipi beton traversin ölçüleri 12
2.6. Konvansiyonel hat üzerinde çalışan trenler 17
3.1. LCA yazılımları 27
3.2. Beşikten mezara ve kapıdan kapıya sistem sınırları 30
3.3. CML 2000 yöntemine göre etki kategorileri 35
3.4. Yaşam döngüsü analizinin aşamaları ve maliyetlerle ilişkilendirilmesi 50
3.5. Hızlı tren yapım maliyetleri 52
4.1. Avrupa'da dışsal maliyet ile ilgili yapılmış çalışmalar 62
5.1. LCA bileşenleri 69
5.2. LCC maliyet bileşenlerinin sınıflandırılması 74
6.1. "1 yolcu-km" taşımacılığının toplu karakterizasyon sonuçları 80
6.2. "1 yolcu-km" taşımacılığının toplu normalizasyon sonuçları 81
6.3. Yük taşımacılığının toplu karakterizasyon ve normalizasyon sonuçları 86
6.4. YHT demiryolu yaşam döngüsü maliyeti karakterizasyon sonuçları 92
6.5. KD yaşam döngüsü maliyeti karakterizasyon sonuçları 94
6.6 Yük taşımacılığı yaşam döngüsü maliyeti karakterizasyon sonuçları 95
Ek-2. 1 Demiryolu altyapı bileşenlerine ait LCA envanteri (a-f) 110
Ek-2.2. Demiryolu işletme bileşenlerine ait LCA envanteri (a-h) 111
Ek-2.3. Demiryolu işletme bileşenleri ile ilgili varsayımlar 114
Ek-2.4. Malzeme yoğunlukları ve ısıl değer kabulleri 114
Ek-3.1. İçsel maliyet envanteri 115
Ek-3.2. Dışsal maliyet envanteri (kirleticiler) 118
Ek-4.1. Demiryolu ulaşımının küresel ısınma etkisinin emisyon envanteri 148
Ek-4.2 Demiryolu ulaşımının yüzey sularına olan toksik etkisinin emisyon envanteri 149

Ek-4.3. Demiryolu ulaşımının küresel ısınma etkisine proses dağılımının katkısı 150
Ek-4.4. Demiryolu ulaşımının yüzey sularına olan toksik etkisinin proses dağılımının katkısı 151

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ADP : Abiyotik Kaynakların Tükenmesi Potansiyeli (Abiotic Depletion Potential)

AP : Asidifikasyon Potansiyel (Acidification Potential)

ATS : Otomatik Tren Kontrol Sistemi (Automatic Train Control System)

CBS : Maliyet Dağılım Yapısı (Cost Breakdown Structures)

CFC : Kloroflorakarbon (Chlorofluorocarbon)

EA : Exergy Analizi (Exergy Analyse)

EA : Emerji Analizi (Emergy Analyse)

EEA : Avrupa Çevre Ajansı (European Environment Agency)

EEA : Şekillenmiş Enerji Analizi (Embodied Energy Analyses)

EP : Ötrofikasyon Potansiyeli (Eutrophication Potential)

ETCS : Avrupa Tren Kontrol Sistemi (European Train Control System)

EUAS : Elektrik Üretim Anonim Şirketi

FAETP :Yüzey Sularına Olan Ekotoksisite Potansiyeli (Freshwater Aquatic Eco-toxicity Potential)

GWP : Küresel Isınma Potansiyeli (Global Warming Potential)

HTP : İnsanlar Üzerine Olan Toksik Etki Potansiyeli (Human Toxicity)

IEC : Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (The International Electrotechnical Commission)

ISO : Uluslararası Standart Organizasyonu (International Organization : for Standardization)

LCA : Yaşam Döngüsü Analizi/Değerlendirmesi (Life Cycle Analyses/Assessment)

LCC : Yaşam Döngüsü Maliyeti (Life Cycle Cost)

LCCA : Yaşam Döngüsü Maliyeti Analizi (Life Cycle Cost Analyses)

LCM : Yaşam Döngüsü Yönetimi (Life Cycle Management)

KD : Konvansiyonel Demiryolu

KT : Konvansiyonel Tren

MEB : Milli Eğitim Bakanlığı

MFA	: Malzeme Akış Analizi (Materyal Flow Analyses)
MISA	: Norveç Çevresel Sistem Analizleri
ODP	: Ozon Tabakasının Tükenmesi Potansiyeli (Ozone Depletion Potential)
PAN	: Peroksi Asetil Nitrat
POCP	: Fotokimyasal Oksidant Oluşturma Potansiyeli (Photo-chemical Creative Oxidant Potential)
POP	: Fotokimyasal Sis Potansiyeli (Photochemical Oxidation)
RAMS	: Güvenlik Ulaşılabilirlik Bakım Onarım (Reliability Availability Maintainability Safety)
REPA	: Kaynak ve Çevresel Profil Analizleri (Resource and Environmental Profile Analysis)
SETAC	: Çevresel Toksikoloji ve Kimya Birliği
TCDD	: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
TEP	: Kara Ekosistemine Olan Toksik Etki Potansiyeli (Terrestrial Ecotoxicity Potential)
UIC	: Uluslararası Demiryolları Birliği
UNIFE	: Avrupa Demiryolu Endüstri Birlikleri
	: (Union of European Railway Industries)
WICE	: Çevre için Dünya Enerji Konseyi (World Institute for Conservation and Environment)
YHD	: Yüksek Hızlı Demiryolu
YHT	: Yüksek Hızlı Tren

1. GİRİŞ

Ulaşım eski zamanlardan beri toplumların en temel ihtiyaçlarından biridir. Nitekim günümüzde bu ihtiyaçların karşılanması amacıyla pek çok yeni teknolojiler ve yeni üretim yöntemleri oluşturulmaktadır. Öte yandan, ulaşım sistemlerindeki değişimlerin insan ve çevre açısından oldukça yüksek maliyetli yatırımlar oldukları da bilinmektedir. Bu nedenle ulaşım seçeneklerinin farklı açılardan değerlendirilmesi gerekir. Gelişmiş ülkelerin son yıllarda küresel iklim değişikliği nedeniyle, ulaşım stratejilerini belirlerken, çevreye daha az zararlı olan demiryolu ulaşımının payını arttırmaya yönelik politikalar üretmekte ve bu konuda önemli adımlar atmaktadırlar.

Ülkemizde de son yıllarda demiryolu ulaşım sektöründe önemli gelişmeler sağlanmış, demiryolu ulaşımı yeniden "Devlet Politikası" haline gelmiştir. Ulaştırma Bakanlığı tarafından yayımlanan Türkiye Ulaşım ve İletişim Stratejisi Hedef 2023 Raporu'nda, demiryolu ulaşımında mevcut 12.000 km demiryolu hattına ilaveten 10.000 km'si yüksek hızlı tren ve 5.000 km'si konvansiyonel tren olmak üzere yeni hatların yapılması hedeflenmiştir. Avrupa Komisyonu Türkiye 2011 yılı İlerleme Raporu'nun "Fasıl 14: Taşımacılık Politikası" başlığı altında da demiryolu taşımacılığındaki hazırlıkların erken aşamada olduğu belirtilmektedir. Bunun yanı sıra, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından hazırlanan İklim Değişikliği Ulusal Eylem Planı'na (2011-2023) göre, 2023 yılı itibariyle Ulaştırma Bakanlığı ve TCDD (Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları) sorumluluğunda, demiryollarının yük taşımacılığındaki (2009 yılında % 5 olan) payının % 15'e, yolcu taşımacılığındaki (2009 yılında % 2 olan) payının ise % 10'a çıkartılarak sera gazı emisyonlarının azaltılması hedeflenmektedir.

Bu bağlamda, ülkemiz açısından önemi gittikçe artan demiryolu taşımacılığının, ulaşımla ilgili politika ve stratejilerin belirlenmesinde bütünsel olarak ele alınması gerekliliği bu tez çalışmasının çıkış noktasını oluşturmuştur. Ulusal ve uluslararası platformlarda artık çevresel, ekonomik ve sosyal açıdan sürdürülebilirliği ortaya konan çalışmalar ön plana çıkmaktadır. O nedenle bu tez çalışmasında; demiryolu ulaşımında yaşam döngüsü analizi (LCA, Life Cycle Analysis) ve yaşam döngüsü maliyeti (LCC, Life Cycle Cost) yöntemlerinin

uygulanması ile Türkiye'deki demiryolu ulaşımının hem çevresel etkilerinin belirlenmesi hem de ekonomik değerlendirmesinin yapılabilmesi amaçlanmıştır.

Demiryolu ulaşımının çevresel performansının belirlenebilmesi için, tüm demiryolu ulaşımının ray sisteminin yapım, işletme ve bakımı; araçların üretilmesi ve işletilmesi; yakıtın üretilmesi ve dağıtılması; elektriğin üretilmesi ve dağıtılması gibi aşamalarını içerecek şekilde detaylı olarak incelenmesi ve değerlendirilmesi gereklidir. Dünyada pek çok ülke, 50 – 100 yıllık ulaşım stratejilerini ve bunların enerji tüketimi, sera gazı emisyonları vb. çevresel etkilerini belirlemek için LCA yöntemini tercih etmektedir. Bunun yanısıra, demiryolu ulaşım sistemlerinin ekonomik değerlendirmesinin de yapılması, alternatif stratejilerin karşılaştırılabilmesi ve sistemin tüm yaşam döngüsü boyunca maliyetlerinin öngörülebilmesi açısından önemlidir. Bu bakımdan LCC analizi, bir sistem, donanım ya da tesisin, tedarikten, işletme, bakım onarım ve elden çıkarmaya kadar ki tüm aşamalarında ortaya çıkan maliyetleri, LCA analizi ile bütünsel olarak değerlendiren bir analizdir.

Bu tez çalışması, "*Türkiye Demiryolu Ulaşımının Mevcut Durumunun Belirlenmesi"*, "*Yaşam Döngüsü Analizi"* ve *"Yaşam Döngüsü Maliyeti"* olmak üzere üç aşamada ele alınmıştır:

Birinci aşamada, Türkiye demiryolu ulaşım sisteminin altyapı bileşenlerine (yol uzunlukları, ray yapıları, tünel, köprü vb.) ve işletme bileşenlerine (trenlerin yolcu ve yük taşıma kapasiteleri, sefer süreleri vb.) ait mevcut durum belirlenmiştir.

İkinci aşamada, demiryolu ulaşım sisteminin çevresel performansının belirlenmesi için yaşam döngüsü analizi yöntemi kullanılmıştır. Tez çalışmasının bu aşamasında, yaşam döngüsü değerlendirmesi üç adımda gerçekleştirilmiştir: İlk adımda, hedef ve kapsam tanımı ile çalışmanın amaçları ve hedeflenen çıktılara ulaşmak için gerekli ana bileşenler ortaya konularak, demiryolu ulaşım sisteminin sınırları ve fonksiyonel birimi belirlenmiştir. İkinci adımda, yaşam döngüsü envanter analizi için (LCI) malzeme ve enerji akışının sayısal ve teknik verilerinin toplanması ve değerlendirilmesi gerektiğinden, sistem sınırları kapalı bir kutu olarak ele alınarak, bu kutuya giren tüm hammadde ve enerji bileşenleri ile kutudan çıkan kirletici bileşenler ve yan salınımlar fonksiyonel birim bazında

değerlendirilmiştir. Üçüncü adımda, yaşam döngüsü etki değerlendirmesi (LCIA) ile demiryolu ulaşım sisteminin tüm bileşenlerinin çevresel etkileri etki kategorileri bazında hesaplanmıştır. Bu çalışmada, LCA yazılımlarından en çok tercih edilenlerden birisi olan lisanslı SimaPro 7.3.3 (PRe Consultants, Netherland) yazılımı kullanılmıştır.

Tezin üçüncü aşamasında, demiryolu ulaşım sisteminin ekonomik açıdan değerlendirilmesi için yaşam döngüsü maliyeti yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada, LCC beş adımda gerçekleştirilmiştir. İlk adımda, demiryolu ulaşım sisteminin hedef ve kapsam tanımı yapılmıştır. Bir sonraki adımda, maliyet prosesleri detaylı bir şekilde incelenerek maliyet faktörleri belirlenmiş ve kategorilere ayrılmıştır. Üçüncü adımda, maliyet verileri toplanarak yaşam döngüsü maliyet envanteri oluşturulmuştur. Dördüncü adımda, belirlenen LCC modeli, lisanslı SimaPro 7.3.3 yazılımı bünyesinde kurulmuştur. Beşinci adımda, demiryolu ulaşımının her bileşeni için yaşam döngüsü maliyeti modeli ile ilgili veriler SimaPro 7.3.3 yazılımına girilerek yaşam döngüsü maliyet analizi yapılmıştır.

Tezin son aşamasında, demiryolu ulaşım sisteminin yaşam döngüsü analizi ve yaşam döngüsü maliyeti analizlerinin sonuçları yorumlanmıştır.

Sonuç olarak, diğer ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de iklim değişikliği ile ilgili politika ve stratejiler çevresel, ekonomik ve sosyal açıdan bütünsel bir bakış açısı ile belirlenmelidir. O nedenle, tezde ülkemizdeki demiryolu ulaşımı, bu bakış açısıyla incelenmiş, yaşam döngüsü analizi ve yaşam döngüsü maliyetleri birlikte gerçekleştirilerek özgün bir çalışma ortaya konulmuştur. Çalışma sonunda elde edilen bulguların, karar vericilere, başta Ulaştırma Bakanlığı ve TCDD yetkilileri olmak üzere ilgili kurum ve kuruluşlara önemli açılımlar sağlayacağı düşünülmektedir.

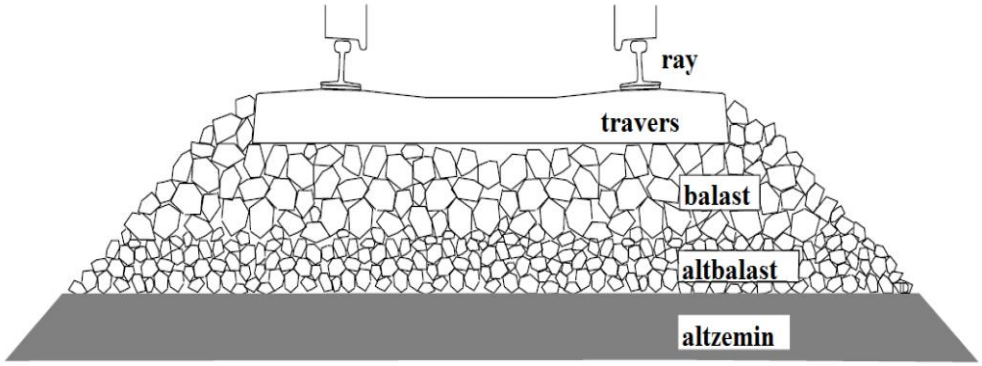
2. TÜRKİYE DEMİRYOLU ULAŞIMININ MEVCUT DURUMUNUN BELİRLENMESİ

Bir yerden bir yere madeni bir yol üzerinde, mekanik bir güçle hareket ettirilen madeni tekerlekli araçlar içinde, insan ve eşya taşınmasını sağlayan tesislerin tümüne birden "demiryolu" denir. Bu tanımdan da anlaşıldığı gibi demiryolu yalnızca ray, travers, balast gibi üstyapı ve drenler, yarma ve dolgu gibi altyapı elemanlarından ibaret olmayıp, iki nokta arasında yer alan istasyon, emniyet ve sinyalizasyon tesisleri ile birlikte raylar üstünde hareket eden araçların tümünün oluşturduğu bir bütündür (Ekim, 2007).

Demiryolu ulaşımı bütünsel bir sistem şeklinde düşünüldüğünde, altyapı ve işletme sistemi olmak üzere iki bileşenden oluştuğu görülmektedir. Altyapı sistemi, Yüksek Hızlı Tren Demiryolu Hattı ve Konvansiyonel Tren Demiryolu Hatlarının altyapı (yol uzunlukları, ray tipleri, travers tipleri, köprü, tünel gibi sanat yapıları v.b.) sisteminin bileşenleri ile ifade edilmekte, işletme sistemi ile de, Yüksek Hızlı Tren Demiryolu Hattı ve Konvansiyonel Tren Demiryolu Hatlarının işletme (yolcu ve yük taşımacılığı, tren lokomotif ve vagon türleri v.b.) bileşenleri ortaya konulmaktadır.

2.1. Demiryolu Altyapı Sistemi

Türkiye'de klasik bir demiryolu hattı, rayların ve traverslerin oluşturdukları "yol çerçevesi" ile, bu çerçevenin altına döşenmiş balast, balast altı adı verilen kırma taş tabakaları ve bunların altındaki "altyapı" adı verilen değişik zemin tabakaları ya da köprü, viyadük, tünel vb. sanat yapılarından oluşur (Yalçın ve Erel, 2007). Genellikle, demiryolu hattı altyapı bileşenleri ray, travers, balast ve küçük yol malzemelerinden oluşmaktadır (Şekil 1). Demiryolu altyapı sistemleri, demiryolu hattı üzerindeki trenlerin türlerine göre adlandırılmaktadır. Bu nedenle, Türkiye'de, "Yüksek Hızlı Tren Demiryolu Altyapı Sistemi" ve "Konvansiyonel Tren Demiryolu Altyapı Sistemi" olmak üzere 2 farklı demiryolu altyapı sistemi mevcuttur. Demiryolu altyapı sistemi bileşenleri ile ilgili teknik terimlerin tanımlamaları EK-1'de verilmiştir (MEB, 2011a).



Şekil 2.1. Demiryolu hattı altyapı bileşenleri

Türkiye yüksek hızlı tren demiryolu ve konvansiyonel tren demiryolu sisteminin tarihsel gelişimi Şekil 2.2'de, mevcut durumu ise Çizelge 2.1' de verilmiştir (TCDD, 2012).



Şekil 2.2. Türkiye demiryollarının tarihsel gelişimi (TCDD, 2012b)

Çizelge 2.1. Yüksek hızlı tren ve konvansiyonel demiryolu hattının mevcut durumu (TCDD, 2012a, 2012b)

	YHT demiryolu hattı	**Konvansiyonel demiryolu hattı**
Hat uzunluğu (km)	888	11.112
Elektrikli (km)	888	2.271
Elektriksiz (km)	0	8.841
Sinyalli hat (km)	888	3.020
Ray (km)	888	11.112
Travers (adet)		
Ahşap	0	3.326.000
Çelik	0	1.022.000
Beton (B58)	0	1.315.600
Beton (B70)	1.480.296	0
Köprü (m)		
Betonarme	5.939	34.238
Çelik	1.485	29.068
Kagir kemer	0	24.662
Viyadük	4.553	-
Tünel (m)	3.051	182

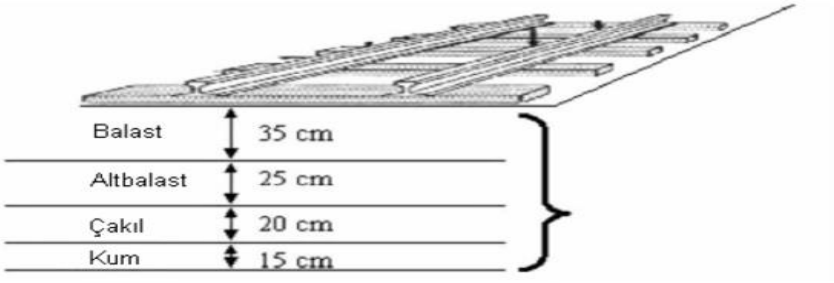
2.1.1. Yüksek Hızlı Tren Demiryolu Altyapı Sistemi

Yüksek hızlı tren demiryolu, UIC (Uluslararası Demiryolları Birliği) Yüksek Hız Departmanı ve Avrupa Birliği'nin 96/48 ve 2004/50/AB no'lu direktiflerinde "yüksek hız" ana başlığı altında çok sayıda sistemi içeren şekilde tanımlanmıştır. Buna göre; yüksek hızlı demiryolu kavramı için tek bir standart tanım bulunmamaktadır. Yüksek hızın tanımı, kompleks bir yapı sunması nedeni ile bazı kriterlere göre değişmektedir. Nüfus yoğunluğunun çok olduğu bölgelerde gürültü sıkıntısı yaratmamak amacıyla, yüksek hızlı hatlarda hızın 110 km/saat'le, özel tünel ve uzun köprülerin olduğu bölgelerde de kapasite ve emniyetle ilişkili bazı nedenlerden dolayı 160 veya 180 km/saat'le sınırlandırıldığı görülmektedir.

Eğer hattın altyapısı, seyahatin tamamında veya en azından büyük bir bölümünde, trenlerin 250 km/saat ve üzeri hızlarda işletilmesine olanak sağlamak üzere yeni inşa edilmiş ise "Yüksek Hız Hattı" denilmektedir. Yine 200 km/saat'e kadar taşımacılık yapmaya uygun konvansiyonel hatlarda, dağ veya boğazlardan geçişlere, dar ray aralığının kullanımına veya başka özel nedenlere bağlı olarak hız sınırlamaları olsa da, bu hatlar "Yüksek Hız Hattı" olarak kabul edilmektedir (TCDD, 2009).

Türkiye'de Yüksek Hızlı Demiryolu (YHD) hattı UIC standartlarına göre inşa edilmiştir. Böylece, yüksek hızlı tren demiryolu hatlarında, 60 E1 tipi ray ve ray bağlantılarında W14 elastik tip kullanılmıştır. Monoblok B70 (öngermeli beton) tipi traversler, traversler arası mesafe 60 cm olacak şekilde raylara yerleştirilmiştir. Yüksek hızlı tren demiryolu hatlarının elektrifikasyon işleminin elektrik ve enerji beslemelerinde, 25 kV 50 Hz katener voltajı, sinyalizasyon işleminde ECTS (Avrupa Tren Kontrol Sistemi) kullanılmıştır. Ayrıca, yüksek hızlı tren demiryolu hattında tren araçlarının hızlarında azalmaların meydana gelmemesi için, hat üzerinde sanat yapıları (viyadük, tünel, köprü, alt ve üst geçit, menfez) inşa edilmiştir.

YHD hattı altyapısı Şekil 2.3'de görüldüğü gibi malzemelerin (balast 35 cm, alt balast 25cm, çakıl 20 cm ve kum (15 cm) farklı seviyelerde zemin üzerine serilerek oluşturulmaktadır (Ekim, 2007).



Şekil 2.3. Yüksek hızlı demiryolu hattı en kesiti

Türkiye'de yüksek hızlı tren demiryolu, Ankara-Eskişehir ve Ankara-Konya yüksek hızlı tren demiryolu hatlarından oluşmaktadır. 2011 yılı sonu itibariyle 16 km'si istasyon içi yüksek hızlı tren demiryolu hattı olmak üzere

toplam 888 km yüksek hızlı tren demiryolu hattı bulunmaktadır. Türkiye'de yüksek hızlı tren demiryolu hatlarının altyapıları incelendiğinde, hatlarda UIC 60 (60,0 kg/m) E 1 modelinde rayların yerleştirildiği, rayların 22,5 ton dingil basıncına dayanıklı oldukları belirlenmiş ve farklı ray tiplerine ait ölçüler Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Ray tiplerinin ölçüleri (http-1, 2012)

Ray Tipi	Taban Genişliği (mm)	Yüksekliği (mm)	Mantar Genişliği (mm)	Gövde Kalınlığı (mm)
60,00 kg/m	150	172	72	16,5
49,05 kg/m	125	148	67	14
46,30 kg/m	134	145	64	15
43,30 kg/m'den az	120	138	62	12

Demiryolu hatlarında, raydan gelen yükleri daha geniş bir yüzeye yayarak balasta ileten, yolun açıklığını saptayıp, koruyan ve yolu yan etkilere karşı ekseninde tutan, rayın altına döşenmiş yapılar traverslerdir. YHD inşaatında, B70 tipi (öngermeli beton) traversler kullanılmış olup bu iki travers arası açıklık mesafesi 60 cm olacak şekilde yerleştirilmiştir. B70 tipi traversine ait ölçüler Çizelge 2.3'de verilmiştir.

Çizelge 2.3. B70 Monoblok tipi traversin ölçüleri Kozak (2010)

Ölçütler	B70
Uzunluk (cm)	260
Orta alt genişlik (cm)	22
Uç alt genişlik (cm)	30
Orta yükseklik (cm)	17,5
Uç yükseklik (cm)	20
Ağırlık - seletli (kg)	300
Çimento dozajı (kg)	500
28 günlük ortalama küp basınç dayanımları (MPa)	75

Yüksek hızlı tren demiryolunun sanat yapıları incelendiğinde ise 22.5 dingil basıncına dayanıklı 710 adet 7426 m uzunluğunda köprü olduğu tespit edilmiştir. Yüksek hızlı tren demiryolu hatlarının inşaat ve altyapı çalışmaları ile ilgili teknik ve detaylı bilgiler Çizelge 2.4'de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Türkiye'deki YHT hatlarının özellikleri (TCDD 2009; 2010)

YHT Hatları	**Hat Özellikleri**
Ankara-Eskişehir Yüksek Hızlı Tren Demiryolu Hattı	• Hattın yapımına 2003 yılında başlanılmış olup, yolcu taşımacılığına Mart 2009 yılında geçilmiştir. • Ankara - Eskişehir yüksek hızlı tren demiryolu hattı, Ankara-Sincan, Sincan-Esenkent, Esenkent-Eskişehir kısımlarından oluşmakta olup mesafe 245 km'dir. • Sincan-Esenkent yüksek hızlı tren demiryolu hattı, 15 km uzunluğunda çift yönlü olarak inşa edilmiştir. Hattın inşaat aşamasında, 2.570.000 m^3 kazı, 1.375.000 m^3 toprak dolgusu yapılmıştır. Hat yapımında, 3.714 ton UIC 60 E1 tipinde ray, 50.000 adet Monoblok B70 tipi travers döşenmesi ile 195.000 ton balast dökülmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca hat üzerinde 360 m uzunluğunda viyadük, 280 m uzunluğunda tünel, 1 adet demiryolu köprüsü, 3 adet nehir köprüsü, 10 adet alt geçit, 2 adet üst geçit ve 15 adet menfez olmak üzere çeşitli sanat yapıları inşa edilmiştir • Esenkent-Eskişehir yüksek hızlı tren demiryolu hattı, 206 km uzunluğunda çift yönlü olarak inşa edilmiştir. Hattın inşaat aşamasında 14.240.000 m^3 kazı ve 10.850.000 m^3 toprak dolgusu yapılmıştır. Hat için 51.000 ton UIC 60 E1 tipinde ray, 680.000 adet Monoblok B70 tipi travers döşenmesi ve raylar arasında 2.500.000 ton balast dökülmüştür. Hat üzerinde, 3.996 m uzunluğunda 4 adet viyadük, 471 m uzunluğunda 1 adet tünel, 13 adet nehir köprüsü, 27 adet üstgeçit, 30 adet karayolu altgeçidi ve 254 adet menfez gibi sanat yapıları inşa edilmiştir

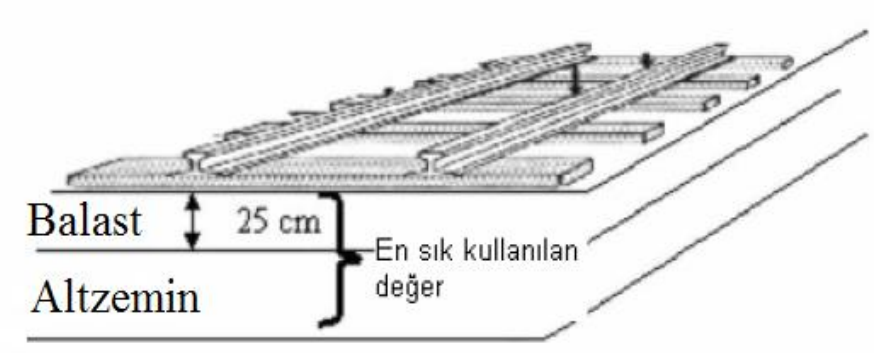
Çizelge 2.4 (devam). Türkiye'deki YHT hatlarının özellikleri (TCDD 2009; 2010)

YHT Hatları	Hat Özellikleri
Ankara-Konya Yüksek Hızlı Tren Demiryolu Hattı	• Hattın inşaatına 2007 yılında başlanılmış olup, yolcu taşımacılığına 23 Ağustos 2011 tarihinde geçilmiştir. • Ankara-Konya yüksek hızlı demiryolu hattı 306 km uzunluğuna sahiptir. Ankara-Polatlı arasında, Ankara-Eskişehir Yüksek Hızlı Tren Demiryolu inşaatı kapsamında yapılan, 94 km uzunluğunda mevcut yüksek hızlı demiryolu hattı kullanılmaktadır. Geriye kalan 212 km'lik hattın inşaatı ise 2 bölümde gerçekleştirilmiştir. 1.bölümde; Polatlı-Örnekköy yüksek hızlı tren demiryolu hattı, 2.bölümde Örnekköy-Konya yüksek hızlı tren demiryolu hatları inşa edilmiştir. • Polatlı-Örnekköy yüksek hızlı tren demiryolu hattı, 100 km uzunluğunda çift yönlü olarak inşa edilmesi sırasında, 27.000.000 m^3 kazı, 13.000.000 m^3 toprak dolgusu yapılmıştır. Hattın oluşturulmasında, 24.758 ton UIC 60 E1 tipinde ray, 333.000 adet Monoblok B70 tipi travers ile 1.214.000 ton balast kullanılmıştır. Hat üzerinde, 2.030 metre uzunluğunda 1 adet tünel, 6 adet köprü, 26 adet üstgeçit, 58 adet altgeçit, 129 adet menfez gibi sanat yapılarının inşası gerçekleştirilmiştir. • Örnekköy-Konya bölümünde, yüksek hızlı tren demiryolu hattı, 112 km uzunluğunda çift yönlü olarak inşa edilmiştir. Bu hattın inşaat safhasında, 6.500.000 m^3 kazı ve 2.500.000 m^3 toprak dolgusu yapılmış olup UIC 60 E1 tipinde ray, 373.300 adet Monoblok B70 tipi travers ve 1.359.223 ton balast kullanılmıştır. Bunlara ilaveten hat üzerinde, 1 adet köprü, 1 adet üst geçit, 25 afet altgeçit ve 14 adet menfez yapısı gibi sanat yapıları kurulmuştur

2.1.2. Konvansiyonel Tren Demiryolu Altyapı Sistemi

Uluslararası Demiryolları Birliği 96/48 ve 2004/50/AB no'lu Avrupa Birliği direktiflerinde yapılmış olan yüksek hız tanımıyla ilgili olarak belirlenen standardın altında kalan hatlar "Konvansiyonel (Geleneksel-Klasik)" olarak kabul edilmektedir (TCDD, 2009).

Konvansiyonel demiryolu (KD) hattına ait bir enkesit Şekil 2.4'de verilmiştir. Bu şekle göre KD hattı, alt zemin (kum ve çakıl) ve balast malzemelerinin serilmesi ile oluşmaktadır. Balast tabakasının 25 cm, alt zemin tabakasını oluşturan çakıl ve kum malzemelerinin 15'er cm olarak inşa edilmesi gerekmektedir (Ekim, 2007).



Şekil 2.4. Konvansiyonel demiryolu hattı en-kesiti

TCDD (2012a) tarafından yapılan bir çalışmada, Türkiye'de 8.700 km'si konvansiyonel anahat ve 2.342 km'si tali hat olmak üzere toplam 11.112 km konvansiyonel demiryolu hattı bulunduğu belirlenmiştir. Bu hatların yaklaşık %21'inin elektrifikasyonu (2.271 km), %27'sinin de sinyalizasyonu (3.020 km) tamamlanmıştır.

Konvansiyonel tren demiryolu hatlarında 46,30 kg/m den az, 46,30 kg/m, 49,05 kg/m ve 60,00 kg/m olmak üzere 4 farklı ray tipi kullanılmıştır. Bu rayların Türkiye'de konvansiyonel tren demiryolu hatları üzerindeki dağılımları sırasıyla, %8,2, %8,9, %66,9 ve %16'dır. Konvansiyonel tren demiryolu hattında raylar arasında kullanılan travers tipleri; çelik, ahşap ve beton (B58) olmak üzere 3 farklı

tiptedir. Bu demiryolu hattı üzerinde döşenen, çelik travers 341 km, ahşap travers 1418 km, beton (B58) travers ise 7011 km uzunluğundadır.

Konvansiyonel demiryolu hattı üzerinde günümüzde sadece B58 tipinde beton travers kullanıldığı kabul edilmiştir. B58 tipine ait ölçüler Çizelge 2. 4'de verilmiştir. Konvansiyonel demiryolu hattındaki traversler arası açıklık 50 cm olacak biçimde yerleştirilmektedir.

Çizelge 2.5. B58 tipi beton traversin ölçüleri (Kozak, 2010)

Ölçütler	**B58 Tipi**	**Birim**
Uzunluk	240	cm
Orta alt genişlik	22	cm
Uç alt genişlik	30	cm
Orta yükseklik	17,5	cm
Uç yükseklik	20	cm
Ağırlık (seletli)	252	kg
Çimento dozajı	450	kg
28 günlük ortalama küp basınç dayanımları	65	MPa

Konvansiyonel tren demiryolu hattı üzerinde, 768 adet, 187.078 m uzunluğunda tünel vardır. Konvansiyonel tren demiryolu hatlarında 3 farklı tipte köprü inşa edilmiştir. Bu köprüler; 1.306 adet, 29.068 m uzunluğunda çelik köprü, 11.733 adet 34.238 m uzunluğunda betonarme köprü ve 12.487 adet, 87.968 m uzunluğunda kâgir kemer köprüsünden oluşmaktadır.

2.2. Demiryolu İşletme Sistemi

Türkiye'de demiryolu işletme sisteminde anahat yolcu taşımacılığı ve yük taşımacılığı olmak üzere iki tip işletme sistemi uygulanmaktadır. Yolcu taşımacılığı, yüksek hızlı tren demiryolu hatları ve konvansiyonel tren demiryolu hatları ile sağlanırken, yük taşımacılığı sadece konvansiyonel tren demiryolu hattıyla gerçekleştirilmektedir. Bu iki taşımacılıkta kullanılan trenler birbirinden tamamen farklı olup aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

Yolcu trenleri; yolcu taşınması amacıyla işletilen trenler olup hız, konfor ve diğer özelliklerine göre sınıflandırılırlar. Banliyö trenleri, büyük kentlerin TCDD tarafından belirlenen kesimlerinde toplu yolcu taşıması yapan trenlerdir. Süper ekspres trenler, en hızlı ve konforlu trenler olup, büyük kentler arasında direkt yolcu taşıması yapan, ara gar ve istasyonlarda durdurulmayan trenlerdir. Mavi trenler, işledikleri bölgenin önemli merkezleri dışında durmayan hızlı trenlerdir. Ekspresler, uzun mesafeli hızlı trenler olup, yolcusu yoğun olan merkezlerde duran trenlerdir. Normal yolcu trenleri, kısa ve uzun mesafe trenleri olup, yerleşim merkezleri arasında çalışan ve aradaki bütün istasyonlar ile duraklarda duran trenlerdir (MEB, 2011b).

Yük trenleri; yük taşıması amacıyla işletilen trenler olup, hız ve gördükleri iş bakımından şu şekilde sınıflandırılırlar: Ekspres yük trenleri, belirli merkezler arasında doğru yük taşıyan, işletme zorunluluğu dışında istasyonlarda durdurulmayan ve manevra yaptırılmayan trenlerdir. Blok yük trenleri, belirli merkezler arasında demir cevheri, kömür, konteyner ve benzeri programlı yük taşımalarının yapıldığı, işletme zorunluluğu dışında ara gar ve istasyonlarda durdurulmayan ve manevra yaptırılmayan, belli vagon dizileri ile sefer ettirilen trenlerdir. Bölgesel hızlı yük trenleri, teşkilat merkezleri arasında yük taşıması yapan, işletme zorunluluğu dışında durdurulmayan ve manevra yaptırılmayan hızlı trenlerdir. Yavaş yük trenleri, işledikleri bölgenin bütün istasyonları arasında vagon ve parça taşıması yapan ve istasyon manevralarını sağlayan trenlerdir. Özel yük trenleri, TCDD ile diğer kişi, kurum ve kuruluşlarının isteği üzerine tarifeli ve tarifesiz olarak sefere konulan, tarife listesinde gösterilmeyen trenlerdir (MEB, 2011b).

2.2.1. Yüksek Hızlı Tren Demiryolu İşletme Sistemi

Türkiye'de yüksek hızlı tren demiryolu hattında işletilen yüksek hızlı trenler İspanya'nın CAF firması tarafından üretilmiştir. Türkiye'de 12 adet YHT seti mevcut olup 11 tanesi faal olarak çalışmaktadır. Yüksek hızlı tren işletmesinde kullanılan 1 tren seti 6 vagondan oluşmaktadır. Her 1 tren seti 419 yolcu taşıma kapasitesine sahiptir. Tren setinin uzunluğu 158.5 m ve tren setlerinin çekilmesinde MB15126A tipinde çeken araç kullanılmaktadır. Yüksek hızlı tren aracının işletme hızı azami 250 km/saat, araç gücü 4800 kW'dir. Yüksek hızlı trenin dingil basıncının 17 ton, katener voltajının 25 KV 50 Hz ve sinyalizasyon tipinin ETCS (Avrupa Tren Kontrol Sistemi), Level 1 ATS (Otomatik Tren Kontrol Sistemi) olduğu belirlenmiştir (TCDD, 2012a)

Türkiye'de YHT demiryolu hatları üzerinde sadece yolcu taşımacılığı yapılmakta olup yük taşımacılığı yapılmamaktadır.

YHT 13 Mart 2009 tarihinde, Ankara-İstanbul Hızlı Tren projesinin 1.etabı olan Ankara-Eskişehir-Ankara arasında yolcu taşımacılığı ile başlamıştır.

- **Ankara-Eskişehir YHT hattı*:*** Ankara-Eskişehir arasında günde toplam 8 seferle başlayan YHT'lerin sefer sayısı 1 Haziran 2011 tarihinden itibaren 20 adede çıkartılmıştır. YHT öncesinde konvansiyonel trenlerle günde ortalama 572 yolcu taşınırken, YHT sonrasında bu sayı günde ortalama 7.000 kişiye ulaşmıştır. Daha önce Ankara-Eskişehir arasında %8 olan tren taşıma payı YHT ile % 72'ye ulaşmıştır. 2009 Yılı Mart-Aralık döneminde 942.341, 2010 yılında 1.889.666 kişi taşınmış, 2011 yılında 2.147.055 olmak üzere Eskişehir hattında 4.979.062 adet yolcu taşınmıştır. Eskişehir YHT ile 13 Mart 2009 – 31 Aralık 2011 tarihleri arasında toplam 17.326 sefer, 4.244.870 tren-km yapılmıştır. Doluluk oranı %70'tir. YHT'lerin işletmeye alınması ile Eskişehir-Ankara hattında, otobüs taşımalarının %55 olan payı %10'a, %37 olan özel araç taşıma payını %18'e düştüğü ve %8 olan tren payının ise YHT sonrası %72'ye yükseldiği görülmektedir (TCDD, 2012b).
- **Ankara-Konya YHT hattı:** 24 Ağustos 2011 tarihinde günde 8 sefer ile ticari yolcu taşımacılığına başlayan Ankara-Konya YHT sefer sayısı 1

Aralık 2011 tarihinde günde 14'e çıkarılmıştır. 24 Ağustos 2011 – 31 Aralık 2011 tarihleri arasında 1.288 sefer yapılmış ve toplam 408.328 yolcu taşınmıştır. Yapılan tren-km 390.264, doluluk oranı ise %78'dir. YHT'lerin işletmeye alınması ile parkurda, otobüs taşımalarının %70 olan payı %35'e, %29 olan özel araç taşıma payının %11'e düştüğü ve bu parkurda taşıma payı olmayan trenin ise YHT sonrası %54 pay aldığı görülmektedir (TCDD, 2012b).

Ankara-Eskişehir ve Ankara-Konya hatlarında 2009-2010-2011 yıllarında YHT'ler ile toplam 5.387.390 yolcu taşınmış ve 18.614 sefer yapılmıştır. Bu yıllarda çalışan YHT'lerin ortalama doluluk oranı ise %71'dir (TCDD, 2012b). Sonuç olarak, Türkiye'de YHT demiryolu hattında, 2011 yılı sonunda, tren araçlarının 2.334.688 tren km işletilmesi ile 2.556.615 yolcunun, 664.981.000 yolcu-km taşındığı belirlenmiştir (TCDD, 2012a).

2.2.2. Konvansiyonel Tren Demiryolu İşletme Sistemi

Türkiye'de konvansiyonel tren demiryolu işletme sisteminde yolcu ve yük taşımacılığı yapılmaktadır.

2011 yılı sonu itibariyle TCDD'nin çeken araç parkında 45 adet elektrikli loko, 489 adet anahat dizelli loko, 46 adet manevra loko, 69 adet elektrikli dizi, 56 adet dizelli dizi, 12 set yüksek hızlı tren, çekilen araç parkında ise 962 adet yolcu vagonu bulunmaktadır. TCDD'nin yük taşımacılığında kullanmak üzere kendisine ait 15.330 adet, 2.870 adet özel olmak üzere toplam 18.200 adet yük vagonu bulunmaktadır (TCDD, 2012b). Diğer taraftan, dizelli lokomotiflerin % 82'si, elektrikli lokomotiflerin % 80'i, yolcu vagonlarının % 61'i, yük vagonlarının % 56'sı 20 yaşın üzerindedir.

Türkiye'de konvansiyonel tren demiryolu hattındaki yolcu taşımacılığı, banliyö ve anahat yolcu taşıma aşamalarından oluşmaktadır (TCDD, 2012b).

- **Banliyö taşımacılığı:** TCDD, İstanbul'da Anadolu yakasında H.Paşa-Gebze (176 sefer/gün), Avrupa yakasında İstanbul-Halkalı hatlarında (120 sefer/gün), Ankara'da Sincan-Kayaş hattında (168 sefer/gün) ve İzmir'de

Aliağa-Halkapınar (51 sefer/gün), Halkapınar-Cumaovası (95 sefer/gün) hatlarında banliyö hizmeti vermektedir. 2011 yılında banliyö taşımacılığı ile H.Paşa-Gebze hattında 29.987.000 yolcu, İstanbul-Halkalı hattında 23.736.000 yolcu, Sincan-Kayaş hattında 6.703.000 yolcu ve Aliağa-Cumaovası hatlarında 35.400.000 yolcu taşınmıştır (TCDD 2012b; İZBAN 2013).

- **Anahat yolcu taşımacılığı:** Anahat yolcu taşımacılığı için konvansiyonel tren demiryolu hattında süper ekspres trenler, mavi trenler, ekspres trenler ve bölgesel trenleri çalışmakta olup, çalışan tren adları ve tren hatları Çizelge 2.6'de verilmiştir. Bu trenler ile 2011 yılında konvansiyonel hat üzerinde toplam 26.769.000 yolcu taşınmıştır (TCDD, 2012b).
- **Yük taşımacılığı:** Türkiye'de konvansiyonel tren demiryolu hattında yük taşımacılığı TCDD'ye ait yük vagonları ve kişiye (özel sektöre) ait yük vagonları ile yapılmaktadır. TCDD yük taşımacılığında, 2004 yılından itibaren blok tren işletmeciliği ile yük taşımacılığına geçmiştir. Bu kapsamda 158 adet yurtiçi, 33 adet uluslararası olmak üzere günde karşılıklı 191 adet blok yük treni çalıştırılmaktadır. 2011 yılında, Türkiye'de konvansiyonel demiryolu hattında 25 milyon ton yük taşınmıştır. Bu kadar yükün taşınması sırasında tren araçları, yaklaşık 11 milyar ton-km mesafe çalıştırılmış olup yaklaşık 17.6 milyar yük hamton-km yapılmıştır (TCDD, 2012b).

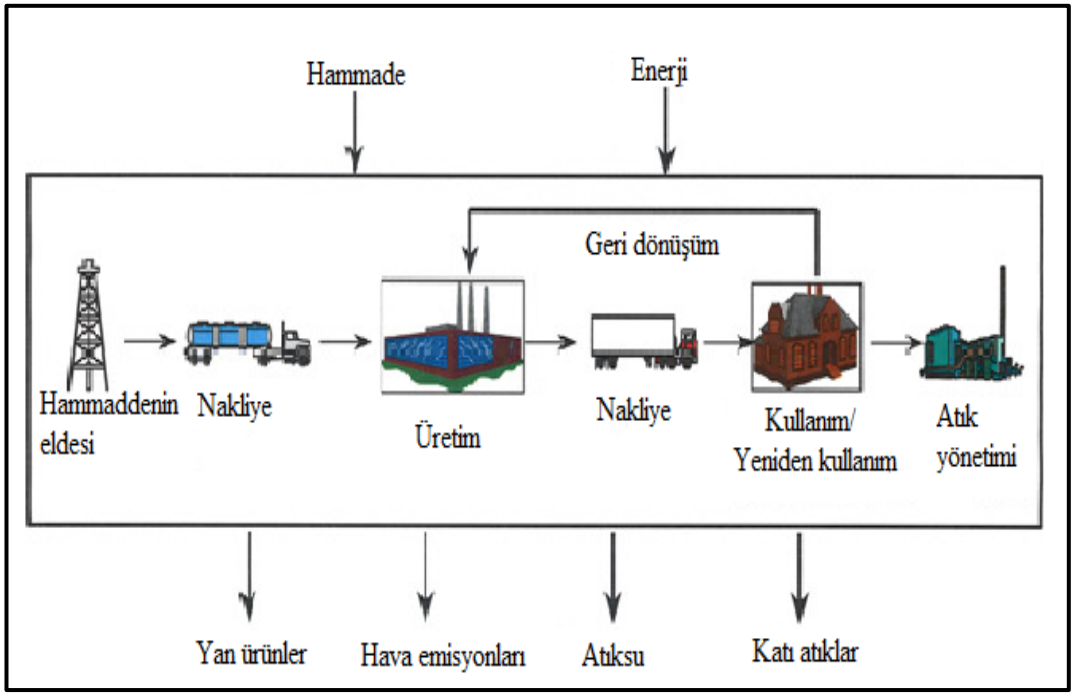
Çizelge 2.6. Konvansiyonel hat üzerinde çalışan trenler (TCDD, 2012b)

Tren Türü	Tren Adı	Hattı
Süper Ekspres Trenler	Başkent Ekspresi	Eskişehir - H.Paşa[(1)]
	Fatih Ekspresi	Ankara - H.Paşa[(1)]
	Cumhuriyet Ekspresi	Eskişehir - H.Paşa[(1)]
	6 Eylül Ekspresi	İzmir - Bandırma
	17 Eylül Ekspresi	İzmir - Bandırma
	Eskişehir Ekspresi	Eskişehir - H.Paşa[(1)]
	Sakarya Ekspresi	Eskişehir - H.Paşa[(1)]
Mavi Trenler	İç Anadolu Mavi	H.Paşa - Adana
	İzmir Mavi	Ankara - İzmir
	Çukurova Mavi	Ankara - Adana
Ekspres Trenler	Boğaziçi Ekspresi	Ankara - H.Paşa[(2)]
	Anadolu Ekspresi	Ankara - H.Paşa[(1)]
	Ankara Ekspresi	Ankara - H.Paşa[(1)]
	Karesi Ekspresi	Ankara - İzmir
	Meram Ekspresi	H.Paşa - Konya
	Doğu Ekspresi	H.Paşa - Kars[(3)]
	Güney Ekspresi	H.Paşa - Kurtalan
	Van Gölü Ekspresi	H.Paşa - Tatvan
	Fırat Ekspresi	Adana - Elazığ
	Ege Ekspresi	Afyon - İzmir
Bölgesel Ekspres	Bölgesel Ekspres	H.Paşa- Adapazarı [(1)]
	Bölgesel Ekspres	Adana – Mersin
	Bölgesel Ekspres	Zonguldak - Karabük

[(1)] Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi yol çalışmaları kapsamında 01 Şubat 2012 tarihinden itibaren 24 ay süreyle ara verilmiştir.
[(2)] Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi yol çalışmaları kapsamında 1 Şubat 2012 tarihinden itibaren 24 ay süreyle Ankara-Arifiye-Ankara arasında işletilecektir. Yol çalışmaları nedeniyle 02.04.2012 tarihinden itibaren Eskişehir-Arifiye-Eskişehir arasında işletilmektedir.
[(3)] Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi yol çalışmaları kapsamında 1 Şubat 2012 tarihinden itibaren 24 ay süreyle Ankara-Kars-Ankara arasında işletilmektedir.

3. YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ

Yaşam Döngüsü Analizi (Life Cycle Analysis) ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (Life Cycle Assessment), bir eylemin tüm çevresel boyutlarını; hammaddenin doğadan eldesinden tüm atıklar tekrar doğaya dönene kadar değerlendiren bir sistemdir. Bu değerlendirme, ürünün işlenmesinde olduğu kadar enerji de dahil olmak üzere hammaddenin üretilmesi, kullanılması ve final bertarafı sırasında havaya, suya ve toprağa olan tüm etkilerini içerir. LCA hem doğrudan (üretim aşamasında oluşan emisyonlar ve kullanılan enerji v.s.), hem de dolaylı (hammadde eldesi, ürünün dağıtılması, tüketici tarafından kullanılması ve bertarafı v.s.) etkileri belirlemek ve ölçmek için kullanılmaktadır (Şekil 3.1). LCA'nın sistematik yaklaşımı, belirli bir ürün veya sistemin etkilerinin doğru bir şekilde ölçülmesini sağlar. Belirli bir tesise ve sadece sahada oluşan aktivitelere odaklanan endüstriyel bir prosesin çevresel denetimlerinden farklı olarak LCA, firmanın tedarikçileri ve müşterileri ile arasındaki ilişkileri de alır. Bunun sonucu, bir ürünün çevresel etkilerinin beşikten mezara kadar olan toplam analizi ortaya çıkmış olur (Çokaygil, 2005) .



Şekil 3.1. LCA aşamaları

LCA'nın temel düşüncesi, 1960'lı yılların başlarındaki enerji ve hammadde kullanımındaki sınırlamaların artması ile ortaya çıkmıştır. Bu konuda yapılan çalışmalar enerji tüketimi, gelecekte kaynak elde edilmesi ve kullanımına yönelik projeksiyonlarla ilgili yapılmıştır (Özeler ve Demirer, 2001).

1960'ların sonunda ve 1970'lerin başında Kaynak ve Çevresel Profil Analizleri (REPAS) LCA'nın ilk habercisi olmuştur. Özel sektör için yapılan bir dizi çalışma, önceleri Midwest Araştırma Enstitüsü tarafından, daha sonra ise Franklin Associates Ltd. Danışmanlık Şirketi tarafından yönetilmiştir. Coca Cola ve Mobil Corporation, REPA çalışmaları yapan firmalardan ikisidir (Çokaygil, 2005).

Gaines'in (1981) ve Lundholm ve Sundstorm'un (1985) çalışmalarında, LCA, hammadde talepleri, enerji girdileri ve atık üretimi konuları karar verme ve metot belirleme için kullanılmıştır. Çevresel etkinin sınıflandırılması yoluyla daha kompleks analiz yapma girişimleri LCA metodolojisinin gelişim sürecinde sonradan oluşmuştur (Çokaygil, 2005).

Modern LCA metodolojisi ise 1990'lar boyunca standartların geliştirilmesi konusunda araştırılmıştır. SETAC (Çevresel Toksikoloji ve Kimya Birliği, Society of Environmental Toxicology and Chemistry) bu konuda ilk girişim olarak "Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi İçin Teknik Yapı" adlı uluslararası bir LCA standardı yayınlamıştır. Bu standart, çağdaş LCA'nın bileşenlerinin ana hatlarını, hedef tanımı, envanter değerlendirmesi, etki değerlendirmesi ve geliştirme analizi olarak açıkça ortaya koymuştur (Çokaygil, 2005).

3.1. LCA Standartları

Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) olmak üzere pek çok kurum/kuruluş, LCA çalışmalarını güvenilir bir tabana oturtabilmek için çeşitli standartlar ve prosedürler yayınlamışlardır. Bunlardan belki de en bilinenleri Çevre Yönetim Sistemleri olarak anılan ISO 14000 serisi kapsamında yer alan TS EN ISO 14040, TS EN ISO 14041, TS EN ISO 14042, TS EN ISO 14043 ve TS EN ISO 14044'tür.

TS EN ISO 14041, bir Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinin (LCA) kapsam ve hedef tanımının derlenmesi ve hazırlanması için ve bir yaşam döngüsü envanter analizinin gerçekleştirilmesi, yorumlanması ve bildirilmesi için gerekli olan gereklilik ve prosedürleri belirtmektedir.

TS EN ISO 14042 ve TS EN ISO 14043, sırasıyla etki değerlendirmesi ve yaşam döngüsü yorumunu ele almakla beraber diğer Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi aşamalarını da tanımlamaktadır.

2005 yılında TS EN ISO 14041, 2007 yıllında TS EN ISO 14042 ve TS EN ISO 14043 standartları yürürlükten kaldırılarak TS EN ISO 14040 ve TS EN ISO 14044 standartlarına atfedilmiştir. Türk Standartları Enstitüsü (TSE) tarafından "Hayat Boyu Değerlendirme" adı altında yayınlanan ve yürürlükte olan standartlar ise şunlardır:

TS EN ISO 14040: Hayat Boyu Değerlendirme – İlkeler ve Çerçeve

TS EN ISO 14044: Hayat Boyu Değerlendirme – Gerekler ve Kılavuz

- TS EN ISO 14040: Hayat Boyu Değerlendirme – İlkeler ve Çerçeve: ISO 14040 serisi, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi çalışmaları için bir metot önermemekte, gerçekleştirilme ve bildirilmesine yönelik genel çerçeve, prensipler ve gereklilikleri belirtmektedir. TS EN ISO 14040, ancak bir Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinin nasıl yürütülmesi, incelenmesi, sunulması ve kullanılması gerektiğine dair bilgi sağlama amacını taşımaktadır. Bu standartlar Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi terminolojisi, veri kalitesi, nasıl güvence altına alınacağı, sonuçların sunumu, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi uygulamaları ve kısıtlamalarını kapsamaktadır.
- TS EN ISO 14044: Bu standart, yaşam döngüsü değerlendirmesi için gerekleri belirtir ve LCA çalışmasının yapılmasına yönelik bir kılavuz sağlar. Bu standartta, yürürlükten kaldırılmış olan TS EN ISO 14041, 14042 ve 14043 standartlarının yer aldığı görülmektedir. Bu nedenle bu standartta, LCA'nın amaç ve kapsam tarifinin derlenmesi ve hazırlanması ile yaşam döngüsü analizlerinin yapılması, yorumlanması ve rapor edilmesi için gerekli işlemler ve şartlar kapsanmaktadır. Ayrıca yaşam

döngüsü değerlendirmesinde elde edilen verilerin değerlendirilmesine ilişkin esaslar bulunmaktadır. Bu standardın tanımlar bölümünde verilen; "etki kategorisi" tanımı, ürünün/sistemin etkilediği çevresel alanları belirtmektedir (örn: iklim değişikliği, ozon tabakasının tahribatı, ötrofikasyon, asidifikasyon, kanserojen etkiler, radyasyon gibi). "Kategori göstergeleri" ne örnek olarak; iklim değişikliği, KIP (Küresel Isınma Potansiyeli) eşdeğeri olan kg CO_2 ile verilir ve bir maddenin bu etkiye katkısı kg CO_2/kg madde olarak hesaplanır. LCA çalışmasının yorum aşamasında, etki analizinden bulunan sonuçların, bütünlük, hassasiyet ve uygunluk açısından kontrolünün yapılmasında, yorumlanmasında, bu sonuçlara dayalı önerilerin sunulmasında ve raporun hazırlanmasında uyulması gerekli hususları açıklanmaktır (Çokaygil ve Banar, 2005).

3.2. Kullanım Alanları ve Potansiyel Kullanıcı Grupları

LCA, ulaşım seçenekleri (kara, demiryolu, hava vb.), elektrik üretim seçenekleri (termik, hidrolik, nükleer, güneş, rüzgar vb.), atık yönetim senaryoları (ambalajlar, yiyecekler, inşaat malzemeleri vb.) gibi bir çok karmaşık sistemden pek çok farklı ürüne ve prosese uygulanabildiği gibi, ürün, proses geliştirme, stratejik karar verme, eko-tasarım, ürün karşılaştırma, eko-etiketleme, pazarlama gibi bir dizi uygulama için de kullanılabilmekte olup, son yıllarda artan bir şekilde planlanma ve projelendirilme aşamalarında önemli bir araç haline gelmiştir.

LCA uygulamaları ve sonuçları ile ilgilenebilecek çeşitli kullanıcı grupları; firmalar, ticari birlikler, kamu kuruluşları, çevreciler ve tüketici kuruluşları gibi diğer kamu dışı kuruluşlar olabilir. Bu gruplar, LCA aracını dahili çevre yönetimi ve harici amaçlar için kullanabilirler. Harici amaçlar için kullanımı, çalışmanın ayrıntı düzeyine, kullanılan veri ve metotların şeffaflık derecesine ve çalışmanın bütünlüğüne bağlıdır. Çalışmanın uygulama ve sınırlamalarına karar verirken gözönünde bulundurulması gereken konular; ele alınması düşünülen çalışmanın amaç ve kapsamının belirlenmesi, sonuçların kamuoyuna sunumu, sonuçlara dikkati çekilmesi istenen kitlenin eğitim düzeyi gibi birçok faktöre bağlı olmaktadır.

LCA, farklı uygulayıcılar için farklı amaçlarla kullanılmaktadır (Çokaygil, 2005)

- Sanayide, stratejik planlama, ürün tasarımı veya bunların yenilenmesi ve geliştirilmesinde
- Kamu sektöründe; idari düzenlemeler, araştırma projeleri ve kalkınma finansmanı gibi konularda karar verilmesinde
- Başarı değerlendirilmesi için çevresel göstergelerin seçilmesinde
- Bir ürünün ekolojik yönüyle ilgili bir etiketlendirme programının hazırlanmasında

3.2.1. Özel sektör uygulamaları

LCA'nın özel sektördeki kullanım alanları büyük çeşitlilikler göstermektedir. Bu çeşitlilik, büyük oranda, ele alınan şirketin ürün zincirindeki yerine ve yasal ya da pazar amaçlı olması gibi LCA eyleminin yürütülme amacına bağlıdır. İş çevresinde LCA aracı, prosesin kendisiyle olduğu gibi proses öncesi ve sonrasıyla da ilgili olan çevresel açıları anlamak için kullanılmalıdır. Bu anlayış, tedarik zinciri boyunca olan etkileri azaltmada sürekli gelişim için kullanılabilir. Yaşam döngüsü envanterleri, çoğunlukla kimyasal, plastik, metal ürün üreticileri tarafından, karşılaştırma yapmada veya atik yönetimlerini ve geri dönüşüm seçeneklerini değerlendirmede kullanılmaktadır. Ara ürün ve yedek parça üreticileri son ürün üreticileri için veri sağlamakta; son ürün üreticileriyse önceki ve sonraki proseslerden gelen bilgileri çevreye en az zarar verici ürünleri tasarlamak ve üretmek için birleştirmektedirler. Bu bağlamda, zaman, LCA'da önemli bir faktör haline gelmektedir. Dolayısıyla, analizlerin zaman gerektirmesi nedeniyle, rekabetçi pazarda ürün geliştirme döngüleri kısa olan, son ürünü üreten şirketler için, karşılaştırmalı LCA uygulamaları mantıklı değildir (Çokaygil, 2005).

3.2.1.1. Ürün geliştirme

Ürün veya üretim sisteminin yaşam döngüsündeki her aşama, materyal ve enerji ihtiyacı girdisi, ürün ve atık oluşumu açısından tanımlanmaktadır. Ekolojik açıdan uygun olan optimum noktalar vardır. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, firmaların çevresel etkilerini kontrol altına alırken, neye odaklanmaları gerektiğini anlamada ve bu alandaki yatırımlarını şekillendirmede iyi bir araçtır. Yeni ürün geliştirirken bu parametreler değerlendirilerek yapılacak yeni tasarımlar, pazarlamada bir araç olarak kullanma fırsatını beraberinde getirmektedir. Yaşam döngüsü yaklaşımı ile bir ürün geliştirirken seçilen her bileşen, sadece ürünün görüntüsü ve fonksiyonlarına etkisi temelinde değerlendirilmemektedir. Aynı zamanda, imalat, kullanım, atık, yeniden kullanım ve yeni ürün eldesi aşamalarının çevreye ve topluma etkileri de gözönünde bulundurulmaktadır. Ürün veya üretim sistemi geliştirirken sektörler bazında farklılık gösterebilmekle birlikte temelde "Çevre için Dünya Endüstri Konseyi (World Industrial Council for Environment, WICE)" tarafından tanımlanmış bazı ortak noktalar bulunmaktadır (Balpetek vd., 2012);

- Malzeme seçimi
  - Hammadde kullanımının azaltılması
  - Toksik kimyasal içeriğinin minimize edilmesi
  - Geri kazanılmış ve kazanılabilir malzemelerin sisteme dahil edilmesi
  - Daha dayanıklı malzemelerin kullanılması
- Üretimin etkileri
  - Prosesten kaynaklanan atığın azaltılması
  - Enerji tüketiminin azaltılması
  - Toksik kimyasalların kullanımının azaltılması
- Ürün kullanımı
  - Enerjinin verimi
  - Üründen kaynaklanan emisyonların ve atığın azaltılması
  - Ambalajlamanın minimize edilmesi
- Geri kazanım ve yeniden kullanım
  - Geri kazanılabilir malzemelerin sisteme dahil edilmesi
  - Kolay geri dönüşümün sağlanması

  - Malzeme çeşitliliğinin azaltılması
  - Parçaların etiketlenmesi
  - Ürünlerin basitleştirilmesi (örneğin, parça sayısı)
  - Malzeme tipinin standardize edilmesi
- Ürün ve bileşenlerinin ömrünün uzatılması
  - Yeniden üretim için tasarım
  - Kalitesini yükseltebilecek şekilde tasarım
  - Kolay bakım ve onarımı sağlayacak şekilde parçaların yapılması
  - Tamir edilip yenilenmiş parçaların veya alt montajın sisteme dahil edilmesi
- Ürün ömrünün bitmesi
  - Güvenli bertaraf

3.2.1.2. Pazarlama ve reklam

Pazarlama, tüketicinin beklentileri ve ihtiyaçlarıyla uyumlu olan ürün özelliklerinin ve yeteneklerinin gösterilmesinin geleneksel bir yoludur. Çevresel bilinç arttıkça, tüketiciler tarafından malların ve hizmetlerin çevresel özellikleri daha çok dikkate alınmaktadır. Bu durum, birçok şirket tarafından pazar paylarını arttırmak için kullanılmakta ve çevresel pazarlamaya yönelik kriterler ve kılavuzların geliştirmesine öncelik verilmektedir. Küresel dünyada, birçok şirket, ürünlerinin çevre dostu olup olmadığını LCA yöntemiyle belirlemekte ve kullanıcılarına bunu bildirerek, ürünlerini dünya pazarında daha iyi temsil etmektedirler. Üreticiler genellikle, ürünlerinin yaşam döngüsünde bir ya da iki aşamayı göz önüne alıp, bu aşamalar süresince oluşan atık miktarını veya geri dönüşüm gibi olasılıkların çevreyle olan ilişkisini tek bir açıdan incelemektedirler. Örneğin, “Kurşunsuz benzin”, “CFC içermeyen saç spreyi”, “Fosfat içermeyen deterjan”, “Biyobozunabilir” gibi özellikleri ön plana çıkarılarak, LCA analizi yapılabilmektedir (Bishop 2000; Çokaygil, 2005).

3.2.1.3. Proses seçimi ve modifikasyon

LCA sık sık, kirlilik önleme ve atık azaltmaya yönelik uygulamalar arasından en iyi alternatiflerin seçilmesinde kullanılmaktadır. Bu işlem bir ürün için detaylı bir LCA yaparak veya geliştirilmiş üretim prosesini değerlendiren bir çalışmaya yoğunlaşarak gerçekleştirilebilir. Proses modifikasyonuna dayanan bir LCA çalışması, üretim proseslerinden bağımsız olarak nihai ürünün aynı olmasından ve aynı çevresel etkilere sahip olmasından dolayı basitleştirilebilir. Bu tür bir çalışma, ürünü/hammaddeyi depolamadaki farklılıklar, üretimdeki farklı enerji ihtiyaçları, üretim verimleri, farklı yan ürünler ve atıklar gibi aşamalarla sınırlandırılabilir (Bishop 2000).

3.2.2. Kamusal uygulamaları

Sürdürülebilir kalkınma, 1992 Rio Sözleşmesi'nden bu yana çoğu devletin kalkınma planlarında ana madde olarak ele alınmakta, yaşam döngüsü yaklaşımının daha sürdürülebilir bir geleceğe doğru yapılacak eylemlerde kullanılmasının gerekliliği açıkça ortaya çıkmaktadır. LCA, tüm sorulara cevaplar vermeyen fakat yönlendirmelerde bulunan bir yaklaşım veya stratejik bir araç iken, risk değerlendirmesi, çevresel etki değerlendirmesi, fayda maliyet analizi ve bunlar gibi diğer araçlarla kullanıldığında ülkelerin sürdürülebilirlik politikalarını etkileyebilecek bir araç olarak görülebilir. LCA, karar vericilere çevresel açıdan yardımcı olmasına rağmen, karar alma sırasında diğer yaşam döngüsü yaklaşımları (LCC, LCM) ile desteklenmesi gerekmektedir (Çoakygil, 2005; Du, 2012).

3.2.2.1. Kamusal uygulamalarda çevresel etiketleme

LCA'nın, eşit düzeyde ürünleri karşılaştırma veya ürünlerin çevresel standartları ne derecede sağladığını belirlemedeki yararının farkına sadece endüstriler değil, ayni zamanda devletler ve çevresel gruplar da varmıştır. Ancak,

LCA tekniklerinin kamusal karar vermenin tam bir parçası olarak uygulanması için, sürdürülebilirlik yaklaşımıyla ele alınması gerekmektedir.

3.2.2.2. Diğer kamusal uygulamalar

LCA, genel politika stratejilerinin geliştirilmesinde değerli bilgiler verebilir. Örneğin, elektrik üretimi için yakıt seçimi, yolcu ve yük taşımacılığı için ulaşım seçeneklerinin değerlendirilmesi, atık yönetim seçeneklerinin karşılaştırılması ve özel bir atığın en iyi şekilde arıtılması gibi alanlarda kullanılabilir.

3.3. LCA Yazılımları

Siegenthaler ve ark. (2005) tarafından yapılan çalışmada, yaklaşık 28 adet LCA yazılımının olduğu belirlenmiştir. Ancak bunlardan sadece birkaç tanesi kompleks ürünlerle ilgili yapılacak LCA çalışmaları için uygundur. Diğer yazılımlar proseslerin analizinde kullanılacak olan veri tabanı açısından yeterli veriye sahip olmadıklarından, ürün analizinde başarısızdırlar. Ayrıca incelenen yazılımlar arasından etkin veri tabanına sahip olması, LCA'nın hızlı değerlendirilmesi ve maliyet hesaplaması gibi fonksiyonları içermesi nedeniyle dünyada bu alanda en çok tercih edilen programın SimaPro yazılımı olduğu görülmektedir (Çizelge 3.1.).

Çizelge 3.1. LCA yazılımları

LCA Yazılımları	**İlgili Sektörler**	**Tercih edilme %'si**
AUDIT/APCC	Kağıt ve çelik	3
Boustead Model5.0	Yakıt üretimi, metal, cam, polimer, kimyasal	1
CEDA	Tüm endüstriyel sektörler	1
CMLCA	Tüm endüstriyel sektörler	1
EcoScan Life	Elektrik ve elektronik ekipman üretimi, inşaat sektörü	4
EIME	Elektrik elektronik, mekanik, otomotiv	1
EIO-LCA	Tüm endüstriyel sektörler	1
EMIS	Genel üretim, hizmet sektörü, tarım ve inşaat	1
EPS	Genel üretim	1
Gabi	Otomobil, kimya, plastik, elektronik, enerji, inşaat, metal vd.	8
GEMIS	Tüm endüstriyel sektörler	1
JEMAI-LCA	Malzeme ve enerji	1
KCL-ECO	Tüm endüstriyel prosesler	2
LCAiT	Tüm endüstriyel sektörler	12.5
LEGEP	İnşaat	3
NIRE-LCA	Elektrik, otomotiv	13
OGIP	İnşaat	3
REGIS	Tüm endüstriyel sektörler	3
SimaPro Analyst	Tüm endüstriyel sektörler	17
SimaPro Compact	Tüm endüstriyel sektörler	
SimaPro Developer	Tüm endüstriyel sektörler	
SIMBOX	belirli bir sektör yok	1
TEAM	Enerji, ham madde, kimya, inşaat	7
TEAM Web Simulator	Enerji, ham madde, kimya, inşaat	
Umberto	Otomotiv, çelik, metal, kağıt, besin	12.5
WISARD	Evsel ve endüstriyel atıklar	1
WWLCAW	Tüm endüstriyel sektörler	1

3.4. Sistemin Yapısı

LCA sistemi, ISO 14040 standartlarına göre; hedef ve kapsam tanımı, yaşam döngüsü envanter analizi, yaşam döngüsü etki değerlendirmesi ve yorumlar olmak üzere dört aşamadan oluşmaktadır.

3.4.1. Hedef ve kapsamın belirlenmesi

Hedef ve kapsam belirlenmesi, yaşam döngüsü analizinin ilk aşaması olup, LCA'nın diğer aşamalarının gerçekleştirilmesinde güçlü bir etkiye sahip olması nedeniyle kritik bir bölüm olarak ele alınmaktadır. Bu aşamada, LCA çalışmasının amaçları, sınır koşulları, hedef kitlesi, çalışma sonrası beklentiler, açık bir şekilde ortaya konulmalıdır.

Hedef tanımı, bir LCA çalışmasının en temel adımı olarak görülmekte olup çalışmanın karmaşıklık derecesini ve raporlama gereksinimlerini ortaya koymaktadır. Hedef, yorum aşamasının bir bölümü ve çalışmadan elde edilenlerin bir sonucu olarak yeniden tanımlanabilir (Bishop, 2000).

Basit bir ürünün bile yaşam döngüsü değerlendirmesi ham maddenin elde edilmesinden, üretim, kullanım, bakım onarım ve bertaraf seçeneklerinin değerlendirilmesi dahil bir çok aşamadan oluşmaktadır. Örneğin; iki alternatif üretim prosesi birbiri ile karşılaştırıldığında, süre ve maliyet gibi kısıtlardan dolayı detaylı adımlara ihtiyaç duyulmayabilir. Bu yüzden bir ürünün üretim sonrası aşamaları dikkate alınmadan sadece üretim öncesi değerlendirilebilir (Bishop, 2000).

Bir LCA çalışmasının hedef ve kapsam tanımı aşağıdaki bileşenleri içermektedir:

- Fonksiyonel birim
- Sistem sınırları

3.4.1.1. Fonksiyonel birim

Bir LCA çalışmasında ürünün/sistemin çevresel yüklerinin belirlenmesi, ürünler arasında karşılaştırma yapılabilmesi için öncelikle "fonksiyonel birim" in tanımlanması gereklidir.

Fonksiyonel birim, bir ürünün geliştirilmesi dahil, iki veya daha fazla ürün karşılaştırmalarına bir ölçü konulabilmesi açısından LCA'da bulunması gerekli olan bir bölümdür. Envanter aşamasında toplanan tüm veriler, fonksiyonel birim bazında değerlendirilmelidir. Sistemler arasında karşılaştırmalar aynı fonksiyonel birim bazında yapılmalıdır.

LCA çalışmalarında bir sistemin kurulması sırasında birçok alt sistem bileşenleri olabilir. Böyle bir durumda, alt bileşenlerin fonksiyonel birim bazında değerlendirilmesi gerekebilir. Örneğin, demiryolu yolcu taşımacılığında fonksiyonel birim:1 yolcu-km seçilirse, yolcu taşımacılığının alt bileşenleri olarak (araç üretimi ve hat yapımı gibi) farklı bileşenler ortaya çıkabilir. Bu aşamada, araç üretimi ile ilgili fonksiyonel birim 1 adet tren aracının üretimi veya 1 km demiryolu ray hattının yapımı olarak farklı fonksiyonel birimler şeklinde de seçilebilir.

Her bir birim proses için, uygun bir referans akış belirlenmelidir (örn: fonksiyonel birim bir cam şişe için 1 L olursa referans akışlar 277 g kum/1 L cam şişe ve 943 g CO_2/1L cam şişe'dir). Birim prosesin ölçülebilir girdi ve çıktı verileri bu referans akışla olan ilişkiye göre hesaplanmaktadır. Tüm sistemin hesaplanabilmesi için, akış diyagramı ve sistem sınırlarına dayanarak, birim prosesler birbirlerine bağlanmaktadır. Bunun için bir sistemdeki birim prosesin girdi ve çıktıları fonksiyonel birime uyarlanmakta, sonra tüm alt ve üst akımlar buna göre düzenlenmektedir (Çokaygil ve Banar, 2005; Balpetek ve ark., 2012).

3.4.1.2. Sistem sınırları

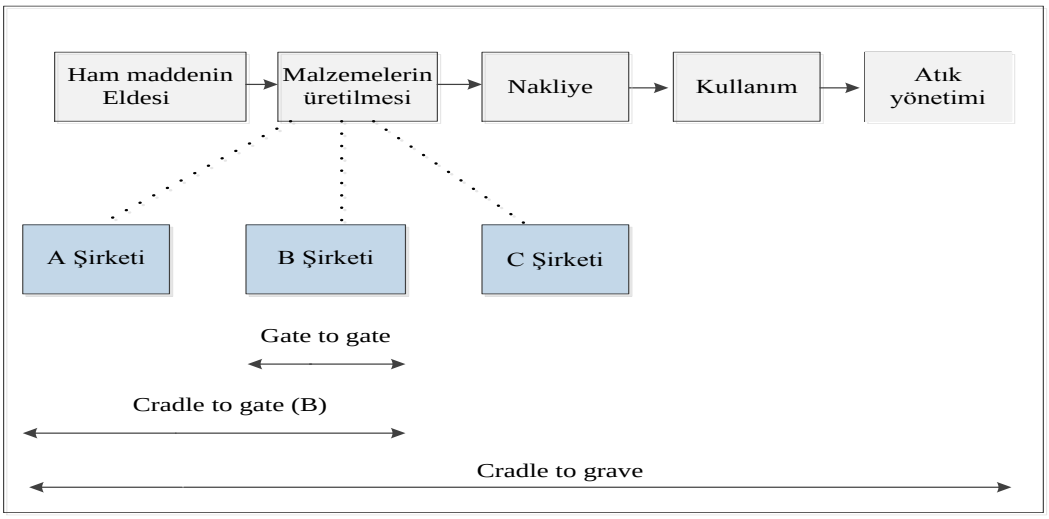
LCA'nın kapsamının belirlenmesinde, çalışmanın sistem sınırlarının belirlenmesi çok önemli bir yer tutmaktadır. Sistem sınırları, çalışmada seçilen prosesleri (üretim, nakliye, atık yönetimi v.b.) ve LCA çalışmasında ele alınacak

olan girdileri ve çıktıları tanımlamaktadır. LCA çalışmalarında sistem sınırları aşağıdaki aşamalardan oluşur:

- Hammaddenin ve enerjinin eldesi
- Üretim (malzemelerin fabrikaya nakliyesi, fabrikada üretilmesi, ambalajlama, ürünlerin dağıtılması)
- Kullanım/yeniden kullanım/bakım onarım
- Geri dönüşüm/yakma/deponi vb. atık yönetimi.

Sistem sınırları tanımlanırken, sisteme ait proses/ürün akış diyagramlarının kurulması ve sistem sınırlarının daha açık bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Böylelikle, proseslerin akış diyagramları oluşturularak, seçilen sistemler/prosesler kapalı birer kutu olarak ele alınabilecek ve sisteme/prosese giren malzeme ve enerji akışı belirlenebilecektir (Bishop, 2000).

Sistem sınırları, beşikten mezara (cradle to grave) veya kapıdan kapıya (gate to gate) yaklaşımlarını içerecek şekilde oluşturulabilir. Beşikten mezara yaklaşımı ile seçilen sistem sınırları, ham maddenin eldesi ile başlayıp, malzemelerin üretilmesi, nakliyesi, kullanımı ve atık yönetimi aşamalarında ortaya çıkan tüm çevresel etkileri değerlendirir. Kapıdan kapıya yaklaşımında ise, sadece şirket kendi bünyesinde gerçekleştirdiği proseslerden veya ham maddenin eldesi ile başlayıp şirketten çıkışına kadar ki çevresel etkileri inceleyebilir, bu LCA yapan kurum/kuruluşların Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Çizelge 3.2. Beşikten mezara ve kapıdan kapıya sistem sınırları

3.4.1.3. Veri kalitesi

LCA sistemleri çok karmaşık sistemler olup, birçok veriye ve aşamaya ihtiyaç duyulmaktadır. Yaşam döngüsü envanterinde kullanılan verinin kalitesi yapılan LCA çalışmasının da kalitesini belirler. Veri kalitesinin sistemli bir şekilde tanımlanması ve değerlendirilmesi, gerçek verinin kontrolünün yapılabilmesi açısından önemlidir. Başlangıç veri kalitesi gereksinimi aşağıda verilen parametreler ışığında hazırlanmalıdır:

- **Zamanla ilgili kapsam:** Verinin yaşı (örn: beş yıl içinde) ve minimum zaman uzunluğu (örn: yıllık).
- **Coğrafi kapsam:** Çalışmanın hedefini sağlamak üzere birim işlemler için bilginin toplanması gereken coğrafi alan (yerel, bölgesel, ulusal, küresel gibi).
- **Teknolojik kapsam:** Teknolojik veri karışımının niteliği (gerçek işlem karışımının, en iyi teknolojinin veya en kötü işletme biriminin ağırlıklı ortalaması).

Literatürden elde edilen verilere karşılık, faaliyet alanlarından toplanan verileri tanımlayan ve verilerin ölçüm, hesaplama ve tahminlerini gerektiren ileri tanımlamalar ayrıca dikkate alınmalıdır. Özel sahalardan toplanan veriler, hassasiyet analizlerinde belirtildiği gibi, çalışılan sistem içindeki kütle ve enerji akışlarının çoğunluğuna katkıda bulunan birim işlemler için kullanılmalıdır (Çokaygil, 2005).

3.4.1.4. Kritik gözden geçirme

Kritik gözden geçirme prosesinin amacı, yaşam döngüsü analizinin kalitesinden emin olmaktır. Kritik gözden geçirme prosesi,

- LCA'yı gerçekleştirmek için kullanılan metodun uluslararası standartlara uygunluğundan,
- LCA'yı gerçekleştirmek içim kullanılan metodun bilimsel ve teknik açıdan uygunluğundan,

- Kullanılan verilerin, çalışmanın hedefiyle olan uygunluğundan ve kabul edilebilirliğinden,
- Yorumların, çalışmanın hedeflerini yansıtıp yansıtmadığından,
- Çalışma raporunun şeffaflığından ve tutarlığından

emin olmak için kullanılır (Çokaygil, 2005).

3.4.2. Envanter analizi/değerlendirmesi

Envanter analizi/değerlendirmesi, yaşam döngüsünün ikinci aşamasını oluşturmakta olup çalışmanın hedef ve kapsam tanımını karşılayacak şekilde olmalıdır. Envanter analizi/değerlendirmesi yaşam döngüsünün tüm aşamalarında, ürün/prosesler için gerekli olan enerji ve hammadde tüketimi ile atmosferik, su ve katı atık emisyonlarının hesaplanarak değerlendirildiği sistematik bir işlemdir. Envanter analizi/değerlendirmesi beş ana adımdan oluşur (Bishop, 2000):

- Veri toplama
- Sistem sınırlarının incelenmesi
- Hesaplama
- Verinin geçerliliği
- Paylaştırma

Veri toplama: Envanter analizleri, bir ürün sisteminin ilgili girdi ve çıktılarını değerlendirmek için veri toplama ve hesaplama prosedürlerini içerir. Bu girdi ve çıktılar, sistemle ilgili kaynak kullanımını ve havaya, suya, toprağa olan salınımları içermelidir. LCA'nın yorum aşaması, hedef ve kapsam aşamasına bağlı olarak bu veriler ışığında yapılır. Bu veri aynı zamanda yaşam döngüsü etki değerlendirmesi aşamasına girdi oluşturur (Çokaygil, 2005).

Sistem sınırlarının incelenmesi: LCA çalışmasının hedef ve kapsam tanımının bileşeni olarak sistem sınırları kabul edilmektedir. Sistem sınırları dahilinde başlangıç verilerinin elde edilmesinden sonra, önemli sayılabilecek yaşam döngüsü aşamalarının bazı kısımlarına ya da alt bölümlerine ait belirli bölümlerin dahil edilip edilmemesine yönelik kararların alınmasıdır.

Hesaplama prosedürü: Yaşam döngüsü değerlendirmesinde paylaştırma yöntemleri için tanımlanan gereksinimler dışında, hesaplama için yasal

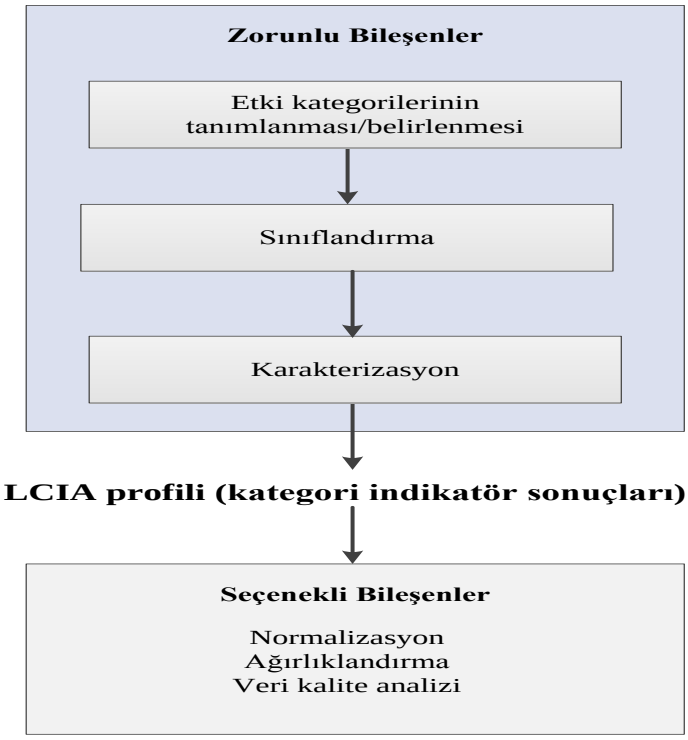
gereksinimler bulunmamaktadır. Verilerin miktarına bağlı olarak özel bir amaç için bir tablo oluşturulması tavsiye edilmektedir (Çokaygil, 2005).

Verinin doğrulanması/geçerliliği: Veri toplama prosesi süresince sürekli ve tekrarlı olarak veri doğrulaması yapılmalıdır. Doğrulama, kütle ve enerji denklikleri ve karşılaştırmalı emisyon faktör analizleri kurmayı gerektirebilir (Çokaygil, 2005).

Paylaştırma: Karmaşık bir sistemin yaşam döngüsü değerlendirilmesi oluşturulurken, sistem sınırlarında yer alan tüm çıktıların ve etkilerin ele alınması mümkün olmayabilir. Bu nedenle, sistem sınırları genişletilerek ya da sistem sınırlarını daha alt kategorilere ayırarak, ilgili çevresel etkileri çalışılan sisteme dağıtarak, envanterin ikincil verilerden ziyade daha gerçek verilerden, yani proses verilerinden oluşturulmasıyla, paylaştırma prosedürünün kullanımından kaçınılabilir (Graedel,1998; Çokaygil, 2005).

3.4.3. Etki değerlendirmesi

Etki değerlendirmesi, çalışmanın amacı ve kapsamı doğrultusunda envanter analizinde elde edilen verilere dayanarak çevresel etkilerin sınıflandırılması, nicel ve nitel olarak değerlendirilmesi ve elde edilen tüm sonuçların karakterizasyon ve normalizasyon sonuçlarının verildiği, yaşam döngüsü analizinin çok önemli bir aşamasıdır. Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi, ISO 14040:2006 standardına göre Şekil 3.2'de gösterilmiş olan bileşenlerden oluşmaktadır (Bishop, 2000; Baumann ve Tilman, 2004).



Şekil 3.2. Etki değerlendirmesinin bileşenleri

3.4.3.1. Etki kategorilerinin tanımlanması/belirlenmesi

Etki kategorilerinin belirlenmesi, hammadde temini ve enerji akışı ile ilgili envanter analizinde elde edilen bilgilerin, çevresel kategorilere göre (ekolojik kalite, doğal kaynak tüketimi ve insan sağlığı gibi) gruplandırıldığı bir işlem olup, etki değerlendirmesinin ilk aşamasıdır.

Etki kategorilerinin belirlenmesinde, prosesin amacı, envanter girdi ve çıktı verilerinin kategorilere göre ayrılmasıdır. Bu kategorilerin tanımı gerekli olup, bu işlem, hedef ve kapsam aşamasında yapılan kararların bir devamıdır. Etki kategorileri, ele alınan ürün veya ürün sisteminden kaynaklanacak olan etkileri tanımlamak üzere seçilmelidir. Ele alınan etki kategorileri, çalışmada kullanılan karakterizasyon metotlarına göre farklılıklar göstermektedir. LCA literatüründe, CML2000, Ecoindicator'99, EPS gibi karakterizasyon metotları kullanılmaktadır. Örneğin CML 2000 yöntemine göre etki kategorileri abiyotik kaynaklar, biyotik kaynaklar, alan kullanımı, küresel ısınma, insanlar üzerine toksik etki,

fotokimyasal oksidasyon, asidifikasyon ve ötrofikasyon v.b. olup Çizelge 3.2'de detaylı bir şekilde verilmiştir.

Çizelge 3.3. CML 2000 yöntemine göre etki kategorileri (Baumann ve Tilman, 2004).

A (baseline kategoriler)	**B (çalışma ya özel kategoriler)**	**C (diğer kategoriler)**
Abiyotik kaynakların tükenmesi	Alan kullanımının etkileri	Biyotik kaynakların tükenmesi
Ekotoksisite	Biyoçeşitliliğin kaybı	
Yüzey sularına olan toksik etki	Ekotoksisite	
Deniz ekosistemine olan toksik etki	Yüzey sularının sediment toksisitesi	
Kara ekosistemine olan toksik etki	Deniz ekosisteminin sediment toksik etki	
İnsan toksisitesi	Fotokimyasal sis	
Küresel ısınma	Koku	Koku
Ozon tabakasının tükenmesi	Radyasyon	
Asidifikasyon	Atık ısı	
Ötrofikasyon	Ölümler	
Fotokimyasal sis		

3.4.3.2. Sınıflandırma

Sınıflandırma, yaşam döngüsü envanter sonuçlarının çeşitli etki kategorileri ile ilgili ilişkilendirilmesidir. Bu işlem, kirletici türlerinin neler olduğu ve bunların kaynakları hakkında bilgi vermektedir. Örneğin NOx kirletici parametresi hem asidifikasyon hem de ötrofikasyon kategorilerine etki edebilir. Aynı zamanda tek bir NOx molekülü bile fotokimyasal sis oluşumuna neden olan reaksiyonlarda yer alabilir. Bu durumda, hidrojen iyonlarının salınmasıyla, asidifikasyon etkisi görülür, daha sonra azot atomlarının aracılığıyla ötrofikasyon görülebilir. Böyle bir değerlendirme yalnızca birbirinden bağımsız durumlar için yapılır. Eğer etkiler birbirlerine bağımlıysa, örneğin küresel ısınma etkisi, biyoçeşitlilik üzerine de etki yapıyorsa bu durumda etki değerlendirmesi iki kez yapılmış olacak ve bu durumda hatalı sonuçlar ortaya koyacaktır. Bu nedenle,

kirleticilerin her bir etki kategorisi net bir şekilde sınıflandırılmalıdır (Baumann ve Tillman, 2004).

3.4.3.3. Karakterizasyon

Karakterizasyon, yaşam döngüsü envanter analizindeki her bir girdi ve çıktının olası çevresel etkilerinin (örneğin: küresel ısınma üzerine metan ve karbon dioksitin) bazı modeller veya CML 2000, Ecoindicator gibi metotlar yardımıyla değerlendirilmesidir. Karakterizasyon aşamasında yaşam döngüsü envanterindeki sonuçların her bir etki kategorisi açısından karşılaştırılması yapılır. Etki kategorileri yaygın olarak "eşdeğer" cinsinden ifade edilmektedir (örneğin: kg CO_2 eşdeğeri, kg SO_2 eşdeğeri v.b) (Roy ve ark., 2009).

- **Doğal kaynakların tüketimi:** İnsanlar her zaman düşük kaliteli kaynağı ileriye bırakarak en iyi kaynağı en önce tüketme eğiliminde olmuşlardır. Doğal kaynaklara verilen zararın sonuçlarından gelecek nesiller etkileneceğinden, kalan kaynakları kullanabilmek için daha fazla çaba harcayacaklardır. Bu fazladan çaba "fazla enerji" (surplus energy) olarak açıklanmaktadır. Mineraller, maden cevheri miktarının azalması nedeniyle 1 kg cevher veya maden elde etmek için harcanan fazla enerji olup, MJ fazla enerji/kg olarak ele alınmaktadır. Örneğin; alüminyum, boksit, bakır gibi. Fosil yakıtlar, düşük kaliteli kaynakların kullanımı sonucu, 1 kg veya 1 m^3 fosil yakıtı elde etmek için harcanan fazla enerji, MJ fazla enerji/kg olarak ele alınmaktadır. Örn: kömür, doğal gaz gibi (Çokaygil, 2005).
- **Asidifikasyon:** SO_2, NO_x, HCl ve NH_3, asidifikasyon etkisine neden olan temel kirleticilerdir. Asidifikasyon etkisine neden olan kirleticilerin arasındaki ortak durum, kirleticilerin H^+ iyonlarına dönüşmesidir. Bir kirleticinin potansiyel asidifikasyon etkisi onun H^+ iyonlarına dönüşebilme kapasitesi ile ölçülebilir. Bu durum LCA'daki karakterizasyon modellemelerinde kullanılmıştır. Asidifikasyon potansiyelinin eşdeğerliği; kg kirleticinin SO_2'ye bağlı oluşturduğu H^+ iyonunun sayısı olarak

hesaplanmaktadır (Hauschild ve Wenzen, 1997; Baumann ve Tillman, 2004).

- **Ötrofikasyon:** Ötrofikasyon hem kara, hem de su ekosistemini etkilemektedir. Azot ve fosfor diğer kirleticilere göre ötrofikasyon etkisine daha çok neden olmaktadır ve genellikle azot ve fosfor içeren besinlerin yüksek seviyelere ulaşmasıyla ekosistemdeki biyolojik üretkenliğin artması sonucu meydana gelen çevresel etkilerle ilişkilendirilmektedir. LCA'da ötrofikasyon etki kategorisi bazen nitrifikasyon olarak da adlandırılabilmektedir. Fakat ötrofikasyona sadece azot ve fosfor içeren besi elementleri değil, hem bozunabilir organik kirleticiler, hem de biyolojik üretkenliğin artmasına neden olan atık ısı gibi kirleticilerin de neden olduğu bilinmektedir. Bu farklı kirleticilerin olması, farklı karakterizasyon modellemeleri için kullanılmaktadır. Örneğin, bozunabilir organik kirleticinin sucul bir ekosisteme deşarj edilmesi sonrası, o ekosistemdeki oksijen seviyesine olan olumsuz etkisi düşünülebilir veya atık ısı ile birlikte ekosistemde yaşayan canlı üretkenliğinin artması sonucu, canlı formasyonunda değişim ve göldeki oksijen seviyesindeki azalması, karakterizasyon modellemelerinde düşünülebilir. Ötrofikasyon etkisi, sucul ekosistemdeki canlı kütlesinin parçalanması için bir kimyasal formüldeki azot, fosfor, karbon ve oksijen oranlarına dayandırılarak hesaplanır. Ötrofikasyon potansiyeli PO_4^{-3} olarak ifade edilmekte fakat kimyasal formülde mol oranları göz önüne alındığında PO_4^{-3} eşdeğeri kolaylıkla NO^{3-} veya O^{2-} eşdeğerine çevrilebilmektedir (Baumann ve Tillman, 2004).
- **Küresel Isınma:** İklim değişikliği toplum ve ekosistem üzerinde geniş etkilere neden olmasına rağmen, sera gazı emisyonlarının LCA 'nın karakterizasyon modellemeleri için kullanılabilirliği açısından ortak bir özelliğe sahiptir. Sera gazı emisyonlarının karakterizasyonu, kirleticilerin atmosferdeki radyasyona neden olmasına dayanır. Örnek olarak, artan sıcaklıkla, kirleticilerin atmosferdeki kızılötesi radyasyonu absorplama kapasitesi gösterilebilir. İklim değişikliğine sadece karbondioksit değil, metan, kloroflorokarbonlar (CFC'ler), azot oksitler ve kızıl ötesi

absorplama kapasitesine sahip atmosferdeki diğer küçük gaz karışımları neden olmaktadır. Bu kirleticiler CO_2 ile karşılaştırıldığında daha yüksek absorplama verimine sahiptir. Bir kirleticinin iklim değişikliğine olan katkısı küresel ısınma potansiyeli (GWP) olarak ifade edilmektedir. CML2 baseline 2000 yöntemine göre, sera gazı emisyonları, atmosferde farklı kalma süreleri olduğu için, küresel ısınma potansiyeli bu sürelere göre ayrı olarak hesaplanmıştır. LCA'da kullanılan küresel ısınma potansiyeli, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli tarafından (IPCC) geliştirilmiştir. Analiz yöntemlerinde, küresel ısınma potansiyeli kg CO2 eşdeğeri olarak ifade edilmektedir

- **Toksisite:** Karakterizasyon metotlarının çeşitliliğinden dolayı karmaşık bir etki kategorisidir. Bunun nedeni, toksisite kategorilerinin birçok kirleticiyi içermesidir. Örneğin organik çözücüler, ağır metaller ve pestisitler toksik etkinin farklı çeşitlerini oluşturmaktadır. Bazı kirleticiler nörolojik hasar verirken, diğerleri mutajenik, karsinojenik gibi etkilere neden olmaktadır. Toksik kirleticiler hızlı bir şekilde yayılır, örneğin tarım alanlarında kullanılan pestisit bir süre sonra topraktan sızarak içme ve kullanma sularında olumsuz durumlar yaratabilir. Bundan dolayı, toksik etki kategorisi (toksisite) genellikle insan toksisitesi ve eko-toksisite olarak ayrılmaktadır. Eko-toksisite, sırasıyla sucul eko- toksisite ve karasal eko-toksisiteye, sucul eko-toksisite yüzey sularına olan toksisite ve deniz ekosistemine olan toksisiteye ayrılır. Deniz ve yüzey sularına olan toksisite, akut ve kronik toksisiteye kadar uzanmaktadır. Toksisite etkisi 1,4 Diklorobenzen (DB) eşdeğeri cinsinden hesaplanmaktadır.
- **Fotokimyasal Sis:** Hidrokarbon ve azot oksitler güneş ışığının etkisiyle düşük atmosfer seviyelerinde foto-oksidantalara dönüştürülür. Bu kirleticiler bitki örtüsü ve insan solunumu üzerinde sağlık problemlerine neden olduğu bilinen yaz sisi veya Los Angeles sisi olarak fotokimyasal sisin bir karakteristiğidir. Örneğin, sisin tarım üzerindeki çevresel maliyetleri çok önemlidir. Ozon en önemli foto-oksidantlardan biridir. Peroksi Asetil Nitrat (PAN), hidrojen peroksit ve çeşitli aldehitler diğer foto oksidantlardır. Azot oksit ve hidrokarbonlar büyük alanlara

yayıldıkları zaman rüzgarla birlikte ozon taşınmaktadır ve bu problem yerel ya da bölgesel olarak başlayıp kıtalara kadar yayılabilir. Bu metot LCA çalışmalarında bölgesel etkiler üzerine odaklanmaktadır. Tüm metotlar kirleticileri göz önüne aldıklarında fotokimyasal olarak ozonun miktarını tahmini olarak hesaplamaktadırlar. Fotokimyasal oksidant oluşturma potansiyeli (POCP), Avrupa üzerinde kirleticilerin 5 günlük gezinmesine bağlı hesaplamalara dayanmaktadır.

Ozon, NOx ve güneş ışığı varlığında oluşur. Ozon oluşumu havadaki organik kirletici varlığıyla da artmaktadır. Farklı hidrokarbonlar, farklı oranlarda, farklı verimlerde reaksiyon verir. POCP'lerde ozon üretimi, nispeten standart bir kirleticiye göre sınıflandırılır ve birimi etilen (C_2H_4) eşdeğeri olarak verilir. Bu etki, ozon tabakasında tahribata neden olan madde emisyonları (CFC-115, metan, bromo-, Halon 1211, Halon 1301) sonucu artan UV radyasyonunun yarattığı etkidir olup (Baumann ve Tillman, 2004).

3.4.3.4. Normalizasyon

Normalizasyon aşamasında, karakterizasyon sonuçları her bir etki kategorisi için gerçek yada tahmini değerler ile ilgilidir. Herhangi bir sistem/prosesten kaynaklanan çevresel etkilerin büyüklüklerini daha iyi anlamak için normalizasyon işlemi isteğe bağlı olarak uygulanabilir. Bu adımda, bir etkinin görece boyutunun daha iyi anlaşılması için ürünün yaşam döngüsünde hesaplanan her etki ile bu sınıf için bilinen toplam etkinin karşılıklı olarak test edilmesini kapsamaktadır (Baumann ve Tilman, 2004; Balpetek ve ark., 2012).

Normalizasyon ile birlikte, ürünün neden olduğu asidifikasyon etkisinin, ülkedeki toplam asidifikasyon etkisi ile arasındaki büyüklüğün ne olduğu görülebilir. Bu durumda, bölgede oluşan toplam etki ve fonksiyonel birim başına oluşan etki arasında bir ilişki anlamlı görünmeyebilir, fakat bir ürün/prosesin kullanımından oluşan toplam etkinin bölgedeki toplam etki ile karşılaştırılması daha anlamlı olabilir. (Baumann ve Tilman, 2004).

3.4.3.5. Ağırlıklandırma/değerlendirme

Yaşam döngüsünün karakterizasyon aşamasında küresel ısınma, ekotoksikolojik etkiler, ozon tabakasının tükenmesi gibi farklı etki kategorileri üzerine olan etkiler sayısal olarak ifade edilebilir, ancak bu kategorilerin hemen birbiriyle karşılaştırılabilmesi mümkün değildir. Bundan dolayı, bu aşamada etki kategorilerinin birbirleriyle karşılıklı olarak ağırlıklı değerlendirmeleri yapılmaktadır. Ağırlıklı değerlendirmenin amacı, farklı yaşam döngüsü etki kategorilerini, önem sırasına göre sıralamak, ağırlıklandırmak, mümkünse gruplandırmaktır (Çokaygil, 2005).

3.4.4. Yorum

Yaşam döngüsü değerlendirmesi yorumu, bir sistemin envanter analizi veya etki değerlendirmesi sonuçlarından elde edilen bilgiyi nitelendirmek, kontrol etmek, değerlendirmek ve hedef ve kapsam bölümünde belirtildiği gibi sunmaya yönelik işlemlerin tümüdür.

Yorum, yaşam döngüsünün diğer üç aşaması arasında gerçekleştirilir. Envanter analizlerinden ve etki değerlendirmesinden bulunanlar, hedef ve kapsam tanımında belirtilenleri karşılamaz ise, sistem sınırları tekrar gözden geçirilmeli, daha fazla veri toplanması gibi işlemlerle geliştirilmeli, bunu, geliştirilmiş etki değerlendirmesi takip etmelidir. Bu tekrarlayıcı süreç, hedef ve kapsam aşamasında belirtilen gereksinimler, aşağıda tanımlanan hususlar karşılanıncaya kadar tekrarlanmalıdır:

1.Önemli çevresel konuların belirlenmesi,

2.Bütünsellik, hassasiyet ve tutarlılık açısından yöntemin ve sonuçların değerlendirilmesi,

3.Sonuçların hedef ve kapsam tanımındaki gereksinimlerle uyumluluğunun kontrolü,

Yukarıdaki işlemler sağlanıyorsa, sonuç olarak bir rapor yazılmalı, sağlanmıyorsa, 1. ve 2. basamağa geri dönülmelidir. Bu işlem 3. basamak sağlanıncaya kadar tekrarlanmalıdır (Özkan, 2008).

Önemli çevresel konuların belirlenmesi: Bu unsurun amacı, hedef ve kapsam tarifine uygun olarak, değerlendirme unsuru ile karşılıklı etkileşim içindeki önemli konuları belirlemek üzere, envanter analizleri ve etki analizlerinden elde edilen bilgileri yapılandırmaktır. Çevresel konular, envanter aşamasının ve çevresel indikatörlerin sonuçları gibi girdi ve çıktılardır. Önemli çevresel konular, hedef ve kapsam tanımı gereğince çalışmanın en önemli sonuçlarını temsil etmektedir. Belirleme basamağı, aşağıda verilen maddelerle ilgili bilginin yapılandırılmasını ve sunulmasını içerir (Çokaygil, 2005):

- Farklı aşamaların sonuçları; envanter analizlerindeki verilerin veya etki analizlerinin sonuçlarının tablolar, şekiller ve diyagramlarla verilmesi.
- Metodolojik seçenekler
- Kullanılan değerlendirme metodu
- Farklı ilgili tarafların rolü ve sorumlulukları

LCA çalışmasının karmaşıklığına bağlı olarak, ele alınan sistemin önemli çevresel konuları, küresel ısınma (CO_2), asidifikasyon (SO_2), ekolojik toksisite, ozon tabakasının tükenmesi, alan kullanımı vb. olabilir.

***Değerlendirme*:** Bu ikinci aşama hedef ve kapsam tanımına uygun olarak yapılmalı ve çalışmanın son kullanımını da dikkate almalıdır. Değerlendirme sırasında, aşağıdaki üç teknik dikkate alınmalıdır:

Bütünlük kontrolü: Bu prosedür, envanter aşamasında toplanan bilgiye yoğunlaşır. Birçok LCA çalışmasında eksik veya kayıp veri kümesi bulunmaktadır. Bütünlük kontrolü, bu tür veri kümelerinin tamamlanmasının gerekli olup olmadığına karar vermelidir. Tanımlanan çevresel konulara göre veri kümesi önemli ise, veri toplama geliştirilmeli veya hedef ve kapsam tanımı revize edilmelidir.

Hassasiyet kontrolü: Hassasiyet kontrolü, çalışmanın hedefleriyle ilgili sonuçların güvenilirlik derecesini belirlemek üzere kullanılan parametrelerdeki değişkenlerin etkilerinin tahmin edilmesine yönelik sistematik bir prosedür içerir. Bu basamağın amacı;

a) Farklı aşamalarda (envanter analizleri ve etki değerlendirmesi) gerçekleştirilen hassasiyet ve belirsizlik analizlerinin sonuçlarını gözden geçirmek ve

b) Önemli çevresel konuları, çalışmanın hedef ve kapsam tanımında belirtilen kabul edilebilir değerleri geçtikleri durumlarda değerlendirmektir.

Hassasiyet analizleri, farklı giriş parametrelerinin sistematik olarak değiştiği durumlarda, bir çeşit " eğer " senaryosu yapılarak yürütülebilir. Hassasiyet analizi yapmanın en uygun yolu, simülasyonlar kullanarak giriş parametrelerini sistematik olarak değiştirmektir (örneğin Monte Carlo simülasyonları).

Uygunluk kontrolü: Uygunluk kontrolü de nitel bir yöntemdir. Değerlendirme aşamasının bu basamağının amacı, çalışmada kullanılan metotların, prosedürlerin ve verilerin işlenmesinin, amaç ve kapsamla uyumluluğunu kontrol etmektir. Bu prosedür, özellikle karşılaştırma çalışmalarında kullanılan metotları test etmektedir. Uygunluk kontrolünün konuları; bölgesel ve/veya geçici farklılıklar, sistem sınırları, paylaştırma yöntemleri, proses öncesi ve sonrasındaki farklılıklar ve ağırlıklı değerlendirme yöntemleri şeklindedir. Bütünlük, hassasiyet ve uygunluk kontrolü, belirsizlik analizleri ve veri kalitesi değerlendirmesinin sonuçlarıyla tamamlanabilir.

Sonuç ve öneriler: Yorum aşamasının bu dördüncü basamağının amacı, LCA çalışması veya yaşam döngüsü envanter çalışmasının raporu için, sonuçlara varmak ve öneriler getirmektir. Bu basamak, LCA çalışmasını okuyan kişiler açısından gerekli ve çalışmanın raporlanmasını ve şeffaflığını geliştirme bakımından son derece önemlidir (Çokaygil, 2005).

3.5. Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC) Analizi

İşletmelerde, herhangi bir ürün ya da proses ile ilgili ayrıntılı maliyetlerin hesaplanması; üretilecek olan ürünün cinsine, işletmenin kapasitesine, üretim tekniğine v.b. etkenlere göre değişiklikler göstermektedir. Bu nedenle, her işletmede kullanılabilecek mevcut bir maliyet sistemi bulunmamaktadır. Bunun yanısıra, her işletme; ürünün cinsine, prosesin kendi yapısal özelliklerine ve

ihtiyaçlarına göre maliyetler oluşturmalıdır. Ancak, herhangi bir ürün ya da proses maliyetleri ile ilgili alınan kararlarda detaylı bir yapılandırmanın söz konusu olmadığı görülmektedir. Oysa küreselleşen dünyada rekabetin arttığı göz önüne alınırsa, maliyet ayrıntılarının detaylandırılarak, ürün ya da proseslerin yaşam döngüsünü kapsayan bir maliyet değerlendirilmesinin son derece önemli bir avantaj kazandıracağı düşünülmektedir.

Bir sistem veya prosesin yalnızca üretim maliyetlerini değil, sistemin ya da prosesin tüm yaşam döngüsü boyunca tüm (araştırma ve geliştirme, işletme, elden çıkarma gibi) aşamalarının neden olduğu maliyetleri değerlendiren yaşam döngüsü maliyet yaklaşımı ile maliyetlerin kısmi değerlendirmeleri yerine, bütünsel bir şekilde ele alınabilmesi mümkün olabilmektedir. Böylelikle, sistem veya proses ile ilgili farklı seçeneklerin maliyetler açısından karşılaştırılması gerçekleştirilebilecek ve tesis/işletme kaynakları daha etkin ve verimli kullanılabilecektir.

Yaşam döngüsü maliyeti (Life Cycle Cost, LCC) kavramı, bir sistemin veya ürünün yaşam döngüsü boyunca; sistemin geliştirilmesi, üretilmesi, işletilmesi ve envanterden çıkarılması için ortaya çıkan maliyetlerin toplamı olarak tanımlanmaktadır (Işın, 2009).

Yaşam döngüsü maliyet analizi konusundaki ilk çalışmalara 1960'lı yıllarda Amerika Birleşik Devletleri Savunma Bakanlığı tarafından başlanmıştır. Silah sistemlerinin satın alma fiyatları yanında, sistemlerin kullanımı nedeniyle ortaya çıkan lojistik (işletim ve bakım) maliyetlerin de, rekabet eden ürünlere göre önemli farklılıklar gösterdiği bu çalışmalarda belirlenmiştir. Geleneksel olarak, lojistik maliyetleri ihmal eden tedarik usulleri yerine, satın alma kararlarında, tahmin de olsa, lojistik maliyetlerin de dikkate alınması gerektiği tespit edilmiştir (Aytok, 2006).

Son yıllarda yaşam döngüsü maliyetlerinin hesaplanılması, mühendislik ekonomisinde popülerlik kazanmış ve 1960'larda Amerika Birleşik Devletleri hükümet teşkilatları tarafından donanım alımlarında maliyet etkinliklerini arttırmak amacıyla, yaşam döngüsü maliyet analizleri bir araç olarak kullanılmıştır. Daha sonra yaşam döngüsü maliyet hesaplamaları iş dünyasında

yaygınlaşarak ürün geliştirme çalışmalarında ve proje geliştirmelerinde kullanılmıştır (Aytok, 2006).

Konuya ilişkin paralel çalışmaların, A.B.D.'ndeki kadar kapsamlı olmasa da, diğer ülkelerde de gündeme geldiği ve çalışmalar yapıldığı görülmektedir. İngiltere'de "Yaşam Döngüsü Maliyetlerine Göre Tasarım" proje grubu oluşturularak, proje yöneticilerinin maliyet ve performanslara ilişkin yapacakları analizler için, metodoloji geliştirilmeye çalışılmıştır. Halen Kanada Ulusal Savunma Bakanlığı, çeşitli iyileştirme çalışmaları ile yaşam döngüsü maliyet modelini ve metodolojisini, savunma malzemeleri tedarikinde uygulamakta ve savunma sanayi işletmelerinden, verecekleri tekliflerinde, yaşam döngüsü maliyetlerine ilişkin bilgileri de istemektedir (Aytok, 2006).

3.5.1. IEC-60300-3-3: Uygulama Kılavuzu

Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission, IEC) elektrik ve elektronik alanlarda standardizasyon konularındaki sorunların çözümüyle ilgili işbirliğini teşvik eden, uluslararası kullanım için bazı uluslararası standartlar, teknik raporlar ve kılavuzlar gibi yayınlar yayınlamakla sorumlu olan dünya çapında bir kuruluştur.

Yaşam döngüsü maliyet analizine olan büyük ilgi nedeniyle, IEC, 1996 yılında güvenilirliği sağlamak amacıyla, yaşam döngüsü maliyetleriyle ilgili önerilerin ve standartların sunulduğu bir ölçüt olan IEC 60300 standardını yayınlamıştır. Daha sonra, 2004 yılında IEC 60300 standardına ait " IEC 60300-3-3 (2004) Yaşam Döngüsü Maliyet, Uygulama Kılavuzu başlığı altında bu standardı yayınlanarak bugünkü son halini almıştır. Bu standart içerisinde demiryolu altyapı çalışmalarında kullanılabilecek yaşam döngüsü maliyet modelinin oluşturulmasına birçok açıdan katkı sağlanmıştır (IEC, 2005).

IEC 60300-3-3 standardı, Yaşam Döngüsü Maliyet kavramının genel bir girişi ile tüm uygulamalarının içerildiği bir standart olarak ortaya çıkmıştır. IEC 60300-3-3 standardına göre, yaşam döngüsü maliyet analizinin aşamaları aşağıdaki gibi oluşturulmuştur (IEC, 2005):

- Araştırma ve geliştirme maliyeti
- Yapım ve üretim maliyeti
- İşletme maliyeti
- Elden çıkarma maliyeti

3.5.2. LCC analizinin faydaları ve kısıtları

Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi'nin 4 temel faydası vardır ve bunlar aşağıdaki gibidir (Aytok, 2006):

- **Satın almadaki rekabet seçeneklerini değerlendirmesi:** Yaşam döngüsü maliyet analizi teknikleri, temel yaşam döngüsü maliyetlerinden yola çıkarak rekabet seçeneklerinin değerlendirilmesine imkan verir.
- **Toplam maliyetlerden haberdar olmayı geliştirmesi:** Yaşam döngüsü maliyet analizi tekniklerinin uygulanması, satış için gerekli olan maliyetleri ve kaynakları düzenleyen gelişmiş haber almayı sağlar. Böylelikle yönetim gücünün büyük bir kısmı, satın almanın daha çok maliyet-etkin alanlarına harcanır.
- **Öngörüleri geliştirmesi:** Yaşam döngüsü maliyet analizi tekniklerinin kullanılmasıyla, toplam satın alma, maliyet tahminlerinin daha gerçekçi olmasını sağlar ve bu da tüm seviyelerde etkin karar almayı kolaylaştırır.
- **Değiş–tokuş maliyetlerine rağmen performansı arttırması:** Satın alma kararlarında tedarik maliyeti, seçeneklere değer biçilmesinde gözönünde bulundurulacak tek faktör değildir. Yaşam döngüsü maliyet analizinin dikkate aldığı maliyetler, değiş-tokuş yapılmış değişik satın alma seçeneklerinin özelliklerine göre yapılandırılır.

Başarılı bir yaşam döngüsü maliyet analizinin getirdiği diğer temel faydalar ise şunlardır (Aytok, 2006):

- Gelecekteki kaynak ihtiyacının tahmin edilmesini ve belirlenmesini sağlar.
- Ar-Ge ve öncelikli tasarım kararlarını etkiler.
- Stratejik planlamayı ve bütçelemeyi destekler.

3.5.3. LCC analizinin karar almada kullanımı

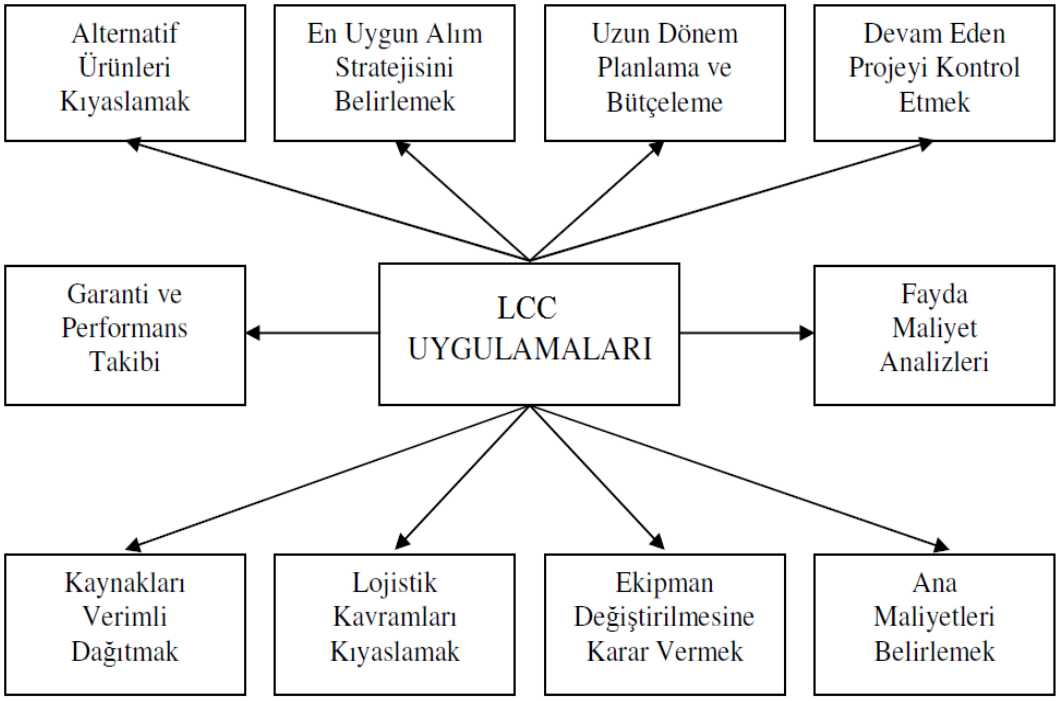
Bir bütün olarak yaşam döngüsü maliyet analizi, sistemlerin tasarım sürecini etkileyerek, sistemin yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan maliyetlerin toplamını en aza indirecek kararların alınmasında da bir araç olarak kullanılmaktadır.

Yaşam döngüsü maliyet analizi, alternatifler arasından maliyet ve yaşam süresi açısından en uygun olan alternatifin tespit edilmesi ve gerekli kararın alınmasında kullanılabilecek bir modeldir. Yaşam döngüsü maliyet analizi, bir tesis/işletme veya ürün/proses içerisinde gerçekleştirilmesi istenen çok sayıdaki yatırım projelerinin tamamının birden yapılması için ödenek yetersizliği olması durumlarında, mevcut ödeneğin paylaştırılması için hangi projelere öncelik verileceğinin kararlaştırılmasında da kullanılabilir. Yaşam döngüsü maliyet analizinin pek çok uygulama alanı mevcut olup, özellikle aşağıdaki konularda değerlendirme yapılmasında da kullanılmaktadır (Aytok, 2006).

- Alternatif sistem/ürünün işlevsel senaryoları ve kullanım yaklaşımları,
- Alternatif sistem/ürünün işletilmesi, bakım onarım aşamaları,
- Alternatif sistem/ürünün tasarım özellikleri (ünitelerin tasarımı, donanım/yazılım seçimi, güvenilirlik, bakım kolaylığı, vb.),
- Bir malzeme/parça için alternatif tedarik kaynaklarının seçimi,
- Alternatif üretim yöntemlerinden birinin seçimi (sürekli/kesintili üretim, üretim hatlarının miktarı, vb.),
- Alternatif dağıtım yollarının, ulaştırma yöntemlerinin, yedek parça depolarının yerlerinin incelenmesi, vb.,
- Ürünü elden çıkarmak ve yeniden değerlendirmek için alternatif yöntemlerin belirlenmesi,
- Alternatif yönetim usulleri ve bunların sistem üzerindeki etkilerinin incelenmesi.

Yaşam döngüsü maliyet analizi farklı ulaşım seçenekleri (otomobil, uçak, raylı sistemler), bilgisayarlar, ağır endüstri ekipmanları ve askeri sistemlerde

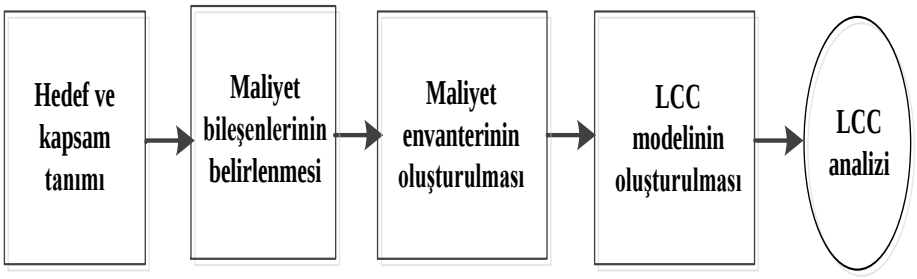
kullanıldığı gibi bunların yanında oluşturulacak modelin kapsamına göre de değişik uygulamalara sahiptir (GB, 2004). Bu uygulamalardan bazıları Şekil 3.3' te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Yaşam döngüsü maliyet analizi uygulamaları (Aytok, 2006).

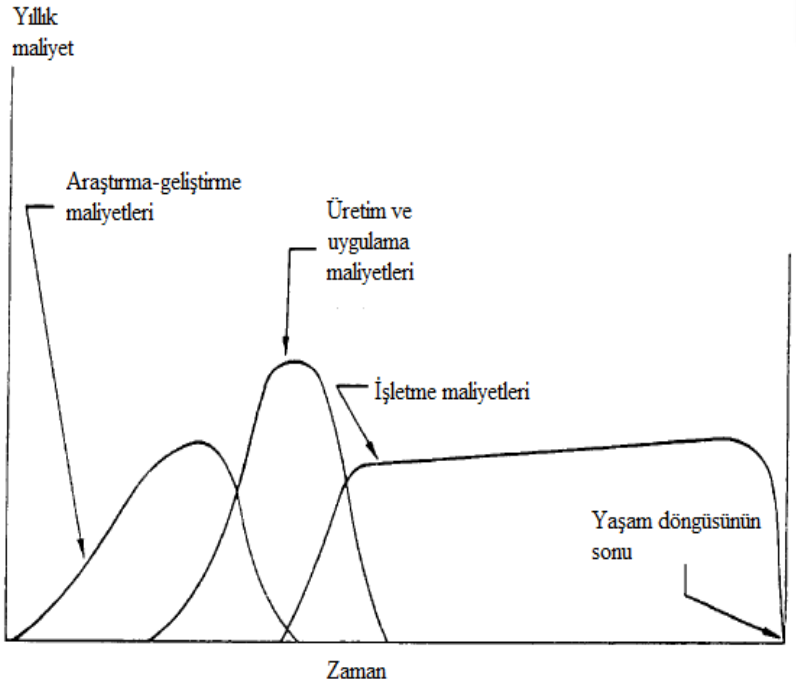
3.5.4. LCC Analiz Prosedürü

Yaşam döngüsü maliyet analizinin prosedürü, bir ürünün/prosesin kavram olarak ortaya çıkması ile başlayıp, ürünün/prosesin üretilmesi, işletilmesi ve elden çıkarılmaya kadar olan tüm aşamalarında harcanan kaynakların toplam maliyeti olarak tanımlanmış olup LCC analiz prosedürü Şekil 3.4'te verilmiştir (Woodward, 1997).



Şekil 3.4. Yaşam döngüsü maliyet prosedürü

- **Maliyet bileşenlerinin tanımlanması,** ürün/prosesin tüm yaşamı boyunca gerçekleşen nakit akışlarıdır. Bundan dolayı, maliyet unsurları tanımlanırken, faizin de mutlaka belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, yaşam döngüsü maliyet analizinde, ürün/prosesin elde edilmesinden, elden çıkarılmasına kadarki tüm aşamalarındaki maliyetler düşünülmeli ve net bir şekilde ifade edilmelidir. Maliyet bileşenlerinin tanımlanması öncelikle, maliyet gruplarının oluşturulmasını içerir. Böylece, maliyete neden olan ve potansiyel bileşenler ortaya konulabilir (Woodward, 1997).
  Woodward (1997) tarafından yapılan çalışmada, yaşam döngüsü maliyet bileşenleri, araştırma-geliştirme maliyetleri, üretim-uygulama maliyetleri ve işletme maliyetleri olmak üzere üç grupta incelenmiş ve Şekil 3.5'te buna bir örnek verilmiştir. Yaşam döngüsü maliyet bileşenleri 3 gruba ayrılsa da maliyet gruplandırılmasında son olarak her bir bileşenin ayrıntılı maliyetleri de gözönüne alınmalıdır.



Şekil 3.5. Yaşam döngüsü maliyetinin bileşenlerinin gruplandırılması (Woodward, 1997)

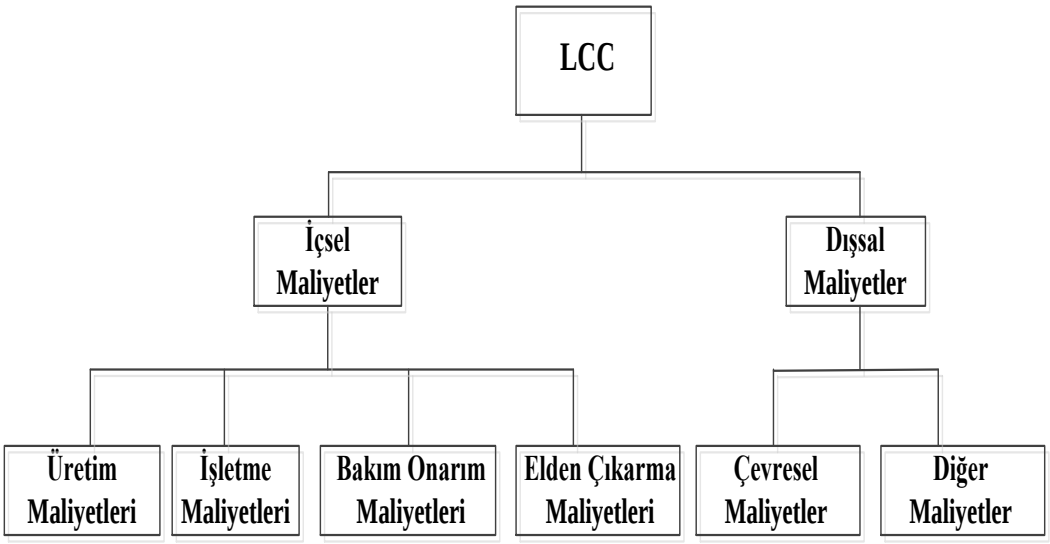
- **LCC formülasyon modelinin oluşturulmasında,** yaşam döngüsü maliyetinin değerlendirilebileceği en uygun modelin seçilmesi gereklidir**.** Bu durum Woodward (1997) tarafından önerilen sekiz aşamalı bir zaman testi ile anlaşılabilir:
    - İşletme profilinin oluşturulması
    - Kullanım faktörlerinin oluşturulması
    - Tüm maliyet unsurlarının belirlenmesi
    - Kritik maliyet parametrelerinin belirlenmesi
    - Güncel fiyatlarla tüm maliyetlerin hesaplanması
    - Kabul edilen enflasyon oranının dahil edilmesi
    - Dönem bazlı maliyetlere yapılan iskontoların hesaplanması
    - Toplam yapılan iskontoların net bugünkü değere göre düşünülmesi

Asiedu ve Gu (1998) ise yaptıkları çalışmada, yaşam döngüsü maliyetini şirket/üretici maliyeti, kullanıcı maliyeti (içsel) ve toplumsal (dışsal) maliyetlerden oluştuğunu belirtmişlerdir.

Çizelge 3.4. Yaşam döngüsü analizinin aşamaları ve maliyetlerle ilişkilendirilmesi (Aseidi ve Gu, 1998)

LCC / LCA	**Şirket Maliyetleri**	**Kullanıcı Maliyetleri**	**Toplumsal (Dışsal) Maliyetler**
Yapım veya Üretim	Malzeme, Enerji Fabrika/tesis Maaş/ücretler vb.		Atık Kirlilik Sağlık problemleri
İşletme veya kullanım	Nakliye Depolama Atık Iskarta Garanti hizmetleri	Nakliye Depolama Enerji Malzeme Bakım onarım	Ambalajlama Atık Kirlilik Sağlık problemleri
Elden çıkarma		Bertaraf/atık arıtımı/ geri kazanım	Ambalajlama, Atık, Kirlilik, Sağlık Problemleri

Şirket olarak, bir ürünü meydana getirmek, pazarlamak, üretmek, üretilen bu ürünü dağıtmak, işletmek ve ürünü elden çıkarmak için kullanılan kaynaklara ödemelerin yapılması gerekmektedir. Bu durumda, maliyet bileşenleri Şekil 3.6'da olduğu gibi kategorilere ayrılarak Maliyet Dağılım Yapısı (Cost Breakdown Structures, CBS) oluşturulmalıdır. Şekil 3.6'da gösterilen Maliyet Dağılım Yapısı bir ürün ya da bir sistem için yapılabilecek en kapsamlı maliyet gruplandırması olarak bilinmektedir. Ürün tasarımı/satın alma veya üretim aşamalarındaki maliyetlerin gruplandırılması, bir modele bağlıdır. Bu modelin oluşturulmasında gerekli olan veriler maliyet modelinin yapısına uygun seçilmelidir (Aseidu ve Gun, 1998).



Şekil 3.6. Maliyet dağılım yapısı

3.5.3.1 İçsel Maliyetler

Demiryolu ulaşımında, demiryolu altyapı ve işletme bileşenleri kendi özelliklerine sahip birer ürün gibidir. Bu ürünlerin yapımı ve üretimi sırasında uzun süreçler ve yüksek maliyetli yatırımlar gerekmektedir. Bu nedenle, demiryolu ulaşımında; altyapı (hattın yapımı, bakım-onarımı, işletilmesi ve hattın bertarafı) ve işletme (tren araçlarının üretimi, işletilmesi, bakım-onarımı ve araçların bertarafı) bileşenlerine ait içsel maliyetlerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Yaşam döngüsü analizindeki içsel maliyet kategorisi; yapım ve üretim maliyeti, işletme ve bakım onarım maliyeti ve son olarak elden çıkarma maliyetlerinden oluşmaktadır (Aseidu ve Gun, 1998).

- **Yapım ve üretim maliyeti:** Yatırım maliyetleri; üretilecek sistemlerin yapım, montaj ve test maliyetleri, üretim tesislerinin işletme ve bakım maliyetleri, başlangıç lojistik destek maliyetleri (test ve destek elemanları geliştirme maliyetleri, yedek parça tedarik maliyetleri, teknik veri geliştirmesi, tesis inşa maliyetleri) üretim ve inşaat aşamasının maliyetlerini oluşturmaktadır. Örneğin, demiryolu altyapı sistemlerinin oluşturulmasında kullanılan malzemelerin (çelik, çimento, balast, ray vb.)

enerjinin (elektrik, doğalgaz, fuel oil vb.) üretimi, malzemelerin nakliyesi (karayolu, demiryolu vb.) ve diğer saha çalışmaları için ortaya çıkan maliyetler yapım ve üretim ile ilgili içsel maliyettir. Kabasakal ve Solak (2010) çalışmasında, ülkemizde hızlı tren altyapı yapım maliyetinin Çizelge 3.4 'ten görüleceği üzere ortalama 4,53 milyon $/km civarında olduğu görülmüştür. TCDD (2013) çalışmasındaki 2008-2012 yılı istatistik verilerine göre, 2012 yılında YHT- km maliyeti 60,64 TL, KT- km maliyeti (yolcu) 85,01, Lokomotif-km (yük) 62,72 TL olarak verilmiştir.

Çizelge 3.5. Hızlı tren yapım maliyetleri (Kabasakal ve Solak, 2010)

Hat	**Mesafe (km)**	**Yaklaşık maliyet (milyon $)**
Ankara –İstanbul	533	3,15
Ankara- Konya	212	0,75
Ankara-Sivas	460	1,80
Ankara-İzmir	606	3,00
Bursa-Osmaneli	106	0,35
Ankara-Kayseri	150	0,45
Halkalı-Kapıkule	230	0,90
Toplam	2297	10,40
Ortalama	**1**	**4,53**

- **İşletme ve bakım onarım maliyeti:** İşletme maliyetleri; işletimi sürdürme, personel ve bakım desteği, yedek parça/tamir parçası ve ilgili envanter, test ve destek donanım bakımı, ulaştırma ve muamele, tesisler, modifikasyonlar ve teknik veri değişikliklerinin maliyetlerini kapsar. Örneğin, demiryolu altyapısındaki rayların işletilmesi veya demiryolu tren araçlarının hat üzerinde çalıştırılması sonucu oluşan maliyetler işletim maliyeti ile içsel maliyetlerin bir bölümünü oluşturmaktadır. Campos ve de Rus (2009) yaptığı çalışmada sadece işletme maliyetleri, hızlı tren için koltuk başına 0,0776 €/km ile 0,1776 €/km arasında değişmektedir. Bu

rakamlara göre ortalama 450 yolcu kapasiteli hızlı tren setinin işletme maliyeti 35 €/km ile 80 €/km arasında bir değer almaktadır. Demiryolu işletme maliyetleri, trenlerin teknik özelliklerine ve koltuk kapasitelerine göre farklılıklar göstermektedir. Örneğin, Türkiye'de YHT yolcu taşımacılığının işletme açısından maliyeti 0.12 TL/yolcu-km iken KD 0.22 TL /yolcu-km, KD yük taşımacılığında ise 0.18 TL/ton-km olarak verilmiştir (TCDD, 2013). Kabasakal ve Solak (2010) göre yılda 500.000 km yapan bir tren setinin ortalama bakım maliyeti yıllık 1 milyon €, kilometre başına 2 € olmaktadır. Tren setlerinin bakım maliyetini ise 2,83 $/km, enerji tüketimini 10,5 kwh/km ile 20 kwh/km arasında değişen değerler aldığı belirlenmiştir.

- **Elden çıkarma maliyeti:** Hizmet dışı bırakma ya da elden çıkarma maliyeti; sistem/ürünün yaşam döngüsü boyunca tamir edilemeyen parçalarının elden çıkarılması, sistem/ürünün hizmet dışı bırakılması sonucu bu malzemelerin veya parçaların bertarafı veya arıtımı için oluşan ilgili maliyetlerdir.

3.5.3.2 Dışsal Maliyetler

Dışsallık, ekonomik birimler arasında bedeli ödenmemiş karşılıklı bağıntılardır. Bir başka açıdan dışsallık, ekonomik birimlerin davranışlarının tüm sonuçlarına katlanmadıklarında ve faaliyetlerinin başkaları üzerindeki etkilerini hesaba katmadıkları zaman ortaya çıkar. Bireylerin istek ve ihtiyaçlarının yelpazesinin genişlemesi ve üretim sektörünün alanının gelişmesi, tüketim sürecinin sonunda çevresel sorunlar yaratarak dışsallıkların ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Çevresel maliyetlerin artması negatif dışsallıkları yaratmakta; çevrenin şimdi ve gelecekte "kıt kaynak" olduğunun ve olacağının farkına varılması ise önlemlerin alınmasını gerekli kılmaktadır. Bir üreticinin meydana getirdiği ürünler sadece kendi kullandığı girdilere bağlı olmayıp, diğer üreticilerin faaliyetlerine de bağlı olabilir ki, işte "dışsal zarar" böyle bir durumda ortaya çıkar. Bir başka deyişle, dışsal zarar bir üreticinin karşılığında bir şey almadan veya vermeden diğer bir üreticiye sağlamış olduğu fayda ve zarardır. Örneğin,

kamyonların veya tren araçlarının yol güzergahında yaşayan insanları etkileyen hava kirliliği ve gürültü yaratmasında olduğu gibi bir ulaşım kullanıcısı hiçbir maliyete katlanmadan diğer bir grubun refahını etkiliyorsa dışsal maliyet söz konusudur. (Nalçakan ve ark., 2012).

Ulaşım seçeneklerinin dışsallıkları birbirinden oldukça farklı biçimlerde oluşabilmektedir. Ancak genel olarak bu tür dışsallıkları oluşumları bakımından, üç temel şekilde incelemek mümkündür.

Birinci düzeyde meydana gelen dışsallıklar, ulaşım hizmetlerinin üretilmesi ve tüketilmesi sırasında meydana gelen çevresel kirleticilerin (küresel ısınma ve iklim değişikliği; CO_2, SO_2, toksisite; ağır metaller, PAH v.d. emisyonların) oluşturduğu maliyetlerdir.

İkinci düzeydeki ulaşım dışsallıkları olarak, ulaşım hizmetlerinde meydana gelen kaza vb. olayların oluşturduğu maliyetlerdir.

Üçüncü düzeydeki ulaşım dışsallıkları, ulaşım hizmetinin yoğun bir şekilde gerçekleştirilmesiyle, altyapısının yetersiz kalmasından dolayı meydana gelen trafik tıkanıklığı denilen dışsal maliyettir.

4. KONUYLA İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Yapılan detaylı literatür taramasına göre, demiryolu ulaşım sistemlerinde yaşam döngüsü analizinin kullanılması ile ilgili çalışmalar oldukça fazla olmakla birlikte, demiryolu sistemlerinde yaşam döngüsü maliyeti ile ilgili çalışmaları sınırlı sayıdadır. Literatürde, demiryolu sistemleri için LCA ve LCC yaklaşımının birlikte yürütüldüğü çalışmaların bütün bir demiryolu sistemini ele alamadığı, daha çok modüler bir yaklaşımda değerlendirildiği belirlenmiştir. Ayrıca ulusal ölçekte, demiryolu sistemlerinin çevresel etkilerinin ve ekonomik değerlendirmesinin birlikte araştırıldığı ve incelendiği herhangi bir çalışmaya rastlanmadığı gibi, yaşam döngüsü analizi ve yaşam döngüsü maliyeti analizinin bütünsel bir şekilde uygulandığı bir çalışma da tespit edilememiştir.

4.1. LCA ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Jonasson (2003) tarafından yapılan çalışmada, tren araçlarının işletme ve bakım onarım aşamalarında bütünsel bir yaklaşım kazanabilmek için Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) yöntemi kullanılmıştır. Tren araçlarının işletme aşamasında elektriğin kullanılmasının ve enerji kaybının, bakım onarım aşamasında ise deterjan ve nafta gibi kimyasal madde tüketiminin çevresel etkilere neden olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışmada, demiryolu sistemlerinin; işletme, bakım onarım ve inşaat (altyapı) bileşenlerinin farklı seçeneklerinin çevresel açıdan araştırılmasının gerekliliği vurgulanmıştır.

Swärd (2006)'ın çalışmasında, demiryolu ulaşım sistemlerinde yüksek enerji kullanılarak üretilen malzemelerin, geri dönüşüm ve yeniden kullanımları sonrası çevresel performansın nasıl etkilendiği yaşam döngüsü yaklaşımıyla belirlenmiştir. Yapılan çalışmada, öncelikle İsveç'te demiryolu ulaşımında hangi malzemelerin geri dönüştürülebileceği ve yeniden kullanılabileceği belirlenmiş, demiryolu malzemelerinin geri dönüşümü ve yeniden kullanımı ile ilgili mevcut durum, yeni teknoloji ve en iyi durum senaryoları olmak üzere üç farklı senaryo oluşturulmuş ve bu senaryoların yıllık ve km başına düşen enerji tüketimleri ayrı ayrı olarak hesaplanarak birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Facanha ve Horvath (2007) çalışmalarında, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki karayolu, demiryolu ve havayolu yük taşımacılığından kaynaklanan CO_2, NO_x, PM_{10}, CO, SO_2 gib_i kirleticilerin emisyon faktörlerinin belirlenmesinde yaşam döngüsü analiz yöntemini kullanmıştır. Yapılan çalışmada, her bir ulaşım türü için sadece yakıtın yanmasını değil, altyapı (yapım, onarım vb.), ve işletme (araçların üretilmesi, bakım onarımı ve bertarafı) bileşenleri ile birlikte yakıtın üretilmesi ve dağıtılması gibi aşamalar dikkate alınmıştır.

Federici ve ark. (2008) yaptıkları çalışmada, kara ulaşım seçenekleri (karayolu, yüksek hızlı tren demiryolu ve konvansiyonel tren demiryolu) ile yolcu ve yük taşımacılığını destekleyen alt sistemler tarafından oluşturulan "İtalya Ulaşım Altyapısı"nı incelemişlerdir. Ulaşım altyapısı; malzeme akışı analizi (MFA), şekillenmiş enerji analizi (EEA), ekserji analizi (EA) ve emergy analizi (EA) olmak üzere 4 farklı değerlendirme yöntemi ile değerlendirilmiştir. Tüm analizlerde; araçların, demiryolu ve karayollarının, bakım onarım, üretim veya inşaat aşamalarında kullanılan malzeme ve enerjisi girdisi ile ilgili ortak bir veri tabanı kullanılmıştır. Yapılan çalışmada, ulaşım sistemlerindeki önemli faktörlerin belirlenmesinde sadece yakıt tüketimi, araçların maliyetleri ve enerji kullanımlarının değil, altyapı bileşenlerinin oluşturulması için gerekli enerji ve malzeme maliyetlerinin de araştırılması gerektiği görülmüştür. Yüksek Hızlı Tren'de düşük trafik yoğunluğu güvenilir olmasına rağmen, yüksek enerji maliyetli malzeme kullanıldığı belirlenmiştir. Bunun sonucunda, yüksek hızlı tren ile yolcu ve yük taşımacılığı için gerekli olan enerji ihtiyacının sırasıyla 1.44 MJ/yolcu-km ve 3.09 MJ/t-km olduğu hesaplanmıştır.

Stripple ve Uppenberg (2010), tarafından yapılan çalışmada, İsveç Bothnia Hattı için, tüm altyapı ve hat üzerindeki bileşenlerin işletim ve üretim envanterinin oluşturularak belgelendirilmesi, demiryolu altyapı ve taşıma sisteminin çevresel etkilerinin sera gazı, asidifikasyon, ötrofikasyon açısından değerlendirilmesi, LCA yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada öncelikli olarak çalışmanın hedefi ve kapsamı ile birlikte sistem sınırları belirlenmiştir. Daha sonra her bir altyapı ve taşıma sistemi bileşeni için fonksiyonel birimler tanımlanmıştır. Bu tezdeki, yaşam döngüsü envanter (LCI) sisteminin oluşturulmasında bu çalışmadaki verilerden faydalanılmıştır.

Network Rail (2010), çalışmasında, İngiltere'de Londra kentinin kuzey ve batı bölgeleri için mevcut hatların yetersiz kalmasından dolayı kapasite artışına gidilmesi ve yeni yapılacak olan yüksek hızlı tren hatlarının işletime başlaması sonucu oluşacak olan durum için karbon ayak izi hesaplanmış, demiryolu sisteminin kendi içerisinde oluşturacağı alternatiflerinin çevresel açıdan değerlendirilmesi yapılmıştır.

Thiebault (2010) çalışmasında, iki farklı demiryolu köprüsü tasarımının çevresel etkilerinin belirlenmesinde, yaşam döngüsü analiz yöntemini kullanmıştır. Çalışmanın sistem sınırlarının belirlenmesinde demiryolu köprülerinin inşaatından, işletimine kadar olan tüm aşamaları dikkate alınmıştır. Sonuç olarak yapılan çalışmada, balast kullanılarak oluşturulan demiryolu hattının çevresel etkilerinin balastsız (sadece beton yatak) demiryolu hattına göre daha yüksek olduğu ifade edilmiştir. Köprülerde balastsız demiryolu hattının kullanılması durumunda oluşan çevresel etkilerin %77 oranında azaldığı belirlenmiştir. Çevresel etkilerin azaltılmasında kullanılan ham madde ve alternatif malzemelerin araştırılması gerektiği ifade edilmiştir.

Chester ve Horvath (2010) çalışmalarında, Kaliforniya yüksek hızlı treninin çevresel etkilerini yaşam döngüsü analizi yöntemi kullanarak sayısal olarak ifade etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, Kaliforniya yüksek hızlı trenini ve diğer alternatif ulaşım yöntemleri için farklı doluluk oranlarını kabul ederek oluşan çevresel etkiler belirlenmiştir. Özellikle, Kaliforniya yüksek hızlı treninin işletilmesi için gerekli olan elektriğin üretilmesinden kaynaklanan asidifikasyon etkisinin ve SO_2 seviyelerinin ekosistemi olumsuz derecede etkilediğini ifade etmişlerdir.

Baron ve ark. (2011) yaptıkları çalışmada, "*demiryolu taşıma araçlarının ve demiryolu altyapı sistemlerinin üretim metotları değişirse, CO_2 emisyonlarında değişim ne olur?*" sorusuna cevap aramış, Fransa ile Tayvan ve Çin'deki yüksek hızlı tren projelerinin inşaat ve işletme aşamalarını kapsayan karbon ayak izi hesaplanmış, ayrıca, Fransa'nın güney bölgesindeki kara ve havayolu ulaşımının karbon ayak izi hesaplanarak, bölgedeki yüksek hızlı tren hattı projesinin karbon ayak izi hesabı ile karşılaştırılması yapılmıştır.

Grossrieder (2011) çalışmasında, Norveç yüksek hızlı treninin mevcut durumu ve 2050 yılında oluşacak olan yeni durumu için çevresel performansın belirlenmesinde SimaPro yazılımını kullanmıştır. Bu çalışmada yüksek hızlı trenin altyapı (ray, travers v.b.) ve trenlerin üretilmesi ve işletilmesi gibi aşamaları dikkate alınmıştır. Ayrıca yaşam döngüsü envanterinin oluşturulmasında, Norveç için MİSA (Norveç'te Çevresel Sistem Analizleri) tarafından hazırlanan envanter kullanılmıştır. Yapılan çalışmada, çimento, çelik, ekstrüde polistren (XPS), altyapı, günlük taşınan yolcu sayısının, demiryolu sistemlerinin en önemli faktörleri olduğu ifade edilmiştir. Norveç için gelecekte yüksek hızlı tren hatlarında taşınan yolcu sayısının artması beklendiğinden, bu hatların işletilmesi sonrası oluşacak olan karbon ayak izinin düşük seviyelerde (166 g CO_2/kWh) olması beklenmektedir.

Chang ve Kendall (2011) tarafından yapılan çalışmada, Kaliforniya Yüksek Hızlı Tren sisteminin altyapı (demiryolu hattı, tünel, viyadük, elektrifikasyon) çalışmaları sonucu oluşan sera gazı emisyonlarının belirlenmesinde yaşam döngüsü analiz yöntemi kullanılmıştır. Altyapı çalışmaları sırasında kullanılan malzeme ve nakliye proseslerinin sera gazı emisyonlarına %80 seviyesinde neden olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, tünel ve viyadük gibi bazı sanat yapılarının toplam hat uzunluğunun sadece %15'i kadar uzunlukta olmasına rağmen, bu yapılardan meydana gelen sera gazı emisyonlarının %60 oranında olduğu ifade edilmiştir.

4.2. LCC ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Esveld (1999) tarafından yapılan çalışmada, konvansiyonel ve yüksek hızlı tren demiryolu hatlarında balast kullanılması ile ilgili görüşler, yaşam döngüsü maliyet yaklaşımıyla ele alınmıştır. Demiryolu ray hatlarında kullanılan balastların inşaat, yıllık bakım onarım maliyetleri belirlenmiştir. Sonuç olarak demiryolu ray hattı maliyetleri açısından, konvansiyonel demiryolu ray hatlarında balast kullanılmasının uygun olabileceği, yüksek hızlı tren seferlerinin ve yeni yük taşıma koridorlarının oluşmasıyla ilgili olarak servis sürelerinin uzamasının,

bakım onarım miktarlarının, yükleme oranları ile hızların artmasının maliyetleri etkileyeceği belirtilmiştir.

Zoeteman (2001) çalışmasında, demiryolu altyapı sistemlerinin (inşaat ve bakım onarım) bileşenleri ile ilgili maliyetlerin hesaplanmasında karar vericilere yardımcı olmak amacıyla yaşam döngüsü maliyet yaklaşımını kullanmıştır. Çalışmada, Almanya Yüksek Hızlı Treni ile ilgili örnek bir LCC çalışması da yapılmıştır.

Jun ve Kim (2007) çalışmalarında, tüm demiryolu sisteminin yaşam döngüsü maliyetini değerlendirmek için temel bir çalışma olarak demiryolu tren araçlarının yaşam döngüsü maliyet modelinin oluşturulmasını amaçlamışlardır. Yapılan bu çalışmada, demiryolu araçlarının yaşam döngüsü maliyet modeli oluşturulurken, Uluslararası Elektroteknik Komisyonu, IEC 60300-3-3 standardından ve Avrupa Demiryolu Endüstri Birlikleri Yaşam Döngüsü Maliyet grubu (UNIFE LCC) tarafından hazırlanan yaşam döngüsü maliyeti rehberinden faydalanılmıştır. Demiryolu araçlarının yaşam döngüsü maliyet modeli oluşturulurken, tren araçlarının yatırım, yıllık işletme ve yıllık bakım onarım maliyetleri dikkate alınmıştır. Sonuç olarak, yapılan çalışmada, demiryolu tren araçlarının yıllık bakım onarım maliyetlerinin hesaplanmasına yoğunlaştıkları belirtilmiş ve oluşturulan modelin tutarlılığı ve kullanılabilirliği geleneksel maliyet modelleriyle karşılaştırılmıştır.

Andrade (2008) tarafından yapılan bu çalışmada, demiryolu altyapı sistemlerinde kullanılan ray ve balast malzemelerinin bakım onarım aşamasında karar vericilere yardımcı olması için yaşam döngüsü maliyeti yönteminin uygulanması amaçlanmıştır. Demiryolunda mevcut olan modele ek olarak balast LCC modeli geliştirilmiştir. Her iki modele ait entegre senaryolar ile bakım onarım aşamalarına yeni bir seçenek sunulmuştur. Bu çalışmada yaşam döngüsü maliyeti yaklaşımına ait IEC 60300-3-3 standardı incelenmiştir. IEC 60300-3-3 standardının (2004) yılında güncellendiği ve bu standardın demiryolu altyapılarında yaşam döngüsü maliyeti modelinin oluşturulmasına destek olduğu belirlenmiştir.

Ciroth ve Franze (2009) tarafından yapılan çalışmada, LCA yazılımı için seçilen SimaPro 7.3.3 yazılımında, LCC için uygun bir modelin oluşturulabileceği

ve LCC analizinin gerçekleştirilebileceği ifade edilmektedir. Yapılan çalışmada, LCC analizi modelinin oluşturulması için yapılması gereken adımlar detaylı bir şekilde belirtilmiş ve şu anda SimaPro 7.3.3 yazılımının veri tabanında bu çalışmada kullanılabilecek herhangi bir verinin olmadığı ifade edilmiştir.

Patra ve ark. (2009) tarafından yapılan çalışmada yaşam döngüsü analizinin demiryolu hatlarının bakım onarımının, yaşam döngüsü maliyetindeki belirsizliklerin ortaya konularak belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu amaç kapsamında, Monte Carlo simülasyonu ve Deney Tasarımının kombinasyonları ile uygun bir metodoloji oluşturulmuştur. Oluşturulan bakım onarım maliyet modeli ile İsveç Demiryolu Hattı için örnek bir çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışma ile belirsizliklere neden olan parametreler (hatta oluşan gecikmeler ve gecikme maliyetleri, (güvenirlik, ulaşılabilirlik ve bakım maliyetleri) (RAM) tespit edilmiştir.

Kim ve ark. (2010) çalışmalarında, hafif raylı taşımacılığının altyapı bileşenleri için yaşam döngüsü maliyetinin tahmin edilebilmesini sağlayacak olan bir sistemin geliştirilmesini, geliştirilen bu sistemin ekonomik açıdan uygulanabilir olmasını ve karar vericiler için karar verme aşamasında yardımcı olabilmesini amaçlamışlardır. Yapılan çalışmada öncelikle, altyapı bileşenleri için inşaat maliyetlerini etkileyen faktörler belirlenmiştir. Her bir birim maliyet için veri tabanı oluşturularak, inşaat maliyetleri hesaplanmıştır. Daha sonra yaşam döngüsü maliyeti için literatür taramalarıyla birlikte prosedürler ve modeller tanımlanmıştır. Yaşam döngüsü maliyeti için bir algoritma yazılması gerçekleştirilmiş ve yazılan algoritmanın uygulanabilirliği ve tutarlılığının sağlanması amacıyla hafif raylı taşımacılık için köprülerin yaşam döngüsü maliyeti hesaplanmıştır. Sonuç olarak, yapılan bu çalışmada hafif raylı taşımacılık inşaat projelerinde maliyetlerin tahmin edilebilmesi ve yaşam döngüsü maliyet analizinin uygulanabilirliği ortaya konulmuştur.

Hoffart ve Kamps (2010) çalışmalarında, demiryolu altyapısında sinyalizasyon sisteminin sürdürülebilir işletme stratejisi için yaşam döngüsü maliyeti yaklaşımının uygulanması gerektiğini belirtmektedirler. Demiryolu sektöründe bazı özel koşullar düşünülerek, sinyalizasyon sistemlerinde yaşam döngüsü maliyet analizinin nasıl hesaplanacağı sorusu yöneltilmiş ve

sürdürülebilir bir yaklaşım için yaşam döngüsü maliyet analizinin Avrupa'da tüm demiryolu şirketleri arasında önemli bir fark yarattığı belirtilmiştir. Yapılan bu çalışmada yaşam döngüsü maliyet analizi ile Avrupa demiryollarının (demiryolu sektöründe yatırım maliyetlerinin yüksek olması, demiryolu projelerinin oluşum aşamalarında yatırım maliyetlerinde meydana gelen hataların öngörülememesi ve demiryolu altyapı sistemlerinin kullanım sürelerinin fazla olması gibi) sorunların çözümünde yaşam döngüsü maliyet analizinin uygulanabilirliğinin altı çizilmektedir. Yaşam döngüsü maliyet analizi yaklaşımı ile yapılan çalışma, IEC 60300- 3-3 standardına göre altı aşamada gerçekleştirilmiştir. Aşamalar sırasıyla; hedef ve kapsam tanımı, sistem geliştirilmesi, üretim, kurulum, işletme, bakım onarım ve son aşama olan elden çıkarma olarak belirlenmiştir. Her bir aşama için model içerisinde maliyetler hesaplanmıştır. Çalışmanın sonucu olarak, yaşam döngüsü maliyeti yaklaşımı ile uzun süreli yatırımların, yatırım maliyetlerinin analiz edilebilmesinin de ne denli önemli olduğu vurgulanmıştır.

Atkins (2011)'in çalışmasında, Norveç yüksek hızlı tren projesinin finansal ve ekonomik açıdan yatırım maliyetlerinin değerlendirilmesi ve tahmin edilmesi için yaşam döngüsü maliyet yaklaşımı kullanılmıştır. Çalışmada yaşam döngüsü maliyet modeli ile yüksek hızlı tren hattının yatırım, işletme, bakım onarım ve yatırım maliyetlerine ilaveten uzun dönem maliyetleri ile ekonomik değerlendirilmesi yapılmıştır. Verilerin toplanmasında ve yaşam döngüsü maliyet modelinin geliştirilmesinde UK HS2 (High Speed Two Limited) verilerinden ve J.P. Baumgartner'ın "Demiryolu Sektöründe Maliyetler" adlı çalışmasından faydalanılmış ve Oslo Bergen hattı için de bir yaşam döngüsü maliyet modeli oluşturulmuştur.

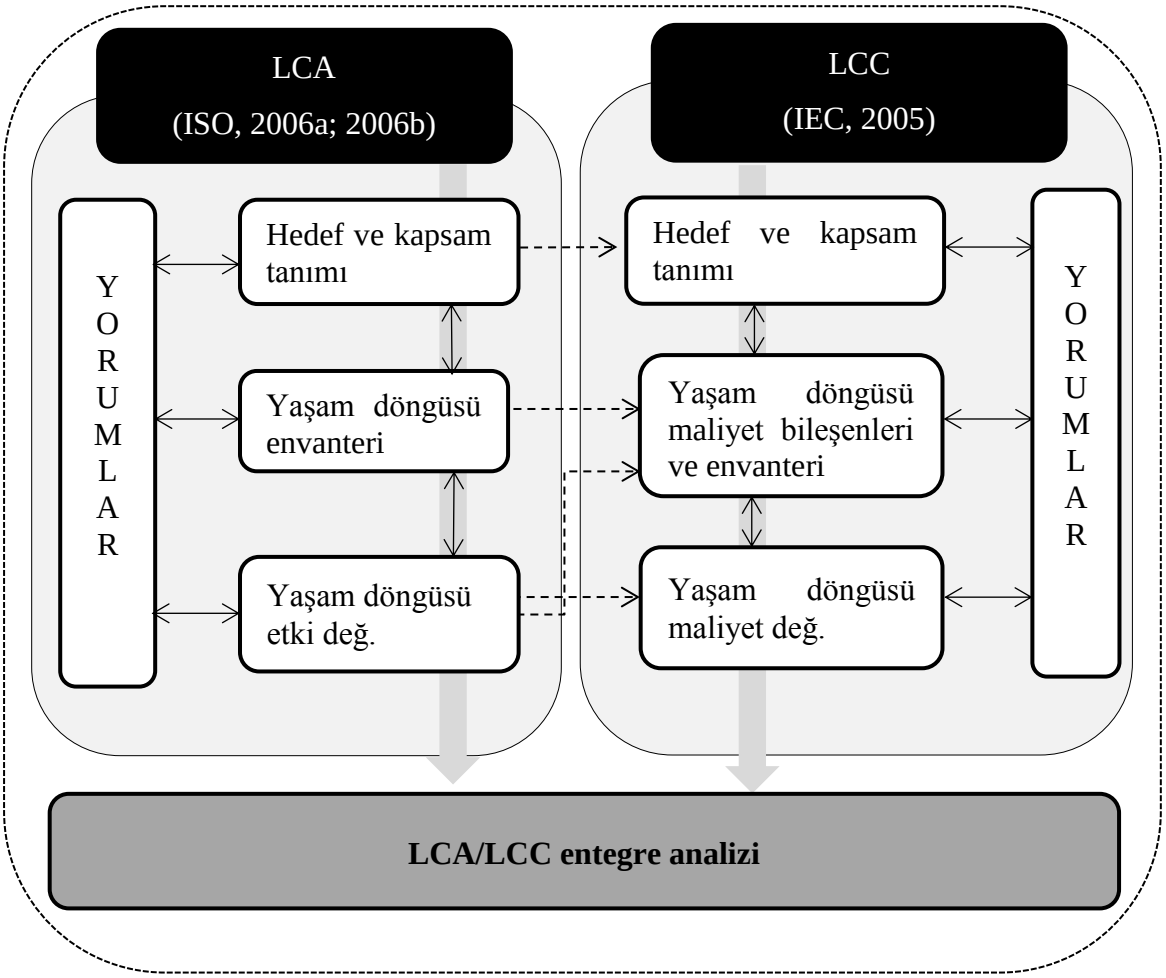
Çizelge 4.1. Avrupa'da dışsal maliyet ile ilgili yapılmış çalışmalar

Çalışma Başlığı	**Yazar**	**Amaç ve içeriği**
Ulaşım Sistemleri Fiyatlarının Araştırılması	CAPRI (2001)	4. Avrupa araştırma ve geliştirme programı çerçevesi kapsamında, Ulaşım altyapı modellerinin maliyetleri üzerine gerçekleştirilen Avrupa araştırma projelerinin değerlendirilmesi
Kapı'dan Kapıya Çok Türlü Taşıma Maliyetlerinin Azaltılması	RECORDIT (2001)	Avrupa' da çok türlü taşımacılığın maliyetler açısından değerlendirilmesi
Verimli Ulaşım Sistemlerinde Dışsal Maliyetlerin Belirlenmesi	UNITE (2003)	Verimli bir taşıma sisteminin oluşturulmasında, dışsal maliyetlerle birlikte diğer maliyetlerin hesaplanması için uygun bir metodun geliştirilmesi.
Batı Avrupa'da Dışsal Maliyetlerin Meta Analiz ile Tahmini	Quinet (2004)	Avrupa'da yapılmış çalışmaların taranması yapıldıktan sonra, ulaşım sektöründen kaynaklanan dışsal maliyetlerin farklılığının gösterilmesi.
Ulaşım Maliyetleri için Yapılan Projelerin Değerlendirilmesi ve Entegrasyonu	HEATCO (2006)	Avrupa ülkelerinde ulaşım maliyetlerinin tahmin edilmesi için bir kılavuzun geliştirilmesi, Özellikle, Avrupa'nın altyapı ve işletme maliyetlerinin çeşitliliğin gözden geçirilmesi ve bir model geliştirilmesi.
Maliyet Tahminlerinin Yaygınlaştırılması	Lindberg (2006)	Yük taşımacılığından kaynaklanan dışsal maliyetlerin belirlenmesi
Ulaşım Sektörünün Dışsal Maliyetleri	CE Delft ve ark. (2011)	Toplam üretim maliyetleri ve ortalama sosyal maliyetlerin belirlenmesi ve bir hesaplama metodolojisinin geliştirilmesi
İspanya'da yük taşımacılığı açısından dışsal maliyetlerinin değiştirilmesi	Pérez-Martínez ve Vassallo-Magro (2013)	İspanya'da karayolu ve demiryolu yük taşımacılığından kaynaklanan dışsal maliyetlerin karşılaştırılması,

4.3. LCA ve LCC Entegrasyonu

LCA ve LCC'nin entegrasyonu ile ilgili yaptığı çalışmada, bu iki metodun yaklaşımları arasındaki farklılıkları ve benzerlikleri ortaya koymaktadır. Özellikle, LCA ve LCC çok farklı sorulara cevap vermek için yapılıyor olmasına rağmen, her iki yaklaşımda karar vericilere daha iyi katkılar verebilmek için gerçekleştirilir. Bu yüzden LCA ve LCC birbirlerinden ayrı bir şekilde yapılsa da, karar vericilere bir çok açıdan karar vermede yardımcı olabilmesi için birbirlerine entegre edilirler (Norris, 2001).

Simoes ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada LCA ve LCC metotlarının entegre olarak birlikte kullanılabileceği ifade edilmiş olup her iki metodolojik aracın berabere kullanılabildiği bir model oluşturulmuştur (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. LCA ve LCC entegre model yapısı

5. MATERYAL VE METOD

Ulaşımla ilgili olası çevresel problemlerin tanımlanabilmesi için tüm ulaşım sistemi, yaşam döngüsünü içeren bütünsel bir yaklaşımla ele alınmalıdır. Bu yaklaşımda, sadece ulaşım aracı değil, aynı zamanda ulaşımı sağlayan tüm yapı da dikkate alınmaktadır.

O nedenle, tez çalışmasında, ülkemizde karar vericilere bir girdi sağlaması amacıyla, demiryolu ulaşım sisteminin çevresel etkileri ile bu etkilerin ekonomik açıdan da değerlendirilmesi LCA ve LCC yöntemleri ile birlikte yapılmıştır.

LCA, bu çalışmada dört adımda gerçekleştirilmiştir (Bölüm 5.2). İlk adımda, hedef ve kapsam tanımı ile çalışmanın amaçları ve hedeflenen çıktılara ulaşmak için gerekli ana bileşenler ortaya konularak demiryolu ulaşım sisteminin sınırları ve fonksiyonel birimi belirlenmiştir (Bölüm 5.2.1). İkinci adımda, yaşam döngüsü envanter analizi için (LCI) malzeme ve enerji akışının sayısal ve teknik verilerinin toplanması ve değerlendirilmesi gerektiğinden, sistem sınırları kapalı bir kutu olarak ele alınarak, bu kutuya giren tüm hammadde ve enerji bileşenleri ile kutudan çıkan kirletici bileşenler ve yan salınımlar fonksiyonel birim bazında hesaplanmıştır (Bölüm 5.2.2). Üçüncü adımda, yaşam döngüsü etki değerlendirmesi (LCIA) ile demiryolu ulaşım sisteminin tüm bileşenlerinin çevresel etkileri etki kategorileri bazında lisanslı SimaPro 7.3.3 (PRe Consultants, Netherland) yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır (Bölüm 5.2.3). Dördüncü aaşamada, etki değerlendirmesi sonuçları yorumlanmıştır (Bölüm 6.1).

LCC bölümü ise beş adımda gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, demiryolu ulaşım sisteminin hedef ve kapsam tanımı yapılmıştır (Bölüm 5.3.1). Bir sonraki adımda, maliyet prosesleri detaylı bir şekilde incelenerek maliyet faktörleri belirlenmiş ve kategorilere ayrılmıştır (Bölüm 5.3.2). Üçüncü adımda, maliyet verileri toplanarak yaşam döngüsü maliyet envanteri oluşturulmuştur (Bölüm 5.3.3). Dördüncü adımda, uygun LCC modeli, lisanslı SimaPro 7.3.3 yazılımında kurulmuştur (Bölüm 5.3.4). Beşinci adımda, demiryolu ulaşımının her bileşeni için yaşam döngüsü maliyeti modeli ile ilgili veriler lisanslı SimaPro 7.3.3 yazılımına girilerek yaşam döngüsü maliyet analizi yapılmış ve yorumlanmıştır (Bölüm 5.3.5).

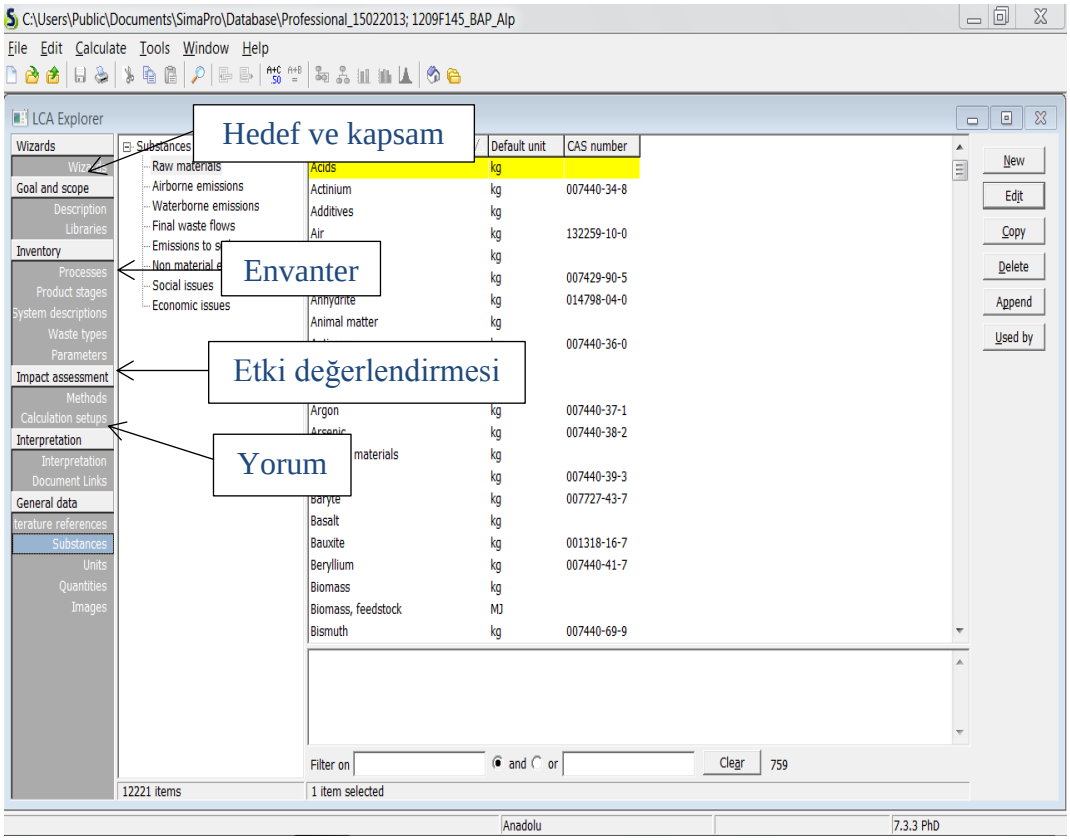
5.1 Çalışmada Kullanılan SimaPro 7.3.3. Yazılımı

Günümüzde LCA yönteminin uygulandığı birçok ticari yazılım bulunmaktadır. Bu yazılımlar, içerdikleri veri tabanına, etki değerlendirmesi yöntemlerine, ISO 14040'a uygunluklarına göre artmaktadır. Mevcut LCA yazılımları arasında yapılan değerlendirmeye göre; ISO 14040'a uygun olması, dünyada en fazla kullanılan LCA yazılımı olması, içerdiği veri tabanının ve metotların kalitesi, kullanım kolaylığı gibi nedenlerden dolayı bu tez çalışmasında, PRè Consultants adlı bir Hollanda firmasının ürünü olan SimaPro 7.3.3 yazılımının kullanılmasına karar verilmiştir.

SimaPro 7.3.3. içerik olarak Şekil 5.1'den de görüleceği gibi; hedef ve kapsam (goal and scope), envanter (inventory), etki değerlendirmesi (impact assessment) ve yorumdan (interpretation) oluşan ISO 14040 standartlarına ilaveten, kullanıma dayalı aşamaları (sihirbaz, veri kalitesi gereksinimleri, birimler, maddeler v.b.) da içermektedir.

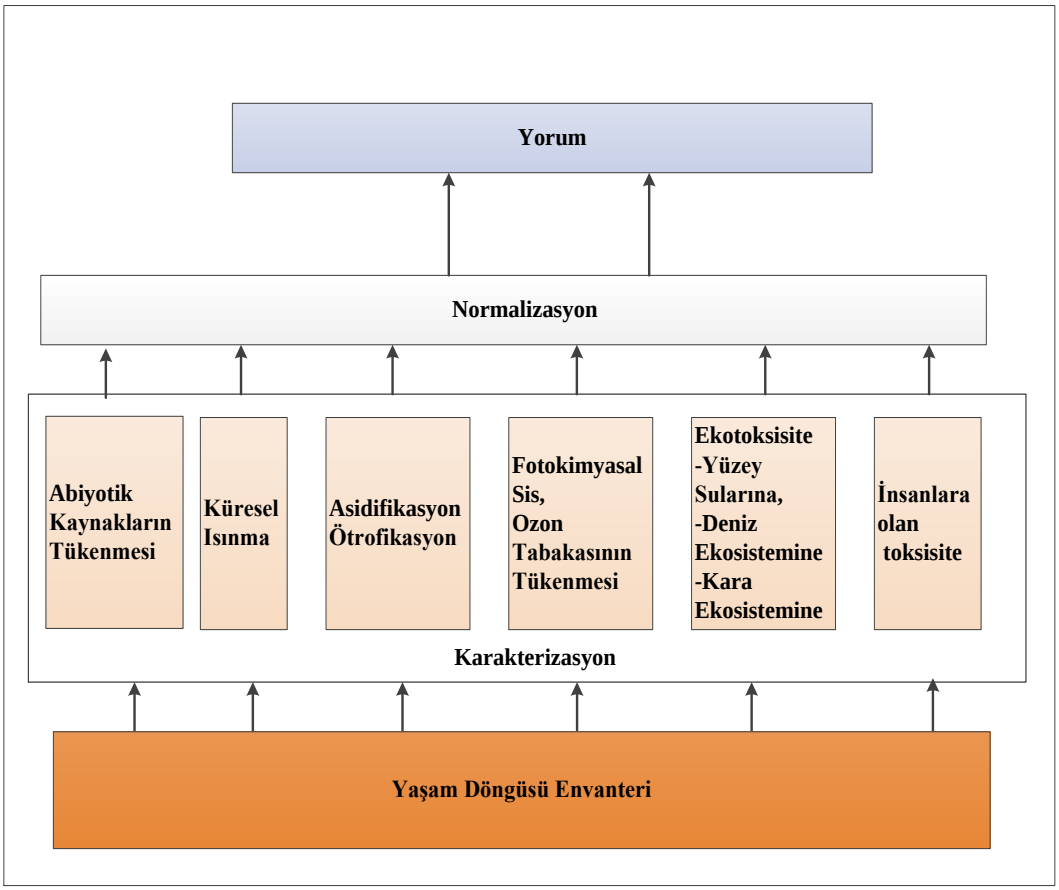
Hedef ve kapsam aşaması, raporlama açısından pek çok verinin girilmesini gerektirmektedir. Bu aşamada ayrıca envanterden seçilecek olan verinin çalışmaya uygunluğunun belirlenebilmesi için gereken veri kalitesi gereksinimleri (zaman, coğrafi kapsam, temsil edilen teknoloji v.b. gibi) de bulunmaktadır.

Envanter aşamasında, veriler içeren pek çok sayıda proje ve veri bankası vardır. Hedef ve kapsam aşamasında belirtilen gereksinimler doğrultusunda, veri bankalarında bulunan verilerden en uygun olan seçilir, ürün kümesi, yaşam döngüsü ve atık/bertaraf senaryoları oluşturulur.



Şekil 5.1. SimaPro 7.3.3 yazılımının yapısı

Etki değerlendirmesi aşamasında ise matematiksel hesaplamalara dayanan birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden de uygun olan seçilerek, oluşturulmuş olan yaşam döngüleri analiz edilir. SimaPro 7.3.3 yazılımında, sistemlerin envanter analizlerinin hesaplanması için bir çok hesaplama metodu bulunmaktadır. Metotların bazıları orta nokta (midpoint), bazılarıysa son nokta (endpoint) prensibine dayanmaktadır. Son nokta prensibine dayanan metotların, bileşenlerinin üçüncü kişilerce anlaşılması oldukça güçtür. Orta nokta prensibine dayanan metotların sonuçlarının anlaşılması ise daha kolaydır ve literatürde görüldüğü üzere bu metotlar uygulayıcılar tarafından daha çok tercih edilmektedir (Çokaygil, 2005). Literatürde en çok tercih edilen metotlardan birisi de CML 2 baseline 2000 metodudur. Bu metodun etki değerlendirmesinde uygulanma aşamaları Şekil 5.2' de verilmiştir.



Şekil 5.2. CML2 baseline 2000 yöntemi kullanılarak yapılan bir analizin yapısı

5.2 Demiryolu Ulaşım Sistemi ve LCA Uygulaması

Bu çalışmada, LCA analizi dört adımda gerçekleştirilmiştir. Bu adımlar takip eden bölümlerde açıklanmıştır.

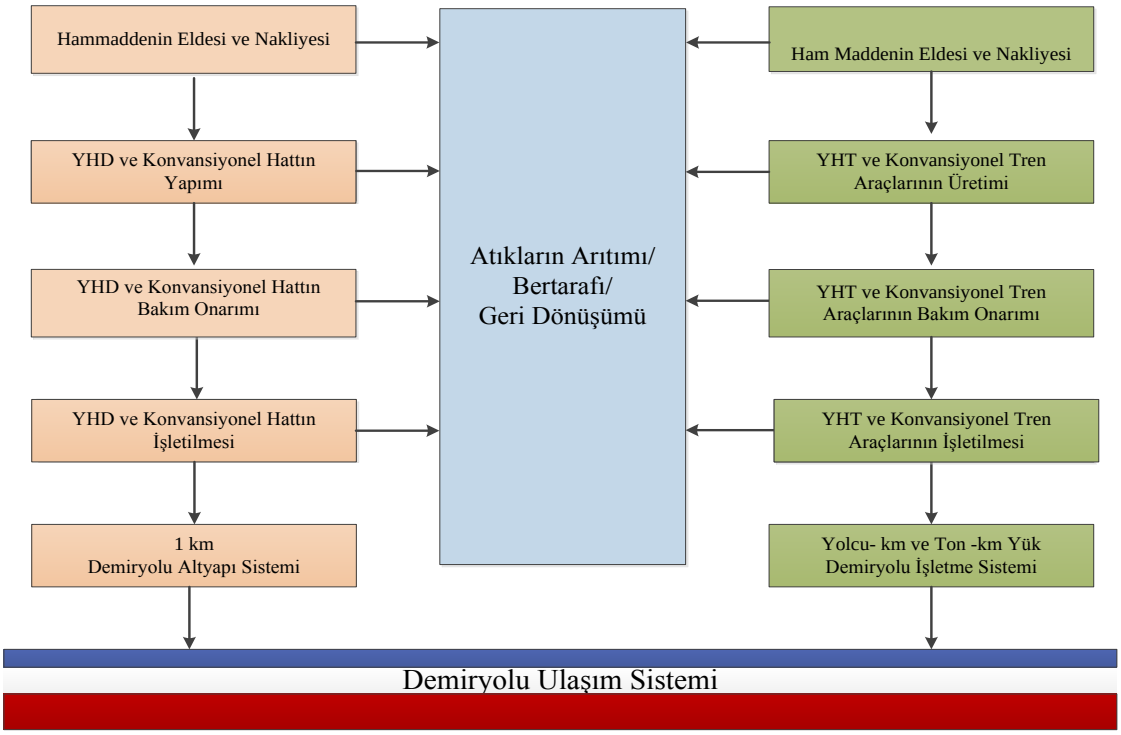
5.2.1. Hedef ve kapsam tanımı

Çalışmada, Türkiye'de YHT ve KD hattı ile sağlanan demiryolu ulaşımının, inşaat aşaması, taşıma aşaması ve bertaraf aşaması dahil olmak üzere, bu aşamaların her bir adımı göz önüne alınarak, çevresel etkilerinin LCA yöntemiyle belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda kapsam tanımı ile çalışmanın sistem sınırları ve fonksiyonel birimi belirlenmiştir.

Sistem sınırları;

- hammaddenin eldesi,
- elektrik enerjisinin üretilmesi ve dağıtılması,
- malzemelerin nakliyesi,
- demiryolu ray hattının; yapım, bakım onarım ve işletme,
- demiryolu tren araçlarının; üretim, bakım onarım ve işletme,
- atık arıtımı, geri dönüşüm ve bertaraf aşamalarını

içerecek şekilde beşikten mezara (cradle to grave) yaklaşımı ile belirlenmiştir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. LCA analizindeki sistem sınırları

Fonksiyonel birim, altyapı bileşenleri için **"1 km demiryolu altyapı sisteminin oluşturulması"**, demiryolu işletme sistemi için **"1 yolcunun 1 km taşınması"**, yük taşımacılığı içinse **"1 ton yükün 1 km taşınması"** olarak belirlenmiştir.

5.2.2. Yaşam döngüsü envanter analizi

Çalışmada, demiryolu ulaşımı ile ilgili yaşam döngüsü envanteri, veri toplama, varsayımlar ve hesaplama prosedüründen oluşmaktadır.

5.2.2.1 Veri toplama

Yaşam döngüsü envanteri oluşturulurken, her bir bileşen için gerekli hesaplamalar fonksiyonel birim bazında yapılmış ve "Demiryolu Altyapı Sistemi" ve "Demiryolu İşletme Sistemi" nin her bir bileşeni için gerekli olan malzeme ve enerji akışı ile ilgili sayısal ve teknik verilerin toplanması amacıyla, ülkemizde YHT ve konvansiyonel demiryolu hattı ile ilgili yapılmış inşaat projeleri, teknik analiz raporları, LCA çalışmaları ile ilgili literatür bilgileri ve veri tabanları detaylı bir şekilde incelenmiştir. LCA bileşenlerine ait alt bileşenler, prosesler ve envanter kaynakları Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. LCA bileşenleri

LCA bileşenleri	**LCA alt bileşenleri**	**LCA prosesleri**	**Envanter kaynakları**
Altyapı	YHD	Yapım Bakım onarım İşletme	(Banar ve ark., 2012) Ecoinvent database Ecoinvent database
	KD	Yapım Bakım onarım İşletme	(Banar ve ark., 2012) Ecoinvent database Ecoinvent database
İşletme	YHT	Üretim Bakım onarım İşletme	Ecoinvent database Ecoinvent database Hesaplanmıştır.
	KT	Üretim Bakım onarım İşletme	Ecoinvent database Ecoinvent database Hesaplanmıştır.
Enerji	Elektrik enerjisi	Elektrik üretimi	(Banar ve ark., 2013)

- **Demiryolu altyapı bileşenleri**

Bu bölümde, demiryolu altyapı bileşenleri; demiryolu ray hattının yapım/onarımı ve işletilmesi aşamalarından oluşmaktadır. 1 km YHD ve KD hatlarının oluşturulması için yapılan (demiryolu temeli, ray, travers, tünel, köprü, viyadük vb.) inşaat çalışmaları ve ray hattının bakım onarım ve işletilmesi aşamalarında kullanılan malzemeler ile ilgili envanter oluşturulmuş ve envanter bilgileri daha sonra lisanslı SimaPro 7.3.3 yazılımına girilmiştir. Demiryolu altyapı bileşenleri ile ilgili yaşam döngüsü envanteri Ek-2'de verilmiştir.

- **Demiryolu işletme bileşenleri**

Türkiye'de YHD ile sadece yolcu taşımacılığı yapılırken, KT ile hem yük hem de yolcu taşımacılığı yapılmaktadır. Demiryolu taşıma sistemi, demiryolu araçlarının üretim/bakım-onarım/işletme bileşenlerinden oluşmaktadır. Demiryolu işletme sistemi bileşenleri ile ilgili envanter oluşturulmuş ve envanter bilgileri daha sonra lisanslı SimaPro 7.3.3 yazılımına girilmiştir. Demiryolu işletme bileşenleri ile ilgili yaşam döngüsü envanteri Ek-2'de verilmiştir.

- **Enerji**

Türkiye'de YHD ve KD hattı üzerinde çalışan tren araçlarının işletilmesinde elektrik ve dizel yakıt enerjileri kullanılmaktadır. Türkiye'nin 2012 yılı toplam elektrik üretimi, kaynaklar açısından bakıldığında %44 doğalgazdan, %29 kömürden, %24 hidrolik kaynaklardan, %2.5 rüzgardan ve %0.5 jeotermalden sağlanmaktadır (Banar ve ark., 2013; EUAS, 2013).

5.2.2.1. Varsayımlar

Demiryolu altyapı ve işletme bileşenleri ile ilgili yapılan varsayımlar aşağıdadır:

- **Altyapı bileşenleri:**

YHD hattının yapımında, YHD plan kesit şekli (Şekil 2.3), KD hattının yapımında ise KD plan kesit şekli (Şekil 2.4) dikkate alınmıştır. YHD hattı üzerinde B70 tipi travers, KD hattında B58 tipi beton travers YHD hattında UIC 60 (60kg/m) ray tipi, KD hattında 49,05 kg/m ray tipi kullanılmaktadır (Banar vd., 2012). YHD ve KD hatlarının altyapılarının sıfır eğim ile inşa edildikleri kabul edilmiştir.

Hatların kullanım süreleri ile ilgili varsayımlarda (Kabasakal ve Solak, 2010) tarafından yapılan çalışma dikkate alınmış, yolcu taşımacılığı yapılan YHD ve KD hatlarının kullanım süreleri sırasıyla 35 ve 32 yıl, yük taşımacılığı yapılan KD hattının kullanım süresi ise 30 yıl olarak varsayılmıştır.

- **İşletme bileşenleri:**

YHT ve KT araçlarının işletmesi (yolcu ve yük taşıması) ile ilgili (tren araçlarının kapasitesi, doluluk oranı, kullanım süresi vb.) varsayımlarda Kabasakal ve Solak (2010) tarafından yapılan çalışma verileri dikkate alınmış olup, bunlar EK-2.3'de verilmiştir.

- **Atık arıtımı ile ilgili varsayımlar:**

Her iki demiryolu hattının yapımı sırasında oluşan inert malzemelerin katı atık depolama sahalarına gönderildiği ve her iki demiryolunda kullanılan tren araçlarının kullanım sürelerinin dolmasıyla, tren araçlarının parçalanarak atık yakma tesisine gönderildikleri varsayılmıştır.

5.2.2.2. Hesaplama prosedürü

Çalışmada 1 km demiryolu altyapı sistemi ve 1 yolcu-km, 1 ton-km yük demiryolu işletme sisteminin oluşturulmasında gerekli olan malzemeler "kg" cinsinden, taşıma verileri ise taşınan malzemelerin ağırlık değeri ve alınan mesafe

değerinin çarpılmasıyla bulunan “kgkm” birimi cinsinden hesaplanarak yazılımda kullanılmıştır.

5.2.3. Etki analizi

Bu çalışmada kullanılan CML 2 baseline 2000 hesaplama yönteminde seçilen etki kategorileri;

- abiyotik kaynakların tükenmesi
- asidifikasyon
- ötrofikasyon
- küresel ısınma
- ozon tabakasının tükenmesi
- toksik etki
    - insanlar üzerine olan toksik etki
    - yüzey sularına olan toksik etki
    - kara ekosistemine olan toksik etki
- fotokimyasal sis

şeklindedir. Etki analizi sonucu bulunan değerlendirme sonuçları Bulgular’da (Bölüm 6) verilmiştir.

5.2.4. Yorum

Çalışmanın yorum aşaması, etki analizi sonuçlarına ait bulguların değerlendirmesi olduğu için, Bulgular’da (Bölüm 6) verilmiştir.

5.3 Demiryolu Ulaşım Sistemi ve LCC Uygulaması

Yaşam döngüsü maliyeti (Life Cycle Cost, LCC) kavramı, bir sistemin veya ürünün yaşam döngüsü boyunca; sistemin geliştirilmesi, üretilmesi, işletilmesi ve envanterden çıkarılması için ortaya çıkan maliyetlerin toplamı olarak tanımlanmaktadır. Bu tez çalışmasında, demiryolu ulaşım sisteminin ekonomik açıdan değerlendirilmesi IEC 60300-3-3 standardına göre, hedef ve

kapsam tanımı, maliyet bileşenlerinin belirlenmesi, maliyet verilerinin toplanması, uygun bir LCC modelinin oluşturulması, sonuçların yorumlanması olmak üzere beş adımda gerçekleştirilmiştir.

5.3.1. Hedef ve kapsam tanımı

Bu bölümde, demiryolu ulaşım sisteminin yaşam döngüsü yaklaşımıyla ekonomik açıdan değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Önce, demiryolu ulaşımının sistem sınırları ve fonksiyonel birimi belirlenmiştir. Sistem sınırları:

- Demiryolu altyapı sistemi için;
    - Hattın yapımı
    - Hattın bakım onarımı ve işletilmesi
    - Hattın bertarafı
- Demiryolu işletme sistemi için;
    - Tren araçlarının üretimi
    - Tren araçlarının işletilmesi
    - Tren araçlarının bakım onarımı
    - Tren araçlarının bertarafı

şeklinde olup, her bir bileşen için maliyet bileşenleri detaylı olarak belirlenmiştir.

5.3.2. Maliyet bileşenlerinin belirlenmesi

Demiryolu ulaşım sisteminin maliyet bileşenleri, içsel maliyetler ve dışsal maliyetler olmak üzere iki bölümde incelmiştir. **İçsel maliyetler**, demiryolu ulaşım sistemi bileşenleri olan demiryolu altyapı (demiryolu hatlarının yapım, bakım onarım vb.) ve demiryolu işletme (tren araçlarının üretim, tren araçlarının bakım onarım, enerji tüketimi ve elden çıkarma) maliyetleridir. **Dışsal maliyetler**, yaşam döngüsü analizi sonucu incelenen etki kategorilerinin (asidifikasyon, ötrofikasyon, küresel ısınma, toksik etki gibi) etki yüzdesinin yüksek olmasına neden olan kirleticilerdir. Yaşam döngüsü maliyet bileşenlerinin sınıflandırılması Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. LCC maliyet bileşenlerinin sınıflandırılması

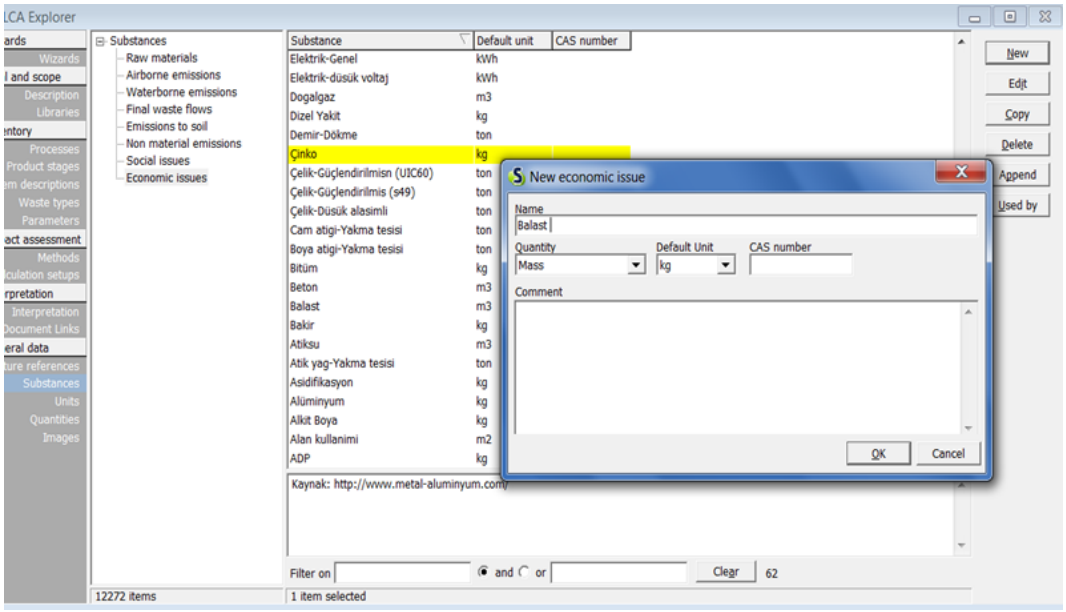
LCC maliyetleri	**LCC bileşen maliyetleri**	**LCC alt bileşen maliyetleri**
İçsel maliyetler	Demiryolu altyapı	Demiryolu hattının yapımı Demiryolu hattının bakım onarımı
	Demiryolu işletme	Tren araçlarının üretimi Tren araçlarının bakım onarımı Tren araçlarının işletilmesi
Dışsal maliyetler	Kirletici maliyetler	Küresel ısınma (CO, CO_2) Asidifikasyon (NO_2, $SO_{2,}$) Ötrofikasyon (NO_3, $PO_{4,}$) Toksisite (Arsenik, kadmiyum, krom, kurşun, civa, benzen, PAH, v.b)
	Diğer maliyetler	Kaza Gürültü

5.3.3. Maliyet verilerine ait envanterin oluşturulması

Bu bölümde, "Demiryolu Altyapı Sistemi" ve "Demiryolu İşletme Sistemi'nin" bileşenlerinin oluşturulmasında, kullanılan malzeme ve enerji ile ilgili sayısal ve maliyet verilerinin toplanması amacıyla, Türkiye'de YHT ve KD hattı ile ilgili yapılmış inşaat projeleri ve teknik analiz raporları, LCC çalışmaları ile ilgili literatür bilgileri ve veri tabanları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, yaşam döngüsü maliyet envanteri oluşturulurken, her bir bileşen için gerekli hesaplamalar fonksiyonel birim bazında yapılmıştır. İçsel ve dışsal maliyetlere ait alt bileşen maliyetleri ile ilgili yaşam döngüsü maliyet envanteri EK-3'te verilmiştir.

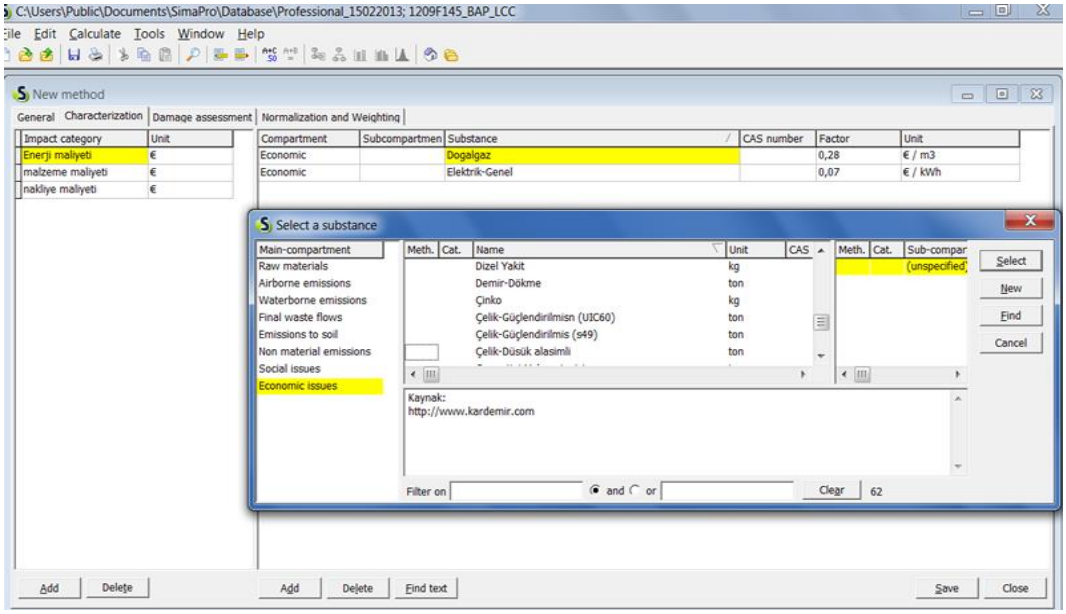
5.3.4. LCC modelinin oluşturulması ve analizinin yapılması

Bu tez çalışmasında, LCC modeli lisanslı SimaPro 7.3.3 programında; LCC hedef ve kapsam tanımının yapılması, LCC envanterinin oluşturulması, LCC metodunun oluşturulması, LCC proseslerine ait ekonomik verilerin girilmesi ve LCC modelinin çalıştırılması olmak üzere 5 aşamada oluşturulmuş olup, yazılım görüntüsü Şekil 5.4' de sunulmuştur. Aşağıda detaylı bir şekilde anlatılmıştır.



Şekil 5.4. LCC model envanterinin oluşturulması

Yazılımda LCC modeline ait maliyet kalemleri birimleri ile birlikte girildikten sonra "karakterizasyon (characterization)" bölümünde, maliyet kategorileri altında maliyet sınıfları (enerji, malzeme, makine, personel, kirletici vb.) ve maliyet sınıflarına ait birimler "€, $ veya TL" olarak, maliyet kalemlerine ait faktör (factor) değerleri ile birlikte girilmiştir (Şekil 5.5).

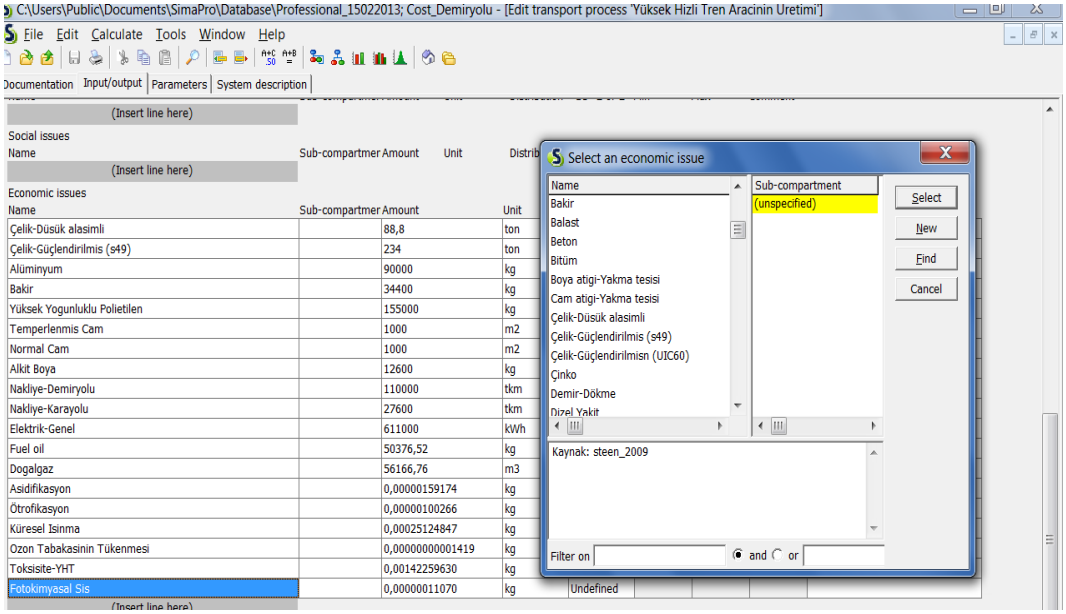


Şekil 5.5. LCC metoduna etki kategorilerinin eklenmesi

Zarar değerlendirmesi kısmında, etki kategorisindeki maliyetlerin maliyet değerleri belirlenmiş, değişken ve sabit maliyetler tanımlanarak, daha önce belirlenen etki kategorileri (enerji, malzeme, makine, personel, kirletici vb.) çağrılarak maliyet kategorilerine ait faktörler ile birimler girilmiştir.

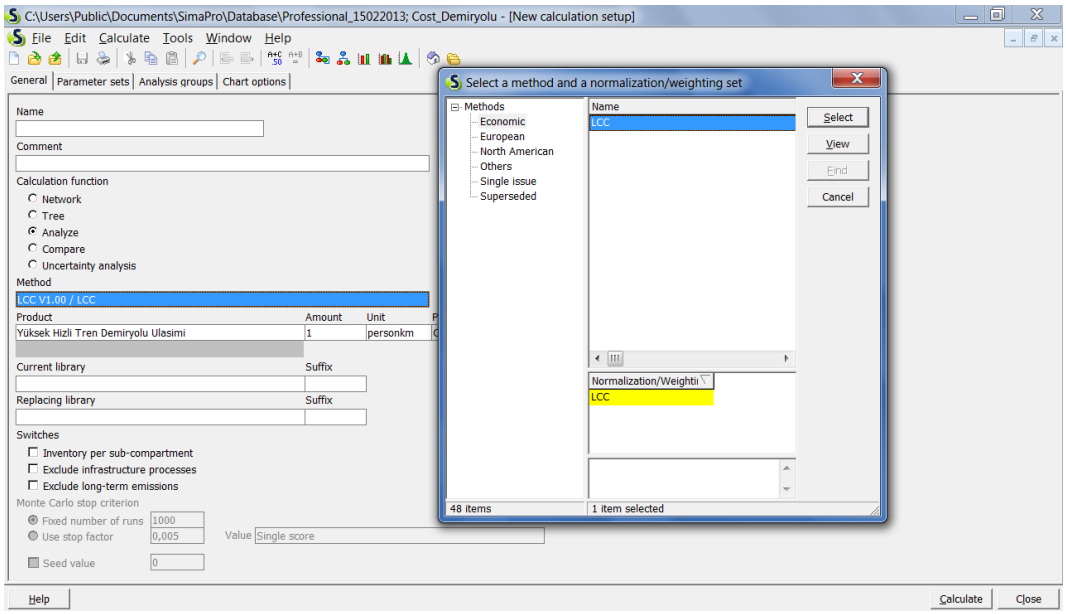
Ağırlıklandırma (weighting) aşamasında ise, maliyet modelinde seçilen değişken ve sabit maliyet kategorilerinin birbirleri arasındaki maliyet etkisinin değerlendirilmesi amacıyla ağırlıklandırma değerleri girilmiştir. Bu ağırlıklandırma da tüm maliyet kategorileri için literatürde çok sık kullanılan "1" değeri girilmiş olup, iskonto, faiz oranları göz önünde bulundurularak farklı değerde seçilebilmektedir.

Proseslere ait ekonomik verilerinin girilmesi kısmında da, öncelikle seçilen proses için belirlenen içsel ve dışsal maliyetlere ait, maliyet kalemleri (enerji, malzeme, işçilik, nakliye vb.) fonksiyonel birim bazında hesaplanarak, "ekonomik bölüm (ekonomik issues)" kısmına girilmektedir. Yaşam döngüsü proseslerinde ekonomik değerler girilirken, diğer çevresel veya altyapı proseslerine ait değerlerin girilmemesi gerekir. Bu nedenle proseslere ait sadece ekonomik değerler girilmelidir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6. Proseslere ait ekonomik veri girişi

Sonuçta, LCC bilgileri ve LCC modeli programda oluşturulduktan sonra, LCA yapılan diğer analizler gibi sonuçlar hesaplanır (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. LCC modelinin çalıştırılması

5.3.5. Yorum

Çalışmanın yorum aşaması, maliyet analizi sonuçlarına ait bulguların değerlendirmesi olduğu için, Bulgular'da (Bölüm 6) verilmiştir.

6. BULGULAR

Bu bölümde, "Yüksek Hızlı Tren" ve "Konvansiyonel Tren" demiryolunun, LCA ve LCC analiz sonuçlarına ait bulgular sunulmuş ve detaylı bir şekilde irdelenmiştir.

6.1. Demiryolu Ulaşımının LCA Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Demiryolu ulaşımında yolcu taşımacılığı yapılan YHT ve KD ile yük taşımacılığı yapılan KT demiryolunun yaşam döngüsü değerlendirmesi analiziyle ilgili bulgular şu şekildedir:

Demiryolu ulaşımının yaşam döngüsü etki değerlendirmesi, demiryolu ulaşımı ile ilgili EK-2' de oluşturulan yaşam döngüsü envanterinin, CML2 baseline 2000 yöntemine göre hesaplanmasıyla yapılmıştır. YHT ve KD demiryolu yolcu taşımacılığının, yaşam döngüsü etki değerlendirmesinin toplu karakterizasyon sonuçları Çizelge 6.1'de verilmiştir.

LCA çalışmalarında, normalizasyon sonuçlarının verilmesi isteğe bağlı olup, Çizelge 6.2'de YHT ve KD ulaşımının yolcu taşımacılığı açısından normalizasyon sonuçları verilmiştir. Normalizasyon sonuçlarında verilen etki kategorilerinin birimsiz olması nedeniyle etki kategorileri kendi aralarında karşılaştırılabilmiştir.

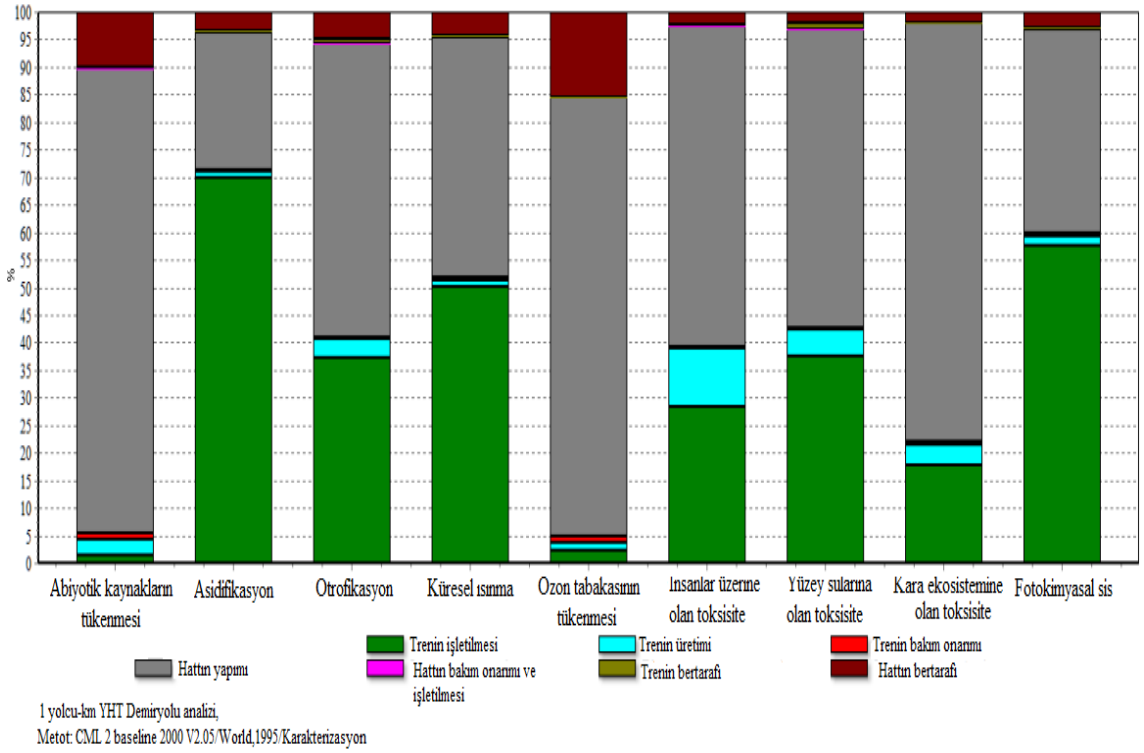
Çizelge 6.1. "1 yolcu-km" taşımacılığının toplu karakterizasyon sonuçları

Etki Kategorisi	**Birim**	**YHT**			**KD**		
		Altyapı	**İşletme**	**Toplam**	**Altyapı**	**İşletme**	**Toplam**
Abiyotik kaynakların tükenmesi	kg Sb ed.	6.6E-05	3.9E-06	7.0E-05	4.7E-05	4.7E-06	5.2E-05
Asidifikasyon	kg SO_2 ed.	4.4E-05	1.1E-04	1.5E-04	2.9E-05	1.6E-04	1.9E-04
Ötrofikasyon	kg PO_4 ed.	1.7E-05	1.2E-05	2.9E-05	1.1E-05	1.7E-05	2.8E-05
Küresel ısınma	kg CO_2 ed.	1.1E-02	1.2E-02	2.2E-02	8.6E-03	1.7E-02	2.5E-02
Ozon tabakasının tükenmesi	kg CFC-11 ed.	1.0E-09	5.0E-11	1.0E-09	6.3E-10	6.9E-11	7.0E-10
İnsanlar üzerine olan toksik etki	kg 1,4-DB ed.	6.4E-03	4.2E-03	1.1E-02	3.1E-03	5.8E-03	8.8E-03
Yüzey sularına olan toksik etki	kg 1,4-DB ed.	3.3E-03	2.6E-03	5.9E-03	2.1E-03	3.5E-03	5.7E-03
Karasal ekosisteme olan toksik etki	kg 1,4-DB ed.	7.5E-05	2.1E-05	9.6E-05	5.6E-05	2.9E-05	8.5E-05
Fotokimyasal sis	kg C_2H_4 ed.	2.7E-06	4.0E-06	6.6E-06	2.0E-06	5.8E-06	7.8E-06

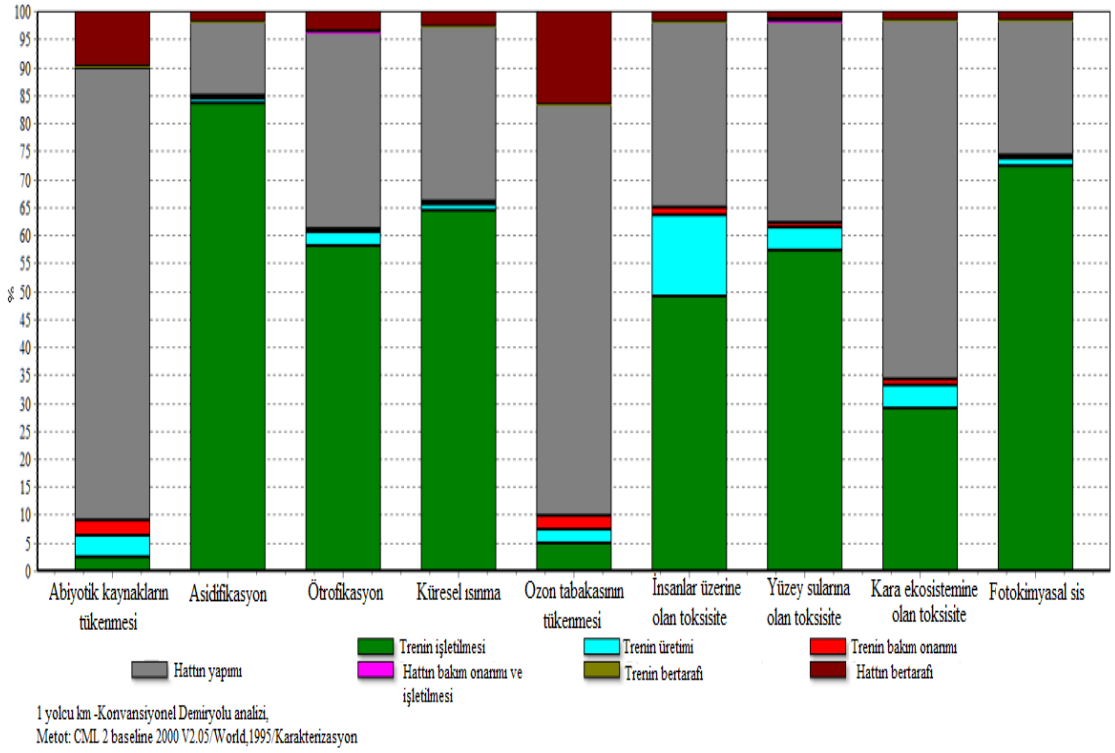
Çizelge 6.2. "1 yolcu-km" taşımacılığının toplu normalizasyon sonuçları

Etki Kategorisi	**YHT**				**KD**			
	Altyapı	**İşletme**	**Toplam**	**Etki %'si**	**Altyapı**	**İşletme**	**Toplam**	**Etki %'si**
Abiyotik kaynakların tükenmesi	4.3E-16	2.5E-17	4.5E-16	8.7	4.3E-16	2.5E-17	3.3E-16	6.5
Asidifikasyon	1.4E-16	3.4E-16	4.7E-16	9.2	1.4E-16	3.4E-16	5.9E-16	11.6
Ötrofikasyon	1.3E-16	9.2E-17	2.2E-16	4.3	1.3E-16	9.2E-17	2.1E-16	4.1
Küresel ısınma	2.6E-16	2.8E-16	5.3E-16	10.3	2.6E-16	2.8E-16	6.1E-16	12.1
Ozon tabakasının tükenmesi	1.9E-18	9.7E-20	2.0E-18	0.0	1.9E-18	9.7E-20	1.4E-18	0.0
İnsanlar üzerine olan toksik etki	1.1E-16	7.3E-17	1.9E-16	3.6	1.1E-16	7.3E-17	1.5E-16	3.1
Yüzey sularına olan toksik etki	1.6E-15	1.3E-15	2.9E-15	55.7	1.6E-15	1.3E-15	2.8E-15	54.7
Karasal ekosisteme olan toksik etki	2.8E-16	7.8E-17	3.6E-16	6.9	2.8E-16	7.8E-17	3.2E-16	6.3
Fotokimyasal sis	2.8E-17	4.1E-17	6.9E-17	1.3	2.8E-17	4.1E-17	8.1E-17	1.6
Toplam	3.0E-15	2.2E-15	5.2E-15	100.0	3.0E-15	2.2E-15	5.1E-15	100.0

Her iki ulaşım türünün etki kategorilerine göre karakterizasyon grafikleri Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de verilmiştir. Karakterizasyon grafikleri, her iki demiryolu ulaşımında ele alınan aşamaların % olarak her bir etki kategorisine olan katkılarını göstermektedir. Burada yapılan değerlendirme, etki kategorileri bazında olduğu için, grafikte görülen barlar birbirinden bağımsız olup, grafiğin en üst noktasının tüm etki kategorileri için aynı değerde olması bu anlama gelmektedir.



Şekil 6.1. "1 yolcu-km" YHT demiryolu karakterizasyon sonuçları



Şekil 6.2. "1 yolcu-km" KD karakterizasyon sonuçları

Demiryolu ulaşımında, 1 yolcu-km taşınmasının yaşam döngüsü değerlendirmesi incelendiğinde,

- **Abiyotik kaynakların tükenmesi potansiyeli (ADP)**, hammadde tüketimini ele almakta ve kg Sb eşdeğeri olarak verilmektedir. Abiyotik kaynakların tükenmesine, demiryolu hattının yapım prosesinin yaklaşık %90 oranında bir etkisi varken, hat üzerinde çalışan tren araçların üretimi ve işletilmesi proseslerinden yaklaşık %10 seviyesinde bir etki oluşmaktadır. Bu duruma, demiryolu altyapı bileşenleri için gerekli elektrik ve ısı enerjisi elde edilmesinde kullanılan doğal kaynakların (kömür, doğalgaz, petrol vb.) neden olduğu düşünülmektedir.
- **Asidifikasyon potansiyeli (AP),** kg SO_2 eşdeğeri olarak ifade edilmektedir. Konvansiyonel demiryolu ulaşımının asidifikasyon etkisi 1.9E-04 kg SO_2, iken yüksek hızlı demiryolu ulaşımınınki 1.5E-04 kg SO_2 eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Bu etkiye demiryolu ulaşımındaki tren araçlarının işletilmesi için kullanılan elektrik üretiminin, hatların altyapı çalışmaları sırasında malzemelerin nakliyesi ve saha çalışmalarındaki

araçlardan açığa çıkan NOx ve sülfür dioksit emisyonlarının neden olduğu tahmin edilmektedir.

- **Ötrofikasyon potansiyeli (EP),** kg PO_4 eşdeğeri olarak verilmektedir. Her iki ulaşım seçeneği için de ötrofikasyon potansiyeli birbirine çok yakın değerlerdedir (yüksek hızlı demiryolu 2.9E-05 kg PO_4, konvansiyonel demiryolu 2.8E-05 kg PO_4). Tren araçlarının işletilmesinde kullanılan elektrik üretimi ve malzemelerin nakliyesinden kaynaklanan fosfat ve NOx emisyonları ötrofikasyon etkisi oluşturmaktadır.
- **Küresel ısınma potansiyeli (GWP),** CML2 baseline 2000 yöntemine göre kg CO_2 eşdeğeri şeklinde ifade edilmektedir. Bu etki kategorisi açısından demiryolu ulaşımı incelendiğinde, küresel ısınma etkisi yüksek hızlı demiryolu ulaşımı için 0.022 kg CO_2 eşdeğeri, konvansiyonel demiryolu ulaşımı için ise 0.025 kg CO_2 eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Küresel ısınma etkisine, tren araçlarının işletilmesi prosesinin, altyapı proseslerine göre daha yüksek etkide bulunduğu görülmektedir. Buna, elektrik (fosil yakıt temelli olması) ve malzeme üretimi (çimento) ile nakliye prosesleri sonrası atmosfere salınan CO_2 emisyonunun yol açtığı düşünülmektedir.
- **Ozon tabakasının tükenmesi (ODP),** kg CFC-11 eşdeğeri olarak ifade edilmektedir. Ozon tabakasının tükenmesinde, demiryolu ulaşımının altyapı bileşenlerinin etkisinin işletme bileşenlerine göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu duruma, demiryolu bileşenlerinde kullanılan petrolün üretilmesi sırasında havaya salınan bromo triflorür metan (Halon 1301) ve bromo klorflorür metan (Halon 1211) gazlarının etkili olduğu tahmin edilmektedir.
- **Toksisite;**
    - **İnsanlar üzerine olan toksik etki (HTP),** kg 1,4 DB (dikloro benzen) eşdeğeri olarak verilmektedir. Yüksek hızlı demiryolu ulaşımında altyapı bileşenlerinin, işletme bileşenlerine göre daha yüksek etkiye neden olduğu bu durumun, konvansiyonel demiryolunda tam tersi olduğu belirlenmiştir. İnsanlar üzerine olan toksisite incelendiğinde, tren araçlarının üretilmesi sırasında kullanılan alüminyum, bakır ve demir gibi malzemelerin, tren

araçlarının işletilmesi için kullanılan elektriğin üretiminin ve bu sırada oluşan PAH, arsenik, krom, nikel, kadmiyum ve bakır emisyonlarının ön plana çıktığı görülmektedir.

- **Yüzey sularına olan toksik etki (FAETP),** kg 1,4 DB (dikloro benzen) eşdeğeri olarak verilmektedir. Bu etki, yüksek hızlı demiryolu ulaşımında 5.9E-03 kg 1,4 DB eşdeğeri iken, konvansiyonel demiryolu ulaşımının da 5.7E-03 kg 1,4 DB eşdeğerinde olduğu hesaplanmıştır. Yüzey sularına olan toksik etkiye, yüksek hızlı demiryolu hattında, hattın yapımında kullanılan malzemelerin (çelik, bakır vb.) üretimi, konvansiyonel demiryolunda ise demiryolu hattındaki tren araçlarının işletilmesinde kullanılan elektriğin üretimi neden olmaktadır.
- **Kara ekosistemine olan toksik etki (TEP),** kg 1,4 DB (dikloro benzen) eşdeğeri olarak verilmektedir. Bu etkiye, her iki demiryolu hattının yapımında kullanılan malzemelerin (çelik, demir) üretimi ve elektriğin iletilmesi, dağıtılması proseslerinden oluşan civa, krom (VI) ve arsenik gibi kirleticilerin neden olduğu düşünülmektedir.

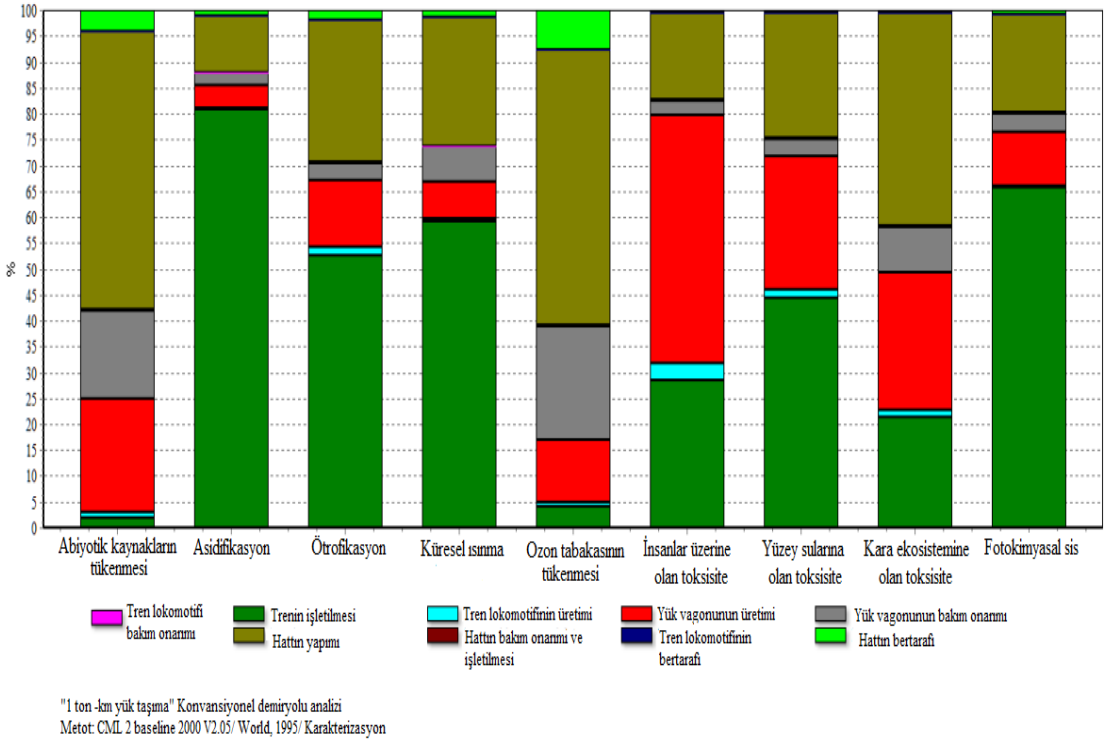
- **Fotokimyasal sis (POP) etkisi**, kg C_2H_4 eşdeğeri olarak hesaplanmaktadır. Yüksek hızlı demiryolu ulaşımının fotokimyasal sis etkisi 6.6E-06 kg C_2H_4, konvansiyonel demiryolu ulaşımının 7.8E-06 kg C_2H_4 olarak hesaplanmıştır. Demiryolu ulaşımındaki fotokimyasal sis etkisine, elektrik üretimi prosesinde açığa çıkan CO ve sülfür dioksit emisyonlarının neden olduğu düşünülmektedir.

Yük taşımacılığının yapıldığı, konvansiyonel Demiryolu ulaşımında, 1 ton-km yük taşınmasının yaşam döngüsü etki değerlendirmesinin toplu karakterizasyon ve normalizasyon sonuçları Çizelge 6.3'te, etki kategorilerine göre değerlendirme sonuçları ise Şekil 6.3'te verilmiştir.

Çizelge 6.3. Yük taşımacılığının toplu karakterizasyon ve normalizasyon sonuçları

Etki Kategorisi	**Karakterizasyon**				**Normalizasyon**			
	Birim	**Altyapı**	**İşletme**	**Toplam**	**Altyapı**	**İşletme**	**Toplam**	**Etki %'si**
Abiyotik kaynakların tükenmesi	kg Sb ed.	4.8E-05	3.5E-05	8.3E-05	3.1E-16	2.2E-16	5.3E-16	6.9
Asidifikasyon	kg SO_2 ed.	2.9E-05	2.1E-04	2.4E-04	9.0E-17	6.6E-16	7.5E-16	9.7
Ötrofikasyon	kg PO_4 ed.	1.1E-05	2.6E-05	3.7E-05	8.3E-17	2.0E-16	2.8E-16	3.6
Küresel ısınma	kg CO_2 ed.	8.9E-03	2.5E-02	3.4E-02	2.1E-16	6.0E-16	8.1E-16	10.5
Ozon tabakasının tükenmesi	kg CFC-11 ed.	6.3E-10	4.0E-10	1.0E-09	1.2E-18	7.9E-19	2.0E-18	0.0
İnsanlar üzerine olan toksik etki	kg 1,4-DB ed.	3.2E-03	1.5E-02	1.9E-02	5.6E-17	2.7E-16	3.3E-16	4.2
Yüzey sularına olan toksik etki	kg 1,4-DB ed.	2.2E-03	6.8E-03	9.0E-03	1.1E-15	3.3E-15	4.4E-15	56.8
Karasal ekosisteme olan toksik etki	kg 1,4-DB ed.	5.9E-05	8.3E-05	1.4E-04	2.2E-16	3.1E-16	5.3E-16	6.9
Fotokimyasal sis	kg C_2H_4 ed.	2.1E-06	8.5E-06	1.1E-05	2.2E-17	8.8E-17	1.1E-16	1.4
Toplam	-	-	-	-	2.1E-15	5.7E-15	7.7E-15	100.0

1 ton km yük taşınmasının karakterizasyon sonuçları incelendiğinde ise (Şekil 6.3),



Şekil 6.3. "Yük taşımacılığının karakterizasyon sonuçları

- **Abiyotik kaynakların tükenmesi potansiyeli (ADP)**, 8.3E-05 kg Sb eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Yük taşımacılığındaki bu etkiye, yük vagonunun üretimi ve bakım onarım proseslerinde kullanılan enerjinin üretimi için kullanılan doğal kaynakların (kömür, petrol ve doğalgaz) tüketiminin neden olduğu düşünülmektedir.
- **Asidifikasyon potansiyeli (AP),** 2.4E-04 kg SO_2 eşdeğeri olarak belirlenmektedir. Asidifikasyon etkisine, yüksek oranda tren araçlarının işletme prosesinin neden olduğu ve bu duruma, tren araçlarının işletilmesinde kullanılan elektrik enerjisinin üretiminden kaynaklandığı düşünülmektedir.
- **Ötrofikasyon potansiyeli (EP),** Konvansiyonel demiryolu hattında, yük taşımacılığının ötrofikasyon potansiyeli, 3.7E-05 kg PO_4 eşdeğeridir.

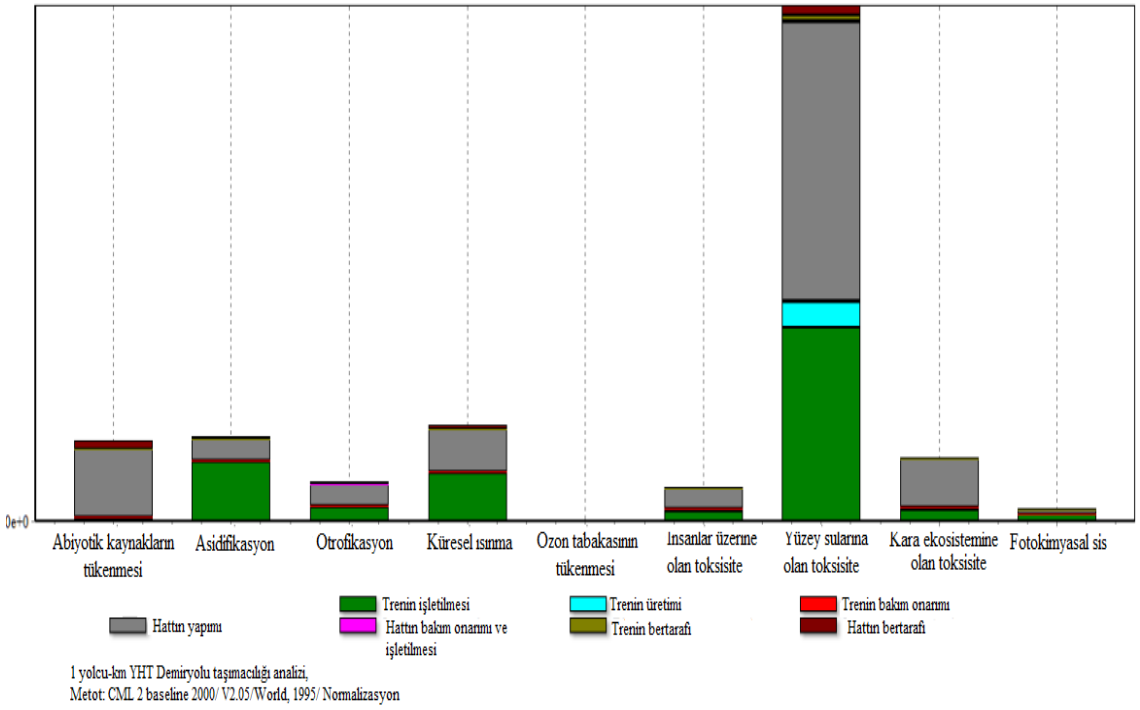
Ötrofikasyon etkisine, ray hattının yapım proseslerinde kullanılan elektriğin üretiminin neden olduğu düşünülmektedir.

- **Küresel ısınma potansiyeli (GWP),** 3.4E-02 kg CO_2 eşdeğeri olarak verilmiştir. Bu etkiye, demiryolu hattının yapımında kullanılan malzemelerin (çimento ve ray) üretimi ile hattın işletilmesi için gerekli olan enerjinin yüksek oranda fosil yakıtlardan elde edilmesi neden olmaktadır.
- **Ozon tabakasının tükenmesi (ODP),** 1.0E-09 kg CFC-11 eşdeğeridir. Ozon tabakasının tükenmesine, hattın yapımı için kullanılan malzemelerin üretimi ve yük vagonunun bakım onarım prosesinde açığa çıkan bor triflorür (Halon 1301) ve bor triklorür (Halon 1211) gazlarının neden olduğu düşünülmektedir.
- **Toksisite;** 1,4 DB eşdeğeri olarak ifade edilmektedir. CML 2 baseline 2000 metodunda toksisite 3 farklı etki kategorisinde incelenmektedir. Konvansiyonel demiryolu yük taşımacılığında toksik etkiye demiryolu işletme bileşenlerinin (vagon araçlarının üretimi ve lokomotiflerin işletilmesi), altyapı bileşenlerine (hattın yapımı) göre daha yüksek toksisiteye neden olduğu görülmüştür.
    - **İnsanlar üzerine olan toksik etki potansiyeli (HTP),** 1.9E-02 kg DB eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Bu etkiye, yük vagonlarının üretimi sırasında kullanılan çelik, alüminyum gibi malzemelerin elektrik enerjisinin üretimi sırasında açığa çıkan PAH, krom (VI) ve selenyum kirleticilerinin neden olduğu düşünülmektedir.
    - **Yüzey sularına olan toksik etki potansiyeli (FATEP),** 9.0E-03 kg DB eşdeğeridir. Programın arka planı incelendiğinde, yüzey sularına olan toksik etkiye, tren araçlarının işletilmesi ile birlikte, yük vagonlarının üretilmesi ve hattın yapım proseslerinde kullanılan malzemelerin ve elektrik enerjisinin üretiminin neden olduğu görülmüştür. Bu etkide, demiryolu tren araçlarına ait malzemelerin ve elektrik enerjisinin üretim proseslerinde açığa çıkan nikel, vanadyum kobalt ve berilyum kirletici emisyonlarının etkisi olduğu belirlenmiştir.

- **Kara ekosistemine olan toksik etki potansiyeli (TEP),** 1.4E-04 kg DB eşdeğeri hesaplanmıştır. Bu etkiye demiryolu hattının yapım, yük vagonunun üretimi ve bakım onarımı proseslerinde kullanılan malzemelerin ve elektrik enerjisinin üretiminden kaynaklanan civa ve krom (VI) emisyonlarının neden olduğu tahmin edilmektedir.

- **Fotokimyasal sis potansiyeli (POP),** 1.1E-05 kg C_2H_6 eşdeğeridir. Konvansiyonel demiryolunda yük taşımacılığında bu etkiye, tren araçlarının işletilmesinde kullanılan elektrik üretiminin neden olduğu düşünülmektedir.

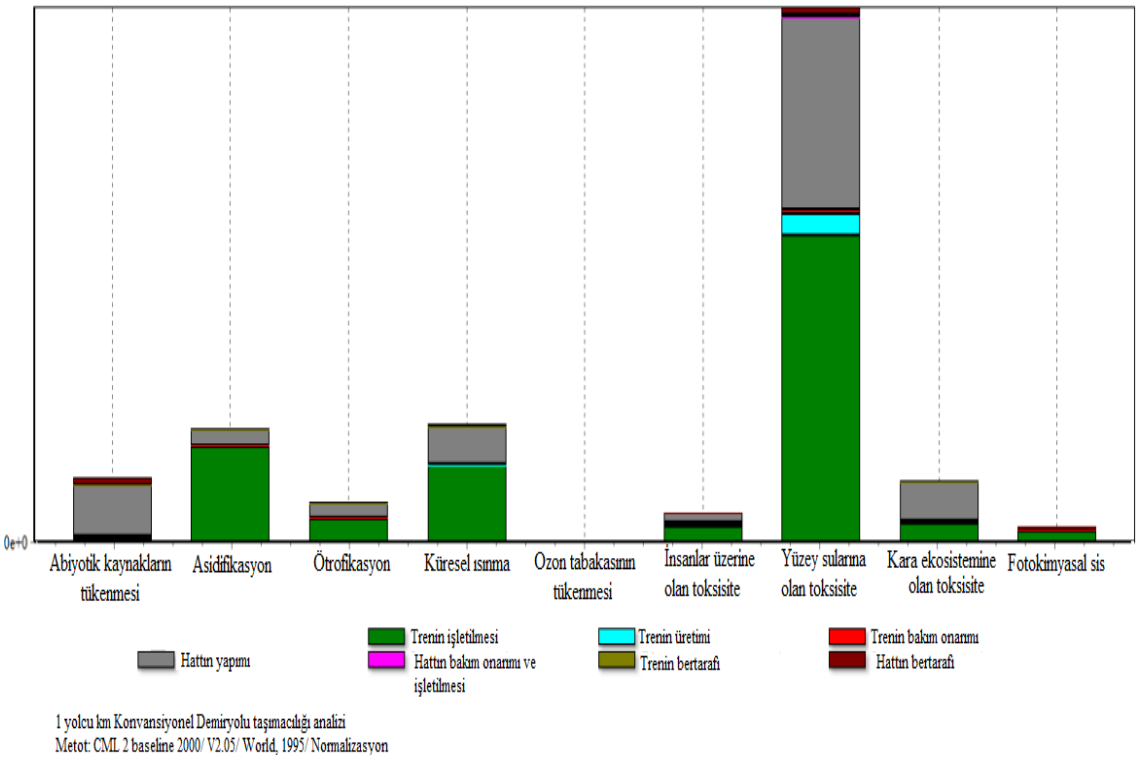
Demiryolu ulaşımının normalizasyon sonuçları Şekil 6.4, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6 göre çizilmiştir. Şekil 6.4'de verilmiştir. YHT demiryolu "1 yolcu-km" taşımacılığına ait normalizasyon sonuçlarına bakıldığında, yüzey sularına olan toksik oldukça yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 6.4). Bu etkiye, tren araçlarının işletilmesinden daha fazla bir etki geldiği, abiyotik kaynakların tükenmesi ve kara ekosistemine olan toksik etki kategorilerine ait etkilerin ise hat yapım prosesinden kaynakladığı görülmektedir.



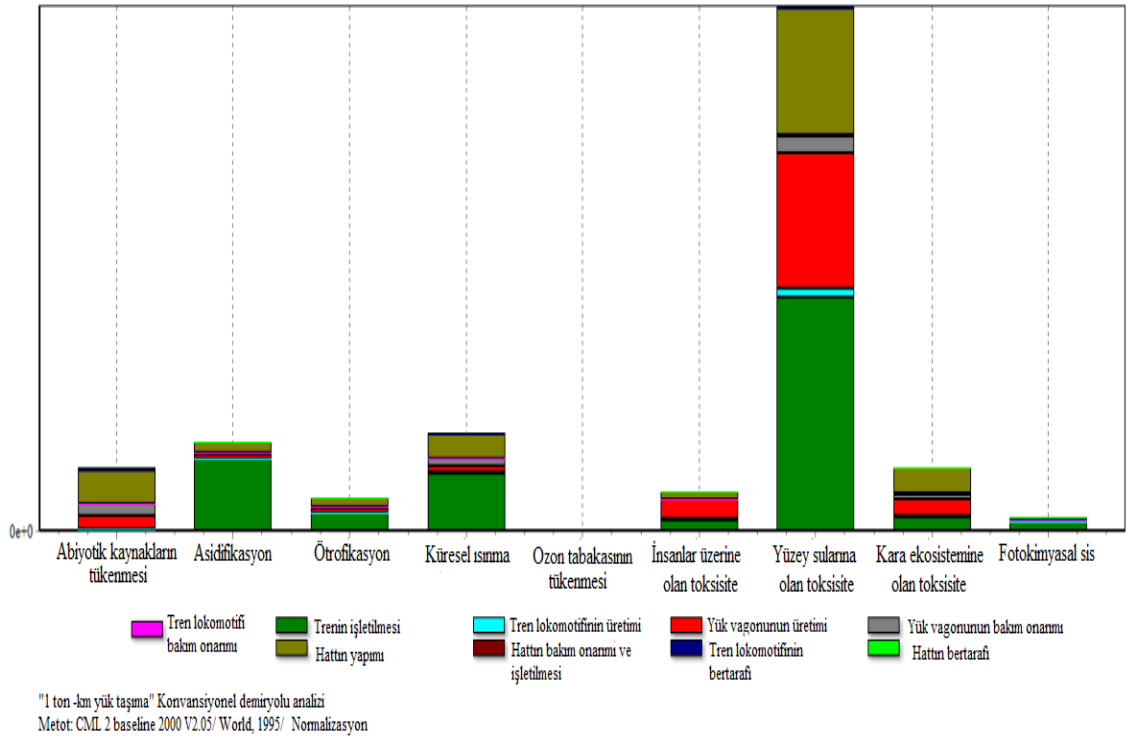
Şekil 6.4. YHT demiryolu taşımacılığı normalizasyon sonuçları

KD “1 yolcu km” taşımacılığına ait normalizasyon sonuçlarına bakıldığında, konvansiyonel demiryolu yolcu taşımacılığının; yüzey sularına olan toksik etki, küresel ısınma, asidifikasyon ve kara ekosistemine olan toksik etkisinin diğer etki kategorilerine göre daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir (Şekil 6.5).

Şekil 6.6’daki KT “1 ton-km” yük taşımacılığının, normalizasyon grafiği incelendiğinde, yüzey sularına olan toksik etki kategorisinin en yüksek etkiye sahip olduğu görülmektedir. Bu etkiye trenin işletilmesi ve hattın yapım proseslerinin neden olduğu görülmektedir. Diğer yüksek etki kategorilerinden, asidifikasyon ve küresel ısınmaya da trenin işletilmesi prosesinin neden olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.5. KD yolcu taşımacılığı normalizasyon sonuçları



Şekil 6.6. Yük taşımacılığı normalizasyon sonuçları

6.2. Demiryolu Ulaşımının LCC Sonuçları ve Değerlendirme

Demiryolu ulaşımında yolcu ve yük taşımacılığı yapılan YHT ve KD hatlarında, **içsel maliyetler;** altyapı (hatların yapımı, bakım onarımı, işletilmesi ve elden çıkartılması) maliyetleri ve işletme (tren araçlarının üretimi, bakım onarımı ve tren araçlarının elden çıkartılması) maliyetleri, **dışsal maliyetler;** çevresel (küresel ısınma, asidifikasyon, toksisite, ozon tabakasının tükenmesi v.b. etki kategorilerinin) maliyetler ve diğer dışsal (gürültü, kaza) maliyetler olmak üzere ele alınmış ve yaşam döngüsü maliyet değerlendirmesi buna göre yapılmıştır.

Yaşam döngüsü maliyet değerlendirmesinde, yaşam döngüsü maliyet envanteri, oluşturulan maliyet modelindeki maliyet kategorilerine göre analiz edilerek, maliyet değerleri hesaplanmıştır. LCC analizi maliyet modeline göre yapıldıktan sonra, "karakterizasyon (characterization)", "maliyet değerlendirmesi (damage assessment)" ve "ağırlıklandırma (weighting)" yapılmaktadır. LCC

çalışmalarında, maliyet kategorilerinin karakterizasyon değerleri, çalışmada kullanılan fonksiyonel birim başına oluşan maliyet değerini ifade etmektedir.

Bu çalışmada, demiryolu ulaşımının yaşam döngüsü maliyet analizi, demiryolu ulaşımı ile ilgili EK-3' de oluşturulan yaşam döngüsü maliyet envanterinin, SimaPro 7.3.3 yazılımının içerisinde, yeni oluşturulan LCC modelindeki maliyet kategorilerine göre hesaplanmıştır. YHT ve KD yolcu taşımacılığının, yaşam döngüsü maliyet değerlendirmesinin karakterizasyon sonuçları Çizelge 6.4 ve Çizelge 6.5' de verilmiştir.

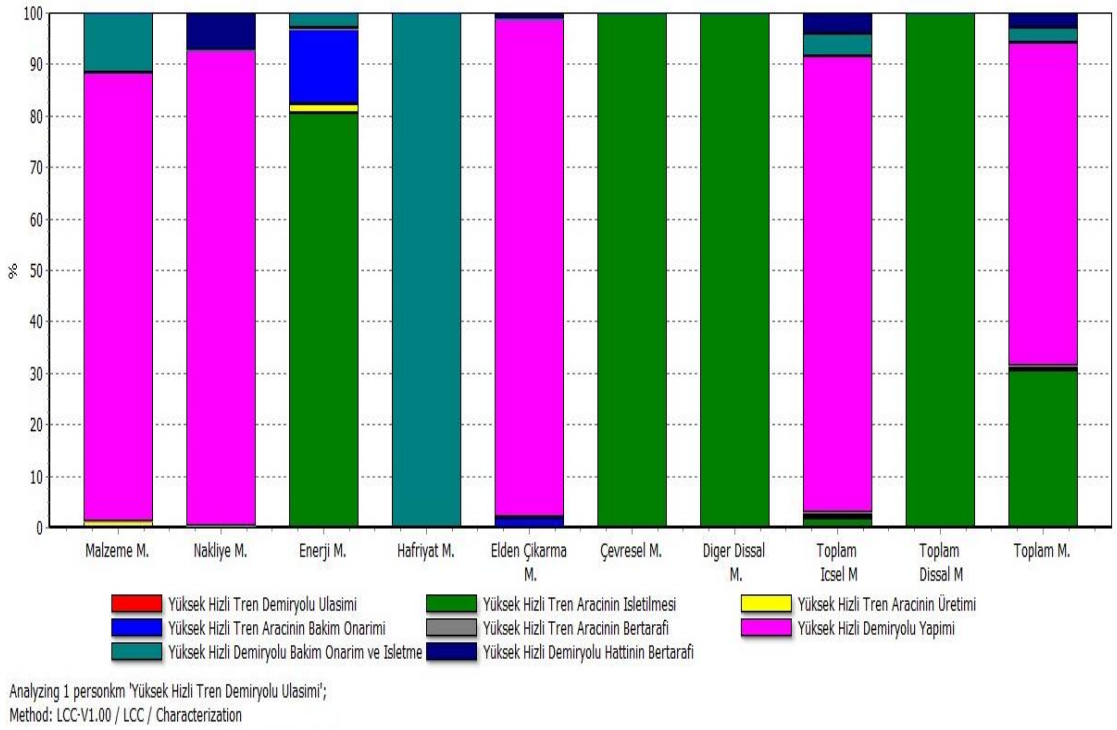
YHT ve KD bileşenlerinin maliyet kategorilerine olan etkileri, karakterizasyon grafiklerinde Şekil 6.7, Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'da verilmiştir. Bu grafiklerde, her iki demiryolu ulaşımı bileşeninin maliyet kategorilerine olan kümülatif etkisi toplanarak % olarak gösterilmektedir.

Çizelge 6.4. YHT demiryolu yaşam döngüsü maliyeti karakterizasyon sonuçları

Maliyet Kategorileri		**Birim**	**İşletme bileşenleri**				**Altyapı bileşenleri**		
		€/yolcu-km	YHT işletme	YHT üretim	YHT bakım-onarım	YHT bertaraf	YHD yapım	YHD bakım-onarım	YHD bertaraf
İçsel Maliyet	Mal. M.	0.00869	-	1.0E-04	9.1E-06	-	7.6E-03	1.0E-03	-
	Nakliye M.	0.01467	-	4.1E-05	8.4E-06	1.0E-06	1.4E-02	7.8E-08	1.1E-03
	Enerji M.	0.00059	4.8E-04	1.2E-05	8.5E-05	-	2.8E-06	1.7E-05	-
	Hafriyat M.	0.00008	-	-	-	-	-	7.6E-05	-
	Elden Ç. M.	0.00244	-	-	4.2E-05	4.4E-06	2.4E-03	-	3.1E-05
Dışsal Maliyet	Çevresel M.	0.00981	9.8E-03	3.0E-13	9.8E-15	7.5E-15	4.9E-10	9.7E-13	2.1E-11
	D. Dışsal M	0.00118	1.2E-03	-	-	-	-	-	-
Toplam Maliyet		**0.038**	1.1E-02	1.6E-04	1.4E-04	5.4E-06	2.3E-02	1.1E-03	1.1E-03

Çizelge 6.4'te görüldüğü gibi," YHT demiryolu hattında % 75 doluluk oranı ile "1 yolcu- km'nin taşınmasının maliyeti 0.038 €'dur. YHT demiryolu hattında oluşan toplam maliyetin % 71'ini içsel maliyetler, %29'unu da dışsal maliyetler oluşturmaktadır. İçsel maliyet bileşenleri incelendiğinde, nakliye ve malzeme maliyetlerinin diğer maliyet kategorilerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. YHT demiryolu hattı toplam maliyetinin %69'unu, demiryolu

altyapı bileşenleri (hattın yapım prosesi), %31'ini demiryolu işletme (yüksek hızlı tren aracının işletilmesi) bileşenleri oluşturmaktadır. (Şekil 6.7).

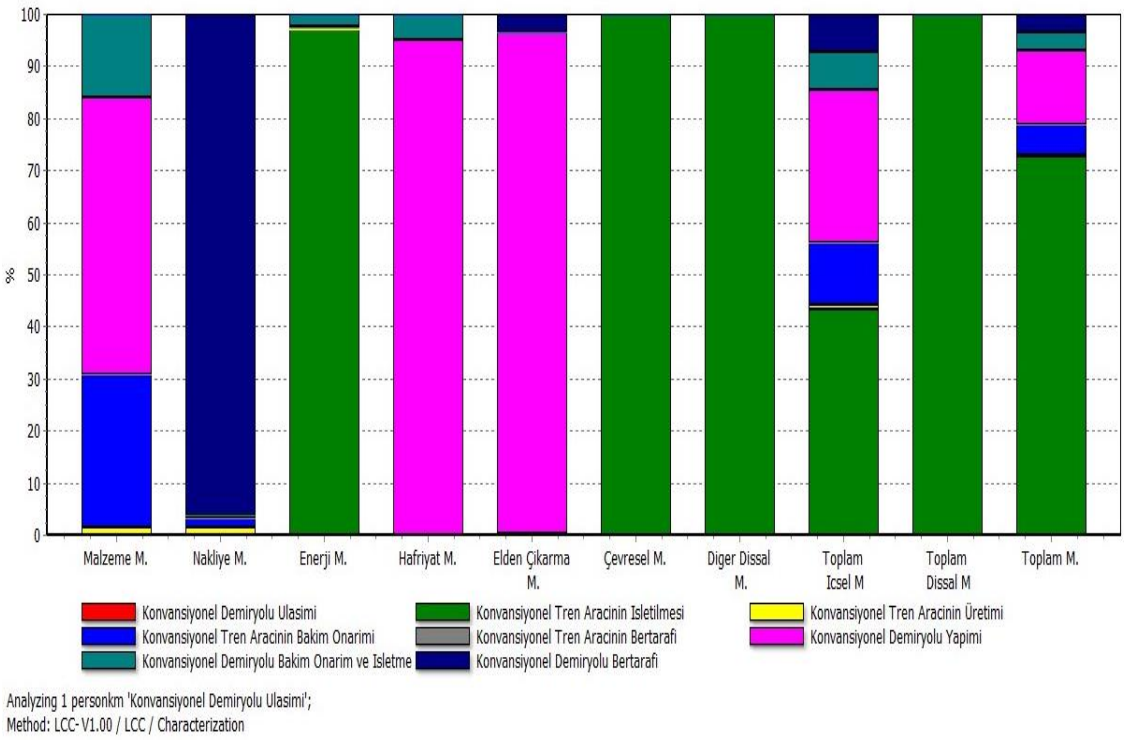


Şekil 6.7. YHT demiryolu bileşenlerinin maliyet kategorilerine etkisi

Konvansiyonel demiryolu hattında %70 doluluk oranı ile "1 yolcu- km'nin taşınmasının maliyeti 0.0342 € olarak hesaplanmıştır (Çizelge 6.5). Konvansiyonel demiryolu maliyet bileşenleri incelendiğinde, toplam maliyetlerin %48'i içsel maliyetler, %52'si dışsal maliyetlerdir. İçsel maliyet kategorileri olarak enerji ve malzeme maliyetlerinin diğer maliyet kategorilerine göre yüksek oranda olduğu görülmektedir. Bu duruma, tren araçlarının işletme prosesinin katkısının daha yüksek olması neden olmaktadır (Şekil 6.8). Konvansiyonel Demiryolu ulaşımına ait toplam maliyetinin % 21'i hattın altyapı bileşenlerinden, % 72'si ise işletme bileşenlerinden oluşmaktadır.

Çizelge 6.5. KD yaşam döngüsü maliyeti karakterizasyon sonuçları

Maliyet Kategorileri		Birim	İşletme bileşenleri				Altyapı bileşenleri		
		€/ yolcu-km	KT işletme	KT üretim	KT bakım-onarım	KT bertaraf	KD yapım	KD bakım-onarım	KD bertaraf
İçsel Maliyetler	Mal. M.	0.0065	-	9.0E-05	1.9E-03	-	3.5E-03	1.0E-03	-
	Nakliye M.	0.0012	-	1.7E-05	2.2E-05	-	5.6E-06	8.5E-08	-
	Enerji M.	0.0074	7.2E-03	7.3E-06	2.3E-05	-	2.3E-05	1.7E-04	-
	Hafriyat M.	0.0004	-	-	-	-	3.4E-04	1.8E-05	-
	Elden Ç. M.	0.0010	-	-	1.3E-06	2.6E-06	9.7E-04	-	3.4E-05
Dışsal Maliyetler	Çevresel M.	0.0146	1.5E-02	5.8E-13	5.4E-14	1.5E-14	2.8E-10	4.2E-14	1.7E-11
	D.Dışsal M.	0.0031	3.1E-03	-	-	-	-	-	-
Toplam Maliyet		**0.0342**	2.5E-02	1.1E-04	2.0E-03	3.3E-06	4.8E-03	1.2E-03	1.2E-03



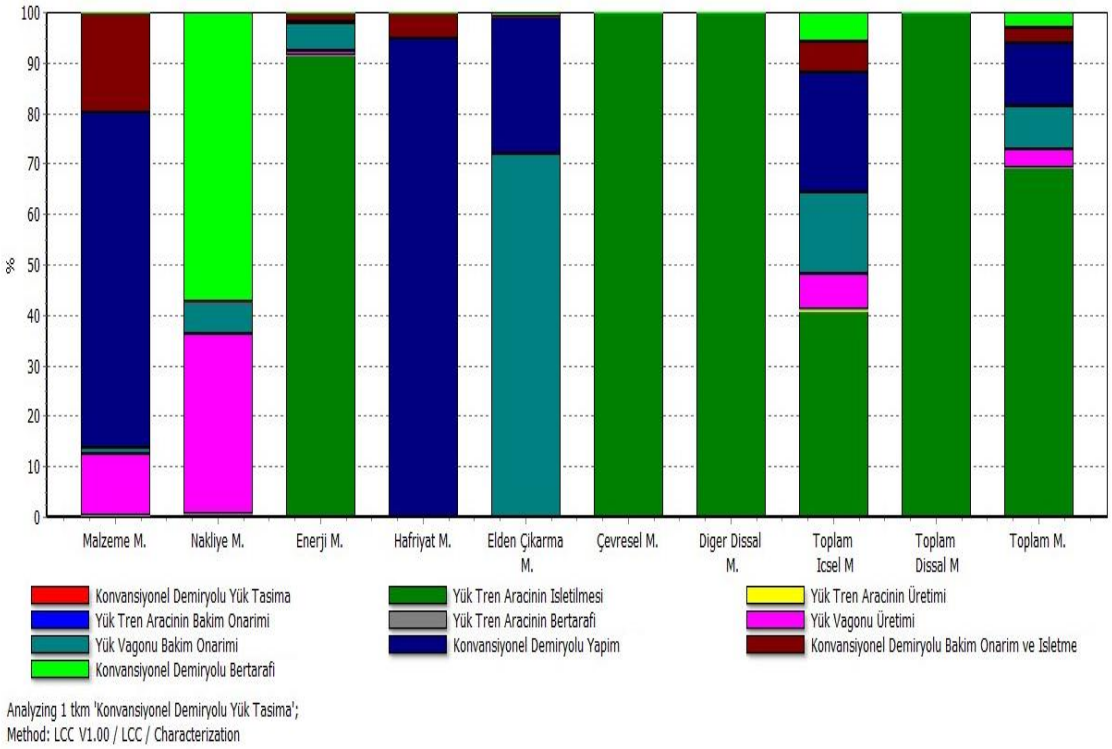
Şekil 6.8. Konvansiyonel demiryolu bileşenlerinin maliyet kategorilerine etkisi

"1 ton-km" yük taşımacılığının yaşam döngüsü maliyet analizinin karakterizasyon sonuçları Çizelge 6.6'da, demiryolu bileşenlerinin maliyet

kategorilerine etkisi ise Şekil 6.9'da verilmiştir. Bu sonuçlara göre, konvansiyonel demiryolu hattında %80 doluluk oranı ile "1 ton-km" yük taşımacılığının yaşam döngüsü maliyeti 0.0412 € olarak hesaplanmıştır. Yük taşıma maliyet bileşenleri incelendiğinde, içsel maliyetlerin %52, dışsal maliyetlerin ise %48 oranında etkiledikleri belirlenmiştir. İçsel maliyet bileşenleri altında incelenen enerji ve malzeme maliyetleri ile dışsal maliyet bileşeni olan kirletici maliyetlerinin toplam maliyete katkılarının diğer maliyet kategorilerine göre daha yüksek oldukları hesaplanmıştır. Bu durumun ortaya çıkmasında, lokomotiflerin işletilmesi, konvansiyonel demiryolu hattının yapımı ve yük vagonunun bakım onarım proseslerinin etkili olduğu düşünülmektedir. KD yük taşımacılığındaki toplam maliyetin % 19'u hattın altyapı bileşenlerinden, % 81'i ise işletme bileşenlerinden oluşmaktadır.

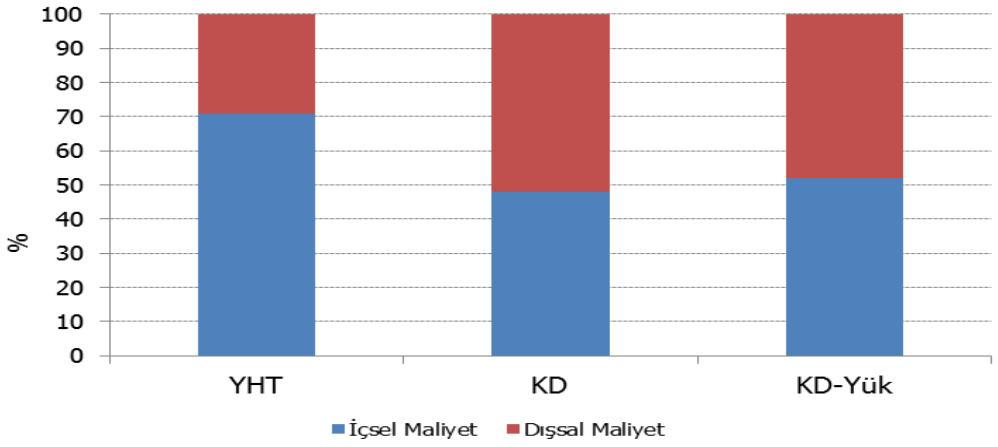
Çizelge 6.6 Yük taşımacılığı yaşam döngüsü maliyeti karakterizasyon sonuçları

Maliyet Kategorileri	**Birim**	**İşletme bileşenleri**						**Altyapı bileşenleri**		
	€/ ton-km	Loko. işletme	Loko. üretimi	Loko. bakım-onarımı	Loko. bertarafı	Yük vagonu üretimi	Yük vagonu bakım-onarımı	KD hattı yapımı	KD hattı bakım-onarımı	KD hattı bertarafı
Malzeme Maliyetleri	0.0056	-	1.6E-05	4.1E-06	-	6.7E-04	8.0E-05	3.7E-03	1.1E-03	-
Nakliye Maliyetleri	0.0022	-	7.5E-06	3.6E-06	7.9E-08	7.7E-04	1.3E-04	6.0E-06	9.0E-08	1.2E-03
Enerji Maliyetleri	0.0096	8.8E-03	7.3E-06	1.9E-06	0	8.8E-05	5.3E-04	2.4E-05	1.7E-04	-
Hafriyat Maliyetleri	0.0004	-	-	-	-	-	-	3.6E-04	1.9E-05	-
Elden Ç. Maliyetleri	0.0038	-	-	1.9E-07	3.4E-07	-	2.7E-03	1.0E-03	-	3.6E-05
Kirletici Maliyetleri	0.0174	1.7E-02	2.7E-13	1.6E-14	3.9E-15	1.0E-09	1.1E-10	3.1E-10	7.8E-14	1.7E-11
Diğer Dışsal M.	0.0023	2.3E-03	-	-	-	-	-	-	-	-
Toplam Maliyet	**0.0412**	2.9E-02	3.0E-05	9.7E-06	4.1E-07	1.5E-03	3.5E-03	5.1E-03	1.3E-03	1.3E-03



Şekil 6.9. Konvansiyonel demiryolu bileşenlerinin maliyet kategorilerine etkisi

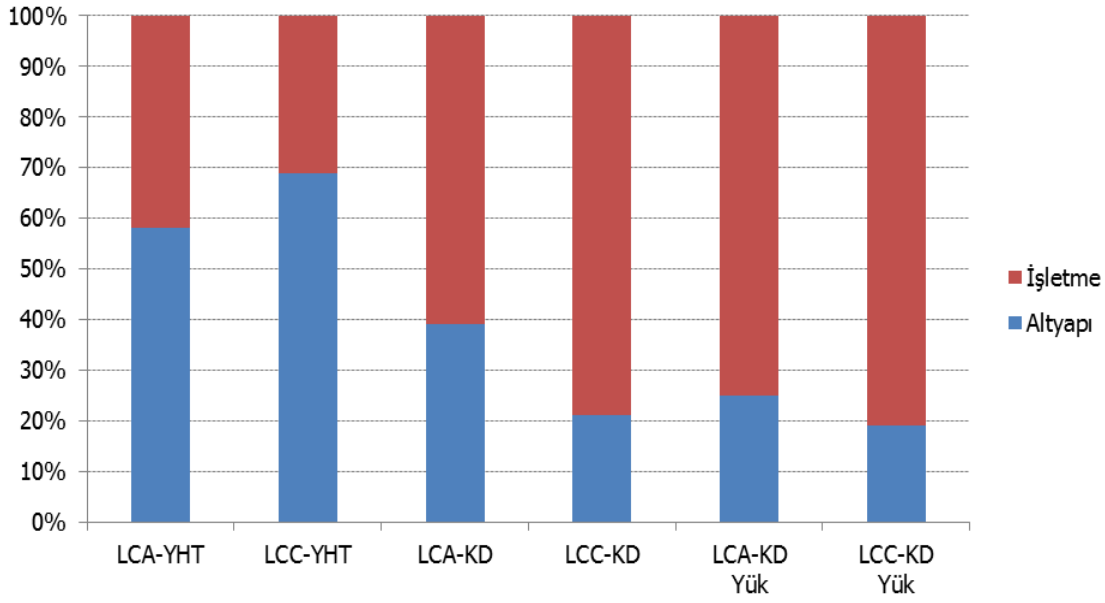
Şekil 6.10'da demiryolu ulaşımının içsel ve dışsal maliyetlerinin karşılaştırma grafiği verilmiştir. Bu grafiğe göre, demiryolu ulaşımında 1 yolcu-km taşımacılığından kaynaklanan dışsal maliyetler, toplam maliyetin yaklaşık %30'u ile %50'sini oluşturmaktadır.



Şekil 6.10. Demiryolu ulaşımı içsel ve dışsal maliyetlerinin karşılaştırması

6.3. LCA ve LCC Analizinin Birlikte Değerlendirilmesi

Bu tez çalışmasında yapılan LCA ve LCC analizlerini birlikte değerlendirmek amacıyla, her iki analizin sonuçları Şekil 6.11'de gösterilmiş ve aşağıda toplu olarak irdelenmiştir.



Şekil 6.11. Demiryolu ulaşımı altyapı ve işletme bileşenlerinin karşılaştırılması

YHT'nin çevresel etkilerinin %58'i, maliyetin de %69'u altyapıdan kaynaklanmaktadır. Yapılan LCC analizi sonucunda belirlenmiş olan dışsal maliyetlerin yaklaşık %99'unun işletmeden kaynaklanması, YHT yatırımlarında altyapıdan kaynaklanan çevresel etkilerin ve işletme sırasında ortaya çıkabilecek dışsal (çevresel) maliyetlerinde önemli olduğunu göstermektedir. O nedenle planlama ve yatırım politikalarında söz konusu faktörler mutlaka dikkate alınmalıdır.

KD'nin çevresel etkilerinin %61'i, maliyetin de %79'u işletmeden kaynaklanmaktadır. Yine yapılan LCC analizi sonucunda belirlenmiş olan dışsal maliyetlerin yaklaşık %99'unun işletmeden kaynaklanması, KT yatırımlarında işletme bileşenlerinin hem çevresel hem de maliyet açısından iyileştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

KD-yük taşımacılığının çevresel etkilerinin %75'i, maliyetin de %81'i işletmeden kaynaklanmaktadır. LCC analizi sonucunda dışsal maliyetlerin de yaklaşık %99'unun işletme bileşenlerinden oluşması, KD-yük taşımacılığı yatırımlarında da, yolcu taşımacılığında olduğu gibi işletme bileşenlerinin hem çevresel hem de maliyet açısından dikkat edilmesi gereken bir husus olduğunu göstermektedir.

7. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Ülkemizin iklim değişikliği ile ilgili politika ve stratejilerinin belirlenmesinde, demiryolu taşımacılığının artırılmasının öncelikli hedefleri arasında yer aldığı bilinmektedir. Bu tez çalışmasında, ülkemizde bugüne değin hiç yapılmamış bir çalışma olarak, demiryolları bütünsel bir bakış açısıyla incelenmiş ve yine aynı bakış açısıyla ekonomik bir değerlendirme de yapılmıştır. Gelişmiş ülkelerin son yıllarda küresel iklim değişikliği nedeniyle, ulaşım stratejilerini belirlerken, çevreye daha az zararlı olan demiryolu ulaşımının payını arttırmaya yönelik politikalar üretmekte ve bu konuda önemli adımlar atmaktadırlar.

Ülkemizde de son yıllarda demiryolu ulaşım sektöründe önemli gelişmeler sağlanmış, demiryolu ulaşımı yeniden "Devlet Politikası" haline gelmiştir. Ulaştırma Bakanlığı tarafından yayımlanan Türkiye Ulaşım ve İletişim Stratejisi Hedef 2023 Raporu'nda, demiryolu ulaşımında mevcut 12.000 km demiryolu hattına ilaveten 10.000 km'si yüksek hızlı tren ve 5.000 km'si konvansiyonel tren olmak üzere yeni hatların yapılması hedeflenmiştir. Bu bağlamda, uluslararası demiryolu istatistiklerine de bakıldığında, 100.000 nüfusa düşen demiryolu miktarının ülkemizde 13 km iken, Finlandiya'da 111 km, İsveç'te 169 km, ABD'de 121 km, Avrupa Birliği ülkelerinde ise ortalama 45 km olduğu görülmektedir (TCDD, 2013). Aynı şekilde yolcu-km olarak ülkemizdeki demiryolu payı %2,3, otomobil oranı %52,5, otobüs oranı ise %45,2 iken, Avusturya'da bu oranlar sırasıyla %11,1, %78,2 ve %10,6 olarak dikkat çekmektedir. Dolayısıyla, 2023 yılı için belirlenen politikalarda, söz konusu oranların artırılması, ülkemizin İklim Değişikliği Ulusal Eylem Planı açısından da doğru bir strateji olacaktır. Yük taşımacılığı açısından bakıldığında ise Ülkemizdeki demiryolu oranı %4,7, karayolu %78,9, petrol boru hattı %16,4 iken Avusturya'da bu oranlar %45,9, %32,3 ve %16,2 şeklindedir.

Bunun yanısıra, gelişmiş ülkelerde özellikle ulaşımla ilgili stratejilerin geliştirilmesinde LCA sıklıkla başvurulan bir yöntem olduğu görülmektedir. Nitekim bu tezde de ülkemizdeki karar vericilere, başta Ulaştırma Bakanlığı ve TCDD yetkilileri olmak üzere ilgili kurum ve kuruluşlara önemli açılımlar

sağlaması açısından sadece LCA değil LCC yöntemi de kullanılmış ve her iki yöntemin bulguları birlikte değerlendirilerek özgün bir çalışma ortaya konulmuştur. Çünkü diğer ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de ulaşımla ilgili politika ve stratejilerin çevresel, ekonomik ve sosyal açıdan bütünsel bir bakış açısı ile belirlenmesi gerektiğinin farkına varılmalıdır.

Tezde yapılan demiryolu ulaşımının yaşam döngüsü maliyet analizine göre, YHT'nin %75 doluluk oranı ile "1 yolcu- km" taşımasının maliyeti 0,038 € olarak hesaplanmıştır. Konvansiyonel demiryolunda %70 doluluk oranı ile "1 yolcu–km" taşıma maliyeti 0,0342 € olarak hesaplanmıştır. TCDD (2013) tarafından yapılan çalışmada ise YHT'nin "1 yolcu-km" taşıma maliyeti 0,047 € (0,12 TL), KD'nin 0,087 € (0,22 TL), Kabasakal ve Solak (2010) tarafından yapılan çalışmada da, YHT için 0,013 € (0,037 TL), KD 0,020€ (0,05 TL) değerleri bulunmuştur.

Yük taşımacılığı ile ilgili olarak yapılan analiz sonucunda da konvansiyonel demiryolu hattında %80 doluluk oranı ile "1 ton-km" yük taşımanın yaşam döngüsü maliyeti 0,0412 € olarak hesaplanmış, bu değer TCDD (2013) çalışmasında ise, 0,07 € (0,18 TL) Kabasakal ve Solak (2010) tarafından yapılan çalışmada ise 0,013 € (0,03TL) bulunmuştur.

Bulunan bu değerler nispeten birbirine yakın olmakla beraber, aradaki farklılığa; trenlerin doluluk oranları, sefer sayıları, kapasiteleri ve personel giderleri ile amortisman değerinin dikkate alınıp alınmaması gibi faktörlerin neden olduğu düşünülmektedir.

Her iki taşımacılık (yolcu ve yük) türü için de, ülkemizdeki karar vericilerin, demiryolları ile yapılan yolcu taşımacılığındaki %2,3 değeri ile yük taşımacılığındaki %4,7 oranını artırmak için çaba sarf etmeleri gerektiği açıktır. Nitekim yapılan bu çalışmadan da görüleceği üzere,

- Türkiye'de YHT demiryolu hattının çevresel etkilerinin %58'i altyapı, %42'si işletme bileşenlerinden
- Konvansiyonel demiryolunun, altyapı bileşeni %39, işletme bileşeni %61 seviyesinde çevresel etkiye neden olmakta ve
- Konvansiyonel demiryolunda yük taşınmasından oluşan çevresel etkilerin de % 25'i altyapıdan, %75'i işletmeden kaynaklanmaktadır.

Sonuç olarak, demiryolu ulaşımı ile ilgili stratejilerin belirlenmesinde çevresel etkiler ve dışsal maliyetler mutlaka göz önüne alınmalı ve sürdürülebilir bir ulaşım stratejisi için tezde belirlenen çevresel etkiler ile maliyetleri en aza indirecek önlemler alınmalıdır.

KAYNAKLAR

AECOM. (2011), *High Speed Rail Study - Phase 1.* Department of Infrastructure and Transport, Avustralya.

Andrade, A.R. (2008), *Renewal decisions from a Life-cycle Cost (LCC) Perspective in Railway Infrastructure: An integrative approach using separate LCC models for rail and ballast components,* Yüksek Lisans Tezi, Technology of Lisbon Üniversitesi, Lisbon, Portekiz.

Asiedu, Y. ve Gu, P. (1998), "Product life cycle cost analysis: State of the art review", *International Journal of Production Research* **36**, 883-908.

Atkins. (2011), *Jernbaneverket Norwegian High Speed Railway Assessment Project Contract - Financial & Economic Analysis Subject - Estimation and Assessment of Investment Costs Final Report.* Jernbaneverket, No: 6.2, Londra, İngiltere.

Balpetek, F.G., Alay, E. ve Özdoğan, E. (2012), "Sürdürülebilir Kalkınma İçin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ve Tekstil Sanayi", *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi* **6**, 37-49.

Banar, M., Özdemir, A., Çokaygil, Z. ve Özkan, A. (2013), "Life Cycle Assessment Based Comparison of Electricity Power Generation Alternatives in Turkey", *3rd International Exergy, Life Cycle Assessment, and Sustainability Workshop & Symposium (ELCAS3)*, Nisros, Yunanistan, 1069-1081.

Baron, T., Martinetti, G. ve Pépion, D. (2011), *High Speed Rail and Sustainability.* Background Report: Methodology and results of carbon footprint analysis, International Union of Railways (UIC), Paris.

Baumann, H. ve Tillman, A.M. (2004), *The Hitch Hiker's Guide to LCA- An orientation in life cycle assessment methodology and application*, Studentliterattur, Lund, İsveç.

Bishop, L.P. (2000), *Pollution Prevention*, Waveland Press, A.B.D.

Campos, J. ve de Rus, G. (2009), "Some stylized facts about high-speed rail: A review of HSR experiences around the world", *Transport Policy* **16**, 19-28.

CAPRI. (2001), *Concerted action on transport pricing research integration.* . Leeds Üniversitesi, No: Nihai Rapor, Leeds, İngiltere.

CE Delft, Infras ve ISI, F. (2011), *External Costs of Transport in Europe Update Study for 2008.* Delft, No: Nihai,

Chang, B. ve Kendall, A. (2011), "Life cycle greenhouse gas assessment of infrastructure construction for California's high-speed rail system", *Transportation Research Part D* **16**, 429-434.

Chester, M. ve Horvath, A. (2010), "Life-cycle assessment of high-speed rail: the case of California", *Environmental Research Letters* **5**, 014003.

Ciroth, A. ve Franze, J. (2009), *Life Cycle Costing in SimaPro.* GreenDeltaTC Berlin, No: Hollanda.

Çokaygil, Z. (2005), *Atık Yönetim Planlamasında Yaşam Döngüsü Analizi,* Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Çokaygil, Z. ve Banar, M. (2005), "Yaşam Döngüsü Analizi ve Standartlar Açısından Bir Değerlendirme", *VI. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi*, İstanbul.

EEA. (1997), *Life Cycle Assessment (LCA) A guide to approaches, experiences and information sources.* Environmental Issues Series, No: 6, United Kingdom.

EEA. (2011), *Revealing the costs of air pollution from industrial facilities in Europe.* No: 15/1, Kopenhag, Danimarka.

Ekim, O. (2007), *Yüksek Hızlı Demiryolları İçin Geometrik Özellikler ve Altyapı* Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.

Esveld, C. (1999). Recent Developments in Slab Track Application. Delft University of Technology, , Faculty of Civil Engineering, Section of Roads & Railways.

EUAS. (2013), *2012 Yılı Elektrik Üretim Sektör Raporu.* ETKB, No: 1, Ankara.

Facanha, C. ve Horvath, A. (2007), "Evaluation of Life Cycle Air Emission Factor of Freight Transportation", *Environ.Sci.Technol* **41**, 7138-7144.

Federici, M., Ulgiati, S. ve Basosi, R. (2008), "A thermodynamic, environmental and material flow analysis of the Italian highway and railway transport systems", *Energy* **33**, 760-775.

Genelkurmay Başkanlığı. (2004), *Degişen ve Gelişen Çağda Lojistik.* Genelkurmay Başkanlığı, No: 224, Ankara.

Grossrieder, C. (2011), *Life-Cycle assessment of Future Highspeed Rail in Norway,* Yüksek Lisans Tezi, Norwegian University of Science and Technology, Department of Energy and Process Engineering, Trondheim, Norveç.

Hauschild, M. ve Wenzel, H. (1997), *Environmental Assessment of Products: Scientific background*, Chapman&Hall, Londra, İngiltere.

HEATCO. (2006), *Economic values for key impacts valued in the Stated Preference surveys.* Sweco, Groner - Norveç.

Hoffart, C. ve Kamps, K. (2010), *Life Cycle Costing As a Strategy - Sustainable Operations of Signalling Systems in The Railway Infrastructure.* Institute of Economic and Social Studies, Aachen, Almanya.

http-1 (2012), http://www.cgcrail.com/index.php?sayfa=Ray-Profil-Tipleri

http-2 (2013), *Malzeme Yoğunlukları Tablosu* http://www.mustafaceylan.com/ceylanpdf/mal.pdf

http-3 (2013), *Yakıtların Isıl değerleri.* http://www.yasam.com.tr/liste_goster.asp?id=37

International Electrotechnical Commission (IEC). (2005), *IEC 60300-3-3 Dependability management – Part 3-3: Application guide – Life cycle costing.* No: 2. Baskı, Geneva, İsviçre.

Işın, Z. (2009), "Ömür Devri Maliyet Analizi Yaklaşımı ve Savunma Projelerine Uygulamaları", *SSM* **4**, 39-43.

İzban (2013), *İzban Sefer Sorgulama orgulama* http://www.izban.com.tr/Sayfalar/Sefer_Planlari.aspx.

Jonasson, K. (2003), *Environmental Aspects of the Use-Phase for Bearings in Trains,* Yüksek Lisans Tezi, Chalmers University of Technology, Department of Environmental System Analysis, Göteborg, İsveç.

Jun, H.K. ve Kim, J.H. (2007), "Life Cycle Cost Modeling for Railway Vehicle", *Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems*, Seul, Kore, 1989-1994.

Kabasakal, A. ve Solak, A.O. (2010), "Demiryolu ve Karayolları Ulaştırma Sistemlerinin Ekonomik Etkinlik Analizi", *Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi* **1**.

Kim, G.-T., Kim, K.-T., Lee, D.-H., Han, C.-H., Kim, H.-B. ve Jun, J.-T. (2010), "Development of a life cycle cost estimate system for structures of light rail transit infrastructure", *Automation in Construction* **19**, 308-325.

Kosugi, T., Tokimatsu, K., Kurosawa, A., Itsubo, N., Yagita, H. ve Sakagami, M. (2009), "Internalization of the external costs of global environmental damage in an integrated assessment model", *Energy Policy* **37**, 2664-2678.

Levinson, D., Mathieu, J.M., Gillen, D. ve Kanafani, A. (1997), "The full cost of high-speed rail: an engineering approach", *Ann Reg Sci* **31**, 189-215.

Lindberg, G. (2006), *Marginal cost case studies for road and rail transport D 3 GRACE.* ITS, No: 1, Leeds, İngiltere.

MEB. (2011a), *Raylı Sistem İşletmeciliği*, T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara.

MEB. (2011b), *Raylı Sistemler Teknolojisi Demiryolu İnşaatı*, T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara.

Nalçakan, M., Tutar, F. ve Tutar, E. (2012), "Ulaştırma Sektörünün Yarattığı Dışsal Maliyetlerin Ekonomik Etkileri", *Sosyal Bilimler Dergisi* **4**, 55-73.

Network Rail. (2010), *Comparing environmental impact of conventional and high speed rail.* Planning and Regulation, No: Nihai Rapor, London, England.

Norris, G.A. (2001), "Integrating Life Cycle Cost Analysis and LCA", *Int. J. LCA* **6**, 118-121.

Özeler, D. ve Demirer, G.N. (2001), "Önleyici Çevre Yönetiminde Ürün ve Proses Optimizasyonu için Yeni Bir Yöntem Hayat Boyu Değerlendirme (Life Cycle Assessment)", *Endüstri ve Otomasyon* **41**, 66-69.

Özkan, A. (2008), *Kentsel Katı Atık Yönetim Sistemlerinin Oluşturulmasında Farklı Karar Verme Tekniklerinin Kullanımı* Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Öztürk, Z. (2004), "Investigating Optimum Speed in High-Speed Railway: Istanbul-Ankara Corridor", *ARI* **54**, 78-89.

Patra, A.P., Söderholm, P. ve Kumar, U. (2009), "Uncertainty estimation in railway track life-cycle cost: a case study from Swedish National Rail Administration", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* **223**, 285-293.

Pérez-Martínez, P.J. ve Vassallo-Magro, J.M. (2013), "Changes in the external costs of freight surface transport In Spain", *Research in Transportation Economics* **42**, 61-76.

Quinet, E. (2004), "A meta-analysis of Western European external costs estimates", *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **9**, 465-476.

RECORDIT. (2001), *Real cost reduction of door-to-door intermodal transport. Deliverable 4: External cost calculation for selected corridors.* . University of Stuttgart., No: Stuttgart, Almanya.

Roy, P., Nei, D., Orikasa, T., Xu, Q., Okadome, H., Nakamura, N. ve Shiina, T. (2009), "A review of life cycle assessment (LCA) on some food products", *Journal of Food Engineering* **90**, 1-10.

Sahin, B., Yilmaz, H., Ust, Y., Guneri, A.F. ve Gulsun, B. (2009), "An approach for analysing transportation costs and a case study", *Eur J Oper Res* **193**, 1-11.

Siegenthaler, C.P., Braunschweig, A., Oeterli, G. ve Furter, S. (2005), *LCA Software Guide 2005 Market Overview-Software Potraits* No: Zürih, İsviçre.

Simoes, C.L., Costa Pinto, L.M. ve Bernardo, C.A. (2013), "Environmental and economic assessment of a road safety product made with virgin and recycled HDPE: a comparative study", *Journal of environmental management* **114**, 209-215.

Steen, B., Carlson, R., Lyrstedt, F. ve Skantze, F. (2009), *Sustainability management of businesses through eco-efficiency – an example.* Center for Environmental Assessment of Product and Material Systems (CPM), No: 2009:3, Goteborg, İsveç.

Stripple, H. ve Uppenberg, S. (2010), *Life cycle assessment of railways for application in environmental product declarations.* IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd., No: B1943, Goteborg, İsveç.

Swärd, K. (2006), *Environmental Performance of the Rail Transport System in a Life-Cycle Perspective - The Importance of Service Life and Reuse in Sweden,* Yüksek Lisans Tezi, Linköpings Üniversitesi, The Tema Institute Environmental Science, Norrköping, İsveç.

TCDD. (2012a), *T.C.Devlet Demiryolları 2007 - 2011 İstatistik Yıllığı.* Araştırma Planlama ve Koordinasyon Dairesi Başkanlığı İstatistik Şubesi, No: 1300-2503, Ankara.

TCDD. (2012b), *TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğünün 2011 Yılı Sektör Raporu.* UBAK, No:1, TCDD.

TCDD. (2013), *TCDD 2008-2012 İstatistik Yıllığı,* Araştırma Planlama ve Koordinasyon Dairesi Başkanlığı İstatistik Şubesi, No: 1300-2503, Ankara.

Thiebault, V. (2010), *Desing of Railway Bridges Considering LCA,* Yüksek Lisans Tezi, Royal Institute of Technology (KTH), Department of Civil and Architectural Engineering, Stockholm, İsveç.

UNITE. (2003), *Unification of accounts and marginal costs for transport efficiency.* Leeds Üniversitesi, No: Nihai Rapor, Leeds, İngiltere.

Vogtländer, J. (2009), *LCA-based assessment of sustainability The Eco-costs/Value Ratio: EVR*, Delft Academic Press, Hollanda.

Weinreich, S., Rennings, K., Schlomann, B., Geßner, C. ve Engel, T. (1998), *External Costs of Road, Rail and Air Transport - a Bottom-Up Approach.* ZEW Discussion Papers, No: 98-06, Mannheim, Almanya.

Woodward, D.G. (1997), "Life cycle costing - theory, information acquisition and application", *International Journal of Project Management* **15**, 335-344.

Zoeteman, A. (2001), "Life Cycle Cost Analysis for Managing Rail Infrastructure-Concept of a decision support system for railway design and maintenance", *EJTIR* **1**, 391 - 413.

EKLER

EK-1 Demiryolu İle İlgili Tanımlamalar *

Altyapı: Yeni yolun geçtiği yerlerde doğal arazideki kotu düşük kesimlerin doldurulması, kotu yüksek yerlerin de kazılarak açılması veya delinmesi şeklinde yol döşenmek amacıyla inşa edilen tesislerin tümüne "altyapı" denilmektedir.

Ray: Üzerinde demiryolu araçlarının hareket etmesini sağlayan ve tekerlekleri kılavuzlayan, ayrıca dingillerden gelen kuvvetleri traverslere aktaran, dökme çelikten yapılmış üstyapı malzemesine "ray" denilmektedir. Raylar mantar, gövde ve taban olmak üzere üç bölümden oluşur. Raylar profillerine göre; S 39, S 46, 49 E1, 60 E1 şeklinde isimlendirilir.

Travers: Raydan gelen kuvvetleri karşılayıp balast tabakasına aktaran, yolun açıklığını koruyan ve yolu yan etkilere karşı ekseninde tutan, raylara dik yönde belirli aralıklarla döşenmiş donanımlara "travers" adı verilir. Raylı sistemlerde kullanılan traversler: ahşap traversler ve demir traversler olarak ikiye ayrılmaktadır. *Ahşap traversler:* konvansiyonel hatlarda, konvansiyonel hatlardaki makaslarda ve çelik köprülerde kullanılmaktadır. *Demir traversler:* çelik malzeme ile yapılmış olan traverslerdir ve artık kullanılmamaktadır. *Beton traversler:* içinde çelik gergi çubukları bulunan ve betondan yapılan traverslerdir. Diğer traverslere göre ağırlıkları fazla olup, yüksek hıza ve dingil basıncına uygun olduğu için raylı sistemlerde kullanımı yaygındır. Çelik köprüler haricinde bütün hatlarda kullanılır.

Balast: Platformun üzerine döşenen, traverslerin aralarını dolduran ve traverse elastik bir yatak oluşturan, traversler tarafından iletilen tüm kuvvetleri platforma ileten 30-60 mm ebadında kırılmış, keskin köşeli ve keskin kenarlı sert ve sağlam taşlara denir.

Tünel: Demiryolu güzergâhının geçtiği doğal arazide, arazi kotunun yol kotundan çok fazla yüksekte kaldığı ve yarma oluşturma maliyetlerinin yüksek boyutlara ulaştığı bölümlerde, arazinin delinmesi suretiyle oluşturulan iki ucu açık geçitlere "tünel" denir.

Köprü: Akarsu, karayolu, demiryolu veya benzeri engelleri geçmek üzere inşa edilen, dolgu altında olmayan ve açıklığı 8 m ve daha büyük olan sanat yapılarına "köprü" denir. Köprüler yapılışlarında kullanılan malzemelere göre; çelik, kârgir (taş veya tuğla ile yapılan) köprü, betonarme köprü olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır.

Viyadük: Yüksek vadiler üzerine kurulan açıklığı çok köprülere denir.

Geçitler: Demiryolu ile yaya ve diğer ulaşım yollarının kesiştiği yerlerde, demiryolunun bir tarafından diğer tarafına geçmesini sağlayan tesislere "geçit" denir. Üç türlü geçit vardır. Bunlar; yayalar ve karayolu araçlarının demiryolunun altından geçmesi için yapılan geçide "alt geçit" denir. *Üst geçit:* yayalar ve karayolu araçlarının, demiryolunun üstünden geçmesi için yapılan geçide ise "üst geçit" denir.*:* Kara ve demiryolunun birbirlerini aynı seviyede kesip geçtikleri yerlere ise "hemzemin geçit" denir.

Hamton – km. Lokomotiflerin ağırlığı hariç, vagonların daraları da dahil olmak üzere bir tren tonunun bir kilometre mesafeye taşınmasıyla ifade edilen hizmet ölçü birimidir

*(MEB, 2011a)

EK-2 Yaşam Döngüsü Analizi Envanteri

Çizelge Ek-2. 1 Demiryolu altyapı bileşenlerine ait LCA envanteri (a-f)

- (a) 1 km demiryolu hattı yapımı

	YHD		KD	
Malzemeler/enerji	**Miktar**	**Birim**	**Miktar**	**Birim**
Çelik	60.000	kg	49.050	kg
Çimento	347,3	m^3	375	m^3
Balast	10.937	ton	2.948	ton
Kazı	4.050	m^3	2.310	m^3
Alüminyum	50	kg	50	kg
Bakır	463	kg	55	kg
Çinko	5	kg	5	kg
Seramik	1.600	kg	-	Kg
Dizel	50	MJ	9.500	MJ
Nakliye-karayolu	474.250	tkm	179.580	tkm
Emisyonlar	**Miktar**	**Birim**	**Miktar**	**Birim**
Havaya				
Atık ısı	-	MJ	14.364	MJ
Atık arıtımı	**Miktar**	**Birim**		
İnert malzeme-deponi	2.970	ton	1.109	ton

- (b) 1 km demiryolu hattı bakım onarım ve işletilmesi

	YHD		KD	
Doğal kaynaklar	**Miktar**	**Birim**	**Miktar**	**Birim**
Trafik alanlarının demiryolu hattına dönüştürülmesi	23.700	m^2y	21.900	m^2y
Demiryolu hattındaki diğer alanların kullanımı (dolgu v.b)	474	m^2	101,6	m^2
Malzemeler/enerji	**Miktar**	**Birim**	**Miktar**	**Birim**
Elektrik, orta voltaj	6.460	kWh	59.100	kWh
Glifosat	0,7	kg	0,7	kg
Motor yağı	7,53	kg	7,53	kg
Nakliye-demiryolu	823	kgkm	823	kgkm
Emisyonlar				
Havaya	**Miktar**	**Birim**	**Miktar**	**Birim**
Atık ısı	23.300	MJ	213.000	MJ
Toprağa				
Glifosat	0,7	kg	0,7	kg
Yağ	7,53	kg	7,53	Kg

- (c) 1 km demiryolu hattı atıklarının bertarafı

	YHD		KD	
Malzeme ve enerji	**Miktar**	**Birim**	**Miktar**	**Birim**
Nakliye-karayolu	37.000	tkm	37.000	tkm
Atık arıtımı	**Miktar**	**Birim**	**Miktar**	**Birim**
İnert malzeme-deponi	38.790	kg	38.790	kg

Çizelge Ek-2.2. Demiryolu işletme bileşenlerine ait LCA envanteri (a-h)

- (a) 1 adet tren aracı üretimi (Yolcu Taşımacılığı)

	YHT		KT	
Malzemeler/enerji	**Miktar**	**Birim**	**Miktar**	**Birim**
Çelik-güçlendirilmiş	234.000	kg	54.200	kg
Çelik-düşük alaşımlı	88.800	kg	0	Kg
Alüminyum	90.000	kg	160.000	kg
Bakır	34.400	kg	9.980	kg
HDPE	155.000	kg	77.000	kg
Temperlenmiş Cam	25.000	kg	9.510	kg
Düz cam	25.000	kg	9.510	kg
Alkit boya	12.600	kg	6.340	kg
Nakliye-karayolu	27.600	tkm	15.900	tkm
Nakliye-demiryolu	110.000	tkm	63.400	tkm
Elektrik enerjisi	611.000	kWh	240.000	kWh
Isı enerjisi- fuel oil	1.940.000	MJ	1.200.000	MJ
Doğalgaz	1.940.000	MJ	-	
Emisyonlar **Havaya**	**Miktar**	**Birim**	**Miktar**	**Birim**
Atık ısı	2.200.000	MJ	864.000	MJ

- (b) 1 adet tren aracı üretimi (Yük Taşımacılığı)

	Lokomotif		Vagon	
Malzemeler/enerji	**Miktar**	**Birim**	**Miktar**	**Birim**
Çelik- güçlendirilmiş	34200	kg	21.000	kg
Çelik- düşük alaşımlı	16400	kg	-	kg
Alüminyum	5500	kg	1.070	kg
Bakır	6810	kg	-	kg
HDPE	6340	kg	-	kg
Düz Cam	235	kg	-	kg
Alkit boya	385	kg	106	kg
Polivinil klorür	351	kg	-	kg
Motor yağı	3560	kg	-	kg
Kurşun	263	kg	-	kg
Laminant ahşap	0.594	m^3	-	m^3
Sentetik plastik	-	kg	10	kg
Ahşap döşeme	-	m^3	1,92	m^3
Kaya yünü	32	kg	32	kg
Nakliye-karayolu	3.530	tkm	2.210	tkm
Nakliye-demiryolu	14.400	tkm	4.430	tkm
Elektrik enerjisi	152.000	tkm	9.220	tkm
Isı enerjisi- fuel oil	1.440.000	MJ	46.000	MJ
Emisyonlar **Havaya**	**Miktar**	**Birim**	**Miktar**	**Birim**
Atık ısı	547.000	MJ	33.200	MJ

- (c) 1 adet tren aracı bakım onarımı (Yolcu Taşımacılığı)

	YHT		KT	
Malzemeler/enerji	**Miktar**	**Birim**	**Miktar**	**Birim**
Çelik- güçlendirilmiş	45.000	kg	99.000	kg
Alüminyum	125	kg	13.000	kg
Bakır	125	kg	125	kg
Alkit boya	5.000	kg	6.180	kg
Sodyum hidroksit	40.000	kg	40.000	kg
Organik çözücü	500	kg	500	kg
Motor yağı	500	kg	500	kg
Kağıt-hamur	20.700	kg	20.700	kg
Su	457.000	kg	457.000	kg
Nakliye-karayolu	5.600	tkm	10.800	tkm
Nakliye-demiryolu	22.400	tkm	43.300	tkm
Elektrik enerjisi	1.580.000	kWh	542.000	kWh
Isı enerjisi- fuel oil	25.100.000	MJ	64.600	MJ
Emisyonlar **Havaya**	**Miktar**	**Birim**	**Miktar**	**Birim**
Atık ısı	5.690.000	MJ	1.950.000	MJ
VOC-metan olmayan	3.500	kg	3.100	kg
Atık arıtımı	**Miktar**	**Birim**	**Miktar**	**Birim**
Tehlikeli atık- yakma tesisi	2.000	kg	-	Kg
Atık boya- yakma tesisi			645	kg
Atık plastik-düzenli depolama			13.000	kg
Atık cam-yakma tesisi			26.100	kg
Atıksu arıtma tesisi	457	m^3	457	m^3

- (d) 1 adet tren aracı bakım onarımı (Lokomotif) (Yük taşımacılığı)

	Lokomotif		Vagon	
Malzemeler/enerji	**Miktar**	**Birim**	**Miktar**	**Birim**
Çelik- güçlendirişmiş	29.100	kg	-	kg
Dökme demir	998	kg	3.510	kg
Bakır	266	kg	-	kg
Alkit boya	121	kg	39	kg
Sentetik plastik	840	kg	840	kg
Polivinil klorür	40	kg	40	kg
Motor yağı	690	kg	222	kg
Nakliye-karayolu	3.200	tkm	381	tkm
Nakliye-demiryolu	6.400	tkm	762	tkm
Elektrik enerjisi	34.100	kWh	11.000	kWh
Isı enerjisi- fuel oil	365.000	MJ	365.000	MJ
Isı enerjisi-doğal gaz	47.330	MJ	79.420	MJ
Emisyonlar **Havaya**	**Miktar**	**Birim**	**Miktar**	**Birim**
Atık ısı	123.000	MJ	39.600	MJ
Atık arıtımı	**Miktar**	**Birim**		**Birim**
Atık yağ-yakma	920	kg	1.850	kg
Kontamine diğer-yakma	5.750	kg	296	kg

- (e) 1 adet tren aracı işletme (Yolcu Taşımacılığı)

	YHT		KT	
Malzemeler/enerji	**Miktar**	**Birim**	**Miktar**	**Birim**
Elektrik enerjisi, yüksek voltaj	0,053	kWh	0,795	kWh
Emisyonlar / **Havaya**	**Miktar**	**Birim**	**Miktar**	**Birim**
Partikül madde >10	7.21E-06	kg	9.4E-06	kg
10 > Partikül madde > 2.5	6.59E-06	kg	8.6E-06	kg
Sülfür hekza flüorür	2.33E-09	kg	3.5E-09	kg
Atık ısı	0,1908	MJ	0,2862	MJ
Toprağa				
Demir	1.76E-05	kg	2.3E-05	kg

- (f) 1 adet tren aracı işletme (Lokomotif) (Yük Taşımacılığı)

Malzemeler/enerji	**Miktar**	**Birim**
Elektrik enerjisi, yüksek voltaj	0,0975	kWh
Emisyonlar / **Havaya**	**Miktar**	**Birim**
Partikül madde >10	1.2E-05	kg
10 > Partikül madde > 2.5	1.1E-05	kg
Sülfür hekza florür	4.3E-09	kg
Atık ısı	3.5E-01	MJ
Toprağa		
Demir	2.8E-05	kg

- (g) 1 adet tren aracı bertarafı (Yolcu Taşımacılığı)

	YHT		KT	
Malzeme ve enerji	**Miktar**	**Birim**	**Miktar**	**Birim**
Nakliye-karayolu	9630	tkm	4420	tkm
Atık arıtımı	**Miktar**	**Birim**	**Miktar**	**Birim**
Atık boya- yakma tesisi	12600	kg	645	kg
Atık cam- yakma tesisi	25000	kg	9510	kg
Atık plastik- yakma tesisi	155000	kg	78200	kg

(h) 1 adet tren aracı bertarafı (Lokomotif) (Yük Taşımacılığı)

Malzeme ve enerji	**Miktar**	**Birim**
Nakliye-karayolu	544	tkm
Atık arıtımı	**Miktar**	**Birim**
Atık boya- yakma tesisi	385	kg
Atık cam- yakma tesisi	235	kg
Kontamine malzeme-yakma tesisi	3560	kg
Atık plastik- yakma	7041	kg

Çizelge Ek-2.3. Demiryolu işletme bileşenleri ile ilgili varsayımlar (Kabasakal ve Solak, 2010)

Tren aracının	Yolcu Taşıma			Yük Taşıma	
	YHT	KT	Birim	KT	Birim
Teknik ömrü	35	26	yıl	25	yıl
Ortalama seyahat süresi	1500	900	km/gün	750	km/gün
Kapasitesi	491	800	yolcu	1000	ton
Doluluk oranı	75	70	%	80	%
Ortalama sefer sayısı	8	2	sefer/saat-yön	8	sefer/saat-yön
Yıllık çalışma süresi	365	365	gün	365	gün
Yakıt tüketimi	0.05	0.08	kWh	0.10	kWh

Çizelge Ek-2.4. Malzeme yoğunlukları ve ısıl değer kabulleri (http-3, 2013)

Malzeme	Yoğunluk	Birim
Balast (çakıl)	1600	kg/m^3
Kum (sıkıştırılmış)	1760	kg/m^3
Kazı-toprak	2200	kg/m^3
Beton (demirsiz)	2325	kg/m^3
Bakır (işlenmiş)	8900	kg/m^3
Dizel	850	kg/m^3
Çelik	7850	kg/m^3
Demir (işlenmiş)	7850	kg/m^3
Kazı-toprak	2200	kg/m^3
Malzeme	**Isıl değer**	**Birim**
Dizel	42,76	MJ/kg
Doğalgaz	34,54	MJ/m^3
Fuel-oil	38,51	MJ/kg

EK-3 Yaşam Döngüsü Maliyet Envanteri

Çizelge Ek-3.1. İçsel maliyet envanteri

No	Malzeme	Miktar	Birim	Fiyat	Para Birimi	Fiyat	Para Birimi	Kaynak
1	Elektrik- genel	1	kWh	0.1816	TL	0.07	€	http://www.tedas.gov.tr
2	Elektrik -Orta voltaj	1	kWh	0.2224	kr	0.09	€	http://www.tedas.gov.tr
3	Elektrik-düşük voltaj	1	kWh	0.2463	kr	0.10	€	http://www.tedas.gov.tr
4	Dizel yakıt	1	kg	4.9880	TL	1.98	€	http://benzin.doviz.com
5	Güçlendirilmiş çelik (UIC 60)	1	ton	2230	TL	884.92	€	http://www.kardemir.com
6	Güçlendirilmiş çelik (S49)	1	ton	2230	TL	884.92	€	http://www.kardemir.com
7	Düşük çelik	1	ton	1440	TL	571.43	€	http://www.kardemir.com
8	Beton	1	m^3	109.35	TL	43.39	€	http://www.birimfiyat.com
9	Demir	1	ton	1086.35	TL	431.09	€	http://www.kardemir.com
10	Balast	1	m^3	70	TL	27.78	€	http://www.insaathaberleri.net
11	Kum	1	m^3	60	TL	23.81	€	http://www.insaathaberleri.net
12	Çinko	1	kg	5.4	TL	2.14	€	http://www.metal-aluminyum.com
13	Seramik	1	m^2	20	TL	7.94	€	http://www.birimfiyat.com
13	Seramik	1	kg	5	TL	1.98	€	http://www.birimfiyat.com
14	Alüminyum-sıcak levha	1	kg	5.8	TL	2.30	€	http://www.etialuminyum.com

Çizelge Ek- 3.1 (devam). İçsel maliyet envanteri

15	Bakır	1	kg	16.15	TL	6.41	€	http://www.kayalarcopper.com
16	Nakliye-Karayolu	1	tkm	2.5	TL	0.99	€	www.nakliyeborsasi.net
17	Nakliye-Demiryolu	1-150	tonkm	8.32	TL	3.30	€	http://www.tcdd.gov.tr
18	Motor yağı	1	kg	0.21	TL	0.08	€	http://www.rayihale.com
19	Glifosfat	1	L	7	TL	2.78	€	http://turkish.alibaba.com
20	Kazı işlemleri	1	m^3	11.7	TL	4.64	€	http://www.birimfiyat.com
21	Dolgu işlemleri	1	m^3	13.66	TL	5.42	€	http://www.birimfiyat.com
22	Alkit boya	1	L	0.645	TL	0.26	€	http://www.makroboya.com.tr
23	Temperlenmiş cam	1	m^2	56	TL	22.22	€	http://www.birimfiyat.com
24	Normal cam	1	m^2	48	TL	19.05	€	http://www.birimfiyat.com
25	Yüksek yoğunluklu polietilen	1	ton	3782.4	TL	1500.95	€	www.b2bPolymers.com
26	Isı enerjisi-Fuel oil	1	kg	2.66	TL	1.06	€	http://www.benzinal.com
27	Isı enerjisi-Doğalgaz	1	m^3	0.714	TL	0.28	€	http://www.botas.gov.tr
28	Organik solvent	30	kg	424	TL	168.25	€	http://www.erhankimya.com.tr
29	Polivinilklorür	1	kg	2.58	TL	1.02	€	http://www.polystan.com
30	Laminant ahşap	1	m^2	19.5	TL	7.74	€	http://www.ahsapparkemarket.com
31	Laminant ahşap	1	kg	82	TL	32.54	€	http://www.ahsapparkemarket.com
32	Kaya yünü	1	kg	11.5	TL	4.56	€	http://malzeme.sermimar.net
33	Kurşun	1	kg	1.15	TL	0.46	€	http://www.birimfiyat.com

Çizelge Ek- 3.1 (devam). İçsel maliyet envanteri

34	Sentetik kauçuk	1	ton	470.4	TL	186.67	€	http://www.kaucukithalat.com
35	Bitum	1	kg	1.24	TL	0.49	€	http://www.tupras.com.tr
36	Kağıt hamur	1	ton	1565.4	TL	621.19	€	http://tr.worldscrap.com
37	Kullanma suyu	1	m^3	6.53	TL	2.59	€	www.iski.gov.tr
38	Sodyum hidroksit	95	kg	159	TL	63.10	€	http://www.aurakimya.com
39	Düzenli Depolama-inşaat atığı	1	ton	600	TL	238.10	€	www.izaydas.com.tr
40	Yakma tesisi-atık boya	1	ton	890	TL	353.17	€	www.izaydas.com.tr
41	Yakma tesisi-atık cam	1	ton	600	TL	238.10	€	www.izaydas.com.tr
42	Yakma tesisi-atık plastik	1	ton	500	TL	198.41	€	www.izaydas.com.tr
43	Yakma tesisi-kontamine malzeme	1	ton	500	TL	198.41	€	www.izaydas.com.tr
44	Yakma tesisi-atık yağ	1	ton	825	TL	327.38	€	www.izaydas.com.tr

Çizelge Ek-3.2. Dışsal maliyet envanteri (çevresel)

Çevresel Maliyetler	YHT- Yolcu		
	€/kg emisyon	Kullanılan Değer	**Kaynak**
Küresel ısınma (kg CO_2 ed.)	0,108 0,135	0.122	Steen (2009) Vogtländer (2009)
Asidifikasyon (kg SO_2 ed.)	8,16 8,25	8.21	Kosugi (2009) Vogtländer (2009)
Ötrofikasyon (kg PO_4 ed.)	3,90	3.90	Vogtländer (2009)
Ozon tabakasının tükenmesi (kg CFC-11 ed.)	541 122*	331.5	Steen (2009) Vogtländer (2009)
Fotokimyasal sis (kg C_2H_6 ed.)	3,26 0,97**	2.12	Steen (2009) Vogtländer (2009)
Toksisite (kg 1,4 Db ed.)	2,5***	2,5	Hesaplanmıştır
Toksisite alt bileşenleri	**€/kg emisyon**	**kg 1,4 DB ed./ kg emisyon**	**Kaynak**
Benzen	0,076	$1.9x10^3$	EEA (2011)
PAH	1279	$5.72x10^5$	EEA (2011)
Formaldehit	0,22	$1.9x10^3$	EEA (2011)
Arsenik	349	$3.48x10^5$	EEA (2011)
Kadmiyum	29	$1.45x10^5$	EEA (2011)

Çizelge Ek-3.2 (devam). Dışsal maliyet envanteri (çevresel)

Çevresel	YHT- Yolcu		
	€/kg kirletici	Kullanılan Değer	**Kaynak**
Krom	38	$3.43x10^{6}$	EEA (2011)
Kurşun	965	467	EEA (2011)
Civa	910	6.010	EEA (2011)
Nikel	3.8	$3.5x10^{4}$	EEA (2011)

*Vogtländer (2009) tarafından yapılan çalışmada, ozon tabakasının tükenmesinin dışsal maliyeti 100 €/kg CFC -12 olarak verilmiştir. CFC-12'nin, CFC-11 eşdeğeri olarak hesaplanması Hauschild ve Wenzel (1997) çalışmasındaki ozon tabakasının tükenmesi için eşdeğer faktörü (0.82 g CFC -12/ CFC-11) olarak verilmiştir.

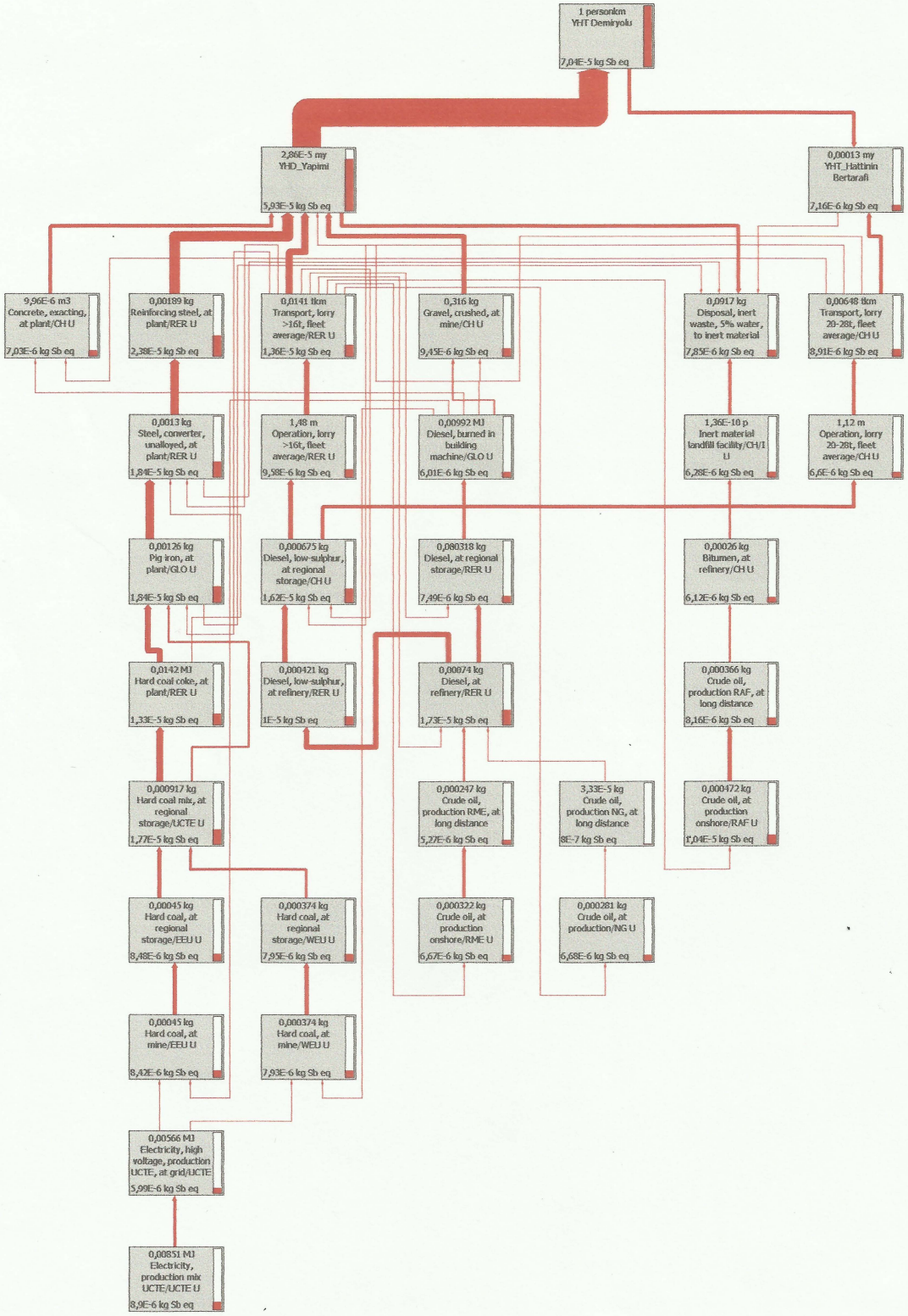
**Vogtländer (2009) tarafından yapılan çalışmada, fotokimyasal sisin dışsal maliyeti 9.7 €/kg C_2H_4 olarak verilmiştir. Hauschild ve Wenzel (1997) çalışmasındaki eşdeğer faktör (0.1 g C_2H_4 / g C_2H_6) olarak verilmiştir.

*** Toksisite açısından insanlar üzerine olan toksik etkiye neden olan hava emisyonları (Benzen, PAH, Formaldehit, arsenik, kadmiyum, kurşun civa ve nikel) dikkate alınmıştır. Bu emisyonların kg başına maliyetleri ile SimaPro yazılımının veri tabanındaki faktör değerleri kullanılmış olup yukarıdaki Çizelge'de gösterilmiştir.

Çizelge Ek-3.3. Dışsal maliyet envanteri (kaza, gürültü)

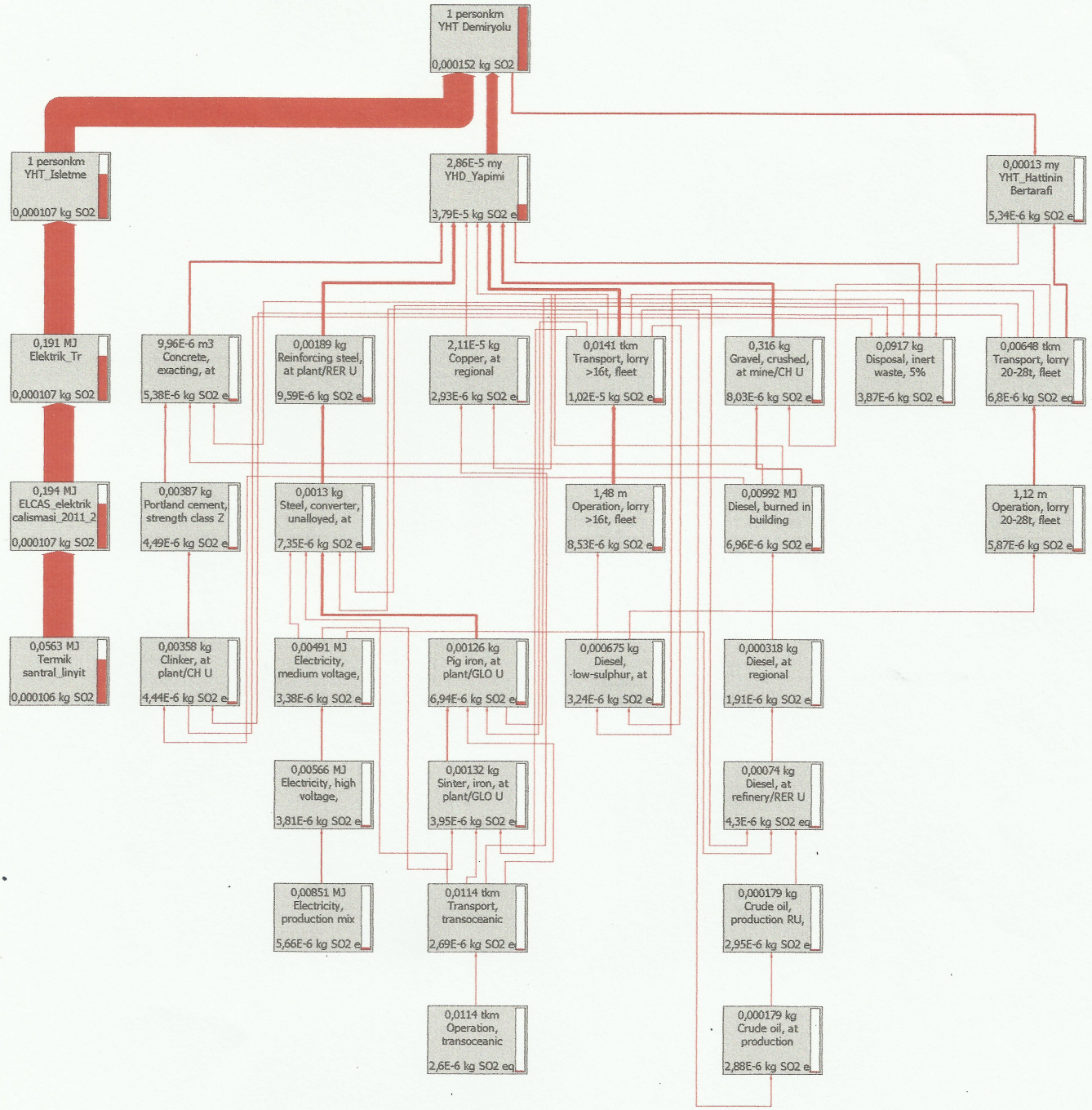
	YHT- Yolcu		**Konvansiyonel D.-Yolcu**		**Konvansiyonel D.-Yük**	
Kaynak	Kaza (€/yolcu-km)	Gürültü (€/yolcu-km)	Kaza (€/yolcu-km)	Gürültü (€/yolcu-km)	Kaza (€/ton-km)	Gürültü (€/ton-km)
Aecom (2011)	0.00114	0.00007	0.0034	0.0002	-	-
	0.00100	0.00015	-	-	-	-
CE Delft (2011)	-	-	0.0006	0.0012	0.0002	0.00100
Öztürk (2004)	-	-	0.0019	0.0015	0.0009	0.00470
Sahin (2009)	-	-			0.0003	0.00015
Weinreich (1998)	-	-	-	0.0016	-	0.00150
Ortalama	0.00107	0.00011	0.00197	0.0011	0.00046	0.0018

Product:	YHT Demiryolu
Project:	1209F145_BAP_Alp
Category:	Transport\Rail
Method:	CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight:	Characterization, Abiotic depletion (kg Sb eq)
Node weight:	Including inputs
Exclude long-term emissions:	No
Node cut-off:	9%



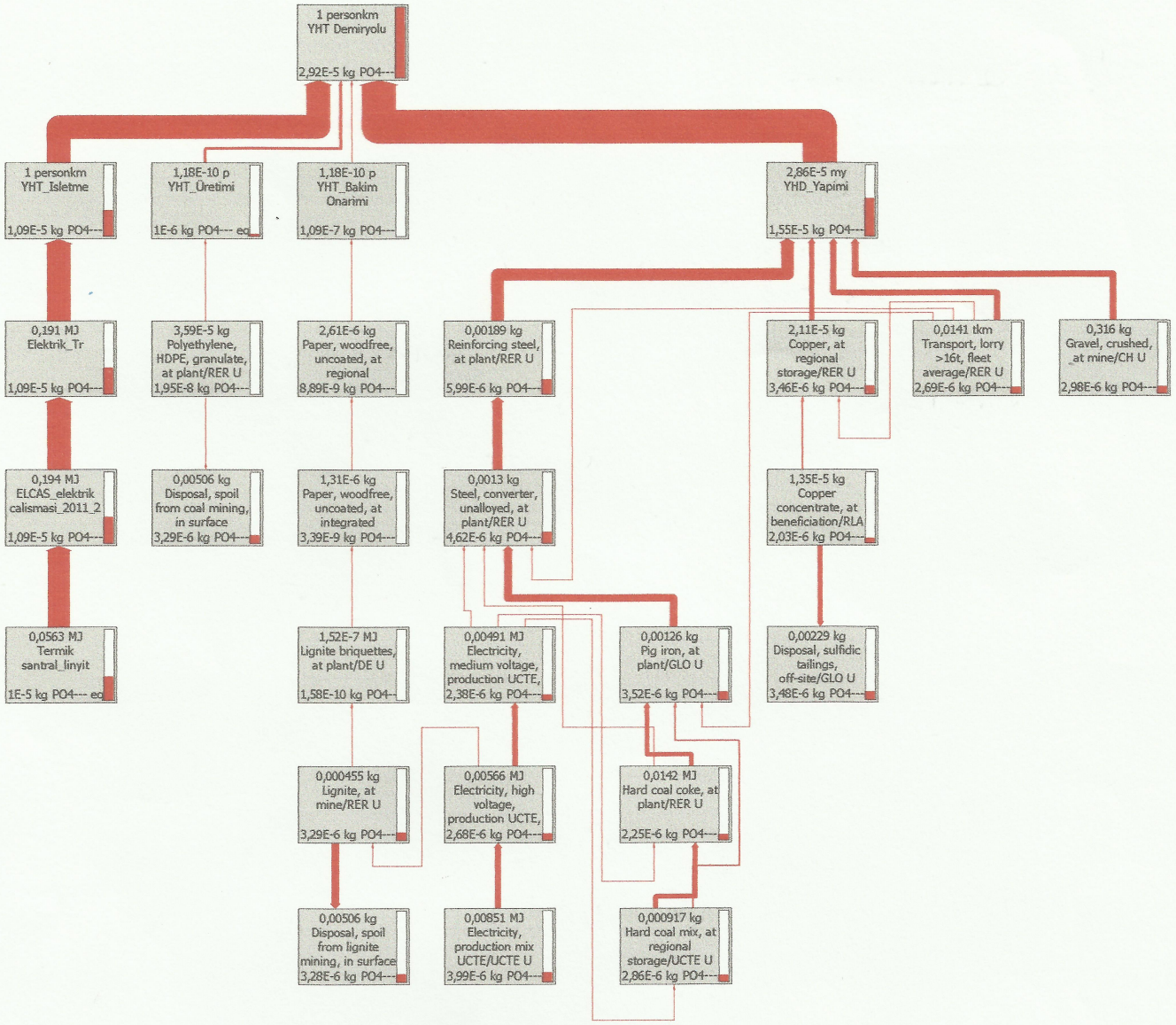
Şekil Ek-4.1. (a) YHT'nin abiyotik kaynakların tükenmesine olan etkisinin ağ görünümü

Product: YHT Demiryolu
Project: 1209F145_BAP_Alp
Category: Transport\Rail
Method: CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight: Characterization, Acidification (kg SO2 eq)
Node weight: Including inputs
Exclude long-term emissions: No
Node cut-off: 1,7%



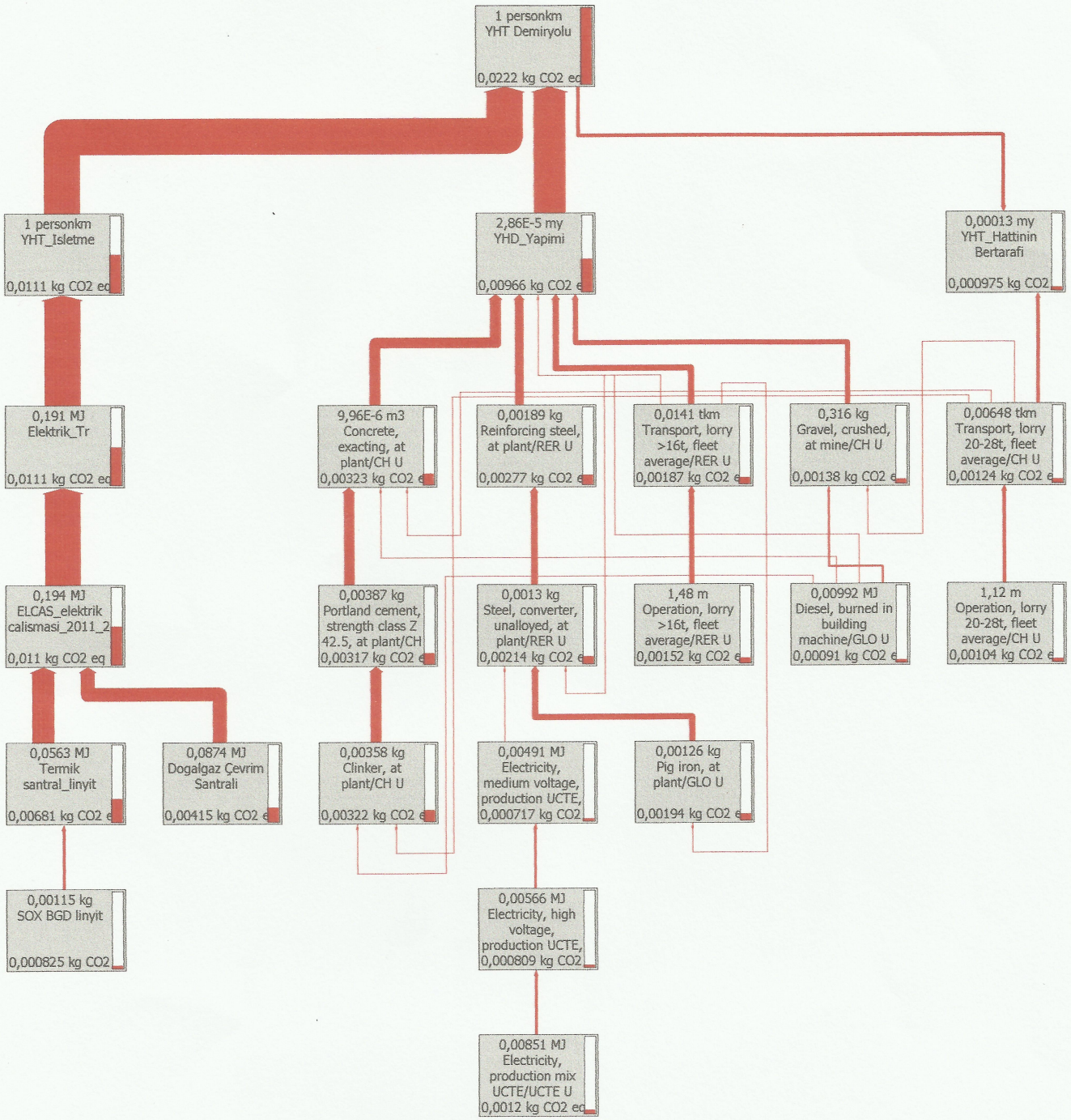
Şekil Ek-4.1.(b) YHT'nin asidifikasyon etkisinin ağ görünümü

Product:	YHT Demiryolu
Project:	1209F145_BAP_Alp
Category:	Transport\Rail
Method:	CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight:	Characterization, Eutrophication (kg PO4--- eq)
Node weight:	Including inputs
Exclude long-term emissions:	No
Node cut-off:	7,5%



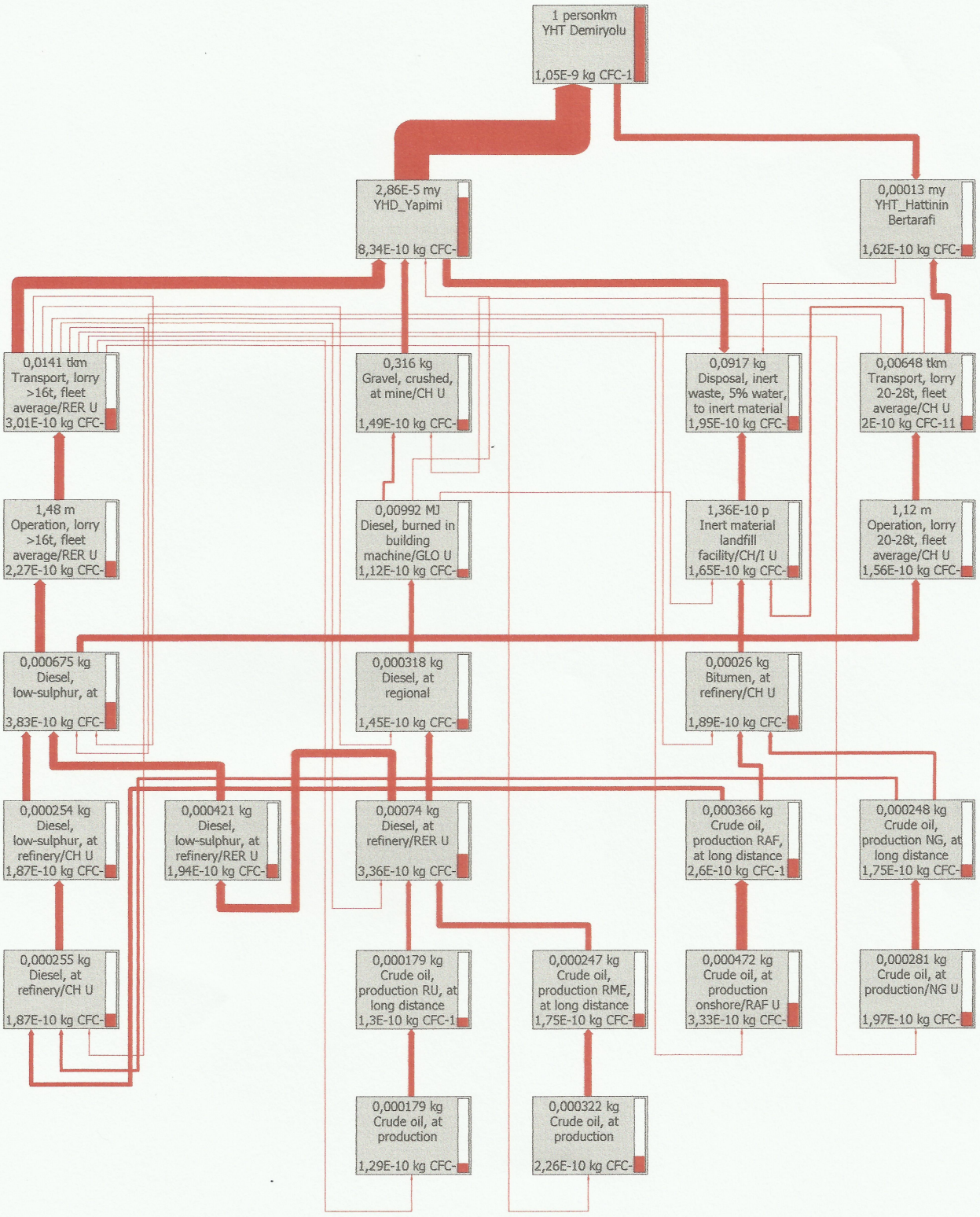
Şekil Ek-4.1.(c) YHT'nin ötrofikasyon etkisinin ağ görünümü

Product:	YHT Demiryolu
Project:	1209F145_BAP_Alp
Category:	Transport\Rail
Method:	CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight:	Characterization, Global warming (GWP100) (kg CO2 eq)
Node weight:	Including inputs
Exclude long-term emissions:	No
Node cut-off:	3%



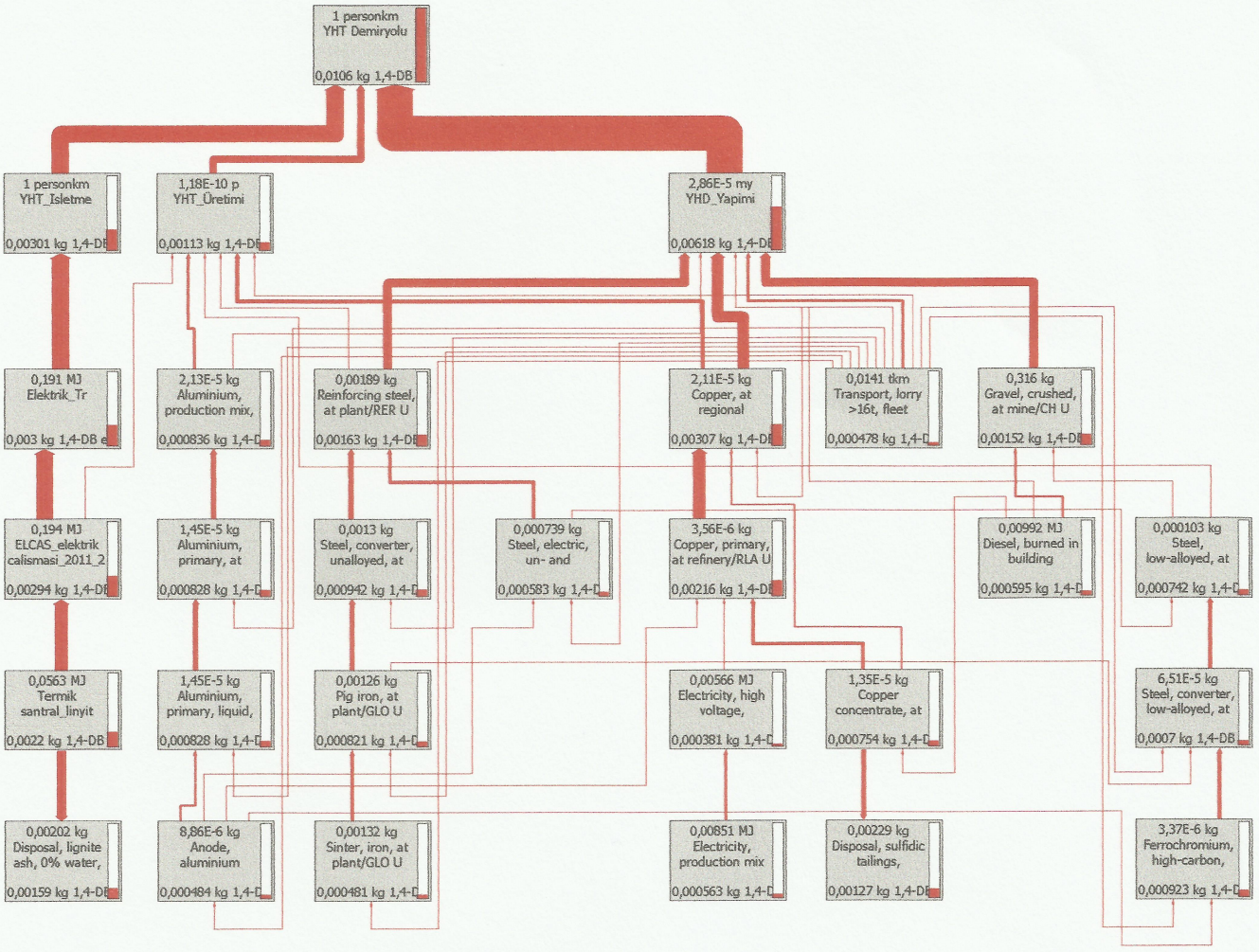
Şekil Ek-4.1.(d) YHT'nin küresel ısınma etkisinin ağ görünümü

Product: YHT Demiryolu
Project: 1209F145_BAP_Alp
Category: Transport\Rail
Method: CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight: Characterization, Ozone layer depletion (ODP) (kg CFC-11 eq)
Node weight: Including inputs
Exclude long-term emissions: No
Node cut-off: 12%



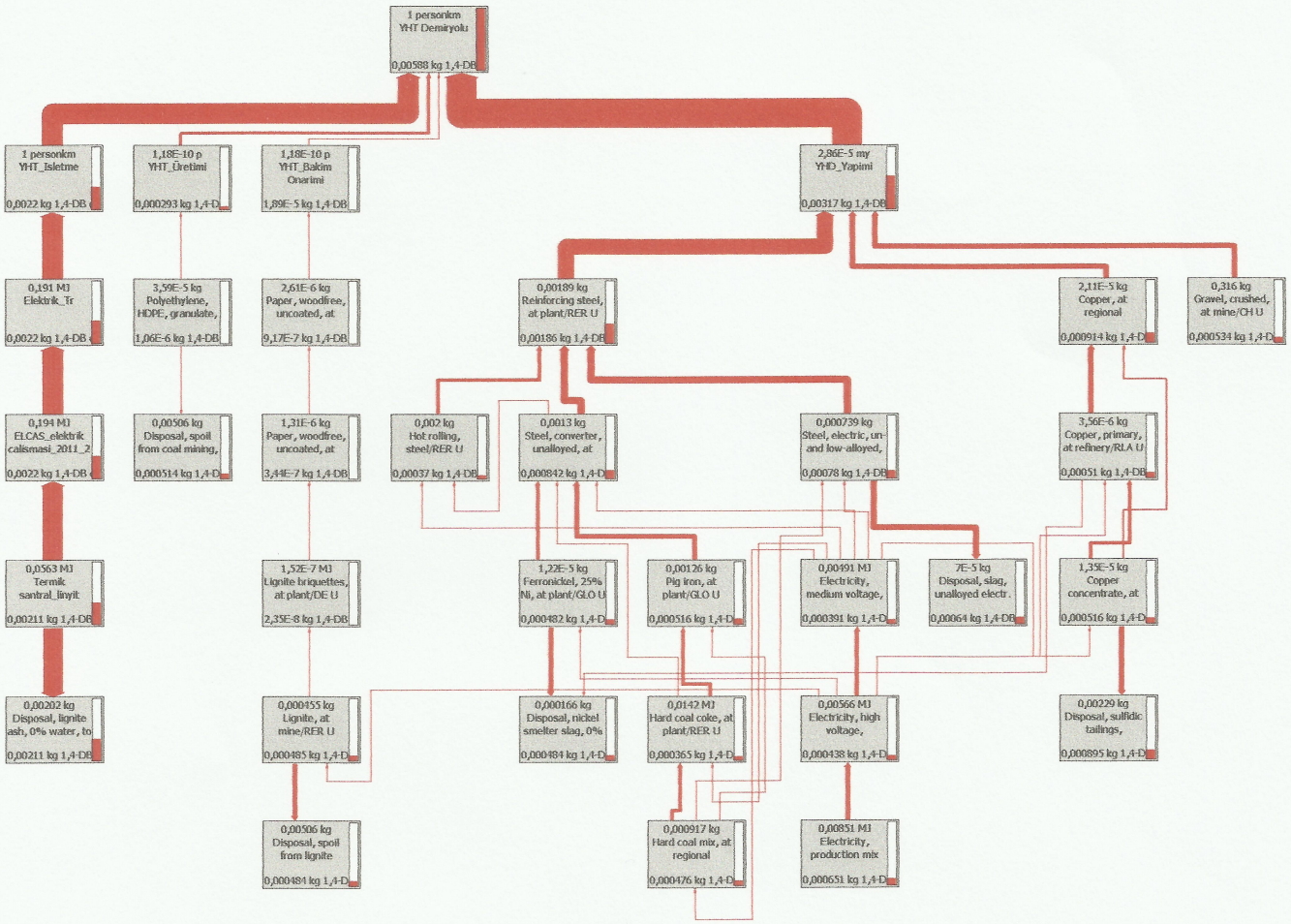
Şekil Ek-4.1.(e) YHT'nin ozon tabakasının tükenmesi etkisinin ağ görünümü

Product:	YHT Demiryolu
Project:	1209F145_BAP_Alp
Category:	Transport\Rail
Method:	CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight:	Characterization, Human toxicity (kg 1,4-DB eq)
Node weight:	Including inputs
Exclude long-term emissions:	No
Node cut-off:	4,5%



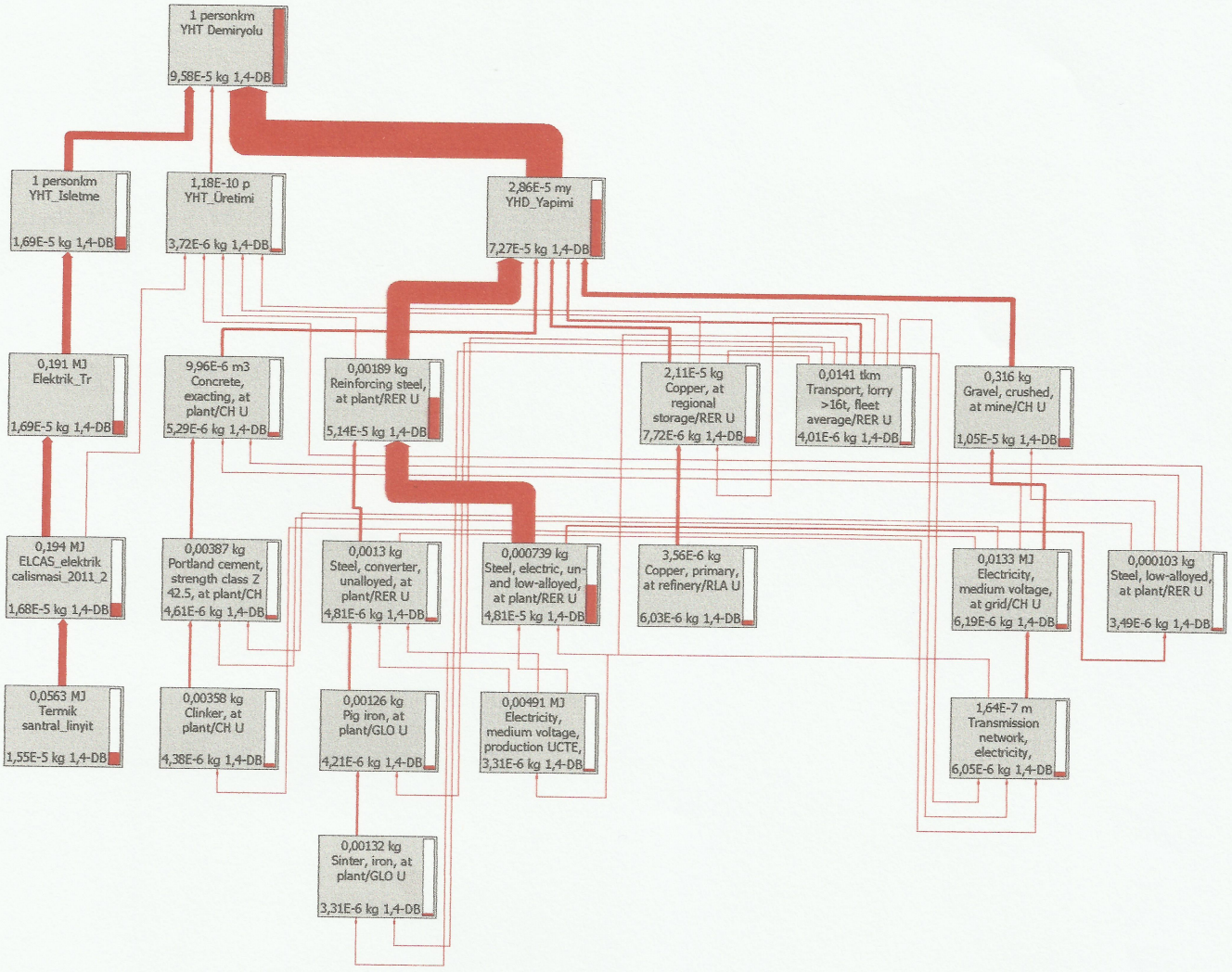
Şekil Ek-4.1. (f) YHT'nin insanlar üzerine olan toksik etkisinin ağ görünümü

Product:	YHT Demiryolu
Project:	1209F145_BAP_Alp
Category:	Transport\Rail
Method:	CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight:	Characterization, Fresh water aquatic ecotox. (kg 1,4-DB eq)
Node weight:	Including inputs
Exclude long-term emissions:	No
Node cut-off:	5,6%



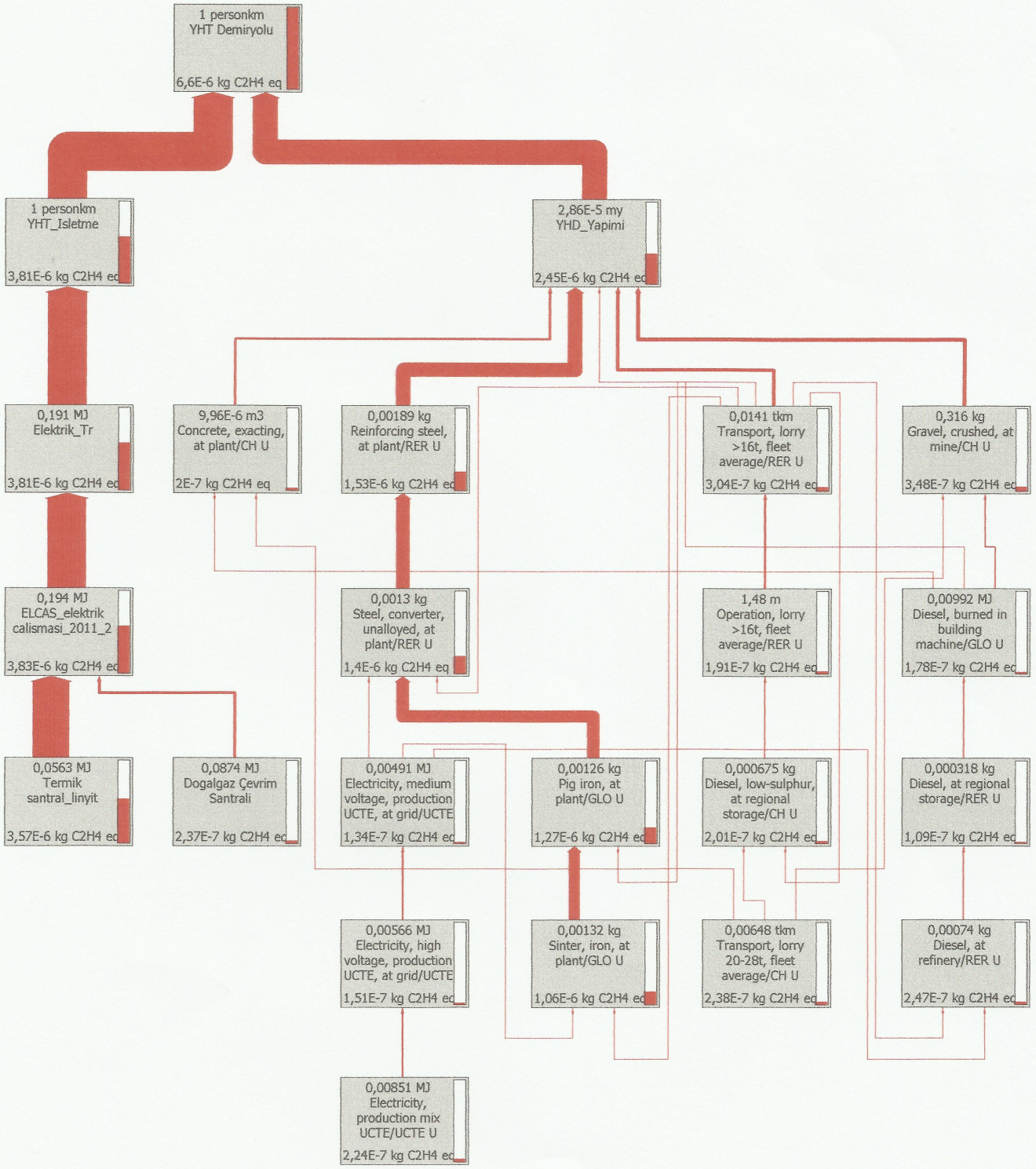
Şekil Ek-4.1. (g) YHT'nin yüzey sularına olan toksik etkisinin ağ görünümü

Product:	YHT Demiryolu
Project:	1209F145_BAP_Alp
Category:	Transport\Rail
Method:	CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight:	Characterization, Terrestrial ecotoxicity (kg 1,4-DB eq)
Node weight:	Including inputs
Exclude long-term emissions:	No
Node cut-off:	3%



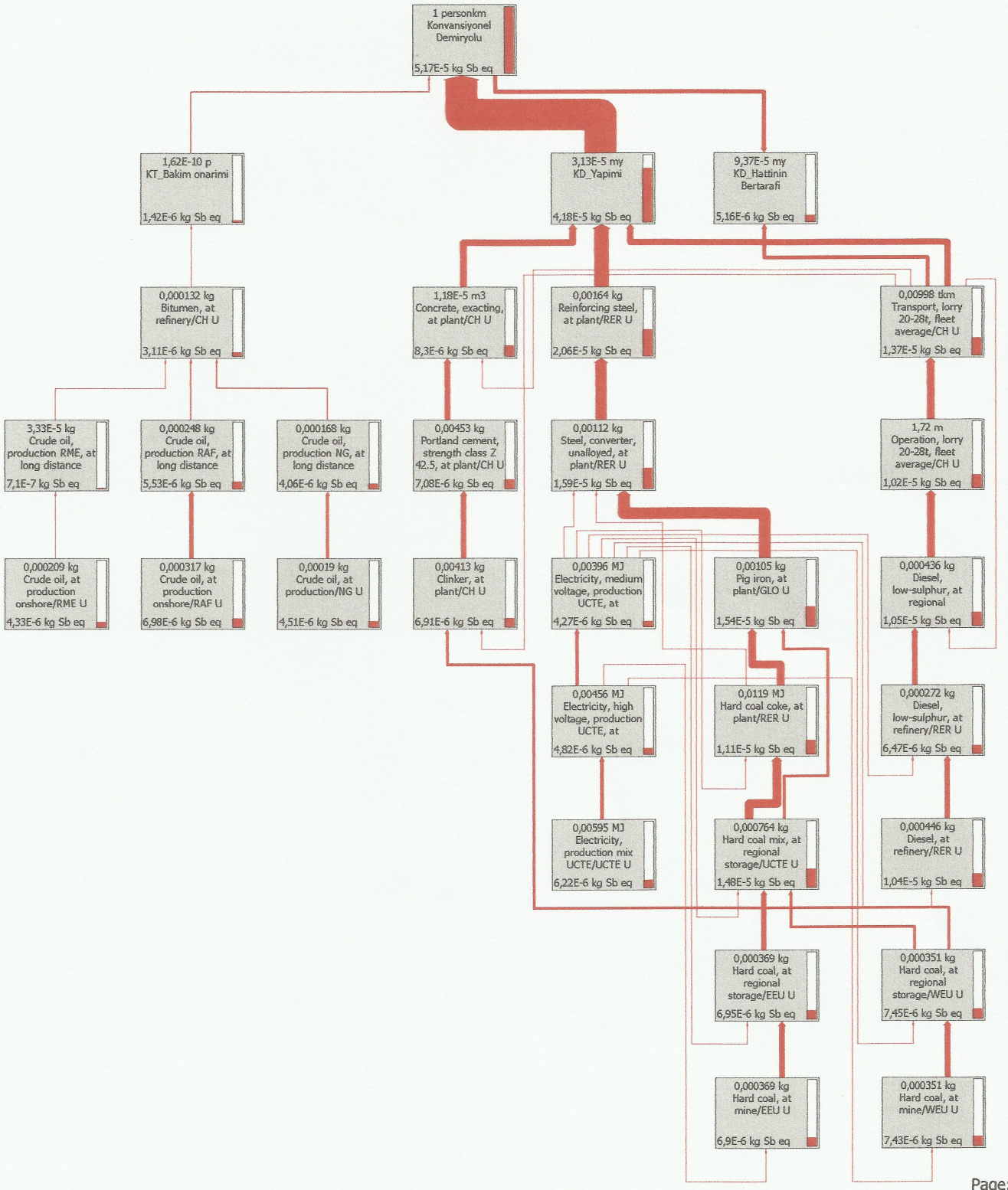
Şekil Ek-4.1.(h) YHT'nin kara ekosistemine olan toksik etkisinin ağ görünümü

Product:	YHT Demiryolu
Project:	1209F145_BAP_Alp
Category:	Transport\Rail
Method:	CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight:	Characterization, Photochemical oxidation (kg C2H4 eq)
Node weight:	Including inputs
Exclude long-term emissions:	No
Node cut-off:	3%



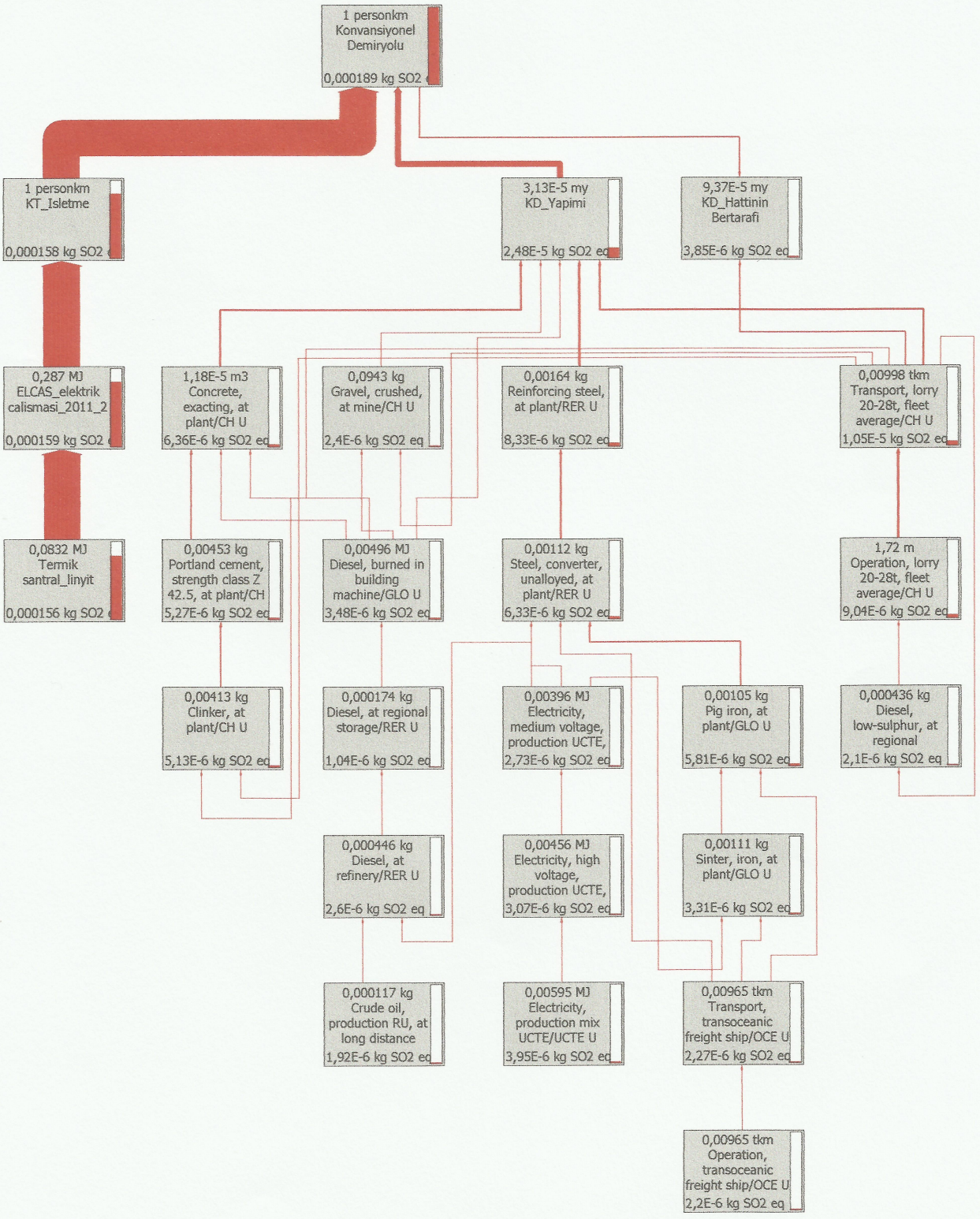
Şekil Ek-4.1. (ı) YHT'nin fotokimyasal sis etkisinin ağ görünümü

Product: Konvansiyonel Demiryolu
Project: 1209F145_BAP_Alp
Category: Transport\Rail
Method: CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight: Characterization, Abiotic depletion (kg Sb eq)
Node weight: Including inputs
Exclude long-term emissions: No
Node cut-off: 8%



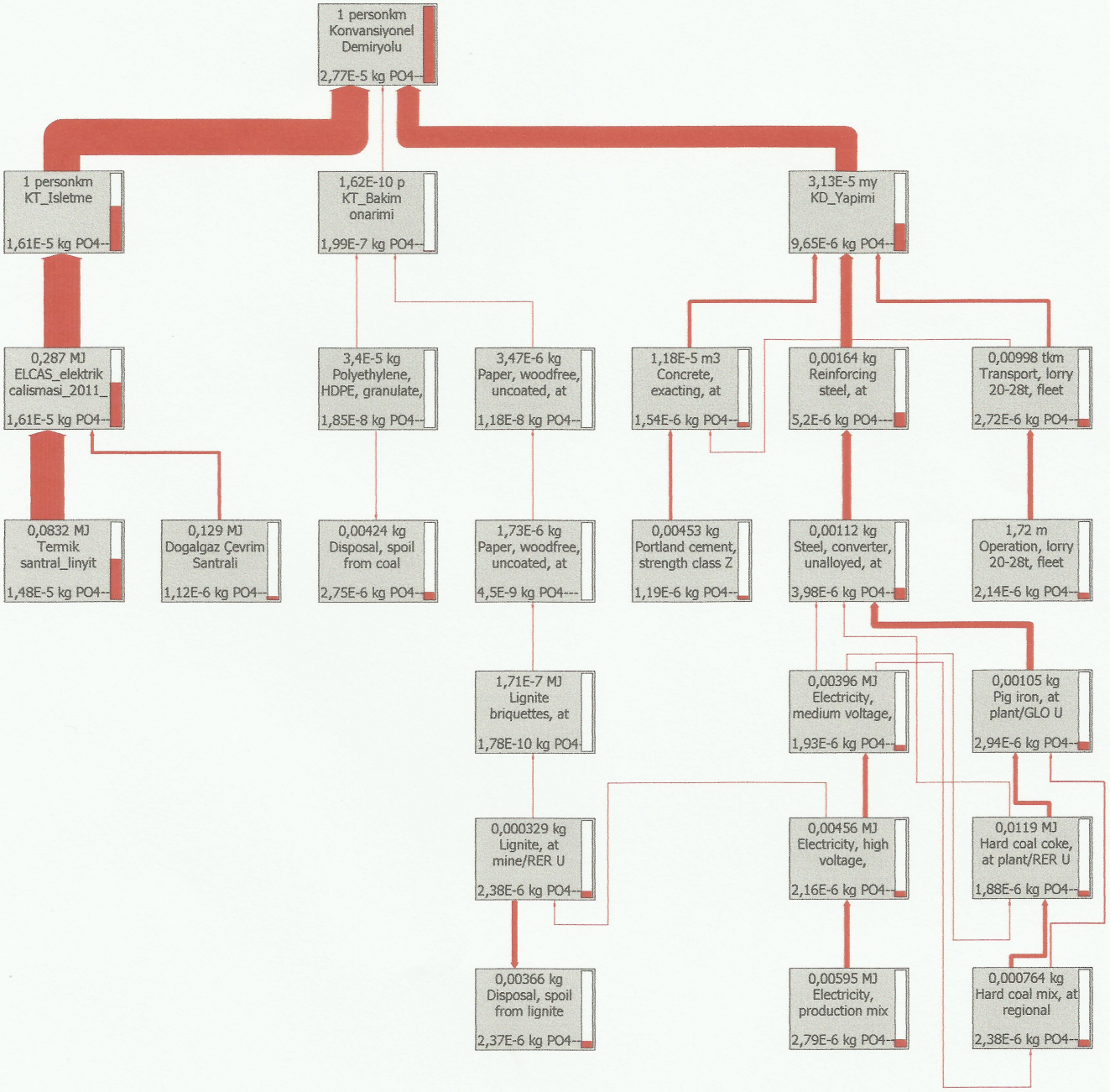
Şekil Ek-4.2.(a)KD'nin abiyotik kaynakların tükenmesine olan etkisinin ağ görünümü

Product:	Konvansiyonel Demiryolu
Project:	1209F145_BAP_Alp
Category:	Transport\Rail
Method:	CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight:	Characterization, Acidification (kg SO2 eq)
Node weight:	Including inputs
Exclude long-term emissions:	No
Node cut-off:	1%



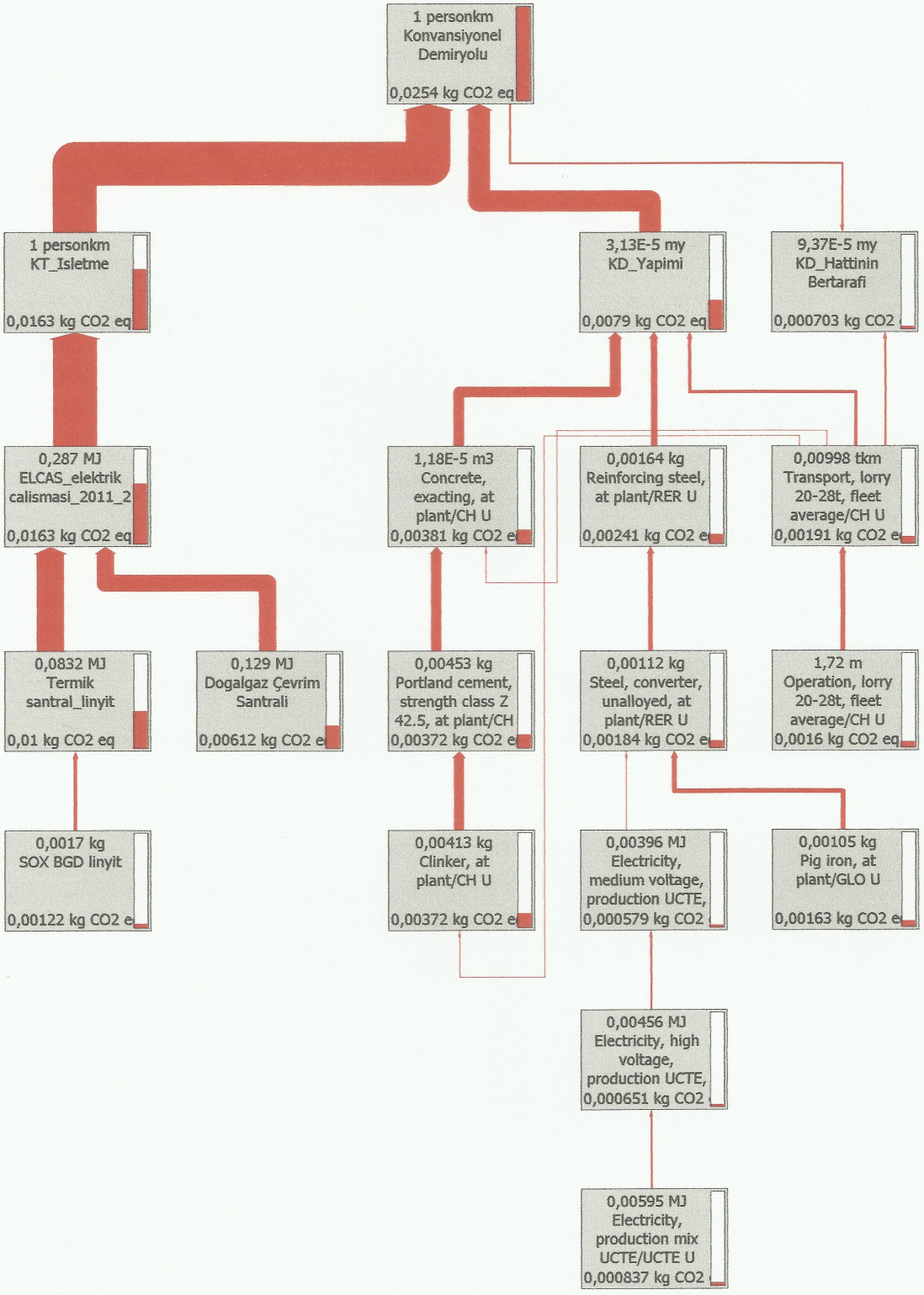
Şekil Ek-4.2.(b) KD'nin asidifikasyon etkisinin ağ görünümü

Product: Konvansiyonel Demiryolu
Project: 1209F145_BAP_Alp
Category: Transport\Rail
Method: CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight: Characterization, Eutrophication (kg PO4--- eq)
Node weight: Including inputs
Exclude long-term emissions: No
Node cut-off: 4%



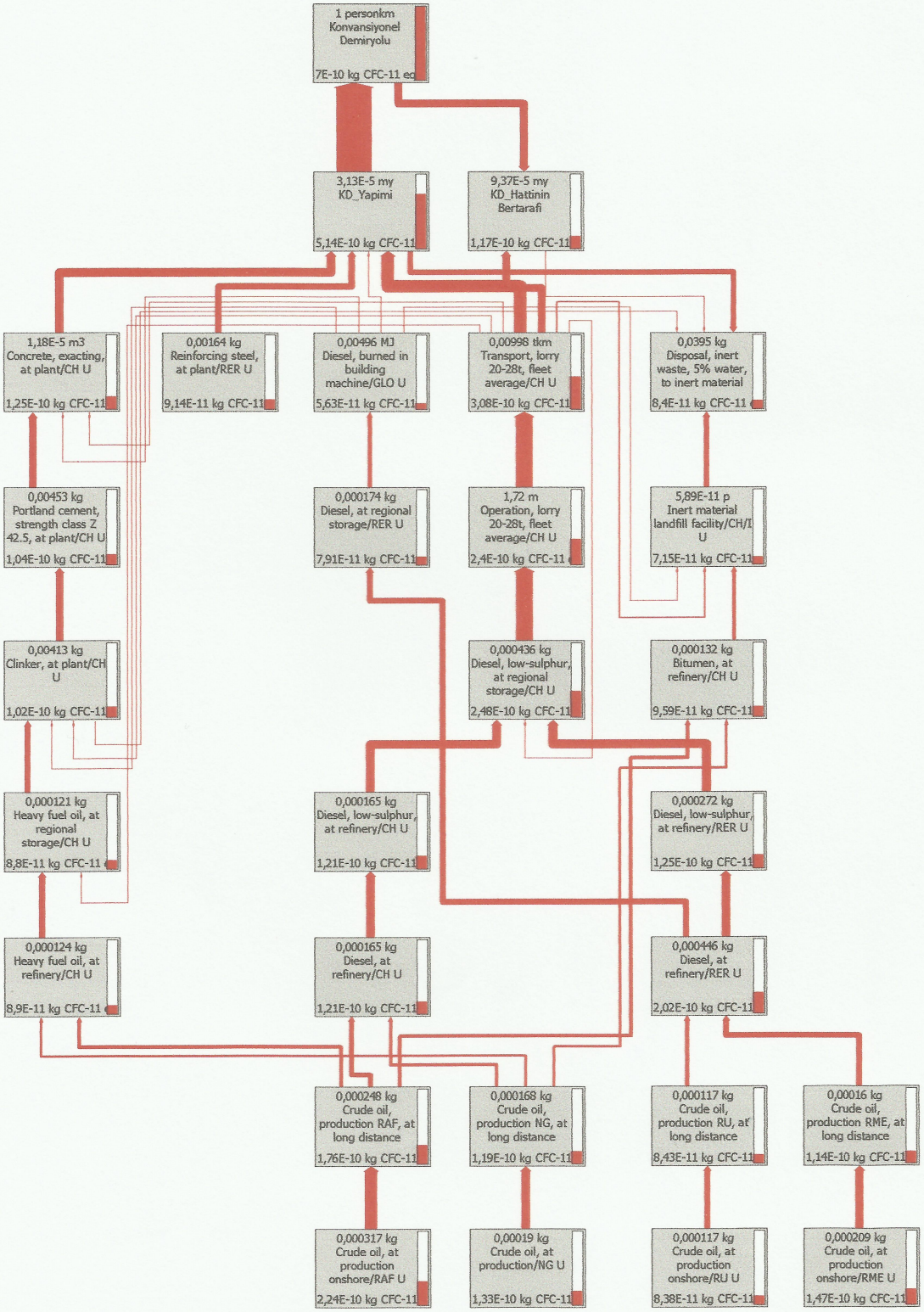
Şekil Ek-4.2.(c) KD'nin ötrofikasyon etkisinin ağ görünümü

Product:	Konvansiyonel Demiryolu
Project:	1209F145_BAP_Alp
Category:	Transport\Rail
Method:	CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight:	Characterization, Global warming (GWP100) (kg CO2 eq)
Node weight:	Including inputs
Exclude long-term emissions:	No
Node cut-off:	2%



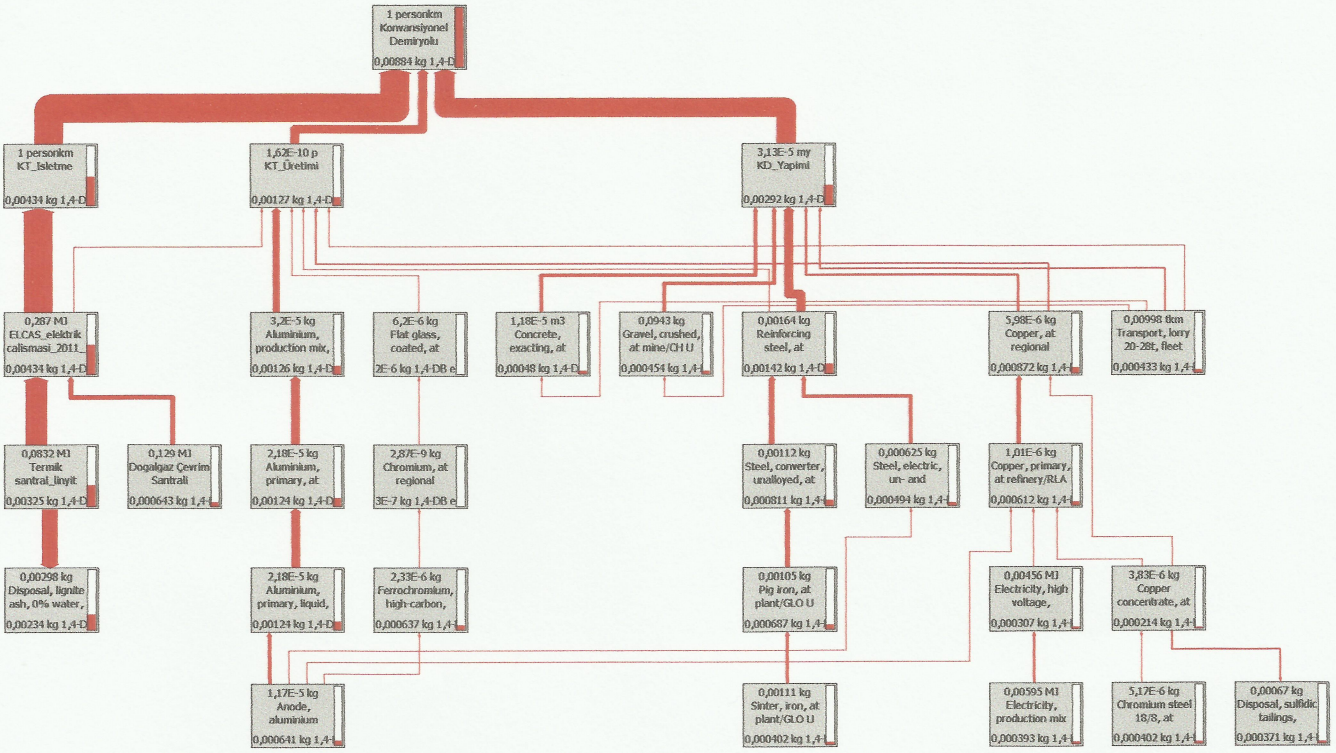
Şekil Ek-4.2. (d) KD'nin küresel ısınma etkisinin ağ görünümü

Product:	Konvansiyonel Demiryolu
Project:	1209F145_BAP_Alp
Category:	Transport\Rail
Method:	CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight:	Characterization, Ozone layer depletion (ODP) (kg CFC-11 eq)
Node weight:	Including inputs
Exclude long-term emissions:	No
Node cut-off:	8%



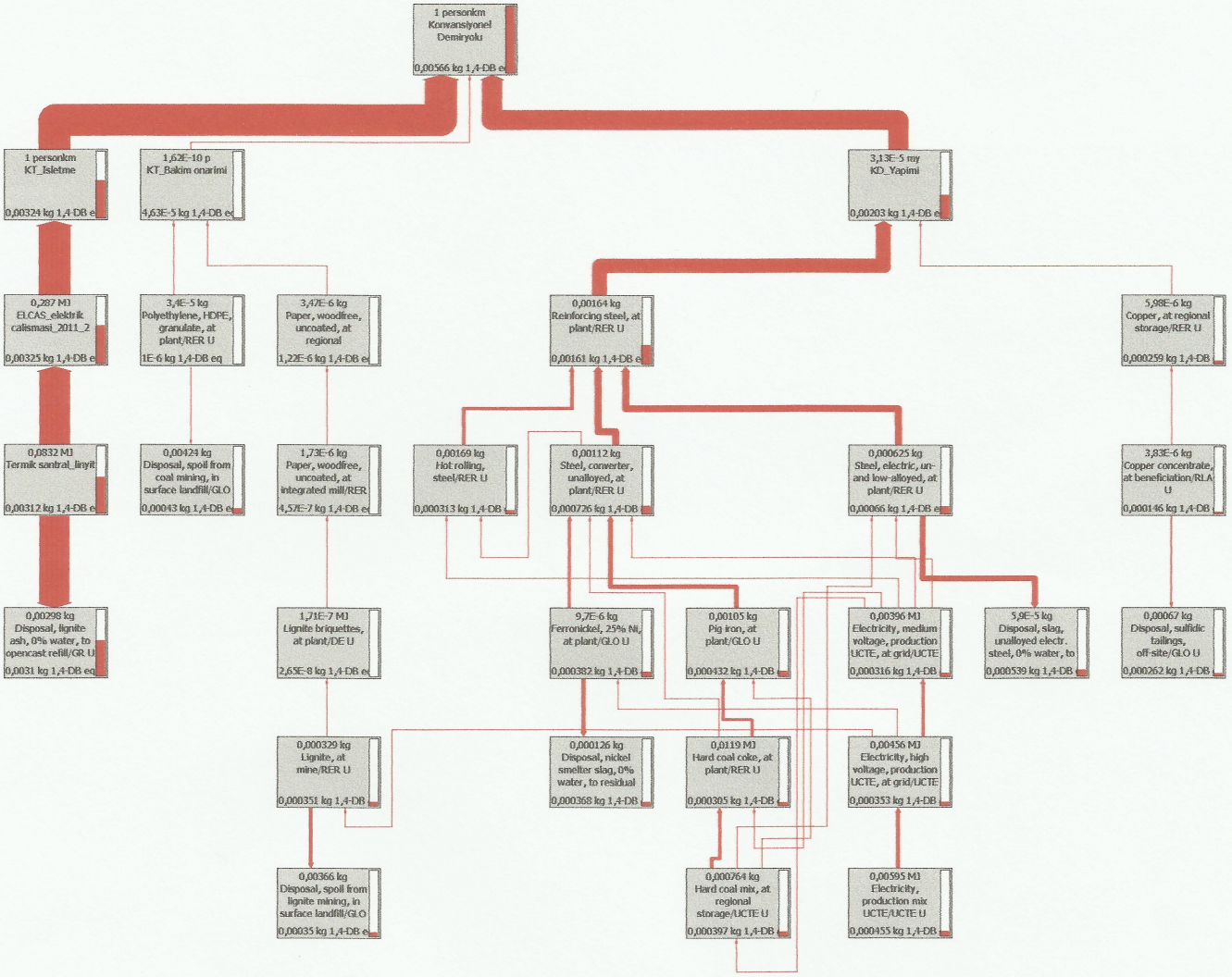
Şekil Ek-4.2.(e) KD'nin ozon tabakasının tükenmesine olan etkisinin ağ görünümü

Product: Konvansiyonel Demiryolu
Project: 1209F145_BAP_Alp
Category: Transport\Rail
Method: CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight: Characterization, Human toxicity (kg 1,4-DB eq)
Node weight: Including inputs
Exclude long-term emissions: No
Node cut-off: 4%



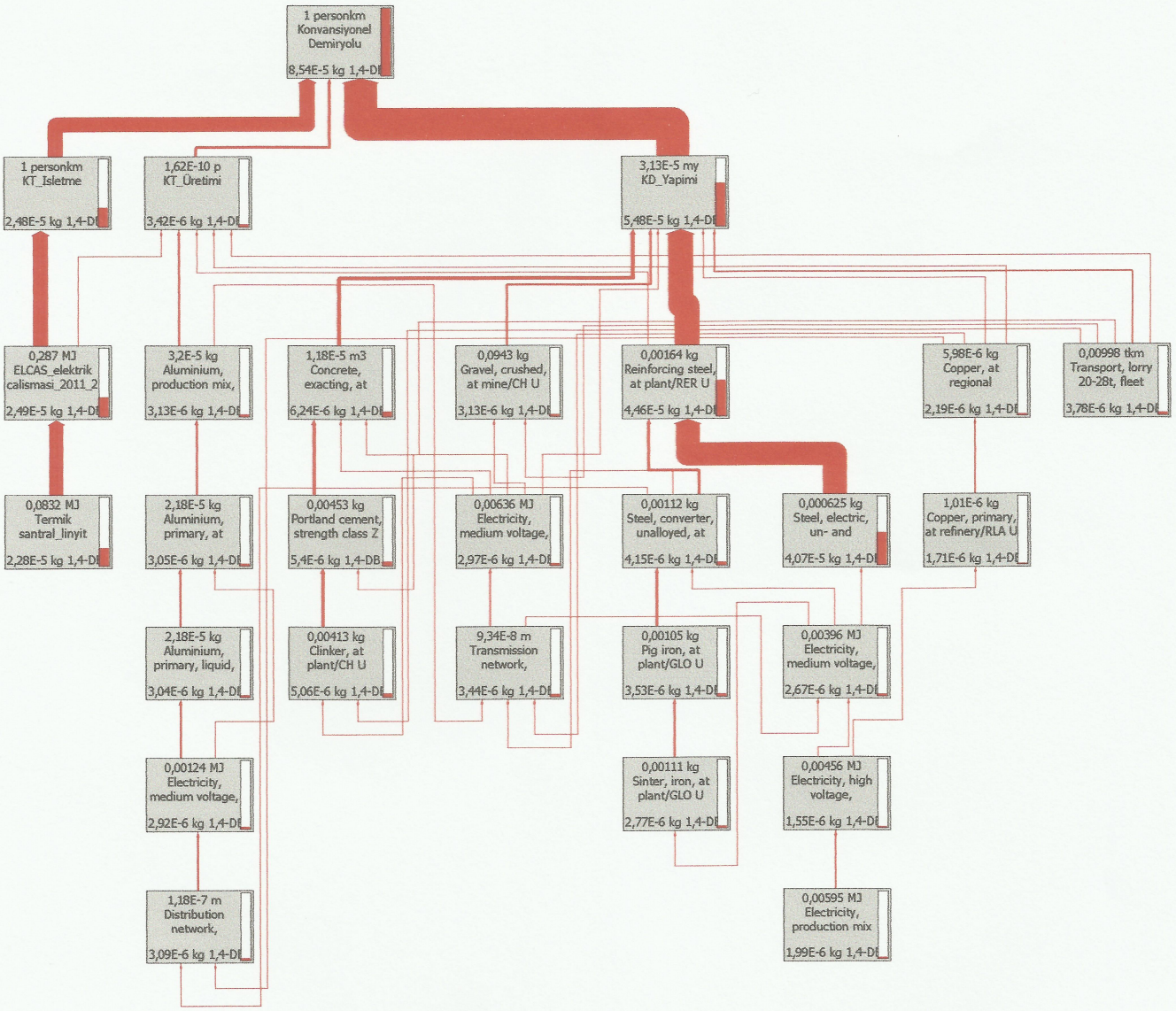
Şekil Ek-4.2.(f) KD'nin insanlar üzerine olan toksik etkisinin ağ görünümü

Product:	Konvansiyonel Demiryolu
Project:	1209F145_BAP_Alp
Category:	Transport\Rail
Method:	CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight:	Characterization, Fresh water aquatic ecotox. (kg 1,4-DB eq)
Node weight:	Including inputs
Exclude long-term emissions:	No
Node cut-off:	4,5%



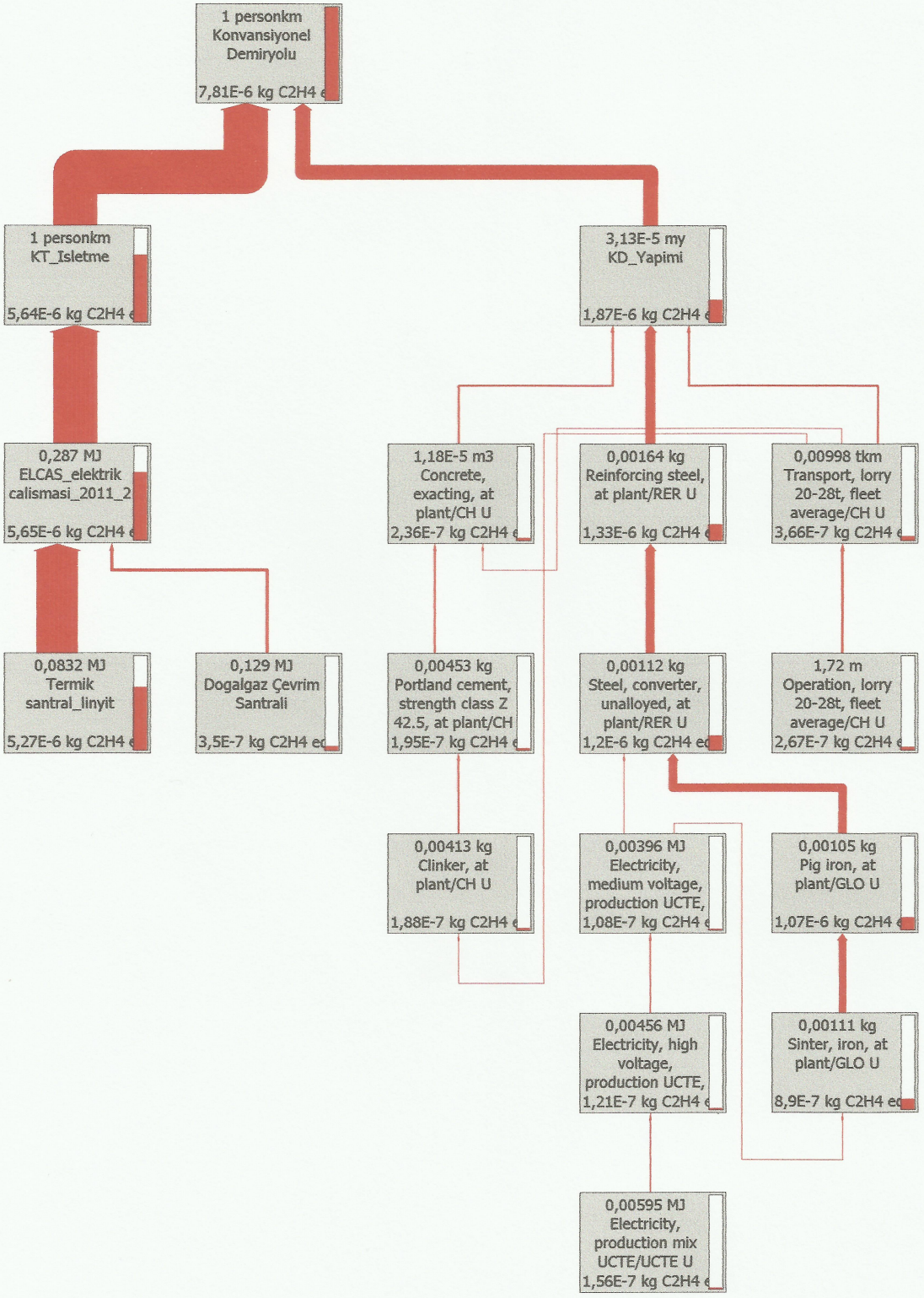
Şekil Ek-4.2.(g) KD'nin yüzey sularına olan toksik etkisinin ağ görünümü

Product:	Konvansiyonel Demiryolu
Project:	1209F145_BAP_Alp
Category:	Transport\Rail
Method:	CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight:	Characterization, Terrestrial ecotoxicity (kg 1,4-DB eq)
Node weight:	Including inputs
Exclude long-term emissions:	No
Node cut-off:	2%



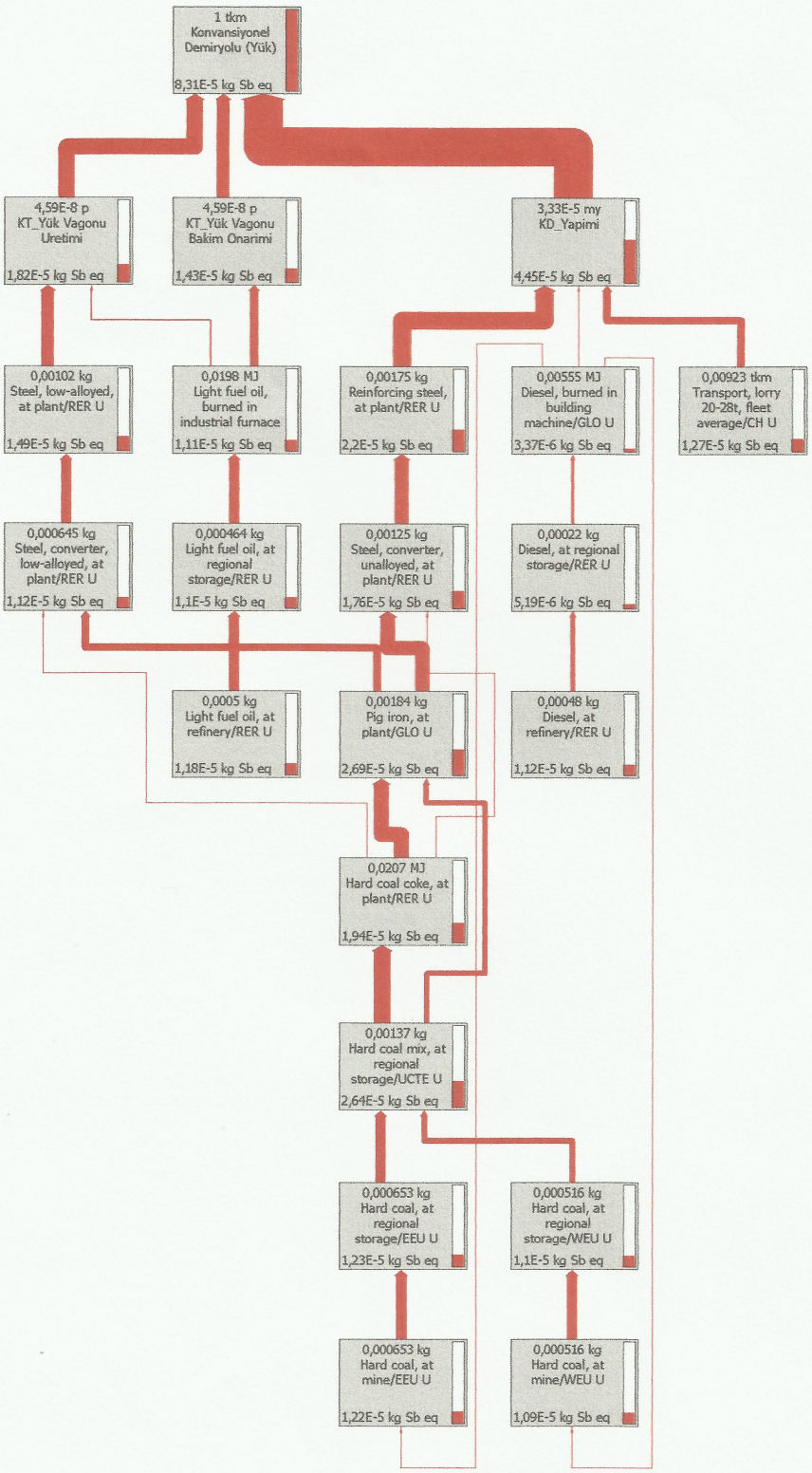
Şekil Ek-4.2.(h) KD'nin kara ekosistemine olan toksik etkisinin ağ görünümü

Product: Konvansiyonel Demiryolu
Project: 1209F145_BAP_Alp
Category: Transport\Rail
Method: CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight: Characterization, Photochemical oxidation (kg C2H4 eq)
Node weight: Including inputs
Exclude long-term emissions: No
Node cut-off: 2%



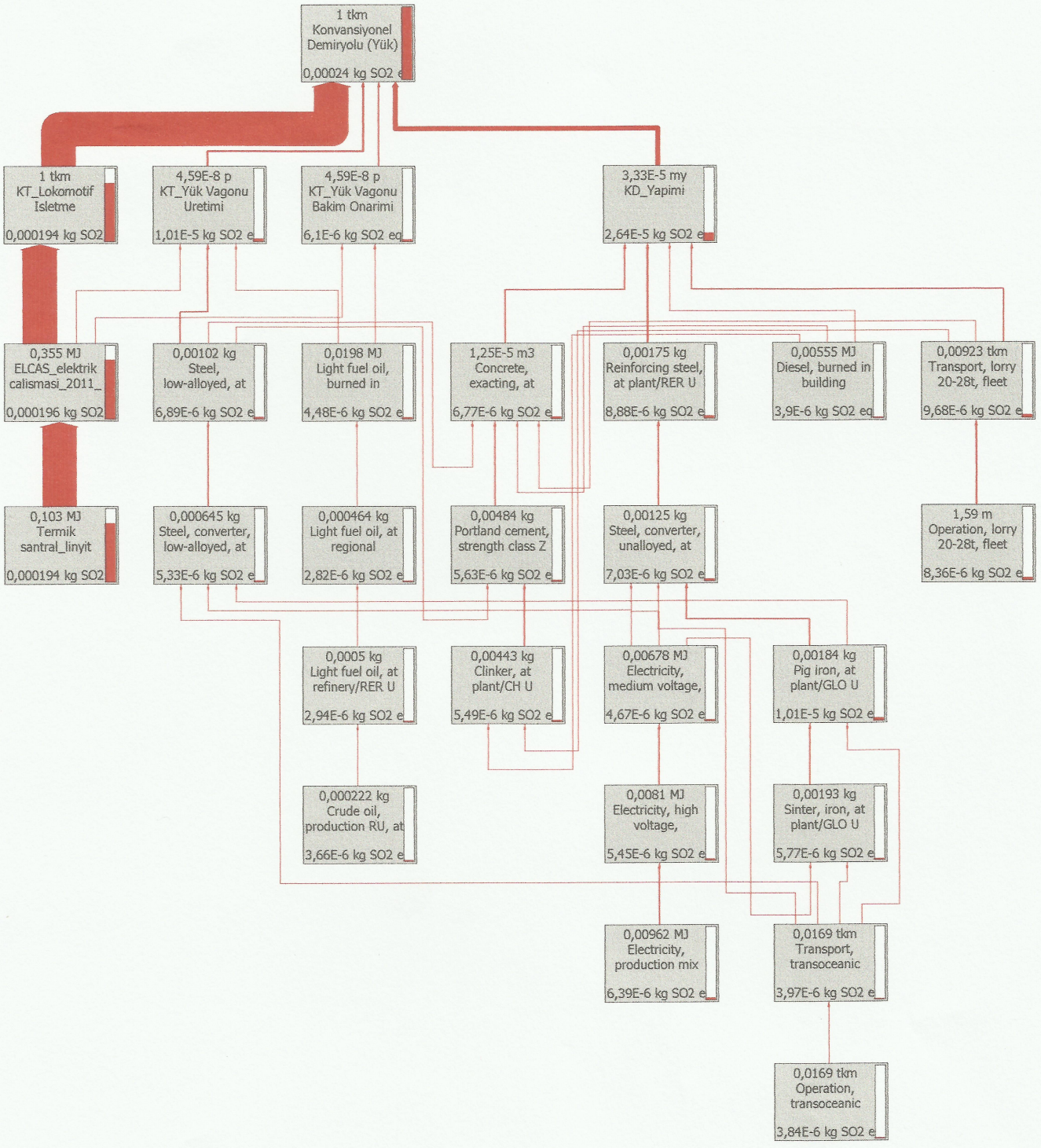
Şekil Ek-4.2.(ı) KD'nin fotokimyasal sis etkisinin ağ görünümü

Product:	Konvansiyonel Demiryolu (Yük)
Project:	1209F145_BAP_Alp
Category:	Transport\Rail
Method:	CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight:	Characterization, Abiotic depletion (kg Sb eq)
Node weight:	Including inputs
Exclude long-term emissions:	No
Node cut-off:	13%



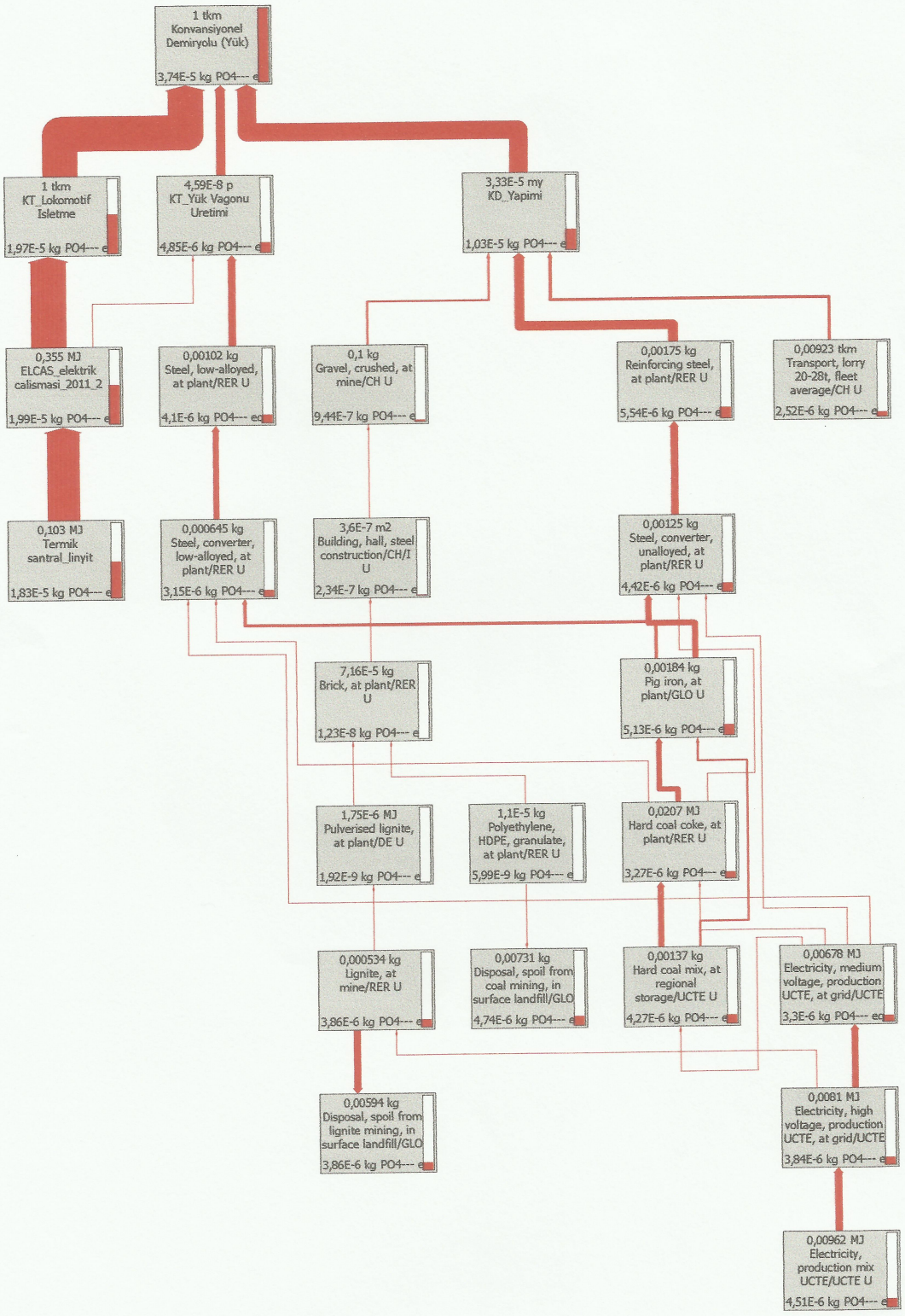
Şekil Ek-4.3.(a) Yük taşımacılığının abiyotik kaynakların tükenmesine olan etkisinin ağ görünümü

Product:	Konvansiyonel Demiryolu (Yük)
Project:	1209F145_BAP_Alp
Category:	Transport\Rail
Method:	CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight:	Characterization, Acidification (kg SO2 eq)
Node weight:	Including inputs
Exclude long-term emissions:	No
Node cut-off:	1,5%



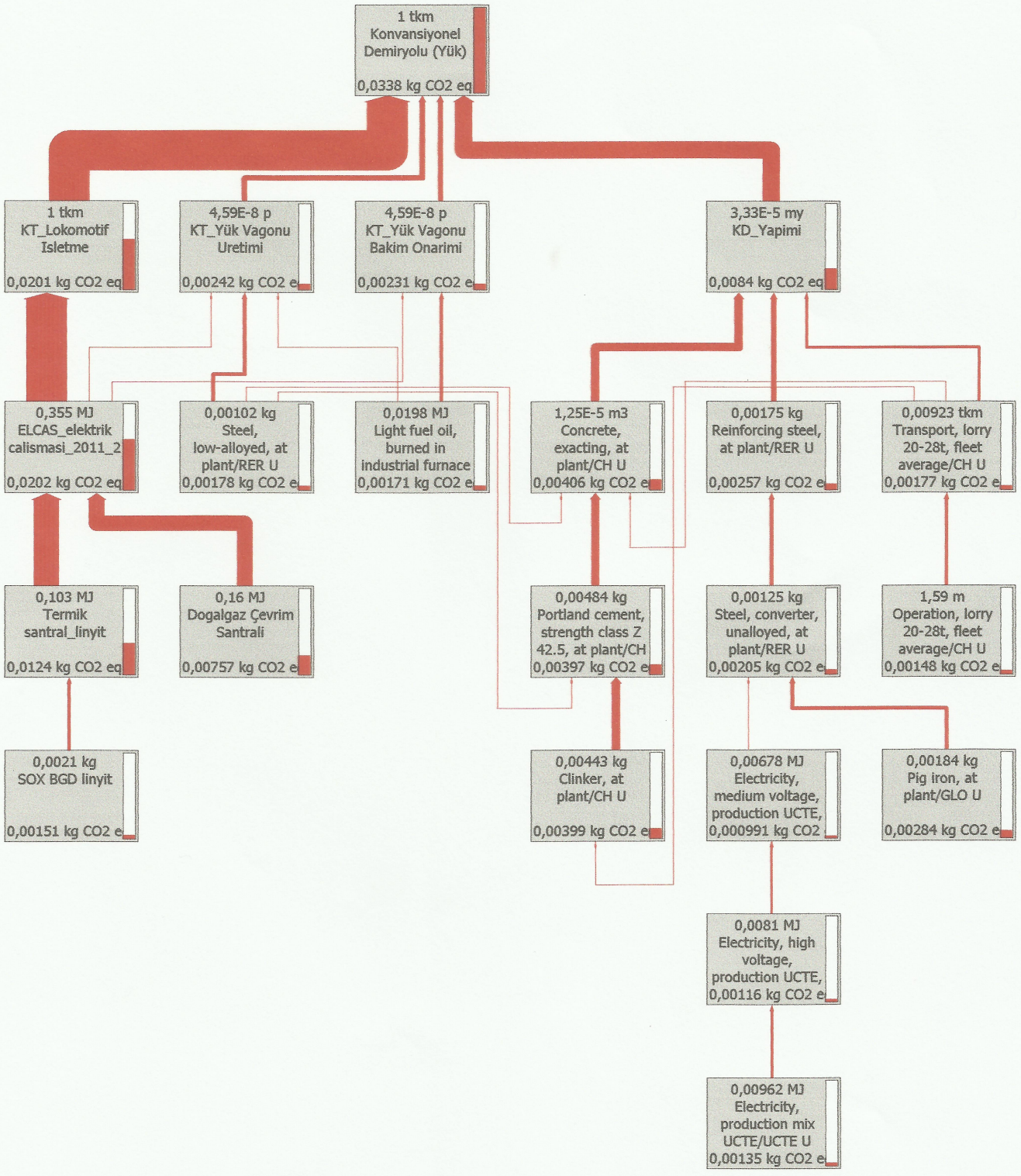
Şekil Ek-4.3.(b) Yük taşımacılığının asidifikasyon etkisinin ağ görünümü

Product:	Konvansiyonel Demiryolu (Yük)
Project:	1209F145_BAP_Alp
Category:	Transport\Rail
Method:	CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight:	Characterization, Eutrophication (kg PO4--- eq)
Node weight:	Including inputs
Exclude long-term emissions:	No
Node cut-off:	6%



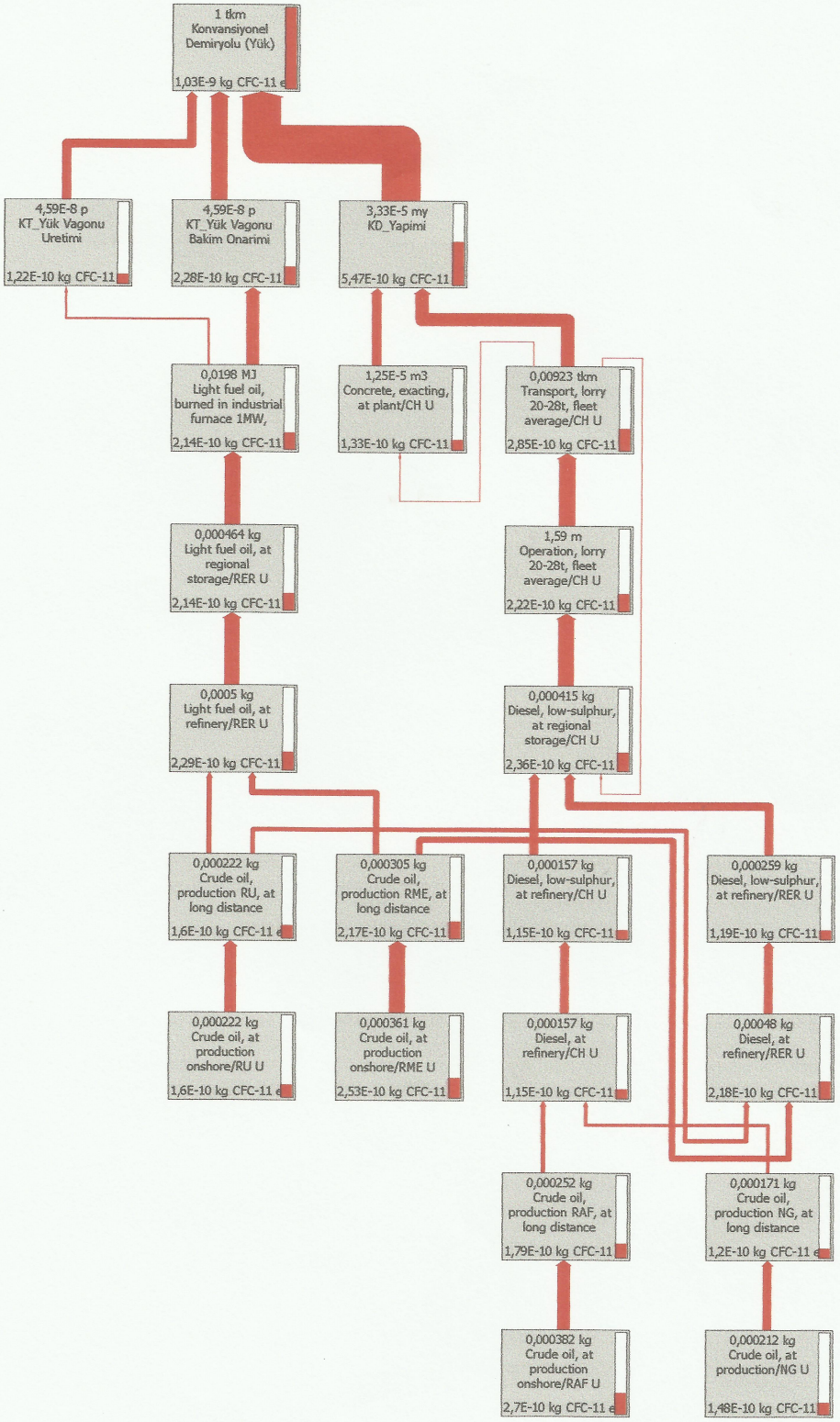
Şekil Ek-4.3.(c) Yük taşımacılığının ötrofikasyon etkisinin ağ görünümü

Product:	Konvansiyonel Demiryolu (Yük)
Project:	1209F145_BAP_Alp
Category:	Transport\Rail
Method:	CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight:	Characterization, Global warming (GWP100) (kg CO2 eq)
Node weight:	Including inputs
Exclude long-term emissions:	No
Node cut-off:	4%



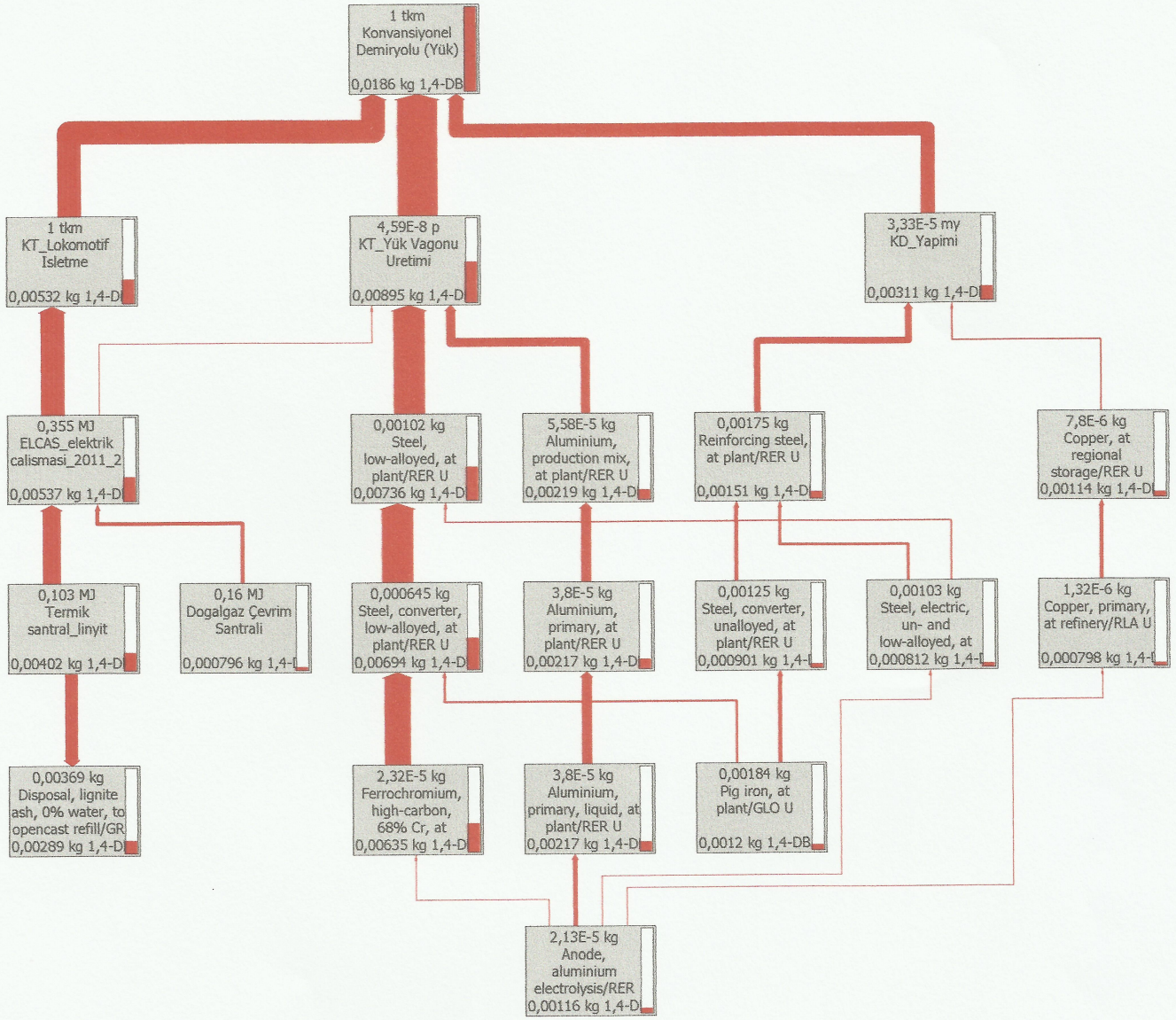
Şekil Ek-4.3.(d) Yük taşımacılığının küresel ısınma etkisinin ağ görünümü

Product:	Konvansiyonel Demiryolu (Yük)
Project:	1209F145_BAP_Alp
Category:	Transport\Rail
Method:	CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight:	Characterization, Ozone layer depletion (ODP) (kg CFC-11 eq)
Node weight:	Including inputs
Exclude long-term emissions:	No
Node cut-off:	11%



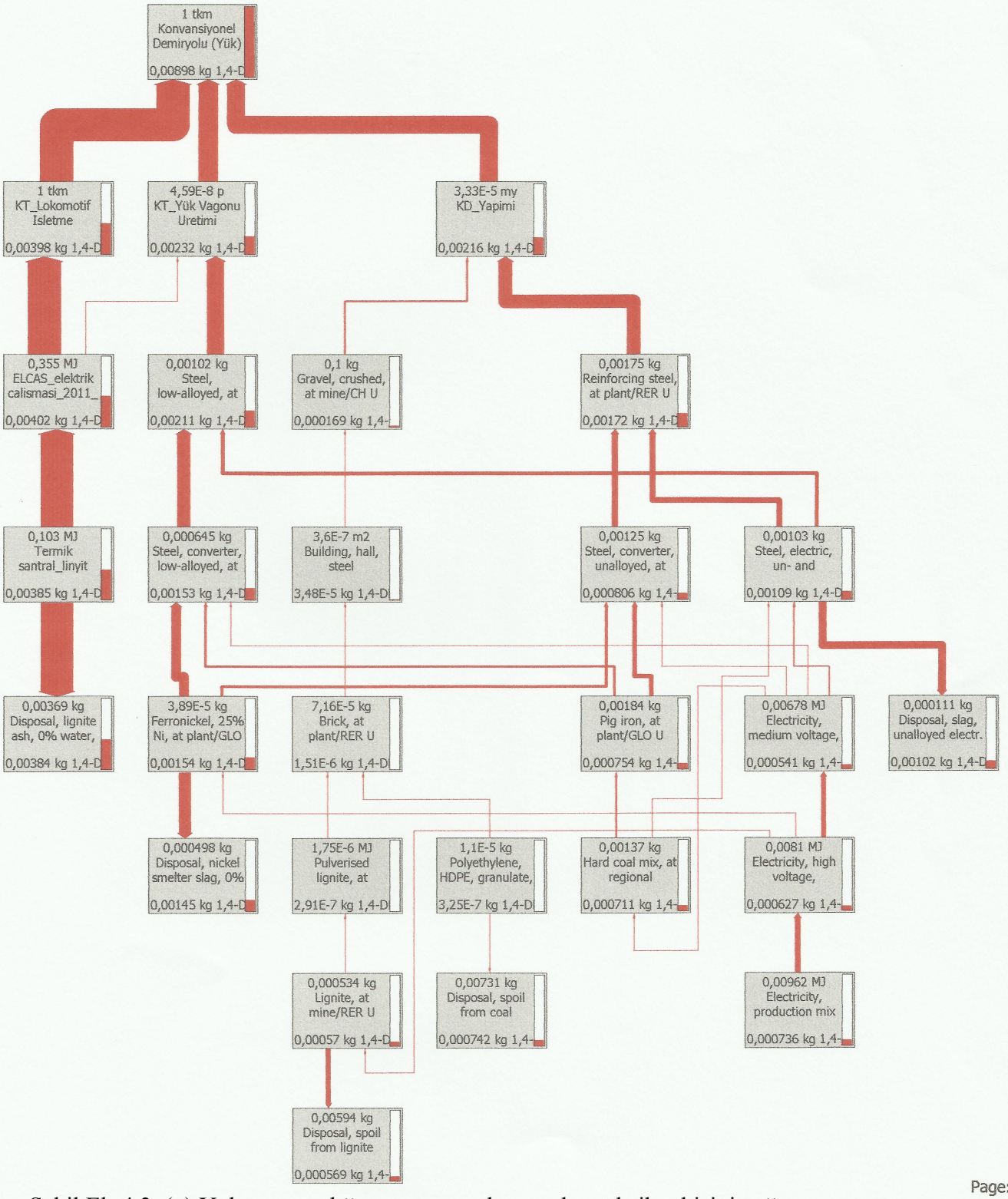
Şekil Ek-4.3.(e) Yük taşımacılığının ozon tabakasının tükenmesine olan etkisinin ağ görünümü

Product:	Konvansiyonel Demiryolu (Yük)
Project:	1209F145_BAP_Alp
Category:	Transport\Rail
Method:	CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight:	Characterization, Human toxicity (kg 1,4-DB eq)
Node weight:	Including inputs
Exclude long-term emissions:	No
Node cut-off:	4%



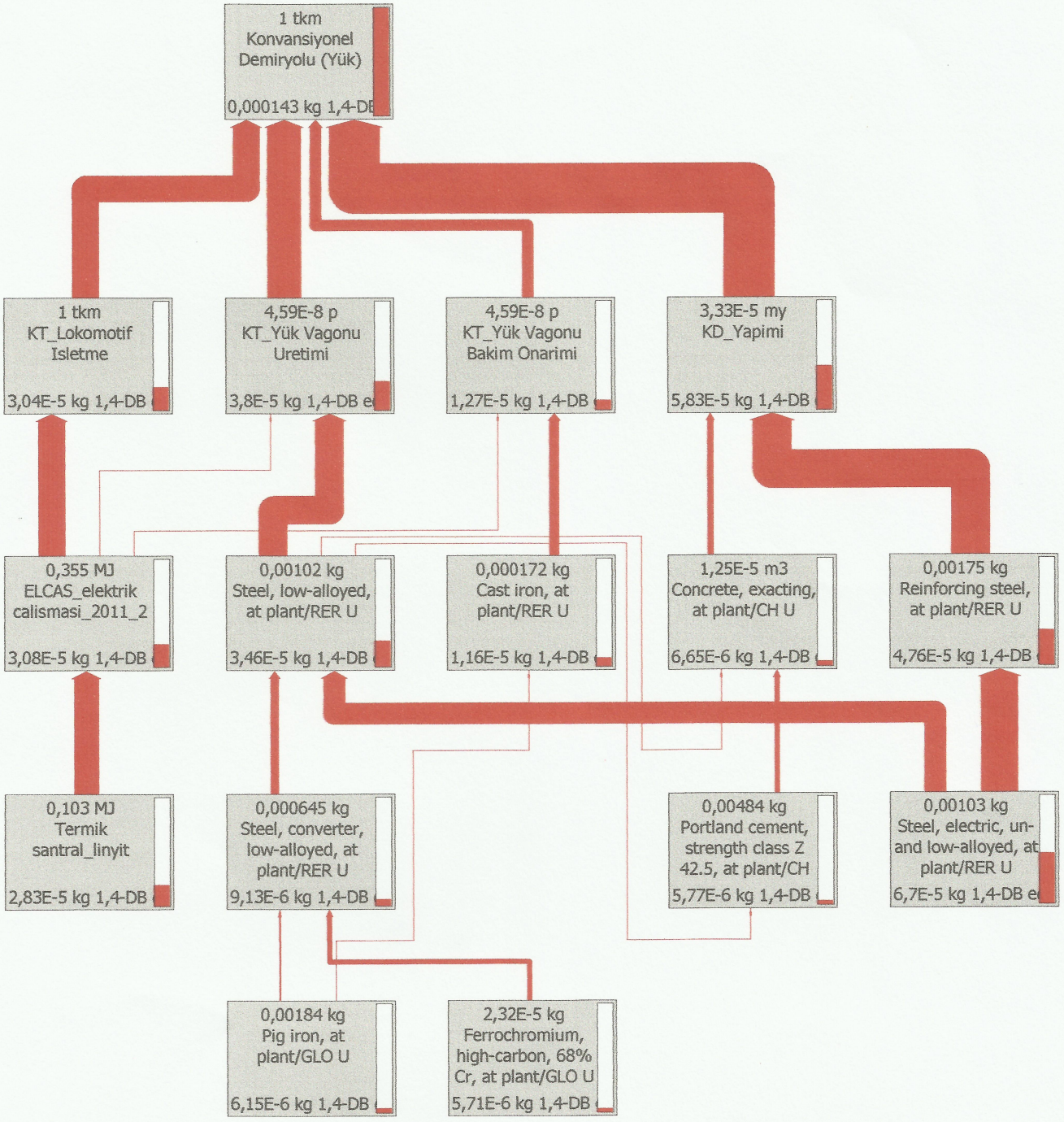
Şekil Ek-4.3. (f) Yük taşımacılığının insanlar üzerine olan toksik etkisinin ağ görünümü

Product:	Konvansiyonel Demiryolu (Yük)
Project:	1209F145_BAP_Alp
Category:	Transport\Rail
Method:	CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight:	Characterization, Fresh water aquatic ecotox. (kg 1,4-DB eq)
Node weight:	Including inputs
Exclude long-term emissions:	No
Node cut-off:	6%



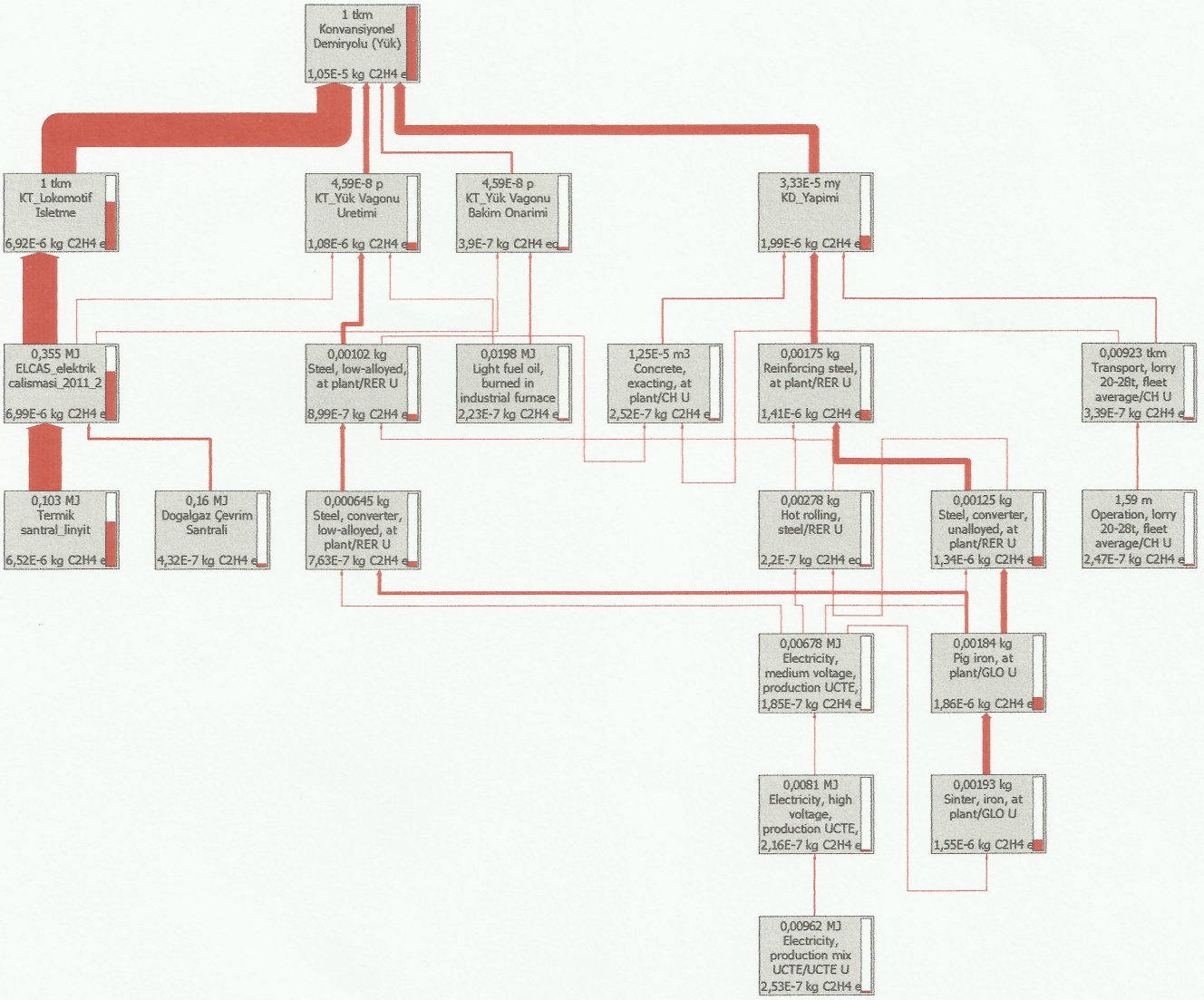
Şekil Ek-4.3. (g) Yük taşımacılığının yüzey sularına olan toksik etkisinin ağ görünümü

Product:	Konvansiyonel Demiryolu (Yük)
Project:	1209F145_BAP_Alp
Category:	Transport\Rail
Method:	CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight:	Characterization, Terrestrial ecotoxicity (kg 1,4-DB eq)
Node weight:	Including inputs
Exclude long-term emissions:	No
Node cut-off:	4%



Şekil Ek-4.3. (h) Yük taşımacılığının kara ekosistemine olan toksik etkisinin ağ görünümü

Product:	Konvansiyonel Demiryolu (Yük)
Project:	1209F145_BAP_Alp
Category:	Transport\Rail
Method:	CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Selected weight:	Characterization, Photochemical oxidation (kg C2H4 eq)
Node weight:	Including inputs
Exclude long-term emissions:	No
Node cut-off:	2%



Şekil Ek-4.3.(1) Yük taşımacılığının fotokimyasal sis etkisinin ağ görünümü

Çizelge Ek-4.1. Demiryolu ulaşımının küresel ısınma etkisinin emisyon envanteri

SimaI Inventory Date: 02.08.2013 Time: 14:04
Proje 1209F145_BAP_Alp

Calcu Compare
Resul Inventory
Produ 1 personkm YHT Demiryolu (of project 1209F145_BAP_Alp)
Produ 1 personkm Konvansiyonel Demiryolu (of project 1209F145_BAP_Alp)
Produ 1 tkm Konvansiyonel Demiryolu (Yük) (of project 1209F145_BAP_Alp)
Meth CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Indic Characterization
Unit: kg CO2 eq
Comp All compartments
Per su No
Skip u No
Categ Global warming (GWP100)
Cut-o 8,1E-6%
Exclu No
Exclu No
Sorte YHT Demiryolu
Sort o Descending

No	Substance	Compartment	Unit	YHT Demiryolu	KD	KD-Yük
	Total of all compartments		kg CO2 eq	2.2E-02	2.5E-02	3.4E-02
	Remaining substances		kg CO2 eq	2.0E-09	1.1E-09	1.3E-09
1	Carbon dioxide, fossil	Air	kg CO2 eq	2.1E-02	2.5E-02	3.3E-02
2	Methane, fossil	Air	kg CO2 eq	4.4E-04	3.4E-04	5.2E-04
3	Dinitrogen monoxide	Air	kg CO2 eq	1.7E-04	8.0E-05	1.1E-04
4	Carbon monoxide, fossil	Air	kg CO2 eq	1.4E-04	1.4E-04	2.1E-04
5	Sulfur hexafluoride	Air	kg CO2 eq	5.7E-05	6.7E-05	1.0E-04
6	Methane, tetrafluoro-, CFC-14	Air	kg CO2 eq	2.1E-05	3.1E-05	5.5E-05
7	Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	Air	kg CO2 eq	7.8E-06	5.3E-06	5.0E-06
8	Methane, biogenic	Air	kg CO2 eq	5.3E-06	5.9E-06	7.5E-06
9	Ethane, hexafluoro-, HFC-116	Air	kg CO2 eq	4.9E-06	7.3E-06	1.3E-05
10	Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-,	Air	kg CO2 eq	5.2E-07	2.8E-07	3.5E-07
11	Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	Air	kg CO2 eq	5.0E-07	3.3E-07	4.7E-07
12	Carbon dioxide, land transformation	Air	kg CO2 eq	1.7E-07	1.1E-07	1.5E-07
13	Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	Air	kg CO2 eq	1.4E-07	8.6E-08	1.8E-07
14	Methane, tetrachloro-, CFC-10	Air	kg CO2 eq	3.8E-08	4.2E-08	5.5E-08
15	Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1	Air	kg CO2 eq	2.4E-08	1.6E-08	3.4E-08
16	Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	Air	kg CO2 eq	1.6E-08	2.1E-08	1.1E-08
17	Carbon dioxide	Air	kg CO2 eq	3.4E-09	5.0E-09	6.2E-09

Çizelge Ek-4.2. Demiryolu ulaşımının yüzey sularına olan toksik etkisinin emisyon envanteri

SimaPro 7. Inventory Date: 02.08.2013 Time: 14:05
Project 1209F145_BAP_Alp

Calculatior Compare
Results: Inventory
Product 1: 1 personkm YHT Demiryolu (of project 1209F145_BAP_Alp)
Product 2: 1 personkm Konvansiyonel Demiryolu (of project 1209F145_BAP_Alp)
Product 3: 1 tkm Konvansiyonel Demiryolu (Yük) (of project 1209F145_BAP_Alp)
Method: CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Indicator: Characterization
Unit: kg 1,4-DB eq
Compartm All compartments
Per sub-co No
Skip unuse No
Category: Fresh water aquatic ecotox.
Cut-off: 0,04%
Exclude in No
Exclude lo No
Sorted on i YHT Demiryolu
Sort order: Descending

No	Substance	Compartment	Unit	YHT Demiryolu	KD	KD-Yük
	Total of all compartments		kg 1,4-DB eq	5.9E-03	5.7E-03	9.0E-03
	Remaining substances		kg 1,4-DB eq	1.8E-05	1.7E-05	2.6E-05
1	Vanadium, ion	Water	kg 1,4-DB eq	1.7E-03	2.0E-03	2.9E-03
2	Nickel, ion	Water	kg 1,4-DB eq	1.6E-03	1.4E-03	2.9E-03
3	Beryllium	Water	kg 1,4-DB eq	1.0E-03	1.0E-03	1.4E-03
4	Cobalt	Water	kg 1,4-DB eq	6.6E-04	6.2E-04	1.0E-03
5	Copper, ion	Water	kg 1,4-DB eq	2.8E-04	1.6E-04	2.2E-04
6	Barium	Water	kg 1,4-DB eq	1.5E-04	2.0E-04	2.5E-04
7	Zinc, ion	Water	kg 1,4-DB eq	1.3E-04	6.8E-05	9.8E-05
8	Selenium	Water	kg 1,4-DB eq	8.0E-05	6.3E-05	8.7E-05
9	Cadmium, ion	Water	kg 1,4-DB eq	3.9E-05	2.0E-05	2.5E-05
10	Molybdenum	Water	kg 1,4-DB eq	3.0E-05	3.2E-05	4.1E-05
11	Thallium	Water	kg 1,4-DB eq	1.5E-05	6.0E-06	9.3E-06
12	Arsenic, ion	Water	kg 1,4-DB eq	1.4E-05	1.2E-05	1.7E-05
13	PAH	Water	kg 1,4-DB eq	1.1E-05	7.2E-06	2.7E-05
14	Chromium VI	Water	kg 1,4-DB eq	9.1E-06	7.9E-06	1.3E-05
15	Vanadium	Air	kg 1,4-DB eq	9.0E-06	7.5E-06	1.1E-05
16	Nickel	Air	kg 1,4-DB eq	7.4E-06	3.8E-06	6.1E-06
17	Copper	Air	kg 1,4-DB eq	4.4E-06	2.0E-06	5.9E-06

Çizelge Ek-4.3. Demiryolu ulaşımının küresel ısınma etkisine proses dağılımının katkısı

SimaP Process contribution 02.08.2013 Time: 14:05
Projec 1209F145_BAP_Alp

Calcul Compare
Result Process contribution
Produ 1 personkm YHT Demiryolu (of project 1209F145_BAP_Alp)
Produ 1 personkm Konvansiyonel Demiryolu (of project 1209F145_BAP_Alp)
Produ 1 tkm Konvansiyonel Demiryolu (Yük) (of project 1209F145_BAP_Alp)
Metho CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Indica Characterization
Unit: kg CO2 eq
Categ Global warming (GWP100)
Cut-of 0,4%
Exclu No
Exclu No
Sorted YHT Demiryolu
Sort o Descending

No	Process	Unit	YHT Demiryolu	KD	KD-Yük
	Total of all processes	kg CO2 eq	2.2E-02	2.5E-02	3.4E-02
	Remaining processes	kg CO2 eq	2.4E-03	1.8E-03	4.4E-03
1	Termik santral_linyit	kg CO2 eq	6.0E-03	8.8E-03	1.1E-02
2	Dogalgaz Çevrim Santrali	kg CO2 eq	4.1E-03	6.1E-03	7.5E-03
3	Clinker, at plant/CH U	kg CO2 eq	3.0E-03	3.5E-03	3.7E-03
4	Operation, lorry >16t, fleet average/RER U	kg CO2 eq	1.3E-03	3.5E-05	6.7E-05
5	Pig iron, at plant/GLO U	kg CO2 eq	1.1E-03	9.0E-04	1.6E-03
6	Operation, lorry 20-28t, fleet average/CH U	kg CO2 eq	8.8E-04	1.4E-03	1.2E-03
7	SOX BGD linyit	kg CO2 eq	8.0E-04	1.2E-03	1.5E-03
8	Diesel, burned in building machine/GLO U	kg CO2 eq	7.4E-04	3.7E-04	4.1E-04
9	Sinter, iron, at plant/GLO U	kg CO2 eq	3.2E-04	2.7E-04	4.7E-04
10	Natural gas, burned in industrial furnace >100kW/R	kg CO2 eq	2.6E-04	1.9E-04	5.5E-04
11	Lignite, burned in power plant/DE U	kg CO2 eq	1.7E-04	1.3E-04	2.1E-04
12	Natural gas, sweet, burned in production flare/MJ/G	kg CO2 eq	1.7E-04	1.1E-04	1.4E-04
13	Quicklime, in pieces, loose, at plant/CH U	kg CO2 eq	1.6E-04	1.4E-04	2.4E-04
14	Hard coal, burned in power plant/DE U	kg CO2 eq	1.4E-04	1.1E-04	1.8E-04
15	Light fuel oil, burned in boiler 10kW, non-modulati	kg CO2 eq	1.4E-04	4.6E-05	4.9E-05
16	Natural gas, vented/GLO U	kg CO2 eq	1.2E-04	8.3E-05	1.0E-04
17	Hard coal, at mine/WEU U	kg CO2 eq	1.2E-04	1.1E-04	1.6E-04
18	Refinery gas, burned in furnace/MJ/RER U	kg CO2 eq	1.1E-04	7.2E-05	1.4E-04
19	Steel, converter, unalloyed, at plant/RER U	kg CO2 eq	1.1E-04	9.3E-05	1.0E-04
20	Operation, transoceanic freight ship/OCE U	kg CO2 eq	9.0E-05	7.6E-05	1.3E-04

Çizelge Ek-4.4. Demiryolu ulaşımının yüzey sularına olan toksik etkisinin proses dağılımının katkısı

SimaPro 7 Process contribution 02.08.2013 Time: 14:07
Project 1209F145_BAP_Alp

Calculatio Compare
Results: Process contribution
Product 1: 1 personkm YHT Demiryolu (of project 1209F145_BAP_Alp)
Product 2: 1 personkm Konvansiyonel Demiryolu (of project 1209F145_BAP_Alp)
Product 3: 1 tkm Konvansiyonel Demiryolu (Yük) (of project 1209F145_BAP_Alp)
Method: CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995
Indicator: Characterization
Unit: kg 1,4-DB eq
Category: Fresh water aquatic ecotox.
Cut-off: 0,1%

No	Process	Unit	YHT Demiryolu	KD	KD-Yük
	Total of all processes	kg 1,4-DB eq	5.9E-03	5.7E-03	9.0E-03
	Remaining processes	kg 1,4-DB eq	1.0E-04	7.7E-05	1.4E-04
1	Disposal, lignite ash, 0% water, to opencast refill/GR	kg 1,4-DB eq	2.1E-03	3.1E-03	3.8E-03
2	Disposal, sulfidic tailings, off-site/GLO U	kg 1,4-DB eq	8.9E-04	2.6E-04	4.1E-04
3	Disposal, slag, unalloyed electr. steel, 0% water, to re	kg 1,4-DB eq	6.4E-04	5.4E-04	1.0E-03
4	Disposal, spoil from coal mining, in surface landfill/G	kg 1,4-DB eq	5.1E-04	4.3E-04	7.4E-04
5	Disposal, nickel smelter slag, 0% water, to residual m	kg 1,4-DB eq	4.8E-04	3.7E-04	1.5E-03
6	Disposal, spoil from lignite mining, in surface landfill	kg 1,4-DB eq	4.8E-04	3.5E-04	5.7E-04
7	Disposal, sludge from steel rolling, 20% water, to resi	kg 1,4-DB eq	2.0E-04	1.7E-04	2.8E-04
8	Disposal, redmud from bauxite digestion, 0% water, t	kg 1,4-DB eq	7.6E-05	1.1E-04	2.0E-04
9	Disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to sanitary l	kg 1,4-DB eq	7.3E-05	3.1E-05	7.0E-06
10	Disposal, tailings from hard coal milling, in impoundr	kg 1,4-DB eq	6.8E-05	5.9E-05	9.7E-05
11	Disposal, uranium tailings, non-radioactive emissions,	kg 1,4-DB eq	4.1E-05	2.3E-05	3.0E-05
12	Disposal, dust, unalloyed EAF steel, 15.4% water, to i	kg 1,4-DB eq	3.6E-05	3.0E-05	5.4E-05
13	Disposal, pollutants from rail ballast, 0% water, to res	kg 1,4-DB eq	2.8E-05	2.0E-05	1.4E-05
14	Discharge, produced water, onshore/GLO U	kg 1,4-DB eq	2.5E-05	1.6E-05	2.5E-05
15	Disposal, steel, 0% water, to municipal incineration/C	kg 1,4-DB eq	2.2E-05	9.6E-06	1.1E-05
16	Disposal, cement, hydrated, 0% water, to residual mat	kg 1,4-DB eq	2.0E-05	1.6E-05	2.4E-05
17	Disposal, lignite ash, 0% water, to opencast refill/PL	kg 1,4-DB eq	1.4E-05	9.9E-06	1.6E-05
18	Disposal, hard coal ash, 0% water, to residual materia	kg 1,4-DB eq	1.1E-05	8.0E-06	1.7E-05
19	Disposal, zinc in car shredder residue, 0% water, to m	kg 1,4-DB eq	9.8E-06	5.1E-06	4.9E-06
20	Disposal, lignite ash, 0% water, to opencast refill/DE	kg 1,4-DB eq	9.2E-06	6.7E-06	1.1E-05
21	Disposal, lignite ash, 0% water, to opencast refill/CS	kg 1,4-DB eq	6.9E-06	5.0E-06	8.2E-06
22	Hot rolling, steel/RER U	kg 1,4-DB eq	6.6E-06	5.6E-06	9.1E-06
23	Copper, primary, at refinery/RLA U	kg 1,4-DB eq	6.1E-06	1.7E-06	2.3E-06