KOCAELİÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

LPG DOLUM SÜRECİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ İLE BELİRLENMESİ

EDA ŞİŞMAN

KOCAELİ 2023

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

LPG DOLUM SÜRECİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ İLE BELİRLENMESİ

EDA ŞİŞMAN

Prof.Dr. Beyhan PEKEY .....
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof. Dr. Aykan KARADEMİR .....
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Doç. Dr. Aliye Suna ERSES YAY .....
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.

Tezin Savunulduğu Tarih: 14.04.2023

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmasında,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

■ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler ..... tarafından ..... no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....
(İmza)
Eda Şişman

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki makale, kitap, tebliğ, lisans, patent gibi çalışmalarda kullanımı, danışmanımın isim hakkı saklı kalmak koşuluyla ve her iki tarafın bilgisi dâhilinde bana ait olacaktır.
Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.
Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan ***"Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge"*** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
■ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

.....
(İmza)
Eda Şişman

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜRLER

Küresel ısınma ve iklim değişikliği başta olmak üzere fosil yakıtların çevre üzerinde birçok zararlı etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Yaşam döngüsü değerlendirilmesi ile fosil yakıtların sebep olduğu çevresel etkilerin belirlenmesi ve mevcut en iyi teknolojilerin uygulanması, sürdürülebilirlik için de büyük önem taşımaktadır. LPG'nin diğer fosil yakıtlara kıyasla daha az kirlilik yayması ve Türkiye'de yaygın olarak tercih edilen araç yakıtlarının başında gelmesi sebebiyle bu tez çalışmasında LPG dolum sürecinin yaşam döngüsü değerlendirmesi gerçekleştirerek literatürdeki eksikliklerin giderilmesi amaçlanmıştır.

Başta tez konumun belirlenmesi olmak üzere tez sürecim boyunca desteklerini esirgemeyen, lisans öğrenimimden itibaren bilgi ve birikimiyle bana yol gösteren değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Beyhan PEKEY'e,

Tez çalışmalarımda verilerin işlenmesi aşamasında bana destek olan, her türlü sorumu yanıtlayan ve güler yüzünü hiç eksik etmeyen değerli hocam Simge ÇANKAYA'ya,

Veri temini kısmında desteklerini esirgemeyen Aygaz A.Ş.'den Mehmet Fevzi ÇİTİL, Burak YAMAN, Gülin ÖZİLKİZ, Masoud TEYMOURFAMIANASL'a, Betül BULUT'a, Ertan KEÇECİ'ye ve Zeynep UYAN UÇAR'a,

Tez çalışmam boyunca sabrını ve desteğini eksik etmeyen eşim Emin ŞİŞMAN'a,

Hayatımın her aşamasında bana her daim güvenen ve inanan, beni bu günlere getiren canım aileme sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Nisan 2023 Eda ŞİŞMAN

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜRLER iii
İÇİNDEKİLER iv
ŞEKİLLER DİZİNİ v
TABLOLAR DİZİNİ vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vii
ÖZET viii
ABSTRACT ix
1. GİRİŞ 1
2. GENEL BİLGİLER 4
2.1. Sıvılaştırılmış Petrol Gazı (LPG) 4
2.1.1. LPG'nin Özellikleri 6
2.1.2. LPG'nin Üretimi 9
2.1.2.1. Doğal Gazdan LPG Üretimi 9
2.1.2.2. Petrol Rafinerisi Sonucu LPG Üretimi 13
2.1.2.3. BioLPG Üretimi 14
2.1.3. LPG'nin Dağıtımı 15
2.1.4. LPG'nin Kullanım Alanları 17
2.1.4.1. Evsel Kullanım 18
2.1.4.2. Ulaşımda Kullanım 18
2.1.4.3. Endüstriyel Kullanım 21
2.2. Yaşam Döngüsü Değerlendirme (YDD) Nedir? 22
2.2.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinin Kısa Tarihi 23
2.2.2. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinde Kullanılan Yazılımlar 24
2.3. Literatürdeki Benzer Çalışmalar 28
3. MATERYAL VE YÖNTEM 34
3.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirme Metodolojisi 34
3.1.1. Amaç, Kapsam ve Fonksiyonel Birim Belirleme 34
3.1.2. Yaşam Döngüsü Envanter Analizi 39
3.1.3. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirme 44
3.1.4. Yaşam Döngüsü Yorumlama 55
3.1.5. Belirsizlik Analizi 55
4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER 57
4.1. LPG Tanker Dolumunun Karakterizasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi 57
4.2. LPG Tüp Dolumunun Karakterizasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi 60
4.3. Kokulandırıcı Teminine Bağlı Olarak Karşılaştırmalı Karakterizasyon ve Normalizasyon Sonuçları 63
4.4. Tanker Dolum ve Tüp Dolum Prosesinin Karşılaştırılması 65
4.5. Tesiste Dolumu Yapılan LPG'nin Taşıtlarda Kullanılması 67
4.6. Belirsizlik Analizi Sonuçları 70
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 72
KAYNAKLAR 75
EKLER 82
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 90
ÖZGEÇMİŞ 91

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1. Küresel LPG tüketiminin yıllara göre değişimi 4
Şekil 2. 2. 2020 yılı küresel LPG kullanımının bölgesel dağılımı. 5
Şekil 2. 3. 2020 yılı Avrupa ülkeleri LPG tüketimi 5
Şekil 2. 4. Doğal gazın yapısında bulunan bileşenler 11
Şekil 2. 5. Doğal gaz saflaştırma prosesi 12
Şekil 2. 6. Petrol distilasyon ünitesi şematik gösterimi 14
Şekil 2. 7. LPG'nin dağıtım ağı 16
Şekil 2. 8. Küresel LPG kullanımının sektörel dağılımı 17
Şekil 2. 9. Türkiye LPG kullanımının sektörel dağılımı 18
Şekil 2. 10. 2000-2019 yılları için küresel otogaz tüketim değerleri 19
Şekil 2. 11. 2019 yılı ülkelere göre LPG'li araç sayısı 20
Şekil 2. 12. Türkiye LPG'li araç sayıları 20
Şekil 2. 13. SimaPro'nun sahip olduğu veri tabanları 27
Şekil 2. 14. SimaPro'nun sahip olduğu bazı metotlar 28
Şekil 3. 1. Yaşam döngüsü değerlendirme metodolojisi 34
Şekil 3. 2. Yaşam döngüsü değerlendirme aşamaları 35
Şekil 3. 3. YDD çalışmasının sistem sınırı ve LPG dolum prosesi akım şeması 38
Şekil 3. 4. Yaşam döngüsü envanter analizi aşamaları 39
Şekil 3. 5. YDD sistem sınırı ve ölçülen tipik girdi/çıktılar 40
Şekil 3. 6. Yaşam döngüsü etki değerlendirme aşamaları 44
Şekil 4. 1. Etil merkaptan katkılı 1 ton LPG dolumu ve Greenodor katkılı 1 ton LPG dolumunun karakterizasyon sonuçları 57
Şekil 4. 2. Etil merkaptan katkılı 1 ton LPG ve Greenodor katkılı 1 ton LPG tüp dolumunun karakterizasyon sonuçları 61
Şekil 4. 3. Etil merkaptan ve Greenodor tüketimine bağlı olası çevresel etkilerin karşılaştırılması 63
Şekil 4. 4. Etil merkaptan ve Greenodor katkı maddelerinin normalizasyon sonuçlarının karşılaştırılması 64
Şekil 4. 5. Katkı analizi sonuçları 64
Şekil 4. 6. LPG tanker dolum ve tüp dolum proseslerinin karakterizasyon sonuçlarının karşılaştırılması 65
Şekil 4. 7. Fotokimyasal oksidasyon, insan toksisitesi ve küresel ısınma potansiyeli etki kategorisi üzerinde katkısı olan prosesler 66
Şekil 4. 8. Tanker ve tüp dolum normalizasyon sonuçlarının karşılaştırılması 67
Şekil 4. 9. Etil merkaptan katkılı 1 ton LPG'nin araçta tüketiminin karakterizasyon sonuçları 68
Şekil 4. 10. Etil merkaptan katkılı 1 ton LPG'nin araçta tüketiminin normalizasyon sonuçları 69
Şekil 4. 11. LPG tanker dolumu için karakterizasyon sonuçlarının A-B yaklaşımı sonuçları 70
Şekil 4. 12. LPG tüp dolumu için karakterizasyon sonuçlarının A-B yaklaşımı sonuçları 71

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2. 1. LPG'nin ana bileşenleri 6
Tablo 2. 2. Ticari LPG'nin tipik özellikleri 7
Tablo 2. 3. %60 bütan %40 propan içeren LPG'nin tipik özellikleri 8
Tablo 2. 4. Ülkelerdeki propan ve bütan karışım oranları 9
Tablo 2. 5. Doğal gazın yapısında bulunan hidrokarbonların tipik analizi ve bileşim aralığı 10
Tablo 2. 6. Bazı YDD yazılım araçlarının karşılaştırılması 25
Tablo 3. 1. Bazı çok sektörlü yaşam döngüsü envanteri veri tabanları 42
Tablo 3. 2. LPG tanker ve tüp dolum için girdi ve çıktılar 43
Tablo 3. 3. Yaşam döngüsü etki değerlendirme aşamasında sıklıkla kullanılan etki kategorileri 45
Tablo 3. 4. Yaşam döngüsü etki değerlendirme metotları 48
Tablo 4. 1. Etil merkaptan katkılı LPG ve Greenodor katkılı LPG tanker dolum karakterizasyon sonuçlarının karşılaştırılması 59
Tablo 4. 2. Etil Merkaptan ve Greenodor tüketiminin karakterizasyon sonuçları üzerindeki katkılarının karşılaştırılması 60
Tablo 4. 3. Etil Merkaptan ve Greenodor tüketiminin karakterizasyon sonuçları üzerindeki katkılarının karşılaştırılması 62

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

CFC	: Kloroflorokarbon
CH_3Br	: Metilbromid
CH_4	: Metan
CML-IA	: Center of Environmental Science (Çevre Bilimleri Merkezi)
CNG	: Compressed Natural Gas (Sıkıştırılmış Doğal Gaz)
CO_2	: Karbondioksit
EPD	: Environmental Product Statement (Çevresel Ürün Beyanı)
GHG	: Greenhouse Gas (Sera Gazı)
HCL	: Hidroklorik asit
HF	: Hidroflorik asit
HFCF	: Hidrokloroflorokarbon
ILCD	: International Life Cycle Data System (Uluslararası Yaşam Döngüsü Veri Sistemi)
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change (Hükûmetlerarası İklim Değişikliği Paneli)
ISO	: International Organization for Standardization (luslararası Standartlar Teşkilatı)
LPG	: Liquefied Petroleum Gas (Sıvılaştırılmış Petrol Gazı)
MC	: Monte Carlo
NGL	: Natural Gas Liquids (Doğalgaz Sıvıları)
NH_4	: Amonyak
NMHC	: Metan olmayan hidrokarbon
NO	: Nitrojen oksit
NO_2	: Nitrojen dioksit
NO_x	: Nitrojen oksitler
PO4	: Fosfat
REPA	: Resource and Environmental Profile Analysis (Kaynak ve Çevresel Profil Analizi)
SETAC	: Society of Environmental Toxicology and Chemistry (Çevresel Toksikoloji ve Kimya Derneği)
SO_x	: Sülfüroksitler
UNEP	: United Nations Environment Programme (Birleşmiş Milletler Çevre Programı)
USEPA	: U.S. Environmental Protection Agency (ABD Çevre Koruma Ajansı)
WLPGA	: World LPG Agency (Dünya LPG Ajansı)
YDD	: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi
YDEA	: Yaşam Döngüsü Envanter Analizi
YDED	: Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirme
YDY	: Yaşam Döngüsü Yönetimi

LPG DOLUM SÜRECİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ İLE BELİRLENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, Türkiye'de LPG depolayan ve dolum yapan bir tesiste LPG'nin olası çevresel etkileri, ISO 14040 ve ISO 14044 standartları kapsamında yaşam döngüsü değerlendirilmesi (YDD) yaklaşımı ile belirlenmiştir. Bu YDD'nin amacı, kükürt içeren (etil merkaptan) ve kükürt içermeyen (Greenodor) kokulandırıcı madde katkılı LPG'nin depolanması ve doldurulması süreçlerinin çevre üzerindeki potansiyel etkilerinin belirlenmesi ve karşılaştırmalı olarak yorumlanmasıdır. Bu doğrultuda potansiyel çevresel etkiler on bir farklı etki kategorisi için hesaplanmıştır. Çalışmanın kapsamı, LPG'nin temini, kokulandırıcı madde temini ve tüketimi, LPG dolumu ve son kullanıcıya ulaştırılması süreçlerini içeren "tanktan tekerleğe" olarak belirlenmiştir. Çalışmanın fonksiyonel birimi "1 ton LPG dolumu" olarak seçilmiştir. SimaPro (v.9.2) yazılımı kullanılmış ve CML-IA yöntemi kullanılarak etki değerlendirmesi yapılmıştır. Karakterizasyon sonuçlarına göre, tüm etki kategorilerinde en yüksek etkiye yurtdışı nakliye sürecinin sahip olduğu belirlenmiştir. Kokulandırıcı maddelerin LPG'ye çok düşük oranda ilave edilmesi sebebiyle çevresel etkiler, karakterizasyon sonuçlarında diğer prosesler tarafından bastırılmıştır. Bu nedenle her iki kokulandırıcı madde tüketiminin yüzde katkısı karşılaştırılmış ve Greenodor'un tüm orta nokta etki kategorilerinde daha düşük çevresel etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Her iki dolum prosesi için en yüksek katkıya sahip etki kategorisi %79'luk oranla fotokimyasal oksidasyon olmuştur. En düşük katkı ise tanker dolum için %18 ve tüp dolum için %19'luk oranla küresel ısınma etkisi olarak belirlenmiştir. Son olarak, çalışmanın güvenilirliğini göstermek için Monte Carlo simülasyonuna dayalı belirsizlik analizi yapılmış, LPG tanker dolumu için sonuçlar, Greenodorun tüm orta nokta kategorilerinde etil merkaptandan önce geldiğini, LPG tüp dolumu için ise iki kokulandırıcı arasında önemli bir fark olmadığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Sıvılaştırılmış Petrol Gazı (LPG), Tanker Dolum, Tüp Dolum, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD).

DETERMINING THE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF THE LPG FILLING PROCESS WITH A LIFE CYCLE ASSESSMENT

ABSTRACT

In this study, the potential environmental impacts of LPG in a facility that stores and fills LPG in Turkey were determined by life cycle assessment (LCA) within the scope of ISO 14040 and ISO 14044 standards. The purpose of this LCA is to identify and comparatively interpret the potential environmental impacts of the processes of storing and filling LPG with sulphur-containing (ethyl mercaptan) and sulphur-free (Greenodor) odorants. The potential environmental impacts of LPG were calculated for eleven different impact categories. The scope of the study was identified as "tank-to-wheel", which includes the processes of supplying LPG, supplying and consuming odorants, filling of LPG and delivery to end users. The functional unit of the study was chosen as "1 ton LPG filling". SimaPro (v.9.2) software was used for LCA, and impact assessment was made using CML-IA baseline method. According to the characterization results, it was identified that the overseas transportation process had the highest impact compared to all impact categories. Due to the very low addition of odorants to LPG, their environmental impacts were suppressed by other processes. For this reason, the percentage contribution of consumption of both odorants was compared and it turned out that Greenodor had a lower environmental impact in all midpoint impact categories. The impact category with the highest difference for both tanker and cylinder filling was photochemical oxidation with a rate of 79%. The lowest difference was determined as the category of global warming impact with 18% for tanker filling and 19% for cylinder filling. Finally, an uncertainty analysis based on Monte Carlo (MC) simulation was performed to demonstrate the reliability of the study. According to the results of the uncertainty analysis in LPG tanker filling, Greenodor preceded ethyl mercaptan for all mid-point categories. However, there was no significant difference between the two odorants for LPG cylinder filling.

Keywords: Liquefied Petroleum Gas (LPG), Tanker Filling, Cylinder Filling, Life Cycle Assessment (LCA)

1. GİRİŞ

Son yıllarda sürdürülebilirlik kavramının gündeme gelmesi ile birlikte hammadde kaynaklarımızın azalması, enerji tüketimi, çevresel kirlilik gibi konulara olan eğilim giderek artmıştır. Bunun bir sonucu olarak sürdürülebilir bir üretim ve tüketim için oldukça önemli olan yaşam döngüsü çalışmaları önem kazanmıştır. Yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD), bir ürünün hammaddesinin çıkarılması, işlenmesi, üretimi, nakliyesi, tüketiciler tarafından kullanılması, kulanım ömrünü tamamladıktan sonra bertaraf edilmesi ve geri kazanılması aşamaları için çevreye olan etkileri hesaplayan bir metodolojidir. Bu çalışmada LPG (sıvılaştırılmış petrol gazı) depolayan ve dolum yapan bir tesiste LPG dolum sürecine yönelik yaşam döngüsü analizi yapılmıştır.

LPG, ilk olarak 1910 yılında Snelling tarafından benzinin uçuculuğu üzerine yaptığı çalışmalar sırasında elde edilmiştir (Gorup ve diğ., 2021). 20. yüzyılın başlarında yaygın olarak yemek pişirme ve aydınlatma amaçlı kullanılan LPG, kısa bir süre sonra LPG'nin içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılabilmesi ile gündeme gelmiştir. 1970'li yıllarda yaşanan petrol krizleri ve artan petrol fiyatları nedeniyle alternatif yakıt olarak tercih edilmiş ve LPG'li araç sayısında önemli bir artış olmuştur. Taşınabilirliği, farklı tedarik kaynaklarına ve rezervlerine sahip olması, diğer petrol bazlı yakıtlara göre güvenli ve ekonomik olması nedeniyle geçmişten günümüze birçok alanda kullanılmaktadır (Ryskamp, 2017). Günümüzde LPG, pişirme, ısıtma ve taşıt araçlarında yakıt olarak kullanılmasının yanı sıra aerosol itici ve soğutucu olarak kullanılmaktadır (Viswanathan, 2017).

Basınç altında sıvılaştırılan propan ve bütan gibi hidrokarbonlar veya bunların karışımından oluşan LPG'nin içeriğinde eser miktarda metan, etan, pentan, penten ve etilen bulunabilmektedir (Shipman, 2002). Küresel olarak üretilen LPG'nin yaklaşık %60'ı doğal gazın kuyulardan çıkarılması sırasında, geri kalan %40'ı ise ham petrolün rafineri işlemleri sırasında elde edilmektedir. LPG'nin bir diğer oluşum kaynağı ise özellikle son yıllarda gündemde olan, yenilenebilir kaynaklardan ve atıklardan elde edilen BioLPG'dir (EPDK, 2018). Bu kaynaklardan elde edilen LPG, farklı yollar ile taşınarak depolama ve dolum terminallerine iletilmektedir. Depolama terminallerinde LPG, silindirik veya küre şeklindeki basınçlı tanklarda depolanmaktadır. Dolum tesislerine gönderilen LPG ise mutfak tüpü, sanayi tüpü veya piknik tüplerine doldurularak dağıtıma

hazır hale getirilmektedir. Hazırlanan LPG tüpleri, açık kasalı kamyonlar ile bayilere taşınmaktadır. LPG, tüp dışında dökme olarak da taşınabilmektedir. Bu yol ile karayolu tankerleri vasıtasıyla tüketicilere veya otogaz istasyonlarına ulaştırılmaktadır. Son kullanıcıya tüplü veya dökme olarak teslim edilen LPG, ev, sanayi veya otogaz istasyonları gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır.

Dünya LPG Ajansı (WLPGA) tarafından 2021 yılında yayınlanan Küresel LPG İstatistiksel İncelemeye göre, dünya çapında LPG tüketimi 2010'dan 2019'a kadar sürekli artmaya devam etmiştir. Ülkeler bazında LPG tüketimi incelendiğinde Rusya, 4,4 milyon ton tüketim miktarı ile ilk sırada yer alırken, Türkiye 3,9 milyon ton tüketim miktarı ile ikinci sırada yer almaktadır. 2020 yılında dünyada tüketilen LPG'nin büyük çoğunluğu (%44) evsel amaçlı kullanılmaktadır (WLPGA & Argus Media, 2021). Türkiye'deki LPG tüketim oranları, küresel sektörel dağılıma göre önemli farklılıklar göstermektedir. Küresel dağılımda en büyük tüketim oranı evsel kullanıma aitken, Türkiye'de ulaşım kaynaklı kullanımlar %80'lik bir oranla en büyük paya sahiptir. 2021 yılı verilerine göre, Türkiye otogaz tüketiminde Avrupa genelinde ikinci sırada yer almaktadır (Dizemen ve diğ., 2022).

Düşük sera gazı emisyonlarına neden olan LPG, diğer petrol bazlı yakıtlara göre yanma sonucu daha az zehirli ürünler üretmesi ve bileşiminde ağır metaller içermemesi nedeniyle daha çevre dostu bir alternatif olarak görülmektedir (Gorup ve diğ., 2021). IPCC'ye (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli) göre LPG, benzin ve dizele kıyasla daha düşük CO_2 eşd. (karbondioksit eşdeğeri) emisyonlarına sahiptir (IPCC, 2006). Bunun nedeni, LPG'nin yandıktan sonra daha düşük seviyelerde CO (karbon monoksit), HC (hidrokarbon) ve NO_x (azot oksitler) emisyonları oluşturmasıdır (Bahattin Çelik ve diğ., 2006).

Ülkemizde LPG'nin otogaz olarak kullanım yaygınlığı ve dünya genelinde sıklıkla tercih edilen petrol kökenli yakıtlara kıyasla daha az kirlilik yayması sebebiyle LPG'nin yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) ile olası çevresel etkilerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Literatürde dizel, benzin, LPG gibi fosil yakıtların çevresel etkilerinin belirlenmesine dayalı çok sayıda YDD çalışması bulunmaktadır (Kim ve diğ., 2021; Shahrier ve diğ., 2020.; Yang ve diğ., 2016; Yeo ve diğ., 2022). Fosil yakıtlar ile biyodizel gibi organik yakıtların karşılaştırılmasına dayalı çeşitli çalışmalar (Morais ve diğ., 2010;

Nanaki & Koroneos, 2012) yapılmıştır. Sonuçlar, LPG'nin üretim aşamasından kullanım aşamalarına kadar yaygın olarak kullanılan diğer fosil yakıtlara kıyasla çevre açısından daha iyi olduğunu göstermektedir (Shahrier ve diğ., 2020; Kim ve diğ., 2021).

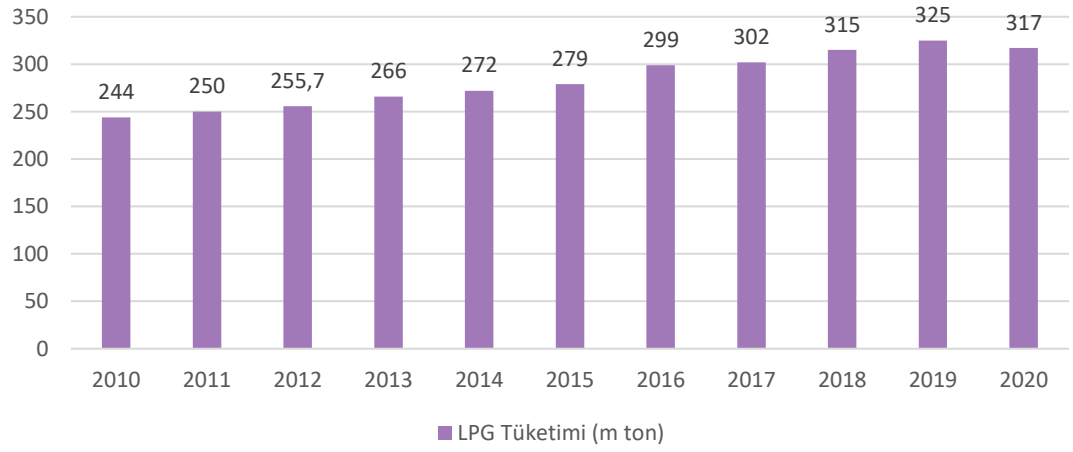
Bu çalışmada, Türkiye'de LPG depolayan ve dolum yapan bir tesiste LPG'nin olası çevresel etkileri, ISO 14040 ve ISO 14044 standartları kapsamında yaşam döngüsü değerlendirilmesi (YDD) ile belirlenmiştir. LPG'nin herhangi bir sızıntı durumunda fark edilmesi için dolum işlemi sırasında LPG'ye kokulandırıcı madde olarak etil merkaptan ilave edilmektedir. Etil merkaptan LPG tüketimi sırasında yanma reaksiyonu sonucu SO_2 (kükürt dioksit) emisyonuna neden olduğundan, çalışmanın yürütüldüğü tesiste Greenodor adı verilen SO_2 emisyonuna sebep olmayan alternatif bir kokulandırıcı madde kullanımına başlanmıştır. Çalışmanın amacı, LPG'nin kokulandırılmasında kullanılan etil merkaptan ve Greenodor'un çevre üzerindeki olası etkilerinin belirlenmesi ve karşılaştırılmasıdır. Çalışmanın kapsamı LPG'nin nakliyesi, kokulandırıcı maddenin nakliyesi (etil merkaptan ve Greenodor), tesis faaliyetleri sırasında kokulandırıcı maddenin tüketimi (etil merkaptan ve Greenodor), LPG dolumu ve dolum sonrası LPG'nin müşterilere iletilmesi süreçlerini içeren "depodan tekerleğe" olarak belirlenmiştir. Çalışmanı amaç ve sistem sınırına bağlı olarak fonksiyonel birim "1 ton LPG dolumu" seçilmiştir. Ardından, LPG depolama ve dolumunun envanter analizi gerçekleştirilmiştir. LPG depolama ve dolumunun potansiyel çevresel etkileri, SimaPro yazılımı (v.9.2) kullanılarak on bir etki kategorisinde (abiyotik tükenme, abiyotik tükenme (fosil yakıtlar), küresel ısınma (100a), ozon tabakasının incelmesi, insan toksisitesi, tatlı su ekotoksisitesi, deniz suyu ekotoksisitesi, karasal ekotoksisite, fotokimyasal oksidasyon, asidifikasyon, ötrofikasyon) değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır. Son olarak, sonuçların anlamlılığını belirlemek ve çalışmanın güvenilirliğini ortaya koymak için Monte Carlo (MC) simülasyonuna dayalı belirsizlik analizi yapılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Sıvılaştırılmış Petrol Gazı (LPG)

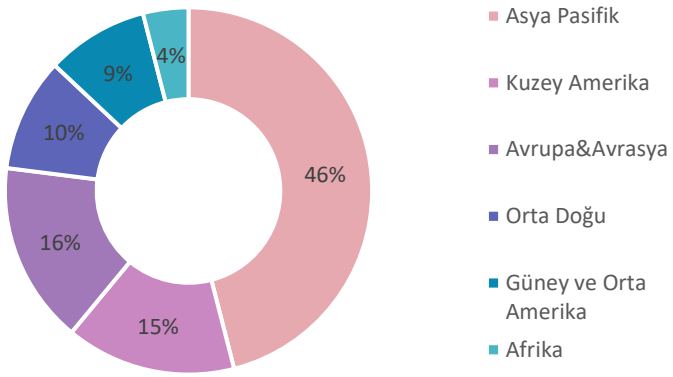
LPG, 20. yüzyılın başlarında pişirme ve aydınlatma amaçlı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu tarihlerden kısa bir süre sonra, LPG'nin içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılabileceği gündeme gelmiştir. 1970'li yıllarda yaşanan petrol krizleri ve artan petrol fiyatları sebebiyle alternatif yakıt olarak tercih edilmiş ve buna bağlı olarak LPG'li araç sayısında önemli bir artış olmuştur. Diğer petrol kökenli yakıtlara kıyasla taşınabilir olması, düşük sera gazı emisyonu yayması, farklı tedarik kaynaklarına ve rezervlere sahip olması, güvenli ve ekonomik olması gibi sebeplerle geçmişten günümüze kadar birçok alanda kullanımı devam etmektedir (Ryskamp, 2017).

Dünya LPG Ajansı'nın 2021 yılında yayınladığı Küresel LPG İstatistiksel İncelemesine göre, dünya genelinde LPG tüketimi, 2010 yılından 2019 yılına kadar sürekli büyümeye devam etmiştir. 2019 yılında COVID-19 pandemisinin etkisiyle arz ve talepte düşüş meydana gelmiş ve buna bağlı olarak tüketim değerleri de azalmıştır. 2020 yılında küresel LPG arzı, bir önceki yıla göre %1,4'lük bir düşüşle 329,4 milyon ton (m ton) iken toplam talebin, 2019'a göre %2,6'lık bir düşüşle 317 m ton olduğu belirlenmiştir. Şekil 2.1.'de görülebileceği gibi küresel LPG tüketimi 2020 yılında 317 m ton olup bir önceki yıla kıyasla %2,6'lık bir düşüş göstermiştir (WLPGA & Argus Media, 2021).



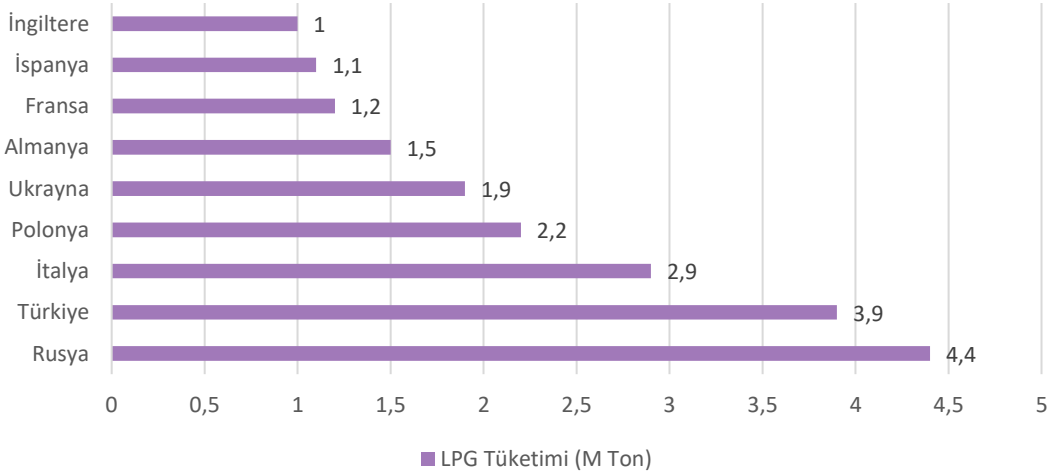
Şekil 2. 1. Küresel LPG tüketiminin yıllara göre değişimi (WLPGA & Argus Media, 2021)

Küresel LPG tüketimi bölgesel bazda incelendiğinde Asya Pasifik bölgesinin %46'lık bir oranla en büyük paya sahip olduğu görülmektedir. Şekil 2.2.'de görülebileceği gibi Asya kıtasını sırasıyla Avrupa-Avrasya (%16), Kuzey Amerika (%15), Orta Doğu, (%10), Güney ve Orta Amerika (%9) ve Afrika (%4) takip etmektedir (WLPGA & Argus Media, 2021).



Şekil 2. 2. 2020 yılı küresel LPG kullanımının bölgesel dağılımı (WLPGA & Argus Media, 2021).

LPG tüketimi ülke bazında incelendiğinde 2020 yılı verilerine göre listenin başında 4,4 m ton tüketim miktarıyla Rusya gelmektedir (Şekil 2.3.). Türkiye ise 3,9 m ton tüketim miktarı ile Avrupa'nın en büyük ikinci pazarı ve dünyanın en büyük onuncu pazarıdır (Dizemen ve diğ., 2022).

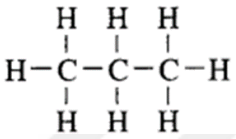
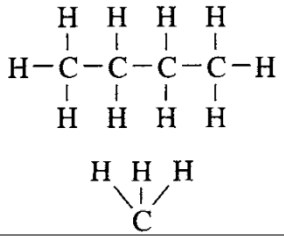
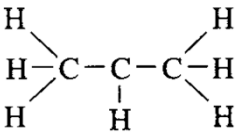
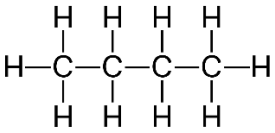
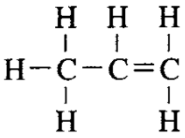
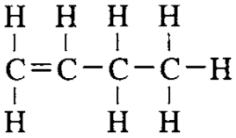


Şekil 2. 3. 2020 yılı Avrupa ülkeleri LPG tüketimi (Dizemen ve diğ., 2022)

2.1.1. LPG'nin Özellikleri

Sıvılaştırılmış petrol gazı anlamına gelen LPG, doğal gazdan veya petrolden elde edilmekte, basınç altında sıvılaştırılan propan ve bütan gibi hidrokarbonlar veya bunların karışımından oluşmaktadır. Ticari propanın neredeyse tamamı propandan (C_3H_8) oluşmakta, ticari bütan ise C_4H_{10} olarak gösterilen normal bütan (n-bütan) ve izobütandan oluşmaktadır. Tablo 2.1.'de LPG'nin ana bileşenleri verilmiştir (Beşergil, 2008; Shipman, 2002).

Tablo 2. 1. LPG'nin ana bileşenleri (Beşergil, 2008; Shipman, 2002)

Bileşen	Kimyasal Formül	Kimyasal Yapısı	Doygunluk
Propan	C_3H_8		Doymuş
Bütan	C_4H_{10}		Doymuş
İzobütan	C_4H_{10}		Doymuş
N-Bütan	C_4H_{10}		Doymuş
Propen (Propilen)	C_3H_6		Doymamış
Büten (Bütilen)	C_4H_8		Doymamış

LPG gibi gaz yakıtlar depolama hacminin azaltılması amacıyla orta ve yüksek basınç (20-200 bar) altında sıvılaştırılmaktadır. Bu işlem ile LPG hacimce 230-267 kat küçülmektedir (Bayrakçeken & Kuş, 2004). Gaz halindeki LPG havadan daha ağır olup, yoğunluğu havanın yoğunluğunun yaklaşık iki katıdır. Sıvı LPG'nin yoğunluğu ise propanın ve bütanın bileşimine bağlı olarak değişmektedir. Propanın yoğunluğu yaklaşık 0,509 ton/m^3, bütanın yoğunluğu ise yaklaşık 0,585 ton/m^3 olup, LPG'nin yoğunluğu suyun yoğunluğunun yaklaşık yarısı kadardır (EPDK, 2018). LPG'nin yapı taşını oluşturan ticari propan ve bütanın tipik özellikleri Tablo 2.2.'de gösterilmiştir (Selim, 2020).

Tablo 2. 2. Ticari LPG'nin tipik özellikleri (Selim, 2020)

Özellikler	**Ticari Propan**	**Ticari Bütan**
Relatif yoğunluk (sıvı), 15 ^{0}C	0,50-0,51	0,57-0,58
15°C'de litre/ton	1965-2019	1723-1760
Hava ile karşılaştırıldığında gazın relatif yoğunluğu, 15°C (60°F) ve 1016mbar	1,40-1,55	1,90-2,10
Gaz hacmi (1 kg), 15 ^{0}C, 1013.25 mbar, lt	537-543	406-431
Atmosferik basınçta kaynama noktası, ^{0}C.	-45	-2
15°C'de gizli buharlaşma ısısı (kJ/kg)	358	372
15°C'de sıvının özgül ısısı (kJ/kg°C)	2.512	2.386
Sülfür içeriği (%)	eser-0.02	eser-0.02
Kalorifik değerler, Brüt:		
MJ/m^3, kuru	93,1	121,8
MJ/kg	50,0	49,3
Kalorifik değerler, Net:		
MJ/m^3, kuru	86.1	112.9
MJ/kg	46.3	45.8
1 m^3 gaz için gerekli hava, m^3	24	30

Propan ve bütanın fiziksel ve kimyasal özellikleri arasındaki farklardan yararlanılarak, istenilen özellikte LPG elde edilebilmektedir. Propan ve bütanı birbirinden farklı kılan en belirgin özelliklerden biri kaynama noktaları arasındaki farktır. Propan atmosferik basınç altında -45^{0}C'de kaynamaya başlarken, bütan -2ºC'de kaynamaya başlamaktadır. LPG'nin içeriğindeki propan oranının artırılmasıyla daha düşük sıcaklıklarda kullanılabilmesi sağlanmaktadır. Bu sebeple kış aylarında LPG'nin içeriğindeki propan daha yüksek tutulmaktadır. Bu sebeple LPG'nin propan ve bütan oranları yaz ve kış aylarında farklılık gösterebilmektedir (EPDK, 2020).

LPG'nin bileşimindeki propan ve bütan oranı mevsime göre farklılık göstermenin yanında, ülkeye, tedarikçiye ve rafineri ürününün maliyetine bağlı olarak da değişebilmektedir. Tablo 2.3.'de %60 bütan ve %40 propandan oluşan LPG'nin tipik özellikleri verilmiştir (Tukiman ve diğ., 2018).

Tablo 2. 3. %60 bütan %40 propan içeren LPG'nin tipik özellikleri (Tukiman ve diğ., 2018)

Özellikler	**LPG (%60 bütan, %40 propan)**
Sıvı Yoğunluğu (kg/m^3)	509
Kalorifik Değer (MJ/kg)	46,34
Kaynama Noktası (^{0}C)	-42
Otomatik Ateşleme Isısı (^{0}C)	510
Alev Doruk Sıcaklığı (^{0}C)	1980
Alev Yayılma Hızı (m/s)	0,4
Stokiyometrik Hava/Yakıt Oranı (kg/kg)	15,8
Oktan Sayısı	111

Ülkemizde hem yaz hem de kış ayında LPG, yaklaşık %70 bütan ve %30 propan olarak piyasaya sunulmaktadır. Çeşitli ülkelerdeki LPG'nin propan ve bütan içeriği aşağıdaki Tablo 2.4.'de verilmiştir (Saka, 2003).

Tablo 2. 4. Ülkelerdeki propan ve bütan karışım oranları (Saka, 2003)

Ülke Adı	**Propan/Bütan Oranı (%)**	
	Yaz	**Kış**
Türkiye	30/70	30/70
Belçika	30/70	50/50
Almanya	Propan	Propan
İngiltere	Propan	Propan
İsviçre	Propan	Propan
Danimarka	30/70	30/70
Hollanda	30/70	30/70
Avusturya	20/80	80/20
İsveç	50/50	Propan

2.1.2. LPG'nin Üretimi

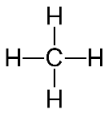
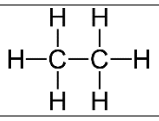
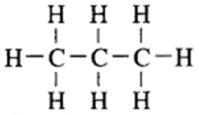
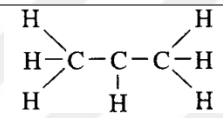
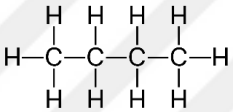
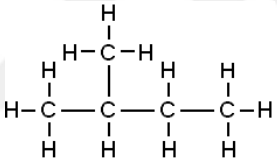
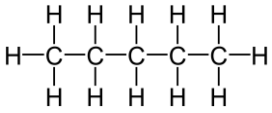
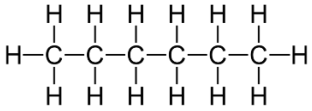
LPG, başlıca üç kaynaktan üretilmektedir. Küresel olarak üretilen LPG'nin yaklaşık %60'ı doğal gazın kuyulardan çıkarılması sırasında, geri kalan %40'ı ise ham petrolün rafineri işlemleri sırasında elde edilmektedir. LPG'nin bir diğer oluşum kaynağı ise yenilenebilir kaynaklardan ve atıklardan elde edilen BioLPG'dir (EPDK, 2018).

2.1.2.1.Doğal Gazdan LPG Üretimi

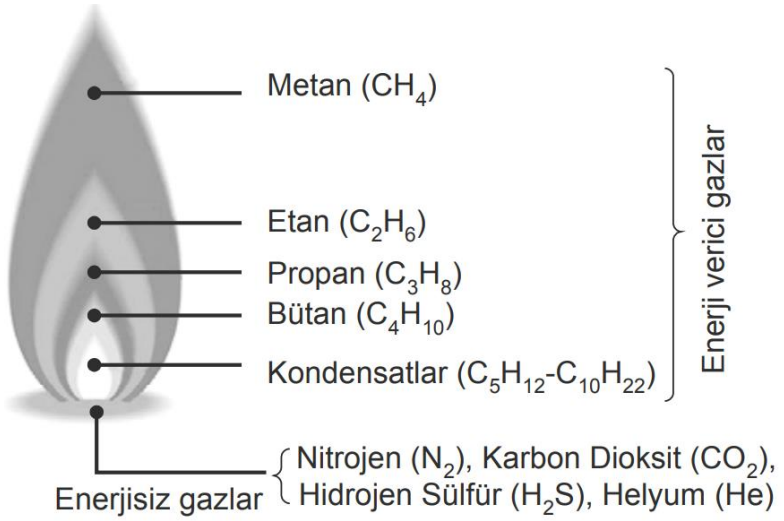
Renksiz, kokusuz ve havadan daha hafif olan doğal gaz, yeraltında başlıca gaz yataklarının bulunduğu kuyularda, yoğunlaşma haznelerinde veya geniş petrol sahalarında bulunabilmektedir. Doğal gaz, yeraltından çıkarılırken içeriğinde birçok gaz ve sıvı karışımı barındırmaktadır. Ham petrolde olduğu gibi doğal gazın bileşimi de çıkarıldığı bölgeye ve rezervuara göre farklılık gösterebilmektedir.

Ham doğal gaz metan başta olmak üzere etan, propan, bütan, pentan ve heksan gibi hidrokarbon karışımından oluşmaktadır. Tablo 2.5'de doğalgazın yapısında bulunan hidrokarbonlar ve oranları görülmektedir (Viswanathan, 2017).

Tablo 2. 5. Doğal gazın yapısında bulunan hidrokarbonların tipik analizi ve bileşim aralığı (Viswanathan, 2017)

Bileşik	Kimyasal Formülü	Kimyasal Yapısı	Bileşim Analizi	Bileşim Aralığı
Metan	CH_4		95	87-97
Etan	C_2H_6		3,2	1,5-7
Propan	C_3H_8		0,2	0,1-1,5
İzobütan	C_4H_{10}		0,03	0,01-0,3
n-bütan	C_4H_{10}		0,03	0,01-0,3
İzopentan	C_5H_{12}		0,01	Eser miktarda -0,04
n-pentan	C_5H_{12}		0,01	Eser miktarda -0,04
Heksan	C_6H_{14}		0,01	Eser miktarda -0,06

Hidrokarbonların dışında doğal gazın yapısında eser miktarda karbon dioksit, hidrojen sülfür, helyum ve nitrojen de bulunmaktadır (Şekil 2.4.). Doğal gazın ticari olarak kullanılabilmesi amacıyla kuyudan çıkarıldıktan sonra hidrokarbon içeriği ne olursa olsun su buharının ve katı kirliliklerin uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu işlem için ham doğal gaz boru hatlarına iletilmeden önce çeşitli işlemden geçirilerek saflaştırılmakta ve kurutulmaktadır. Saflaştırma işlemi, ilk olarak doğal gaz akışından doğal gaz sıvılarının çıkarılmasını ve ardından doğal gaz sıvılarının ayrı bileşenlerine ayrılmasını içermektedir (Beşergil, 2008).

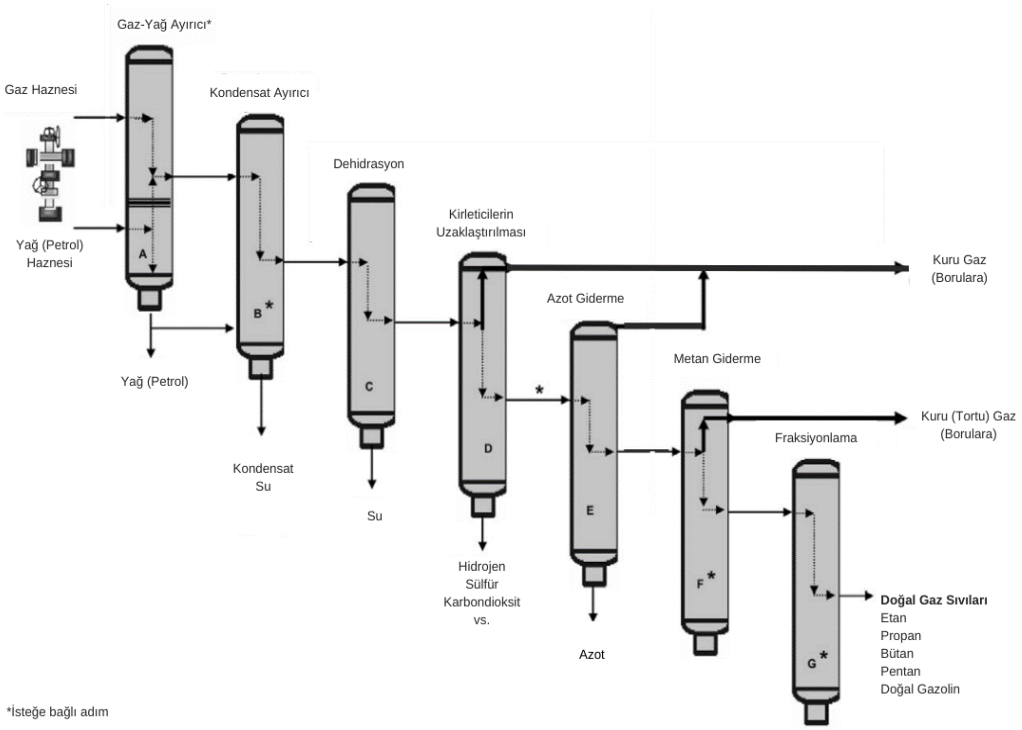


Şekil 2. 4. Doğal gazın yapısında bulunan bileşenler (Beşergil, 2008)

Doğal gazın saflaştırılması sonucu elde edilen ve ham doğal gazla birlikte bulunan doğal gaz sıvıları (NGL) çok değerli yan ürünlerdir. NGL, etan, propan, bütan, izobütan ve pentandan oluşan hidrokarbonlar olup, doğal gazın içeriğindeki oranı gazın yeraltında bulunma şekline veya çıkarılış yerine göre farklılık gösterebilmektedir. Bu sıvılardan bazıları LPG ve doğal benzin bileşenleridir (Beşergil, 2008).

Doğal gazın içeriğinden NGL ve diğer bileşenlerin giderilerek kuru ve kaliteli bir gaz elde edilmesi kompleks bir prosestir. Doğal gazdan safsızlıkların giderilmesi sırasıyla, yağ ve kondensat uzaklaştırma, suyun giderilmesi, sülfür ve karbon dioksit giderme, nitrojen giderme, metan giderme ve doğal gaz sıvılarını uzaklaştırılması proseslerine dayanmaktadır (URL-1). Şekil 2.5.'de doğal gazın saflaştırma prosesi verilmiştir (Tobin ve diğ., 2006).

Ham doğal gazın saflaştırılması için ilk adım yağ ve kondensatın uzaklaştırılmasıdır. Doğal gaz, yeraltından çıkarılırken petrolün yapısında çözünmüş halde bulunmaktadır. Bu gazın işlenebilmesi amacıyla öncelikle petrolden ayrılması gerekmektedir. Bu işlem ile genellikle petrolün kuyu başındaki basınç tahliyesinden yararlanılarak doğal bir şekilde ayrılması sağlanmaktadır. Kondensatların ayrılması ise çoğunlukla mekanik ayırıcılar kullanılarak gerçekleştirilir. (Tobin ve diğ., 2006).



Şekil 2. 5. Doğal gaz saflaştırma prosesi (Tobin ve diğ., 2006)

Yağ ve kondensatın uzaklaştırılması sonrası hidrat oluşumuna neden olabilecek suyu gidermek için bir dehidrasyon işlemi uygulanmaktadır (Tobin ve diğ., 2006). Doğal gazın yapısında bulunan nemin fazla olması gaz boru hatlarında tıkanmaya sebep olan hidrat bileşenlerini oluşturmaktadır. Bu sebeple doğal gazda sıvı veya buhar halinde bulunan su giderilmelidir. Sıvı halde bulunan su bileşiklerinin uzaklaştırılması kolay bir işlemdir. Ancak su buharının uzaklaştırılması için dehidrasyon işleminin uygulanması gerekmektedir. Bu işlem absorbsiyon veya adsorbsiyon yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilir. Su buharının dehidrasyon maddesi ile çekilmesi absorbsiyon prosesi olup, yoğunlaşarak yüzey üzerinde toplanması ise bir adsorbsiyon prosesidir (URL-1). Bu işlemler sonrası doğal gazın yapısında bulunan kirleticinin uzaklaştırılması gerekmektedir. Kirleticilerin uzaklaştırılması, hidrojen sülfür, karbon dioksit, su buharı, helyum ve oksijenin giderilmesini içeren bir süreçtir. Hidrojen sülfür ve karbon dioksit kabul edilebilir seviyelere indirildikten sonra, akım bir azot giderme ünitesine yönlendirilir ve burada moleküler elek yatakları kullanılarak gazın daha fazla kurutulması sağlanmaktadır. Bir sonraki adım olan gaz akımından metan giderme işlemi, ayrı bir işlem olarak veya azot giderme işleminin bir parçası olarak gerçekleştirilmektedir. Bu işlem sonrası kalan doğal gaz boru hatları ile çekilmekte, NGL ise kulenin alt kısmından çıkarak

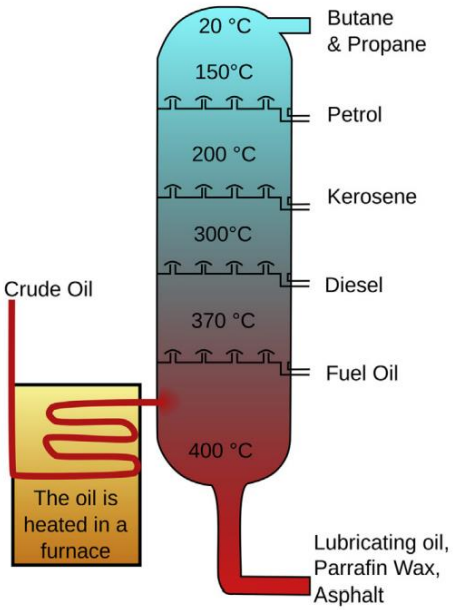
fraksiyonlama kolonuna aktarılır. Fraksiyonlama prosesi hidrokarbonların kaynama noktaları arasındaki farklılıklardan yararlanılarak gerçekleşmektedir. LPG bileşenleri ise, bu işlemlerin propan ve bütan elde edilecek şekilde yönlendirilmesi sonucu oluşmaktadır (Tobin ve diğ., 2006). Böylece doğal gazdan LPG elde edilmektedir. LPG'nin yapıtaşı olan propan ve bütan içeriği doğal gazın üretildiği bölgeye göre farklı miktarlarda olabilmektedir. (%1-%10) Dünyada LPG üretiminin %60'lık bir bölümü bu yolla gerçekleşmektedir (EPDK, 2018).

2.1.2.2.Petrol Rafinerisi Sonucu LPG Üretimi

LPG'nin bir diğer kaynağı ise ham petrol rafinerileridir. Rafinasyon işlemi ile ham petrol; LPG, kerosen, benzin, dizel gibi satılabilir ürünler elde edilmektedir. Rafinerilerden elde edilen ürünler, yakıt, ısı veya hammadde kaynağı gibi farklı amaçlarla kullanılabilmektedir. Rafinerilerde LPG gibi petrol ürünlerinin üretimi amacıyla, ham petrol öncelikle damıtma (distilasyon) ünitesinde işlenmektedir. Ham petrol, distilasyon (damıtma) işlemi hidrokarbonlar arasındaki kaynama noktaları farklılığına dayanan bir yöntem olup petrolün fraksiyonlarına ayrılması sağlanmaktadır. Şekil 2.6'da distilasyon kolonundan elde edilen ürünler ve kaynama noktaları gösterilmiştir (Viswanathan, 2017).

Kolonun içinde sıcaklık yukarıdan aşağıya doğru artmakta bu nedenle kolon içinde aşağıdan yukarıya doğru gaz akışı, yukarıdan aşağıya doğru ise sıvı akışı vardır. Kolonda oluşan bu karışım sebebiyle yüksek saflıkta ürün üretilmektedir. Kolonun içerisinde bulunan fraksiyonlama tepsileri sayesinde elde edilmek istenen ürünlerin kolondan ayrılması sağlanmakta olup, böylece tortu gibi ağır ürünler kolonun alt kısmında toplanırken hafif ürünler ise kolonun üst kısmından toplanmaktadır. Atmosferik distilasyon işlemi sonucu oluşan ürünler satışa sunulabilmekte, rafineride doğrudan kullanılabilmekte veya yeni ürünler üretilmesi amacıyla diğer ünitelere gönderilerek çeşitli proseslere tabi tutulmaktadır (ÇŞB, 2020).

Atmosferik distilasyon kolonundan elde edilen LPG, içeriğinde H_2S, merkaptan, CO_2 gibi bileşikleri barındırabilmektedir. LPG satışa sunulmadan önce temizlenmesi amacıyla sırasıyla amin ve merox ünitelerinde işlem görmektedir. Amin ünitesinde öncelikle temizleme kolonuna alınan LPG, temiz amin çözeltisi ile temas ettirilerek hidrojen sülfürün amin fazına geçmesi sağlanmaktadır (ÇŞB, 2020).



Şekil 2. 6. Petrol distilasyon ünitesi şematik gösterimi (Viswanathan, 2017)

Hidrojen sülfürlerden arındırılan LPG, kolonun üst kısmından çıkarak kalan hidrojen sülfür ve merkaptanlardan ayrılması amacıyla LPG merox ünitesine gönderilmektedir. LPG, bu üniteye gönderilmeden önce içeriğindeki sülfür bileşiklerinden az da olsa arındırılması için kostik ön yıkama prosesine tabi tutulmaktadır. Bu işlem sonrası, merox sistemine iletilen LPG, merkaptanlardan temizlenmesi amacıyla meroxlu kostikle ekstrakte edilmekte ve reaksiyona gidererek merkaptanların merkaptürlere dönüşmesi sağlanmaktadır. Merkaptürler kostik içerisinde çözünerek kostik fazına geçmektedir. Kolondan çıkan LPG, depolama tanklarına iletilerek satışa sunulmaktadır (ÇŞB, 2020)

2.1.2.3.BioLPG Üretimi

Son zamanlarda, yenilenebilir kaynaklardan ve atıklardan LPG üretmenin yeni yöntemleri ortaya çıkmıştır. BioLPG olarak adlandırılan bu formlar, LPG'nin tüm faydalarını son derece düşük karbon emisyonlarıyla birleştirmektedir. BioLPG veya yenilenebilir LPG, yenilenebilir ve atık malzemelerden üretilmektedir. Hammaddeler, enerji içeriklerini saflaştırmak için bir dizi karmaşık işleme tabi tutulmaktadır. BioLPG, kimyasal olarak geleneksel LPG ile aynı olması sebebiyle LPG'nin yerini alabilmektedir

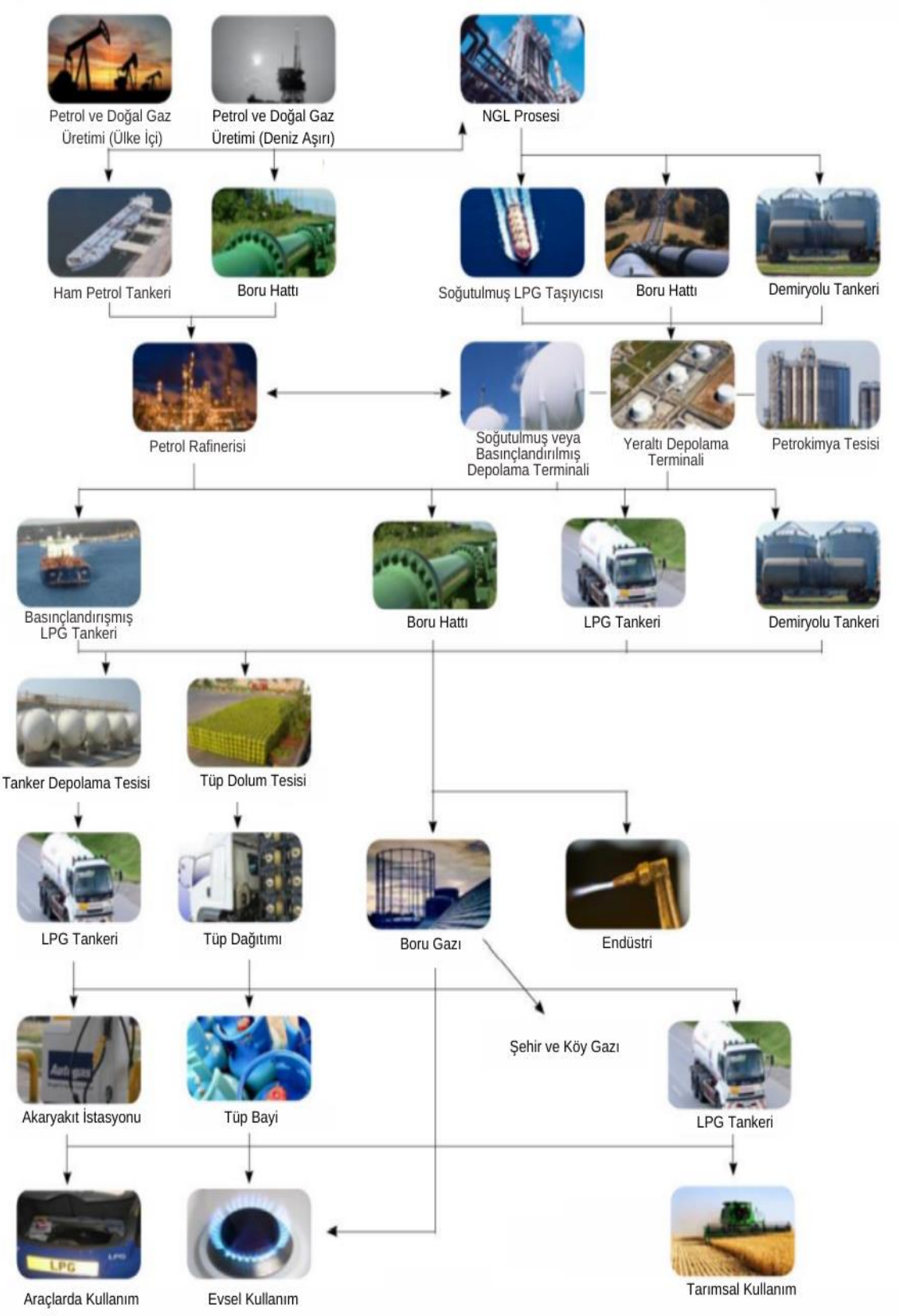
BioLPG, çok düşük konsantrasyonlarda zararlı hava kirleticileri üreten temiz yanan bir yakıttır. BioLPG'nin bir kazanda yakılması, kalorifer yakıtı, kömür ve biokütleye göre

%90-99 daha düşük konsantrasyonlarda partikül madde (PM) üretmektedir. Tipik bir gaz kazanında kullanıldığında bioLPG, ısıtma yağına karşı sera gazı emisyonlarını %70-80 oranında azaltabilmektedir. Biyolojik hammaddelerin ve süreçlerin çeşitli karışımından üretilen bioLPG, geleneksel LPG ile aynı oranda NO_x, SO_x ve PM emisyonlarına neden olurken, %90'a kadar karbon emisyonu azaltımı sağlayabilmektedir. Bu sebeple, bioLPG bir hibrit ısı pompasında veya kombine ısı veya güç sisteminde tüketildiğinde emisyonları daha da düşürebilmektedir. BioLPG'nin geliştirilmesi ile karbon emisyonları ve çevresel etkiler daha da azalmaktadır (URL-2; EPDK, 2018).

2.1.3. LPG'nin Dağıtımı

Doğal gazın kuyulardan çıkarılması veya rafinerilerde ham petrolün işlenmesi sırasında elde edilen LPG'nin, farklı yollar ile taşınması sonucu dağıtımı gerçekleşmektedir. Doğal gazın kuyulardan çıkarılması sürecinde elde edilen LPG, NGL prosesine tabi tutularak soğutulmuş LPG tanker gemileri, boru hatları veya demiryolu tankerleri ile taşınarak petrokimya tesislerine, soğutulmuş veya basınçlandırılmış depolama terminallerine veya yeraltı depolama terminallerine iletilmektedir. Ham petrol ise, üretim alanlarından rafinerilere tanker gemileri veya boru hatları ile taşınmaktadır.

Ham petrol rafinerilerinde üretilen veya doğal gazın üretim sürecinde kazanılan LPG, karayolu, denizyolu, tren yolu veya boru hatlarıyla depolama terminallerine iletilerek tanker depolama veya dolum tesislerine iletilmektedir. Boru hattıyla taşınan LPG, boru gazı olarak veya endüstride kullanılmaktadır. Depolama tesislerinde LPG, silindirik veya küre şeklindeki basınçlı tanklarda depolanmaktadır. Dolum tesislerine gönderilen LPG ise mutfak tüpü, sanayi tüpü veya piknik tüplerine doldurularak dağıtıma hazır hale getirilmektedir. Hazırlanan LPG tüpleri, açık kasalı kamyonlar ile bayilere taşınmaktadır. LPG, tüp dışında dökme olarak da taşınabilmektedir. Bu yol ile karayolu tankerleri vasıtasıyla tüketicilere veya otogaz istasyonlarına ulaştırılmaktadır. Son kullanıcıya tüplü veya dökme olarak teslim edilen LPG, ev, sanayi veya otogaz istasyonları gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır. Şekil 2.7'de LPG'nin dağıtım ağı detaylı olarak gösterilmiştir (WLPGA, 2017).

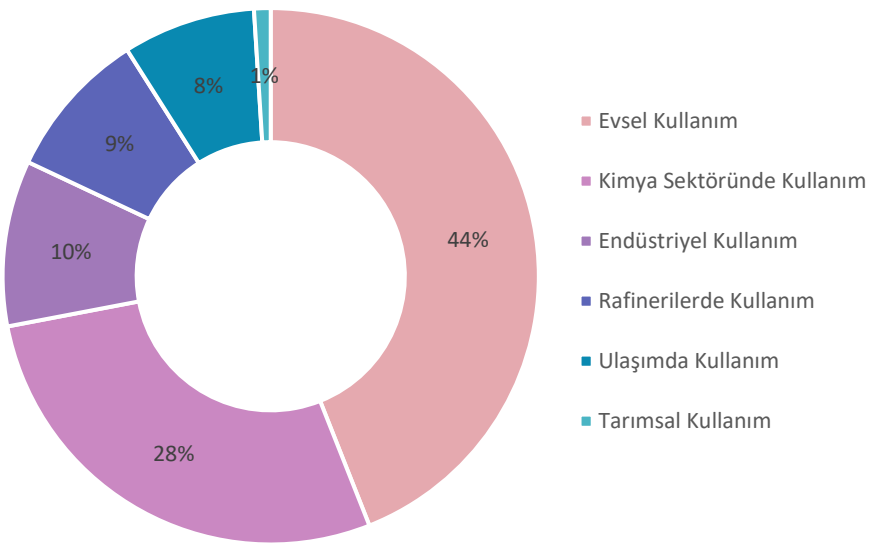


Şekil 2. 7. LPG'nin dağıtım ağı (WLPGA, 2017)

2.1.4. LPG'nin Kullanım Alanları

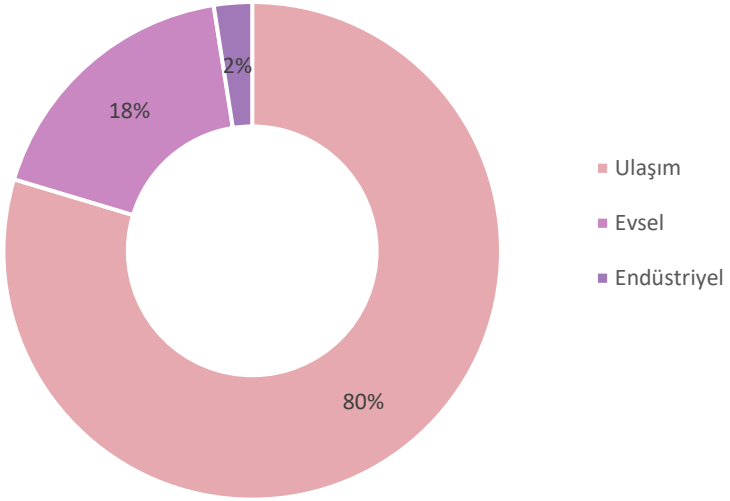
Sıvı petrol gazı veya otogaz olarak adlandırılan LPG'nin kullanım alanları oldukça geniştir. LPG, evlerde, sanayide ve araçlarda pişirme, ısıtma, yakıt olarak kullanılmasının yanında, aerosol itici ve soğutucu gaz olarak da kullanılmaktadır (Viswanathan, 2017).

Dünyada 2021 yılında tüketilen LPG'nin sektörlere göre dağılımı Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Bu verilere göre, dünyada tüketilen LPG'nin büyük bir çoğunluğu (%44'ü) evsel amaçlı kullanılmaktadır. İkinci sırada %28'lik oranla kimya sektörü gelmektedir. Geri kalan tüketim oranları ise sırasıyla %10'u endüstride, %9'u rafinerilerde, %8'i ulaşım sektöründe (otogaz olarak), ve %1'i tarımda kullanımdır (WLPGA & Argus Media, 2021).



Şekil 2. 8. Küresel LPG kullanımının sektörel dağılımı (WLPGA & Argus Media, 2021)

Türkiye'de LPG tüketim oranları küresel sektörel dağılıma göre oldukça farklılık göstermektedir. Küresel dağılımda en büyük tüketim oranı evsel kullanıma aitken, Türkiye'de ulaşım kaynaklı kullanımlar %80'lik bir orana tekâmül eden 3,1 milyon ton değeri ile en büyük paya sahiptir (Şekil 2.9). Evsel kullanım 699 bin ton ile %18'lik bir orana sahiptir. Endüstriyel kullanım ise Türkiye'de tüketilen LPG'nin %2'lik (97 bin ton) bir bölümünü oluşturmaktadır (Dizemen ve diğ., 2022).



Şekil 2. 9. Türkiye LPG kullanımının sektörel dağılımı (Dizemen ve diğ., 2022)

2.1.4.1.Evsel Kullanım

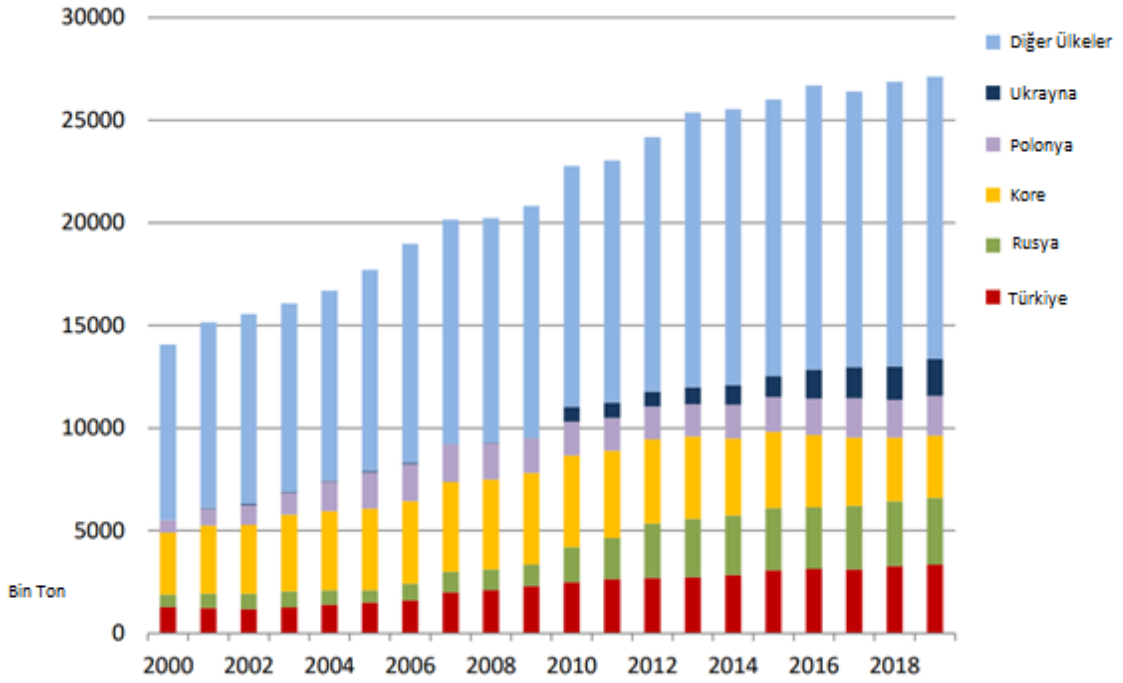
Dünya üzerinde birçok evde çeşitli uygulamalar için LPG kullanılmaktadır. LPG'nin evsel kullanım alanlarının başında pişirme ve ısıtma işlemleri gelmektedir. Bu amaçla LPG, evlerde ve işyerlerinde genellikle dökme ve tüplü LPG olarak kullanılmaktadır. LPG aynı zamanda kurutma, aydınlatma, kuru temizleme, çim biçme ve elektrik üretimi gibi farklı amaçlarla da kullanılmaktadır (EPDK, 2020).

Pişirme amaçlı kullanımda doğal gaz kullanılan evlerde şebeke bağlantısına ihtiyaç olmaktadır. LPG, şebeke bağlantısına ihtiyaç duymaması sebebiyle erişim olmayan alanlarda avantaj sağlamaktadır. Isıtma amaçlı kullanım ile LPG, iç hava kalitesinin ve insan sağlığının korunmasına katkı sağlamaktadır. Daha düşük partikül madde, kükürt ve NO_x emisyonları üreten LPG, temiz, güvenilir ve ekonomik açıdan avantajlı bir yakıttır. Ayrıca bazı partikül maddelerin, özellikle siyah karbonun (kurum) küresel ısınmaya neden olduğu bilinmektedir. LPG'nin neredeyse hiç siyah karbon yaymaması sebebiyle iklim değişikliği üzerindeki etkisi oldukça azdır. (URL-3; WLPGA 2021a).

2.1.4.2.Ulaşımda Kullanım

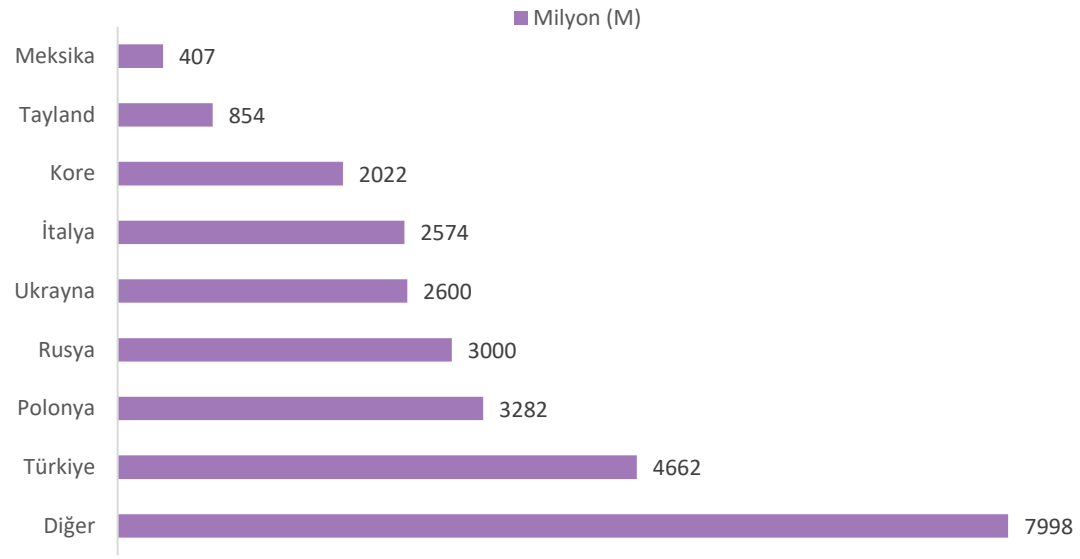
LPG ilk kez 1930'lu yıllarda otomotiv sektöründe yakıt olarak kullanılmıştır. Otogaz olarak adlandırılan LPG, günümüzde dünyada yaygın olarak kullanılan alternatif otomotiv yakıtlarından biridir (EPDK, 2020).

Küresel otogaz tüketimi son yirmi yılda istikrarlı bir şekilde artarak 2019 yılında 27,1 milyon ton ile yeni bir yüksek seviyeye ulaşmıştır. Şekil 2.10'da görülebileceği gibi bazı ülkeler oldukça geniş bir otogaz pazarına sahiptir. Bu ülkeler arasında Türkiye başta olmak üzere, Rusya, Kore, Polonya ve Ukrayna sayılabilmektedir. Otogaz tüketimi küresel bir artış göstermekle birlikte, Kore gibi bazı ülkelerde otogaz filosunun daralması, yakıt ekonomisindeki gelişmeler gibi sebeplerle talebin azaldığı görülmektedir (WLPGA & Liquid Gas Europe, 2020).



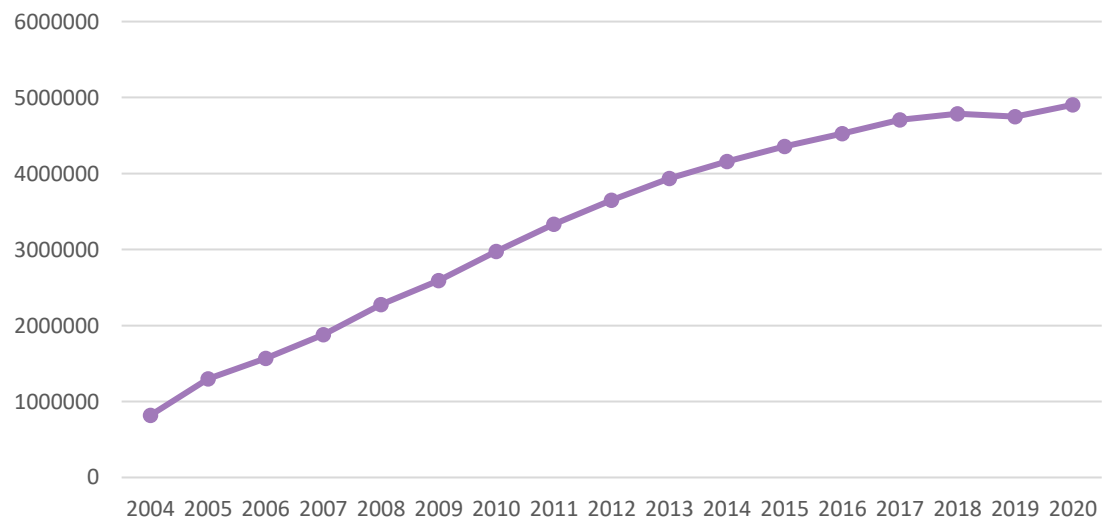
Şekil 2. 10. 2000-2019 yılları için küresel otogaz tüketim değerleri (WLPGA & Liquid Gas Europe, 2020)

2020'nin sonunda dünya genelinde 29 milyonun üzerinde otogazlı araç kullanıldığı bilinmektedir. COVID-19 salgını ile ulaşım yakıtlarına yönelik küresel talep, 2019 yılı itibariyle belirgin bir oranda düşmüştür. Benzin ve motorin tüketimi 2020'de 2019'a göre sırasıyla %12 ve %6 azalmış, otogaz talebi ise %10'un üzerinde düşüş göstererek 24,5 milyon ton olmuştur. Bu rakamlar en son 2012 yılında görülmüştür (WLPGA, 2021). Şekil 2.11'de ülke bazında LPG'li araç sayıları gösterilmiştir. Buna göre 2019 yılında en fazla LPG'li araca sahip olan ülkenin Türkiye olduğu ifade edilebilmektedir (WLPGA & Liquid Gas Europe, 2020).



Şekil 2. 11. 2019 yılı ülkelere göre LPG'li araç sayısı (WLPGA & Liquid Gas Europe, 2020)

LPG, karayolu ulaşımında; binek araçlarda, hafif ticari araçlarda, otobüslerde, taksi ve şirket araç filolarında yakıt olarak kullanılmaktadır. Türkiye LPG'li araç sayısı bakımından dünyada açık ara birinci sıradadır. Türkiye'nin yıllara göre LPG'li araç sayılarındaki artışı Şekil 2.12'de görüldüğü gibidir. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) 2020 verilerine göre Türkiye'de 4,9 milyon LPG'li araç bulunmaktadır. Bu oran ile Türkiye'de en çok tercih edilen motorlu araç yakıtı otogazdır (EPDK, 2020).



Şekil 2. 12. Türkiye LPG'li araç sayıları (TÜİK, 2020)

LPG karayolu ulaşımında kullanılmasının yanında denizyolu ve havayolu ulaşım sektörlerinde de kullanılmaktadır (EPDK, 2020). LPG'nin karbon salımının çok düşük olması nedeniyle bazı ülkelerde hava kirliliği ile mücadele amacıyla da tercih edilmektedir.

Düşük emisyon yayması sebebiyle tercih edilen LPG deniz yakıtı olarak da kullanılabilmektedir. Örneğin Şili'de deniz yakıtı olarak LPG kullanımı oldukça yaygındır. Şili'nin güneyindeki Somon balıkçı teknelerinin %80'i LPG kullanılmaktadır (URL-4). LPG, kargo gemilerine, konteyner gemilerine, tankerlere, yolcu gemilerine, açık deniz gemilerine ve yolcu feribotlarına güç sağlayabilmektedir (Nikolaou ve diğ., 2022). Ülkemizde kullanılan bazı ticari ve özel teknelerde hem tekne motoru hem de mutfak enerji ihtiyacını karşılamak için LPG kullanılmaktadır (EPDK, 2020).

Havacılık yakıtı olarak LPG kullanımı nispeten nadirdir. Bu yönde atılan ilk adımlardan biri Rusya tarafından 1990'ların sonunda LPG yakıtla çalışan helikopterdir. Bu helikopterin motorları tek başına LPG, tek başına jet yakıtı veya ikisinin karışımı ile çalışabilme özelliğine sahiptir. LPG, aynı hacimdeki jet yakıtlarına göre daha hafiftir. Bu sebeple uçağa daha fazla yük alma imkânı sağlamaktadır. LPG kullanımı uçağın toplam ağırlığını azalttığı için yakıt tüketimini de azaltmaktadır. Buna karşın otomotiv sektöründe olduğu kadar yaygın bir şekilde kullanılmamaktadır (URL-4). Ülkemizde, LPG havacılık yakıtı olarak Nevşehir ve Denizli gibi turizm bölgelerinde sıcak hava balonlarında kullanılmaktadır (EPDK, 2020).

Demiryolu ulaşımında ise LPG, yakıt olarak tercih edilmemektedir. Yaygın olarak demiryollarında bulunan makasların ve rayların ısıtılmasında kullanılmaktadır (URL-4).

2.1.4.3.Endüstriyel Kullanım

LPG, birçok endüstride ve üretim sürecinde, temiz enerji sağlayan ve yaygın olarak kullanılan bir yakıttır. Bu süreçler arasında ısıtma, kurutma, ısıl işlemler, metal işleme, gıda üretimi, petrokimya üretimi ve sanayi fırınları yer almaktadır (Saka, 2003).

LPG, doğal gaza kıyasla daha yüksek kalorifik (ısıl) değere sahiptir. Bu nedenle doğal gazdan daha sıcak yanmakta, böylece endüstriyel süreçler için önemli bir fayda sağlamaktadır. Ayrıca sıcaklığının kontrol edilebilir olması, homojen içeriği, çevre

açısından temizliği (ihmal edilebilir SO_x, NO_x ve partikül madde emisyonları), kolay bulunabilirliği ve depolanabilmesi sebebiyle birçok endüstri için önemli bir yakıttır (URL-4).

Cam/seramik ürünleri üretimi karmaşık ve çok sayıda kimyasal reaksiyon içermektedir. Bu süreçlerde LPG'nin kullanılması ürün kalitesini arttırmakta ve teknik sorunları en aza indirmektedir. Ayrıca, aerosol ürün üreticileri, itici gaz olarak LPG'yi kullanmaktadır. LPG, endüstri için oldukça verimli ve çevre dostu bir enerji kaynağıdır (EPDK, 2020).

2.2.Yaşam Döngüsü Değerlendirme (YDD) Nedir?

Son yıllarda sürdürülebilirlik kavramının gündeme gelmesi ile ürün, süreç veya hizmetlerin çevreye verdiği zararın hesaplanmasına olanak sağlayan yaşam döngüsü çalışmalarının önemi artmıştır. Yaşam döngüsü çalışmaları, artan çevre duyarlılığı ve teknolojik gelişmeler ile her tür faaliyetin çevre ve doğal kaynaklar üzerindeki etkilerinin belirlenmesinde ve karar verme süreçlerinde sıklıkla faydalanılan çalışmalar haline gelmiştir. Bu çalışmalara, 90'lı yıllardan günümüze kadar karmaşık karar verme süreçlerinde sıklıkla başvurulmuş ve sürekli olarak geliştirilmiştir (Çağlayan, 2011).

Yaşam döngüsü değerlendirme (YDD); ürün, süreç ve hizmetlerin ortak bir zeminde karşılaştırılması ve çevresel etkilerin belirlenmesi amacıyla bilimsel olarak hesaplamalar sunan sağlam bir yöntemdir. YDD, bir ürün için "beşikten mezara" olarak tanımlanan yaşam döngüsü boyunca toplam çevresel yükleri ve faydaları değerlendirmektedir. Bu kavram, bir ürün veya hizmet için hammaddelerin çıkarılması ve işlenmesi, üretimi, nakliyesi, yeniden kullanım, geri dönüşümü ve üretim sonunda kullanılan malzeme ve enerjiyi de dahil eden en kapsamlı sistem sınırıdır (Haque, 2020).

YDD ile belirlenen sistem sınırı için çevresel girdi ve çıktılar belirlenmektedir. YDD çalışması, bir ürün veya sürecin hammadde ve enerji tüketiminden, kullanımı sonucu oluşan su, hava, toprak ve diğer kirliliklerinin belirlenmesini kapsamaktadır. YDD sonucunda ürün veya süreçlerin iklim değişikliği, ötrofikasyon, asidifikasyon, stratosferik ozon tabakasındaki incelme, toksik emisyonlar gibi çeşitli çevresel parametreler üzerindeki çevresel etkileri değerlendirilmektedir.

2.2.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinin Kısa Tarihi

Yaşam döngüsü değerlendirmesine yönelik çalışmalar ilk olarak 1960'larda başlamıştır. Hammadde ve enerji kaynaklarının azalması sebebiyle kısıtlamaların getirilmesi çalışmaların başlamasındaki ana etken olmuştur. 1963 yılında ise ilk kez Harold Smith, Dünya Enerji Konferansı'nda kimyasal ara ürünlerin ve kümülatif enerji gereksinimlerine yönelik miktarları hesapladığını bildirmiştir (Curran ve diğ., 2006).

1960'ların sonlarına doğru, artan dünya popülasyonuna bağlı olarak sınırlı hammadde ve enerji gereksinimleri üzerine öngörülerde bulunularak bazı modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiş ve bu çalışmalar "The Limits to Growth" ve "A Blue Print for Survival" da yayımlanmıştır (Kılıç, 2017).

Bunu takiben, 1969 yılında Coca-Cola şirketi, farklı içecek kutularının kaynak tüketimi ve diğer çevresel etkiler bağlamında analiz etmek için bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, en düşük çevresel etkiye sahip kutuyu belirlemek için kullanılan hammaddelerin, yakıt miktarının ve üretimden kaynaklanan çevresel yüklerin nicelleştirilmesine odaklanılmıştır (Muthu, 2020).

1970'lerin başlarında Avrupa ve Amerika'daki diğer firmalar tarafından da benzer YDD çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Amerika'da, bu süreç "REPA" (Resource and Environmental Profile Analysis-Kaynak ve Çevresel Profil Analizi) olarak Avrupa'da ise "ekolojik denge" olarak tanımlanmıştır (Kılıç, 2017). O yıllarda, belirli endüstriyel veriler mevcut olmadığı için kaynakların çoğu, hükümet belgeleri veya teknik belgeler gibi kamuya açık kaynaklardan elde edilmiştir. 1970 ve 1975 yılları arasında yaklaşık 15 REPA gerçekleştirilmiş ve çalışmalar yürütülmesi için bir standart ve metodoloji geliştirilmiştir. Bu metodoloji, ABD Çevre Koruma Ajansı (USEPA) ve endüstriyel uzmanlar tarafından incelenmiştir (Curran ve diğ., 2006).

Bu çalışmaların çoğunda petrol krizi sebebiyle enerji kullanımına odaklanılmıştır. 1980'lerin başında çevresel kaygılar tehlikeli ve evsel atık yönetimi konularına kaymıştır. 1990'ların başında ise, YDD çalışmaları envanter analizinin ötesine geçerek etki değerlendirmesine doğru ilerlemiştir (Muthu, 2020; Curran ve diğ., 2006). İlerleyen yıllarda SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry-Çevresel

Toksikoloji ve Kimya Derneği) ve USEPA, yaşam döngüsü çalışmalarını daha üst seviyelere taşımak amacıyla destek olmuşlardır (Kılıç, 2017).

Zamanla çevre kuruluşları tarafından YDD metodolojisini standartlaştırılması konusunda baskılar artmış ve bunun bir sonucu olarak 1997-2002 yılları arasında Uluslararası Standartlar Örgütü (ISO) 14000 serisini yayınlamıştır (Curran ve diğ., 2006). 2006 yılında ISO 14000 Çevre Yönetim Sisteminin bir parçası olan ISO 14040:2006 ve 14044:2006 yayımlanarak YDD standart hale getirilmiştir (Kılıç, 2017).

2002 yılında, Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP), Çevresel Toksikoloji ve Kimya Derneği (SETAC) ile Yaşam Döngüsü Girişimi'ni başlatmak amacıyla uluslararası bir ortaklık başlatmıştır. Bu girişim, yaşam döngüsü yönetimi (YDY), yaşam döngüsü envanteri (YDE) ve yaşam döngüsü etki değerlendirmesi (YDED) olmak üzere üç programdan oluşmaktadır. Programlar, yaşam döngüsü düşüncesini uygulamayı ve daha iyi veriler ve göstergeler aracılığıyla destekleyici araçları geliştirmeyi amaçlamaktadır (Curran ve diğ., 2006).

2.2.2. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinde Kullanılan Yazılımlar

Bir YDD oluşturulurken manuel olarak hesaplamalar Microsoft Excel ya da matematik programlarıyla da yapılabildiği gibi bu çalışma için tasarlanmış özel bir yazılım kullanılarak da yapılabilmektedir. YDD yazılımlarının çoğu için veri tabanı birincil verilerin kaynağını oluşturmaktadır. Bu veri tabanları veri ayarlarını, planları, süreçleri, akışları ve başlatılan her bir proje için dengelemeyi içerecek şekilde düzenlenmektedir. Her yeni proje başlangıcında yeni bir veri tabanı oluşturulmasında fayda vardır. Bu yüzden birçok yazılım programı projenin başlangıç aşamasında kullanıcılarına bu konuda destek sağlamaktadır (Kılıç, 2017). GaBi, openLCA, SimaPro ve Umberto YDD için dünyanın önde gelen yazılım araçlarıdır. Tablo 2.6'da bu yazılım araçlarının karşılaştırılmasına yer verilmiştir. YDD yazılımları modelleme ilkeleri, içerdiği veri tabanları ve metotları bakımından farklık gösterebilmektedir. Bu bağlamda kullanıcının hangi yazılım aracını seçtiğine bağlı olarak farklı YDD sonuçları oluşabilmektedir (Silva ve diğ., 2017).

Tablo 2. 6. Bazı YDD yazılım araçlarının karşılaştırılması (Silva ve diğ., 2017).

	GaBi	**SimaPro**	**openLCA**	**Umberto**
Yazılım Menşei	Almanya	Hollanda	Almanya	Almanya
Kullanıcı Arayüzü Algısı	Her birim süreç için süreç modellemesi ve diyagramları kullanır.	Birim süreçlerin modellemesi için matrisleri kullanır.	Her birim süreç için süreç modellemesi ve diyagramları kullanır.	YDD modellemesi için Petri ağlarını kullanır.
YDD Sonuçlarının Sunumu	YDD sonuçlarını göstermek için Sankey diyagramını ve çubuk grafiklerini, envanter analizi için tablolar ve otomatik akış dengeleri kullanılır.	YDD sonuçlarını göstermek için Sankey diyagramını ve çubuk grafiklerini, envanter analizi için tabloları kullanır.	YDD sonuçlarını göstermek için Sankey diyagramını ve çubuk grafiklerini, envanter analizi için tabloları kullanır.	YDD sonuçları için Sankey diyagramını, envanter analizi için tabloları kullanır. Sonuçlar Dynamic Excel Pivot tablosuna ve Dashboard çizelgesine aktarılabilir.
Belirsizlik ve Duyarsızlık Analizi Sonuçları	Monte Carlo yöntemine bağlı olarak envanter akışları için yüzde sapmaları kullanılabilir.	Monte Carlo yöntemi ile soy matrikslerini kullanabilir.	Monte Carlo yöntemi ile belirsizlik dağılımı testleri yapabilir.	Duyarlılık analizini etkinleştirmek için bazı Excel tabanlı araçlar sağlayabilir.

Tablo 2. 6. (Devam) Bazı YDD yazılım araçlarının karşılaştırılması (Silva ve diğ., 2017).

	GaBi	**SimaPro**	**openLCA**	**Umberto**
Olumlu Özellikleri	-İyi bir veri seti dokümantasyonu sunar. -Maliyetler ve sosyal yönler modellenebilir. -Veri setlerini kolayca içe/dışa aktarmak mümkündür. -Yüzlerce veri setine sahip profesyonel veritabanı ve ayrıca onlarca uzantı veritabanına sahiptir.	-İyi bir veri seti dokümantasyonu sunar. -Sosyal yönler modellenebilir. -Ecoinvent veri tabanı ile entegre edilmiştir. -Veri setlerinin çoğu birim proseslerdir.	-Maliyetler ve sosyal yönler modellenebilir. -Kullanıcılar için ücretsizdir. -Veri setlerini kolayca içe/dışa aktarmak mümkündür ve çevrimiçi paylaşma imkanı sağlar.	-Maliyetler modellenebilir. -Ecoinvent veri tabanı ve/veya GaBi veri tabanı ile entegredir. - Excel özellikleriyle entegredir.
Olumsuz Özellikleri	-Yüksek maliyetlidir. -Veri kümelerinin çoğu toplanır.	-Yüksek maliyetlidir. -Veri setlerinin biçimi sınırlı sayıdadır.	-Serbestçe kullanılabilen veri setleri yetersizdir. -Birçok veri seti yetersiz belgelenmiştir	-Yüksek maliyetlidir. -Monte Carlo analizi ve belirsizlik analizi yoktur. -Veri setlerini geleneksel YDD biçimlerine aktarmak mümkün değildir. -Normalleştirme ve ağırlıklandırma faktörleri, analiz edilen yazılım sürümünde mevcut değildir.

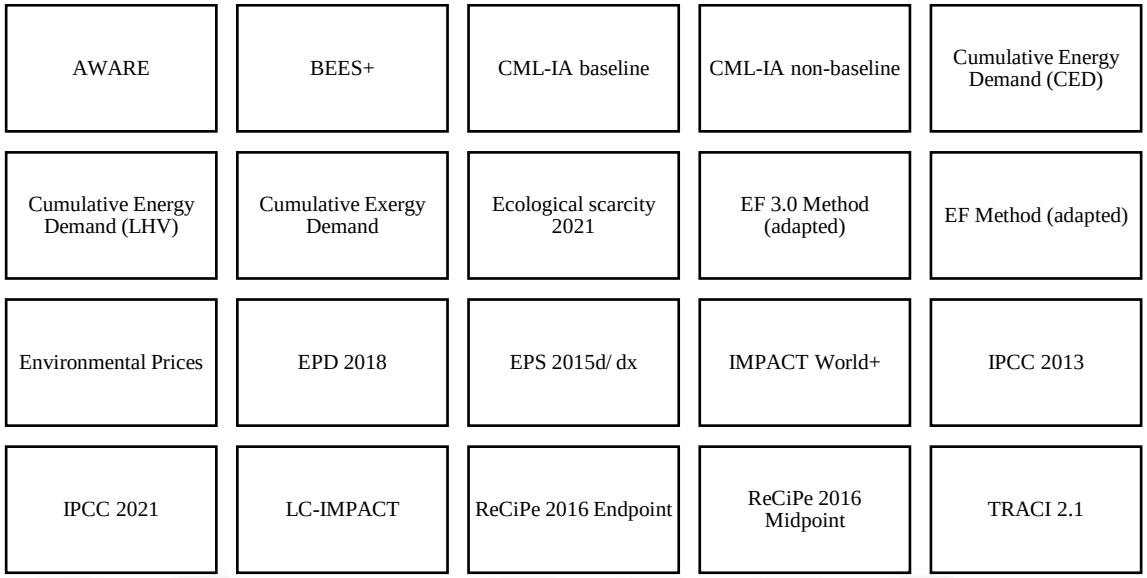
Bahsi geçen yazılımlar arasında sağladığı olanaklar sebebiyle özellikle GaBi ve SimaPro dikkat çekmektedir. GaBi, bir Alman şirketi olan Pe International tarafından geliştirilen ve ilk olarak 1992 yılında piyasaya çıkan, ürün sistemi modelleme ve değerlendirme yazılımıdır. Benzer şekilde, SimaPro, 1990 yılında piyasaya sürülen Hollanda merkezli bir ürün sistemi modelleme ve değerlendirme yazılımıdır. Her iki yazılım da dünya çapında satılmaktadır.

SimaPro, çeşitli çevresel faktörleri ölçebilen ve bir ürünün veya hizmetin beşikten mezara etkileri ile ilgili detaylı inceleme imkânı sunan bir yazılımdır. SimaPro, YDD hesaplamalarında kullanılmasının dışında ürün veya servislerin sürdürülebilirlik performansını belirlemek, karbon ve su ayak izi hesaplamak, temel performans göstergelerini belirlemek, çevresel ürün beyanı (EPD) oluşturmak gibi birçok uygulama için kullanılmaktadır (URL-5). Bu sebeple birçok çalışmada sıklıkla tercih edilen bir yazılımdır. SimaPro yazılımı, sera gazı (GHG) protokolünü ve uluslararası referans yaşam döngüsü veri sistemi (ILCD) el kitabını desteklemektedir. ILCD el kitabı, 2010 yılında Avrupa düzeyinde Ortak Araştırma Merkezi-Çevre ve Sürdürülebilirlik Enstitüsü (JRC-IES) tarafından hazırlanmış olup ISO 14040/44 standartlarına dayanmaktadır (Goedkoop, 2016).

SimaPro; ecoinvent v3 veri tabanı, agri-footprint veri tabanı, environmental footprint veri tabanı, ELCD veri tabanı da dâhil olmak üzere birçok yaşam döngüsü envanteri (YDE) veri seti donanımına sahiptir (Şekil 2.13). IMPACT World+, IPCC 2021, LC-IMPACT, CML-IA ise SimaPro'nun sahip olduğu metotlardan bazılarıdır (Şekil 2.14) (URL-6).

Agri-footprint	Carbon Minds	Quantis World Food LCA Veri Tabanı	WEEE LCI Veri Tabanı	Environmental Footprint Veri Tabanı
EXIOBASE	IDEA Japanese Inventory Veri Tabanı	ESU World Food LCA Veri Tabanı	DATASMART LCI Package	Social Hotspots Veri Tabanı
AGRIBALYSE	Industry Data Library: PlasticsEurope, ERASM, World Steel	Ecoinvent	US Life Cycle Inventory Veri Tabanı	European and Danish Input/Output Veri Tabanı

Şekil 2. 13. SimaPro'nun sahip olduğu veri tabanları (URL-6)



Şekil 2. 14. SimaPro'nun sahip olduğu bazı metotlar (URL-6)

2.3.Literatürdeki Benzer Çalışmalar

Bu bölümde önceki yıllarda LPG'nin yaşam döngüsü temelinde ele alınan potansiyel çevresel etkilerinin belirlendiği çalışmalar incelenmiştir. Literatürde LPG'nin yalnızca depolama ve dolum süreçlerine ilişkin YDD çalışmasına rastlanmamış olup, incelen çalışmaların çoğunda LPG'nin veya diğer yakıt türlerinin üretiminden tüketimine (araçta veya evsel) tüm yaşam döngüsünü ele aldığı belirlenmiştir.

LPG ve diğer yakıt tür ve teknolojilerinin çevre üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla 2014 yılında Messagie ve diğerleri tarafından bir YDD çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada benzin, dizel, CNG (sıkıştırılmış doğalgaz), LPG, biyodizel, biyoetanol, hibrit araçlar, hidrojen yakıt hücreli araçlar ve elektrikli araçlar değerlendirilmiştir. Çalışmanın kapsamı "kuyudan tekerleğe" (well-to-wheel) olarak belirlenmiş ve fonksiyonel birim Avrupa'da 1 km sürüş seçilmiştir. Envanter analizi aşamasında veriler Ecoscore veri tabanından temin edilmiştir. Çalışma kapsamında iklim değişikliği, solunum yolu hastalıkları etkileri, asidifikasyon ve mineral kaynaklarının kullanımı etki kategorileri incelenmiştir. Sonuçlara göre şeker kamışından üretilen biyodizelin iklim değişikliği üzerinde en düşük etkiyi gösterdiği, solunum yolu hastalıkları etkisi üzerinde ise en yüksek değerlere neden olduğu vurgulanmıştır. Fosil yakıtlar ve alternatif teknolojiler arasında en az solunum yolu hastalıkları etkisine sahip seçeneğin doğal gaz üretiminden kaynaklanan düşük emisyonlar sebebiyle CNG'li araç

olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca CNG'li araçların en düşük asidifikasyon değerine sahip olduğunu ve bunu sırasıyla dizel ve LPG'nin takip ettiğini ifade etmişlerdir. LPG'nin küresel ısınma potansiyeli etkisinin "tanktan tekerleğe", solunum yolu hastalıkları etkisi ve asidifikasyon etkisinin ise "kuyudan tanka" aşamaları için en yüksek etkilere sebep olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada farklı araç türlerinin emisyonlar üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirilmiş ve sonuçlar LPG kullanan şehir aracının düşük, LPG'li SUV araçların ise yüksek küresel ısınma potansiyeline sebep olduğunu göstermiştir (Messagie ve diğ., 2014).

Messagie ve diğerlerinin (2014) yaptığı çalışmaya benzer olarak Boureima ve diğerlerinin (2009) elektrikli, hibrit, LPG'li ve benzinli binek araçların çevresel etkilerinin karşılaştırılması amacıyla bir "kuyudan tekerleğe" (well-to-wheel) analizi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, Belçika'da 13,7 yıl boyunca kullanılan aile aracının 230500 km'lik ömür boyu sürüş mesafesi fonksiyonel birim olarak belirlenmiştir. Veriler, Belçika filosunda bulunan tüm araba türlerini içeren Ecoscore veri tabanından alınmıştır. Diğer veriler ise çeşitli raporlardan ve literatürden temin edilmiştir. Gerçekleştirilen YDD çalışmasında küresel ısınma potansiyeli, insan sağlığı etkisi ve asidifikasyon üzerindeki etkilerin belirlenmesi amacıyla hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplama sonuçları, küresel ısınma potansiyeli açısından en fazla etkiye benzinli araçlar sahipken en düşük etkinin elektrikli araçlara ait olduğunu göstermiştir. Benzinden sonra sırasıyla LPG ve hibrit araçlar sera gazı etkilerine sebep olmuştur. LPG küresel ısınma potansiyeli açısından incelendiğinde araçta kullanım aşaması en yüksek etkilere sebep olurken, Euro 4 araçların etkisi, eski model araçlara göre daha yüksek bulunmuştur. Benzer şekilde LPG'nin insan sağlığı etkisi üzerindeki en baskın sürecin kullanım aşaması olduğu belirlenmiştir. Asidifikasyon açısından hibrit ve benzinli araçlardan sonra LPG'li araçların katkıda bulunduğu belirlenmiştir (Boureima ve diğ., 2009).

Benzer bir çalışma 2013 yılında Garg ve diğerleri tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada Hindistan'da LPG dahil olmak üzere petrol ürünlerinin çeşitli tedarik zinciri yollarına dayalı bir YDD gerçekleştirmiştir. Fonksiyonel birim 1 kg yakıt olarak belirlenmiştir. Etki değerlendirmesi hesaplamaları ve elde edilemeyen bazı veriler için Ecoinvent sürüm 2.0'den faydalanılmıştır. Ayrıca hasar değerlendirme yöntemi olarak Eco-Indicator kullanılmıştır. Sonuçlar, LPG'nin ham madde temininden depolama aşamasına kadar

olan süreç için diğer yakıtlardan daha yüksek küresel ısınma potansiyeline sahip olduğunu ancak depolamadan tüketime sistem sınırı için en düşük etkileri gösterdiğini ortaya koymuştur. (Garg, 2013).

Araçlarda kullanılan petrol bazlı yakıtların çevre açısından değerlendirilmesi ve karşılaştırılması amacıyla yapılan bir diğer çalışma ise Kim ve diğerleri tarafından 2021 yılında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada araçlarda kullanılan petrol bazlı yakıtların çevre açısından değerlendirilmesi ve karşılaştırılması amacıyla YDD kapsamında GREET (The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation) ve GHGenius modeline dayalı olarak Kore'de dizel ve LPG'li araçların sera gazı emisyonlarını ve enerji kullanımlarını hesaplamışlardır. Yaşam döngüsü analizi sınırlarını, "kuyudan tanka" ve "kuyudan tekerleğe" olmak üzere belirlemişlerdir. Kuyudan tekerleğe sistem sınırı kuyudan tanka ve tanktan tekerleğe aşamalarının bir bütünüdür. Bu nedenle hesaplamalar yapılırken öncelikle kuyudan tanka için değerler hesaplanmış, sonrasında elde edilen değerler farklı araç türleri için birim km bazında hesaplanmıştır. Enerji kullanımı hesaplamalarında, kuyudan tanka sistem sınırı için fonksiyonel birim kJ/MJ, tanktan tekerleğe sistem sınırı için ise kJ/km olarak belirlenmiştir. Sera gazı emisyonu hesaplamalarında ise kuyudan tekerleğe sistem sınırı için fonksiyonel birim g CO_2 eşd/MJ, taktan tekerleğe sistem sınırı için ise g CO_2 eşd/km olarak hesaplanmıştır. Çalışmanın sonucunda kuyudan tanka sınırı için LPG'nin enerji kullanımı ve sera gazı emisyonlarının dizelden önemli ölçüde düşük olduğu görülmüştür. Bunun sebebi dizel yakıtın üretim sürecinde hidrokraking süreci içermesidir. Tanktan tekerleğe sınırı için Kore'de satılan dört otomobil ve 1.500 kg boş ağırlıklı bir model seçilmiş ve hesaplama sonucunda elde edilen değerler aracın cinsine göre farklılık göstermiştir. Yakıt olarak LPG kullanılan SUV model otomobil ve 1 tonluk kamyonun, sera gazı emisyonu açısından dizele kıyasla avantajlı olduğu doğrulanmıştır (Kim ve diğ., 2021).

Shahrier ve diğ. 2020 yılında yaptıkları YDD çalışmasında evsel ve ulaşım amaçlı kullanılan LPG'nin diğer fosil yakıtlara kıyasla daha çevreci olduğunu vurgulamıştır. Bu çalışmanın amacı, geleneksel ham petrolden elde edilen LPG'nin üretilmesinden pişirme ve ulaşım yakıtı olarak kullanılmasına kadar olan süreç için yaşam döngüsü analizi yapılarak küresel ısınma potansiyelinin belirlenmesi olarak belirtilmiştir. Yaşam döngüsü

çalışması için FUNNEL-GHG-CCO modelinden yararlanılmıştır. Temel mühendislik ilkelerine dayalı model olarak ifade edilen FUNNEL-GHG-CCO modeli spesifik enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarını tahmin etmek için kullanılmıştır. Aynı zamanda GREET model 2013'ü kullanılarak LPG'nin sebep olduğu gCO_2eşd/MJ cinsinden sera gazı emisyonu gösterilmiştir. Bu çalışmada fonksiyonel birim 1 MJ yakıt olarak seçilmiş ve sistem sınırı "kuyudan tekerleğe" olarak belirlenmiştir. Çalışmada LPG'nin sebep olduğu küresel ısınma, asidifikasyon, insan toksisitesi ve fotokimyasal ozon oluşturma potansiyeli gibi etki kategorileri üzerinde sebep olduğu çeşitli çevresel parametreler elde edilmiştir. Sonuçlar, LPG'nin üretim aşamasından kullanım aşamalarına kadar yaygın olarak kullanılan diğer fosil yakıtlara kıyasla çevre açısından daha iyi olduğunu göstermesine karşın, yenilenebilir kaynaklarla kıyaslandığında LPG'nin tamamen çevre dostu olmadığı ifade edilmiştir (Shahrier ve diğ., 2020).

LPG'nin yenilenebilir yakıtlar ile kıyaslanması amacıyla Morais ve diğ. (2010) tarafından gerçekleştirilen, LPG ve biyodizelin çevresel etkilerini ele alan bir çalışma incelenmiştir. Bu çalışmada otomotiv yakıtı olarak soya metil esterleri (biyodizel) ve LPG YDD yaklaşımı kullanarak karşılaştırılmıştır. Her iki yakıtın yaşam döngüsü ile ilişkili potansiyel çevresel etkileri, EN ISO 14040 standardı ve Guinée (2002)'de açıklanan YDD çalışmalarının yürütülmesine ve raporlanmasına ilişkin ilke çerçevesinde değerlendirilmiştir. Fonksiyonel birim ise, bir araç motoru tahrik milinden 1 MJ kullanılabilir enerji olarak seçilmiştir. LPG ve biyodizel için sistem sınırları, ham petrolün başka ülkelerden ithalatı, ülkeye girişi, üretilmesi, dağıtılması ve araçlarda kullanılması olarak tüm yaşam döngüsü olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak soya biyodizel, LPG'den %61 daha düşük toplam çevresel etki değerine sahip olması sebebiyle çevresel açıdan tercih edilen bir yakıt olarak belirlenmiştir. Bu çalışma, soya biyodizelin LPG'ye kıyasla daha düşük küresel ısınma, abiyotik kaynak tükenmesi, deniz suyu toksisitesi ve insan toksisitesine katkıda bulunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, LPG karasal ötrofikasyon ve arazi kullanımı gibi bazı bireysel etki kategorilerinde biyodizele kıyasla daha düşük değerler göstermiştir (Morais ve diğ., 2010).

Shrivastava ve Unnikrishnan (2021), ham petrolün kuyudan tanka performansını (ham petrol çıkarma, ham petrol arıtma ve bitmiş yakıt depolama) değerlendirmek için Hindistan'daki ham petrol üzerinde bir Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik

Değerlendirmesi (LCSA) çalışması gerçekleştirmiştir. Fonksiyonel birim 1 metrik ton yakıt üretimi olarak belirlenmiştir. Envanter verileri ise bir anket kullanılarak toplanmış, etki değerlendirme aşamasında SimaPro v7 yazılımından ve Ecoinvent veri tabanından faydalanılmıştır. Çalışmanın sonuçları ham petrol için tüm etki kategorilerinde ulaşım aşamasının en yüksek etkiye sahip olduğunu göstermiştir (Shrivastava ve Unnikrishnan, 2021).

LPG'nin ulaşımda kullanımı dışında pişirme yakıtı olarak kullanımına dayalı çalışmalar da incelenmiştir. Singh ve diğ. (2014), pişirme yakıtlarının çevresel ayak izini hesaplamak amacıyla Hindistan'da kullanılan LPG ve kerosen başta olmak üzere 10 adet evsel pişirme yakıtının çevresel etkilerini yaşam döngüsü analizi ile karşılaştırmalı olarak hesaplamışlardır. Çalışmada Recipe metodunu kullanarak 13 etki kategorisinde hesaplamalar yapılmış, fonksiyonel birim ise pişirme kaynaklı 1 GJ ısı enerjisi olarak seçilmiştir. Çevresel etkileri belirlemek için SimaPro v.7.3.3 yazılımında yer alan Ecoinvent v2.2 veri tabanından faydalanılmıştır. Çalışmanın sonunda yaşam döngüsü çevresel etkileri en düşük olan pişirme yakıtı biyogaz olarak belirlenmiştir. Biyogazdan sonra LPG, kerosen ve odun kömürü geldiği belirlenmiş ve çoğu için LPG kullanımının çevresel etkileri kerosenden yaklaşık %15 ila 18 daha düşük bulunmuştur. Çalışmada doğal gazdan ve ham petrolden elde edilen LPG ayrı olarak değerlendirilmiş olup doğal gazdan elde edilen LPG, ham petrolden elde edilen LPG'den yaklaşık %20 ila 30 daha düşük çevresel etkiye sahip olduğu hesaplanmıştır. Kırsal alanlar için kerosen, biyogaz ve odun kömürünün; kentsel alanlar için ise LPG, kerosen ve biyogazın, diğer ev tipi yemek pişirme yakıtlarına kıyasla daha düşük çevresel ayak izine sahip olduğu sonucuna varmıştır (Singh ve diğ., 2014).

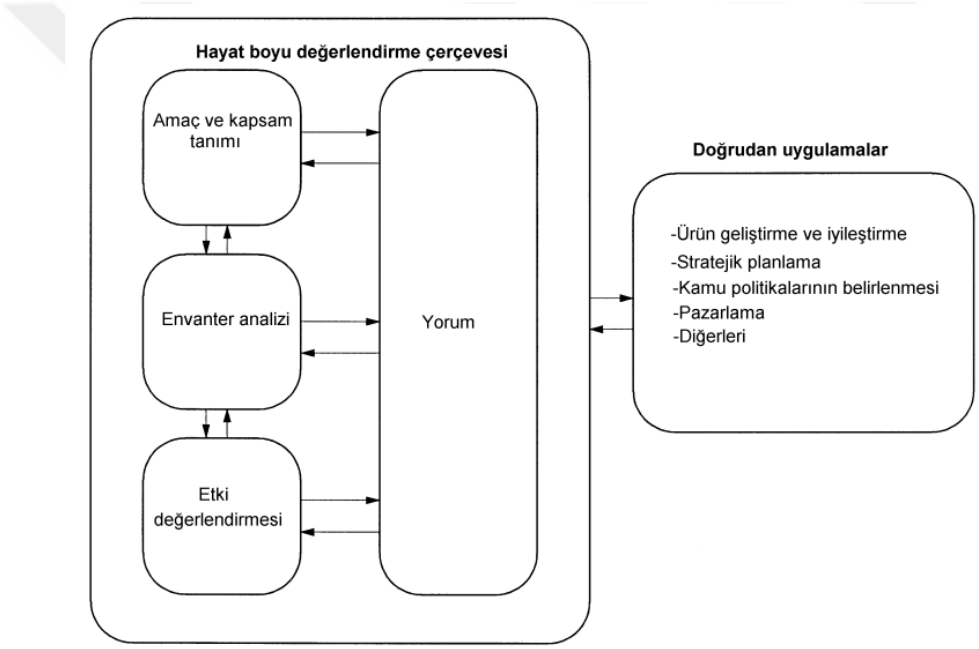
Afrane ve Ntiamoah (2011), Gana'da pişirme yakıtı olarak kullanılan odun kömürü, biyogaz ve LPG'nin çevresel etkilerini belirlemek ve karşılaştırmak için Singh ve diğerlerinin (2014) yaptığı çalışmaya benzer bir YDD çalışması gerçekleştirmişlerdir. Bu değerlendirmede, GaBİ yazılımı kullanılmış, farklı pişirme yakıt sistemleri arasında karşılaştırmaya izin vermek için CML-IA metodundan ve ortak bir referans noktası tanımlamak için Econinvent veri tabanından yararlanılmıştır. Çalışmanın fonksiyonel birimini ise 1 MJ enerji üretimi başına tüketilen yakıt (kg) olarak belirlemişlerdir. LPG'nin sistem sınırları, ham petrolün çıkarılması, nakliyesi, rafineride işlenmesi,

tüketicilere ulaştırılması ve yemek pişirmek için kullanılması aşamalarını içermektedir. Yedi çevresel etki kategorisi bazında gerçekleştirilen YDD sonuçlarına göre küresel ısınma ve insan toksisitesinin en önemli genel çevresel etkiler olduğu belirlenmiştir. Bu kategoriler için sırasıyla odun kömürü ve LPG'nin bu etki kategorilerine en büyük katkıyı yaptığı ifade edilmiştir. Yedi kategoriden beşinde biyogazın en düşük etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Küresel ısınma açısından ise LPG'nin genel olarak diğerlerine göre avantajlı olduğu ve insanlar üzerindeki etkisi açısından pişirme aşamasında da en uygun olduğu sonucuna varılmıştır (Afrane ve Ntiamoah, 2011).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1.Yaşam Döngüsü Değerlendirme Metodolojisi

Yaşam döngüsü değerlendirme metodolojisi, sabit bir yapıya sahiptir ve ISO 14040 ve 14044'e göre uygulanmaktadır. YDD genellikle ürün veya süreçler için yaşam döngüsü aşamalarının genel çevresel yüke katkısının analizi için ya da farklı ürün veya süreçler arasında karşılaştırma yapmak amacıyla kullanılmaktadır (Muralikrishna & Manickam, 2017). Şekil 3.1'de görüldüğü gibi YDD metodolojisi; amaç ve kapsamın belirlenmesi, envanter analizi, etki analizi ve yorumlama olmak üzere dört aşamadan oluşmaktadır (ISO, 2006a).



Şekil 3. 1. Yaşam döngüsü değerlendirme metodolojisi (ISO, 2006a)

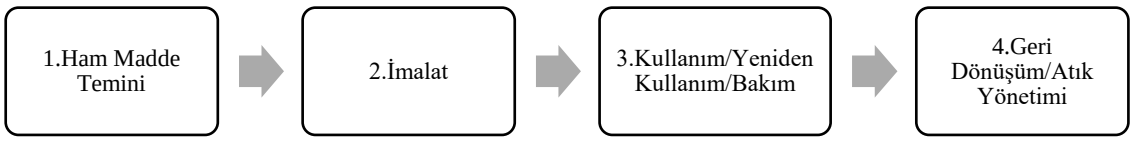
3.1.1. Amaç, Kapsam ve Fonksiyonel Birim Belirleme

Bir YDD çalışmasının ilk basamağı olan amaç ve kapsam belirleme aşamasında, çalışmanın amacının ve kapsamın net bir şekilde açıklanması gerekmektedir. Bu aşamada, çalışmanın kapsamı, işlevsel birimleri ve bu seçimin gerekçesini, fonksiyonel birim, sistem sınırı, birden fazla ürün göz önüne alındığında tahsis prosedürleri, etki türleri ve etki yöntemleri, varsayımları, başlangıç veri kalitesini ve sınırlamaları tanımlanmalıdır (Haque, 2020).

Bu aşamada, YDD çalışmasının amacı ve seçilen sistem sınırı için yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkacak çevresel etkilerin karar verme aşamasına nasıl katılacağına dair yöntem belirlenmektedir. Amaç ve kapsamın belirlenmesi ile çalışma için ne kadar zamana ve kaynağa ihtiyaç olacağı ortaya çıkmakta ve bu sayede tüm analiz aşamalarına yol göstermektedir. Bu aşamada alınan kararlar, çalışmanın sonraki adımlarını ve nihai sonuçları etkilemektedir. Bu sebeple çalışmanın hedef ve kapsamının doğru ve net bir şekilde belirlenmesi oldukça önem taşımaktadır (Çağlayan, 2011).

ISO 14040 ve 14044'e göre YDD çalışmasının amacı; hedeflenen uygulama, çalışmanın yürütülme sebepleri, çalışma sonucunun ulaştırılması istenen hedef kitle gibi hususları içermelidir (ISO 2006a; ISO 2006b). Bir YDD çalışmasının asıl amacı, bir ürün, süreç veya hizmetten kaynaklanacak çevresel etkileri belirlemektir. Bunun dışında YDD çalışmalarının daha farklı amaçları olabilmektedir. Buna örnek olarak çevresel değerlendirmelerin desteklenmesi, bir süreç için referans bilgilerin belirlenmesi, veri eksiklerinin ortaya çıkarılması, ürün sertifikalandırılması, karar vericilere bilgi sağlanması verilebilmektedir (Curran ve diğ., 2006).

Amacın belirlenmesi sonrası YDD çalışmasında kapsam belirlenmekledir. Kapsam belirleme aşamasında Şekil 3.2'de gösterilen YDD aşamalarından hangilerinin çalışmaya dahil edileceği belirlenmelidir. Bu aşamada çalışmanın amacı, sonuçlarda elde edilmesi hedeflenen hassasiyet, zaman ve kaynak gibi parametreler göz önünde bulundurulmalıdır (Çağlayan, 2011).



Şekil 3. 2. Yaşam döngüsü değerlendirme aşamaları (Çağlayan, 2011)

Kapsamın belirlenmesi ile sistem sınırları çizilmiş olmaktadır. Bu sebeple karar verirken ürünün tüm yaşam döngüsünün belirlenmesine gerçekten gerek olup olmadığı sorgulanarak, çalışmanın sonuçlarını etkileyebilecek gerekli tüm süreçler dahil edilmelidir. Kaynak kısıtlamaları da kapsamın belirlenmesi sırasında dikkate alınmalıdır. Sistem sınırları belirlendikten sonra sistemi özetleyen bir akış şeması oluşturulabilmektedir.

Bir ürünün ham madde temininden nihai bertarafına kadar olan yaşam döngüsünü içeren kapsam, "beşikten mezara" olarak tanımlanmaktadır. Bu koşulda, tüm girdiler ve çıktılar, yaşam döngüsünün tüm aşamaları için dikkate alınmaktadır. Çalışmanın hedeflerine bağlı olarak kapsam, beşikten kapıya veya beşikten beşiğe gibi farklı şekillerde de ifade edilebilmektedir. "Beşikten kapıya" sistem sınırı, hammadde üretiminden fabrikanın kapısına kadar olan süreç için yapılan bir yaşam döngüsü değerlendirmesidir. "Beşikten beşiğe" sistem sınırı ise ürünün kullanım ömrü sonunda elden çıkarma adımının bir geri dönüşüm süreci olduğu, "beşikten mezara" değerlendirmenin belirli bir türüdür. Geri dönüşüm sürecinden yeni, özdeş ürünler (örneğin, geri dönüştürülmüş kutulardan alüminyum içecek kutuları) veya farklı ürünler (örneğin, toplanan cam şişelerden cam yünü yalıtımı) ortaya çıkmaktadır. Bu sistem sınırı tam bir yaşam döngüsü olduğunu ifade etmektedir (Haque, 2020).

Yakıt yaşam döngüsü hesaplamaları ise "kuyudan tekerleğe" (well-to-wheel) analizi olarak da bilinmektedir. Kuyudan tekerleğe analizi, "kuyudan tanka" (well-to-tank) ve "tanktan tekerleğe" (tank-to-wheel) aşamalarının bir bütünüdür. Kuyudan tanka analizi, hammadde eldesi, nakliyesi, yakıtın üretimi, yakıtın tüketicilere dağıtımı süreçlerini içermektedir. Tanktan tekerleğe analizi ise yakıtın araçta kullanılması sırasında sebep olduğu çevresel etkileri ifade etmektedir (Ashnani ve diğ., 2015).

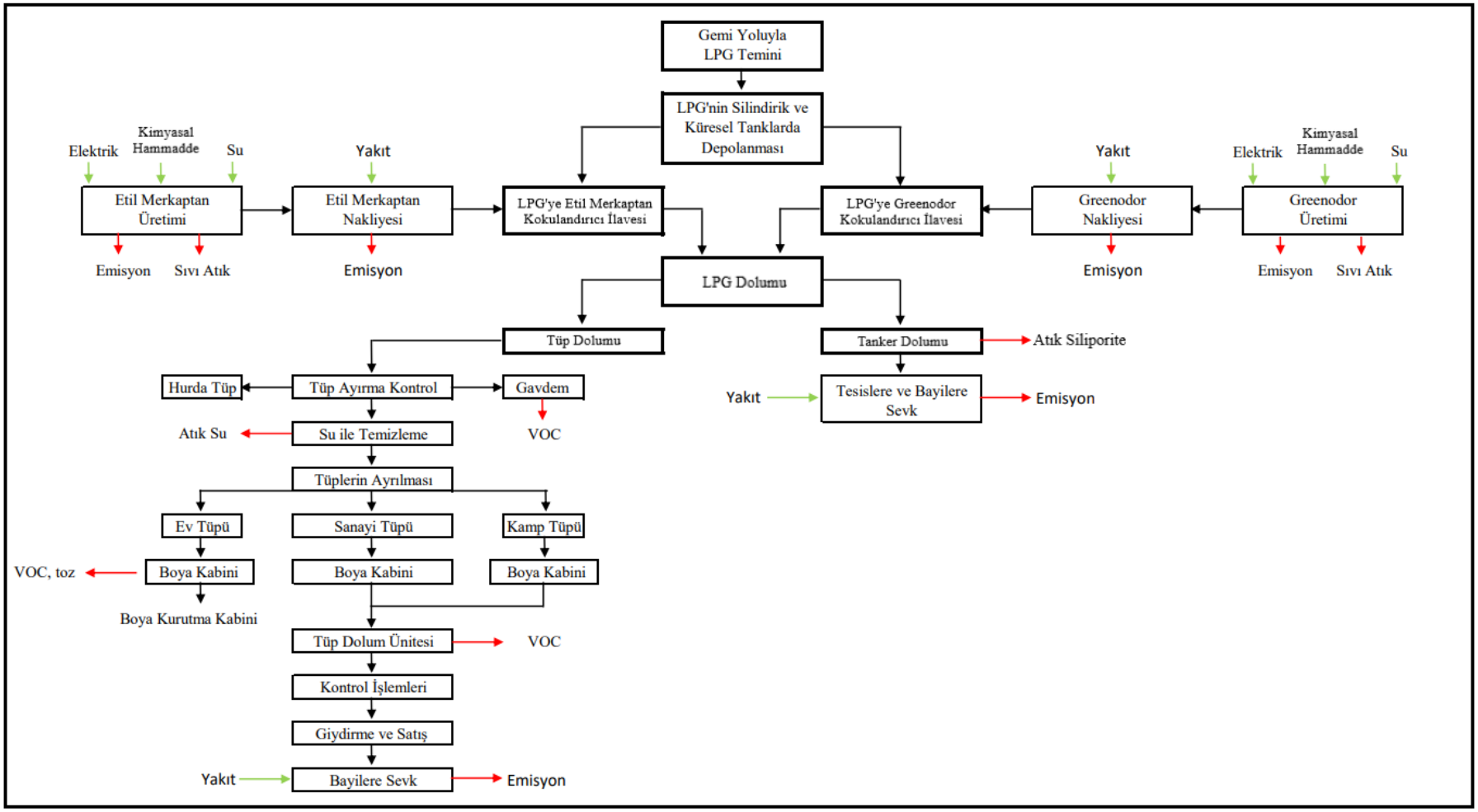
Amaç ve kapsam belirleme aşamasında karar verilmesi gereken önemli hususlardan bir diğeri ise değerlendirilecek olan ürün ya da süreci tanımlayan bir fonksiyonel birimin seçilmesidir. Fonksiyonel birim, YDD sonuçlarının ölçülebilir ve kullanılabilir olmasını sağlamaktadır. Bu sebeple seçimi oldukça hassas ve önemli bir konudur. YDD çalışması iki veya daha fazla ürün veya sürecin karşılaştırılması amacı taşıdığında, fonksiyonel birim seçilirken karşılaştırma temelleri eşdeğer olmalıdır (Çağlayan, 2011).

Gerçekleştirilen çalışma ile LPG dolum sürecinin çevresel etkilerinin YDD yaklaşımı ile belirlenmesi hedeflenmektedir. LPG, dünya genelinde sıklıkla tercih edilen petrol kökenli yakıtlara kıyasla daha az kirlilik yaymaktadır. Bu sebeple LPG'nin yaşam döngüsü analizi ile olası çevresel etkilerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Renksiz ve kokusuz bir gaz olan LPG'nin herhangi bir kaçak anında fark edilmesi zorlaşmakta, bu nedenle dünya genelinde LPG'nin içerisine az miktarda kükürt içeren kokulandırıcı ilave edilmektedir.

Kükürt içeren kokulandırıcı olarak etil merkaptan kullanılmakta ve bu bileşik çevre ve insan sağlığı açısından tehlike arz etmektedir. Kükürtlü bileşikler yakıldığında SO_2 emisyonu yayarak hava kirliliğine sebep olmakta ve asit yağmurlarına da neden olarak birçok çevresel felaketi beraberinde getirmektedir. Çalışmanın yürütüldüğü tesiste kükürtün zararlı etkilerinden dolayı kükürt kullanımının sıfırlanması hedeflenmiş ve kükürt içermeyen kokulandırıcı bir madde (Greenodor) geliştirilmiştir. Bu kapsamda söz konusu çalışmada gerçekleştirilen yaşam döngüsü değerlendirme (YDD) çalışmasının amacı, etil merkaptan ile kokulandırılmış LPG dolumu ve Greenodor ile kokulandırılmış LPG dolumunun çevresel etkilerinin ortaya konması ve karşılaştırmalı olarak yorumlanmasıdır.

Çalışmanın yürütüldüğü tesis 1962 yılında Yarımca'da kurulmuştur. Tesis, LPG dolum ve dağıtım alanında faaliyet göstermektedir. LPG, tesise gemi yoluyla veya boru hattı ile taşınarak depolama tanklarına sevk edilmekte ve bu tanklardan dağıtımı yapılmaktadır. Yükleme ve boşaltma operasyonlarına ilişkin kuruluşun kendisine ait gemi boşaltma alanı bulunmamakta farklı bir tesise ait liman kullanılmaktadır. Tesise ulaşan LPG, depolama tanklarına alınmakta ve bu aşamada katkı maddesi (etil merkaptan/Greenodor) eklenmektedir. LPG, renksiz ve kokusuz bir gaz olması sebebiyle herhangi bir kaçak anında fark edilememektedir. Bu nedenle kokulandırıcı katkı maddeleri ilave edilerek ticari olarak satılabilir hale getirilmekte ve dolum ünitelerine aktarılmaktadır. Tesiste tüp dolum ve tanker dolum olmak üzere iki ayrı proseste dolum işlemi gerçekleştirilmektedir. Tüpler, evsel kullanım ve araçlarda kullanım amaçlı bayilere veya istasyonlara iletilmektedir. LPG tankerleri ise araçlarda kullanım amaçlı istasyonlara gönderilmektedir. Bu bağlamda çalışmanın kapsamı "tanktan tekerleğe" (tank-to-wheel) olarak ifade edilebilmektedir. Tesise ait proses akım şeması Şekil 3.3.'de görüldüğü gibidir.

Çalışmanın gerçekleştirildiği tesiste LPG üretimi gerçekleştirilmediğinden ve çalışmanın amacının etil merkaptan ve onun alternatifi olarak kullanılan Greenodor katkı maddesinin olası etkilerinin ortaya konması olduğundan, "LPG üretimi" bu YDD çalışmasının sistem sınırlarına dahil edilmemiştir.



Şekil 3. 3. YDD çalışmasının sistem sınırı ve LPG dolum prosesi akım şeması

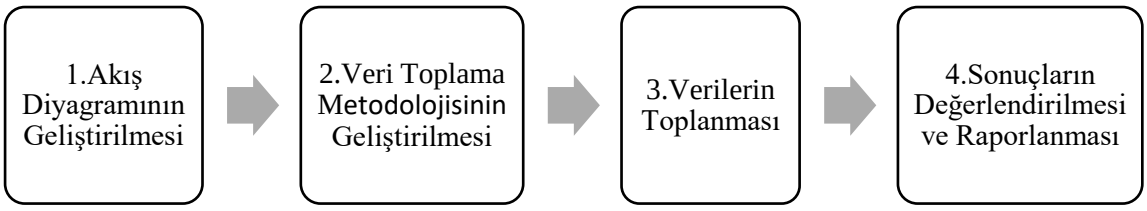
Etil merkaptan ile kokulandırılmış LPG'nin araçlarda kullanımına dair literatürde çalışmalar yapılmış olmakla birlikte; Greenodor ile kokulandırılmış LPG'nin araçlarda kullanımına dair mevcut çalışma bulunmaması nedeniyle Greenodor ile kokulandırılmış LPG'nin araçlarda kullanımına dair bir model oluşturulamamıştır.

Çalışmanın fonksiyonel birimi "1 ton LPG dolumu" olarak seçilmiştir. Tesiste tüp dolum ve tanker dolum faaliyetleri için ayrı modeller oluşturularak yaşam döngüsü etkileri ortaya konulmuştur.

3.1.2. Yaşam Döngüsü Envanter Analizi

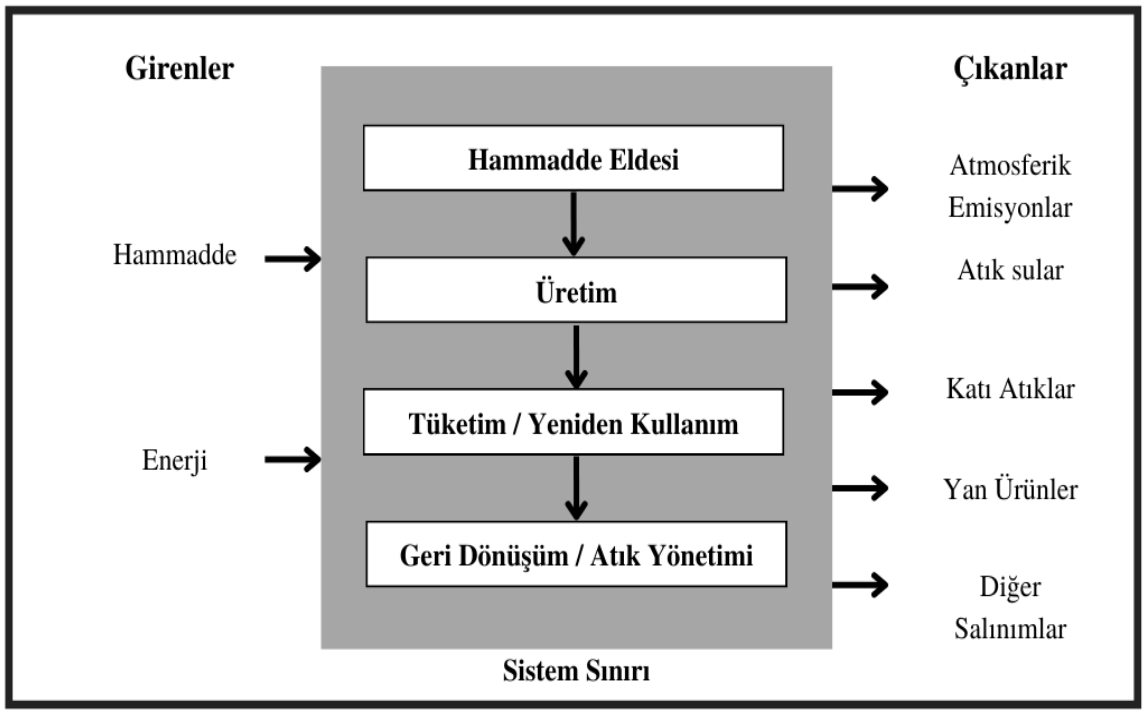
Yaşam döngüsü envanter analizi, YDD'nin ikinci adımıdır ve bir YDD'nin temelini oluşturmaktadır. Ürün imalatının değiştirilmesi ve yeniden analizinde çok önemli bir adım olan envanter analizi, çeşitli çevresel girdi ve çıktı verilerini içermektedir (Gaur, 2022). Bu aşama, ürün, süreç veya faaliyet kaynaklarının yaşam döngüsü aşamaları boyunca kaynak tüketimi, enerji tüketimi veya çevreye salınan emisyonların nicel veri analizi olarak tanımlanabilmektedir (Chen & Wang, 2017).

Ayrıca yaşam döngüsü envanter analizi (YDEA), ISO tarafından "bir ürün veya süreç için yaşam döngüsü boyunca girdi ve çıktıların derlenmesini ve ölçülmesini içeren yaşam döngüsü değerlendirmesinin aşaması" olarak tanımlanmıştır. Bu tanım doğrultusunda bir ürün, süreç veya hizmetin tüm yaşam döngüsü için ham madde ihtiyacı, atmosferik emisyonları, su ile taşınan emisyonları, enerji ihtiyacı, katı atıkları ve çevreye yayılan diğer kirlilik kaynakları gibi unsurların nicelleştirilmesi gereken bir süreçtir (Muthu, 2020). ISO 14040'a göre envanter analizi, Şekil 3.4'de gösterildiği gibi bir dizi aşamadan oluşmaktadır (ISO, 2006a).



Şekil 3. 4. Yaşam döngüsü envanter analizi aşamaları (ISO, 2006a)

Yaşam döngüsü envanter analizinin ilk aşamasında ürünün belirlenen sistem sınırları için kullanılan bir akış şeması çizilerek tüm evrelerin tanımı yapılmaktadır (Üstün, 2013). Sistem sınırı YDD çalışmasının bir önceki aşaması olan amaç ve kapsam belirleme sürecinde belirlenmekte ve her çalışma için farklılık gösterebilmektedir. Belirlenen bu sınır, akış diyagramı içerisinde kullanılmaktadır (Çağlayan, 2011). Akış şemasında, yaşam döngüsündeki tüm prosesler ile girdi ve çıktılar nicel olarak belirlenerek, farklı çevresel kategorilerde sınıflandırılmaktadır (Üstün, 2013). Akış diyagramı, daha fazla veri kullanılarak detaylandırıldıkça sonuçların hassasiyeti artmaktadır. Ancak fazla veri kullanımı ile kaynak ve zamana olan ihtiyacın artacağı unutulmamalı ve sonuçların doğruluğu riske atılmamalıdır (Çağlayan, 2011). Şekil 3.5'de bir YDEA dikkate alınarak olası yaşam döngüsü aşamalarını ve ölçülen tipik girdi/çıktıları gösterilmiştir (Curran ve diğ., 2006).



Şekil 3. 5. YDD sistem sınırı ve ölçülen tipik girdi/çıktılar (Curran ve diğ., 2006)

Envanter analizinin ikinci aşamasında ise bir veri toplama metodolojisinin/planının geliştirilmesi gerekmektedir. Veri toplama planı, verilerin kalitesinin istenilen seviyede olmasını ve doğruluğunun karar vericilerin beklentilerini karşılamasını sağlamaktadır (Curran ve diğ., 2006).

Bu aşamada veri kalite hedeflerinin, veri kaynaklarının, veri türlerinin ve veri kalite göstergelerinin belirlenmesi sonrası bir veri toplama çalışma sayfası oluşturulmalıdır. Sonrasında veriler toplanmakta ve doğrulanmaktadır. Verilerin birim süreç ve çalışma için varsayılan işlevsel birim ile ilişkili olması gerekmektedir (Muthu, 2020; Curran ve diğ., 2006).

Veri toplama planının yapılmasının ardından envanter analizinin bir diğer aşaması olan veri toplama işlemleri gerçekleştirilmektedir. ISO 14040'a göre belirlenen sistem sınırı içerisindeki birim süreçler için enerji, ham madde ve diğer girdiler, ürünler, yan ürünler, atıklar, havaya, suya ve toprağa verilen deşarjlar, diğer çevresel boyutlar gibi veriler belirlenerek sınıflandırılmalıdır (ISO, 2006a). Envanter analizinin en yoğun aşamalarından olan veri toplama aşamasında uygulamadan kaynaklanan zorluklar, kapsam belirlenirken göz önünde bulundurulmalıdır.

Veri toplama aşamasında veriler genellikle araştırmalardan, saha ziyaretlerinden veya uzmanlarla doğrudan iletişimin sonucu elde edilmektedir. Elde edilemeyen verileri temin edilebilmek için piyasada mevcut olan bir YDD yazılım paketinden yararlanılmaktadır (Curran ve diğ., 2006).

Tablo 3.1'de, farklı sektörler için kullanım imkânı tanıyan veri tabanlarından bazılarına yer verilmiştir (Hernandez ve diğ., 2019). Tablo 3.1'de sunulan veri tabanlarının dışında veri kaynakları arasında, laboratuvarlardan alınan test sonuçları, ekipmandan sayaç okumaları, endüstri veri sayfaları, raporlar, kitaplar, patentler, önceki YDEA çalışmaları, devlet belgeleri bir YDD çalışmasında kullanılabilen veri kaynakları arasındadır (Muthu, 2020).

Envanter analizinin son aşamasında sonuçlar değerlendirilmekte ve raporlanmaktadır. YDEA sonuçları raporlarken, analiz sırasında kullanılan metotlar belirlenmeli, analizi gerçekleşen sistemler ve belirlenen sınırlar tanımlanmalı, envanter analizi aşamasında yapılan varsayımlar belirtilmeli, sistemler arasındaki karşılaştırmaların temeli ve kullanılan eşdeğer oranlar ifade edilmelidir (Çağlayan, 2011).

Tablo 3. 1. Bazı çok sektörlü yaşam döngüsü envanteri veri tabanları (Hernandez ve diğ., 2019)

Veri Tabanı	Açıklama
Avrupa referans yaşam döngüsü veri tabanı 3.1	Önde gelen AB düzeyindeki iş birliklerinden ve temel malzemeler, enerji taşıyıcıları, nakliye ve atık yönetimi için diğer kaynaklardan elde edilen yaşam döngüsü envanteri (YDE) veri tabanıdır.
ABD yaşam döngüsü envanter veri tabanı	ABD'de bir malzeme, bileşen veya montajın üretilmesiyle bağlantılı olarak çevresel girdi ve çıktılar ile enerji ve malzeme akışlarının ayrı ayrı kapıdan kapıya, beşikten kapıya ve beşikten mezara sistem sınırları için veri tabanıdır.
Danimarka için IO-veri tabanı	Danimarka ulusal, ekonomik ve çevresel muhasebe istatistiklerine dayalı girdi ve çıktıları içeren veri tabanıdır.
Ecoinvent v3.1	Endüstriyel, inşaat, nakliye süreçlerini ve sistemlerinin çoğunu içeren uluslararası YDE veri tabanıdır.
GaBi yaşam döngüsü analizi veri tabanı	Endüstriyel, inşaat, nakliye süreçlerini ve sistemlerinin çoğunu içeren uluslararası YDE veri tabanıdır.
GEMIS 4.5	Enerji, taşıma süreçleri, malzemeler, süreçler, geri dönüşüm ve atık işlemeyi içeren ücretsiz veri tabanıdır.

Envanter analizinin son aşamasında sonuçlar değerlendirilmekte ve raporlanmaktadır. YDEA sonuçları raporlarken, analiz sırasında kullanılan metotlar belirlenmeli, analizi gerçekleşen sistemler ve belirlenen sınırlar tanımlanmalı, envanter analizi aşamasında yapılan varsayımlar belirtilmeli, sistemler arasındaki karşılaştırmaların temeli ve kullanılan eşdeğer oranlar ifade edilmelidir (Çağlayan, 2011).

Bu çalışmada envanter analizleri kapsamında öncelikle tesisten temin edilen veriler kullanılmıştır. Tesisten elde dilemeyen veriler için ise SimaPro yazılımında yer alan veri tabanları (Ecoinvent, USLCI) ve literatür çalışmalarından yararlanılmıştır. Etil merkaptan ve Greenodor üretimi için SimaPro'da seçilen prosesler Ekler bölümünde Tablo A.1'de, dolum prosesleri için seçilen girdi ve çıktılara ait prosesler ise Tablo A.2'de verilmiştir.

Tesiste gerçekleştirilen LPG dolumunun %91,6'sını tanker dolum; %8,3'ünü ise tüp dolum oluşturmaktadır. Tanker ve tüp dolum modellerinin oluşturulması için kullanılan girdi ve çıktılar Tablo 3.2'de özetlenmiştir.

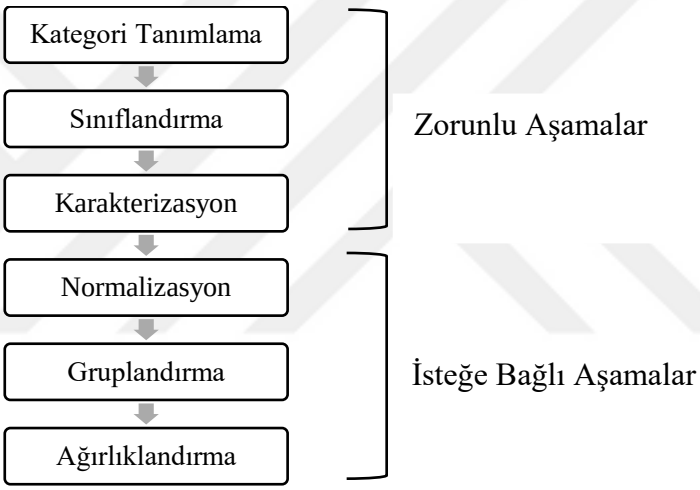
Tablo 3. 2. LPG tanker ve tüp dolum için girdi ve çıktılar (Fonksiyonel birim: 1 ton LPG dolumu)

	Tanker Dolum		***Tüp Dolum***	
Parametre	**Etil merkaptan katkılı LPG**	**Greenodor katkılı LPG**	**Etil merkaptan katıklı LPG**	**Greenodor katkılı LPG**
Girdiler				
Propan/LPG, tesiste tüketilen (ton)	0.000346063		0.000358508	
LPG, dolum yapılan (t)	0.99997010	0.99998207	0.99996903	0.999981428
Etil Merkaptan(kg)	0.02989726	-	0.03097247	-
Greenodor (kg)	-	0.01792732	-	0.018572045
Elektrik (kWh)	4.06120339		4.207258779	
Su (m^3)	0.03873353		0.040126526	
Valf (adet)	-		1.36	
Alüminyum Pasta (kg)	-		0.104	
Tiner (kg)	-		0.143	
Boya (kg)	-		1.08	
Nakliye, deniz yolu (tkm)	3495		3495	
Nakliye, karayolu (tkm)	107			
Nakliye, karayolu (tkm) – bayi-tdm	-		52.66	
Nakliye, karayolu (tkm) – bayi-son kullanıcı	-		80	
Nakliye, karayolu (kgkm)	5.54			
Nakliye, karayolu (kgkm) – malzeme temini	-		67.65	
Nakliye, karayolu (kgkm) – atık bertarafı	-		8901	
Çıktılar				
Havaya Verilen Emisyonlar (kg)				
NO_2	-		0.0914	
NO	-		0.0563	
SO_2	-		0.000698	
Partikül Madde	-		0.000675	
VOC	-		1.68	
TOC	-		1.48	
*Bertarafa gönderilen atık (kg)	0.0684		14.81	
Ürün	**1 ton LPG**			

*Bertarafa gönderilen atıkların yaklaşık %92'sini R4 atık kodu ile geri kazanılan metalik ambalaj ve/veya metaller oluşturduğundan, kalan %8'lik kısım ihmal edilmiştir.

3.1.3. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirme

Envanter analizinden elde edilen sonuçlar, yaşam döngüsü değerlendirme çalışmasının üçüncü aşaması olan etki değerlendirme aşamasına kullanılmaktadır. Etki değerlendirme aşaması ile muhtemel çevresel etkilerin değerlendirilmesi ve alternatif etkiler arasında karşılaştırma yapılabilmesi hedeflenmektedir (Çankaya, 2018; Çağlayan 2011). ISO 14040 Standardına göre etki değerlendirme, zorunlu ve isteğe bağlı unsurlar olmak üzere iki safhaya ayrılmıştır. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi ilk aşama olan zorunlu unsurlar, etki kategorilerinin tanımlanması, sınıflandırılması ve kategorileştirme süreçlerini kapsamaktadır. İsteğe bağlı unsurlar ise, normalleştirme, gruplandırma, önem belirleme (ağırlıklandırma) süreçlerinden oluşmaktadır (URL-6).



Şekil 3. 6. Yaşam döngüsü etki değerlendirme aşamaları (URL-6)

Yaşam döngüsü etki değerlendirme (YDED) aşamasında ürün veya hizmetin yaşam döngüsünün hangi aşamalarında hangi çevresel etkilere sebep olacağı açık bir şekilde belirtilmelidir (Üstün, 2013). Çevresel etkiler belirlenirken çalışmanın amacına uygun olarak çevresel kategoriler seçilmelidir (Ordu, 2017). YDED'nin ilk aşamasında küresel ısınma, ötrofikasyon gibi çevresel etki kategorileri seçilerek tanımlanmaktadır (Curran ve diğ., 2006). Bu adım, amaç ve kapsam belirleme aşamasının bir parçası olarak tamamlanmalı ve veri toplama aşamasının ardından yeniden gözden geçirilmelidir. Sık tercih edilen yaşam döngüsü etki kategorileri Tablo 3.3'de gösterilmiştir (Çankaya, 2018; Hernandez ve diğ., 2019; Çağlayan 2011; Belcher & Mander, 2012; Kaynak Duman, 2020; URL-7; URL-8).

Tablo 3. 3. Yaşam döngüsü etki değerlendirme aşamasında sıklıkla kullanılan etki kategorileri

Etki Kategorisi	Ölçek	Etki Kategorisinin Açıklaması	Veri Örnekleri	Karakterizasyon Faktörünün Açıklaması	Birim
Küresel Isınma	Küresel	Atmosfere salınan sera gazının artması sebebiyle atmosferin ısının olması gerekenden fazla olması olarak ifade edilir.	CO_2, CH_4, NO_2, CFSc, HFCFs, CH_3Br	YDE verisini CO_2 eşdeğerlerine dönüştürür. Not: Küresel ısınma potansiyelleri 50,100 veya 500 yıl olabilir.	Havdaki kg CO_2 eşd.
Stratosferik Ozon Tüketimi	Küresel	İnsan faaliyetlerine bağlı olarak UV-B radyasyon seviyelerine yol açan ozon tabakasındaki incelme olarak ifade edilir.	CFSc, HFCFs, CH_3 Br	YDE verisini trikloroflorometana (CFC-11) eşdeğerinlerine dönüştürür.	Havadaki kg CFC-11 eşd.
Asidifikasyon	Bölgesel Yerel	Asidik özellikli maddelerin toprak, organizmalar, ekosistemler, yeraltı ve yüzey suları vs. üzerinde yarattığı toksik etki olarak ifade edilir.	SO_x, NO_x, HCL, HF, NH_4	YDE verisini hidrojen iyonu eşdeğerlerine dönüştürür.	Havadaki kg SO_2 eşd.
Ötrofikasyon	Yerel	Sucul ekosistemlerindeki alg ve planktonların artmasıyla birlikte besi maddelerinin zenginleşmesi olarak ifade edilir.	PO_4, NO, NO_4, NH_4	YDE verisini fosfat eşdeğerlerine dönüştürür.	Sudaki kg PO_4^{3-} eşd.
Fotokimyasal Sis	Yerel	Güneş ışığının etkisiyle belirli hava kirleticilerinden (hidrokarbon ve nitrojen oksit) reaktif kimyasal bileşiklerin oluşumu olarak ifade edilir.	NMHC	YDE verisini metan eşdeğerlerine çevirir.	Havadaki kg etilen eşd.
Karasal Zehirlilik	Yerel	Karasal ekotoksisite olarak da tanımlanan karasal zehirlilik, çevresel kirleticilerin toprağa bağımlı organizmaları ve çevrelerini nasıl etkilediğinin incelenmesi olarak ifade edilmektedir.	Kemirgenlere olan öldürücü konsantrasyonu raporlanmış zehirli kimyasallar	LC_{50} verisini eşdeğerlere dönüştürür.	Topraktaki kg trietilen glikol eşdeğeri

Tablo 3. 3. (Devam) Yaşam döngüsü etki değerlendirme aşamasında sıklıkla kullanılan etki kategorileri

Etki Kategorisi	Ölçek	Etki Kategorisinin Açıklaması	Veri Örnekleri	Karakterizasyon Faktörünün Açıklaması	Birim
Su Zehirliliği	Yerel	Su zehirliliği, sudaki bir kirleticinin veya kirleticilerin sucul ekosistemde yaşayan balıklar, omurgasızlar ve algler gibi organizmalar üzerindeki potansiyel etkilerin belirlemesini ifade etmektedir.	Balıklara olan öldürücü konsantrasyonu raporlanmış zehirli kimyasallar	LC_{50} verisini eşdeğerlere dönüştürür.	Sudaki kg trietilen glikol eşd.
İnsan Sağlığı	Küresel Bölgesel Yerel	Hastalık ve ölüm oranlarındaki artışı ifade etmektedir.	Havaya, suya ve toprağa yapılan toplam salımlar	LC_{50} verisini eşdeğerlere dönüştürür.	Engelliliğe ayarlanmış yaşam yılları
Kaynak Tüketimi	Küresel Bölgesel Yerel	Gelecek nesiller için gerekli olan doğal kaynaklardaki azalmayı ifade etmektedir.	Kullanılan mineral ve fosil yakıt miktarı	YDE verisini kullanılan kaynağın miktarına karşın rezervde kalan kaynağın miktarına dönüştürür	Mineral kaynak için; kg bakır eşd. Fosil kaynak için; kg petrol eşd.
Arazi Kullanımı	Küresel Bölgesel Yerel	Doğal yaşamın ihtiyacı olan karasal yaşam alanlarının kaybı ve düzenli depolama alanlarında azalma olarak ifade edilmektedir.	Diğer arazi değişiklikleri veya düzenli bir depolama sahasının kullanılma miktarı	Tahmini bir özkütle kullanarak katı atığın kütlesini hacme dönüştürür.	m^2 organik ekilebilir arazi eşd.
Su Kullanımı	Bölgesel Yerel	Mevcut yüzey ve yer altı su kaynaklarında azalma olarak ifade edilmektedir. (USEPA, 2006)	Su kullanımı veya tüketimi	YDE verisini kullanılan kaynağın miktarına karşın rezervde kalan kaynağın miktarına dönüştürür.	Tüketilen m^3 su

YDED'nin ikinci aşaması olan sınıflandırma aşamasında, envanter sonuçları etki kategorileri ile ilişkilendirilmektedir. Buna örnek olarak tüm karbondioksit (CO_2) emisyonlarının, küresel ısınmaya katkılarını gösterecek şekilde sınıflandırılması verilebilmektedir (Curran ve diğ., 2006).

Sınıflandırma aşaması sonrası karakterizasyon yoluyla, bilimsel karakterizasyon faktörleri kullanılarak etki kategorileri modellenmektedir. Buna örnek olarak karbondioksit (CO_2) ve metanın (CH_4) küresel ısınma etkilerinin modellenmesi verilebilmektedir (Çağlayan ve diğ., 2011). Karakterizasyon aşamasında, her bir etki kategorisiyle ilişkili tüm çevresel verilerin etkilerinin karşılaştırılması sağlanmaktadır. Örneğin, CO_2 ve CH_4 gazının küresel ısınma etki kategorisi üzerindeki olası etkileri karakterizasyon faktörleri kullanılarak modellenmektedir (Çankaya, 2018). ISO 14044'e göre karakterizasyon aşaması son zorunlu aşamadır. Ancak, yukarıdaki zorunlu YDED adımlarına ek olarak, YDD çalışmasının amacına ve kapsamına bağlı olarak diğer isteğe bağlı unsurlar (normalleştirme, gruplama ve ağırlıklandırma) yürütülebilmektedir (ISO, 2006b).

Normalizasyon aşamasında karşılaştırma imkânı olan potansiyel etkiler açıklanmakta, gruplandırma aşamasında göstergeler sınıflandırılmakta ve sıralanmakta, ağırlıklandırma aşamasında ise en önemli potansiyel etkiler vurgulanmaktadır. Son aşamada YDED sonuçları değerlendirilerek raporlanmaktadır (Curran ve diğ., 2006).

YDED aşamasında etkiyi hesaplamak için bir dizi etki değerlendirme yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemler başlıca orta nokta ve son nokta yaklaşımları olarak ikiye ayrılmaktadır. Orta nokta metotları karakterizasyon odaklı iken son nokta metotları hasar analizine dayalıdır. Bazı metotlar hem orta nokta hem de son nokta yaklaşımlarına sahip olabilmektedir. Tablo 3.4'de YDED metotları ayrıntılı olarak açıklanmış ve uygulandıkları ekti kategorileri verilmiştir (Acero ve diğ., 2016; Hernandez ve diğ., 2019; URL-9; URL-10).

Çalışmada etki değerlendirme aşamasında SimaPro yazılımında yer alan CML-IA orta nokta metodu kullanılmıştır. CML-IA, 2001 yılında Leiden Üniversitesi Çevre Bilimleri Merkezi liderliğindeki bir grup bilim insanı tarafından geliştirilmiş bir orta nokta yaklaşımıdır. (Acero ve diğ., 2016).

Tablo 3. 4. Yaşam döngüsü etki değerlendirme metotları

Orta Nokta Yaklaşımı			
Metodoloji	**YDED Aşaması**	**Açıklama**	**Etki Kategorileri**
CML-IA	Karakterizasyon ve Normalizasyon	CML, Hollanda Leiden Üniversitesi tarafından geliştirilen ve etki değerlendirme adımı için bir dizi etki kategorisi ve karakterizasyon aşamasını içeren bir orta nokta yöntemidir. CML yöntemi, etki kategorilerini YDD çalışmasında kullanılan zorunlu etki kategorileri (temel etki kategorileri) ve temel olmayan etki kategorileri olmak üzere ikiye ayırmaktadır.	-Abiyotik Kaynak Tükenmesi -Biyotik Kaynak Tükenmesi -İklim Değişikliği -Stratosferik Ozon İncelmesi -İnsan Toksisitesi -Tatlı Su Ekotoksisitesi -Deniz Suyu Ekotoksisite -Karasal Ekotoksisite -Fotokimyasal Oksidan Oluşumu -Asidifikasyon -Ötrofikasyon
Cumulative Energy Demand (CED)	Karakterizasyon	Ecoinvent center tarafından yayınlanan CED yönteminin amacı bir mal veya hizmetin yaşam döngüsü boyunca birincil enerji kullanımını ölçmektir. Karakterizasyon faktörlerini belirlemek için farklı yakıt ve malzemelerin brüt kalorifik değerleri kullanmaktadır.	-Yenilenemez kaynaklar -Yenilenebilir kaynaklar
IPCC 2021	Karakterizasyon	IPCC 2021, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli tarafından geliştirilen IPCC 2013 yönteminin yerine kullanılmaktadır. Bu yöntem, IPCC'nin "AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis" raporuna dayanmakta olup küresel ısınma potansiyelini (GWP) ölçen altı yöntem ve küresel sıcaklık potansiyelini (GTP) ölçen iki yöntem ile sonuçlanan farklı tipte karakterizasyon faktörleri sağlamaktadır.	-Küresel Isınma Potansiyeli -Küresel Sıcaklık Potansiyeli

Tablo 3. 4. (Devam) Yaşam döngüsü etki değerlendirme metotları

Metodoloji	**YDED Aşaması**	**Açıklama**	**Etki Kategorileri**
EDIP 2003	Karakterizasyon, Normalizasyon ve Ağırlıklandırma	Küresel olmayan etki kategorilerinin çoğu için Avrupa ülkeleri baz alınarak sahaya bağlı karakterizasyon sağlamaktadır.	-Ozon Tabakasının İncelmesi -Küresel Isınma Potansiyeli -Asidifikasyon -Karasal Ötrofikasyon -Sucul Ötrofikasyon -İnsan Toksisitesi -Ekotoksisite -Tehlikeli Atıklar -Cüruflar/Küller -Radyoaktif Atıklar
TRACI 2.1	Karakterizasyon ve Normalizasyon	Kimyasal ve Diğer Çevresel Etkilerin Azaltılması ve Değerlendirilmesi Aracı (TRACI), ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından ABD konumlarıyla tutarlı girdi parametreleri kullanılarak özel olarak ABD için geliştirilen bağımsız bir yöntemdir. TRACI başlangıçta yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) ile kullanılmak üzere tasarlanmıştır, ancak gelecekte daha geniş bir uygulama alanına sahip olması beklenmektedir.	-Ozon Tabakasının İncelmesi -Küresel Isınma Potansiyeli -Duman (Smog) -Asidifikasyon -Ötrofikasyon -Kanserojenler -Kanserojen Olmayan -Solunum Yolu Etkileri -Ekotoksisite -Fosil Yakıt Tüketimi

Tablo 3. 4. (Devam) Yaşam döngüsü etki değerlendirme metotları

Metodoloji	**YDED Aşaması**	**Açıklama**	**Etki Kategorileri**
Environmental Prices	Karakterizasyon ve Ağırlıklandırma	Environmental Prices, çevresel etkileri ekonomik olarak ifade etmek için CE Delft tarafından geliştirilmiş olup, bir kirleticinin çevre üzerinde meydana getirdiği ekonomik refah kaybını göstermektedir. Karakterizasyon adımı, IPCC'ye (2013) dayalı iklim değişikliği istisnası ile hiyerarşik perspektif olan ReCiPe (2008) Midpoint'in bir kopyasıdır.	-Ozon Tabakasının İncelmesi -Küresel Isınma Potansiyeli -Partikül Madde Oluşumu -Fotokimyasal Oksidan Oluşumu -İnsan Toksisitesi -Asidifikasyon -Ötrofikasyon -Ekotoksisite -İyonlaştırıcı Radyasyon -Kaynak Tükenmesi
Ecological scarcity (Ecopoints) 2021	Karakterizasyon, Normalizasyon ve Ağırlıklandırma	Ecological scarcity yöntemi, "eko-faktörler" uygulayarak çevresel etkileri (kirletici emisyonları ve kaynak tüketimi) ağırlıklandırmaktadır. Bu yöntemde hedefe uzaklık ilkesi uygulanmaktadır. Mevcut emisyon seviyesi veya kaynak tüketimi, belirlenen çevre koruma hedefini ne kadar aşarsa, eko-nokta olarak ifade edilen eko-faktör o kadar büyük olmaktadır. Bir eko-faktör esasen üç unsurdan türetilmektedir (ISO Standard 14044'e göre); karakterizasyon, normalizasyon ve ağırlıklandırma.	-Ozon Tabakasının İncelmesi -Küresel Isınma Potansiyeli -Enerji Kaynakları -Ağır Metaller (hava, su ve toprak) -Mineral Kaynakları -Radyoaktif Olmayan Atıklar -Radyoaktif Maddeler (su ve hava) -Topraktaki Pestisitler -Biyotik Kaynaklar -Su Kaynakları -Su Kirleticileri -Gürültü -Arazi Kullanımı

Tablo 3. 4. (Devam) Yaşam döngüsü etki değerlendirme metotları

Metodoloji	**YDED Aşaması**	**Açıklama**	**Etki Kategorileri**
EF 3.0 Method (adapted)	Karakterizasyon, Normalizasyon ve Ağırlıklandırma	Environmental Footprint yöntemi, karbon ayak izi bağlamında kullanılmak üzere Avrupa Komisyonu tarafından geliştirilen etki değerlendirme yöntemini oluşturmaktadır. Ürünlerin ve kurumların çevresel ayak izi bu yöntem ile hesaplanarak, çevresel ayak izine en fazla katkıda bulunan etki kategorileri belirlenmektedir.	-Ozon Tabakasının İncelmesi -Küresel Isınma Potansiyeli -İnsan Toksisitesi -Solunum İnorganikleri -İyonlaştırıcı Radyasyon -Asidifikasyon -Karasal Ötrofikasyon -Tatlısu Ötrofikasyonu -Tuzlusu Ötrofikasyonu -Arazi Kullanımı -Su Kullanımı -Tatlısu Ekotoksisitesi -Kaynak Tükenmesi
EN 15804 + A2 method		EN 15804 yöntemi, Yapı Ürünlerinin Çevresel Ürün Beyanlarını (EPD'ler) kapsamaktadır. Bu standardın 2019 A2 revizyonu, biyojenik karbon yaklaşımları dışında metodolojilerini EF 3.0 yöntemiyle uyumlu hale getirmiştir.	-İklim Değişikliği ile Biyojenik Etkiler
EPD (2018)	Karakterizasyon	Bu yöntem, EPD (Environmental Product Declarations) (2013) yönteminin yerini almış olup, İsveç Çevre Yönetim Konseyi'nin (SEMC) web sitesinde yayınlandığı şekliyle çevresel ürün beyanlarının (EPD'ler) oluşturulması için kullanılmaktadır. Bir EPD her zaman bir ürün kategorisi kuralına göre oluşturulmaktadır.	-Asidifikasyon Potansiyeli -Ötrofikasyon Potansiyeli -Küresel Isınma Potansiyeli -Fotokimyasal Oksidan Oluşturma Potansiyeli -Abiyotik Tükenme Potansiyeli (Elementler) -Abiyotik Tükenme Potansiyeli (Fosil Yakıtlar) -Su Kıtlığı Ayak İzi

Tablo 3. 4. (Devam) Yaşam döngüsü etki değerlendirme metotları

Son Nokta Yaklaşımı			
Metodoloji	**YDED Aşaması**	**Tanım**	**Etki Kategorileri**
Ecoindicador 99	Hasar Analizi, Normalizasyon ve Ağırlıklandırma	Normalleştirme ve varsayılan ağırlık kümelerini de içeren son nokta metodolojisidir. Eco-indicator 99, ilk uç nokta değerlendirme yöntemi olup Eco-indicator 95'in yerini almıştır. Çevresel etkinin tek bir puanla ifade edilmesini sağlamaktadır. Bu yöntem, insan sağlığı, ekosistem kalitesi ve kaynaklar olmak üzere üç farklı türde hasarı analizi mevcuttur. Bu yöntemin amacı, ürünlerin veya bileşenlerin karşılaştırılmasıdır.	-Kanserojenler -Solunum Organikleri -Solunum İnorganikleri -Radyasyon -Ozon Tabakasının İncelmesi -Küresel Isınma Potansiyeli -Ekkotoksisite -Asidifikasyon -Ötrofikasyon -Arazi Kullanımı -Kaynak Tükenmesi (Mineral) -Kaynak Tükenmesi (Fosil Yakıtlar)
Birleşik Orta Nokta ve Son Nokta Yaklaşımı			
Metodoloji	**YDED Aşaması**	**Tanım**	**Etki Kategorileri**
IMPACT World+	Hasar Analizi ve Normalizasyon	IMPACT World+, IMPACT 2002+, LUCAS ve EDIP yöntemlerinin güncellenmesi ve derlenmesi olan metot hem orta nokta hem de son nokta yaklaşımı olarak kullanılmaktadır.	-Küresel Isınma Potansiyeli -Fosil ve Nükleer Enerji Kullanımı -Mineral Kaynakların Kullanımı -Fotokimyasal Oksidan Oluşumu, -İyonlaştırıcı Radyasyon -Ozon Tabakasının İncelmesi -Ekotoksisite -İnsan Toksisitesi -Asidifikasyonu -Ötrofikasyonu -Partikül Madde Oluşumu

Tablo 3. 4. (Devam) Yaşam döngüsü etki değerlendirme metotları

Metodoloji	**YDED Aşaması**	**Tanım**	**Etki Kategorileri**
RECIPE 2016	Karakterizasyon, Hasar Analizi ve Normalizasyon	ReCiPe, ilişkili karakterizasyon faktörleri kümeleriyle birlikte iki etki kategorisi kümesi içermektedir. Orta nokta düzeyinde, 18 etki kategorisi ele alınmaktadır. Son nokta düzeyinde ise orta nokta etki kategorilerinin çoğu, hasar faktörleriyle çarpılır ve insan sağlığına, ekosisteme ve kaynak kullanılabilirliğine zarar olmak üzere üç son nokta kategorisine toplanmaktadır.	-Ozon Tabakasının İncelmesi -Küresel Isınma Potansiyeli -İyonlaştırıcı Radyasyon -İnce Partikül madde oluşumu -Karasal Asidifikasyon -Tatlısu Ötrofikasyonu -Tuzlusu Ötrofikasyonu -İnsan Toksisitesi ve Ekotoksisite -Arazi Kullanımı -Su Kullanımı -Mineral Kaynakların Kullanımı -Fosil Kaynakların Kullanımı
LC-IMPACT	Karakterizasyon	LC-IMPACT, son nokta (hasar) düzeyinde küresel bir yaşam döngüsü etki değerlendirme metodolojisi sağlayan yöntem üç ana koruma alanını (insan sağlığı, ekosistem kalitesi ve kaynaklar) ele almaktadır. Gerekli ve mümkün olan her yerde mekânsal olarak farklılaştırılmış bilgileri içermektedir.	-İnsan Sağlığı -Ekosistem Kalitesi -Mineral Kaynakların Kullanımı
EPS 2015d and EPS 2015dx	Karakterizasyon, Ağırlıklandırma	EPS 2015 Default (temerrüt) metodolojisi, EPS 2000'in yerini alan hasar odaklı bir yöntemdir. Yöntem iki versiyonda mevcuttur: -EPS 2015d; ikincil parçacıklardan kaynaklanan iklim etkileri dahil, -EPS 2015dx; ikincil parçacıklardan kaynaklanan iklim etkileri hariç.	-Ekosistem Kalitesi -Suya Erişim -Biyoçeşitlilik -Yapı Teknolojisi -İnsan Sağlığı -Abiyotik Kaynaklar

Gerçekleştirilen çalışmada CML-IA etki değerlendirme metodu kullanılarak tesiste gerçekleşen LPG dolumunun olası çevresel etkileri on bir farklı kategoride değerlendirilmiştir. Değerlendirmenin yapıldığı etki kategorileri aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Abiyotik tükenme, maden cevher ve rezervleri gibi inorganik kaynakların çıkarılmasından kaynaklanan etkileri ifade etmektedir. Birimi, çıkarılan her bir kg mineralin antimon eşdeğeri (kg Sb-eşd.) olarak tanımlanmıştır.

Abiyotik tükenme (fosil yakıtlar), fosil yakıtların çıkarılmasından kaynaklanan etkileri ifade etmektedir. Birimi, çıkarılan fosil yakıtın alt ısıl değeri olan MJ olarak belirlenmiştir.

Küresel ısınma potansiyeli (100a), karakterizasyon faktörlerinin geliştirilmesi için Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından geliştirilen karakterizasyon modeli seçilmiştir. Sera gazlarının 100 yıllık süreçteki etkisini ifade etmektedir. Birimi kg karbon dioksit eşdeğeri olarak tanımlanmıştır.

Ozon tabakasının incelmesi, ozon tabakasının incelmesi nedeniyle yüksek oranda yeryüzüne ulaşan ve insan sağlığı, hayvan sağlığı, karasal ve sucul ekosistemlerde önemli zararları olan UV-B ışınlarının miktarının artması ile ilgili etki kategorisidir. Karakterizasyon modeli Dünya Meteoroloji Organizasyonu (WMO) tarafından geliştirilmiştir ve birimi farklı gazların ozon inceltme potansiyeli (kg CFC-11-eşd) olarak ifade edilmiştir.

İnsan toksisitesi, zehirli maddelerin insan sağlığına olan etkileri ile ilgili olan etki göstergesidir. Çalışma ortamında sağlık riski maruziyetleri dahil edilmemiştir. Birimi her bir zehirli madde için 1,4 diklorobenzen eşdeğeri olarak tanımlanmıştır.

Tatlı su ekotoksisitesi, hava, su ve toprağa verilen zararlı emisyonlar nedeniyle içme suyunun kirletilmesi ile ilgilidir. Birimi 1,4 diklorobenzen eşdeğeri olarak tanımlanmıştır.

Deniz suyu ekotoksisitesi, zehirli maddelerin deniz ekosistemine olan etkileri ile ilgilidir. Birimi 1,4 diklorobenzen eşdeğeri olarak tanımlanmıştır.

Karasal ekotoksisite, zehirli maddelerin karasal ekosistem üzerine olan etkileri ile ilgilidir. Birimi 1,4 diklorobenzen eşdeğeri olarak tanımlanmıştır.

Fotokimyasal oksidasyon, insan sağlığına, ekosisteme ve tarımsal alanlara zararlı etkileri olan ozon gazı oluşumunu ifade etmektedir. Bu problem ayrıca "yaz smog'u" olarak da ifade edilmektedir. Kış smog'u bu kategoriye dahil edilmemiştir. Birimi kg etilen eşdeğeri olarak tanımlanmıştır.

Asidifikasyon (asitleşme) potansiyeli, asitleyici maddelerin toprak, yer altı suyu, akarsular, organizmalar, ekosistem ve malzemeler (binalar) üzerindeki etkileri ile ilgilidir. Birimi kg SO_2 eşdeğeri olarak tanımlanmıştır.

Ötrofikasyon potansiyeli, besin maddelerinin havaya, suya ve karaya olan aşırı miktarda emisyonlarından kaynaklanan etkilerle ilgilidir. Birimi kg PO_4 eşdeğeri olarak tanımlanmıştır (URL-9).

3.1.4. Yaşam Döngüsü Yorumlama

Bir YDD çalışmasının son safhası olan yorumlama aşamasında, amaç ve kapsam doğrultusunda belirlenen sonuçlar yorumlanmakta ve sistemin performansı belirlenmektedir. Yapılan çalışmanın sonuçları açık ve anlaşılır bir şekilde ifade edilmeli ve değerlendirilerek öneriler sunulmalıdır (Ata, 2022).

CML-IA temel etki değerlendirme yöntemiyle ortaya konan yaşam döngüsü etki değerlendirme sonuçları, çalışmanın amacına, kapsamına ve fonksiyonel birimine göre yorumlanmıştır. LPG depolama ve dolum proseslerinde çevre üzerinde olası olumsuz etkilere sahip olduğu tespit edilen etki kategorileri için katkı analizleri gerçekleştirilerek, söz konusu etki kategorileri üzerinde katkısı en yüksek olan prosesler ortaya konmaya çalışılmıştır.

3.1.5. Belirsizlik Analizi

Bir YDD çalışmasında belirsizlik, hafife alındığı veya genellikle göz ardı edildiği için sonuçlarının güvenilirliğini etkileyen ana konulardan biridir. YDD'de temel olarak parametre, senaryo ve model belirsizliği olmak üzere üç farklı belirsizlik kaynağı vardır (Bamber ve diğ., 2020). Özellikle yeterli deneysel veya gerçek verinin bulunmadığı

durumlarda, karmaşık sistemlerin performansını değerlendirmek ve tahmin etmek için belirsizlik analizi yapılarak çalışmanın güvenilirliği gösterilmelidir. (Mahadevan ve Sarkar, 2010). Bir YDD çalışması sürecindeki en bariz belirsizlik, envanter aşamasında kullanılan verilerden kaynaklanmaktadır. Etkin ve standartlaştırılmış envanter verilerinin olmaması ve veri toplamada çeşitli hatalar bu durumun başlıca sebepleri arasındadır (Sun ve Ertz, 2020).

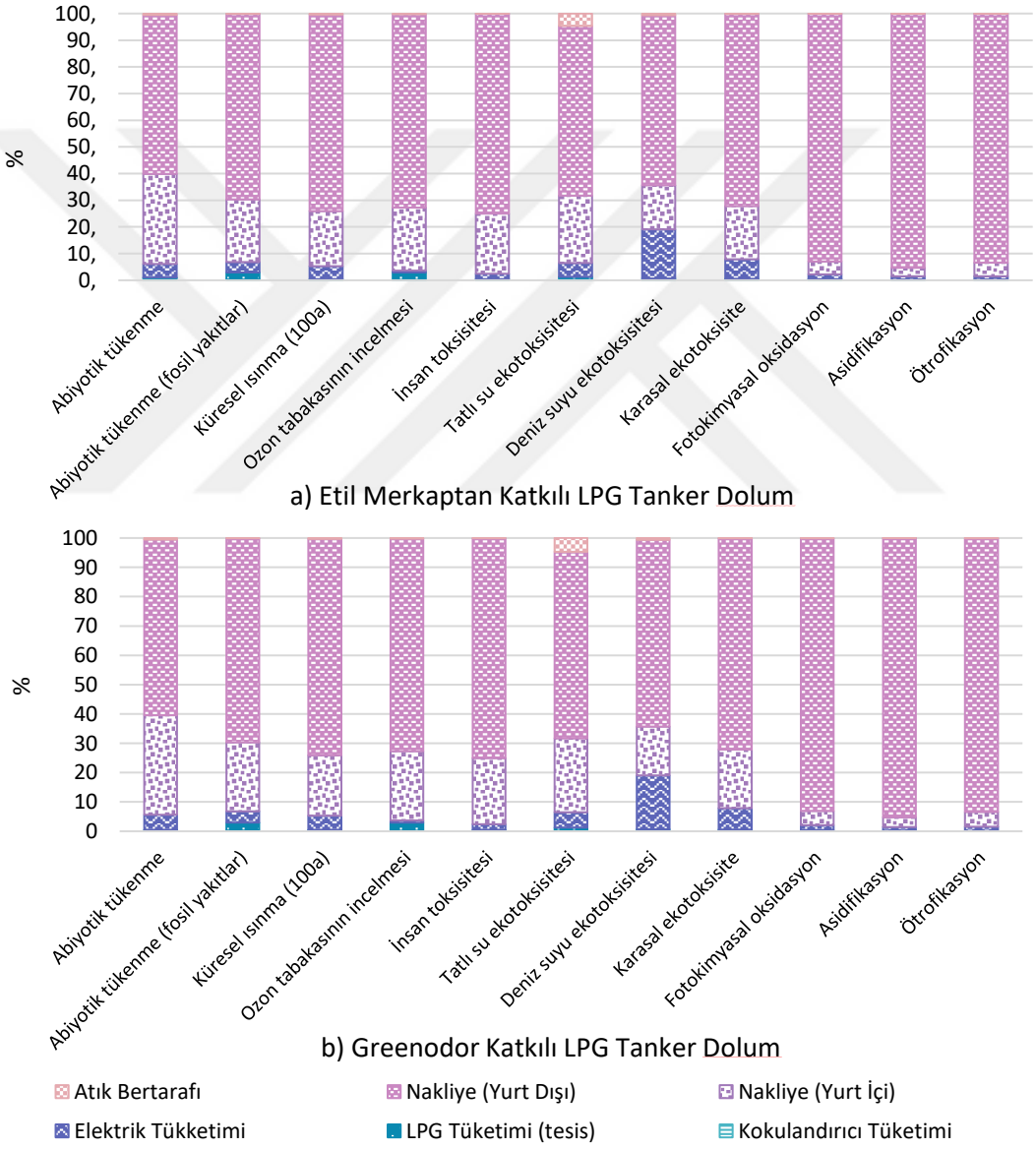
Bu çalışmada, girdi verileri değişkenliğinin bir fonksiyonu olarak belirsizlikleri tahmin etmek için stokastik bir modelleme yaklaşımı olan Monte Carlo simülasyonu (MC) kullanılmıştır. Monte Carlo yöntemi, belirsiz faktörlerin etkilerini daha doğru bir şekilde yansıtabilen istatistiksel olarak anlamlı çevresel etki değerlendirme sonuçları nedeniyle, belirsizlik analizi hesaplamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Olasılık analizine dayalı olarak belirsiz değişkenlerin değerlerini rastgele örnekleyebilir ve simüle etmek için bunları önceden belirlenmiş bir etki değerlendirme yöntemiyle birleştirebilir (Sun ve Ertz, 2020). Çalışmamızdaki simülasyonlar SimaPro yazılımı (v.9.2) kullanılarak gerçekleştirilmiş ve tüm senaryolar için 1000 çalıştırma kullanılmıştır. Enerji ve kimyasallara ait veriler için normal dağılım kullanılırken, Niero ve diğerleri (2014) tarafından uygulanan su, hava ve toprak emisyon verileri için log-normal dağılım kullanılmıştır. Standart sapma (SD), ortalama, medyan, varyasyon katsayısı (CV) ve ortalamanın standart hatası (SEM) gibi temel parametreler MC simülasyonu ile elde edilmiştir. Varyasyon katsayısı, SD ile ortalama arasındaki oran olarak tanımlanır ve daha yüksek CV değerleri, sonuçlardaki daha fazla belirsizliği temsil etmektedir. Ortalamanın standart hatası, ortalamanın örnekleme dağılımının standart sapması olarak tanımlanmaktadır. Bu parametre, ortalamanın tahmininin kesinliğini ölçmekte olup ortalamanın standart hatasının 0,01'den küçük olması kabul edilebilirdir (Alyaseri, 2014; Sheikholeslami ve diğ., 2022).

A-B yaklaşımı olmak üzere iki senaryo, etil merkaptan ve Greenodor arasındaki farkı hesaplamak için SimaPro'da (v.9.2) yürütülmüştür. Bu yaklaşım, Senaryo A'nın kaç kez senaryo B'den daha düşük puan aldığını göstermektedir (Alyaseri ve Zhou, 2019).

4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER

4.1.LPG Tanker Dolumunun Karakterizasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Etil merkaptan ve Greenodor ile kokulandırılmış 1 ton LPG tanker dolumunun olası çevresel etkileri altı farklı proses temelinde değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır. Bu prosesler; kokulandırıcı katkı maddesi tüketimi (Etil merkaptan veya Greenodor), tesiste tüketilen LPG, elektrik tüketimi, yurt içi nakliye, yurt dışı nakliye ve atık bertarafıdır. Karakterizasyon sonuçları Şekil 4.1'de karşılaştırmalı olarak verilmektedir.



Şekil 4. 1. Etil merkaptan ile kokulandırılmış 1 ton LPG dolumu ve Greenodor ile kokulandırılmış 1 ton LPG dolumunun karakterizasyon sonuçları

Şekil 4.1 incelendiğinde, yurt dışı nakliye prosesinin tüm etki kategorileri üzerindeki yüksek katkısı dikkat çekmektedir. Yurt dışı nakliye prosesinin, toplam potansiyel çevresel etkiler üzerindeki payı, etil merkaptan katkılı tanker dolum prosesi için %75, Greenodor katkılı tanker dolum prosesi için %76'dır. Tesiste dolumunun gerçekleştirildiği LPG'nin büyük bir kısmının (%77,7) yurt dışından deniz yolu ile temin edilmesi nedeniyle yurt dışı nakliye prosesinin olası çevresel etkiler üzerindeki katkısının yüksek olduğu düşünülmektedir. Yurt içi nakliye prosesi ise LPG dolumu yapıldıktan sonra müşterilere karayolu ile iletilmesini ifade etmektedir. Shrivastava ve Unnikrishnan (2021), kuyudan tanka performansını (ham petrol çıkarma, ham petrol arıtma ve bitmiş yakıt depolama) değerlendirmek için Hindistan'daki ham petrol üzerinde bir Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi (YDSD) çalışması gerçekleştirmişlerdir. Taşıma, depolama, sevkiyat ve nihai yakıt depolama aşamalarını dikkate alarak yaptıkları çalışmanın sonuçları da bizim çalışmamıza benzer şekilde nakliye aşamasının en yüksek etkiye sahip olduğunu göstermiştir (Shrivastava ve Unnikrishnan, 2021). Kokulandırıcı tüketimi en yüksek katkıyı abiyotik tükenme etki kategorisi üzerinde göstermektedir. Etil merkaptan tüketiminin olası çevresel etkiler üzerindeki katkıları incelendiğinde ise en fazla katkıyı abiyotik tükenme etki kategorisi üzerinde %0,8'lik bir oranla yaptığı belirlenmiştir. Bu değer Greenodor için %0,26 olarak belirlenmiştir. Tüm etki kategorileri için toplam potansiyel çevresel etkiler ele alındığında etil merkaptan tüketimi %0,15, Greenodor tüketimi ise %0,06'lık bir paya sahiptir. Söz konusu katkı maddelerinin LPG içine oldukça düşük bir oranda (etil merkaptan ve Greenodor için sırasıyla; %0,003 ve %0,0018 eklenmesi nedeniyle katkı maddesi tüketimi prosesinin diğer proseslerce baskılanması beklenilen bir durumdur. Detaylı karakterizasyon sonuçları Ekler bölümünde Tablo A.3 ve Tablo A.4'de verilmiştir.

Tablo 4.1'de, etil merkaptan ile kokulandırılmış LPG ve Greenodor ile kokulandırılmış LPG tanker dolum işleminin karakterizasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablo 4.1 incelendiğinde etil merkaptan katkılı 1 ton LPG ve Greenodor katkılı 1 ton LPG tanker dolumunun olası çevresel etkilerinin on bir farklı etki kategorisi için hemen hemen aynı olduğu görülmekle birlikte; abiyotik tükenme (fosil yakıt), insan toksisitesi, tatlı su ekotoksisitesi, deniz suyu ekotoksisitesi ve fotokimyasal oksidasyon etkilerinin etil merkaptan ile kokulandırılmış LPG için bir miktar daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 4. 1. Etil merkaptan ile kokulandırılmış LPG ve Greenodor ile kokulandırılmış LPG tanker dolum karakterizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Etki kategorisi	Birim	Etil Merkaptan Katkılı LPG Tanker Dolum	Greenodor Katkılı LPG Tanker Dolum	Fark (%)
Abiyotik tükenme	kg Sb eşd	0,00006	0,00006	0
Abiyotik tükenme (fosil yakıtlar)	MJ	631,199	630,930	0,043
Küresel ısınma (100a)	kg CO_2 eşd	46,5015	46,5057	-0,009
Ozon tabakasının incelmesi	kg CFC-11 eşd	0,00001	0,00001	0
İnsan toksisitesi	kg 1,4-DB eşd	14,7695	14,7681	0,009
Tatlı su ekotoksisitesi	kg 1,4-DB eşd	0,48202	0,48181	0,043
Deniz suyu ekotoksisitesi	kg 1,4-DB eşd	7341,13	7339,63	0,020
Karasal ekotoksisite	kg 1,4-DB eşd	0,06219	0,06219	0
Fotokimyasal oksidasyon	kg C_2H_4 eşd	0,02483	0,02481	0,080
Asidifikasyon	kg SO_2 eşd	0,94907	0,94912	-0,005
Ötrofikasyon	kg PO_4^- eşd	0,10299	0,10300	-0,009

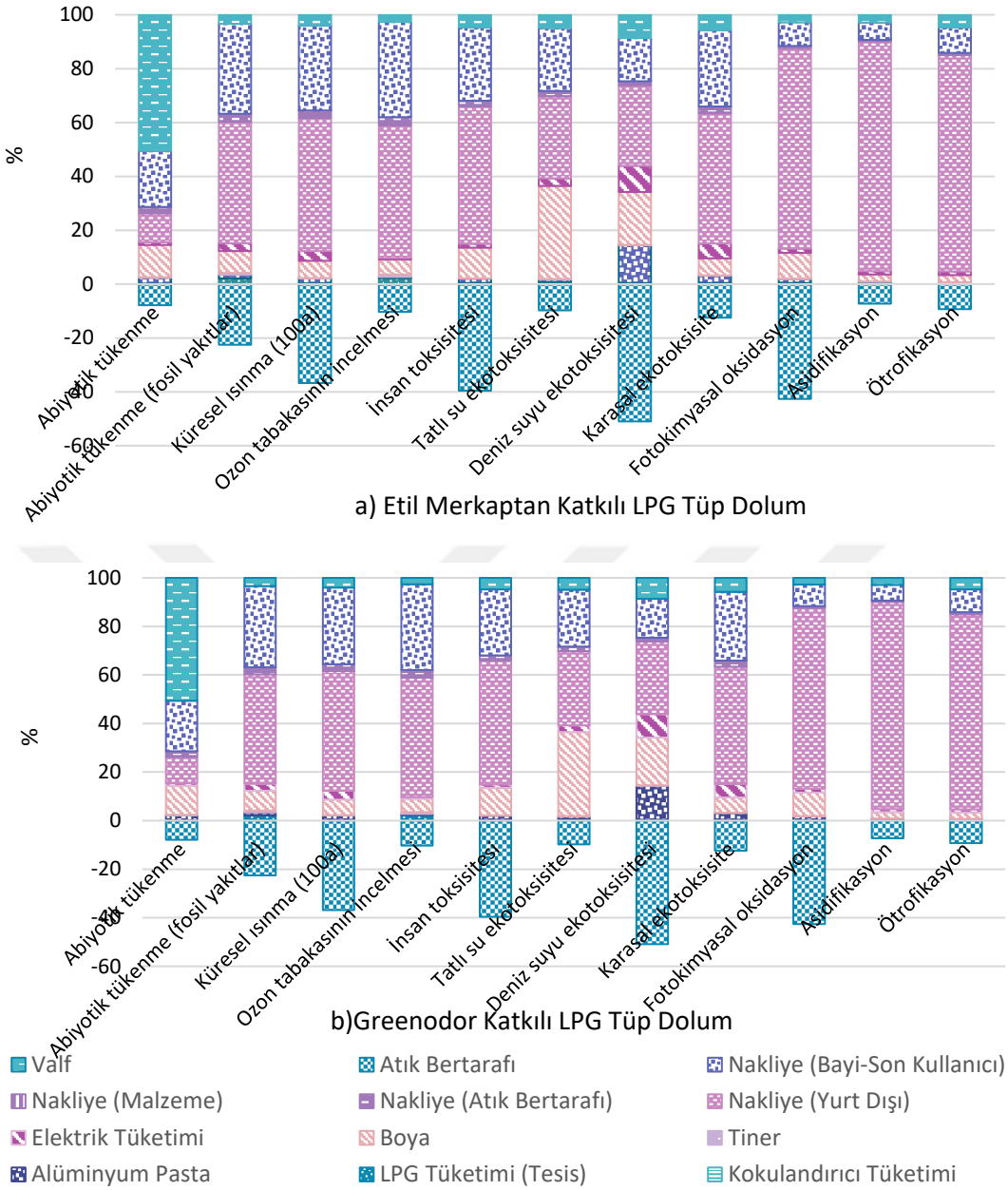
Tanker dolum işleminde 1 ton LPG içine 0,03 kg etil merkaptan; 0,018 kg Greenodor katılmaktadır. Bir ton LPG içine ilave edilen etil merkaptan ve Greenodor miktarının oldukça düşük olmasına bağlı olarak, çalışmanın fonksiyonel birimi olan "1 ton LPG dolumu" için hesaplanan karakterizasyon sonuçları birbirine çok yakın bulunmuş; etil merkaptan ve Greenodor tüketimi prosesinin olası etkileri tanker dolum sürecindeki diğer proseslerce (elektrik tüketimi, yurt içi nakliye, yurt dışı nakliye gibi) baskılanmıştır. Bu nedenle, her iki kokulandırıcı maddenin olası çevresel etkilerinin açık bir şekilde ortaya konması amacıyla öncelikle etil merkaptan ve Greenodor tüketiminin on bir farklı etki kategorisi üzerindeki yüzdesel katkıları araştırılmış ve Tablo 4.2'de verilmiştir. Tablo 4.2'de görüldüğü gibi, etil merkaptan tüketiminin her bir çevresel gösterge üzerindeki katkısı Greenodor tüketiminin katkısına göre daha yüksektir.

Tablo 4. 2. Etil Merkaptan ve Greenodor tüketiminin karakterizasyon sonuçları üzerindeki katkılarının karşılaştırılması

Etki Kategorisi	Birim	Etil Merkaptan Tüketimi (%)	Greenodor Tüketimi (%)	Fark %)
Abiyotik tükenme	kg Sb eşd	0,804	0,261	67
Abiyotik tükenme (fosil yakıtlar)	MJ	0,209	0,144	31
Küresel ısınma (100a)	kg CO_2 eşd	0,076	0,062	18
Ozon tabakasının incelmesi	kg CFC-11 eşd	0,021	0,013	38
İnsan toksisitesi	kg 1,4-DB eşd	0,052	0,018	65
Tatlı su ekotoksisitesi	kg 1,4-DB eşd	0,118	0,056	52
Deniz suyu ekotoksisitesi	kg 1,4-DB eşd	0,093	0,035	62
Karasal ekotoksisite	kg 1,4-DB eşd	0,044	0,015	66
Fotokimyasal oksidasyon	kg C_2H_4 eşd	0,168	0,036	79
Asidifikasyon	kg SO_2 eşd	0,033	0,008	76
Ötrofikasyon	kg PO_4^- eşd	0,034	0,010	71

4.2.LPG Tüp Dolumunun Karakterizasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu aşamada, etil merkaptan katkılı 1 ton LPG ve Greenodor katkılı 1 ton LPG tüp dolumunun olası çevresel etkileri on iki farklı proses temelinde değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır. Bunlar; kokulandırıcı katkı maddesi tüketimi (etil merkaptan veya Greenodor), tesiste tüketilen LPG, elektrik tüketimi, nakliye (yurt dışı, malzeme, bayi-son kullanıcı ve atık bertaraf), valf, tiner, alüminyum pasta ve boya tüketimi ve atık bertarafıdır. Yurt dışı nakliye tesiste dolum faaliyetlerinde kullanılan LPG'nin yurt dışından deniz yolu ile teminini; malzeme nakliyesi tesiste dolum faaliyetlerinde kullanılan boya, tiner, valf gibi malzemelerin karayolu ile nakliyesini; bayi-son kullanıcı nakliyesi tesiste dolum işlemi yapıldıktan sonra tüplerin bayi ve son kullanıcılara ulaştırılması için karayolu ile nakliyesini; atık bertaraf nakliyesi ise tesis faaliyetleri sonucunda oluşan atıkların bertaraf tesislerine karayolu ile nakliyesini ifade etmektedir. Bu kapsamda hesaplanan yaşam döngüsü etki değerlendirmesi sonuçları Şekil 4.2'de karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Ayrıntılı sonuçlar Ekler bölümünde Tablo A.5 ve Tablo A.6'de verilmiştir.



Şekil 4. 2. Etil merkaptan ile kokulandırılmış 1 ton LPG ve Greenodor ile kokulandırılmış 1 ton LPG tüp dolumunun karakterizasyon sonuçları

Şekil 4.2 incelendiğinde, yurt dışından deniz yolu ile nakliye prosesinin hemen hemen tüm etki kategorileri üzerindeki yüksek katkısı dikkat çekmektedir. Yurt dışı nakliye prosesinin, toplam potansiyel çevresel etkiler üzerindeki payı, her iki kokulandırıcı madde katkılı tüp dolum prosesi için de %65 olarak belirlenmiştir. Buna ek olarak tesiste LPG tüp dolumu yapıldıktan sonra bayi ve son kullanıcılara karayolu ile nakliye edilmesi sürecinin de abiyotik tükenme (mineral ve fosil yakıtlar), küresel ısınma, ozon tabakasının incelmesi, insan toksisitesi ve ekotoksisite (su ve kara) üzerinde önemli

katkısı olduğu görülmektedir. Şekil 4.2 incelendiğinde, LPG tüplerde kullanılan valfin abiyotik tükenme etki kategorisi üzerindeki yüksek katkısı (%55) dikkat çekmektedir. Bu sonuç, tesis faaliyetlerinde kullanılan valfin üretimi aşamasındaki etkileri temsil etmektedir. LPG tanker dolum karakterizasyon sonuçları ile benzer şekilde, katkı maddesi tüketimi prosesinin olası çevresel etkisi diğer proseslere göre oldukça düşük olduğundan diğer proseslerce baskılanmıştır. LPG tanker dolum faaliyetinden farklı olarak LPG tüp dolum faaliyetinin karakterizasyon sonuçlarında, atık bertarafı için tercih edilen yöntemin (geri dönüşüm) olası çevresel etkiler üzerindeki pozitif katkısı dikkat çekicidir.

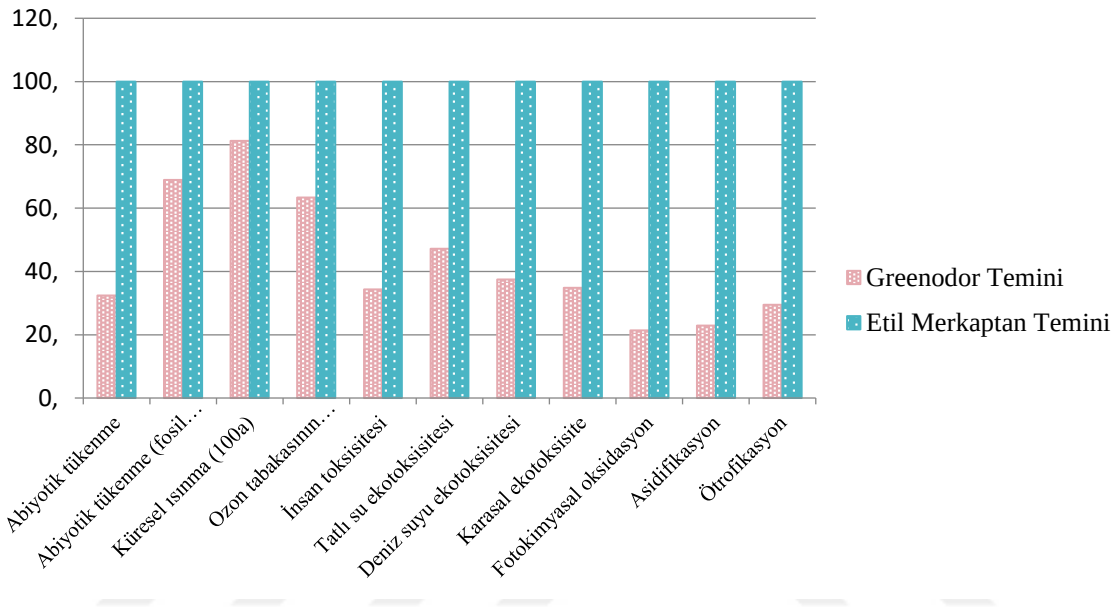
Bu çalışmanın temel hedefi olan etil merkaptan ve Greenodor kokulandırıcı katkı maddelerinin olası çevresel etkilerinin açık bir şekilde ortaya konması amacıyla etil merkaptan ve Greenodor tüketiminin 11 farklı etki kategorisi üzerindeki yüzdesel katkıları Tablo 4.3'de verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi, etil merkaptan tüketiminin her bir çevresel gösterge üzerindeki katkısı Greenodor tüketiminin katkısına göre %19 (küresel ısınma) ile %79 (fotokimyasal oksidasyon) arasında değişen oranlarda daha yüksektir.

Tablo 4. 3. Etil Merkaptan ve Greenodor tüketiminin karakterizasyon sonuçları üzerindeki katkılarının karşılaştırılması

Etki Kategorisi	Birim	Etil Merkaptan Tüketimi (%)	Greenodor Tüketimi (%)	Fark (%)
Abiyotik tükenme	kg Sb eşd	0,162	0,052	68
Abiyotik tükenme (fosil yakıtlar)	MJ	0,181	0,124	31
Küresel ısınma (100a)	kg CO_2 eşd	0,083	0,067	19
Ozon tabakasının incelmesi	kg CFC-11 eşd	0,016	0,010	37
İnsan toksisitesi	kg 1,4-DB eşd	0,060	0,020	66
Deniz suyu ekotoksisitesi	kg 1,4-DB eşd	0,092	0,034	63
Karasal ekotoksisite	kg 1,4-DB eşd	0,035	0,012	65
Fotokimyasal oksidasyon	kg C_2H_4 eşd	0,241	0,051	79
Asidifikasyon	kg SO_2 eşd	0,033	0,008	77
Ötrofikasyon	kg PO_4^- eşd	0,033	0,010	71

4.3.Kokulandırıcı Teminine Bağlı Olarak Karşılaştırmalı Karakterizasyon ve Normalizasyon Sonuçları

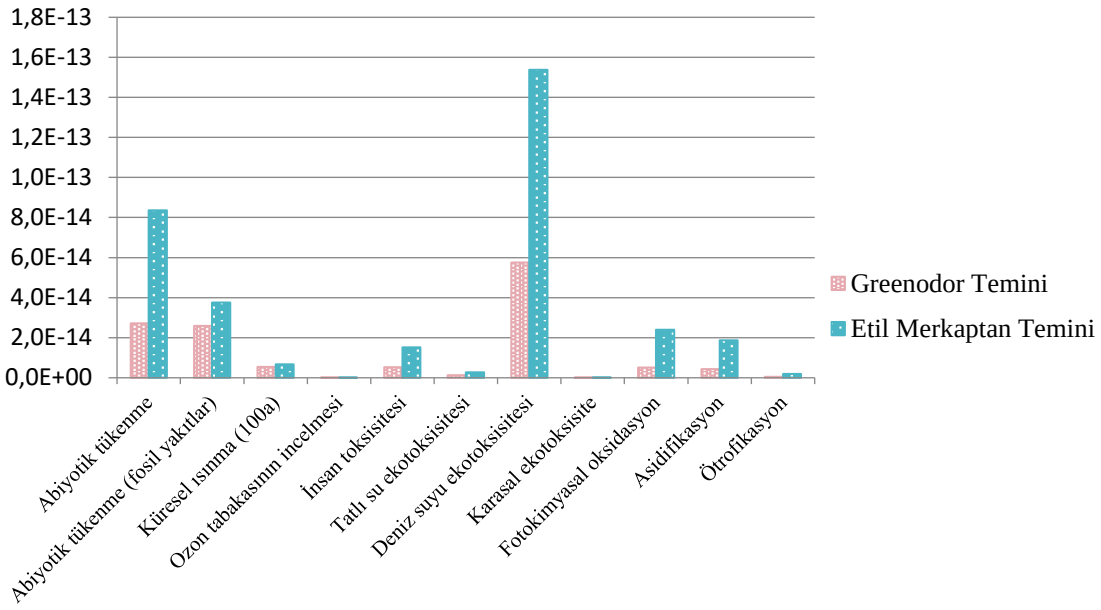
Çalışmanın bu bölümünde fonksiyonel birim olarak 1 ton LPG dolumu için gerekli kokulandırıcı miktarı seçilerek olası çevresel etkiler aynı metotla (CML-IA) karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 4.3.'de sunulmuştur.



Şekil 4. 3. Etil merkaptan ve Greenodor tüketimine bağlı olası çevresel etkilerin karşılaştırılması (Fonksiyonel birim: 1 ton LPG dolumu için gerekli miktarda kokulandırıcının temini)

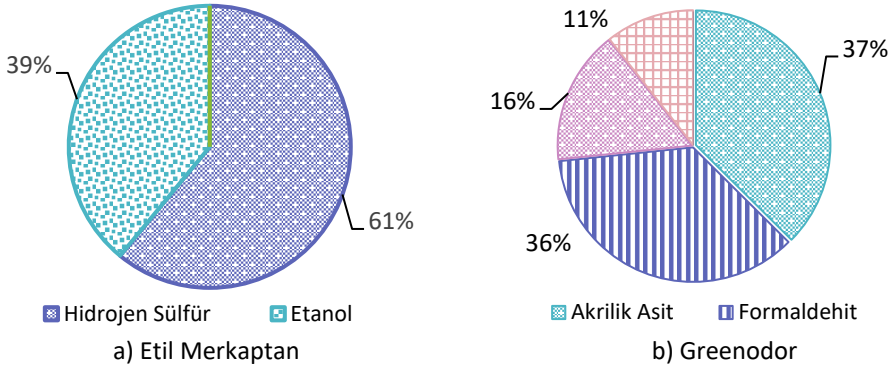
Şekil 4.3'te Tablo 3.2'de verildiği gibi 1 ton LPG tanker dolumuna 0,030 kg etil merkaptan ve 0,018 kg Greenodor ilave edildiği kabul edilmiş olup, bu hesaplama yalnızca tanker dolum prosesi için gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.3 incelendiğinde 1 ton LPG dolumu için Greenodor tüketiminin tüm orta nokta etki kategorilerinde etil merkaptandan daha düşük katkısı olduğu belirlenmiştir.

Etil merkaptan ve Greenodor katkı maddelerinin kullanımına bağlı olarak ortaya çıkan en baskın çevresel göstergenin belirlenmesi için Şekil 4.3'de verilen karakterizasyon sonuçlarına normalizasyon işlemi uygulanmış ve sonuçlar Şekil 4.4'de sunulmuştur. Gerçekleştirilen normalizasyon işlemi sonucunda, en olumsuz etkinin deniz suyu ekotoksisitesi üzerinde olduğu görülmektedir. Deniz suyu ekotoksisitesi kategorisini abiyotik kaynakların tükenmesi takip etmektedir.



Şekil 4. 4. Etil merkaptan ve Greenodor kokulandırıcı katkı maddelerinin normalizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

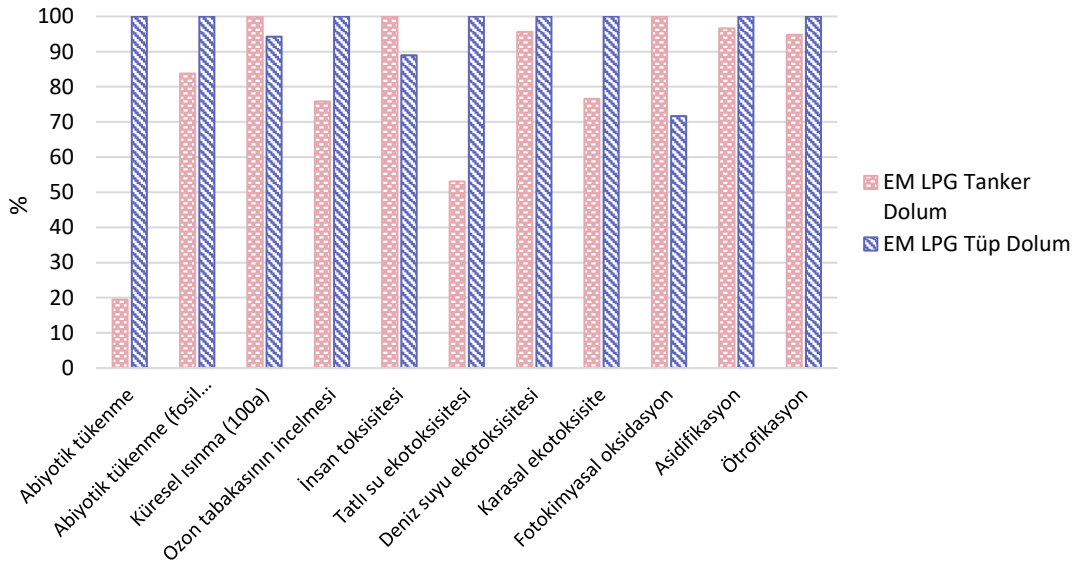
Deniz suyu ekotoksisite etki kategorisi üzerinde katkısı olan proseslerin belirlenmesi için SimaPro yazılımında katkı analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.5). Etantiyol olarak da adlandırılan etil merkaptan, etanol ve hidrojen sülfürün bileşiminden oluşmaktadır. Greenodor ise etil akrilat ve isovaleraldehitten oluşmaktadır. Etil akrilat, etanol ve akrilik asidin reaksiyonundan; isovaleraldehit ise büten ve formaldehitin reaksiyonu ile meydana gelmektedir. Buna bağlı olarak, etil merkaptan tüketimine bağlı oluşan deniz suyu ekotoksisitenin %61'inin hidrojen sülfür üretimi, %39'unun ise etanol üretimi (etilen hidratasyonu) ile ilişkili olduğu belirlenirken; Greenodor tüketimine bağlı oluşan deniz suyu ekotoksisitesinin %37'sinin akrilik asit, %36'sının formaldehit, %16'sının etanol, %11'inin ise büten ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4. 5. Katkı analizi sonuçları

4.4.Tanker Dolum ve Tüp Dolum Prosesinin Karşılaştırılması

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen ve kapsamı "tanktan tekerleğe" olarak belirlenen yaşam döngüsü değerlendirme çalışmasının sonuçları dikkate alındığında, kokulandırmada kullanılan katkı maddelerinin LPG dolum prosesinin olası çevresel etkilerini önemli ölçüde değiştirmediği belirlenmiştir. Bu sebeple, dolum proseslerinin olası çevresel etkiler üzerindeki farklılıklarını ortaya koymak amacıyla yalnızca etil merkaptan katkılı tanker ve tüp dolum prosesleri karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen karşılaştırmalı yaşam döngüsü etki değerlendirmesi sonuçları Şekil 4.6'da verilmiştir.



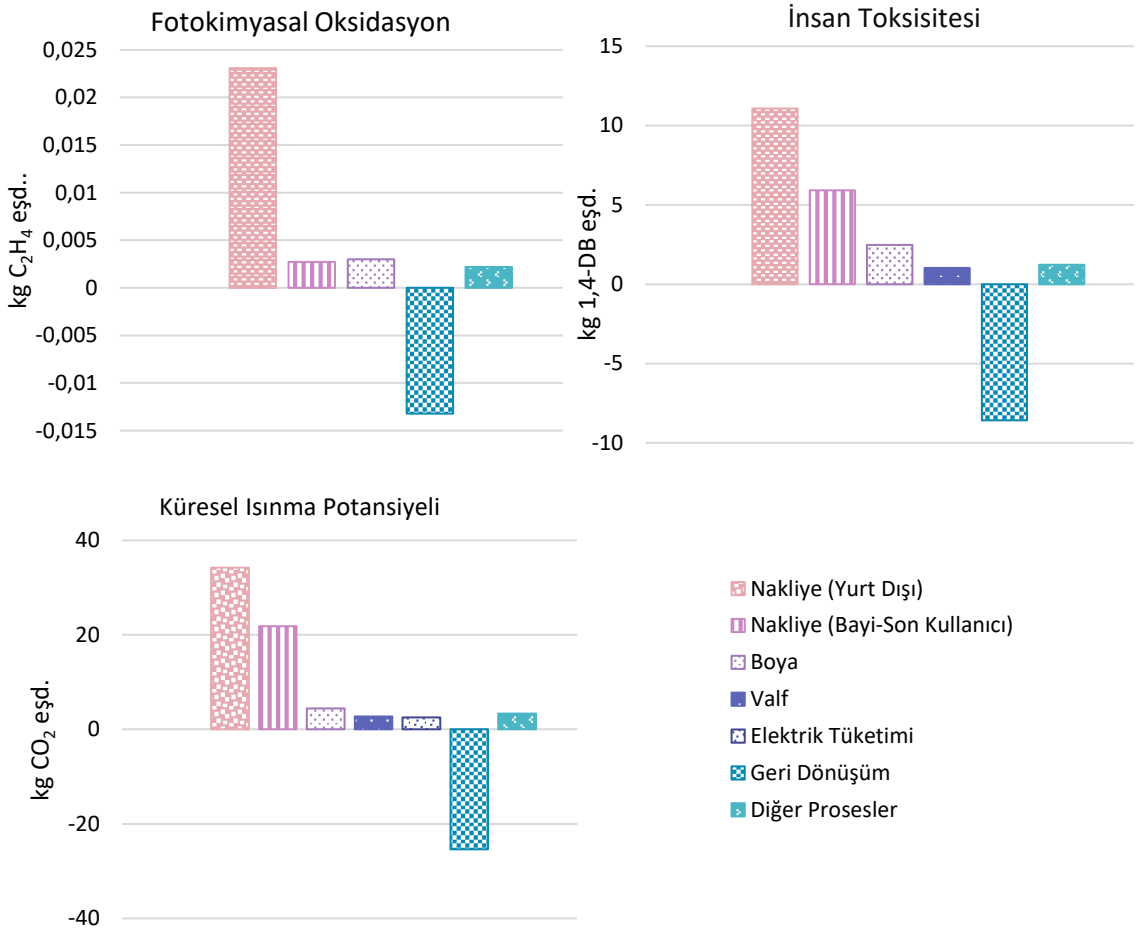
Şekil 4. 6. LPG tanker dolum ve tüp dolum proseslerinin karakterizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 4.6'da görüldüğü gibi, küresel ısınma, insan toksisitesi ve fotokimyasal oksidasyon etki kategorileri dışında tüm etki kategorileri için LPG tüp dolum prosesinin katkısı tanker dolum prosesine göre daha yüksektir. Özellikle abiyotik tükenme etki kategorisindeki farklılık dikkat çekicidir. SimaPro'da gerçekleştirilen katkı analizi sonuçlarına göre bu durumun, LPG tüp dolumunda kullanılan valfin üretim aşaması ile ilişkili olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.6'da dikkat çeken diğer nokta tüp dolum ve tanker dolum proseslerinin tatlı su ekotoksisitesi üzerindeki katkısındaki farklılıktır. Tanker dolum prosesinin tatlı su ekotoksisitesi potansiyeli 0,482 kg 1,4-DB eşd./ton LPG olarak hesaplanırken, bu değer tüp dolum prosesi için 0,908 kg 1,4-DB eşd./ton LPG olarak hesaplanmıştır.

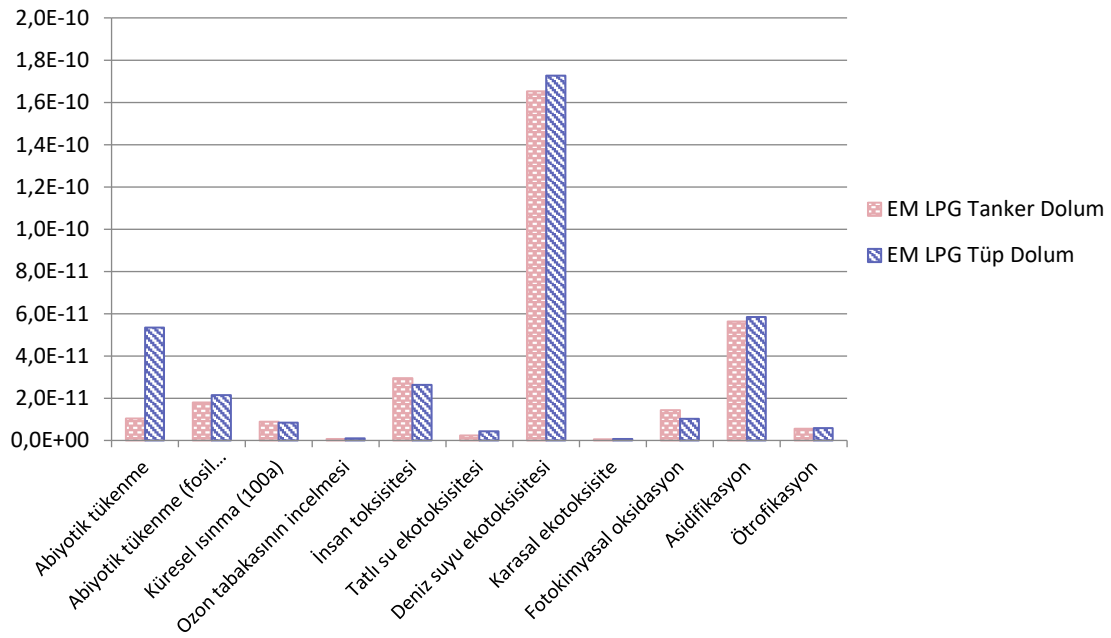
Gerçekleştirilen katkı analizlerine göre bu durumun nedeninin tüp dolum prosesindeki boya kullanımı (0,347 kg 1,4-DB eşd./ton.LPG) ile ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Tüp dolum prosesinin küresel ısınma, insan toksisitesi ve fotokimyasal oksidasyon üzerinde daha düşük etkiye sahip olmasının nedeni SimaPro'da katkı analizleri gerçekleştirilerek ortaya konmaya çalışılmış ve sonuçlar Şekil 4.7'de verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi LPG tüp dolumu prosesi sonucunda oluşan metal atıklarının geri dönüştürülmesi sayesinde yeni metal üretiminden kaçınılmakta ve bu durum fotokimyasal oksidasyon (%30), insan toksisitesi (%28) ve küresel ısınma (%27) etki kategorilerinde çevresel kazanımlar sağlamaktadır. Oluşan atıkların geri dönüşüm yolu ile bertaraf edilmesinin fotokimyasal oksidasyon etki kategorisinde 0,0132 kg C_2H_4-eşd/ton.LPG, insan toksisitesi etki kategorisinde 8,58 kg 1,4-DB eşd./ton.LPG; küresel ısınma etki kategorisinde ise 25,4 kg CO_2-eşd/ton.LPG pozitif katkı sağladığı ortaya konmuştur.



Şekil 4. 7. Fotokimyasal oksidasyon, insan toksisitesi ve küresel ısınma potansiyeli etki kategorisi üzerinde katkısı olan prosesler

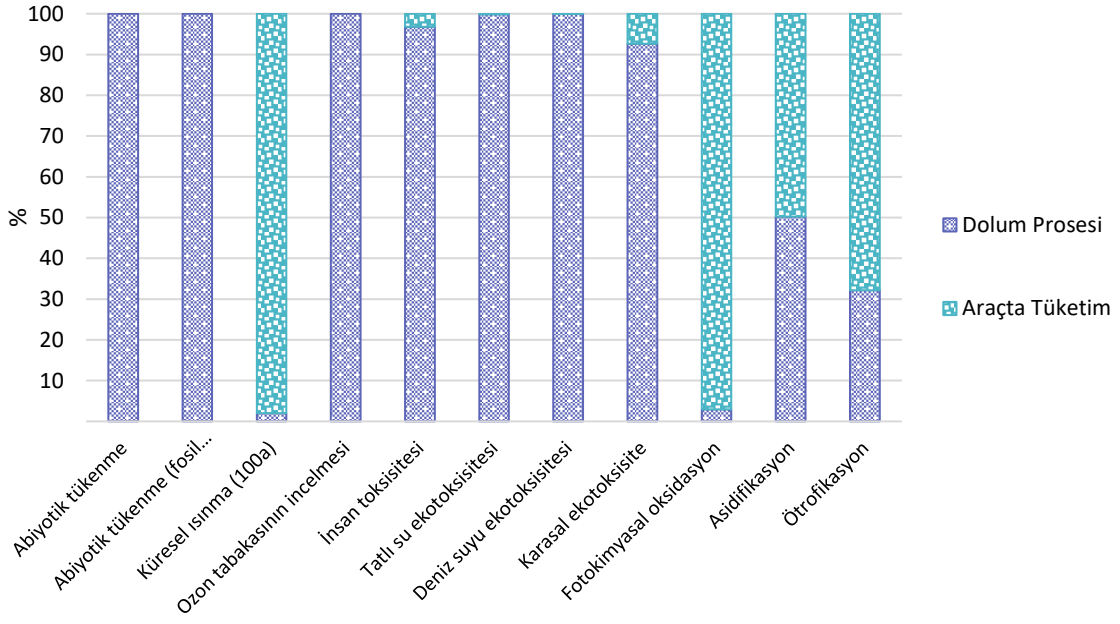
Tüp ve tanker dolum süreçlerinden kaynaklanan en baskın orta nokta etkisinin belirlenmesi amacıyla normalizasyon işlemi gerçekleştirilmiş ve Şekil 4.8'de görülebileceği gibi en baskın orta nokta etkisi deniz suyu ekotoksisitesi olarak bulunmuştur. Tanker ve tüp dolumu için deniz suyu ekotoksisitesi toplam etkinin sırasıyla %53'ünü ve %48'ini oluşturmaktadır. Bu değeri tanker dolum prosesi için %18 ile asidifikasyon ve %9 insan toksisitesi; tüp dolum prosesi için %16 ile asidifikasyon ve %15 ile abiyotik tükenme takip etmektedir.



Şekil 4. 8. Tanker ve tüp dolum normalizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

4.5.Tesiste Dolumu Yapılan LPG'nin Taşıtlarda Kullanılması

Çalışmanın bu bölümünde Bölüm 3.1. ve Bölüm 3.2.'de gerçekleştirilen LPG dolumuna ait YDD sonuçları ve literatürdeki çalışmalardan yararlanılarak temin edilen araçlarda LPG tüketimine dair veriler derlenerek SimaPro yazılımında LPG'nin kullanımı için yeni modeller oluşturulmuştur (Ugurlu, 2022; Woon, 2016). Greenodor ile kokulandırımış LPG'nin taşıtlarda tüketimine dair emisyon verilerine henüz ulaşılamaması nedeniyle, söz konusu model sadece Etil merkaptan ile kokulandırılmış LPG tanker dolum prosesi için oluşturulmuştur. YDD çalışması kapsamında kullanılan fonksiyonel birim olan 1 ton LPG dolumu faaliyeti temel alınarak, 1 ton LPG'nin araçta tüketilmesi durumunda hesaplanan olası yaşam döngüsü etkileri Şekil 4.9'da verilmektedir.

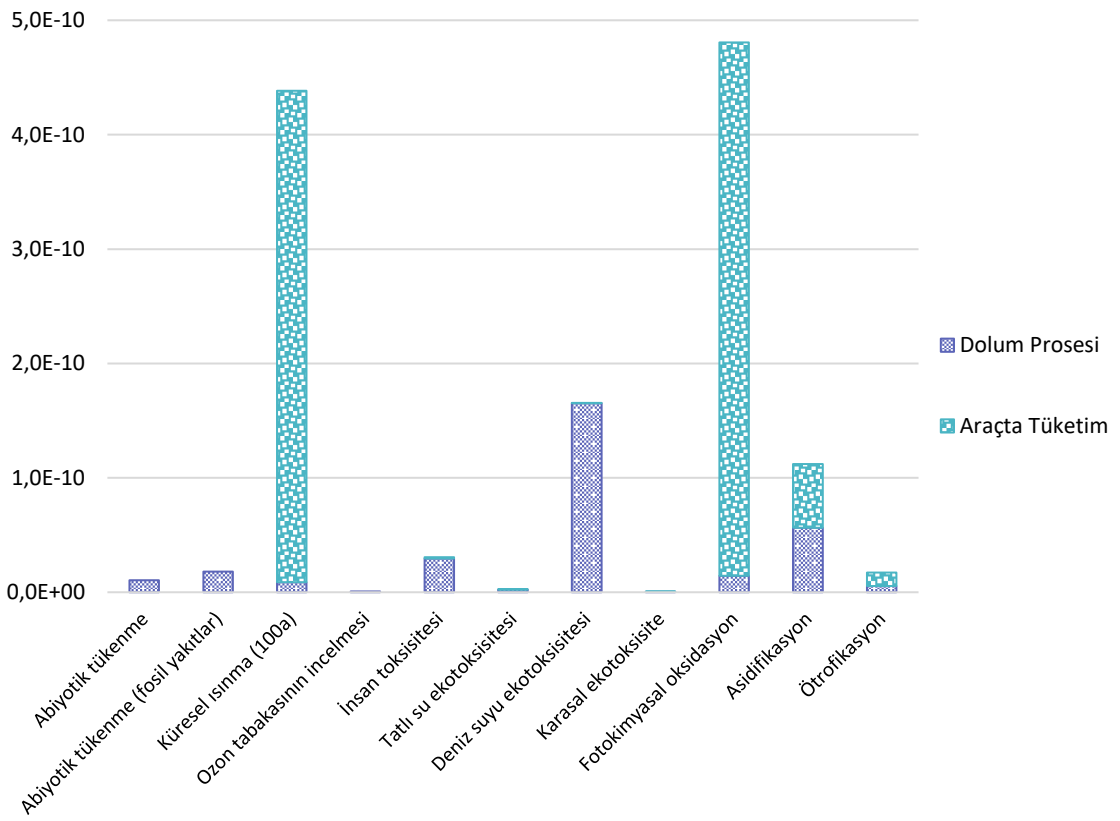


Şekil 4. 9. Etil merkaptan ile kokulandırılmış 1 ton LPG'nin araçta tüketiminin karakterizasyon sonuçları

Şekil 4.9 incelendiğinde, abiyotik tükenme (mineral ve fosil yakıtlar), ozon tabakasının incelmesi, tatlı su ekotoksisitesi ve deniz suyu ekotoksisitesi etki kategorilerinin tamamen LPG dolumu ile ilgili olduğu; insan toksisitesi ve karasal ekotoksisite etki kategorilerinin çok büyük bir kısmının LPG dolumu ile ilgili olduğu dikkat çekmektedir. Buna karşılık, küresel ısınma ve fotokimyasal oksidasyon etkilerinin neredeyse tamamı LPG'nin araçta tüketimi ile ilişkilidir. Kim ve diğ. (2021), sera gazı emisyonları açısından Kore'de karşılaştırmalı olarak dizel ve LPG yakıtının "tanktan tekerleğe" analizini gerçekleştirmiştir. Çalışmaya göre, araç sürüşü sırasında oluşan sera gazı emisyonlarının LPG'li araçlarda büyük bir oranı (yaklaşık %80) oluşturduğu ve içten yanmalı motorlu araçların çoğunun yaşam döngüsündeki ana faktöre karşılık geldiği bulunmuştur. Ayrıca Garg ve diğ. (2013), Hindistan'da LPG dahil olmak üzere petrol ürünlerinin çeşitli tedarik zinciri yollarına dayalı olarak kuyudan tanka sistem sınırı için YDD temelinde bir çalışma gerçekleştirmiştir. 1 ton LPG üretimi için ortalama sera gazı emisyonunun 320 kg CO_2 eşdeğeri olduğunu bulmuşlardır. LPG'nin kullanım aşaması (depolamadan tüketime) dikkate alındığında bu değer üretilen LPG'nin ton başına ortalama 9700 kg CO_2 eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada motorlu araçlarda LPG tüketiminin küresel ısınma potansiyeli 2283 kg CO_2 eşd./ton LPG olarak bulunmuştur (46,5 kg CO_2 eşd. depolama ve dolum işlemiyle ilgili; 2237 kg CO_2 eşd. motorlu taşıtta yanma ile ilgili).

Bu çalışmanın sistem sınırı dikkate alındığında (LPG üretim süreci hariç tutulmuştur) bulunan sonucun literatüre uygun olduğu söylenebilmektedir. Motorlu araçta LPG tüketiminin ötrofikasyon potansiyeline katkısı %68 iken, dolum işlemi için bu değer %32'dir. Asidifikasyon potansiyeline ise LPG'nin dolumu ve araçta tüketiminin katkısı neredeyse eşittir.

Etil merkaptan ile kokulandırılmış 1 ton LPG'nin araçlarda kullanılması durumunda oluşan olası çevresel etkilerin boyutlarının belirlenmesi için normalizasyon ve ağırlıklandırma işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.10). Bunun sonucunda en baskın etki kategorileri sırasıyla fotokimyasal oksidasyon, küresel ısınma, deniz suyu ekotoksisitesi ve asidifikasyon olarak belirlenmiştir. Fotokimyasal oksidasyon ve küresel ısınma potansiyeli karakterizasyon sonuçlarında da açıklandığı gibi LPG'nin araçlarda tüketimi süreci ile ilişkili iken, deniz suyu ekotoksisitesi LPG dolum prosesi ile ilişkilidir.

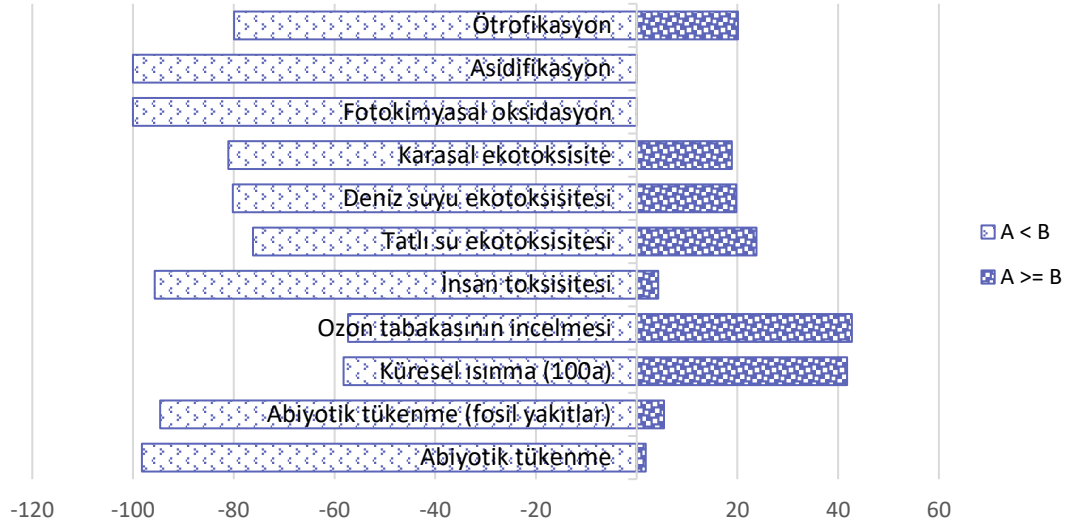


Şekil 4. 10. Etil merkaptan ile kokulandırılmış 1 ton LPG'nin araçta tüketiminin normalizasyon sonuçları

4.6.Belirsizlik Analizi Sonuçları

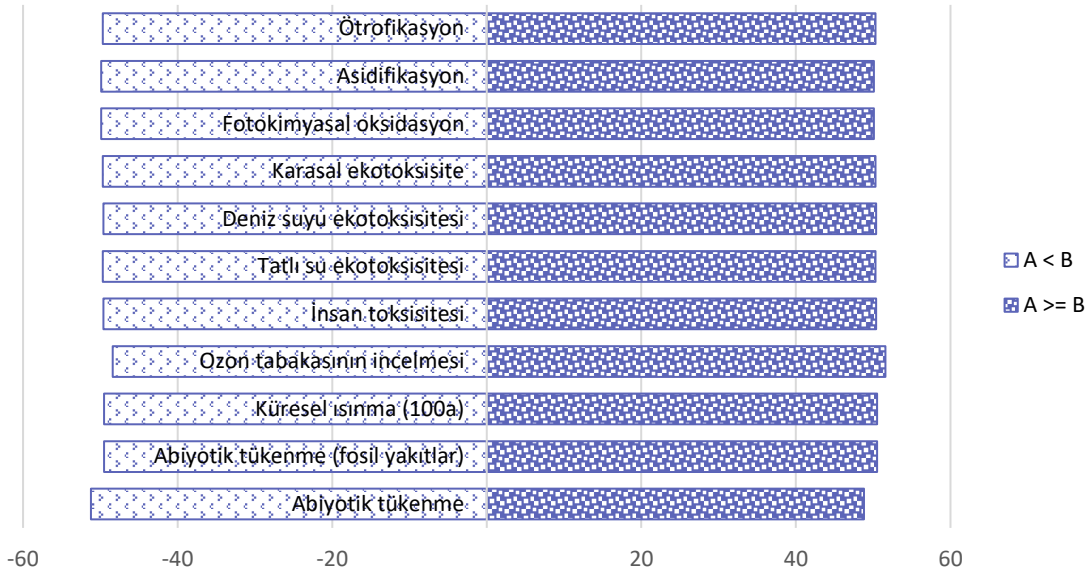
Orta nokta etkiler için belirsizlik analizinin sonuçları Ekler bölümünde verilmiştir (Tablo A.7). Monte Carlo (MC) simülasyon sonuçlarına göre ozon tabakasında incelme etkisi, etil merkaptan ve Greenodor ile kokulandırılmış LPG tanker dolum işlemi için yüksek derecede belirsizliğe sahip olup bunu insan toksisitesi, karasal ekotoksisite ve fotokimyasal oksidasyon takip etmektedir (Tablo A.7). LPG tüp dolum işlemi için en yüksek belirsizliğin, her iki kokulandırıcı madde için de insan toksisitesine ait olduğu belirlenmiştir. Bunu sırasıyla ozon tabakasında incelme, ekotoksisite (deniz suyu, tatlı su ve karasal) ve fotokimyasal oksidasyon takip etmektedir. Tüp ve tanker dolum için en düşük belirsizlik ise, her iki kokulandırıcı için de küresel ısınma potansiyeline aittir.

LPG tanker dolumu için A-B yaklaşım sonuçları Şekil 4.11'de verilmiştir. Tüm orta nokta etki kategorileri için Senaryo A'nın (Greenodor) Senaryo B'den (etil merkaptan) önce geldiği belirlenmiştir. Özellikle asitleştirme ve fotokimyasal oksidasyon etki kategorileri için Greenodor her zaman (%100) etil merkaptandan daha iyidir. Bu durumun aksine Greenodor'un, ozon tabakasının incelmesi ve küresel ısınma potansiyeli için yinelemelerin yalnızca %58'i ve %57'si kadar daha iyi olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4. 11. LPG tanker dolumu için karakterizasyon sonuçlarının A-B yaklaşımı sonuçları (A: Greenodor ile kokulandırılmış LPG tanker dolumu B: Etil merkaptan ile kokulandırılmış LPG tanker dolumu)

LPG tüp dolumunun A-B yaklaşım sonuçları dikkate alındığında, neredeyse tüm orta nokta etkileri için iki senaryo arasında önemli bir fark olmadığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4. 12. LPG tüp dolumu için karakterizasyon sonuçlarının A-B yaklaşımı sonuçları (A: Greenodor ile kokulandırılmış LPG tüp dolumu B: Etil merkaptan ile kokulandırılmış LPG tüp dolumu)

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Etil merkaptan ve Greenodor ile kokulandırılmış LPG dolumunun olası çevresel etkileri tanker dolum ve tüp dolum prosesleri için ayrı ayrı olmak üzere yaşam döngüsü yaklaşımı ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Tanktan tekerleğe kapsamında gerçekleştirilen çalışmada, fonksiyonel birim olarak 1 ton LPG dolumu seçilmiş ve yaşam döngüsü etki değerlendirmesi CML-IA metodu ile gerçekleştirilmiştir.

Karakterizasyon sonuçlarına göre etil merkaptan ve Greenodor ile kokulandırılmış LPG dolum işleminin potansiyel çevresel etkilerinin hemen hemen aynı olduğu belirlenmiştir. Bu durumun temel nedeni, LPG dolum prosesinde kullanılan her iki kokulandırıcı katkı maddesinin çok düşük miktarlarda (etil merkaptan için %0,3 ve Greenodor için %0,18) olmasıdır. Öte yandan, LPG tüp dolumundan kaynaklanan atıkların geri dönüşümü, hemen hemen tüm orta nokta etkileri üzerinde önemli çevresel kazanımlar sağlamaktadır. Etil merkaptan ve Greenodor tüketiminin on bir farklı etki kategorisinde yüzde katkıları dikkate alındığında, Greenodor'un tüm etki kategorilerinde daha düşük çevresel etkiye sahip olduğu ortaya konmuştur.

LPG dolum tesisindeki farklı proseslerin çevresel etkileri karşılaştırıldığında, LPG'nin deniz yolu ile tedariki prosesinin en yüksek etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca LPG tüp ve tanker dolum proseslerinin çevre üzerindeki en baskın etkisinin deniz suyu ekotoksisitesi olduğu belirlenmiştir. Bunu, tanker dolum prosesi için asidifikasyon ve insan toksisitesi, tüp doldum prosesi için asidifikasyon ve abiyotik tükenme takip etmektedir. Buna karşılık karasal ekotoksisite ve ozon tabakasının incelmesi hem tanker hem de tüp dolum proseslerinde en düşük etkiye sahip kategoriler olarak belirlenmiştir.

Etil merkaptan ve Greenodor kokulandırıcı maddelerinin çevre üzerindeki potansiyel olumlu ve olumsuz etkileri karşılaştırıldığında, etil merkaptanın üç etki kategorisi (abiyotik tükenme (fosil yakıtlar), küresel ısınma potansiyeli ve ozon tabakasının incelmesi) dışında hemen hemen tüm etki kategorilerinde yüksek katkı sağladığı sonucuna varılmıştır. Bu sonuçların ana nedeni Greenodor'un üretim aşaması ile açıklanabilmektedir.

Süreç katkı analizine göre, Greenodor'un bileşimindeki kimyasalların üretim aşamasında daha yüksek miktarlarda ham petrol kullanılması, daha yüksek miktarlarda karbondioksit (fosil) ve ozon tabakasına zarar veren gazların oluşması nedeniyle Greenodor'un abiyotik tükenme (fosil yakıtlar), küresel ısınma ve ozon tabakasında incelme etki kategorileri üzerinde daha büyük bir etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.

Etil merkaptan ve Greenodor kokulandırıcı maddelerinin kullanımına bağlı en baskın çevresel göstergeyi belirlemek amacıyla normalizasyon uygulanmış ve 1 ton LPG için gerekli kokulandırıcı madde (etil merkaptan ve Greenodor) tüketiminin en olumsuz etkisinin deniz suyu ekotoksisitesi üzerinde olduğu belirlenmiştir. Bu etkiye sebep olan süreçleri belirlemek için SimaPro yazılımından faydalanılarak katkı analizi yapılmıştır. Katkı analizi sonuçlarına göre 1 ton LPG için gerekli etil merkaptan tüketiminin neden olduğu deniz suyu ekotoksisitesinin %61 hidrojen sülfit üretimi ve %39 etanol üretimi (etilen hidrasyonu) ile; 1 ton LPG için gerekli Greenodor tüketiminden kaynaklanan deniz suyu ekotoksisitesinin, %37 akrilik asit, %36 formaldehit, %16 etanol ve %11 büten ile ilişkili olduğu bulunmuştur.

Belirsizlik analizi sonuçlarına bakıldığında, etil merkaptan ve Greenodor ile kokulandırılmış LPG tanker dolum prosesi için ozon tabakasında incelme, insan toksisitesi ve karasal ekotoksisitenin yüksek derecede belirsizliğe sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durumun aksine, küresel ısınma ve fotokimyasal oksidasyon düşük belirsizliğe sahiptir. LPG tüp dolum prosesi için ise en yüksek belirsizliğin insan toksisitesi olduğu gözlemlenmiştir. Genel olarak toksisite ile ilgili karakterizasyon faktörleri yerel ölçekte olması sebebiyle, YDD çalışmalarının çoğunda insan toksisite verilerinin belirsizliği yüksek bulunmaktadır (Jolliet, 2015; Hodson, 2019). Etil merkaptan ile kokulandırılmış LPG tüp dolum prosesi için belirsizliği en düşük olan etki kategorisi asidifikasyon iken, Greenodor ile kokulandırılmış LPG tüp dolum prosesi için küresel ısınmadır.

LPG'nin kokulandırılmasında kullanılan iki farklı kimyasal maddenin potansiyel çevresel etkileri karşılaştırıldığında, sonuçlar sadece kokulandırıcı maddelerin (etil merkaptan ve Greenodor) üretimi ve LPG dolum tesisine nakliyesi ile sınırlı kalmaktadır. Etil merkaptan, taşıtlarda ve/veya evlerde kullanılan LPG'de katkı maddesi olarak ilave edilmekte ve bu yakıtın yakılması durumunda kükürt dioksit emisyonu oluşmaktadır.

LPG'nin kokulandırılması aşamasında etil merkaptan yerine onun alternatifi olarak geliştirilen ve kükürt içermeyen Greenodor kullanılması durumunda kükürt dioksit emisyonlarının önüne geçileceği açıktır. Bununla birlikte, henüz Greenodor ile kokulandırılmış LPG'nin yakılmasına dair çalışmalar bulunmaması, bu çalışmanın en önemli kısıtıdır. Gelecekte Greenodor ile kokulandırılmış LPG yakılmasına dair pilot ölçekli ve gerçek ölçekli çalışmaların yapılması halinde, Greenodor katkılı LPG'nin taşıt ve evlerde kullanımı esnasında ortama yaydığı emisyonlar da YDD modeline eklenerek Greenodor ile kokulandırılmış LPG'nin üretimi, dolumu ve kullanılması süreçlerini içeren daha geniş kapsamlı bir yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmasının ortaya konması mümkündür.

KAYNAKLAR

Acero, A. P., Rodríguez, C., Ciroth A., (2016). LCIA methods; Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories. GreenDelta, https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2015/11/LCIA-METHODS-v.1.5.4.pdf/, (Ziyaret Tarihi: 2 Ocak 2023).

Afrane, G., & Ntiamoah, A. (2011). Comparative life cycle assessment of charcoal, biogas, and liquefied petroleum gas as cooking fuels in Ghana. *Journal of Industrial Ecology*, *15*(4), 539-549.

Alyaseri, I., (2014). Qualitative and quantitative procedure for uncertainty analysis in life cycle assessment of wastewater solids treatment processes. Master Thesis, Southern Illinois University, Department of Engineering Science, Carbondale.

Alyaseri, I., Zhou, J., (2019). Handling uncertainties inherited in life cycle inventory and life cycle impact assessment method for improved life cycle assessment of wastewater sludge treatment. *Heliyon, 5*(11). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02793

Ashnani, M. H. M., Miremadi, T., Johari, A., & Danekar, A. (2015). Environmental Impact of Alternative Fuels and Vehicle Technologies: A Life Cycle Assessment Perspective. *Procedia Environmental Sciences, 30*, 205-210. https://doi.org/10.1016/J.PROENV.2015.10.037

Ata A., (2022). Atık Yakma Tesisi Çevresel Etkilerinin Yaşam Döngüsü Yaklaşımı ile Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 766057.

Bahattin Çelik, M., Aktaş, A., & Özdalyan, B. (2006). *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 11*(1).

Bamber, N., Turner, I., Arulnathan, V., Li, Y., Zargar Ershadi, S., Smart, A., Pelletier, N., (2020). Comparing sources and analysis of uncertainty in consequential and attributional life cycle assessment: review of current practice and recommendations. *International Journal of Life Cycle Assessment 25*, 168–180. https://doi.org/10.1007/S11367-019-01663-1/TABLES/6

Bayrakçeken, H., & Kuş, R. (2004). Taşıtlarda Kullanılan Alternatif Yakıtlar. *Afyon Kocatepe Üniveristesi Fen Bilimleri Dergisi, 6*(1), 125-144.

Belcher, C. M., & Mander, L. (2012). Catastrophe: Extraterrestrial Impacts, Massive Volcanism, and the Biosphere. *The Future of the World's Climate*, 463-485. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386917-3.00016-6

Beşergil, B., (2008). *Yakıtlar Yağlar* (1. Basım). Gazi Kitabevi, Manisa.

Boureima, F. S., Messagie, M., Matheys, J., Wynen, V., Sergeant, N., van Mierlo, J., de Vos, M., & de Caevel, B. (2009). Comparative LCA of electric, hybrid, LPG and gasoline cars in Belgian context. *World Electric Vehicle Journal*, *3*(3), 469-476. https://doi.org/10.3390/WEVJ3030469

Chen, H., & Wang, L. (2017). Coproducts Generated from Biomass Conversion Processes. *Technologies for Biochemical Conversion of Biomass*, 219-264. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802417-1.00009-0

Curran, M. A., (2006). Scientific Applications International Corporation, life-cycle assessment: principles and practice. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.

Çağlayan, Y., (2011). Yaşam Döngüsü Analizi. Sürdürülebilir Üretim ve Tüketim Yayınları-I, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı & REC Türkiye*. ISBN: 978-975-6180-42-6; 1-44.

Çankaya, S., (2018). Çimento Üretiminde Çevresel Sürdürülebilirlik İçin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 526793.

Dizemen, G., Turunç, A.S., Sanver, S., (2022). *Aygaz Yatırımcı Sunumu.* https://www.aygaz.com.tr/yatirimci-iliskileri/yatirimci-sunumlari/ (Ziyaret Tarihi: 12 Temmuz 2022).

Garg, A., Vishwanathan, S., & Avashia, V. (2013). Life cycle greenhouse gas emission assessment of major petroleum oil products for transport and household sectors in India. *Energy policy*, *58*, 38-48.

Gaur, R. (2022). Environmental impact and life cycle analysis of green nanomaterials. Green *Functionalized Nanomaterials for Environmental Applications*, 513-539. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823137-1.00018-X

Goedkoop, M., Oele, M., Leijting, J., Ponsioen, T., Meijer E., (2016). Introduction to LCA with SimaPro. PRé Copyright, San Francisco, USA.

Gorup, L. F., Sequinel, T., Akucevicius, G. W., Pinto, A. H., Biasotto, G., Ramesar, N., de Arruda, E. G. R., de Arruda, E. J., & Camargo, E. R. (2021). Nanostructured gas sensors in smart manufacturing. *Nanosensors for Smart Manufacturing*, 445-485. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823358-0.00022-8

Haque, N. (2020). The life cycle assessment of various energy technologies. Future Energy: Improved. *Sustainable and Clean Options for Our Planet*, 633-647. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00029-3

Hernandez, P., Oregi, X., Longo, S., & Cellura, M. (2019). *Life-Cycle Assessment. Handbook of Energy Efficiency in Buildings*. https://commons.wmu.se/lib_articles/438 (Ziyaret Tarihi: 24 Aralık 2022).

Hodson, P. V., Adams, J., & Brown, R. S. (2019). Oil toxicity test methods must be improved. *Environmental toxicology and chemistry*, *38*(2), 302-311.

Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC), (2006). IPCC Guidelines for National Gas Inventories Volume 2. *Intergovernmentel Panel on Climate Change*, Paris.

International Organization for Standardization (ISO), (2006a). Environmental Management e Life Cycle Assessment e Principles and Framework. *International Organisation for Standardisation*, Geneva, Switzerland.

International Organization for Standardization (ISO), (2006b). Environmental Management e Life Cycle Assessment e Requirements and Guidelines. *International Organisation for Standardisation*, Geneva, Switzerland.

Jolliet, O., & Fantke, P. (2015). Human toxicity. *Life cycle impact assessment*, 75-96.

Kaynak Duman, A., (2020). Zeytinyağı endüstrisi Atıklarının Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 629605.

Kılıç, E. E., (2017). Bir Araç Koltuğunun Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ile Çevresel Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 456993.

Kim, M. J., Lee, E. J., Kim, C. J., Hong, U. G., Park, D. S., Shin, H., & Lee, K. Y. (2021). Life cycle assessment of LPG and diesel vehicles in Korea. *Korean Journal of Chemical Engineering, 38*(5), 938-944. https://doi.org/10.1007/S11814-021-0761-0

Messagie, M., Boureima, F. S., Coosemans, T., Macharis, C., & Mierlo, J. van. (2014). A range-based vehicle life cycle assessment incorporating variability in the environmental assessment of different vehicle technologies and fuels. *Energies, 7*(3), 1467-1482. https://doi.org/10.3390/EN7031467

Morais, S., Mata, T. M., & Ferreira, E. (2010). Life cycle assessment of soybean biodiesel and LPG as automotive fuels in Portugal. *Chemical Engineering Transactions, 19*, 267-272. https://doi.org/10.3303/CET1019044

Muralikrishna, I. v., & Manickam, V. (2017). Chapter Five Life Cycle Assessment. *Environmental Management*, 57-75. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811989-1.00005-1

Muthu, S. S. (2020). Estimating the overall environmental impact of textile processing: Life cycle assessment of textile products. *Assessing the Environmental Impact of Textiles and the Clothing Supply Chain (2nd Edition),* 105-129. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819783-7.00006-5

Nanaki, E. A., & Koroneos, C. J. (2012). Comparative LCA of the use of biodiesel, diesel and gasoline for transportation. J*ournal of Cleaner Production, 20*(1), 14-19. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2011.07.026

Niero, M., Pizzol, M., Bruun, H. G., & Thomsen, M. (2014). Comparative life cycle assessment of wastewater treatment in Denmark including sensitivity and uncertainty analysis. *Journal of cleaner production, 68*, 25-35.

Nikolaou, G., Arahata, M., Basaglia, R., Frederiksen, N., Hadjipateras, P., Hamaguchi, T., Neilsen, W., Perkins, T., Solem, O., Tyler, D., Ure, C., Xydas, N., (2022). LPG for Marine Engines The Marine Alternative Fuel, World LPG Association.

Ordu, M., (2017). Çevresel Etkinin Zaman İçerisindeki Değişiminin Yaşam Döngüsü Analiziyle Değerlendirilmesi: Bursa Organize Sanayi Bölgesi Su Üretim Tesisi Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 470563.

Ryskamp, R. (2015). *Emissions and Performance of Liquefied Petroleum Gas as a Transportation Fuel: A Review*. https://auto-gas.net/library/emissions-and-performance-of-liquefied-petroleum-gas-as-a-transportation-fuel-a-review/ (Ziyaret Tarihi: 14 Temmuz 2022).

Saka, B. (2003). Doğalgaz ve LPG'nin Kullanım Alanları, Dünyadaki ve Türkiye'deki Rezerv, Üretim ve Tüketim Miktarı ve Taşıtlarda Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 142766.

Sarkar, S., Mahadevan, S., Meeussen, J. C. L., Van Der Sloot, H., Brown, K., & Kosson, D. S. (2010). Probabilistic durability analysis of cementitious materials under combined sulfate attack and calcium leaching–10149. In *WM2010 Conference, March* (pp. 7-11).

Selim, M. Y. E.-S. (2020). Liquefied Petroleum Gas. Alternative *Fuels for Transportation,* 203-226. https://doi.org/10.1201/b16260-7

Shahrier, F., Jahan Eva, I., Mahi, A., Sadid Alam, C., & Harunur Rashid, A. (2020). Literature Review on LCA of LPG as a Transportation and Cooking Fuel. *Proceedings of the International Conference on Industrial & Mechanical Engineering and Operations Management,* Dhaka, Bangladesh, December 26-27.

Sheikholeslami, Z., Ehteshami, M., Nazif, S., Semiarian, A., (2022). The environmental assessment of tertiary treatment technologies for wastewater reuse by considering LCA uncertainty. *Process Safety and Environmental Protection 168,* 928–941. https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2022.10.074

Shipman, R. H. (2002). Liquefied petroleum gas. Plant Engineer's Reference Book, (2nd Edition), 14-1. https://doi.org/10.1016/B978-075064452-5/50069-9

Shrivastava, S., & Unnikrishnan, S. (2021). Life cycle sustainability assessment of crude oil in India. *Journal of Cleaner Production, 283*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124654

Silva, D. A. L., Nunes, A. O., Silva Moris, V. A., Piekarski, C. M., Rodrigues, T., (2017). How important is the LCA software tool you choose Comparative results from GaBi, openLCA, SimaPro and Umberto. *VII International Conference on Life Cycle Assessment*, Latin America

Singh, P., Gundimeda, H., & Stucki, M. (2014). Environmental footprint of cooking fuels: a life cycle assessment of ten fuel sources used in Indian households. *The International Journal of Life Cycle Assessment, 19*(5), 1036-1048. https://doi.org/10.1007/S11367-014-0699-0

Sun, S., Ertz, M., 2020. Life cycle assessment and Monte Carlo simulation to evaluate the environmental impact of promoting LNG vehicles. *MethodsX, 7*. https://doi.org/10.1016/J.MEX.2020.101046

T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇSB), (2020). Petrol Rafinerisi Sektörel Uygulama Kılavuzu (Taslak).

T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), (2018). LPG Tüketicisinin El Kitabı, Ankara.

T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), (2020). Sıvılaştırılmış petrol gazlarının (LPG) farklı kullanım alanlarının incelenmesi, Ankara.

Tobin J., Shambaugh P., Mastrangelo E., (2006). Natural Gas Processing: The Crucial Link Between NG Production & Its Transportation to Market. *U.S. Energy Information Administration (EIA)*. https://www.eia.gov/naturalgas/articles/ngprocessindex.php/ (Ziyaret Tarihi: 6 Ağustos 2022).

Tukiman, M. M., Osman, S. A., Fawzi, M., Mustaffa, N., & Madon, R. H. (2018). Effect of performance and exhaust emission using liquid phase LPG sequential injection as an alternative fuel in spark ignition engine. *International Journal of Integrated Engineering, 10*(8), 223-230. https://doi.org/10.30880/ijie.2018.10.08.032

Ugurlu, A. (2022). An investigation on well-to-wheel emissions of passenger cars in Turkey. Environmental Science and Pollution Research, 29(11), 16692-16715.

URL-1: http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/1_11.html/, (Ziyaret Tarihi: 12 Nisan 2022).

URL-2: https://www.wlpga.org/key-focus-areas/biolpg/, (Ziyaret Tarihi: 5 Mayıs 2022).

URL-3: https://www.liquidgaseurope.eu/lpgandbiolpg, (Ziyaret Tarihi: 6 Mayıs 2022).

URL-4: https://lpg-apps.org/ (Ziyaret Tarihi: 10 Nisan 2022).

URL-5: https://simapro.com/about/, (Ziyaret Tarihi: 18 Eylül 2022).

URL-6: https://simapro.com/databases/, (Ziyaret Tarihi: 18 Eylül 2022).

URL-7: https://www.epa.gov/ (Ziyaret Tarihi: 3 Ekim 2022).

URL-8:https://www.water.wa.gov.au/water-topics/waterways/assessing-waterway-health/ecotoxicity/ (Ziyaret Tarihi: 11 Ekim 2022).

URL-9: https://support.simapro.com/s/article/SimaPro-Methods-manual (Ziyaret Tarihi: 18 Eylül 2022).

URL-10: https://support.simapro.com/s/article/Superseded-methods-in-SimaPro-desktop (Ziyaret Tarihi: 20 Eylül 2022).

Üstün, S., (2013). Plastik Ürün Endüstrisinin Yaşam Döngüsü Analizi Yöntemi ile Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 348444.

Viswanathan, B. (2017a). Chapter 2 – Petroleum. *Energy Sources*, 29-57. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-56353-8.00002-2

Viswanathan, B. (2017c). Chapter 3 - Natural Gas. *Energy Sources*, 59-79. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-56353-8.00003-4

Woon, K. S., Lo, I. M., Chiu, S. L., & Yan, D. Y. (2016). Environmental assessment of food waste valorization in producing biogas for various types of energy use based on LCA approach. *Waste management*, *50*, 290-299.

World LPG Association (WLPGA) & Argus Media, (2021). Statistical review of global LPG 2021. France/Paris.

World LPG Association (WLPGA) and Liquid Gas Europe, (2020). Autogas Incentive Policies.

World LPG Association (WLPGA), (2017). Guidilines for good business practies in the LPG industry. https://www.wlpga.org/publications/good-industry-practices/ (Ziyaret Tarihi: 2 Ağustos 2022).

World LPG Association (WLPGA), (2021). Guide To New Autogas Markets.

Yang, R., Ozer, H., & Al-Qadi, I. L. (2016). Regional upstream life-cycle impacts of petroleum products in the United States. *Journal of Cleaner Production, 139*, 1138-1149. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.08.164

Yeo, S. J., Kim, J., & Lee, W. J. (2022). Potential economic and environmental advantages of liquid petroleum gas as a marine fuel through analysis of registered ships in South Korea. *Journal of Cleaner Production*, *330*, 129955. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.129955

EKLER

Ek-A

SimaPro'da Seçilen Veriler ve Hesaplama Sonuçları

Tablo A.1. Etil Merkaptan ve Greenodor üretimi ile ilgili SimaPro'da seçilen veriler

Kokulandırıcı	**Girdiler**	**SimaPro'da Seçilen Prosesler**
Etil Merkaptan	Hidrojen Sülfür	Hydrogen sulfide {RER}| production | APOS, U
	Etanol	Ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene {RER}| ethylene hydration | APOS, U
	Su	Water, unspecified natural origin, TR
	Nakliye, etil merkaptan temini	Transport, freight, lorry, unspecified {RER}| market for transport, freight, lorry, unspecified | APOS, U
Greenodor	Etanol	Ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene {RER}| market for ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene | APOS, U
	Akrilik Asit	Acrylic acid {RER}| market for acrylic acid | APOS, U
	Büten	Butene, mixed {RER}| market for butene, mixed | APOS, U
	Formaldehit	Formaldehyde {RER}| market for formaldehyde | APOS, U
	Su	Water, unspecified natural origin, TR
	Nakliye, Greenodor temini	Transport, freight, lorry, unspecified {RER}| market for transport, freight, lorry, unspecified | APOS, U

Tablo A.2. Etil Merkaptan ve Greenodor katkılı dolum proseslerine ait SimaPro'da seçilen veriler

	Etil Merkaptan Katkılı Tanker Dolum	**Greenodor Katkılı Tanker Dolum**	**Etil Merkaptan Katkılı Tüp Dolum**	**Greenodor Katkılı Tüp Dolum**
Girdiler	***SimaPro'da Seçilen Prosesler***			
Su	Water, unspecified natural origin, TR			
Etil Merkaptan	Tablo A.1.	-	Tablo A.1.	-
Greenodor	-	Tablo A.1.	-	Tablo A.1.
Tesiste tüketilen LPG	Liquefied petroleum gas {RoW}| liquefied petroleum gas production, petroleum refinery operation | APOS, U			
Valf	Exhaust air valve, in-wall housing, plastic/steel, DN 125 {RoW}| production | APOS, U			
Alüminyum Pasta	-		Metallization paste, back side, aluminium {RER}| production | APOS, U	
Tiner	-		White spirit {GLO}| market for | APOS, U	
Boya	-		Electrostatic paint {GLO}| market for | APOS, U	
Elektrik	Electricity, medium voltage {TR}| market for | APOS, U		-	
Nakliye, deniz yolu	Transport, freight, sea, tanker for liquefied natural gas {GLO}| transport, freight, sea, tanker for liquefied natural gas | APOS, U		-	
Nakliye, karayolu	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RER}| transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 | APOS, U		-	
Nakliye, karayolu – bayi-tdm	-		Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro5 {RER}| market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | APOS, U	
Nakliye, karayolu – bayi-son kullanıcı	-		Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro5 {RER}| market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | APOS, U	

Tablo A.2. (Devam) Etil Merkaptan ve Greenodor katkılı dolum proseslerine ait SimaPro'da seçilen veriler

Nakliye, karayolu – boya	-	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, euro5 {RER}| market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 | APOS, U
Nakliye, karayolu – tiner	-	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, euro5 {RER}| market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 | APOS, U
Nakliye, karayolu – alüminyum pasta	-	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, euro5 {RER}| market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 | APOS, U
Nakliye, karayolu – atık bertarafı	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro5 {RoW}| market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | APOS, U	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, euro5 {RER}| market for transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | APOS, U
Çıktılar	***SimaPro'da Seçilen Prosesler***	
NO_2	-	Nitrogen dioxide, TR
NO	-	Nitrogen monoxide, TR
SO_2	-	Sulfur dioxide, TR
Partikül Madde	-	Particulates
VOC	-	VOC, volatile organic compounds, unspecified origin
TOC	-	TOC, Total Organic Carbon
Atık Siliporite	Hazardous waste, for incineration {RoW}| market for hazardous waste, for incineration | APOS, U	-
Metal Atık	-	Steel and iron (waste treatment) {GLO}| recycling of steel and iron | APOS, U
Kâğıt Atık	-	Paper (waste treatment) {GLO}| recycling of paper | APOS, U
Plastik Atık	-	Mixed plastics (waste treatment) {GLO}| recycling of mixed plastics | APOS, U

Tablo A.3. Etil Merkaptan ile Kokulandırılmış 1 Ton LPG Tanker Dolumunun Karakterizasyon Sonuçları

Etki Ketegorisi	Abiyotik tükenme	Abiyotik tükenme (fosil yakıtlar)	Küresel ısınma (100a)	Ozon tabakasının incelmesi	İnsan toksisitesi	Tatlı su ekotoksisitesi	Deniz suyu ekotoksisitesi	Karasal ekotoksisite	Fotokimyasal oksidasyon	Asidifikasyon	Ötrofikasyon
Birim	kg Sb eşd	MJ	kg CO_2 eşd	kg CFC-11 esd	kg 1,4-DB eşd	kg 1,4-DB eşd	kg 1,4-DB eşd	kg 1,4-DB eşd	kg C_2H_4 eşd	kg SO_2 eşd	kg PO_4 eşd
EM tüketimi	5,05E-07	1,32E+00	3,53E-02	1,61E-09	7,60E-03	5,70E-04	6,85E+00	2,71E-05	4,16E-05	3,14E-04	3,48E-05
LPG tüketimi (tesis)	1,43E-07	1,73E+01	1,86E-01	2,24E-07	6,57E-02	5,75E-03	4,39E+01	3,20E-04	7,63E-05	1,92E-03	1,74E-04
Elektrik tüketimi	3,21E-06	2,48E+01	2,24E+00	5,54E-08	2,88E-01	2,51E-02	1,35E+03	4,53E-03	4,37E-04	1,18E-02	1,38E-03
Nakliye (yurt içi)	2,12E-05	1,48E+02	9,61E+00	1,81E-06	3,32E+00	1,22E-01	1,22E+03	1,24E-02	1,19E-03	3,10E-02	5,17E-03
Nakliye (yurt dışı)	3,75E-05	4,39E+02	3,43E+01	5,55E-06	1,11E+01	3,06E-01	4,68E+03	4,48E-02	2,31E-02	9,04E-01	9,62E-02
Atık bertarafı	3,13E-07	7,13E-01	1,54E-01	1,67E-08	9,47E-03	2,26E-02	4,20E+01	7,48E-05	7,52E-06	1,98E-04	3,25E-05

Tablo A.4. Greenodor ile Kokulandırılmış 1 Ton LPG Tanker Dolumunun Karakterizasyon Sonuçları

Etki Ketegorisi	Abiyotik tükenme	Abiyotik tükenme (fosil yakıtlar)	Küresel ısınma (100a)	Ozon tabakasının incelmesi	İnsan toksisitesi	Tatlı su ekotoksisitesi	Deniz suyu ekotoksisitesi	Karasal ekotoksisite	Fotokimyasal oksidasyon	Asidifikasyon	Ötrofikasyon
Birim	kg Sb eşd	MJ	kg CO_2 eşd	kg CFC-11 esd	kg 1,4-DB eşd	kg 1,4-DB eşd	kg 1,4-DB eşd	kg 1,4-DB eşd	kg C_2H_4 eşd	kg SO_2 eşd	kg PO_4 eşd
Greenodor tüketimi	1,50E-07	8,30E-01	2,61E-02	9,31E-10	2,38E-03	2,46E-04	2,35E+00	8,64E-06	8,12E-06	6,57E-05	9,33E-06
LPG tüketimi (tesis)	1,43E-07	1,73E+01	1,86E-01	2,23E-07	6,56E-02	5,73E-03	4,38E+01	3,20E-04	7,62E-05	1,92E-03	1,74E-04
Elektrik tüketimi	3,21E-06	2,48E+01	2,24E+00	5,54E-08	2,88E-01	2,51E-01	1,35E+03	4,53E-03	4,38E-04	1,18E-02	1,38E-03
Nakliye (yurt içi)	2,12E-05	1,48E+02	9,61E+00	1,81E-06	3,32E+00	1,22E-01	1,22E+03	1,24E-02	1,19E-03	3,10E-02	5,17E-03
Nakliye (yurt dışı)	3,75E-05	4,39E+02	3,43E+01	5,55E-06	1,11E+01	3,06E-01	4,68E+03	4,48E-02	2,31E-02	9,04E-01	9,62E-03
Atık bertarafı	3,13E-07	7,10E-02	1,54E-01	1,67E-08	9,47E-03	2,26E-02	4,20E+01	7,48E-05	7,52E-06	1,98E-04	3,25E-05

Tablo A.5. Etil Merkaptan ile Kokulandırılmış 1 Ton LPG Tüp Dolumunun Karakterizasyon Sonuçları

Etki Ketegorisi	Abiyotik tükenme	Abiyotik tükenme (fosil yakıtlar)	Küresel ısınma (100a)	Ozon tabakasının incelmesi	İnsan toksisitesi	Tatlı su ekotoksisitesi	Deniz suyu ekotoksisitesi	Karasal ekotoksisite	Fotokimyasal oksidasyon	Asidifikasyon	Ötrofikasyon
Birim	kg Sb eşd	MJ	kg CO_2 eşd	kg CFC-11 esd	kg 1,4-DB eşd	kg 1,4-DB eşd	kg 1,4-DB eşd	kg 1,4-DB eşd	kg C_2H_4 eşd	kg SO_2 eşd	kg PO_4 eşd
EM tüketimi	5,21E-07	1,36E+00	3,64E-02	1,66E-09	7,84E-03	5,88E-04	7,06E+00	2,80E-05	4,30E-05	3,24E-04	3,59E-05
LPG tüketimi (tesis)	1,61E-07	1,95E+01	2,09E-01	2,52E-07	7,41E-02	6,47E-03	4,94E+01	3,61E-04	8,60E-05	2,16E-03	1,96E-04
Alüminyum Pasta	7,48E-06	1,23E+01	1,23E+00	5,09E-08	3,53E-01	9,85E-03	2,19E+03	2,48E-03	4,57E-04	6,97E-03	5,97E-04
Tiner	6,91E-07	7,34E+00	7,44E-02	9,22E-08	2,44E-02	2,38E-03	2,92E+01	1,35E-04	2,83E-05	6,97E-04	8,15E-05
Boya	4,19E-05	7,94E+01	4,43E+00	6,24E-07	2,47E+00	3,47E-01	3,07E+03	5,88E-03	2,99E-03	2,76E-02	3,16E-03
Elektrik tüketimi	3,61E-06	2,79E+01	2,52E+00	6,24E-08	3,25E-01	2,82E-02	1,52E+03	5,11E-03	4,93E-04	1,33E-02	1,56E-03
Nakliye (yurt dışı)	3,75E-05	4,39E+02	3,43E+01	5,55E-06	1,11E+01	3,06E-01	4,68E+03	4,48E-02	2,31E-02	9,04E-01	9,62E-02
Nakliye (atık bertarafa)	8,23E-06	2,77E+01	1,89E+00	3,35E-07	4,50E-01	1,89E-02	2,26E+02	2,31E-03	2,39E-04	5,80E-03	9,46E-04
Nakliye (malzeme)	2,03E-07	4,96E-01	3,43E-02	5,89E-09	7,18E-03	3,20E-04	4,48E+00	4,47E-05	4,52E-06	1,03E-04	1,62E-05
Nakliye (bayi-son kullanıcı)	7,26E-05	3,25E+02	2,18E+01	3,97E-06	5,92E+00	2,35E-01	2,51E+03	2,62E-02	2,74E-03	6,83E-02	1,13E-02
Atık bertarafı	-2,74E-05	-2,19E+02	-2,55E+01	-1,16E-06	-8,59E+00	-9,78E-02	-7,96E+03	-1,15E-02	-1,32E-02	-7,75E-02	-1,11E-02
Valf	1,77E-04	3,23E+01	2,76E+00	2,99E-07	1,02E+00	4,93E-02	1,35E+03	5,28E-03	8,65E-04	3,07E-02	5,67E-03

Tablo A.6. Greenodor ile Kokulandırılmış 1 Ton LPG Tüp Dolumunun Karakterizasyon Sonuçları

Etki Ketegorisi	Abiyotik tükenme	Abiyotik tükenme (fosil yakıtlar)	Küresel ısınma (100a)	Ozon tabakasının incelmesi	İnsan toksisitesi	Tatlı su ekotoksisitesi	Deniz suyu ekotoksisitesi	Karasal ekotoksisite	Fotokimyasal oksidasyon	Asidifikasyon	Ötrofikasyon
Birim	kg Sb eşd	MJ	kg CO_2 eşd	kg CFC-11 esd	kg 1,4-DB eşd	kg 1,4-DB eşd	kg 1,4-DB eşd	kg 1,4-DB eşd	kg C_2H_4 eşd	kg SO_2 eşd	kg PO_4 eşd
Greenodor tüketimi	1,68E-07	9,35E-01	2,95E-02	1,05E-09	2,68E-03	2,77E-03	2,64E+00	9,73E-06	9,15E-06	7,40E-05	1,05E-05
LPG tüketimi (tesis)	1,61E-07	1,95E+01	2,09E-01	2,52E-07	7,41E-02	6,47E-03	4,94E+01	3,61E-04	8,60E-05	2,16E-03	1,96E-04
Alüminyum Pasta	7,48E-06	1,23E+01	1,22E+00	5,09E-08	3,53E-01	9,85E-03	2,19E+03	2,48E-03	4,57E-04	6,97E-03	5,97E-04
Tiner	6,91E-07	7,34E+00	7,44E-02	9,22E-08	2,44E-02	2,38E-03	2,92E+01	1,35E-04	2,83E-05	6,97E-04	8,15E-05
Boya	4,19E-05	7,94E+01	4,43E+00	6,24E-07	2,47E+00	3,47E-01	3,07E+03	5,88E-03	2,99E-03	2,76E-02	3,16E-03
Elektrik tüketimi	3,61E-06	2,79E+01	2,52E+00	6,24E-08	3,25E-01	2,83E-02	1,52E+03	5,12E-03	4,93E-04	1,33E-02	1,56E-03
Nakliye (yurt dışı)	3,75E-05	4,39E+02	3,42E+01	5,55E-06	1,11E+01	3,10E-02	4,68E+03	4,48E-02	2,31E-02	9,04E-01	9,62E-02
Nakliye (atık bertarafa)	8,23E-06	2,77E+01	1,89E+00	3,35E-07	4,50E-01	1,89E-02	2,26E+02	2,31E-03	2,39E-04	5,80E-03	9,04E-46
Nakliye (malzeme)	2,03E-07	4,96E-01	3,43E-02	5,89E-09	7,18E-03	3,20E-04	4,485.746	4,47E-05	4,52E-06	1,03E-04	1,62E-05
Nakliye (bayi-son kullanıcı)	7,26E-05	3,25E+02	2,18E+01	3,97E-06	5,92E+00	2,35E-01	2,51E-03	2,62E-02	2,74E-03	6,83E-02	1,13E-02
Atık bertarafı	-2,74E-05	-2,19E+02	-2,55+01	-1,16E-06	-8,59E+00	-9,78E-02	-7,97E+03	-1,15E-02	-1,32E-02	-7,75E-02	-1,11E-02
Valf	1,77E-04	3,23E+01	2,76E+00	2,99E-07	1,02E+00	4,93E-02	1,35E+03	5,28E-03	8,65E-04	3,07E-02	5,67E-03

Tablo A.7. Orta Nokta Etkileri için Belirsizlik Analizi Sonuçları

Etki Kategorisi	Birim	Varyasyon Katsayısı				Standard Hata			
		Tanker Dolum		Tüp Dolum		Tanker Dolum		Tüp Dolum	
		EM*	Greenodor	EM*	Greenodor	EM*	Greenodor	EM*	Greenodor
Abiyotik tükenme	kg Sb eşd	2,37E+01	2,35E+01	1,79E+01	1,84E+01	4,74E-07	4,67E-07	1,83E-06	1,86E-06
Abiyotik tükenme (fosil yakıtlar)	MJ	7,77E+00	7,55E+00	1,06E+01	8,55E+00	1,55E+00	1,51E+00	2,55E+00	2,05E+00
Küresel ısınma (100a)	kg CO_2 eşd	7,52E+00	7,51E+00	7,53E+00	7,37E+00	2,24E-03	2,26E-03	2,35E-03	2,29E-03
Ozon tabakasının incelmesi	kg CFC-11 eşd	1,73E+01	1,65E+01	1,20E+01	1,96E+01	6,19E-04	6,01E-04	7,13E-04	6,90E-04
İnsan toksisitesi	kg 1,4-DB eşd	2,64E+01	2,86E+01	3,71E+01	3,46E+01	5,30E-02	5,73E-02	1,27E-01	1,16E-01
Tatlı su ekotoksisitesi	kg 1,4-DB eşd	2,91E+00	2,76E+00	1,25E+01	4,28E+00	4,28E-02	4,07E-02	1,74E-01	5,94E-02
Deniz suyu ekotoksisitesi	kg 1,4-DB eşd	3,81E+01	4,07E+01	5,99E+01	6,37E+01	2,18E-01	2,32E-01	3,99E-01	4,09E-01
Karasal ekotoksisite	kg 1,4-DB eşd	1,78E+01	1,79E+01	4,77E+01	3,82E+01	8,68E+01	8,69E+01	2,66E+02	2,10E+02
Fotokimyasal oksidasyon	kg C2H4 eşd	4,38E+01	4,29E+01	4,21E+01	4,24E+01	1,07E-07	1,03E-07	1,33E-07	1,36E-07
Asidifikasyon	kg SO_2 eşd	3,91E+00	3,54E+00	4,14E+01	3,92E+01	3,07E-05	2,78E-05	2,33E-04	2,20E-04
Ötrofikasyon	kg PO_4 eşd	3,75E+01	4,00E+01	3,07E+01	3,17E+01	7,55E-04	8,00E-04	8,07E-04	8,26E-04

*EM: Etil Merkaptan

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Şişman E., Çankaya S., Keçeci E., Teymourfamianasl M., Uyan Uçar Z, Bulut B., Pekey B., (2023). Identifying the environmental hotspots of sulfur-free odorant for LPG storage and filling by life cycle approach. *Science of The Total Environment, 886C,* 163816. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.

Şişman E., (2023). Yaşam Döngüsü Yaklaşımı ile Farklı Araç Yakıt ve Teknolojilerinin Çevresel Etkilerinin Karşılaştırılması, *8. Uluslararası "Başkent" Fen, Sosyal ve Sağlık Bilimleri Kongresi,* Ankara, Türkiye, 4-6 Şubat 2023.

ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi İngilizce Hazırlık öğrenimini tamamlayarak 2016 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde öğrenim göremeye başladı. 2020 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nden Çevre Mühendisi olarak mezun olmasının ardından aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı.