T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DENİZ SUYU DESALİNASYON TESİSLERİNDE YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ UYGULAMASI

Ali Berkant BALKIŞ

DANIŞMAN
Prof. Dr. Yasemin KAYA

II. DANIŞMAN
Prof. Dr. İlda VERGİLİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans Programı

Temmuz, 2025

TEZ KABUL VE ONAYI

Ali Berkant BALKIŞ tarafından, **Prof. Dr. Yasemin KAYA ve Prof. Dr. İlda VERGİLİ** danışmanlığında hazırlanan **"DENİZ SUYU DESALİNASYON TESİSLERİNDE YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ UYGULAMASI"** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **09/07/2025** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	**Sonuç**
DANIŞMAN	Prof. Dr. Yasemin KAYA İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Zeren Beril ÖZÇELEP İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Fatma Gülen İSKENDER İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret

Anneme, babama ve kardeşime ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

DENİZ SUYU DESALİNASYON TESİSLERİNDE YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ UYGULAMASI

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje no: 37864

TEŞEKKÜR

Öncelikle yüksek lisans tezimin tüm sürecinde bilgi, emek ve destekleriyle yanımda olan herkese teşekkürlerimi sunarım. Tez danışmanlarım Sayın Prof. Dr. Yasemin KAYA ve Prof. Dr. İlda VERGİLİ'ye akademik birikimleri, yönlendirici katkıları ve yüksek anlayışları ile çalışma sürecim boyunca bana yol gösterdikleri için sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışmanın saha ve deney aşamalarında bana destek sağlayan tesis yetkililerine ve çalışanlarına, sağladıkları veri ve imkanlar için minnettarım. Hayatım boyunca beni her koşulda destekleyen, sevgisini ve duasını benden esirgemeyen aileme, bu süreçte bana olan inançları ile güç verdikleri için teşekkür ederim.

Temmuz 2025 Ali Berkant BALKIŞ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
BEYAN iii
BÜTÇE DESTEKLERİ v
TEŞEKKÜR vi
İÇİNDEKİLER vii
ŞEKİL LİSTESİ x
TABLO LİSTESİ xii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ xiviv
ÖZET xviii
ABSTRACT xx
1. GİRİŞ **1**
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **4**
2.1. DENİZ SUYU 5
2.2. TERS OSMOZ 7
2.3. TERS OSMOZ DESALİNASYON TESİSLERİ 8
2.3.1. Su Alma Yapıları 9
2.3.1.1. Yüzeyaltı Su Alma Yapıları 10
2.3.1.2. Yüzeysel Su Alma Yapıları 11
2.3.2. Ön Arıtma 13
2.3.2.1. Kimyasal Ön Arıtma 13
2.3.2.2. Fiziksel Ön Arıtma 15
2.3.3. Ters Osmoz 18
2.3.4. Son Arıtma 19
2.3.5. Konsantre Bertarafı 20
2.4. YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ 23
2.4.1. Ters Osmoz Desalinasyon Tesislerinde YDA Uygulamaları 27
3. YÖNTEM **30**
3.1. DENİZ SUYU DESALİNASYON TESİSİ 30

3.2. DENİZ SUYU DESALİNASYON TESİSİNE AİT YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ ÇALIŞMASI....31
3.2.1. Amaç ve Kapsam....31
3.2.2. Yaşam Döngüsü Envanter Analizi (YDE)....32
3.2.3. Yaşam Döngüsü Etki Analizi (YDEA)....46
3.2.4. Hassasiyet Analizi ve Belirsizlik Analizi....49
3.2.5. Yorumlama....50
3.3. ALTERNATİF SENARYOLAR....51
3.4. DENİZ SUYU İLE YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR....51
3.4.1. Deniz Suyu Karakterizasyonu....53
3.4.2. Deniz Suyunun NF Membranı ile Ön Arıtımı....53
3.4.3. Deniz Suyunun TO Membranı ile Arıtımı....53
3.4.4. Deney Sistemine ait YDA Çalışması....53
4. BULGULAR....55
4.1. DESALİNASYON İLE İÇME SUYU ÜRETİMİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİ....55
4.1.1. Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)....58
4.1.2. Stratosferik Ozon Tüketimi Potansiyeli (SOTP)....59
4.1.3. İyonlaşmış Radyasyon Potansiyeli (İRP)....60
4.1.4. Ozon Oluşumu Potansiyeli, İnsan Sağlığı (OOP, İS)....61
4.1.5. Ozon Oluşumu Potansiyeli, Karasal Ekosistemler (OOP, KE)....62
4.1.6. İnce Partikül Madde Oluşumu Potansiyeli (İPMOP)....63
4.1.7. Karasal Asidifikasyon Potansiyeli (KAP)....64
4.1.8. Tatlı Su Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (TSSÖP)....65
4.1.9. Deniz Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (DSÖP)....66
4.1.10. Kara Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (KCEP)....67
4.1.11. Tatlı Su Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (TSCEP)....68
4.1.12. Deniz Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (DCEP)....69
4.1.13. Toksisite-İnsan Sağlığı (Kanser) ((T-İS (Kanser))....70
4.1.14. Toksisite-İnsan Sağlığı (Kanser Dışı) ((T-İS (Kanser Dışı))....71
4.1.15. Arazi Kullanımı (AK)....72
4.1.16. Mineral Kaynak Kıtlığı (MKK)....73
4.1.17. Fosil Kaynak Kıtlığı (FKK)....74
4.1.18. Su Tüketimi (ST)....75
4.2. ALTERNATİF SENARYOLARIN ÇEVRESEL ETKİLERİ....78
4.2.1. Yenilebilir ve Yenilemeyen Enerji Kaynaklarının %100 Kullanımı....78

4.2.2. Yenilebilir ve Yenilemeyen Enerji Kaynaklarının Karma Kullanımı 82
4.3. HASSASİYET ANALİZİ VE BELİRSİZLİK ANALİZİ 87
4.3.1. Sistem Girdisi ile Hassasiyet Analizi 87
4.3.2. Etki Analizi Metodları ile Hassasiyet Analizi 90
4.3.3. Monte Carlo Metodu ile Belirsizlik Analizi 91
4.4. DENİZ SUYU İLE YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR 93
4.4.1. Deniz Suyu Karakterizasyonu 93
4.4.2. Deniz Suyunun NF Membranı ile Ön Arıtımı 93
4.4.3. Deniz Suyunun TO Membranı ile Arıtımı 94
4.4.4. Laboratuvar Ölçekli Alternatif Desalinasyon Sistemine ait YDA Çalışması 94
5. TARTIŞMA 97
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 101
KAYNAKLAR 105
EKLER 109
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI 149
ETİK KURUL İZİN YAZISI 150
KURUM İZNİ YAZILARI 151
ÖZGEÇMİŞ 152

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Osmoz ve ters osmoz (TO) prosesinin görsel ifadesi 7
Şekil 2.2: Konvansiyonel ters osmoz (TO) desalinasyon tesisi akım şeması 9
Şekil 2.3: Yüzeyaltı su alma yapılarının gösterimi 11
Şekil 2.4: Amerika Birleşik Devletleri, Florida, Tampa Bay Desalinasyon Tesisi yüzeysel su alma yapısı gösterimi 12
Şekil 2.5: Çok portlu ve difüzörlü konsantre bertaraf sistemini gösteren çizim 21
Şekil 2.6: Yaşam döngüsü analizinde sistem sınırı, girdi ve çıktıların ifadesi 24
Şekil 2.7: Yaşam döngüsü analizinin genel çerçevesi 26
Şekil 2.8: 2004-2023 yıllarına ait desalinasyon başlığı altında çalışılan yaşam döngüsü analizi çalışmalarının sistem sınırı ve sürdürebilirlik çerçevesi 28
Şekil 3.1: Deniz suyu desalinasyon tesisi akım şeması 30
Şekil 3.2: Yaşam döngüsü analizi çalışmasında belirlenen sistem sınırı 32
Şekil 3.3: Toray AquaGRID membran sistemi tasarım yazılımına ait görsel 35
Şekil 3.4: Tesise ait YDA çalışmasında belirlenen sistem sınırının görsel ifadesi 44
Şekil 3.5: Çapraz akışlı membran sisteminin gösterimi 52
Şekil 3.6: DuPont WAVE Water Treatment Design Software adlı programa ait görsel 54
Şekil 4.1: Tesise ait ReCiPe Midpoint (H) V1.04 orta nokta etki analizi sonuçları 57
Şekil 4.2: Tesise ait alt proseslerin KİP etki kategorisindeki yüzdesel dağılımı 58
Şekil 4.3: Tesise ait alt proseslerin SOTP etki kategorisindeki yüzdesel dağılımı 59
Şekil 4.4: Tesise ait alt proseslerin İRP etki kategorisindeki yüzdesel dağılımı 60
Şekil 4.5: Tesise ait alt proseslerin OOP, İS etki kategorisindeki yüzdesel dağılımı 61
Şekil 4.6: Tesise ait alt proseslerin OOP, KE etki kategorisindeki yüzdesel dağılımı 62
Şekil 4.7: Tesise ait alt proseslerin İPMOP etki kategorisindeki yüzdesel dağılımı 63
Şekil 4.8: Tesise ait alt proseslerin KAP etki kategorisindeki yüzdesel dağılımı 64
Şekil 4.9: Tesise ait alt proseslerin TSSÖP etki kategorisindeki yüzdesel dağılımı 65
Şekil 4.10: Tesise ait alt proseslerin DSÖP etki kategorisindeki yüzdesel dağılımı 66
Şekil 4.11: Tesise ait alt proseslerin KCEP etki kategorisindeki yüzdesel dağılımı 67

Şekil 4.12: Tesise ait alt proseslerin TSCEP etki kategorisindeki yüzdesel dağılımı.....68
Şekil 4.13: Tesise ait alt proseslerin DCEP etki kategorisindeki yüzdesel dağılımı 69
Şekil 4.14: Tesise ait alt proseslerin T-İS (Kanser) etki kategorisindeki yüzdesel dağılımı ...70
Şekil 4.15: Tesise ait alt proseslerin T-İS (Kanser Dışı) etki kategorisindeki yüzdesel dağılımı 71
Şekil 4.16: Tesise ait alt proseslerin AK etki kategorisindeki yüzdesel dağılımı.....72
Şekil 4.17: Tesise ait alt proseslerin MKK etki kategorisindeki yüzdesel dağılımı 73
Şekil 4.18: Tesise ait alt proseslerin FKK etki kategorisindeki yüzdesel dağılımı.....74
Şekil 4.19: Tesise ait alt proseslerin ST etki kategorisindeki yüzdesel dağılımı.....75
Şekil 4.20: Tesise ait ReCiPe Endpoint (H) V1.04 son nokta etki analizi sonuçları 77
Şekil 4.21: Yenilebilir ve yenilenemeyen enerji kaynaklarının karma kullanımları ile elde edilen azalmalar. 85
Şekil 4.22: Enerji girdilerinin değişimi ile elde edilen hassasiyet analizi sonuçları.....89
Şekil 4.23: NF membranına ait akı zaman grafiği 93
Şekil 4.24: TO membranına ait akı zaman grafiği 94
Şekil 4.25: WAVE yazılımı sistem akış diyagramı ekran görüntüsü 95

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Farklı deniz ve okyanusların ortalama toplam çözünmüş katı madde (TÇM) değerleri 6

Tablo 2.2: Standart deniz suyu bileşimi 6

Tablo 2.3: Büyük ölçekli TO desalinasyon tesislerinin ön arıtma tipleri ve akı bilgileri 17

Tablo 2.4: 2004-2023 yıllarına ait TO desalinasyon YDA çalışmalarına ait bulgular 27

Tablo 3.1: Tesise ait debi hesap verileri 33

Tablo 3.2: Tesise ait konsantre hesap verileri 33

Tablo 3.3: Tesisin yıllık çektiği ham deniz suyu miktarı 34

Tablo 3.4: Toray AquaGRID yazılımı ile elde edilen konsantre kompozisyonu 34

Tablo 3.5: Örnek bir ters osmoz desalinasyon tesisinde tesis büyüklüğünün bir fonksiyonu olarak enerji tüketimi 35

Tablo 3.6: Tesisin proseslerine ait elektrik enerjisi tüketim verileri 36

Tablo 3.7: Tesisin proseslerine ait elektrik enerjisi nihai tüketim verileri 36

Tablo 3.8: Tesise ait proses girdileri ve yıllık tüketim miktarları 37

Tablo 3.9: Tesise ait proses girdilerinin fonksiyonel birim başına hesap verileri 38

Tablo 3.10: Tesise ait proses girdilerinin taşınım mesafeleri ve taşınıma ait araç tipleri 39

Tablo 3.11: Tesise ait proses girdilerinin taşınan yük ve taşınım mesafesi çarpımları 40

Tablo 3.12: Tesise ait kaba ve ince ızgara ünitesi katı atıklarının verileri 41

Tablo 3.13: Tesise ait kaba ve ince ızgara ünitesi katı atıklarının fonksiyonel birim başına hesap verileri 41

Tablo 3.14: Tesise ait proses çıktılarının yıllık oluşum miktarları ve bertaraf yöntemleri 42

Tablo 3.15: Tesise ait proses çıktılarının fonksiyonel birim başına hesap verileri. 42

Tablo 3.16: Tesise ait proses çıktılarının taşınım mesafeleri ve taşınıma ait araç tipleri 43

Tablo 3.17: Tesise ait proses çıktılarının taşınan yük ve taşınım mesafesi çarpımları 43

Tablo 3.18: Tesise ait çalışmada kullanılacak alt proseslerin gösterimi 43

Tablo 3.19: Fonksiyonel birim (1 m^3 arıtılmış deniz suyu) başına girdi ve çıktı tablosu 45

Tablo 3.20: Çalışmalarda kullanılan membranların teknik özellikleri ve test koşulları. 52

Tablo 4.1: Tesise ait ReCiPe Midpoint (H) V1.04 orta nokta etki analizi sonuçları 56

Tablo 4.2: Tesise ait ReCiPe Endpoint (H) V1.04 son nokta etki analizi sonuçları 77

Tablo 4.3: Yenilebilir ve yenilenemeyen enerji kaynaklarının %100 kullanımı senaryolarına ait yaşam döngüsü etki analizi sonuçları 79

Tablo 4.4: Yenilebilir ve yenilenemeyen enerji kaynaklarının %100 kullanımında çevresel etki kategorilerinde gerçekleşen değişimler. 80

Tablo 4.5: Yenilebilir ve yenilenemeyen enerji kaynaklarının karma kullanımına ait yaşam döngüsü etki analizi sonuçları 83

Tablo 4.6: Yenilebilir ve yenilenemeyen enerji kaynaklarının karma kullanımı ile elde edilen azalmalar 84

Tablo 4.7: Enerji girdilerinin değişimi ile elde edilen hassasiyet analizi sonuçları 88

Tablo 4.8: Ortak etki kategorilerinin farklı etki analizi metodları ile değerlendirmesi 90

Tablo 4.9: Monte Carlo metodu ile gerçekleştirilen belirsizlik analizi sonuçları 92

Tablo 4.10: Tesis yakınından alınan deniz suyu karakterizasyonu 93

Tablo 4.11: NF süzüntüsüne ait analiz sonuçları 93

Tablo 4.12: TO süzüntüsüne ait analiz sonuçları 94

Tablo 4.13: Deney düzeneğine ait etki analizi sonuçları ve tesis ile karşılaştırılması 96

Tablo 5.1: Tesise ait çalışma sonuçlarının literatür çalışmaları ile karşılaştırılması 99

Tablo 5.2: Tesise ait çalışma sonuçarının literatür çalışmaları ile yüzdesel karşılaştırılması 100

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
B	: Boron
Ba^{2+}	: Baryum
Br	: Bromür
C	: Karbon
$CaCl_2$	: Kalsiyum Klorür
$CaCO_3$	: Kalsiyum Karbonat
Ca^{2+}	: Kalsiyum
cm^2	: Santimetrekare
Cu	: Bakır
Cl^-	: Klorür
CO_2	: Karbondioksit
CO_3^{2-}	: Karbonat
Co-60	: Kobalt-60
Da	: Dalton
Dak.	: Dakika
F	: Florür
Fe^{2+}	: Demir
$FeCl_2$	: Demir (II) Klorür
$FeCl_3$	: Demir (III) Klorür
g	: Gram
HCO_3^-	: Bikarbonat
J	: Akı
kBq	: Kilobekerel
kg	: Kilogram
km	: Kilometre
K^+	: Potasyum
kWh	: Kilovat-saat
L	: Litre
Mg^{2+}	: Magnezyum
m^2	: Metrekare
m^3	: Metreküp

mm : Milimetre

mg : Miligram

mS : Milisiemens

N : Azot

NaCl : Sodyum Klorür

NaClO : Sodyum Hipoklorit

NH_4^+ : Amonyum

NO_x : Azot Oksitler

NO_3^- : Nitrat

NTU : Nephelometric Turbidity Unit
Nefelometrik Bulanıklık Birimi

Na^+ : Sodyum

$Na_2S_2O_5$: Sodyum metabisülfit

O_2 : Oksijen

P : Fosfor

ppm : Milyonda Parça

PO_4^{3-} : Fosfat

Si : Silikon

SiO_2 : Silisyum Oksit

SO_2 : Kükürt Dioksit

SO_4^{2-} : Sülfat

Sr^{2+} : Stronsiyum

µm : Mikrometre

$: Amerika Birleşik Devletleri Doları

Kısaltmalar	**Açıklama**
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AK	: Arazi Kullanımı
AKM	: Askıda Katı Madde
CFC	: Kloroflorokarbonlar
CFC-11	: Triklorofloremetan
CML	: Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden

ÇHF : Çözünmüş Hava Flotasyonu
DCEP : Deniz Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli
DSÖP : Deniz Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli
EDTA : Etilendiamintetraasetik Asit
EPA : Çevre Koruma Ajansı
EPFL : École Polytechnique Fédérale de Lausanne
Eşd. : Eşdeğer
FKK : Fosil Kaynak Kıtlığı
İO : İleri Osmoz
İPMOP : İnce Partikül Madde Oluşumu Potansiyeli
İRP : İyonlaşmış Radyasyon Potansiyeli
ISO : International Organization for Standardization
Uluslararası Standartlar Teşkilatı
KAP : Karasal Asidifikasyon Potansiyeli
KCEP : Kara Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli
KIP : Küresel Isınma Potansiyeli
MF : Mikrofiltrasyon
MKK : Mineral Kaynak Kıtlığı
MWCO : Molecular Weight Cutoff
Moleküler Ağırlık Kesme Değeri
NF : Nanofiltrasyon
OOP, İS : Ozon Oluşumu Potansiyeli, İnsan Sağlığı
OOP, KE : Ozon Oluşumu Potansiyeli, Karasal Ekosistemler
PA : Poliamid
PE : Polietilen
PES : Polisülfon
PM : Particulate Matter
: Partikül Madde
PP : Polipropilen
RIVM : Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
Ulusal Halk Sağlığı ve Çevre Enstitüsü (Hollanda)
SDİ : Silt Density İndex
Silt Yoğunluk İndeksi
SOTP : Stratosferik Ozon Tüketimi Potansiyeli

ST : Su Tüketimi
STPP : Sodyum Tripolifosfat
TÇM : Toplam Çözünmüş Madde
TFC : Thin Film Composite
İnce Film Kompozit
TMP : Transmembran Basıncı
TO : Ters Osmoz
TOK : Toplam Organik Karbon
TSCEP : Tatlı Su Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli
TSSÖP : Tatlı Su Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli
TÜİK : Türkiye İstatistik Kurumu
T-İS : Toksisite - İnsan Sağlığı
UF : Ultrafiltrasyon
WHO : Dünya Sağlık Örgütü
VOC : Volalite Organic Compound
: Uçucu Organik Bileşikler
YDA : Yaşam Döngüsü Analizi
YDE : Yaşam Döngüsü Envanter Analizi
YDEA : Yaşam Döngüsü Etki Analizi
1,4-DCB : 1,4-Diklorobenzen

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DENİZ SUYU DESALİNASYON TESİSLERİNDE YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ UYGULAMASI

Ali Berkant BALKIŞ

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışman : Prof. Dr. Yasemin KAYA

II. Danışman : Prof. Dr. İlda VERGİLİ

Bu tezde, Marmara Bölgesi'ndeki bir deniz suyu ters osmoz (TO) desalinasyon tesisinin ürettiği 1 m³ arıtılmış deniz suyunun çevresel etkileri kapıdan kapıya yaklaşımıyla Yaşam Döngüsü Analizi (YDA) metoduyla ortaya konmuş ve değerlendirilmiştir. Fonksiyonel birim olarak 1 m³ arıtılmış deniz suyu seçilmiştir ve sistem sınırı; ham deniz suyunun temini ile başlayıp ham deniz suyunun arıtım süreçleri ile ardından şebekeye dağıtımı ve son kullanıcıya ulaşması aşamalarını kapsamaktadır. Tesis verileri ile gerçekleştirilen YDA uygulaması dışında tesisinin su alma yapısına yakın noktadan alınan ham deniz suyu örneği laboratuvar ortamında analiz edilerek suyun karakteristiği belirlenmiştir. Suyun arıtılabilirliğini değerlendirmek amacıyla hem ters osmoz (TO) hem de nanofiltrasyon (NF) membranlarıyla arıtabilirlik çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen deneysel veriler, ticari bir proses tasarım yazılımı ile modellenmiştir ve deney sistemine ait yaşam döngüsü envanteri (YDE) oluşturulmuştur. Oluşturulan bu envanter, ReCiPe 2016 metodu ile YDA'ya tabi tutulmuş; elde edilen çevresel etki sonuçları, gerçek tesis verileri ile karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Analizler SimaPro 9.1.1.7 Educational sürümünde ReCiPe 2016 hesaplama metodu ile gerçekleştirilmiş; orta nokta kategorileri olarak; Küresel Isınma Potansiyeli (KIP), Stratosferik Ozon Tüketimi Potansiyeli (SOTP), İyonlaşmış Radyasyon Potansiyeli (İRP), Ozon Oluşumu Potansiyeli, İnsan Sağlığı, (OOP, İS) Ozon Oluşumu Potansiyeli, Karasal Ekosistemler (OOP, KE), Karasal Asidifikasyon Potansiyeli (KAP), İnce Partikül Madde Oluşumu Potansiyeli (İPMOP), Tatlı Su Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (TSSÖP), Deniz Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (DSÖP), Kara Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (KCEP), Tatlı Su Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (TSCEP), Deniz Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli

(DCEP), Toksisite–İnsan Sağlığı (T-İS (Kanser) / T-İS (Kanser Dışı)), Arazi Kullanımı (AK), Mineral Kaynak Kıtlığı (MKK), Fosil Kaynak Kıtlığı (FKK) ve Su Tüketimi (ST); son nokta kategorileri olarak da İnsan Sağlığı, Ekosistem ve Kaynaklar ele alınmıştır. Hassasiyet analizleri için IMPACT 2002+ ve CML-IA Baseline metodları, belirsizlik değerlendirmesi için ise Monte Carlo simülasyonu uygulanmıştır. Sonuçlar, tüm etki kategorilerinde enerji tüketimi nedeniyle TO prosesinin baskın katkı kaynağı olduğunu göstermiştir. Bu nedenle tesisin çevresel etkilerininin iyileştirilmesinde yenilenebilir ve yenilenemeyen enerji karışımları içeren iki alternatif senaryo modellenmiş; yenilenebilir kaynak kullanımının etki düzeylerinde ciddi azalmalar sağladığı, bu nedenle yüksek enerji gereksinimi kaynaklı emisyonların önüne geçmek için tesiste yenilenebilir enerjiye geçişin kaçınılmaz olduğu matematiksel olarak kanıtlanmıştır. Sonuç olarak, desalinasyon ile içme suyu üretiminde çevresel etkilerin azaltılması için enerji yoğun proseslerin enerji verimliliğinin artırılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişin hızlandırılması önerilmektedir.

Temmuz 2025 , 172. sayfa.

Anahtar kelimeler: ters osmoz, desalinasyon, yaşam döngüsü analizi, çevresel etki

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

APPLICATION OF LIFE CYCLE ASSESSMENT IN SEAWATER DESALINATION PLANTS

Ali Berkant BALKIŞ

Istanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Environmental Engineering

Environmental Engineering, Master's Program with Thesis

Supervisor : Prof. Dr. Yasemin KAYA

Co-Supervisor: Prof. Dr. İlda VERGİLİ

In this thesis, the environmental impacts of 1 m^3 treated seawater produced by a seawater reverse osmosis (RO) desalination plant in Marmara Region were revealed and evaluated using Life Cycle Analysis (LCA) method with a door-to-door approach. 1 m^3 treated seawater has been selected as the functional unit and system boundary includes the supply of raw seawater, treatment of seawater, distribution to the network and supply to the end user. In addition to the LCA application performed with the plant data, a raw seawater sample taken from a point close to the water intake structure of the treatment plant was analyzed in a laboratory to determine the characteristics of the water. In order to evaluate the treatibility of the water, treatibility studies were carried out with both reverse osmosis (RO) and nanofiltration (NF) membranes. The experimental data obtained from these studies were modeled with a commercial process design software and a life cycle inventory (LCI) of the experimental system was created. This inventory was modeled in SimaPro and analyzed with the ReCiPe 2016 method. The environmental impact results obtained were evaluated by comparing with the real plant data. Analyses were performed with ReCiPe2016 method in SimaPro9.1.1.7 Educational version; as midpoint categories; Global Warming Potential (GWP), Ozone Formation, Human Health (OF, HH), Ozone Formation, Terrestrial Ecosystems (OF, TE), Terrestrial Acidification Potential (TAP), Fine Particulate Matter Formation Potential (FPMFP), Freshwater Eutrophication Potential (FEP), Marine Eutrophication Potential (MEP), Terrestrial Ecotoxicity Potential (TEP), Freshwater Ecotoxicity Potential (FEP), Marine Ecotoxicity Potential (MEP), Human Carcinogenic Toxicity (HCT), Human Non-Carcinogenic Toxicity (HN-CT), Land Use (LU),

Mineral Resource Scarcity (MRS), Fossil Resource Scarcity (FRS), Water Consumption (WT); Human Health, Ecosystems and Resources were considered as endpoint categories. IMPACT2002+ and CML IA Baseline methods were applied for sensitivity analysis, and Monte Carlo simulation was applied for uncertainty analysis. The results showed that the RO process was the dominant contributor in all impact categories due to energy consumption. In order to improve the environmental impacts of the plant, two alternative scenarios with renewable and non-renewable energy were modeled; it was mathematically proven that the use of renewable resources provides significant reductions in impact levels, and therefore, in order to prevent emissions caused by high energy requirements, the transition to renewable energy in the plant is inevitable. As a result, it is recommended to increase the energy efficiency of energy-intensive processes and accelerate the transition to renewable energy sources in order to reduce environmental impacts in drinking water production by desalination.

July 2025, 172. pages.

Keywords: reverse osmosis, desalination, life cycle assessment, environmental impact

1. GİRİŞ

Deniz suyundan içme suyu elde etmek amaçlı kullanılan desalinasyon teknolojileri, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Ancak bu teknolojilerin uzun vadede kalıcı bir çözüm olabilmesi, çevresel olarak sürdürülebilir bir yapıya kavuşturulmalarını gerekli kılmaktadır. Aksi halde, hâlihazırda baskı altında bulunan küresel iklim sistemi üzerinde olumsuz etkilerin ortaya çıkması riski de söz konusu olacaktır. Desalinasyon tesislerinin çevresel etkilerinin tespit edilmesi ve izlenmesinin yanı sıra bu etkilerin azaltılmasına yönelik etkin politika araçları ve düzenleyici mekanizmaların geliştirilmesi kaçınılmaz bir gerekliliktir. Özellikle önümüzdeki yıllarda desalinasyon kapasitesinde öngörülen hızlı artış göz önünde bulundurulduğunda, bu gereksinim çok daha kritik bir önem kazanmaktadır (Ahmed ve diğ., 2021; Ayaz ve diğ., 2022).

Ters osmoz (TO) teknolojisi, günümüzde deniz suyunun desalinasyonu amaçlı en yaygın kullanılan prosestir ve küresel mevcut kapasitenin yaklaşık %69'unu oluşturmaktadır (Eke ve diğ., 2020). Dünya genelinde hâlihazırda faaliyette olan 16.876 desalinasyon tesisinin 14.365'i TO teknolojisi ile faaliyet göstermektedir. Bu durum, TO'nun toplam desalinasyon tesis sayısının %85'ine karşılık geldiğini göstermektedir. Ayrıca, kurulum aşamasında bulunan 270 tesisin %91'i yine TO sistemi ile inşa edilmektedir. Bu veriler, TO teknolojisinin sektördeki liderliğini açıkça ortaya koymaktadır (Eke ve diğ., 2020). Bu sistemlerin yaygınlaşmasında, özellikle membran teknolojilerindeki ilerlemeler ile enerji geri kazanım sistemlerindeki geliştirme ve iyileştirme süreçleri etkili olmuştur. Ancak enerji verimliliği alanındaki bu iyileştirmelere rağmen, deniz suyu desalinasyon tesisleri halen yüksek enerji gereksinimi ile işletilmektedir ve birim su üretim maliyetinin önemli bir kısmı enerji tüketimine dayanmaktadır. Deniz suyu desalinasyon tesislerinin enerji tüketimi 2.5 ila 4 kWh/m³ arasında değişmektedir ve bu değer, konvansiyonel yüzey suyu arıtma sistemlerine kıyasla yaklaşık 8 ila 10 kat daha fazladır (Kim ve diğ., 2019; Eke ve diğ., 2020).

Yüksek enerji gereksinimi, çoğunlukla fosil yakıt kullanımıyla karşılandığı için deniz suyu desalinasyon tesisleri sera gazı emisyonlarında artışa neden olmaktadır. Bu durum desalinasyon tesislerini iklim değişikliği konusunda tartışmalı bir konuma getirmektedir. Desalinasyon

tesislerinin verimliliğine bağlı olarak 1,000 m³ deniz suyunun arıtımı, 0,4 ila 6,7 ton arasında (CO_2 eşdeğerinde) salımına yol açabilmektedir (Ayaz ve diğ., 2022). Küresel ölçekte, yalnızca fosil yakıtla çalışan desalinasyon tesislerinden kaynaklanan yıllık karbon emisyonlarının 2020 yılı itibarıyla yaklaşık 76 milyon tona (CO_2 eşdeğerinde) ulaştığı ve mevcut uygulamaların bu şekilde devam etmesi durumunda bu miktarın 2040 yılına kadar 218 milyon tona (CO_2 eşdeğerinde) çıkabileceği öngörülmektedir (Ayaz ve diğ., 2022). Deniz suyu desalinasyon tesislerinin bir diğer çevresel zorluğu ise süreç sonunda ortaya çıkan yoğun tuzlu atık (konsantre) akımının bertaraf edilmesidir. Konsantre deşarjları, yüksek tuzluluğa ve yüksek sıcaklığa sahip olması nedeniyle deniz ekosistemlerinde termal şok, çözünmüş oksijen seviyelerinde azalma ve lokal toksisite gibi çeşitli çevresel sorunlara neden olmaktadır (Shemer ve Semiat, 2017; Missimer ve Maliva, 2018). Planlı ve kontrollü deşarj sistemleri uygulanmadığında konsantrenin olumsuz bir şekilde etkilediği alanın onlarca metreye kadar yayıldığını ve bu bölgelerde deniz canlılarının çeşitliliğinde ciddi azalmalar gözlemlendiğini rapor edilmiştir (Missimer ve Maliva, 2018) Bu bağlamda, deniz suyu desalinasyon sistemlerinin çevresel sürdürülebilirliğinin sağlanabilmesi için yalnızca teknolojik gelişmeler değil, aynı zamanda enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi, atık yönetim stratejileri ve çevre dostu politikaların sistematik olarak entegre edilmesi de büyük önem taşımaktadır (Eke ve diğ., 2020; Ayaz ve diğ., 2022).

Yaşam Döngüsü Analizi (YDA), bir ürün ya da sürecin hammadde çıkarımından başlayarak üretim, kullanım ve nihai bertarafına kadar uzanan tüm aşamalarını çevresel etkiler açısından değerlendiren sistematik bir yöntemdir. Bu analiz, özellikle enerji tüketimi, sera gazı emisyonları ve doğal kaynak kullanımı gibi çevresel etkileri nicel olarak ortaya koyarak, sürdürülebilirlik değerlendirmelerinde önemli bir karar destek aracı haline gelmiştir (International Organization for Standardization [ISO], 2006). Literatürde içme suyu amaçlı deniz suyu arıtımı üzerine yapılan YDA çalışmaları genellikle sistemin bütününü kapsamaktadır ve farklı süreç bileşenlerinin çevresel performansını karşılaştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Özellikle ön arıtma teknolojileri (konvansiyonel ön arıtma ve membran ön arıtma sistemleri), farklı TO sistemi konfigürasyonları (tek kademeli, çift kademeli ve farklı tipte enerji geri kazanım sistemli), farklı su alma yapıları (yüzeysel ve yüzey altı su alma yapıları) ve konsantre bertaraf sistemleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş, bu sistemlerin toplam enerji tüketimine ve emisyon profiline katkıları analiz edilmiştir (Aziz ve Hanafiah, 2021; Lee ve Jepson, 2021).

Türkiye'de deniz suyu TO desalinasyon sistemlerine yönelik çevresel etkileri kapsamlı bir şekilde değerlendiren YDA odaklı bir çalışma bilgimiz dahilinde bulunmamaktadır. Literatürdeki mevcut çalışmalar genellikle teknik ve ekonomik değerlendirmelere odaklanmıştır. Dolayısıyla, bu alanda yapılacak bir çalışma, Türkiye'de bir ilk olma özelliği taşıyacak ve literatüre önemli bir katkı sağlayacaktır. Bu tez çalışmasında Türkiye'de bulunan deniz suyundan içme suyu üreten bir desalinasyon tesisinin çevresel etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Tesisin ürettiği 1 m^3 arıtılmış deniz suyunun temini, arıtımı ve dağıtım aşamalarının çevresel etkileri YDA metodolojisi ile ortaya konulmuştur. Ayrıca, çevresel etkileri azaltmaya yönelik alternatif senaryolar oluşturulmuş ve mevcut durum ile karşılaştırılmıştır.

YDA çalışması, SimaPro yazılımının 9.1.1.7 Educational sürümü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deniz suyu desalinasyon tesisinin deniz suyunu arıtmak için gerçekleştirdiği operasyonel faaliyetler esas alınarak envanter verileri oluşturulmuştur. Deniz suyunun temini, arıtımı, arıtım için gerekli materyal ve enerji girdileri ve girdilerin taşınımı, arıtılan deniz suyunun dağıtımı ve tüm faaliyetler sonucu oluşan atıkların bertarafı ve taşınımı operasyonel faaliyetlere dahil edilmiştir. Tesisin inşaası ve yıkımı çalışma kapsamının dışında tutulmuştur. Envanter verileri SimaPro yazılımının "Ecoinvent 3" kütüphanesi aracılığı ile yazılıma modellenmiştir. Etki analizi aşamasında ise potansiyel çevresel etkiler ReCiPe 2016 V1.04" ile başta olmak üzere "IMPACT 2002+" ve "CML-IA Baseline V3.06" etki yazılımları kullanılarak hesaplanmıştır. "IMPACT 2002+" ve "CML-IA Baseline V3.06" metodları hassasiyet analizi için uygulanan metodlar olup potansiyel çevresel etkileri veriler halinde sunulmamıştır. Orta nokta ve son nokta yaklaşımı olarak; ReCiPe 2016 V1.04 ve IMPACT 2002+ ile orta ve son nokta, CML-IA Baseline ile orta nokta analizleri gerçekleştirilmiştir.

ReCiPe 2016 V1.04 etki analizi metodu ile *Küresel Isınma Potansiyeli (KIP), Stratosferik Ozon Tüketimi Potansiyeli (SOTP), İyonlaşmış Radyasyon Potansiyeli (İRP), Ozon Oluşumu Potansiyeli, İnsan Sağlığı (OOP, İS), Ozon Oluşumu Potansiyeli, Karasal Ekosistemler (OOP, KE), Karasal Asidifikasyon Potansiyeli (KAP), İnce Partikül Madde Oluşumu Potansiyeli (İPMOP), Tatlı Su Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (TSSÖP), Deniz Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (DSÖP), Kara Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (KCEP), Tatlı Su Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (TSCEP), Deniz Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (DCEP), Toksisite- İnsan Sağlığı (T-İS (Kanser)), Toksisite - İnsan Sağlığı (T-İS (Kanser Dışı)), Arazi*

Kullanımı (AK), Mineral Kaynak Kıtlığı (MKK), Fosil Kaynak Kıtlığı (FKK), Su Tüketimi (ST). Son nokta için ise 3 etki kategorisi dikkate alınmıştır: *İnsan Sağlığı, Ekosistem, Kaynaklar.*

Çalışma kapsamında bir dizi aşamalar oluşturulmuş ve bu taslağa bağlı kalınmıştır. Sırasıyla çalışma kapsamında şu yol izlenmiştir: İlk aşamada, 1 m^3 arıtılmış deniz suyu (fonksiyonel birim) üretiminin kapıdan kapıya süreci için gerçekleşen çevresel etkiler ortaya konmuştur. Ardından çevresel etkilerin iyileştirilmesi amacıyla farklı tipte enerji kaynakları kullanımı çerçevesinde alternatif senaryolar oluşturulmuş ve mevcut süreçteki değişimler incelenmiştir. Son olarak çalışmanın güvenirliğinin ortaya konması amacıyla (i) hassasiyet analizleri yapılmış ve (ii) "Monte Carlo Simulasyonu" uygulanmıştır. Ek olarak laboratuvar çalışması ile elde edilen sistem çalışma parametreleri DuPont firmasına ait "WAVE Water Treatment Design Software" adlı programa aktarılarak, laboratuvar deney sistemi ile işletilen bir tesis tasarlanmıştır. Tasarlanan tesis verileri mevcut çalışma ile karşılaştırılmak üzere bir YDA çalışmasında modellenmiştir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Su ve enerji, ekonomik, sosyal ve kültürel kalkınma için temel kaynaklardır. Bu kaynaklar uzun süre boyunca sınırsız varsayılmıştır. Ancak nüfus artışı ve sanayi devriminin getirdiği gelişmelerle birlikte bu kaynaklara olan talep artmış ve kıtlık günümüzde yadsınamaz bir gerçeklik haline gelmiştir.

Küresel su rezervlerinin yalnızca %2,5'i tatlı su olup geri kalanı tuzlu sudur. Bu %2,5'lik kısmın büyük bölümü kutup bölgelerinde donmuş halde bulunmaktadır ve yaklaşık %30'u ise ulaşılması güç yer altı akiferlerinde yer almaktadır. Sonuç olarak, dünya üzerindeki toplam suyun yalnızca %0,007'si doğrudan kullanılabilir durumdadır. Ne yazık ki, bu sınırlı miktardaki suyun bir kısmı da sanayi tesisleri, madencilik, petrol ve doğalgaz arama faaliyetleri ve tarımda kullanılan gübre ve pestisit kalıntıları nedeniyle kirlenmiştir (Le ve Nunes, 2016). Ayrıca suyun yeryüzündeki dengesiz dağılımı, bazı bölgelerde su kıtlığını daha da şiddetlendirmektedir. Bu bağlamda, su güvenliği için içme suyu amaçlı desalinasyon tesislerinin kurulması su geri kazanımı büyük önem taşımaktadır. Özellikle kurak bölgelerde deniz suyu desalinasyonu yaşamın devamı için temel destek unsurlarından biridir (Le ve Nunes, 2016).

Membran teknolojileri, su ve enerji sürdürülebilirliğinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu teknolojilerin bazıları birçok endüstride geniş çapta uygulanmakta olup ve su ve enerji kıtlığına çözüm sunmanın yanı sıra çevresel etkiler, arazi kullanımı, kullanım kolaylığı ve uyarlanabilirliği açısından da sürdürülebilirlik kriterlerini karşılamaktadır. Bu noktada, membran teknolojilerinin ve diğer su-enerji çözümlerinin sürdürebilirliğinin devamlılığı, çevresel etkilerinin izlenmesi veya farklı senaryolar altında nasıl performans gösterdiğinin değerlendirmesi yaşam döngüsü analizi (YDA) ile ortaya konabilmektedir. Örneğin, sistemin farklı enerji kaynaklarıyla çalıştırılması ya da çeşitli su alma yapılarının kullanılması, enerji tüketimi, emisyonlar ve malzeme kullanımı gibi birçok etkide değişiklik yaratmaktadır. YDA bu tür değişkenlerin sistem üzerindeki etkisini bütüncül biçimde analiz ederek teknolojilerin kararlılığı, sürdürülebilirliği ve iyileştirme potansiyeli hakkında somut veriler ortaya koymaktadır. Bu yönüyle YDA, teknolojik unsurların sadece bugünü değil, gelecektekti uzun vadeli etkilerinin de gözetilmesi ile sürdürebilir kararlar alınmasına olanak sunmaktadır.

Bu bağlamda, YDA'nın sistemler arası karşılaştırma, senaryo analizi ve çevresel etki optimizasyonu gibi yetkinliklerinden yararlanmak amacıyla, bir ters ozmoz desalinasyon tesisinde üretilen 1 m³ içme suyu için yaşam döngüsü analizi gerçekleştirilmiştir.

2.1. DENİZ SUYU

Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Çevre Koruma Ajansı (EPA) "Safe Drinking Water Act" yasası kapsamında, TO sisteminden elde edilen içme suyu için belirli maksimum değerler tanımlamıştır. Yasaya göre bu değerler; toplam çözünmüş katı madde (TÇM) konsantrasyonu 300–500 mg/L, klorür konsantrasyonu 150–240 mg/L ve sodyum konsantrasyonu 90–180 mg/L olarak belirtilmiştir. Belirtilen TÇM seviyesi, içme suyu (tatlı su) sınıflandırması için bir eşik değeri olarak kullanılmaktadır (Zaidi ve Saleem, 2022a).

Genel olarak, TÇM konsantrasyonu 1000–15.000 mg/L arasında olan sular acı su olarak adlandırılmaktadır. 15.000 ppm'den yüksek TÇM içeren doğal su kaynakları ise deniz suyu kategorisine girmektedir. Küresel ölçekte en yaygın su kaynağı olan deniz suyu, ortalama 35000 ppm TÇM içeriğine sahiptir. Ancak, coğrafi konuma bağlı olarak deniz suyunun TÇM içerikleri değişkenlik gösterebilmektedir (Tablo 2.1). TÇM konsantrasyonu Baltık Denizi'nde yaklaşık 8.000 ppm iken Arap Körfezi'nde 50.000 ppm'e kadar çıkabilmektedir (Zaidi ve Saleem, 2022a).

Tablo 2.1: Farklı deniz ve okyanusların ortalama toplam çözünmüş katı madde (TÇM) değerleri (Zaidi ve Saleem, 2022a).

Deniz veya Okyanus	**TÇM (ppm)**
Baltık Denizi	8.000
Hazar Denizi	13.500
Pasifik Okyanusu	33.600
Hint Okyanusu	33.800
Atlantik Okyanusu	37.000
Kızıl Deniz	43.000
Basra Körfezi	50.000
Lut Gölü	260.000

Deniz suyu bileşimi genel olarak dünya çapında benzer bir bileşime sahip olup (Tablo 2.2) deniz suyunda en çok bulunan altı iyon şunlardır: klorür (Cl^-), sodyum (Na^+), sülfat (SO_4^{2-}), magnezyum (Mg^{2+}), kalsiyum (Ca^{2+}) ve potasyum (K^+) (Zaidi ve Saleem, 2022a).

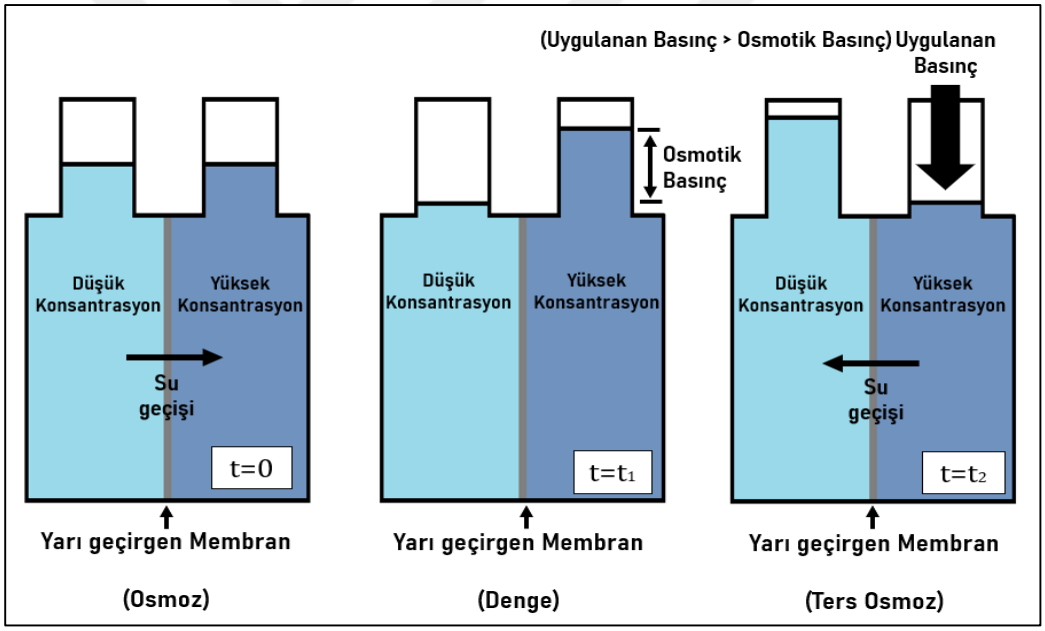
Tablo 2.2: Standart deniz suyu bileşimi (Zaidi ve Saleem, 2022a).

No	**İyon**	**Konsantrasyon (ppm)**
1	Klorür (Cl^-)	19.700
2	Sodyum (Na)	10.900
3	Sülfat (SO_4^{2-})	2.700
4	Magnezyum (Mg)	1.310
5	Kalsiyum (Ca)	412
6	Potasyum (K)	390
7	Bikarbonat (HCO_3^-)	150
8	Bromür (Br)	65
9	Karbon (C)	28
10	Azot (N)	11,5
11	Stronsiyum (Sr)	8,6
12	Oksijen (O_2)	4,4
13	Boron (B)	2
14	Silikon (Si)	1,4
15	Florür (F)	1,3

Deniz suyu, içerdiği yüksek tuz miktarı nedeniyle tatlı suya kıyasla daha yüksek viskoziteye sahiptir. Aynı zamanda, tuz konsantrasyonu arttıkça yoğunluğu artarken, sıcaklık yükseldikçe yoğunluğu azalmaktadır. Bununla birlikte, kıyı kuyuları ve galerilerinden elde edilen suyun tuz içeriği ve kimyasal bileşimi, bulunduğu bölgedeki toprak yapısı, yeraltı su akışı ve diğer etkenlere bağlı olarak deniz suyundan farklılık gösterebilmektedir (Zaidi ve Saleem, 2022a).

2.2. TERS OSMOZ (TO)

Ters osmoz (TO) prosesinin taşınım mekanizması çözünme/difüzyon olup, yoğun aktif yüzeye sahip yarı geçirgen membranlar aracılığı ile tuz ve küçük organik moleküllerin giderimi için kullanılmaktadır. Doğal koşullarda yarı geçirgen bir membranda gerçekleşen osmotik taşınım olayını anlamak, TO mekanizmasının kavranması için birincil önceliktir (Hasar ve diğ., 2018).



Şekil 2.1: Osmoz ve ters osmoz (TO) prosesinin görsel ifadesi (Hasar ve diğ., 2018).

Şekil 2.1'de görüldüğü üzere t=0 anında düşük konsantrasyona sahip tuzlu çözelti ile yüksek konsantrasyona sahip tuzlu çözelti, yarı geçirgen bir membran ile ayrıldığı zaman su her iki tarafta da konsantrasyon dengeye ulaşıncaya kadar düşük konsantrasyona sahip çözeltiden yüksek konsantrasyona sahip çözeltiye doğru geçiş yapacaktır. Yarı geçirgen membran çözünmüş maddelerin geçişine izin vermediği için yüksek konsantrasyona sahip çözeltideki su miktarı artacak ve bu durum su seviyesini yükseltecektir ($t=t_1$). Su seviyelerindeki fark "osmotik basınç" ve bu olay "osmoz" olarak ifade edilmektedir (Hasar ve diğ., 2018).

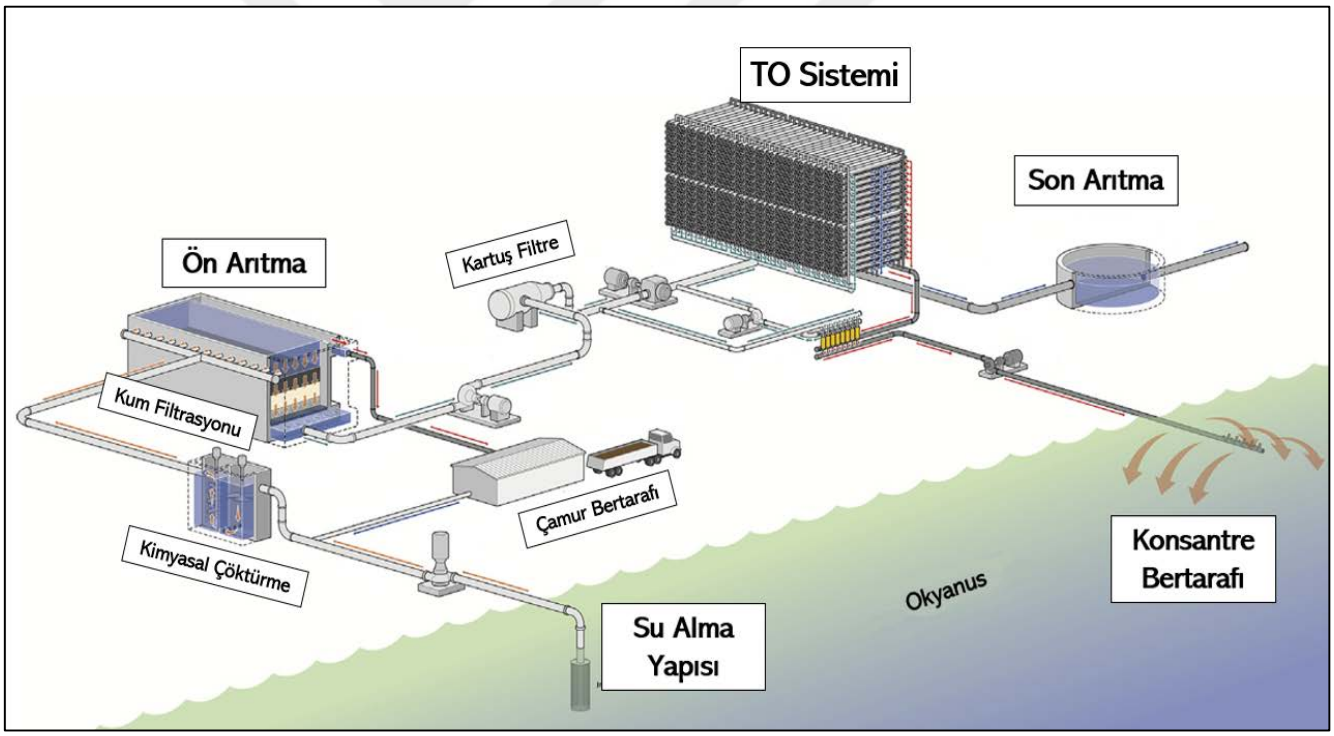
Suların ve atıksuların arıtımında, içinde sayısız istenmeyen iyon ve molekül bulunan yüksek konsantrasyona sahip suların seyrelmesi elbette ki amaç olamaz. Bunun için konsantre çözelti tarafına osmotik basıncı aşacak miktarda bir basınç uygulanarak su membrandan filtrelenebilir. Osmotik basınçtan daha yüksek bir basıncın uygulanmasıyla su, yüksek konsantrasyonlu çözeltiden düşük konsantrasyonlu çözeltiye doğru geçmeye başlayacak ($t=t_2$) ve tuzlu çözeltiyi, çözünmüş maddelerden arındırarak temiz su hacmini arttıracaktır. Bu olay, osmoz olayının tersi olduğundan bu proses "Ters Osmoz (TO)" olarak adlandırılmıştır (Şekil 2.1) (Hasar ve diğ. 2018).

2.3. TERS OSMOZ (TO) DESALİNASYON TESİSLERİ

Desalinasyon, Dünya'da kısıtlı su rezervine sahip birçok bölgede içme suyu sağlamak için kullanılan bir çözüm olarak kabul edilmektedir (Hasar ve diğ., 2018; Kurihara, 2021). 1960'lı yılların başında destilasyon ve membran prosesleri temel esaslı deniz suyu desalinasyon sistemleri üzerine araştırma ve geliştirme çalışmaları yürütmüştür. Destilasyon prosesi, 1970'li yıllardan 2010 yıllarına kadar desalinasyon tesislerinde aktif olarak kullanılan önemli bir teknoloji olmuştur ancak 2010 yılından itibaren membran bazlı desalinasyon prosesi sektörde önemli bir teknoloji haline gelmiştir ve destilasyon prosleri yerini TO proseslerine bırakmış ve böylelikle membran teknolojilerine geçiş olmuştur (Kurihara, 2021). TO teknolojisi hem deniz suyu hem de acı suyun arıtılması için yaygın olarak kullanılan bir prosestir ve su kaynaklarının sınırlı olduğu kıyı bölgelerin çoğunda halihazırda mevcuttur ve kullanılmaktadır (Hasar ve diğ., 2018).

Uygun bir şekilde tasarlanmış ve doğru bir şekilde işletilen bir TO sistemi (Şekil 2.2), uzun süre sorunsuz bir şekilde işletilebilmektedir. Tasarım ve işletim sırasında yapılan hatalar sistemdeki membran performansı ve membran ömründe önemli kayıplara yol açabilmektedir. TO sistemleri; membran modülü, modül kabı ve yüksek basınçlı pompadan oluşmaktadır. Ayrıca sistem, istenen süzüntü kalitesinin elde edilebilmesi amacıyla bir ön arıtma prosesi veya son arıtma prosesi dahil edilerek konfigüre edilebilmektedir (Hasar ve diğ., 2018).

Diğer tüm doğal su kaynakları gibi deniz suyu da askıda ve çözünmüş olarak iki formda katı içermektedir. Günümüzde işletilen hemen hemen tüm TO desalinasyon tesisleri, besleme suyundan askıda katı madde (AKM) ve toplam çözünmüş katı madde (TÇM)'yi gidermek için tasarlanmış iki temel arıtma basamağını bünyesinde barındırmaktadır. İlk basamağın yani ön arıtmanın asıl amacı; AKM ve TÇM'nin giderilmesidir. TO membranlarında AKM ve TÇM'nin katı forma dönüşüp çökelmesinin önlenmesi ve TO membranlarının kirlenmesinin en aza indirgenmesi, ön arıtmanın performansına ve niteliğine doğrudan bağlıdır. İkinci basamak olan tuzun TO membranları ile tutularak sudan arıtılması da tamamlandıktan sonra, TO sistemi tarafından üretilen tatlı su, korozyon ve insani tüketime uygunluk standartlarını sağlamak için son arıtma işlemine tabi tutulmakta ve nihai kullanım için şebekeye verilmeden önce dezenfeksiyonu sağlanmaktadır. TO desalinasyon tesisleri için arıtma işleminin bu basamağı ise son arıtma olarak tanımlanmaktadır (Voutchkov, 2013a; Zaidi ve Saleem, 2022b)



Şekil 2.2: Konvansiyonel ters osmoz (TO) desalinasyon tesisi akım şeması (Zaidi ve Saleem, 2022b).

2.3.1. Su Alma Yapıları

TO deniz suyu desalinasyon sistemleri için, su alma yapılarının tasarımı ve yerleşimi, ön arıtma sistemlerinin arıtma veriminde ve performansında oldukça önemlidir (Henthorne ve Boysen, 2015).

Tipik olarak iki tür su alma yapısı bulunmakta olup bunlar; yüzeysel (açık) ve yüzey altı (yer altı suyu, kuyu tipi) su alma yapılarıdır. Yüzeysel su alma yapıları besleme suyunu doğrudan okyanus veya deniz gibi bir yüzey suyundan, kara veya açık deniz giriş yapısı ve bu yapıyı tesise bağlayan iletim hatları vasıtası ile toplamaktadır. Bu tip su alma yapıları ile temin edilen besleme suyu genellikle katı birikintiler, kaba ve ince katılar, silt ve besleme suyunun ön arıtımını daha maliyetli ve güç kılan balık, alg ve bakteri gibi organizmaları içermektedir (Voutchkov, 2017a). Yüzey altı su alma yapıları, TO desalinasyon tesisleri için besleme suyu elde etmek üzere acı yeraltı suyu akiferine veya tuzlu kıyı akiferine konumlandırılır. Yüzey altı su alma yapılarının yeraltı akiferlerine konumlandırılması, acı suyun ve deniz suyun bu akiferlere girişi sayesinde doğal bir şekilde filtre edilmekte ve bir bakıma arıtımını da sağlamaktadır (Voutchkov, 2017a).

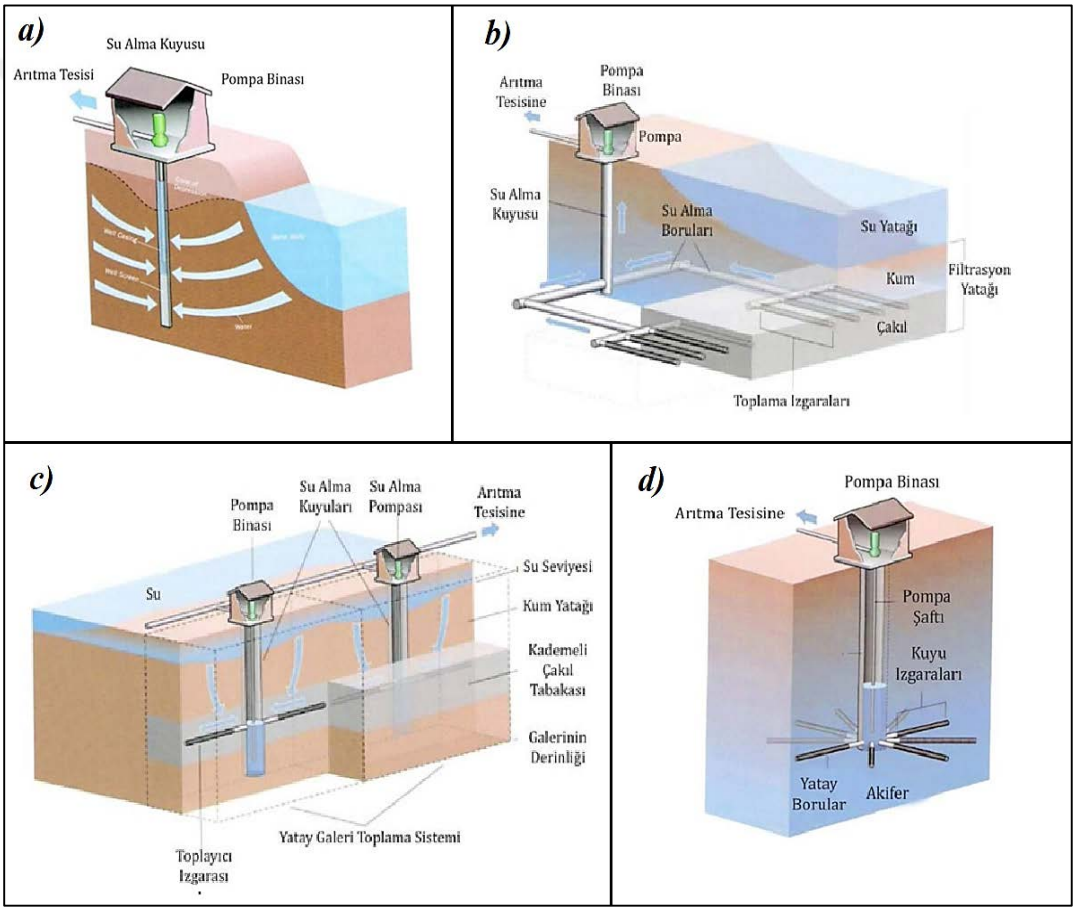
Özellikle yüzey altı su alma yapıları ile elde edilen besleme sularında alg, bakteri ve toplam organik karbon (TOK) miktarlarında önemli miktarlarda düşüş görülmektedir. Ayrıca TO sistemlerinde organik kirlenmenin temel bileşenleri olan biyopolimerler ve polisakkaritler gibi kirleticiler TO yüzey altı su alma yapıları ile neredeyse tamamen giderilmektedir. Ancak, yüzey altı su alma yapılarının besleme suyu debilerinin düşük olması sebebiyle yüksek kapasiteli TO deniz suyu desalinasyon tesislerinde genellikle yüzeysel su alma yapıları tercih edilmektedir (Henthorne ve Boysen, 2015). Sonuç olarak, besleme suyu temininde yüzey altı su alma yapıları ile temin edilen besleme suyunun ön arıtma ihtiyacı, yüzeysel su alma yapıları ile temin edilen besleme suyuna göre daha azdır (Voutchkov, 2017a).

2.3.1.1. Yüzeyaltı Su Alma Yapıları

Yüzey altı su alma yapıları, TO acı su desalinasyon tesisleri başta olmak üzere küçük ve orta büyüklükteki deniz suyu arıtma tesisleri için yaygın olarak tercih edilen su alma yapısı konfigürasyonudur (Voutchkov, 2017a; Koyuncu ve diğ., 2018) TO deniz suyu desalinasyon tesislerinin yüzey altı su alma yapıları, besleme suyunu kıyıya yakın tuzlu bir akiferden ve/veya okyanus tabanının altındaki açık deniz akiferinden toplamaktadır. Kıyı akiferlerinde tuzluluk; kıyı akiferlerine hidrolik olarak bağlı tatlı veya acı su akiferlerinin su seviyesi veya tuzluluğundaki değişiklikler ve okyanus sularının gelgit hareketleri sonucunda değişmektedir. Böylelikle kıyı akiferleri açık okyanus suyundan daha düşük TÇM konsantrasyonuna sahip bir tuzlu su kaynağı haline gelmektedir (Voutchkov, 2017a).

Yüzey altı su alma yapısına sahip TO deniz suyu desalinasyon tesisleri, dünya çapında tüm TO desalinasyon tesislerinin yalnızca %10'unu oluşturmaktadır. Kıyı akiferinden temin

edilebilir sürdürülebilir su hacmi sınırlı olduğundan dolayı TO desalinasyon tesisleri yüzeysel su alma yapılarını tercih etmektedir. Jeolojik formasyonun (akifer) verimi, akifer yatağının kalınlığı ve deniz kenarındaki kuyudan çekilecek suyun kalitesini etkileyen diğer yakın tatlı su kaynakları gibi faktörler ve özellikle orta ve yüksek kapasiteli TO desalinasyon tesisleri için projelenen yüzey altı su alma yapılarının yapım süreçlerinin karmaşıklığı ve kurulum maliyetlerinden dolayı büyük kapasiteli deniz suyu arıtan TO sistemleri daha çok açık su alma yapılarını tercih etmektedir (Voutchkov, 2017a; Koyuncu ve diğ., 2018). Yüzey altı su alma yapıları; dikey kuyular, deniz tabanı filtrasyon sistemleri, infiltrasyon galerileri ve yatay kollektörlü su alma kuyuları olarak sıralanmaktadır (Şekil 2.3) (Koyuncu ve diğ., 2018).



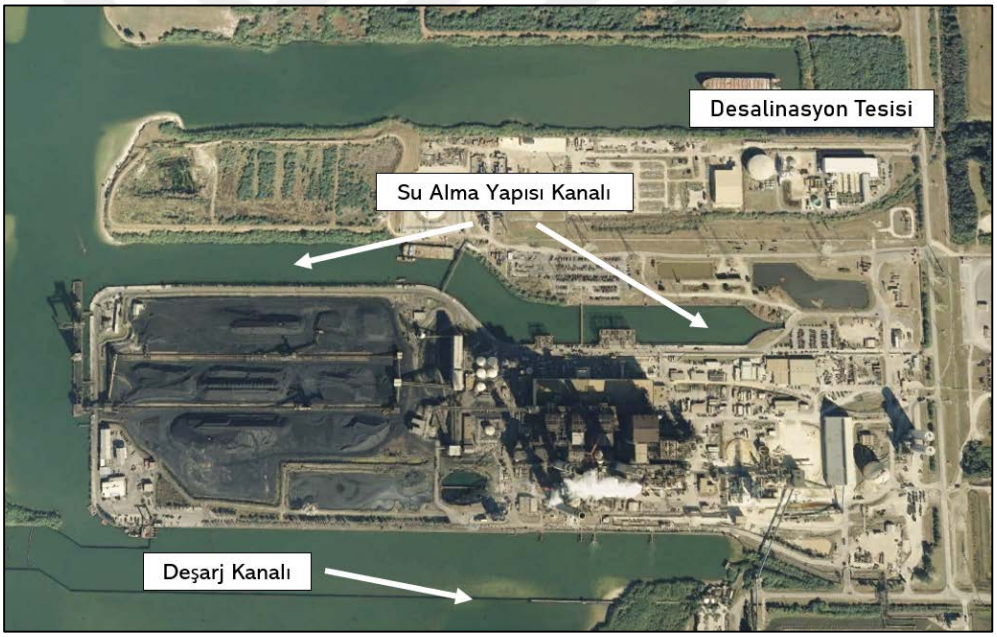
Şekil 2.3: Yüzeyaltı su alma yapılarının gösterimi (a) dikey kuyular, b) deniz tabanı filtrasyon sistemleri c) infiltrasyon galerileri, d) yatay kollektörlü su alma kuyuları) (Koyuncu ve diğ., 2018).

2.3.1.2. Yüzeysel Su Alma Yapıları

Yüzeysel su alma yapıları genellikle konumlarına göre sınıflandırılmakta olup kıyı üstünde (kıyıda) ve kıyıdan uzak (açık denizde) olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Kıyı üstünde bulunan yüzeysel su alma yapılarının giriş yapısı ham su kütlesinin kıyısına inşa edilirken, açık

deniz su alma yapılarının giriş yapısı genellikle kıyı şeridinden birkaç yüz ila birkaç bin metre uzakta bulunmaktadır (Voutchkov, 2017a).

Günümüzde kıyı üstünde bulunan yüzeysel su alma yapıları genellikle yüksek kapasiteye sahip deniz suyu desalinasyon tesisleri için tercih edilmektedir. Rüzgar ve dalga rejimleri, kıyıdaki su seviyesinde meydana gelen değişimler, gelgit rejimi ve kıyı akıntıları; kıyı üstünde bulunan yüzeysel su alma yapılarının uygulanabilirliği ve su kalitesiyle ilişkili esas faktörleri oluşturmaktadır. Düşük eğime sahip kumlu kıyı bölgelerinde kıyı üstünde bulunan yüzeysel su alma yapıları çoğunlukla çevresel faktörlerin etkisini azaltmak için kenarlarında beton uzun setler bulunan girişler halinde inşa edilmektedir. Kayalık kıyı bölgelerinde ise kıyı üstünde bulunan su alma yapıları; çoğunlukla dış etkilerden korunmak amacıyla dalga kıran gibi korunma unsurları içeren, doğrudan su kütlesine açık beton veya metal yapılardır (Şekil 2.4) (Voutchkov, 2017a).



Şekil 2.4: Amerika Birleşik Devletleri, Florida, Tampa Bay Desalinasyon Tesisi yüzeysel su alma yapısı gösterimi (Voutchkov, 2013b).

Yüksek kaliteli su kaynağı sağlanabilmesi için su alma yapılarının, okyanus tabanının en az 20 metre veya daha derin olduğu bölgelerde bulunması gerekmektedir. Bu nedenle, su alma yapıları genellikle 20 metre veya daha fazla derinliğe sahip okyanus tabanına yerleştirilmektedir. Açık deniz yüzeysel su alma yapıları; açık deniz alım yapısı, iletim hatları, ince ve kaba ızgaralar, pompa ünitesi, elektrik ve kontrol üniteleri ve kimyasal dozaj ünitesi vb. birçok yapıyı bünyesinde barındırmaktadır (Voutchkov, 2017a).

2.3.2. Ön Arıtma

Ön arıtma, kirleticileri gidermek, geri kazanımı ve sistem verimini optimize etmek ve membran ömrünü uzatmak için TO membran sisteminden önce tuzlu su kaynağına uygulanan kimyasal ve fiziksel arıtma proseslerini içermektedir. Kimyasal ön arıtma prosesleri; dezenfektanların, yumaklaştırıcıların, pıhtılaştırıcıların ve kireç önleyicilerin kullanılması ile uygulanmaktadır. Fiziksel ön arıtma prosesleri ise kartuş filtre, çöktürme, kum filtrasyonu ve membran filtrasyonu gibi mekanik filtrasyon proseslerini içermektedir (Zaidi ve Saleem, 2022b).

Konvansiyonel TO deniz suyu desalinasyon tesislerinin büyük bir bölümü; kimyasal ilavesi, kum filtrasyonu ve ardından kartuş filtrasyonu gibi fiziksel ve kimyasal ön arıtma proseslerini içeren ön arıtma sistemleri ile tasarlanmakta ve işletilmektedir. Konvansiyonel ön arıtma sistemleri genellikle koagülasyon, flokülasyon, çöktürme, ve algleri ve kolloidal parçacıkları mekanik olarak gidermek için filtrasyon içeren kimyasal ve fiziksel ön arıtma proseslerini içermektedir. Besleme suyu kalitesindeki bozulma ve membran ön arıtma maliyetlerinin iyileştirilmesi, güncel TO deniz suyu desalinasyon tesisleri için mikrofiltrasyon (MF) ve ultrafiltrasyon (UF) membran arıtım proseslerini konvansiyonel ön arıtma sistemlerine göre öncelikli bir seçenek kılmaktadır (Tablo 2.3) (Zaidi ve Saleem, 2022b).

TO deniz suyu desalinasyon sistemleri söz konusu olduğunda silt yoğunluk indeksi (SDI), ham su akışındaki kirlilik yükünün karakterizasyonu için en önemli parametredir. Membran üreticileri, membran modülünde yüksek basınç kaybını önlemek, membran sisteminin stabil çalışmasını sağlamak ve membran kirlenmesinin önüne geçmek için TO besleme suyunun SDI değerinin 3,0'dan düşük olmasını önermektedir. Verimsiz bir ön arıtma sistemi, TO membranlarının sık sık temizlenmesine, membran kirlenme oranlarının artmasına, membran ömrünün azalmasına, daha düşük geri kazanım oranına, zayıf ürün kalitesine ve yüksek işletme basınçlarına neden olmaktadır. Tüm bu faktörler işletme maliyeti üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olmaktadır (Zaidi ve Saleem, 2022b).

2.3.2.1. Kimyasal Ön Arıtma

Ham deniz suyunun membranın kirlenmesini azaltmak için, TO prosesinden önce suyun farklı kimyasallar kullanılarak şartlandırılması gerekmektedir. Koagülantlar (pıhtılaştırıcılar), yumaklaştırıcılar, kireç önleyiciler (antiskalant), oksidanlar (klor dioksit, klorür), pH ayarlayıcılar (asit ve bazlar) ve indirgeyici bileşikler gibi çeşitli kimyasallar kullanılarak deniz suyu şartlandırılmaktadır (Badurzzaman ve diğ., 2019; Zaidi ve Saleem, 2022b). Kimyasal

şartlandırma kaba ve ince ızgaraları takiben ham deniz suyuna klorür ilavesi ile başlamaktadır. Bu işleme ön klorlama adı verilmektedir ve ön klorlama tesisteki mevcut boru sistemleri ve depolama tanklarının içinde büyüyen ve arıtma verimliliğini düşüren deniz organizmalarının/mikroorganizmalarının (algler, midyeler vb.) büyümesini kısıtlamaktadır. (Badurzzaman ve diğ., 2019; Zaidi ve Saleem, 2022b).

Ön klorlamadan geçmiş deniz suyunda mevcut bulunan partiküllerin, kolloidal kirleticilerin ve çözünmüş organik maddelerin fiziksel prosesler ile giderim verimini arttırmak için fiziksel proseslerden önce pıhtılaştırıcı kimyasallar kullanılmaktadır (Voutchkov, 2017b). Pıhtılaştırıcıların desalinasyon tesislerindeki rolü; ham sudaki partiküllerin bir araya gelip daha büyük yumaklar oluşturmasını ve böylelikle kum filtreleri aracılığıyla daha etkin bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlamaktır. Yüksek bulanıklık ve/veya doğal organik madde konsantrasyonuna sahip ham suların, özellikle konvansiyonel ön arıtma prosesleri ile etkili bir düzeyde arıtılabilmesi için pıhtılaştırıcıların doğru ve optimize edilmiş kullanımı, sistemin arıtma performansı açısından kritik bir öneme sahiptir (Voutchkov, 2017b; Zaidi ve Saleem, 2022b). Demir tuzları ($FeCl_2$ ve $FeCl_3$), çöktürme veya filtrasyondan önce sık kullanan pıhtılaştırıcı kimyasallardandır (Badurzzaman ve diğ., 2019).

Yumaklaştırıcı yardımcı kimyasalları, pıhtılaştırıcılara arıtma performansını artırmak için çok düşük dozajlarda (0,25-0,5 mg/L) uygulanmaktadır (Badurzzaman ve diğ., 2019). Bu kimyasalların kullanımında dikkat edilecek husus ham suya ilave edilen miktarlardır. Ham suya yüksek miktarda ilave söz konusu olduğunda, TO membranlarında organik kirlenme meydana gelebilmektedir. Bu nedenle aşırı yumaklaştıcı kullanımından kaynaklanan TO membran kirlenmesi riski, bu kimyasalların sağladıkları faydalardan daha büyük bir tehdit oluşturmaktadır ki birçok desalinasyon tesisi pıhtılaştırıcı eklenmiş ham suyuna yumaklaştırıcı ilave etmemektedir (Voutchkov, 2017b).

Desalinasyon tesislerinde besleme suyundan tatlı suya dönüşüm oranı (geri kazanım) arttıkça, ham sudaki magnezyum karbonat, baryum sülfat, stronsiyum sülfat ve silika gibi düşük çözünürlükteki tuzlar, çözünürlük sınırlarını aşmakta ve TO membranlarının yüzeyinde kristal formda birikmeye başlamaktadır (Voutchkov, 2017b). Kalsiyum karbonat ve diğer tuzların membran yüzeylerinde birikmesinin önlenmesi ve membran performansının korunması için, asit veya kireç önleyici kimyasallar (antiskalant) kullanılmaktadır (Voutchkov, 2017b; Zaidi ve Saleem, 2022b). Genellikle geri kazanımın %35 ve üzerine çıktığı işletme koşullarında kireç önleyici kimyasalların kullanımı önerilmektedir (Zaidi ve Saleem, 2022b).

Ham suya pH ayarlayıcıların (asit veya baz) ilavesi genellikle pH ayarlamak için kullanılmaktadır. Örneğin sodyum hidroksit ilavesi genellikle gelişmiş bor giderimi için tasarlanmış TO sistemlerinin birinci kademesinde veya çift kademeli ise ikinci kademesinde besleme deniz suyunun pH'ını ayarlamak için kullanılmaktadır (Zaidi ve Saleem, 2022b).

Sodyum hipoklorit ve klor dioksit gibi oksidanlar genellikle sucul organizmaların (yani kabuklu deniz hayvanları, deniz kabukluları) iletim hatlarının, ekipmanların, tankların, dağıtım kanallarının ve ham deniz suyuyla temas eden diğer yapıların iç yüzeylerinde büyümesinin önlenmesi ve TO membranlarındaki organik kirlenmeyi en aza indirmek için kullanılmaktadır (Voutchkov, 2017b).

Ön klorlama, sodyum hipoklorit ve klor dioksit gibi oksidanların kullanımı, besleme suyunda bulunan kalıntı klor oksidasyonu nedeniyle membranlara zarar verebilmektedir. Bu durum göz önüne alınarak TO ünitelerinden önce besleme suyundan kalıntı klor giderimi yapılmaktadır. Bu işlem için genellikle maliyeti düşük ve verimliliği yüksek olması sebebiyle sodyum metabisülfit ($Na_2S_2O_5$) tercih edilmektedir (Zaidi ve Saleem, 2022b).

2.3.2.2. Fiziksel Ön Arıtma

Fiziksel ön arıtma prosesleri, ızgaralar ve elekler, (kaba çubuk elekler, döner elekler, bant elekleri, tambur elekleri, mikro elekler ve kartuş filtreleri), kum tutucular, çöktürme, çözünmüş hava flotasyonu, granüler ortam filtrasyonu ve membran filtrasyonu gibi filtrasyon proseslerini içermektedir (Zaidi ve Saleem, 2022b).

Izgara ve elek üniteleri her desalinasyon tesisi için arıtmanın birincil basamağını oluşturmaktadır. Bu ünitelerin temel amacı TO tesislerini yapı ve ekipman hasarından, oluşabilecek filtre tıkanıklığı ve kirlenmesinden korumaktır (Zaidi ve Saleem, 2022b). Su alma yapılarına ve temin edilen deniz suyu kalitesine bağlı olarak, ızgara ve elek ekipmanları, basit kartuş filtrelerden başlayarak, büyük boyuttaki atıkları, yengeç ve balık gibi deniz organizmalarını aşamalı olarak giderecek şekilde yapılandırılmış karmaşık mekanik eleklere ve plankton, silt, kum gibi tuzlu ham suda bulunan diğer ince katı partikülleri tutmak üzere tasarlanmış mikro eleklere kadar çeşitlilik gösterebilmektedir (Zaidi ve Saleem, 2022b).

Kum tutucular, çöktürme, ve çözünmüş hava flotasyonu gibi ön arıtma sistemlerinin amacı, tesis su temin yapıları ile gelen birikinti, kum ve AKM miktarını azaltmak ve aşağı akış yönlü filtrasyon sistemlerini katı maddelerin aşırı yükünden korumaktır (Voutchkov, 2017c). Desalinasyon tesislerinin çoğu ayrı bir kum tutucu ünitesine sahip olmamakla beraber önemsiz

miktardaki kum ve iri silt genellikle çöktürme ve filtrasyon üniteleri tarafından tutulmaktadır. Ancak, tesis yüzeysel su alma yapısına sahip ise ve bulunduğu bölge yoğun gemi trafiğine, sık sık gerçekleştirilen tarama faaliyetlerine ve türbülanslı su altı akıntılarına yer veriyor ise yüksek miktarda kum ve silt tesise sürekli olarak girebilmekte ve bu durumda etkin bir şekilde uzaklaştırılması gerekmektedir (Voutchkov, 2017c).

Çöktürme prosesi genellikle ham suyun günlük ortalama bulanıklık değeri 30 NTU'yu aştığında veya birkaç saat boyunca 50 NTU'nun üzerine çıkan bulanıklık artışları gerçekleştiğinde tercih edilmektedir. Ham suda gerçekleşen ani bulanıklık artışları ön arıtma sisteminin sahip olduğu filtrelerin katı madde tutma kapasitesinin sınırını aşmaktadır ve katı yükün yüksek seviyelerde sürekli seyretmesi durumu, ön arıtma filtrelerinde sürekli geri yıkama ihtiyacı oluşturur. Bu koşullar filtreleri hizmet dışı bırakmakta ve desalinasyon tesisinin operasyonlarını durdurmaktadır. Bu nedenle, çöktürme süreci, yüksek bulanıklık seviyelerinin filtreler üzerinde yaratabileceği aşırı yüklenmeyi önleyerek sistemin sürdürülebilirliğini korumaktadır. Desalinasyon tesislerinde genellikle konvansiyonel tip (dairesel ve dikdörtgen tip) ve lamella tipi çöktürme tankları kullanılmaktadır (Zaidi ve Saleem, 2022b).

Çözünmüş hava flotasyonu (ÇHF) sistemleri, çöktürme ve filtrasyon ile verimli bir biçimde giderilemeyen yüzen partikül kirleticiler ve diğer hafif katıların uzaklaştırılması için çok uygun kabul edilen bir prosestir. ÇHF sistemleri, hava kabarcıkları kullanarak ham suda bulunan organik maddeleri (gres, yağ) yüzdürmektedir ve yüzen katılar ÇHF tankının en üstünde biriktirilmektedir. Daha sonra bu maddeler bertaraf için sıyrılırken, daha düşük bulanıklığa sahip ham su tankın dibine yakın bir yerden tanktan ayrılmaktadır (Zaidi ve Saleem, 2022b).

Granüler ortam filtrasyonu, günümüzde TO desalinasyon tesislerinde kullanılan en yaygın konvansiyonel ön arıtma prosesidir. Granüler ortam filtrasyonu, ham suyun bir veya daha fazla granüler ortam katmanından (antrasit kömürü, silika kumu, granat) geçirilerek filtrelenmesini ifade etmektedir. Desalinasyon ön arıtımda kullanılan granüler ortam filtrasyonu üniteleri genellikle hızlı, tek aşamalı ve çift ortamlı (antrasit ve kum) ünitelerdir (Voutchkov, 2017d). Granüler ortam filtreleri iyi bir şekilde işletildiği takdirde besleme suyunda bulunan askıda katıların, organik partiküllerin ve siltin %90-%99'unu bertaraf etmektedir (Voutchkov, 2017d) Granüler ortam filtreleri ham kalitesi ve istenen su kalitesi doğrultusunda, tekli veya çoklu ortam filtresi olarak, birçok tipte konfigüre edilebilmektedir (Zaidi ve Saleem, 2022b).

UF ve MF membranları, son birkaç yıldır deniz suyuna kıyasla daha karmaşık bileşime sahip evsel ve endüstriyel atık suların ön arıtımında etkili bir şekilde kullanılmaktadır. MF (0,1–1 μm por boyutu aralığı) ve UF (0,01–0,1 μm gözenek boyutu aralığı) membran sistemleri, bulanıklık gidermenin yanı sıra deniz suyunda bulunan çözünmeyen ve kolloidal organiklerin giderilmesinde de oldukça etkilidir. UF ve MF membranları, patojen, bakteri, kolloidal maddeler ve AKM'leri tutarak, daha düşük bir SDI değerine sahip bir TO besleme suyu üretmektedir. Temin edilen ham suyun kalitesinde ani keskin değişim ve dalgalanmalar gerçekleşse bile, UF ve MF ön arıtma sistemleri uzun süreli bir çalışmada bile kararlı ve yüksek bir süzüntü akışıyla çalışmaya olanak tanımaktadır (Zaidi ve Saleem, 2022b).

Membran bazlı ön arıtma prosesinde ham su membrana beslenmeden önce mekanik ince ve kaba ızgaralar kullanılarak ön filtreden geçirilmektedir ve kimyasal tüketimi konvansiyonel ön arıtmaya göre daha azdır (Zaidi ve Saleem, 2022b). Boşluklu elyaf tipi membran modülleri ön arıtma için en yaygın kullanılan modül tipi olmakla beraber spiral sargılı modül tipi, plaka tipi ve boru tipi membran modülleri mevcut membran bazlı ön arıtma sistemlerinde kullanılan ticari modül tipleridir. Membran bazlı ön arıtma sistemlerinde oluşan kirlenmenin giderilmesi için süzüntü veya klorür ilaveli süzüntü, hava sıyırıcılardan gelen hava ile birlikte verilerek yıkama yapılmakta ve membran yüzeylerinde biriken kirlilik yükü etkin bir şekilde giderilmektedir (Zaidi ve Saleem, 2022b).

Tablo 2.3: Büyük ölçekli TO desalinasyon tesislerinin ön artıma tipleri ve akı bilgileri (Voutchkov, 2017e).

Desalinasyon tesisi, konumu ve kapasitesi	Ön arıtma tipi	Ön arıtma akısı	Giriş yapısı
Shuwaikh TO Desalinasyon Tesisi, Kuveyt, 350.000 m^3/gün	Ultrafiltrasyon	60-77 L/m^2.sa	Yüzeysel su alma yapısı
Adelaide TO Desalinasyon Tesisi, Avusturalya 300.000 m^3/gün	Ultrafiltrasyon	52-64 L/m^2.sa	Yüzeyaltı su alma yapısı
Güney Deniz Suyu Desalinasyon Projesi (TO), Avusturalya, 300.000 m^3/gün	Ultrafiltrasyon	40-50 L/m^2.sa	Yüzeysel su alma yapısı
Quigdao TO Desalinasyon Tesisi, Çin, 232.000 m^3/gün	Ultrafiltrasyon	80-93 L/m^2.sa	Yüzeysel su alma yapısı
Palm Jumeira TO Desalinasyon Tesisi, Birleşik Arap Emirlikleri, 96.000 m^3/gün	Ultrafiltrasyon	85 L/m^2.sa	Yüzeysel su alma yapısı
Bekton TO Desalinasyon Tesisi, Londra, Birleşik Krallık, 150.000 m^3/gün	Ultrafiltrasyon	40-70 L/m^2.sa	Yüzeysel su alma yapısı
Fukuoka TO Desalinasyon Tesisi, Japonya, 96.000 m^3/gün	Ultrafiltrasyon	60-80 L/m^2.sa	Yüzeyaltı su alma yapısı
Yu-Huan TO Desalinasyon Tesisi, Çin, 36.000 m^3/gün	Ultrafiltrasyon	40-60 L/m^2.sa	Yüzeysel su alma yapısı

2.3.3. Ters Osmoz

TO teknolojisi ile arıtma prosesi, yarı geçirgen bir membranın, çözeltinin osmotik basıncından daha büyük bir basınç altında (genellikle deniz suyu için 50 ila 80 bar aralığında) bir tuz çözeltisiyle temas ettirilmesi ile ifade edilmektedir (Zaidi ve Saleem, 2022c). TO membranları, membran polimerinin malzemesine ve yapısına ve yapılandırılmasına göre farklılık göstermektedir. Yapılarına göre membranlar, ince film kompozit ve ince film nano kompozit olarak ve ince film tabakalarındaki materyallerine göre poliamid ve selüloz asetat olarak ikiye ayrılmaktadır (Voutchkov, 2013a). Membranların modüller içindeki yapılandırmasına bağlı olarak, TO membranları spiral sargılı, boşluklu elyaf ve plaka tipi olarak üç ana gruba ayrılmaktadır (Voutchkov, 2013a).

Membran modülleri, tesis ölçeğinin belirlenmesinde kullanılan en küçük kapasite unsuru olarak tanımlanmaktadır. Membran modülü, konsantre, süzüntü ve besleme akımı için boru bağlantısı olan modül raflarına monte edilmiş basınç kaplarına yerleştirilmektedir. Paralel olarak düzenlenmiş belirli sayıda basınç kabı bir membran dizisi veya membran grubu olarak adlandırılır ve her membran grubu birbirinden bağımsız ünitelerdir. Basınç kapları, 8 inç membranlardan içerisine 6-8 membran yerleştirilecek uzunlukta yapılmaktadır. Sistem tek veya çift kademeli olabilmektedir (Koyuncu ve diğ., 2018; Zaidi ve Saleem, 2022c). Besleme suyu yüksek basınçta membran modüllerine çapraz akış ile membran yüzeylerine paralel olacak şekilde uygulanarak arıtım gerçekleşmektedir. TO membranları için genellikle, yatay santrifüj ve dikey türbin pompalar kullanılmaktadır. Küçük desalinasyon sistemleri, basınç değişimlerini azaltmak için pozitif yer değiştirmeli pompalar da kullanmaktadır. Pompalar değişken devirli olabilmektedir. Ayrıca, desalinasyon sistemlerinde enerji geri kazanımı birimleri de kullanılmaktadır (Koyuncu ve diğ., 2018). Deniz suyunun arıtımında ve yüksek basınç kullanan yeraltı sularının arıtılmasında pek çok tesiste enerji geri kazanım sistemleri (ER) kullanılır. Enerji, konsantre akımında bulunan basıncın kullanılması ile geri kazanılabilir. ER sistemleri, yüksek basınç pompası ile aynı şaft üzerine ters yönde yerleştirilmiş (konsantre akımı için) çarkı olan turbo pompalar içermektedir. Düşük basınçta çalışan TO sistemlerinde kullanılmazlar. Deniz suyu arıtma sistemlerinin hepsinde vardır (Koyuncu ve diğ., 2018). Seçilen malzemenin korozyondan zarar görmemesi için TO sistemlerinde malzeme seçimi çok önemlidir. Deniz suyu TO desalinasyon sistemlerinde, yüksek basınç borulaması için genellikle dupleks paslanmaz çelik veya süper dupleks paslanmaz çelik malzeme kullanılmaktadır (Koyuncu ve diğ., 2018).

TO membranlarının deniz suyu arıtımında kullanımı sırasında karşılaşılan en büyük sorunlardan biri membran kirlenmesidir. Kirlenme, özellikle biyolojik, organik, inorganik ve kolloidal maddelerin membran yüzeyine birikmesiyle oluşur ve performans kayıplarına yol açmaktadır. Bu tür kirlilikler, membran akış hızını düşürür ve işletme basıncını artırır. Temizlik işlemleri genellikle kimyasal çözücülerle yapılır ve bu işlemlerde alkali ve asidik yıkama çözümleri sıklıkla tercih edilir. Etkili bir temizlik, kirlenme türüne özgü kimyasalların uygun koşullarda uygulanmasıyla mümkün olmaktadır (Najid ve diğ., 2022). TO sistemlerinin performansıyla ilişkili temel parametreler: Osmotik basınç, süzüntü geri kazanımı, membran tuz geçişi, membran tuz reddi, transmembran basıncı (TMP), membran süzüntü akısı ve spesifik membran akısı parametreleri olarak ifade edilmektedir (Voutchkov, 2013a).

2.3.4. Son Arıtma

Desalinasyon tesislerinde TO ünitelerinden çıkan ürün suyu karakteristik olarak mineral içeriği, sertlik, alkalinite ve pH parametreleri bakımından düşük değerlere sahiptir. Bu nedenle üretilen su, dağıtım ve insani tüketimden önce şartlandırılmalıdır (Voutchkov, 2013c). Bu doğrultuda tipik bir son arıtma, korozyon koruması için remineralizasyon ve inhibitör ilavesi, biyolojik stabilite ve toplum sağlığının korunması için dezenfeksiyon ve su kalitesinin korunması için boron, silika ve tat ve koku yapıcı gazlar gibi spesifik parametrelerin giderilmesini içermektedir (Voutchkov, 2013c).

TO suyuna alkalinite ve sertlik ilavesi yani remineralizasyon işlemi üç farklı yöntem ile yapılabilmektedir: (i) Yüksek kalsiyum ve magnezyum içeriğine sahip diğer tatlı su kaynaklarıyla karıştırma, (ii) magnezyum ve/veya kalsiyumun kireç taşı (kalsiyum karbonat/kalsit) ve dolomit (kalsiyum ve magnezyum karbonat) gibi doğal olarak oluşan minerallerin eritilmesiyle ilave edilmesi ve (iii) kalsiyum (kalsiyum hidroksit/kireç) ve magnezyum (magnezyum klorür ve sülfat) içeren kimyasalların doğrudan eklenmesi (Voutchkov, 2013c). Arıtılmış suya, korozyonu önlemek amacıyla inhibitör eklenebilmektedir. Fosfat ve silika bazlı inhibitörler, boru yüzeylerinde koruyucu bir tabaka oluşturarak korozyonun etkilerini azaltmaktadır. Ortafosfat, boru malzemesi ile reaksiyona girerek yüzeyi kaplarken, silika camsı bir tabaka meydana getirerek koruyucu bir bariyer oluşturur. Bu inhibitörler, korozyonun başladığı tespit edildiğinde suya ilave edilmektedir (Koyuncu ve diğ., 2018). Genellikle, daha verimli olduğu için ve arıtılmış suda düşük konsantrasyonda organik madde bulunması sebebiyle dezenfeksiyon yan ürünü oluşumu potansiyeli azaldığından, klor ve türevleri (sodyum hipoklorit, kalsiyum hipoklorit ve klor gazı) yaygın olarak tercih

edilmektedir. Ancak, ozonlama, UV ile dezenfeksiyon gibi dezenfeksiyon proseslerinin de kullanıldığı tesisler mevcuttur (Voutchkov, 2013c; Koyuncu ve diğ., 2018).

2.3.5. Konsantre Bertarafı

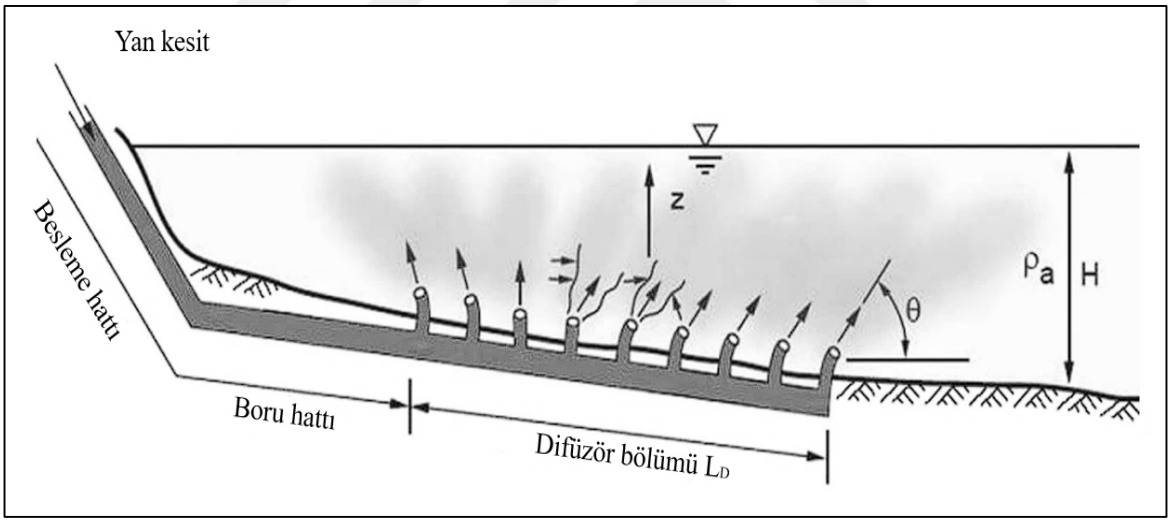
Desalinasyon tesislerinde, besleme suyu arıtma sürecinden kaynaklanan çeşitli yan ürünlerin deşarjı da gerçekleştirilmektedir. Bu yan ürünler arasında konsantre (tuzlu atık su), ön arıtma filtrelerinin geri yıkama suları ve membran temizleme işlemlerinden kaynaklanan kimyasal çözeltiler yer almaktadır. Bu atık akımları içinde en büyük hacme sahip olan ve yönetimi en zorlu bileşen, desalinasyon sürecinin temel yan ürünü olan konsantredir (Voutchkov, 2013d). Konsantre; tuzluluk, sıcaklık ve kimyasal kompozisyonu açısından tesise alınan besleme suyundan (deniz suyundan) önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar nedeniyle deşarjın yapıldığı alanda çevresel etkiler ortaya çıkabilmektedir (Missimer ve Maliva, 2018). Tek bir tuzdan arındırma tesisinin bir körfeze veya deniz ortamına konsantre deşarjı, alıcı su kütlesinin tuzluluğu üzerinde genellikle belirgin bir etki yaratmamaktadır. Ancak, uzun süre faaliyet gösteren ve birden fazla tesisin bulunduğu bölgelerde, zamanla tuzluluk seviyelerinde artış gözlemlenebilmektedir. Deniz ekosisteminde yaşayan organizmalar, tuzluluk değişimlerine karşı farklı seviyelerde duyarlılığa sahip olmakla beraber özellikle tek hücreli planktonlar gibi bazı hassas biyotik unsurlar, tuzluluk artışından olumsuz etkilenebilmektedir. Bu durum, ekosistem dengesi üzerinde uzun vadeli sonuçlar doğurabilmektedir.

TO desalinasyon tesislerinde arıtma sonucu oluşan konsantre debisi, besleme suyunun yaklaşık iki katı kadar tuzluluğa ve buna bağlı olarak daha yüksek yoğunluğa sahiptir. Bu durum, söz konusu konsantrenin denize deşarj edildiğinde dikey olarak çökelmesine ve deniz tabanı boyunca yatay yönde, nispeten yavaş bir şekilde yayılmasına neden olmaktadır. Konvansiyonel konsantre bertaraf yöntemlerinde, konsantre doğrudan denize deşarj edilmektedir. Deşarj işlemi, direkt deniz yüzeyine deşarj, deniz tabanına inşa edilen açık bir boru ile deşarj, difüzörlü bir boru veya termik santral soğutma suyunun büyük debileriyle karıştırılması yoluyla da gerçekleşebilmektedir (Voutchkov, 2013d).

En basit denizaltı deşarj sistemlerinden biri, yukarıya doğru eğimli olarak yerleştirilmiş açık uçlu tek bir borudan oluşan tasarımdır. Bu sistemde, konsantre akım basınçla borudan dışarı atıldıktan sonra kısa bir mesafe yukarı yönlü hareket eder ve ardından yerçekiminin etkisiyle deniz tabanına doğru çöker. Bu tür deşarj yapıları, geçmişte özellikle belediye kaynaklı atıksuların deniz ortamına bertarafında yaygın olarak uygulanmıştır. Tek borulu deşarj

sistemleri, genellikle sığ kıyı bölgelerinde bulunan hassas denizel ekosistemler üzerindeki olası olumsuz etkileri en aza indirmek amacıyla daha derin sulara yerleştirilir. Ancak bu sistemlerin çevresel açıdan sınırlayıcı bir yönü bulunmaktadır: Noktasal bir deşarj karakterine sahip olmaları ve derin deniz ortamlarında genellikle mevcut olan düşük akıntı hızları nedeniyle, deşarj edilen konsantrenin doğal ortamda karışma ve seyrelme kapasitesi düşüktür. Bu da çevrede bölgesel tuzluluk artışlarına ve potansiyel ekolojik streslere yol açabilmektedir (Missimer ve Maliva, 2018).

Günümüzde deniz altı deşarjları için en yaygın kullanılan modern tasarım, çok portlu veya rozet difüzörlü boru sistemleridir (Şekil 2.5). Difüzörler sayesinde konsantre deniz suyu ile daha hızlı ve homojen bir şekilde karışmaktadır. Bu yapı, konsantrenin deniz tabanında birikmesini önleyerek çevresel etkileri en aza indirmeyi amaçlamakta ve belirli bir seyreltme oranı sağlayan bir karışım bölgesi oluşturarak, doğal deniz suyu ile konsantrenin dengeli bir şekilde dağılımını kontrol etmektedir. Böylece, özellikle hassas denizel ekosistemlerin korunması açısından önemli bir avantaj elde edilmektedir (Missimer ve Maliva, 2018).



Şekil 2.5: Çok portlu ve difüzörlü konsantre bertaraf sistemini gösteren çizim (Missimer ve Maliva, 2018).

Enerji santralleri ile desalinasyon tesislerinin entegre işletilmesi, santral açısından önemli ekonomik avantajlar sunmaktadır. Desalinasyon tesislerinin sürekli ve öngörülebilir elektrik talebi, santralin yük profilini optimize ederek daha yüksek yük faktörüyle çalışmasını sağlamakta ve böylece enerji üretim üniteleri daha verimli koşullarda işletilmektedir. Hem enerji üretim hem de su arıtma maliyetleri azalmakta ve genel sistem verimliliği artmaktadır (Missimer ve Maliva, 2018).

Doğrudan deşarj gibi konvansiyonel sistemlere nazaran alternatif deşarj yöntemleri ve konseptleri bulunmaktadır. Bu alternatif yaklaşımlar, özellikle çevresel etkilerin azaltılması, sürdürülebilirlik kriterlerinin karşılanması ve yerel koşullara uyum sağlanması açısından önem arz etmektedir. Bu kapsamda, enjeksiyon kuyularına deşarj yöntemi öne çıkan seçeneklerden biri olarak uygulanmaktadır. Söz konusu yöntemde, konsantre akım yer altındaki geçirimsiz jeolojik formasyonlara yüksek basınçla enjekte edilmekte ve yüzey sularına olan olası etkiler engellenmektedir (Missimer ve Maliva, 2018). Bunun yanı sıra, sahil kıyısına ya da açık deniz ortamına yerleştirilen galeriler aracılığıyla gerçekleştirilen deşarj sistemleri de yaygın olarak araştırılmaktadır. Bu galeriler, konsantrenin daha geniş bir alanda, düşük akımla yayılmasına olanak sağlayarak, çevresel etkileri azaltmaktadır. Difüzyonun daha kontrollü gerçekleşmesi sayesinde, özellikle kıyısal ve sığ su ekosistemleri üzerindeki baskılar minimum düzeye indirilmektedir (Missimer ve Maliva, 2018).

İleri osmoz (İO) teknolojisi de konsantre bertarafında kullanılan bir diğer yenilikçi yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntemde, konsantre akım evsel atıksu gibi düşük tuzluluk içeren akımlarla osmotik bir süreç aracılığıyla seyreltilmektedir. Böylelikle, hem tuz konsantrasyonu düşürülmekte hem de atıksuyun yeniden kullanımına katkı sağlanmaktadır (Missimer ve Maliva, 2018).

Sıfır sıvı deşarjı konsepti ise, sıvı fazın tamamen geri kazanıldığı ve geriye yalnızca katı tuz kalıntılarının bırakıldığı ileri bir arıtma yaklaşımı olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemlerde, yoğunlaştırma, buharlaştırma ve kristalizasyon gibi prosesler kullanılmakta ve atık sıvı tamamen bertaraf edilmektedir. Her ne kadar bu yöntem yüksek enerji gereksinimine sahip olsa da, çevresel etkileri en aza indirmesi açısından stratejik bir çözüm sunmaktadır (Missimer ve Maliva, 2018).

Tüm bu yöntemler, uygulanabilirlik, maliyet ve çevresel uygunluk açısından detaylı analizler gerektirmektedir. Bertaraf stratejisinin seçimi, bölgesel hidrografik koşullar, yasal düzenlemeler ve sistem tasarımına bağlı olarak şekillenmektedir (Missimer ve Maliva, 2018).

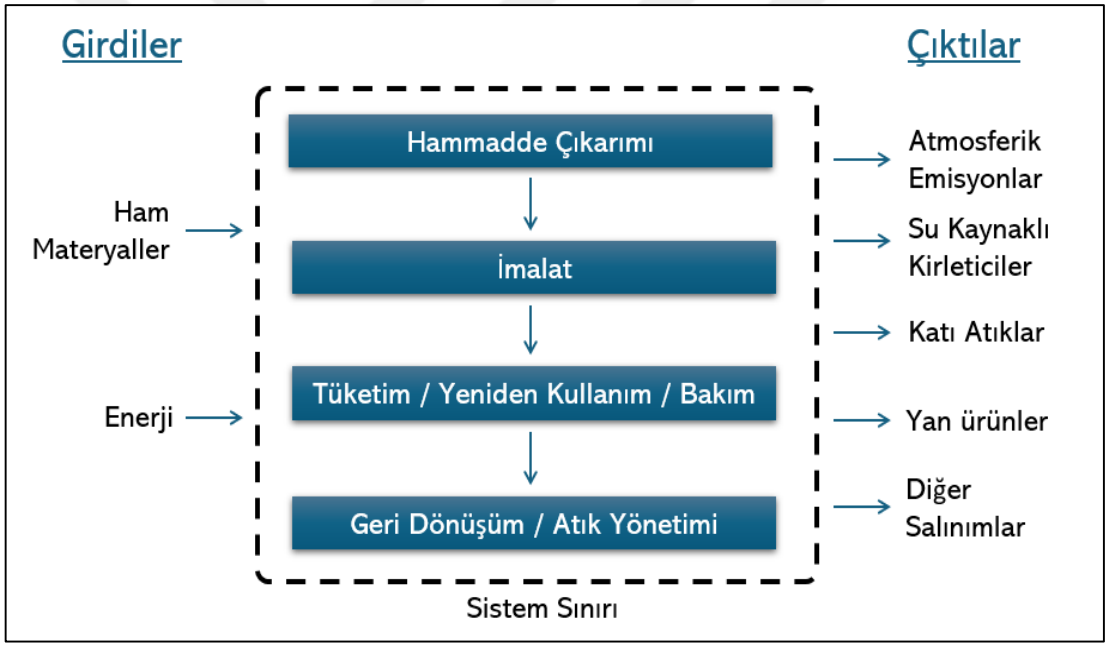
2.4. YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ

Çevre koruma bilincinin artmasıyla birlikte, ürünlerin ve hizmetlerin üretim-tüketim süreçlerinde oluşturduğu çevresel etkilerin daha sistematik biçimde anlaşılması ve yönetilmesi gerekliliği ön plana çıkmıştır. Bu doğrultuda, çevresel etkilerin analiz edilmesi ve azaltılması yönünde yardımcı olması amacıyla çeşitli değerlendirme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden biri olan yaşam döngüsü analizi (YDA), bir ürünün tüm yaşam süreci boyunca çevresel performansını değerlendirmeye olanak tanımaktadır (ISO 14040:2006). YDA'nın temel amacı, bir ürün ya da sistemin çevre üzerindeki toplam etkisini belirlemek ve bu etkileri minimize etmeye yönelik stratejiler geliştirmektir. YDA yalnızca bir ürünün doğrudan çevresel etkilerini değil, aynı zamanda dolaylı etkilerini de kapsayarak kapsamlı bir analiz sunmaktadır. Bu yönüyle, geleneksel analiz yöntemlerinden ayrılmakta ve sistemler arası karşılaştırma yapılmasına olanak tanımaktadır (U.S. Environmental Protection Agency, 2006). YDA, özellikle farklı paydaş gruplarının (endüstri, kamu otoriteleri ve sivil toplum kuruluşları) karar alma süreçlerinde bilimsel veri temelli bir araç olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, uygun çevresel göstergelerin belirlenmesine katkı sunmakta ve bu göstergeler üzerinden sürdürülebilirlik odaklı yaklaşımların geliştirilmesine destek olmaktadır (ISO 14040:2006).

YDA’da sürdürülebilirlik kavramı, çevresel, ekonomik ve sosyal olmak üzere üç temel boyutta ele alınmaktadır. Çevresel sürdürülebilirlik; doğal kaynak kullanımı, enerji tüketimi, sera gazı emisyonları, atık oluşumu ve ekosistem üzerindeki etkiler gibi çevreye yönelik faktörleri kapsamaktadır. Ekonomik sürdürülebilirlik ise bir ürün ya da hizmetin yaşam döngüsü boyunca oluşan maliyetlerinin (üretim, işletme, bakım ve bertaraf gibi) analiz edilerek kaynakların verimli kullanımını ifade etmektedir. Sosyal sürdürülebilirlik boyutu ise toplum sağlığı, güvenlik, istihdam, eşitlik, yaşam kalitesi ve toplumsal kabul gibi insan ve toplum odaklı etkileri incelemektedir. Bu üç boyut birlikte değerlendirildiğinde, sürdürülebilirliğe yönelik daha dengeli ve kapsamlı kararlar alınabilmesi mümkün olmaktadır (Aziz ve Hanafiah, 2021)

YDA’da değerlendirmenin dayandırıldığı temel ölçüm birimi fonksiyonel birim olarak adlandırılmaktadır. Fonksiyonel birim, analiz edilen ürünün ya da hizmetin işlevsel çıktısını ifade eder. Bu birim, farklı ürünlerin veya sistemlerin karşılaştırılabilirliğini sağlamak için tanımlanmakta ve tüm girdi-çıktı hesaplamaları bu birim üzerinden yapılmaktadır. Örneğin, bir içme suyu arıtma sisteminin YDA çalışmasında fonksiyonel birim olarak "1 m^3 içme suyunun

arıtılması" belirlenebilir (EPA, 2006). YDA çalışmalarında bir diğer kritik unsur sistem sınırı kavramıdır (Şekil 2.6). Sistem sınırı, analiz kapsamında değerlendirilecek süreçlerin ve girdilerin nerede başlayıp nerede sona ereceğini belirlemektedir. Sistem sınırlarının belirlenmesi, yalnızca teknik tercihlere değil, aynı zamanda çalışmanın amacı, yürütüldüğü coğrafi bölge ve zamansal kapsam gibi çeşitli dışsal faktörlere bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle, sınırların doğru şekilde tanımlanması, analizin geçerliliği açısından kritik bir öneme sahiptir. "Beşikten mezara" (cradle to grave) yaklaşımı, ürünün ham madde çıkarımından kullanım sonrası bertarafına kadar olan tüm yaşam döngüsünü kapsarken, bazı durumlarda "beşikten kapıya" (cradle to gate) veya "kapıdan kapıya" (gate to gate) gibi daha dar kapsamlı analizler de yapılabilmektedir. Sistem sınırının net olarak tanımlanması, analizdeki tutarlılığı ve doğruluğu doğrudan etkilemektedir (EPA, 2006).



Şekil 2.6: Yaşam döngüsü analizinde sistem sınırı, girdi ve çıktıların ifadesi (EPA, 2006).

Bir YDA çalışmasında dört aşama bulunmaktadır (Şekil 2.7). 1. Amaç ve kapsamın tanımı, 2. Envanter analizi, 3. Etki analizi, 4. Yorumlama (EPA, 2006; ISO 14040:2006).

Amaç ve kapsamın belirlenmesi: Bir YDA çalışması ilk aşamasını amaç ve kapsamın tanımlanması oluşturmaktadır. Bu doğrultuda yürütülecek YDA çalışmasının sınırları ve içeriği belirlenmektedir.

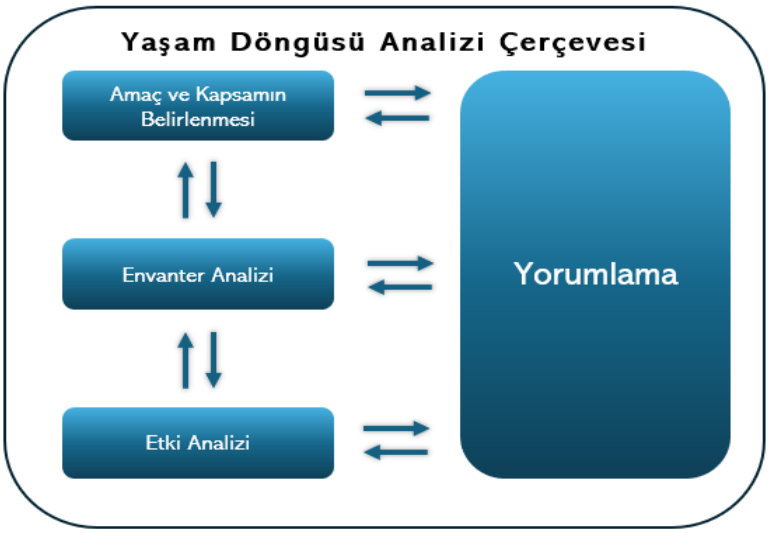
Envanter Analizi: Yaşam döngüsü envanter analizi (YDE) aşaması YDA'nın ikinci aşamasıdır. İncelenen sistem ile ilgili olarak sistemle ilişkili tüm giriş ve çıkış verilerinin toplanmasını kapsamaktadır. Bu aşamada, tanımlanan sistemin işleyişine ilişkin kaynak kullanımı ve çevresel emisyon verileri detaylı biçimde derlenmektedir. Ardından bu veriler, SimaPro, GaBi gibi YDA programlarına girilerek süreçler modellenmektedir. Böylece seçilen sistemin çevresel etkilerine temel oluşturacak envanter yapısı şeffaf ve hesaplanabilir şekilde oluşturulmaktadır.

Etki Analizi: Yaşam döngüsü etki analizi aşaması (YDEA) YDA'nın üçüncü aşamasıdır. YDEA aşaması, YDE aşamasında elde edilen verilerin çevresel açıdan anlamlandırılmasına yönelik bilgi sağlamaktadır. Bu süreçte, elde edilen envanter verileri kullanılarak sistemin potansiyel çevresel etkileri değerlendirilmekte ve çevresel önem dereceleri belirlenmektedir. YDEA, analiz sürecinde çevresel etkilerin daha derinlemesine anlaşılmasını sağlayan bir adımdır ve genellikle üç alt bileşen içerir: karakterizasyon, normalizasyon ve ağırlıklandırma. Bu alt adımlardan yalnızca karakterizasyon zorunlu kabul edilmekte; diğer iki bileşen ise tercihe bağlı olarak uygulanmaktadır. Karakterizasyon, belirli girdilerin ya da emisyonların çevresel etki kategorilerine katkısını ölçmeyi amaçlamaktadır. Bu aşamada, iklim değişikliği, toksikolojik etkiler, su ve arazi kullanımı gibi kategoriler üzerinden değerlendirmeler yapılmakta; bazı durumlarda bu etkiler toplulaştırılarak insan sağlığı üzerindeki etkiler ya da ekolojik kayıplar gibi bileşik göstergelere dönüştürülmektedir.

YDEA, orta nokta ve son nokta olmak üzere iki yaklaşıma dayalı olarak yürütülmektedir. Orta nokta indikatörleri daha çok bir ürünün veya bir prosesin neden olduğu problemlere; KIP, KAP, KCEP, DSÖP vb. odaklı olmakla beraber son nokta indikatörleri bu problemlerin çevreye ve insanlara verdiği zarara (insan sağlığı, ekosistem kalitesi, kaynak tüketimi vb.) odaklanmaktadır (Aziz ve Hanafiah, 2021; Lee ve Jepson, 2021). Eco-indicator 99, IMPACT 2002+, ReCiPe, CML gibi çeşitli etki analizi metodları, çevre üzerinde potansiyel etkilerin karakterizasyonunu sağlayan eden orta nokta veya son nokta yaklaşımına sahip metotlardır (Aziz ve Hanafiah, 2021). Bu metotların kullanılabilmesi için bir YDA yazılımı/programı gerekmektedir. SimaPro ve GaBi, envanter veritabanlarını (Ecoinvent, ELCD, Swiss Input Output vb.) ve etki analizi metodlarını (ReCiPe, CML vb.) bünyesinde bulunduran ve etki analizi çıktılarını hesaplayabilen en yaygın iki yazılımdır (Zhou ve diğ., 2014; Aziz ve Hanafiah, 2021). Yukarıda belirtilen tüm yazılım araçları, hesaplama yöntemlerini proses modeline göre tasarlamaktadır. YDA uygulayıcılarının, her yaşam döngüsü aşaması için enerji

ve malzeme girdilerini ve çevresel çıktıları ayrıntılı biçimde tanımlamaları gerekmektedir (Zhou ve diğ., 2014).

Yorumlama: Son aşama olan yaşam döngüsü yorumlama, YDA sürecinin genel sonuçlarının analiz edildiği ve karar vericilere sunulduğu bölümdür. Bu aşamada, hem YDE hem de YDEA çıktıları bütüncül biçimde değerlendirilmekte ve çalışmanın amacı doğrultusunda sonuçlara ulaşılmakta, öneriler geliştirilmektedir. Bu aşama, sonuçların karar vericiler için nasıl kullanılabileceği konusunda yol gösterici öneriler içermektedir. ISO 14044 standardı doğrultusunda, katkı analizi, belirsizlik analizi ve duyarlılık analizi gibi yöntemlerin kullanımı teşvik edilmekte olup, bu tür analizlerin uygulanması sonuçların güvenilirliğini artırmak amacıyla önerilmektedir (Zhou ve diğ., 2014).



Şekil 2.7: Yaşam döngüsü analizinin genel çerçevesi (EPA, 2006).

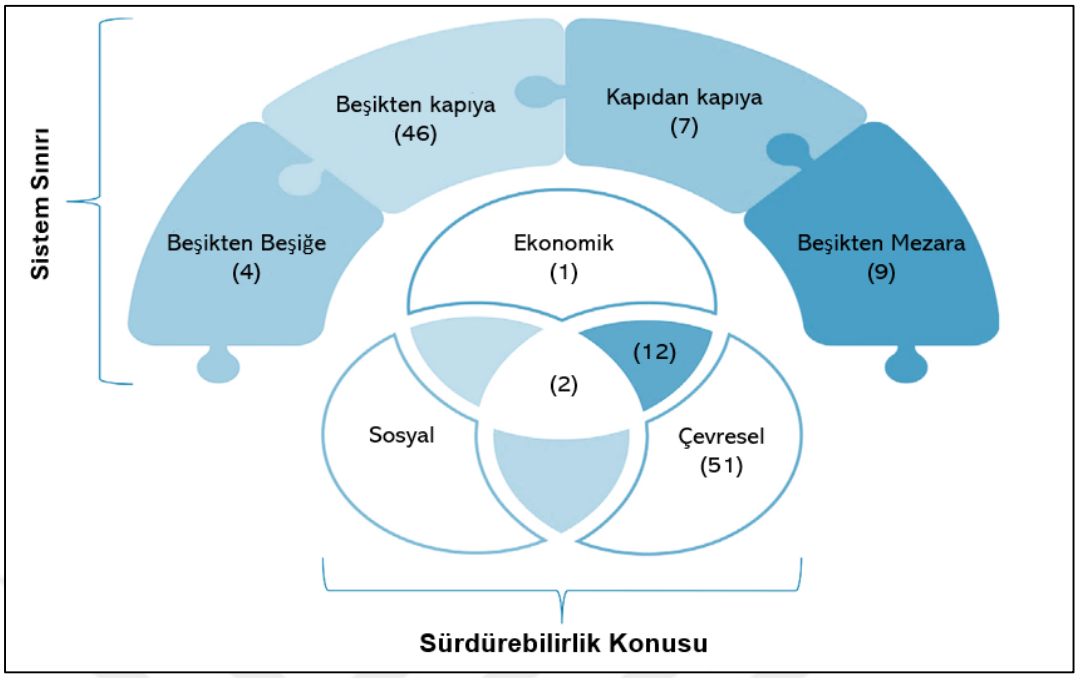
Hassasiyet analizi, YDA çalışmalarında model varsayımlarının, veri kalitesinin ve belirsizliklerin sonuçlar üzerindeki etkisini sistematik biçimde değerlendirmek amacıyla uygulanmaktadır. Analizde genellikle çevresel etkilere en fazla katkıda bulunan girdiler veya süreçler seçilmekte olup bunların değerleri belirli oranlarda arttırılıp azaltılmaktadır ve değişikliklerin YDA çalışması sonucu üzerindeki etkisi gözlemlenmektedir. Hassasiyet analizi, katkı analizleriyle entegre biçimde çalışabilir ve böylece kritik süreçlerin veya veri setlerinin etkisi kolayca ortaya konabilmektedir. Ayrıca, parametrelerin tek tek değiştirilmesine dayalı senaryo analizleri ya da Monte Carlo simülasyonları gibi daha gelişmiş yöntemler de kullanılabilmektedir. Bu tür analizler, YDA sonuçlarının ne ölçüde kararlı ve güvenilir olduğunu ortaya koyarak, çevresel karar destek süreçlerinin sağlam temellere dayanmasına katkı sağlamaktadır (EPA, 2006).

2.4.1. Ters Osmoz (TO) Desalinasyon Tesislerinde Yaşam Döngüsü Analizi (YDA) Uygulamaları

TO teknolojisine dayalı desalinasyon tesislerine yönelik YDA çalışmalarında, analiz süreci genellikle çalışmanın amacı, kapsamı ve fonksiyonel biriminin tanımlanması ile başlamaktadır. Bu aşamaların ardından, sistemin çevresel etkilerinin sınırlarını belirlemek amacıyla dört farklı sistem sınırı türü değerlendirilmektedir (Şekil 2.8): beşikten beşiğe, beşikten kapıya, kapıdan kapıya ve beşikten mezara yaklaşımları. "Beşikten beşiğe" yaklaşımı, yalnızca ham madde çıkarım süreçlerini kapsamaktadır. Buna karşın "beşikten kapıya" sistemi, ham maddelerin çıkarımının yanı sıra bu maddelerin desalinasyon tesisine taşınmasına kadar olan süreçleri de içermektedir. "Kapıdan kapıya" yaklaşımı ise doğrudan tesisin işletme faaliyetlerine odaklanmakta; deniz suyunun temini, arıtılması ve dağıtımı gibi işlemleri kapsamaktadır. En geniş çerçeveye sahip olan "beşikten mezara" sistem sınırı ise, ham madde tedarikinden başlayarak tesisin inşası, deniz suyunun temini ve arıtımı, arıtılmış suyun son kullanıcıya ulaştırılması, tesisin ömrünün sonunda gerçekleştirilmesi gereken söküm işlemleri ve süreç boyunca oluşan atıkların bertarafına kadar tüm aşamaları değerlendirmeye almaktadır (Aziz ve Hanafiah, 2021). Desalinasyon süreçlerine yönelik YDA çalışmalarında fonsiyonel birim genellikle “1 m^3 içilebilir su üretimi” olarak belirlenmektedir (Zhou ve diğ., 2014). Literatüre hakim olmak amacı ile 2004-2023 yıllarına ait 68 YDA desalinasyon çalışması incelenmiştir. İnceleme sonucu elde edilen bulgular Tablo 2.4’te verilmiştir.

Tablo 2.4: 2004-2023 yıllarına ait TO desalinasyon YDA çalışmalarına ait bulgular.

YDA Verisi	En Yaygın Bulgular
Fonksiyonel Birim	1 metreküp arıtılmış su
Sistem Sınırı	Beşikten kapıya
Çalışma Kapsamı	Çevresel performans
Yaşam Döngüsü Analizi Programı	SimaPro
Yaşam Döngüsü Analizi Etki Analizi Metodu	ReCiPe, CML2000, IMPACT2002
Yaşam Döngüsü Analizi Kütüphanesi	Ecoinvent



Şekil 2.8: 2004-2023 yıllarına ait desalinasyon başlığı altında çalışılan yaşam döngüsü analizi çalışmalarının sistem sınırı ve sürdürebilirlik çerçevesi (Aziz ve Hanafiah, 2021).

Şekil 2.8'de, önceki YDA çalışmalarının sistem sınırları ve sürdürülebilirlik kapsamına göre dağılımı gösterilmektedir. İncelenen 68 çalışmanın büyük bir bölümü "beşikten kapıya" sistem sınırı yaklaşımını tercih etmiştir. Sürdürülebilirlik kapsamı açısından ise, çoğu çalışma yalnızca çevresel etkilere odaklanırken, ekonomik ve sosyal faktörlerin ele alındığı çalışmalar daha az sayıda kalmıştır. Bu durum, mevcut YDA çalışmalarında sürdürülebilirliğin tüm boyutlarını kapsayan bütüncül analizleri içeren çalışmaların eksikliğini vurgulamaktadır. Ek olarak çalışmalarda çevresel etkilerde payı en yüksek unsurlar enerji tüketimi, konsantre bertarafı, kimyasal tüketimi, hammadde transferinden kaynaklı taşınımlar ve atık bertarafı olmuştur. TO desalinasyon tesislerinin sahip olduğu farklı su alma yapıları, ön arıtma konfigürasyonları, TO sistemi konfigürasyonları, son arıtma prosesleri ve konsantre bertaraf yapılarının çeşitliliği, enerji kaynakları, taşınım mesafeleri vb. unsurlar TO desalinasyon tesisleri için yapılacak çalışmalarda birçok alternatif seçenek sunmaktadır (Lee ve Jepson, 2021).

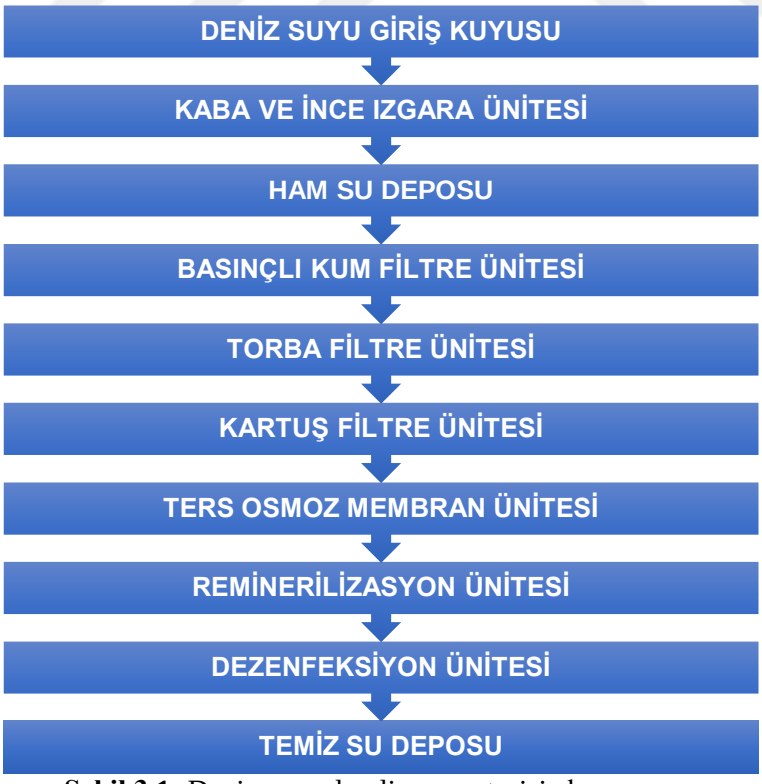
Bu alternatif seçeneklerin değerlendirilmesi ve mevcut YDA çalışmamız ile karşılaştırılmak adına birçok literatür araştırması incelenmiştir. Bu doğrultuda başlıca incelenen çalışmalar; Najjar ve diğ. (2022) çalışmasında bir deniz suyu TO desalinasyon tesisinin farklı enerji kaynakları ile işletilmesi sonucu oluşan çevresel etkilerin karşılaştırılması yer almaktadır. Shahabi ve diğ. (2015b) ve Al-Kaabi ve Mackey (2019) çalışmalarında deniz suyu TO desalinasyon tesisinin farklı su alma yapıları ile işletilmesi sonucu oluşan çevresel etkilerin

karşılaştırılması yer almaktadır. Shahabi ve diğ. (2014) çalışmasında yenilebilir enerji kaynakları ile işletilen bir TO desalinasyon tesisinin çevresel etkilerinin değerlendirilmesi yer almaktadır. Beery ve diğ. (2010) çalışmasında farklı ön arıtma tiplerinin deniz suyu TO desalinasyon tesisinin çevresel etkilerinde oluşan değişimin değerlendirilmesi yer almaktadır. Al Sarkal ve Arafat (2013) çalışmasında ultrafiltrasyon ve konvansiyonel ön arıtma tipleri ile işletilen bir TO desalinasyon tesisinin çevresel etkilerinin değerlendirilmesi yer almaktadır. Abdul Ghani ve diğ. (2021) gerçekleştirdiği çalışma mevcut YDA çalışmamız ile sonuçlarını karşılaştırabileceğimiz en yakın çalışma olmakla beraber çalışma, Malezya'nın kırsal bir bölgesinde kurulan küçük ölçekli deniz suyu TO desalinasyon tesisinin çevresel performansının araştırıldığı çalışmadır. Çalışmada SimaPro yazılımı ve ReCiPe 2016 V1.04 metodu kullanılmış olup, mevcut çalışmamızda olduğu gibi sistem sınırı "Kapıdan kapıya" olarak, fonksiyonel birimi ise "1 m^3 arıtılmış içme suyu" olarak belirlenmiştir. Tesisin arıtma prosesleri YDA çalışmasında bulunduğumuz tesis ile aynı proseslere sahiptir. Fayyaz ve diğ. (2023) çalışması, İran'da yer alan bir petrokimya kompleksinde yüksek tuzluluğa sahip deniz suyundan içme ve endüstriyel su üretimi gerçekleştiren bir desalinasyon tesisinin çevresel etkilerini YDA yöntemiyle değerlendirmektedir. Çalışma SimaPro programı üzerinden ReCiPe 2016 V1.04 yazılımları ile gerçekleştirilmiştir. Mevcut çalışmamızda olduğu gibi sistem sınırı "kapıdan kapıya" olarak tanımlanmış, fonksiyonel birim ise "1 m^3 içme suyu ve 1 m^3 endüstriyel su" şeklinde ayrı ayrı belirlenmiştir.

3. YÖNTEM

3.1. DENİZ SUYU DESALİNASYON TESİSİ

Çalışmaya konu olan tesis, konvansiyonel ön arıtma sistemi, ters osmoz (TO) arıtma sistemi ve son arıtma olmak üzere üç temel aşamadan oluşmaktadır (Şekil 3.1). Günlük 6.000 m^3/gün kapasiteye sahip olan tesisin üretim miktarı, yıl içindeki talep ve mevsimsel değişikliklere göre farklılık göstermektedir. Ham deniz suyu, denizden yaklaşık 400 metre uzaklıktaki bir noktadan cazibeyle alınmaktadır. Deniz suyu önce kaba ve ince ızgaralardan geçirilmektedir. Daha sonra kum filtrelerine yönlendirilerek daha küçük tortular ve askıda katı maddeler (AKM) uzaklaştırılmaktadır. Bu aşamaların ardından, deniz suyu kartuş filtrelerden ve torba filtrelerden geçirilerek ön arıtma tamamlanmaktadır. Ön arıtmaya tabi tutulmuş deniz suyu, TO ünitesine aktarılmakta ve burada membranlar aracılığıyla tuz ve diğer çözünmüş maddelerden arındırılmaktadır. Arıtılmış su, mineral dengenin sağlanması amacıyla dolomit filtrelerde remineralizasyon işlemine tabi tutulmaktadır. Son olarak, deniz suyu dezenfeksiyon ünitesinde klorlanmakta ve içme suyu standartlarına uygun hale getirilmektedir. Bu işlemden geçen su, 3 km uzaklıktaki depolara iletilmekte ve mevcut şebeke hattına dağıtılmaktadır.



Şekil 3.1: Deniz suyu desalinasyon tesisi akım şeması.

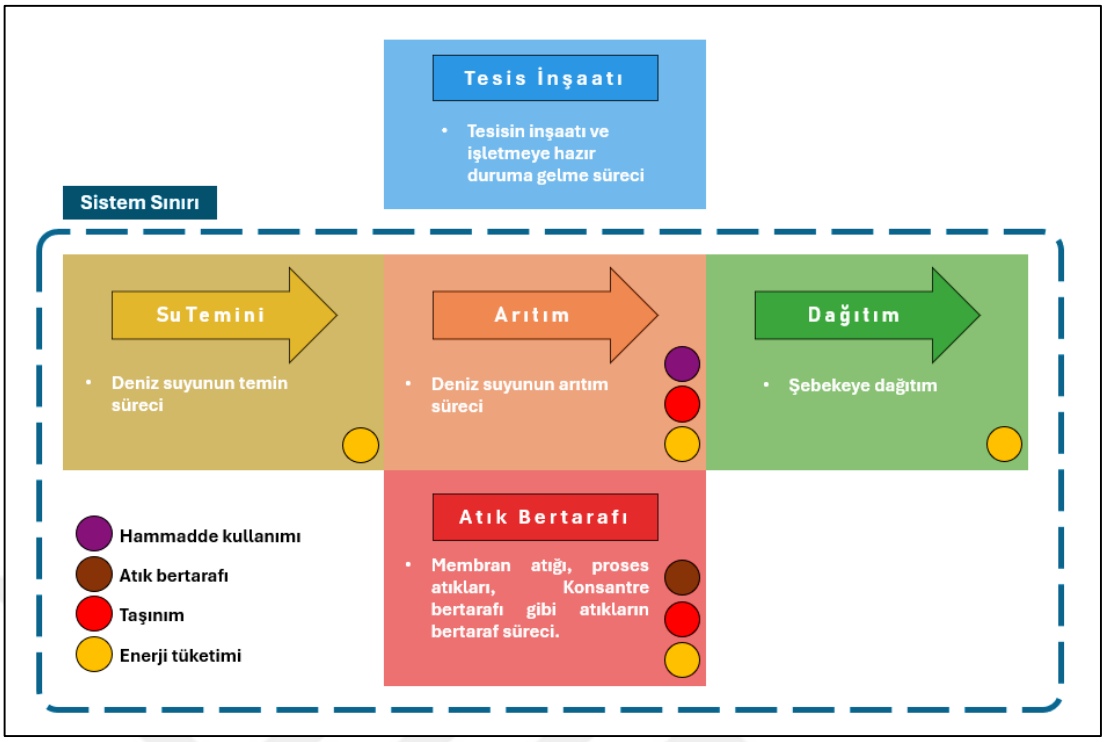
3.2. DENİZ SUYU DESALİNASYON TESİSİNE AİT YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ ÇALIŞMASI

3.2.1. Amaç ve Kapsam

Çalışmanın temel amacı, TO ile deniz suyundan içme suyu eldesi sağlayan desalinasyon tesisinin operasyonel faaliyetleri süresince oluşan çevresel etkilerin değerlendirilmesi ve bu etkileri minimize etmeye yönelik önerilerin geliştirilmesidir. Bu amaçla Yaşam Döngüsü Analizi (YDA) yöntemi kullanılacaktır. Çalışma kapsamında tesisin çevresel boyutlardaki performansı sistemli bir şekilde ortaya konulacak ve başta enerji tüketimi, hammadde kullanımı ve taşımacılık ağları gibi başlıklara ait etkinliklerin optimize edilmesine yönelik alternatif seçeneklere daha kapsamlı ve bilinçli bir tutum ile yaklaşılması mümkün kılınacaktır. Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler ve gerçek desalinasyon tesisinden alınması planlanan veriler SimaPro 9.1 yazılımı kullanılarak YDA ile modellenecek ve karşılaştırılacaktır. Laboratuvar deneyleri, tesise ait deniz suyu ile gerçekleştirilecektir.

YDA çalışmasında incelenecek tesisin sistem sınırı; deniz suyunun temini ile başlayan işletim süreci, işletim sürecinde ihtiyaç duyulan tüm girdilerin taşınım süreçleri ve kullanımları, işletim sürecinde kullanım ömrü biten filtreler ve membranlar ile konsantre gibi yan ürünlerin ve atıkların taşınımı ve bertaraf süreci ve son olarak ürünün tüketiciye ulaştırılması süreçlerini kapsamaktadır (Şekil 3.2). YDA çalışmasında esas alınan bu süreç **kapıdan kapıya** yaklaşımı olarak tanımlanmaktadır. Tesis inşası ve beraberinde işletmeye hazır durumu geliş süreci ve tesisin ömrünü yitirdikten sonraki bertaraf süreci çalışma kapsamı dışında tutulmuştur. Çalışmada fonksiyonel birim **1 m^3 arıtılmış deniz suyu** olarak belirlenmiştir, sistem sınırı dahilinde bulunan tüm girdiler ve çıktılar **1 m^3 arıtılmış deniz suyu** başına hesaplanmıştır.

YDE ile tesisin belirlenen kapsam ve sistem sınırları (Şekil 3.2) içerisinde bulunan her bir girdi ve çıktı için taşınım ve tüketim verileri belirlenmiş ve fonksiyonel birim başına hesaplanarak nicel veriler halinde yıllık bazda verilmiştir. Doğru ve etkin bir çalışma ortaya konulması için gereken tüm veriler tesisten alınmıştır, aksi bir durumun gerçekleşmesi halinde literatür verilerinden yararlanılmıştır.



Şekil 3.2: Yaşam döngüsü analizi çalışmasında belirlenen sistem sınırı.

Çalışmada kullanılan program, YDA çalışmalarında yaygın olarak kullanılan SimaPro programıdır. SimaPro programının 9.1.1.7 Educational sürümü kullanılmıştır. Programda yer alan Ecoinvent veri tabanı kütüphanesinden yararlanılmıştır. Etki analizi aşamasında SimaPro programında ReCiPe 2016 V1.04, IMPACT 2002+ ve CML-IA Baseline V3.06 etki analizi metotları kullanılarak çevresel etkiler modellenmiştir.

3.2.2. Yaşam Döngüsü Envanter Analizi (YDE)

Envanter analizi için kullanılan veriler öncelikle tesisten temin edilmiş olup diğer veriler veritabanları ve literatürden temin edilerek tesis için özelleştirilmiştir. Tesisten alınan veriler doğrultusunda yaz döneminde gerçekleşen nüfus artışı ve bunun sonucunda oluşan yüksek içme suyu talebi nedeniyle tesisin yaz ayları tam kapasitede ve 24 saat çalıştığı, kış döneminde ise var olan kapasitenin yaklaşık %20-25'ine ihtiyaç duyulduğu ve günde 8 saat çalıştığı belirtilmiştir (Tablo 3.1). Günlük üretilen içme suyu miktarları tesisten alınmış verilerdir. Tabloda verilen kWh başına elektrik birim fiyatları ise yerel elektrik dağıtıcısı firmanın verileridir. Ayrıca hesaplanan toplam içme suyu miktarı, üretilen içme suyu miktarına göre bildirilen elektrik faturaları ve tesise ham deniz suyu pompalayan ürün suyu terfi pompalarının kapasiteleri ve üretilen içme suyu miktarları arasında ilişki kurularak farklı hesaplama metotları uygulanıp iki kez doğrulanmıştır.

Tablo 3.1: Tesise ait debi hesap verileri.

Debi hesapları			
Yaz Dönemi	**Birim**	**Kış Dönemi**	**Birim**
95	gün	270,25	gün
5.616	m^3 arıtılmış deniz suyu/gün	1.123,2	m^3 arıtılmış deniz suyu/gün
234	m^3 arıtılmış deniz suyu/saat	140,4	m^3 arıtılmış deniz suyu/saat
1.740.000	TL fatura/ay	312.000	TL fatura/ay
3,3465	TL/kWh	3,37	TL/kWh
3,0821927	kWh/m^3 arıtılmış deniz suyu	2,7491125	kWh/m^3 arıtılmış deniz suyu
Metreküp başına harcanan ortalama elektrik enerjisi			
2,8357 kWh/m^3 arıtılmış deniz suyu			
Yaz Çalışma Saati		**Kış Çalışma Saati**	
	Birim		Birim
24	saat	8	saat
Yıllık üretilen toplam içme suyu miktarı			
837.064,80 m^3 arıtılmış deniz suyu/yıl			
Sistem Akı Hesabı			
5 Ünite Aktif	**Birim**	**3 Ünite Aktif**	**Birim**
9,512195	L/m^2.saat	9,512195	L/m^2.saat

Tesisin membran modüllerinin değişim periyodu 5 sene olup geri kazanım yüzdesi, TO membranlarının kullanım ömrü arttıkça azalmaktadır (Tablo 3.2). Tesisten alınan veriler doğrultusunda yaz döneminde tüm terfi pompaları çalıştırılmakta olup kış döneminde ise yalnızca 1. ve 2. ürün suyu terfi pompalarının çalıştırıldığı belirtilmiştir (Tablo 3.3).

Tablo 3.2: Tesise ait konsantre hesap verileri.

Yıl	**Geri Kazanım (%)**	**Konsantre miktarı (m^3 konsantre/yıl)**
İlk Yıl	%52	772.675,20
İkinci Yıl	%51	804.238,72
Üçüncü Yıl	%50	837.064,80
Dördüncü Yıl	%49	871.230,71
Beşinci Yıl	%48	906.820,20
Yıllık ortalama toplam konsantre miktarı		
837.064,80 m^3/yıl		

Tablo 3.3: Tesisin yıllık çektiği ham deniz suyu miktarı.

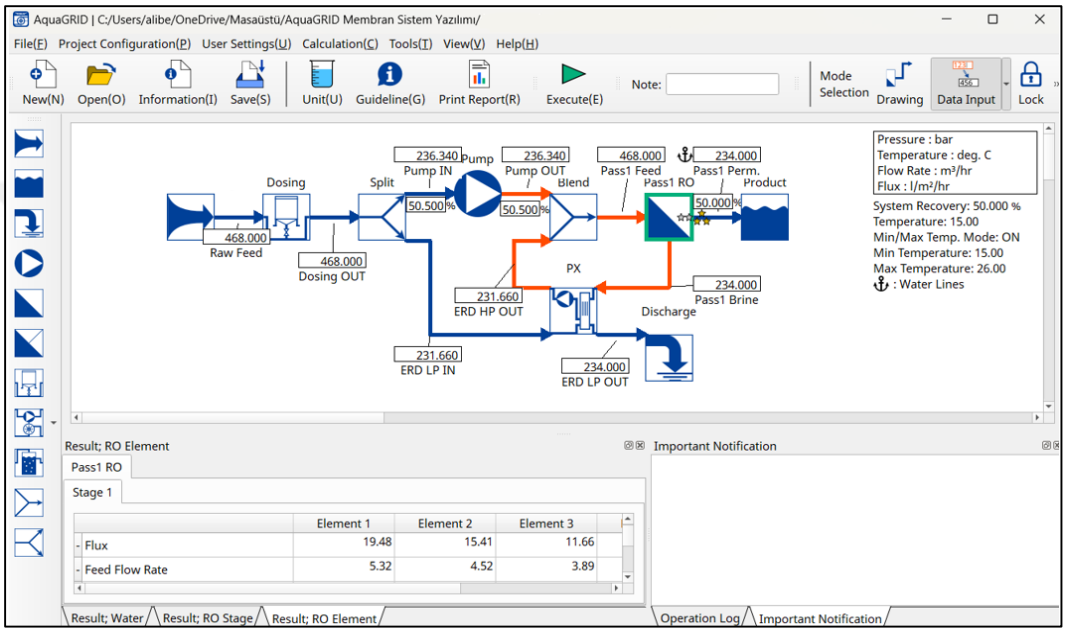
Ürün Suyu Terfi Pompaları		
No.	**Kapasite**	**Birim**
1. Pompa	167	m^3 deniz suyu/saat
2. Pompa	167	m^3 deniz suyu/saat
3. Pompa	112	m^3 deniz suyu/saat
4. Pompa	112	m^3 deniz suyu/saat
Toplam	558	m^3 deniz suyu/saat
Yıllık çekilen toplam ürün suyu miktarı		
1.994.348 m^3 deniz suyu/yıl		

Deniz suyu desalinasyon tesisi TO sistemi, tesiste kullanılan TO membranlarının üretici firmasına ait TORAY AquaGRID yazılımına (Şekil 3.3) entegre edilmiştir. Deniz suyunun konsantre kompozisyonu bu yazılım ile elde edilmiştir (Tablo 3.4).

Tablo 3.4: Toray AquaGRID yazılımı ile elde edilen konsantre kompozisyonu.

Kompozisyon		**Birim**		
Katyonlar		**mg/L**	**g/m³**	**kg/m³**
Kalsiyum	Ca^{2+}	646,26704	646,27	0,6462670
Magnezyum	Mg^{2+}	2102,3162	2102,32	2,1023162
Sodyum	Na^{+}	18084,52	18084,52	18,0845196
Potasyum	K^{+}	630,01798	630,02	0,6300180
Baryum	Ba^{2+}	0,04	0,04	0,0000400
Stronsiyum	Sr^{2+}	10,36	10,36	0,0103600
Amonyum	NH_4^{+}	0,09	0,09	0,0000900
Demir	Fe^{2+}	0	0	0
Anyonlar				
Bikarbonat	HCO_3^{-}	391,78726	391,79	0,3917873
Klorür	Cl^{-}	31697,572	31697,57	31,6975724
Sülfat	SO_4^{2-}	5092,5442	5092,54	5,0925442
Nitrat	NO_3^{-}	6,36	6,36	0,0063600
Flor	F^{-}	2,12	2,12	0,0021200
Brom	Br^{-}	0	0	0
Fosfat	PO_4^{3-}	0	0	0
Karbonat	CO_3^{2-}	21,723662	21,72	0,0217237
Yüksüz Bileşikler				
Boron	B	7,5535866	7,55	0,0075536
Silisyum Oksit	SiO_2	5,97	5,97	0,0059700
Karbondioksit	CO_2	2,2719713	2,27	0,0022720
Diğer Parametreler				
TÇM		58699,045		
pH		8,29		

Yaz ve kış aylarında ham deniz suyunun sıcaklığında meydana gelen değişimler programa yansıtılmıştır. Programda yapılan hesaplamalar tesiste kullanılan membran olan TM820V-440 ile yapılmıştır ve tesisle aynı sayıda ünite, aynı sayıda membran kabı başına modül sayısı, aynı enerji geri kazanım ünitesi (basınç değiştirici) ve aynı çalışma basıncı esas alınarak konfigüre edilmiştir. Membran yaşı 2,5 yıl ve geri kazanım oranı %50 olarak esas alınmıştır. Yazılımla elde edilen ortalama akı 9,54 L/m^2.saat olup elde Tablo 3.1'de elde edilen akı değerlerine uygundur.



Şekil 3.3: Toray AquaGRID membran sistemi tasarım yazılımına ait görsel.

Teze konu olan deniz suyu desalinasyon tesisine ait üretilen m^3 içme suyu başına enerji tüketimi ve tesis birimlerinin net enerji tüketimleri Kim ve diğ. (2011) çalışmasına ait "Energy consumption in SWRO plant as a function of plant size" adlı tablodan referans alınarak hesaplanmıştır (Tablo 3.5).

Tablo 3.5: Örnek bir ters osmoz desalinasyon tesisinde tesis büyüklüğünün bir fonksiyonu olarak enerji tüketimi (Kim ve diğ., 2011).

Prosesler	**1.135 m^3/gün**	**37.850 m^3/gün**	**189.250 m^3/gün**
TO Prosesi	2,78 kWh/m^3	2,27 kWh/m^3	2,0 kWh/m^3
Su Alma Yapısı	0,53 kWh/m^3	0,46 kWh/m^3	0,45 kWh/m^3
Ön Arıtma	0,28 kWh/m^3	0,24 kWh/m^3	0,24 kWh/m^3
Son Arıtma	0,06 kWh/m^3	0,05 kWh/m^3	0,04 kWh/m^3
Dağıtım	0,31 kWh/m^3	0,23 kWh/m^3	0,23 kWh/m^3
Toplam enerji miktarı	3,96 kWh/m^3	3,25 kWh/m^3	2,99 kWh/m^3

Tesisinin günlük kapasitesi yaz dönemi esas alınarak 5616 m^3/gün olarak alınmıştır. Mevcut kapasiteye ait enerji tüketim hesapları Kim ve diğ. 2011, çalışmasındaki 1135 m^3/gün ve 37850 m^3/gün kapasiteleri arasında korelasyon kurularak hesaplanmıştır (Tablo 3.6).

Tablo 3.6: Tesisin proseslerine ait elektrik enerjisi tüketim verileri.

Proses	**Referans Tesis (Kim ve diğ., 2011)** (Kapasite=1135 m^3 arıtılmış deniz suyu/gün)	**Çalışmada Bulunulan Tesis** (Kapasite=5616 m^3 arıtılmış deniz suyu/gün)	**Referans Tesis (Kim ve diğ., 2011)** **(Kapasite=** 37850 m^3 arıtılmış deniz suyu/gün)
	Enerji Tüketimi (kWh/m^3 arıtılmış deniz suyu)	Enerji Tüketimi (kWh/m^3 arıtılmış deniz suyu)	Enerji Tüketimi (kWh/m^3 arıtılmış deniz suyu)
Su alma yapısı	0,53	0,51929266*	0,46
Ön arıtma	0,28	0,27388152	0,24
TO Ünitesi	2,78	2,70198937	2,27
Son arıtma	0,06	0,05847038	0,05
Dağıtım	0,31	0,29776304	0,23
Toplam	3,96	3,85139697	3,25
*Çalışmadaki tesisin su alma yapısı, suyu cazibe ile temin etmekte olup enerji tüketmemektedir. Bu tüketim değeri diğer proseslere dağıtılmıştır.			

Deniz suyu desalinasyon tesisinden temin edilen elektrik faturaları ile 1 m^3 arıtılmış deniz suyu başına hesaplanan ortalama tüketim Tablo 3.6'da hesaplanan tüketim değerinden düşüktür bu nedenle proseslere ait tüketimlerin toplam tüketimdeki payı hesaplanmış ve Tablo 3.1'de verilen metreküp başına harcanan ortalama elektrik enerjisine göre uyarlanmıştır. Ek olarak tesise ait su alma yapısı ham suyu cazibe ile temin etmesinden dolayı su alma yapısına ait enerji tüketimi proseslerin toplam tüketimdeki yüzde payına göre dağıtılmıştır (Tablo 3.7).

Tablo 3.7: Tesisin proseslerine ait elektrik enerjisi nihai tüketim verileri.

Proses	**Tesis Birimleri**	**Enerji Tüketimi (kWh/m^3 arıtılmış deniz suyu)**
Su Alma Yapısı	Su Alma Yapısı	Enerji Tüketimi Yoktur
Ön Arıtma	Kaba ve İnce Izgaralar	0,233083408
	Basınçlı Kum Filtresi	
	Torba Filtre	
	Kartuş Filtre	
Ters Osmoz Ünitesi	Ters Osmoz Ünitesi	2,299493932
Son Arıtma	Dolomit Filtreler	0,049760478
	Dezenfeksiyon	
Dağıtım	Şebekeye Dağıtım	0,253407474
Toplam Tüketim		2,835745293

Konsantre ve elektrik tüketimleri hesaplarının ardından proseslere ait girdilerin fonksiyonel birim başına tüketim miktarları ve girdilerin taşınım mesafeleri hesaplanmıştır. Tesisten alınan verilere göre aylık veya yıllık bazda tüketim değerleri belirlenmiş ve fonksiyonel birim başına (1 m^3 arıtılmış deniz suyu) girdileri hesaplanmıştır (Tablo 3.8).

Tablo 3.8: Tesise ait proses girdileri ve yıllık tüketim miktarları.

Proses Girdileri	Tüketim Miktarı	Birim
Kartuş Filtre	330	adet kartuş filtre/yıl
	138,6	kg kartuş filtre/yıl
Membran Modülü	120	adet membran modülü/yıl
	4.920	m^2 membran/yıl
	2.067,6	kg membran/yıl
Antiskalant	4.968,33	L antiskalant/yıl
	5.763,26	kg antiskalant/yıl
Sodyum Tripolifosfat (STPP)	1.000	kg STPP/yıl
Etilendiamintetraasetik Asit (EDTA)	375	kg EDTA/yıl
Sitrik asit	875	kg sitrik asit/yıl
Dolomit Filtreler	1.500	kg dolomit/yıl
Sodyum Hipoklorit (NaClO)	9.472,49	L NaClO/yıl
	1.509,07	kg NaClO/yıl
Elektrik Enerjisi	2.373.702,57	kWh/yıl

Proses girdilerine ait tesisten alınan veriler şunlardır; tesiste yaz dönemi (95 gün) boyunca 5 günde bir tüm kartuş filtreler yenilenmekte olup, kış dönemi (270,25 gün) boyunca 3 ayda bir tüm kartuş filtreler yenilenmektedir. Kartuş filtreler 40 inç 5 mikron çapa sahiptir, filtrelerin tanesinin ağırlığı piyasadaki aynı özelliklere sahip ürün referans alınarak, 0,8 kg alınmıştır.

Membran modülü TORAY firmasına ait TM820V-440 membran modülüdür ve membran morfolojisi ince filmli kompozit, ayırma mekanizması gözeneksiz, geometrisi tabaka (spiral sargılı) tipi ve kimyasal yapısına göre kompozit poliamid özelliklerine sahiptir. Tesis toplam 600 membran modülüne sahiptir ve bu modüller 5 senede bir yenilenmektedir. Membran teknik föyünden bir modülün ağırlığı 17,23 kg/modül, modülün yüzey alanı ise 41 m^2/modül olarak esas alınmış olup fonksiyonel birim başına hesaplamalar bu değerler üzerinden yapılmıştır.

Antiskalant, kimyasal ürün üreten bir firmaya aittir, antiskalanta ait yoğunluk ürün föylerinden alınmış olup, yaz döneminde toplam 1000 L antiskalant kullanılırken, kış döneminde ise aylık 200 L antiskalant kullanılmaktadır. 1 yıl boyunca toplam 4.968,33 L antiskalant kullanıldığı hesaplanmıştır.

Teze konu olan desalinasyon tesisinde TO sistemi, yılda 1 defa Mayıs ayında temizlenerek bakımı yapılmaktadır. Tesiste bakım için senelik 1 ton sodyum tripolifosfat (STPP), 375 kg etilendiamintetraasetik asit (EDTA) ve 875 kg sitrik asit kullanılmaktadır.

Ön arıtmaya tabi tutulan deniz suyu TO membranları ile arıtıldıktan sonra korozifliği yüksek ve agresif bir su haline gelmektedir. TO sisteminden çıkan bu özellikteki su, insani tüketime uygun bir su elde edebilmek amacıyla, bir remineralizasyon prosesinden geçirilmektedir. Bunun için dolomit filtre prosesi kullanılmaktadır. Dolomit filtrasyon malzemesi kullanıldıkça aşındığı ve suda çözündüğü için tesiste her sene 1.500 kg dolomit takviyesi yapılmaktadır.

Tesiste yaz döneminde dezenfeksiyon amaçlı aylık 1.500 L sodyum hipoklorit (NaClO) kullanılırken, kış döneminde aylık 1.000 L NaClO tüketilmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda yıllık kullanım miktarları yıllık üretilen içme suyu miktarı olan 837.064,80 m^3/yıl'a bölünerek fonksiyonel birim olan 1 m^3 arıtılmış deniz suyu başına hesaplanmıştır (Tablo 3.9).

Tablo 3.9: Tesise ait proses girdilerinin fonksiyonel birim başına hesap verileri.

Proses Girdileri	**Fonksiyonel Birim Başına Kullanım Miktarları**	**Birim**
Kartuş Filtre	0,0001655786	kg kartuş filtre/m^3 arıtılmış deniz suyu
Membran Modülü	0,0058776810	m^2 membran/m^3 arıtılmış deniz suyu
Antiskalant	0,0068850823	kg antiskalant/m^3 arıtılmış deniz suyu
Sodyum Tripolifosfat (STPP)	0,0011946506	kg STPP/m^3 arıtılmış deniz suyu
Etilendiamintetraasetik Asit (EDTA)	0,0004479940	kg EDTA/m^3 arıtılmış deniz suyu
Sitrik asit	0,0010453193	kg sitrik asit/m^3 arıtılmış deniz suyu
Dolomit Filtreler	0,0017919760	kg dolomit/m^3 arıtılmış deniz suyu
Sodyum Hipoklorit (NaClO)	0,0137493386	kg NaClO/m^3 arıtılmış deniz suyu
Elektrik Enerjisi	2,8357452928	kWh/m^3 arıtılmış deniz suyu

Proses girdilerinin nakliye/transfer sürecinin başladığı konumlar daha doğrusu proses girdilerin satın alındığı veya temin edildiği firmalar hakkında bilgi yalnızca il bazında verilmiştir. Bilgisi elde edilebilen firmalar, kesin konumları tespit edilmek üzere iletişime geçilmiş ve lojistik rotaları öğrenilmiştir. Proses girdilerinin taşınma mesafeleri ve taşımada kullanılan araç tipleri Tablo 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.10: Tesise ait proses girdilerinin taşınım mesafeleri ve taşınıma ait araç tipleri.

Proses Girdileri	**Taşıma Mesafeleri**		**Taşımada Kullanılan Araç Tipi**
	Mesafe	**Birim**	
Membran Modülü	145	Kilometre	Arabalı feribot
	333,2	Kilometre	Tır veya kamyon tipi araç
	19115,47	Kilometre	Konteyner gemisi
Kartuş Filtre	145	Kilometre	Arabalı feribot
	179,2	Kilometre	Tır veya kamyon tipi araç
Antiskalant	145	Kilometre	Arabalı feribot
	123,2	Kilometre	Tır veya kamyon tipi araç
Sodyum Tripolifosfat (STPP)	35,2	Kilometre	Arabalı feribot
	142,2	Kilometre	Tır veya kamyon tipi araç
Etilendiamintetraasetik Asit (EDTA)	35,2	Kilometre	Arabalı feribot
	123,2	Kilometre	Tır veya kamyon tipi araç
Sitrik asit	35,2	Kilometre	Arabalı feribot
	977,2	Kilometre	Tır veya kamyon tipi araç
Dolomit	145	Kilometre	Arabalı feribot
	110	Kilometre	Tır veya kamyon tipi araç
Sodyum Hipoklorit (NaClO)	35,2	Kilometre	Arabalı feribot
	267,2	Kilometre	Tır veya kamyon tipi araç

Taşımacılık mesafelerinin hesaplanması sürecinde, denizyolu ulaşımına ilişkin mesafeler, deniz taşımacılığı hizmeti sunan firmaların belirlediği rota ve güzergâhlar dikkate alınarak oluşturulmuş ve her bir taşınım rotası bu doğrultuda detaylı biçimde hesaplanmıştır. Karayolu taşımacılığına ilişkin güzergâh belirleme işlemleri ise, Türkiye Cumhuriyeti Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan 2918 Sayılı Karayolları Trafik Kanunu ve bu kanuna bağlı Karayolları Trafik Yönetmeliği esas alınarak yürütülmüş; TIR ve kamyon tipi araçlar için yasal ve teknik açıdan uygun taşıma güzergâhları belirlenmiştir. Bu aşamaların ardından, tüm taşıma yolları için elde edilen mesafe verileri kullanılarak, ilgili proses girdilerinin her bir fonksiyonel birim başına taşınmasında harcanan taşıma mesafeleri ile bu girdiler çarpılmış ve sonuç olarak taşımacılığa özgü "kg·km" (kilogram-kilometre) değerleri hesaplanmıştır (Tablo 3.11).

Tablo 3.11: Tesise ait proses girdilerine ait taşınan yük ve taşınım mesafesi çarpımları.

Proses Girdileri	Taşınım		Taşınım Yapan Araç Tipi
	Yük*Mesafe	Birim	
Membran Modülü	0,358158600	kg membran*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Arabalı feribot
	0,820553821	kg membran*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Tır veya kamyon tipi araç
	47,21635100	kg membran*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Konteyner gemisi
Kartuş Filtre	0,024008894	kg kartuş filtre*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Arabalı feribot
	0,029671681	kg kartuş filtre*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Tır veya kamyon tipi araç
Antiskalant	0,998336900	kg antiskalant*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Arabalı feribot
	0,848242134	kg antiskalant*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Tır veya kamyon tipi araç
Sodyum Tripolifosfat (STPP)	0,042051703	kg STPP*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Arabalı feribot
	0,169879321	kg STPP*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Tır veya kamyon tipi araç
Etilendiamintetraasetik Asit (EDTA)	0,015769388	kg EDTA*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Arabalı feribot
	0,055192860	kg EDTA*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Tır veya kamyon tipi araç
Sitrik asit	0,036795200	kg sitrik asit*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Arabalı feribot
	1,021486031	kg sitrik asit*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Tır veya kamyon tipi araç
Dolomit	0,259836514	kg dolomit*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Arabalı feribot
	0,197117356	kg dolomit*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Tır veya kamyon tipi araç
Sodyum Hipoklorit (NaClO)	0,483976720	kg NaClO*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Arabalı feribot
	3,673823285	kg NaClO*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Tır veya kamyon tipi araç

Proses girdileri hesaplandıktan sonra proses çıktılarının fonksiyonel birim başına miktarları hesaplanmıştır. Tesisten alınan bilgilere göre girdi miktarı kadar kartuş filtre ve membran modülü atık olarak belediye tarafından alınmaktadır. Membran sistemine ait bakım kimyasalları kullanıldıktan sonra desalinasyon tesisi bölgesine yakın bir yerde bulunan bir kuyuya verilmekte olup atık tuz konsantresi derin deniz deşarjı yöntemi ile Marmara Denizine verilmektedir. Kaba ve ince ızgaralar günlük olarak 50-55 L hacminde bir atık oluşmaktadır, oluşan atıklar çoğunlukla kaba ızgaralardan gelmektedir ve belediye katı atık çöp aracı 10 günde bir tesise uğramakta ve 770 L hacime sahip atık konteynerini boşaltmaktadır.

Tesisten toplanan katı atıkların taşınım güzergâhı ve bertaraf yönteminin belirlenmesi amacıyla tesisin bağlı olduğu belediye ile iletişime geçilmiştir ve belediyeden alınan bilgilere göre; tesisin bulunduğu bölgeden toplanan katı atık, ilk önce katı atık aktarma merkezine taşınmaktadır. Katı atık aktarma merkezine taşınan katı atıklar, belediyeye ait atık taşıma kamyonlarına yüklenip bölgeden gemi ile il limanına ulaşmakta ve buradan belediyeye ait düzenli depolama sahasına taşınarak burada bertaraf edilmektedir.

Yıllık miktarları hesaplanan ızgara atık miktarları toplam debiye bölünerek fonksiyonel birim başına miktarları hesaplanmıştır (Tablo 3.13). Atık türleri, dağılımları T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın Marmara Denizinde yapmış olduğu Marmara Denizi Atık Yönetimi ve Deniz Çöpleri Bölgesel Eylem Planı (2021-2026) Kasım 2021 nihai raporundan alınmış olup, atık yoğunluğu ise Kuzey İrlanda Çevre Ajansı; "Northern Ireland Environment Agency Waste Density Conversion Factors" kaynağından 19 09 01 numaralı atık "Solid waste from primary filtration and screenings" ön arıtma ve ızgara atıkları olarak referans alınmıştır. Tablo 3.12'den itibaren Tablo 3.16'ya kadar atık hesapları verilmiştir.

Tablo 3.12: Tesise ait kaba ve ince ızgara ünitesi katı atıklarının verileri (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021;Northern Ireland Environment Agency, 2014).

Katı Atık Hesaplamaları			
Miktar	**Birim**	**Miktar**	**Birim**
55	L atık/gün	0,055000	m^3 atık/gün
20.088,75	L atık/yıl	20,08875	m^3 atık/yıl
Atık Birim Hacim Ağırlığı			
403,5 kg atık/m^3 atık			
Atık Türleri ve Dağılımı			
Atık Türü	**Atık Yüzdesi (%)**	**Yıllık Miktarı**	**Birim**
Plastik	76,5306	6366,66	kg atık plastik/yıl
Metal	10,2041	703,3294	kg atık metal/yıl
Lastik	4,08163	339,5552	kg atık lastik/yıl
Kumaş	4,08163	281,3318	kg atık kumaş/yıl
Cam	2,04082	203,7821	kg atık cam/yıl
Ahşap	2,04082	146,7818	kg atık ahşap/yıl
Kağıt/Karton	1,02041	64,36993	kg atık kağıt/karton/yıl
Toplam	**100**	**8105,8106**	**kg atık/yıl**

Tablo 3.13: Tesise ait kaba ve ince ızgara ünitesi katı atıklarının fonksiyonel birim başına hesap verileri.

Fonksiyonel Birim Başına Atık Miktarı		
0,00968361 kg Atık/m^3 arıtılmış deniz suyu		
Atık Türü	**Miktar**	**Birim**
Plastik	0,007410	kg atık plastik/m^3 arıtılmış deniz suyu
Metal	0,000988	kg atık metal/m^3 arıtılmış deniz suyu
Lastik	0,000395	kg atık lastik/m^3 arıtılmış deniz suyu
Kumaş	0,000395	kg atık kumaş/m^3 arıtılmış deniz suyu
Cam	0,000197	kg atık cam/m^3 arıtılmış deniz suyu
Ahşap	0,000197	kg atık ahşap/m^3 arıtılmış deniz suyu
Kağıt/Karton	0,000098	kg atık kağıt/karton/m^3 arıtılmış deniz suyu
Toplam	0,009683	kg atık/m^3 arıtılmış deniz suyu

Tablo 3.14: Tesise ait proses çıktılarının yıllık oluşum miktarları ve bertaraf yöntemleri.

Proses Çıktıları	Atık Miktarı	Birim	Bertaraf Yöntemi
Izgara Atığı	8.105,8106	kg atık/yıl	Düzenli depolama
Atık Kartuş Filtre	330	adet atık kartuş filtre/yıl	Düzenli depolama
	138,6	kg atık kartuş filtre/yıl	
Atık Membran Modülü	120	adet atık membran modülü/yıl	Düzenli depolama
	2.067,6	kg atık membran/yıl	
Atık STPP	1.000	kg atık STPP/yıl	Kuyuya deşarj
Atık EDTA	375	kg atık EDTA/yıl	Kuyuya deşarj
Atık Sitrik asit	875	kg atık sitrik asit/yıl	Kuyuya deşarj
Konsantre	837.064,80	m^3 konsantre/yıl	Derin deniz deşarjı

Tablo 3.15: Tesise ait proses çıktılarının fonksiyonel birim başına hesap verileri.

Proses Çıktıları	Fonksiyonel Birim Başına Oluşum Miktarları	Birim
Atık Plastik	0,007410927	kg atık plastik/m^3 arıtılmış deniz suyu
Atık Metal	0,000988124	kg atık metal/m^3 arıtılmış deniz suyu
Atık Lastik	0,000395249	kg atık lastik/m^3 arıtılmış deniz suyu
Atık Kumaş	0,000395249	kg atık kumaş/m^3 arıtılmış deniz suyu
Atık Cam	0,000197625	kg atık cam/m^3 arıtılmış deniz suyu
Atık Ahşap	0,000197625	kg atık ahşap/m^3 arıtılmış deniz suyu
Atık Kağıt/Karton	0,000098812	kg atık kağıt/karton/m^3 arıtılmış deniz suyu
Atık Kartuş Filtre	0,000165579	kg atık kartuş filtre/m^3 arıtılmış deniz suyu
Atık Membran Modülü	0,002470060	kg atık membran/m^3 arıtılmış deniz suyu
Atık STPP	0,001194651	kg atık STPP/m^3 arıtılmış deniz suyu
Atık EDTA	0,000447994	kg atık EDTA/m^3 arıtılmış deniz suyu
Atık Sitrik asit	0,001045319	kg atık sitrik asit/m^3 arıtılmış deniz suyu
Konsantre	1	1 m^3 konsantre/m^3 arıtılmış deniz suyu

Fonksiyonel birimleri hesaplanan proses çıktılarının hesaplanmasının ardından bu çıktıların taşıma hesapları ile devam edilmiştir (Tablo 3.16).

Tablo 3.16: Tesise ait proses çıktılarının taşınım mesafeleri ve taşınıma ait araç tipleri.

Proses Çıktıları	Taşıma Mesafeleri		Taşımada Kullanılan Araç Tipi
	Mesafe	Birim	
Izgara Atığı	35,2	Kilometre	Arabalı feribot
	135,5	Kilometre	Tır veya kamyon tipi araç
Atık Kartuş Filtre	35,2	Kilometre	Arabalı feribot
	135,5	Kilometre	Tır veya kamyon tipi araç
Atık Membran Modülü	35,2	Kilometre	Arabalı feribot
	135,5	Kilometre	Tır veya kamyon tipi araç
Atık STPP	4,3	Kilometre	Tır veya kamyon tipi araç
Atık EDTA	4,3	Kilometre	Tır veya kamyon tipi araç
Atık Sitrik asit	4,3	Kilometre	Tır veya kamyon tipi araç
Konsantre	Taşınım yoktur		

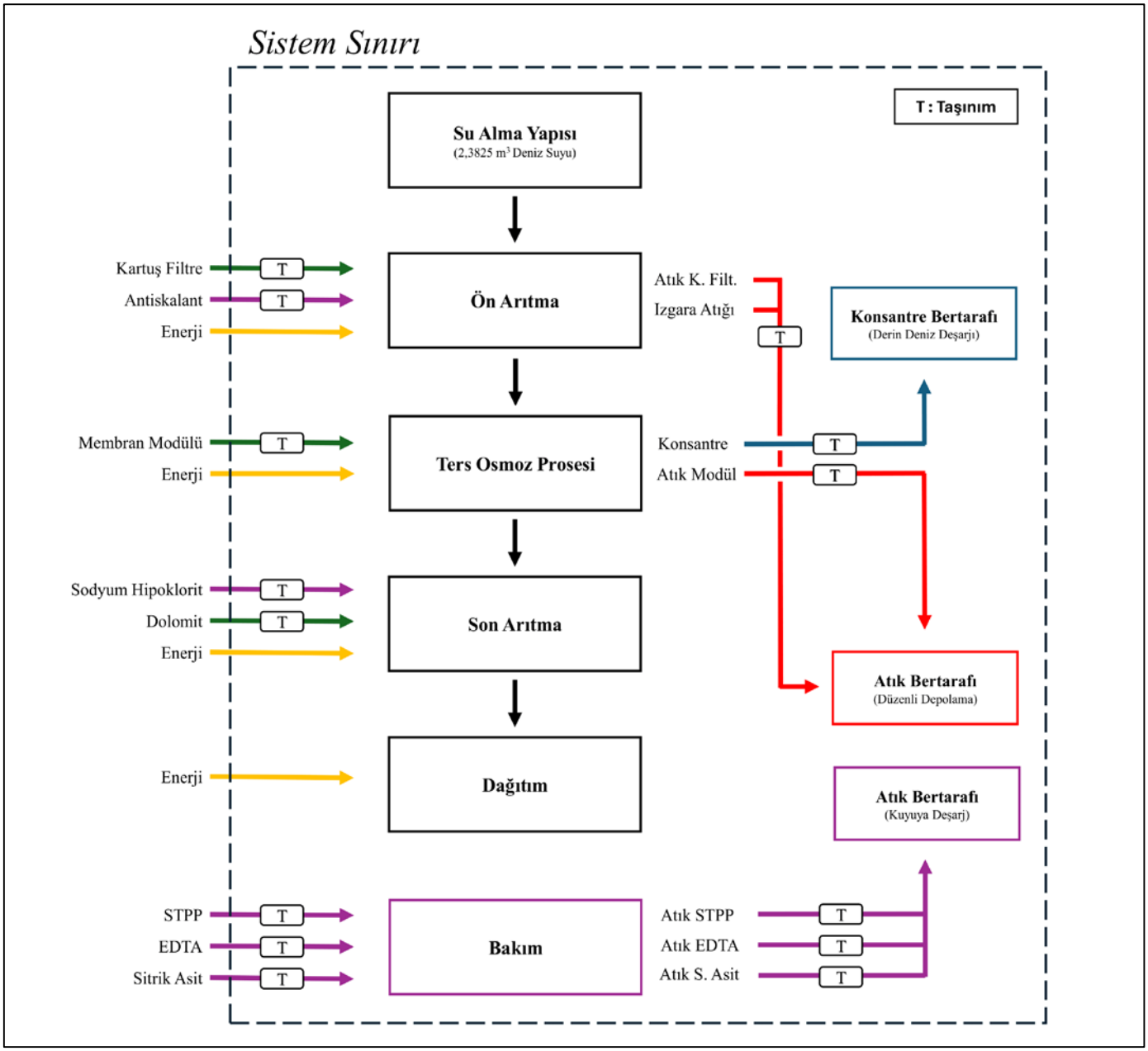
Tablo 3.17: Tesise ait proses çıktılarının taşınan yük ve taşınım mesafesi çarpımları.

Proses Girdileri	Taşınım		Taşınım Yapan Araç Tipi
	Yük*Mesafe	Birim	
Izgara Atığı	0,340863137	kg ızgara atığı*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Arabalı feribot
	1,312129407	kg ızgara atığı*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Tır veya kamyon tipi araç
Atık Kartuş Filtre	0,005828366	kg atık kartuş filtre*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Arabalı feribot
	0,022435897	kg atık kartuş filtre*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Tır veya kamyon tipi araç
Atık Membran Modülü	0,086946100	kg atık membran*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Arabalı feribot
	0,334693085	kg atık membran*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Tır veya kamyon tipi araç
Atık STPP	0,005137000	kg atık STPP*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Tır veya kamyon tipi araç
Atık EDTA	0,001926374	kg atık EDTA*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Tır veya kamyon tipi araç
Atık Sitrik Asit	0,004494873	kg atık sitrik asit*kilometre/m^3 arıtılmış deniz suyu	Tır veya kamyon tipi araç
Konsantre	Taşınım yoktur		

Envanter analizi ve etki analizi çalışmaları için bu projede ele alınan desalinasyon ile içme suyu eldesi alt proseslere bölünmüştür (Tablo 3.18). Alt prosesler ile detaylandırılmış sistem sınırı Şekil 3.4'te verilmiştir. Hammaddelerin üretimi sistem sınırının dışında tutulmuştur. Oluşan atıklar ve bu atıkların bertarafı ise sistem sınırlarına dahil edilmiştir (Tablo 3.19).

Tablo 3.18: Tesise ait çalışmada kullanılacak alt proseslerin gösterimi.

No.	Alt Prosesler
1	Su Alma Yapısı
2	Ön Arıtma
3	Ters Osmoz
4	Son Arıtma
5	Dağıtım
6	Bakım
7	Konsantre Bertarafı
8	Atık Bertarafı



Şekil 3.4: Tesise ait YDA çalışmasında belirlenen sistem sınırının görsel ifadesi.

Tablo 3.19: Fonksiyonel birim (1 m^3 arıtılmış deniz suyu) başına girdi ve çıktı tablosu.

Alt Prosesler	**Veriler** (Fonksiyonel Birim Başına; 1 m^3 arıtılmış deniz suyu)		
	Değer	**Birim**	
Su Alma Yapısı	2,3825491170	m^3 deniz suyu	
Ön Arıtma	2,3825491170	m^3 deniz suyu	
	0,0001655790	kg kartuş Filtre/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,0068850820	kg antiskalant/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,8779138150	kg*km/m^3 arıtılmış deniz suyu	tır veya kamyon tipi araç
	1,0223458210	kg*km/m^3 arıtılmış deniz suyu	arabalı feribot
	0,2330834080	kWh/m^3 arıtılmış deniz suyu	
Ters Osmoz Prosesi	2,3825491170	m^3 deniz suyu	
	0.0058776810	m^2 membran/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,8205538210	kg*km/m^3 arıtılmış deniz suyu	tır veya kamyon tipi araç
	0,3581586520	kg*km/m^3 arıtılmış deniz suyu	arabalı feribot
	47,216351430	kg*km/m^3 arıtılmış deniz suyu	konteyner gemisi
	2,2994939320	kWh/m^3 arıtılmış deniz suyu	
Son Arıtma	2,3825491170	m^3 deniz suyu	
	0,0017919760	kg dolomit/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,0137493390	kg NaOCl/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	3,8709406410	kg*km/m^3 arıtılmış deniz suyu	tır veya kamyon tipi araç
	0,7438132350	kg*km/m^3 arıtılmış deniz suyu	arabalı feribot
	0,0497604780	kWh/m^3 arıtılmış deniz suyu	
Dağıtım	2,3825491170	m^3 deniz suyu	
	3	km	dağıtım mesafesi
	0,2534074740	kWh/m^3 arıtılmış deniz suyu	
Bakım	0,0011946506	kg STPP/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,0004479940	kg EDTA/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,0010453193	kg sitrik asit/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	1,2465582120	kg*km/m^3 arıtılmış deniz suyu	tır veya kamyon tipi araç
	0,0946163000	kg*km/m^3 arıtılmış deniz suyu	arabalı feribot
Konsantre Bertarafı	1,3825491170	m^3 konsantre/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,0075536000	kg boron/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,6462670000	kg kalsiyum/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,0217237000	kg karbonat/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	31,697572400	kg klorür/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,0021200000	kg flor/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,3917873000	kg bikarbonat/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	2,1023162000	kg magnezyum/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,6300180000	kg potasyum/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	18,084519600	kg sodyum/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,0103600000	kg stronsiyum/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	5,0925442000	kg sülfat/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,0000400000	kg baryum/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,0000900000	kg amonyum/m^3 arıtılmış deniz suyu	
Atık Bertarafı	0,0074109274	kg atık plastik /m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,0009881237	kg atık metal /m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,0003952495	kg atık lastik /m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,0003952495	kg atık kumaş /m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,0001976247	kg atık cam/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,0001976247	kg atık ahşap/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,0000988124	kg atık kağıt/karton/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,0001655786	kg atık kartuş filtre/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,0024700597	kg atık membran /m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,0011946506	kg atık STPP/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,0004479940	kg Atık EDTA/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	0,0010453193	kg atık sitrik asit/m^3 arıtılmış deniz suyu	
	1,6808166341	kg*km/m^3 arıtılmış deniz suyu	tır veya kamyon tipi araç
	0,4336376037	kg*km/m^3 arıtılmış deniz suyu	arabalı feribot

3.2.3. Yaşam Döngüsü Etki Analizi (YDEA)

Envanter analizi sırasında belirlenen potansiyel çevresel emisyonların, insan sağlığı, ekosistemler ve doğal kaynak kullanımı üzerindeki muhtemel etkileri, SimaPro yazılımı ile ReCiPe 2016 V1.04 için orta nokta ve son nokta, IMPACT 2002+ için orta nokta ve son nokta ve CML-IA Baseline V3.06 için orta nokta prensipleri esas alınarak karakterize edilmiştir. IMPACT 2002+ ve CML-IA Baseline V3.06 çalışmanın güvenirliğini arttırmak amacıyla hassasiyet analizi için uygulanan metodlar olup, etki analizi çalışmasında esas alınan etki analizi metodu ReCiPe 2016 V1.04'dür. ReCiPe 2016 V1.04 midpoint ile 18 etki kategorisi dikkate alınmıştır: *Küresel Isınma Potansiyeli (KIP), Stratosferik Ozon Tüketimi Potansiyeli (SOTP), İyonlaşmış Radyasyon Potansiyeli (İRP), Ozon Oluşumu Potansiyeli, İnsan Sağlığı (OOP, İS), Oluşumu Potansiyeli, Karasal Ekosistemler (OOP, KE), Karasal Asidifikasyon Potansiyeli (KAP), İnce Partikül Madde Oluşumu Potansiyeli (İPMOP), Tatlı Su Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (TSSÖP), Deniz Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (DSÖP), Kara Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (KCEP), Tatlı Su Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (TSCEP), Deniz Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (DCEP), Toksisite- İnsan Sağlığı (Kanser) (T-İS (Kanser)), Toksisite - İnsan Sağlığı (Kanser Dışı) (T-İS (Kanser dışı)), Arazi Kullanımı (AK), Mineral Kaynak Kıtlığı (MKK), Fosil Kaynak Kıtlığı (FKK), Su Tüketimi (ST).* Son nokta için ise 3 etki kategorisi dikkate alınmıştır: *İnsan Sağlığı, Ekosistemler, Kaynaklar.*

ReCiPe etki analizi metodu, 2008 yılında Hollanda merkezli çeşitli araştırma kurumlarının (RIVM, Radboud Üniversitesi Nijmegen, Leiden Üniversitesi ve PRé Sustainability) ortak çalışmalarıyla geliştirilmiştir. ReCiPe metodu, çevresel etki analizinde hem orta nokta hem de son nokta düzeyinde analizler sunabilmesiyle dikkat çekmektedir. Ayrıca metod, Avrupa bölgesi yerine küresel ölçekte geçerli etki yollarını benimsemesi ve çok sayıda orta etki kategorisini içermesi nedeniyle benzer yöntemlerden ayrılmakla beraber, diğer metotlardan farklı olarak, gelecekte oluşabilecek etkileri doğrudan hesaplamaya dahil etmemekte, bunun yerine bu etkilerin yaşam döngüsü envanteri kapsamında zaten temsil edildiği varsayılmaktadır (Huijbregts ve diğ., 2016).

Küresel Isınma Potansiyeli (KIP): Sera gazlarının atmosferde birikerek Dünya'nın radyatif dengesini bozma kapasitesini temsil etmektedir. Bu potansiyel, farklı sera gazlarının 100 yıllık zaman dilimindeki etkilerini kg CO_2 eşd. cinsinden hesaplamaktadır. ReCiPe metodu, IPCC 2013 verilerini esas alarak karbon dioksit, metan ve diazot monoksit gibi gazların küresel ısınma üzerindeki görece etkilerini dikkate almaktadır. Bu etki, iklim değişikliği aracılığıyla hem ekosistemlerde bozulmaya hem de insan sağlığı üzerinde olumsuz sonuçlara yol açmaktadır (Hauschild ve diğ., 2011; Huijbregts ve diğ., 2016).

Stratosferik Ozon Tüketimi Potansiyeli (SOTP): Ozon tabakasını incelten maddelerin etkisini değerlendirmektedir. CFC'ler ve halonlar gibi kimyasallar, stratosferde ozon moleküllerini parçalayarak zararlı UV-B ışınlarının yeryüzüne ulaşmasına neden olmaktadır. Bu etki, insanlarda deri kanseri ve göz hastalıklarına, ayrıca ekosistem bozulmalarına yol açmaktadır. ReCiPe 2016 metodu, bu potansiyeli kg CFC-11 eşd. cinsinden ifade etmektedir (Hauschild ve diğ., 2011; Huijbregts ve diğ., 2016).

İyonlaşmış Radyasyon Potansiyeli (İRP) : Nükleer enerji üretimi ve radyoaktif madde salınımlarının insan sağlığı üzerindeki etkisini ölçmektedir. Radyonüklidlerin çevresel dolaşımı sonucu insanların maruz kaldığı radyasyon dozu dikkate alınmakta ve bu etki kBq Co-60 eşd üzerinden değerlendirilmektedir. ReCiPe 2016 metodu, sağlık üzerindeki etkileri analiz ederek potansiyel riskleri belirlemektedir (Hauschild ve diğ., 2011; Huijbregts ve diğ., 2016).

Ozon Oluşumu Potansiyeli, İnsan Sağlığı (OOS, İS) : Uçucu organik bileşikler (VOC'ler) ve azot oksitlerin güneş ışığıyla tepkimesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu ozon, yer seviyesinde bir hava kirletici olarak solunum yolları hastalıklarına neden olmaktadır. ReCiPe 2016 metodu, bu etkiyi kg NO_x eşd. eşdeğeri üzerinden değerlendirmektedir. Ozonun insan sağlığı üzerindeki etkisi bu kategori kapsamında analiz edilmektedir (Hauschild ve diğ., 2011; Huijbregts ve diğ., 2016).

İnce Partikül Madde Oluşumu Potansiyeli (İPMOP): Özellikle yakıt yanması sonucu ortaya çıkan hava kirleticilerin insan solunum sistemi üzerindeki olumsuz etkilerini değerlendirmektedir. Bu kirleticiler kalp-damar hastalıkları ve erken ölümlerle ilişkilidir. ReCiPe 2016 metodu, etkiyi kg PM 2.5 eşd. biriminde hesaplamaktadır (Hauschild ve diğ., 2011; Huijbregts ve diğ., 2016).

Oluşumu Potansiyeli, Karasal Ekosistemler (OOP, KE): Yer seviyesinde oluşan ozon, fotosentezi azaltarak bitki büyümesini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle tarımsal verim düşmekte ve doğal ekosistemler zarar görmektedir. ReCiPe 2016 metodu, bu etkiyi kg NO_x eşd. cinsinden değerlendirmektedir (Hauschild ve diğ., 2011; Huijbregts ve diğ., 2016).

Karasal Asidifikasyon Potansiyeli (KAP): SO_2 , NO□ve NH_3 gibi gazların atmosferde asitlere dönüşerek yağış yoluyla toprağa ve suya karışmasıyla oluşmaktadır. Bu durum toprak pH'ını düşürmekte, bitki örtüsünü ve mikroorganizmaları olumsuz etkilemektedir. ReCiPe 2016 metodu, asidifikasyonu kg SO_2 eşd. üzerinden değerlendirmektedir (Hauschild ve diğ., 2011; Huijbregts ve diğ., 2016).

Tatlı Su Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (TSSÖP): Tatlı su kaynaklarına fosfor girişinin artması, aşırı alg büyümesine ve çözünmüş oksijenin azalmasına neden olmaktadır. Bu durum sucul yaşam için ölümcül sonuçlar doğurabilmektedir. ReCiPe 2016 metodu, tatlı su ötrofikasyonunu kg P eşd. üzerinden değerlendirmektedir (Hauschild ve diğ., 2011; Huijbregts ve diğ., 2016).

Deniz Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (DSÖP): Denizel sistemlerde azot bileşiklerinin birikimi, fitoplankton patlamalarına ve oksijen eksikliğine neden olmaktadır. ReCiPe 2016 metodu bu etkileri kg N eşd. üzerinden değerlendirmekte ve özellikle kıyı ekosistemlerini kapsamaktadır (Hauschild ve diğ., 2011; Huijbregts ve diğ., 2016).

Kara Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (KCEP): Tarım, sanayi ve atık yönetimi süreçlerinden kaynaklanan toksik maddelerin toprağa salımı sonucu karasal canlılar olumsuz etkilenmektedir. ReCiPe 2016 metodu, bu etkiyi kg 1,4-DCB eşd. üzerinden değerlendirmektedir (Hauschild ve diğ., 2011; Huijbregts ve diğ., 2016).

Tatlı Su Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (TSCEP): Tatlı suya karışan pestisitler ve ağır metaller gibi toksik maddeler, sucul canlı türlerinde ölüm veya üreme problemlerine yol açmaktadır. ReCiPe 2016 metodu, bu etkileri kg 1,4-DCB eşd. cinsinden değerlendirmektedir (Hauschild ve diğ., 2011; Huijbregts ve diğ., 2016).

Deniz Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (DCEP): Endüstriyel kimyasalların deniz ortamına taşınması sonucu oluşan toksik etkiler, deniz organizmalarının biyolojik yapısını bozmaktadır. ReCiPe 2016 metodu bu etkiyi de kg 1,4-DCB eşd. ile ölçmektedir (Hauschild ve diğ., 2011; Huijbregts ve diğ., 2016).

Toksisite - İnsan Sağlığı (Kanser) (T-İS): Kanserojen maddelere maruz kalmanın insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkilerini kapsamaktadır. Kimyasalların kullanım ömrü boyunca oluşturduğu risk, ReCiPe 2016 metoduyla kg 1,4-DCB eşd. üzerinden değerlendirilmektedir (Hauschild ve diğ., 2011; Huijbregts ve diğ., 2016).

Toksisite - İnsan Sağlığı (Kanser Dışı) (T-İS) (Kanser Dışı) : Kanser dışı etkiler; sinir sistemi bozuklukları, hormonal bozulmalar gibi toksik etkileri içermektedir. Bu potansiyel sağlık riski de ReCiPe 2016 metodunda kg 1,4-DCB eşd. ile ölçülmektedir (Hauschild ve diğ., 2011; Huijbregts ve diğ., 2016).

Arazi Kullanımı (AK): Arazi kullanımı, habitat kaybı, toprak bozulması ve biyoçeşitlilik üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır. ReCiPe 2016 metodu, bu etkiyi m^2 ekin eşd. birimiyle değerlendirmekte ve insan faaliyetlerinin ekosistemler üzerindeki baskısını analiz etmektedir (Hauschild ve diğ., 2011; Huijbregts ve diğ., 2016).

Mineral Kaynak Kıtlığı (MKK): Mineral kaynak kıtlığı, ekonomik önemi olan metallerin tükenme potansiyelini ifade etmektedir. Bu etki, rezerv konsantrasyonu ve ekonomik ekstraksiyon zorluğuna dayalı olarak kg Cu eşd. cinsinden değerlendirilmektedir. ReCiPe 2016 metodu, bu potansiyeli kaynakların erişilebilirliği açısından ele almaktadır (Hauschild ve diğ., 2011; Huijbregts ve diğ., 2016).

Fosil Kaynak Kıtlığı (FKK): Fosil yakıtların tükenmesi, enerji üretimi ve endüstriyel süreçler açısından kritik bir sorundur. ReCiPe 2016 metodu, fosil kaynak tüketimini kg petrol eşd. cinsinden değerlendirmekte ve ekonomik-ekolojik sürdürülebilirlik açısından önemli bulgular sunmaktadır (Hauschild ve diğ., 2011; Huijbregts ve diğ., 2016).

Su Tüketimi (ST): Su tüketimi, suyun miktar ve kalite yönünden kullanımı ile ilgilidir. Bu kategori, tatlı suyun çevresel sistemler ve insan ihtiyaçları üzerindeki baskısını ölçmektedir. ReCiPe 2016 metodu, bu etkiyi litre ya da m^3 bazında hesaplamakta ve özellikle kurak bölgelerdeki stres etkisini vurgulamaktadır (Hauschild ve diğ., 2011; Huijbregts ve diğ., 2016).

3.2.4. Hassasiyet Analizi ve Belirsizlik Analizi

Hassasiyet analizi **2** şekilde gerçekleştirilmiştir: **(1)** Ana senaryoya ait enerji tüketimi düzeyleri %10 arttırılarak ve %10 azaltılarak mevcut etki kategorilerindeki yüzde değişimler incelenmiştir. **(2)** Tez çalışmasında kullanılan etki metodu olan ReCiPe 2016 V1.04 metodu sonuçlarının kontrol edilmesi amacıyla ana senaryoya ait *Küresel Isınma Potansiyeli (KIP) (kg CO_2 eşd.), Stratosferik Ozon Tüketimi Potansiyeli (SOTP) (kg CFC-11 eşd.) ve Karasal*

Asidifikasyon Potansiyeli (KAP) (kg SO_2 eşd.) orta nokta etki kategorileri IMPACT 2002+ ve CML-IA Baseline V3.06 etki analizi metodları için de hesaplanmıştır ve karşılaştırılmıştır.

Ayrıca, YDA çalışmalarında önemli bir belirsizlik analizi metodu olan Monte Carlo metodu ReCiPe 2016 V1.04 orta nokta yaklaşımı için uygulanmıştır. %95 güven aralığında, oluşturulan sistem modeli 1000 kez rastgele değerler ile yeniden hesaplanmıştır.

IMPACT 2002+ metodu, İsviçre merkezli École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) bünyesindeki Laboratoire de Chimie Environnementale (Laboratory of Environmental Chemistry) tarafından geliştirilmiştir. Bu metodoloji, YDA alanında çevresel etkilerin karakterizasyonu amaçlamaktadır. IMPACT 2002+, özellikle insan sağlığı, ekosistem kalitesi, iklim değişikliği ve kaynak tüketimi gibi çevresel etkilerle doğrudan ilişkilidir. Geniş kapsamlı etkileri değerlendirme yeteneği sayesinde, bu yöntem enerji üretimi, kimya endüstrisi, ulaşım ve atık yönetimi gibi çevresel etkileri yüksek sektörler için oldukça uygundur (Jolliet ve diğ., 2003).

CML-IA Baseline yöntemi, Hollanda'daki Leiden Üniversitesi'ne bağlı Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden (CML) tarafından geliştirilmiş ve yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDA) kapsamında sıklıkla başvurulan bir karakterizasyon metodudur. Bu yöntem, çevresel etkileri yalnızca orta nokta (midpoint) düzeyinde analiz eder ve etki kategorilerini temel çevresel süreçlere (örneğin asidifikasyon, ötrofikasyon, toksisite) göre gruplandırmaktadır. CML-IA yöntemi, özellikle bilimsel şeffaflık ve mekanistik netlik sunması sayesinde endüstriyel üretim, enerji sistemleri, atık yönetimi ve tarımsal uygulamalar gibi geniş kapsamlı sektörlerde kullanılabilir niteliktedir. Kaynak tüketimi ve kirletici emisyonlarının farklı çevresel etkiler üzerindeki katkılarını net biçimde ayırması sayesinde karar vericilere kapsamlı bir analiz zemini sunmaktadır (Guinée ve diğ., 2002).

3.2.5. Yorumlama

Yaşam döngüsü yorumlama aşamasında hem YDE hem de YDEA çıktıları bütüncül biçimde değerlendirilmekte ve çalışmanın amacı doğrultusunda sonuçlara ulaşılmakta, öneriler geliştirilmektedir (EPA, 2006; ISO 14040:2006). Deniz suyu TO desalinasyonu ile üretilen içme suyunun YDEA sonuçlarının değerlendirilmesi ReCiPe 2016 V1.04 midpoint ve ReCiPe 2016 V1.04 endpoint olarak orta nokta metodu ile 18 etki kategorisi, son nokta metodu ile 3 etki kategorisi dikkate alınıp yorumlanmıştır.

3.3. ALTERNATİF SENARYOLAR

Türkiye'nin elektrik enerjisi üretim kaynaklarına ilişkin 2017 yılı verileri incelendiğinde; üretimin %32,8'inin kömür, %0,4'ünün sıvı yakıtlar, %37,2'sinin doğalgaz, %19,6'sının hidrolik kaynaklar ve %10'unun yenilenebilir enerji ile atıklardan sağlandığı görülmektedir (TÜİK, 2025). Bu dağılım, elektrik üretiminin yaklaşık %70'inin yenilenemeyen enerji kaynaklarına dayandığını ortaya koymaktadır. Bu durum, enerji üretiminde sürdürülebilirlik ilkeleri açısından önemli bir sorun teşkil etmektedir. Dolayısıyla, enerji ihtiyacının yenilenebilir kaynaklardan karşılanması, çevresel etkilerin azaltılması ve kaynak verimliliğinin artırılması açısından önem arz etmektedir. Bu doğrultuda, yürütülen tez çalışmasında deniz suyundan TO desalinasyon prosesiyle içme suyu üretiminin YDA'ya dayalı çevresel etkileri değerlendirilmesini takiben mevcut çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik olarak çalışmada tesisin elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla farklı enerji kaynakları senaryoları değerlendirilmiştir. Bu kapsamda; %100 şebeke, %100 kömür, %100 petrol, %100 doğalgaz, %100 rüzgar, %100 fotovoltaik, %100 hidro gibi kaynaklardan sağlanan enerji senaryoları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, fotovoltaik güneş enerjisi ile şebeke elektriği kombinasyonlarının çevresel etkileri de analiz edilmiştir. Bu analizlerde, %100 Şebeke, %90 Şebeke + %10 Fotovoltaik, %80 Şebeke + %20 Fotovoltaik, %70 Şebeke + %30 Fotovoltaik, %60 Şebeke + % 40 Fotovoltaik ve %50 Şebeke + %50 Fotovoltaik senaryoları dikkate alınarak farklı enerji paylarının çevresel etkiler üzerindeki etki değişimleri irdelenmiştir.

3.4. DENİZ SUYU İLE YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışma kapsamında TO ve nanofiltrasyon (NF) membranları ile tesis girişinden alınan deniz suyu ile arıtabilirlik çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan çapraz akışlı membran sistemi deney düzeneği (Şekil 3.5), OSMO firmasından temin edilmiş olup MF, UF, NF ve TO proseslerinin ayrı ayrı uygulanabildiği laboratuvar ölçekli bir membran sistemidir. Yüksek basınç pompası, membran hücresi, membrana girişte ve çıkışta olmak üzere iki adet manometre, süzüntü ve konsantre miktarının ölçüldüğü iki adet debimetre, hidroakümülatör, soğutma sistemi ve besleme tankı ünitelerinden meydana gelmektedir. Sistem 64 bara kadar basınç altında çalışabilmektedir. Membran hücresinin üst ve alt kapağının uzunluk, genişlik ve yüksekliği sırasıyla, 250×98×24 mm ve 224×98×18 mm'dir. Membranın konulduğu kısmın boyutları ise 224×59.8×20 mm'dir.



Şekil 3.5: Çapraz akışlı membran sisteminin gösterimi.

Sistemde kullanılan plaka tipi membranların uzunluğu 200 mm, genişliği 40 mm olup, etkili membran alanı 80 cm^2'dir. Arıtabilirlik çalışmalarında kullanılan plaka tipi ticari membranların özellikleri Tablo 3.20'de verilmiştir. Kullanılan membranlar Microdyn NADIR NP030 P membranı Microdyn'den ve BW 30 membranı Dow−FilmTech'ten temin edilmiştir.

Tablo 3.20: Çalışmalarda kullanılan membranların teknik özellikleri ve test koşulları.

Membran Malzemesi	Microdyn NADIR NP030 P (NF)	Dow−FilmTech BW 30 (TO)
	İnce Film Kompozit (TFC) Aktif Tabaka: Polisülfon (PES) Destek Tabaka: Polietilen ve Polipropilen (PE/PP)	İnce Film Kompozit (TFC) Aktif Tabaka: Poliamid (PA) Destek tabaka: Polisülfon (PES)
MWCO	~500 Da	98 Da
pH aralığı	0–14	2–11
Maksimum Sıcaklık	90^0C	90^0C
Maksimum işletme basıncı	40 Bar	41 bar
Giderme verimi (%)	%80-95 (Na_2SO_4)	%99.7 (NaCl), %99.5 ($CaCl_2$)
Test Şartları	12 bar, 25^0C	30 bar, 25^0C

Akının belirlenmesi için bilgisayara bağlı terazi ile süzüntü miktarı 1 dakika aralıklarla ağırlık cinsinden ölçülmüştür. Dakikada bir alınan tartım sonucu bir yazılım programı ile otomatik olarak bilgisayara gönderilmiştir. Bilgisayarda toplanan veriler gr/dak. cinsinden olup, deney sonunda elde edilen tüm değerler 'excel' programında düzenlenmiştir. Bu düzenleme ile akı, L/m² • saat birimine dönüştürülmüştür. Membran alanı 0,008 m^2 alınarak aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$J\left(\frac{\mathrm{L}}{\mathrm{m^2 \times saat}}\right) = \frac{\mathrm{g/dak.} \times 0.001\mathrm{L/dak.} \times 60 dak./saat}{0.008\ \mathrm{m^2}}$$

3.4.1. Deniz Suyu Karakterizasyonu

Bu çalışmada, deniz suyunun arıtma süreçlerine uygunluğunu değerlendirmek amacıyla bir karakterizasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında alınan deniz suyu numunesi üzerinde; **pH, klorür, sülfat, toplam sertlik, alkalinite, iletkenlik** gibi temel kalite parametreleri laboratuvar ortamında analiz edilmiştir.

3.4.2. Deniz Suyunun NF Membranı ile Ön Arıtımı

NF prosesi TO prosesi için bir ön arıtma prosesi olarak kullanılmıştır. NF prosesi ile tek değerlikli iyonların belli bir oranda tutularak TO prosesinin süzüntü suyu miktarı ve kalitesini arttırmak hedeflenmiştir. Bu hibrit 2 adımlı NF-TO prosesinin sonunda elde edilen NF çıkış değerleri ve NF membranına ait akı grafiği bulgularda verilmiştir. Sisteme ait deney verisi olarak; kullanılan numune hacmi 3 L olmakla beraber ham su sıcaklığı 25 ^{o}C, sistem basıncı 16 bar, debi 2 L/dk ve saf su akısı 130 L/m^2.saat'tir.

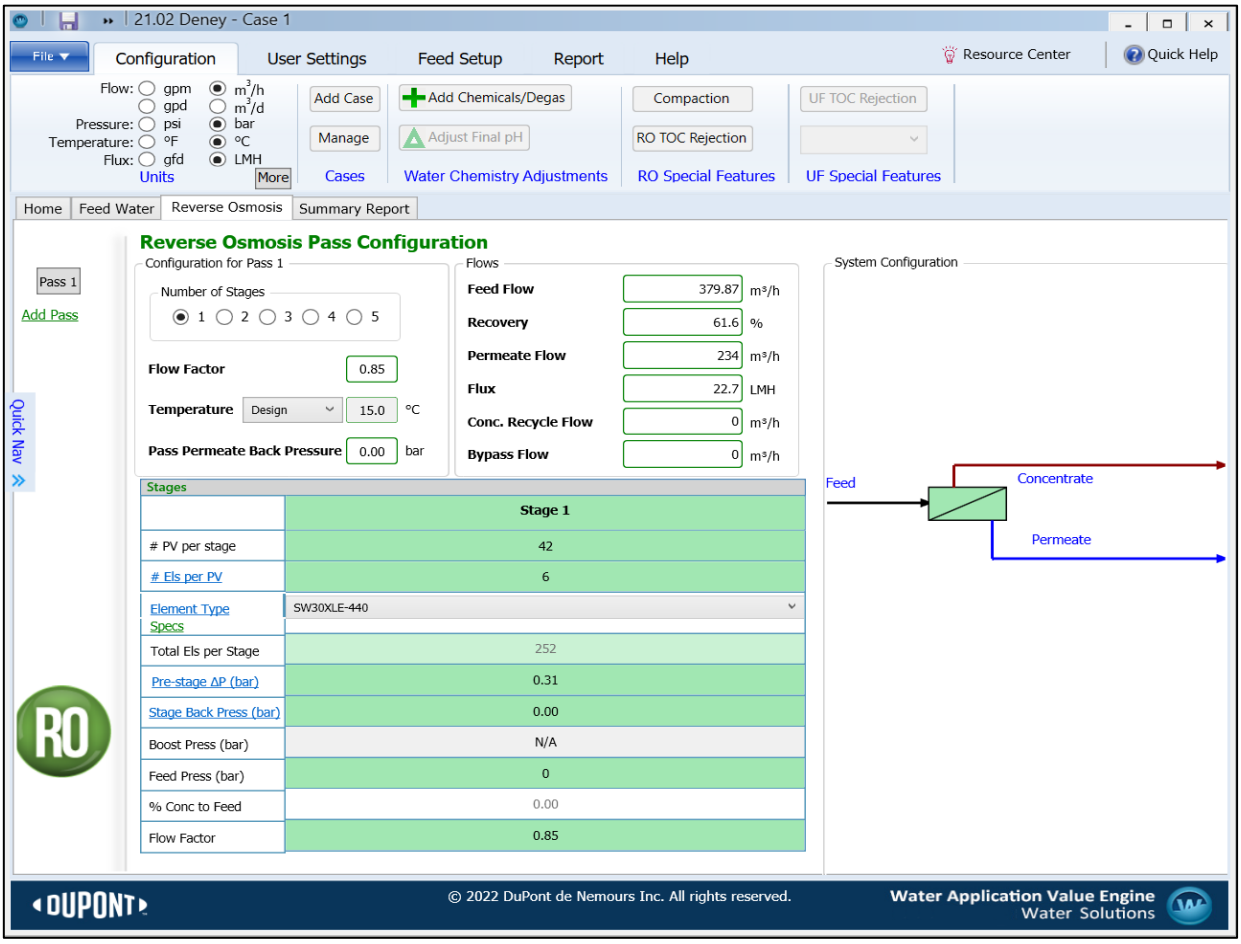
3.4.3. Deniz Suyunun TO Membranı ile Arıtımı

NF ile arıtıldıktan sonra elde edilen ön arıtıma tabi tutulmuş deniz suyu 25 ^{o}C sıcaklığa getirilmiştir ve 30 bar basınç ile ters osmoz membranından geçirilmiştir. Sistem debisi 2 L/dk, sisteme giren su hacmi 2,25 L'dir ve sistemin saf su akısı 106 L/m^2.saat'tir. TO prosesinin sonunda elde edilen TO çıkış değerleri ve TO membranına ait akı grafiği bulgularda verilmiştir.

3.4.4. Deney Sistemine ait YDA Çalışması

Çalışmanın gerçekleştirilme amacı, desalinasyon tesisinin deneysel sistemin çalışma parametreleri çalışması ile durumunda çevresel etkilerin nasıl davranış göstereceğinin belirlenmesidir. Bu kapsamda deney sistemine ait giriş suyu ve sistem çalışma parametreleri TO membranlarının temin edildiği DuPont firmasına ait "WAVE Water Treatment Design Software" adlı programa aktarılmıştır (Şekil 3.6) ve program aracılığı ile içme suyu arıtma tesisi deney sistemine ait çalışma parametreleri ile işletilme durumunun sonuçları incelenmiştir ve TO membran yüzey alanları tekrar hesaplanmıştır. Deney sistemine ait parametreler ile işletilen içme suyu arıtma tesisi daha az membran modülüne ihtiyaç duymuştur. Daha az membran modülüne ihtiyaç duyulmasının içme suyu arıtma tesisinin çevresel etkilerinde meydana getirdiği değişimlerin incelenmesi adına ek bir YDA çalışması daha yapılmıştır. Modül sayısındaki azalma fonksiyonel birim başına ihtiyaç duyulan modül sayısını düşürmüştür ve taşınımları (kg*kilometre) düşürmüştür. Membran modüllerinin ömrünü tamamlaması sonucu oluşan atık miktarı da doğrudan azalacağından, atık membran modüllerinin taşınımı ve bertaraf

miktarı azalmıştır. Bu veriler doğrultusunda içme suyu arıtma tesisinin çevresel etkilerinin azalacağı ön görülerek ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 orta nokta etki analizi metoduna envanter verileri girilerek çevresel etkiler orta nokta yaklaşımı esas alınarak hesaplanmıştır ve mevcut içme suyu arıtma tesisi ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.6: DuPont WAVE Water Treatment Design Software adlı programa ait görsel.

4. BULGULAR

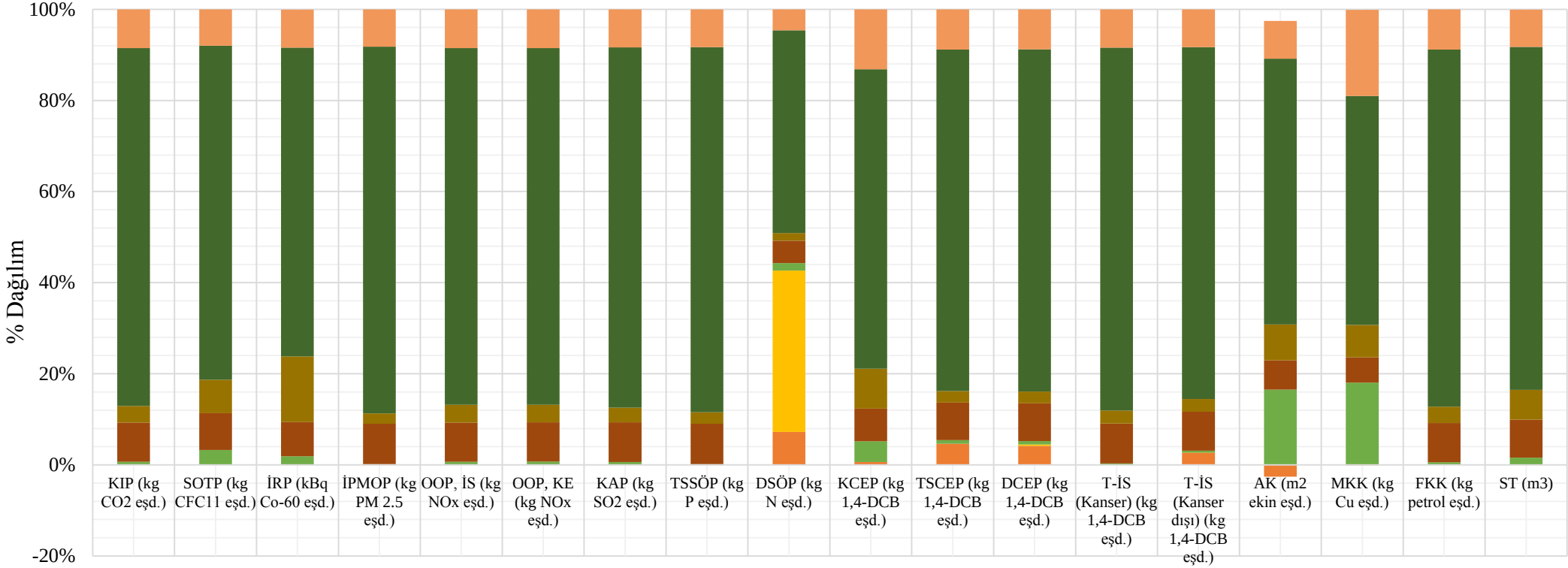
4.1. DESALİNASYON İLE İÇME SUYU ÜRETİMİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİ

Desalinasyon ile içme suyu üretiminde, kapıdan kapıya yaklaşımının içerdiği aşamaların çevresel etkilerinin belirlenmesi amacıyla YDA yaklaşımı ile modellenme çalışması yapılmıştır. Envanter verisi "Ecoinvent 3" veritabanı ile modellenmiştir ve ReCiPe 2016 V1.04 etki analizi metoduna göre orta nokta yaklaşımı dahilinde 18 etki kategorisi, son nokta yaklaşımı dahilinde 3 etki kategorisi için çevresel etkiler hesaplanmıştır. Hesaplamalardaki envanter verileri için Cut-off yaklaşımlı sistem modelleri kullanılmıştır. Orta nokta yaklaşımına ait etki analizi sonuçları Tablo 4.1 ve Şekil 4.1'de verilmiş olup, son nokta yaklaşımına ait etki analizi sonuçları Tablo 4.2 ve Şekil 4.20'de verilmiştir ve her bir etki kategorisi alt başlıklar halinde ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Başlangıç olarak, YDA etki analizi sonuçları proseslerin tüm etki kategorileri için *ortalama yüzde katkıları* ve *en yüksek katkıyı verdiği etki kategorisi* için değerlendirilmiştir. Buna göre; TO aşaması ortalama %72,15 katkı vermekte olup tüm etki kategorilerinde en yüksek katkıyı sağlayan aşamadır. TO aşaması, en yüksek katkıyı %80,52 ile İPMOP etki kategorisinde vermektedir. Ön arıtma aşaması etki kategorilerinde ortalama %9,09 katkı vermekle beraber, en yüksek katkıyı %18,96 ile MKK etki kategorisinde vermektedir. Dağıtım aşaması etki kategorilerinde ortalama %7,95 katkı vermekle beraber, en yüksek katkıyı %8,88 ile İPMOP etki kategorisinde göstermektedir. Son arıtma aşaması etki kategorilerinde ortalama %4,89 katkı vermekle beraber, en yüksek katkıyı, %14,43 ile İRP etki kategorisinde göstermektedir. Bakım aşaması etki kategorilerinde ortalama %3,01 katkı vermekle beraber, en yüksek katkıyı %18,09 ile MKK etki kategorisinde vermektedir. Konsantre bertarafı etki kategorilerinde ortlama %1,99 katkı vermekle beraber, en yüksek katkıyı %35,40 ile DSÖP etki kategorisinde vermektedir. Son olarak atık bertarafı aşaması etki kategorilerinde ortalama %0,92 katkı vermekle beraber, en yüksek etkiyi %4,64 ile DSÖP etki kategorisinde vermektedir. YDA çalışması kapsamına inşaat-yapım aşaması alınmadığı ve su alma cazibe ile gerçekleştirildiği için su alma yapısına ait herhangi bir enerji tüketimi ve hammadde kullanımı mevcut değildir, dolayısıyla bu aşamanın herhangi bir çevresel etki kategorisine katkısı bulunmamaktadır.

Tablo 4.1: Tesise ait ReCiPe Midpoint (H) V1.04 orta nokta etki analizi sonuçları.

Etki Kategorisi	Birim	Su Alma Yapısı	Ön Arıtma	Ters Osmoz	Son Arıtma	Dağıtım	Bakım	Konsantre Bertarafı	Atık Bertarafı	Toplam
Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)	kg CO_2 eşd.	0,00E+00	1,46E-01	1,35E+00	6,23E-02	1,48E-01	9,88E-03	0,00E+00	2,06E-03	1,72E+00
Stratosferik Ozon Tüketimi Potansiyeli (SOTP)	kg CFC-11 eşd.	0,00E+00	4,75E-08	4,37E-07	4,36E-08	4,81E-08	1,95E-08	0,00E+00	5,71E-11	5,96E-07
İyonlaşmış Radyasyon Potansiyeli (İRP)	kBq Co-60 eşd.	0,00E+00	1,95E-03	1,58E-02	3,36E-03	1,74E-03	4,46E-04	0,00E+00	-1,36E-05	2,33E-02
Ozon Oluşumu Potansiyeli, İnsan sağlığı (OOP,İS)	kg NO_x eşd.	0,00E+00	3,13E-04	2,88E-03	1,43E-04	3,16E-04	2,47E-05	0,00E+00	1,61E-06	3,68E-03
Ozon Oluşumu Potansiyeli, Karasal ekosistemler (OOP,KE)	kg NO_x eşd.	0,00E+00	3,15E-04	2,90E-03	1,44E-04	3,19E-04	2,51E-05	0,00E+00	1,63E-06	1,33E-02
İnce Partikül Madde Oluşumu Potansiyeli (İPMOP)	kg PM 2.5 eşd.	0,00E+00	1,09E-03	1,07E-02	3,01E-04	1,18E-03	1,91E-05	0,00E+00	-1,85E-06	3,70E-03
Karasal Asidifikasyon Potansiyeli (KAP)	kg SO_2 eşd.	0,00E+00	6,40E-04	6,04E-03	2,46E-04	6,64E-04	4,92E-05	0,00E+00	-2,61E-07	7,64E-03
Tatlı Su Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (TSSÖP)	kg P eşd.	0,00E+00	1,46E-04	1,41E-03	4,48E-05	1,56E-04	3,12E-06	0,00E+00	-6,22E-07	1,76E-03
Deniz Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (DSÖP)	kg N eşd.	0,00E+00	9,08E-06	8,77E-05	3,42E-06	9,67E-06	3,21E-06	6,98E-05	1,43E-05	1,97E-04
Kara Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (KCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	0,00E+00	8,94E-02	4,47E-01	5,97E-02	4,89E-02	3,08E-02	1,20E-21	4,41E-03	6,80E-01
Tatlı Su Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (TSCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	0,00E+00	4,33E-03	3,67E-02	1,24E-03	4,05E-03	3,84E-04	1,83E-25	2,27E-03	4,90E-02
Deniz Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (DCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	0,00E+00	5,93E-03	5,07E-02	1,74E-03	5,59E-03	4,96E-04	2,24E-04	2,81E-03	6,75E-02
Toksisite- İnsan Sağlığı (Kanser) (T-İS (Kanser))	kg 1,4-DCB eşd.	0,00E+00	8,04E-03	7,61E-02	2,68E-03	8,39E-03	3,13E-04	0,00E+00	-2,14E-06	9,55E-02
Toksisite- İnsan Sağlığı (Kanser Dışı) (T-İS (Kanser Dışı))	kg 1,4-DCB eşd.	0,00E+00	1,66E-01	1,54E+00	5,56E-02	1,70E-01	8,75E-03	2,90E-04	5,37E-02	1,99E+00
Arazi Kullanımı (AK)	m^2 ekin eşd.	0,00E+00	4,47E-04	3,15E-03	4,23E-04	3,47E-04	8,93E-04	0,00E+00	-1,38E-04	5,12E-03
Mineral Kaynak Kıtlığı (MKK)	kg Cu eşd.	0,00E+00	5,20E-05	1,38E-04	1,97E-05	1,52E-05	4,96E-05	0,00E+00	-3,22E-07	2,74E-04
Fosil Kaynak Kıtlığı (FKK)	kg petrol eşd.	0,00E+00	3,89E-02	3,45E-01	1,57E-02	3,80E-02	2,50E-03	0,00E+00	6,96E-06	4,40E-01
Su Tüketimi (ST)	m^3	0,00E+00	1,34E-03	1,23E-02	1,07E-03	1,36E-03	2,64E-04	0,00E+00	-7,10E-06	1,63E-02

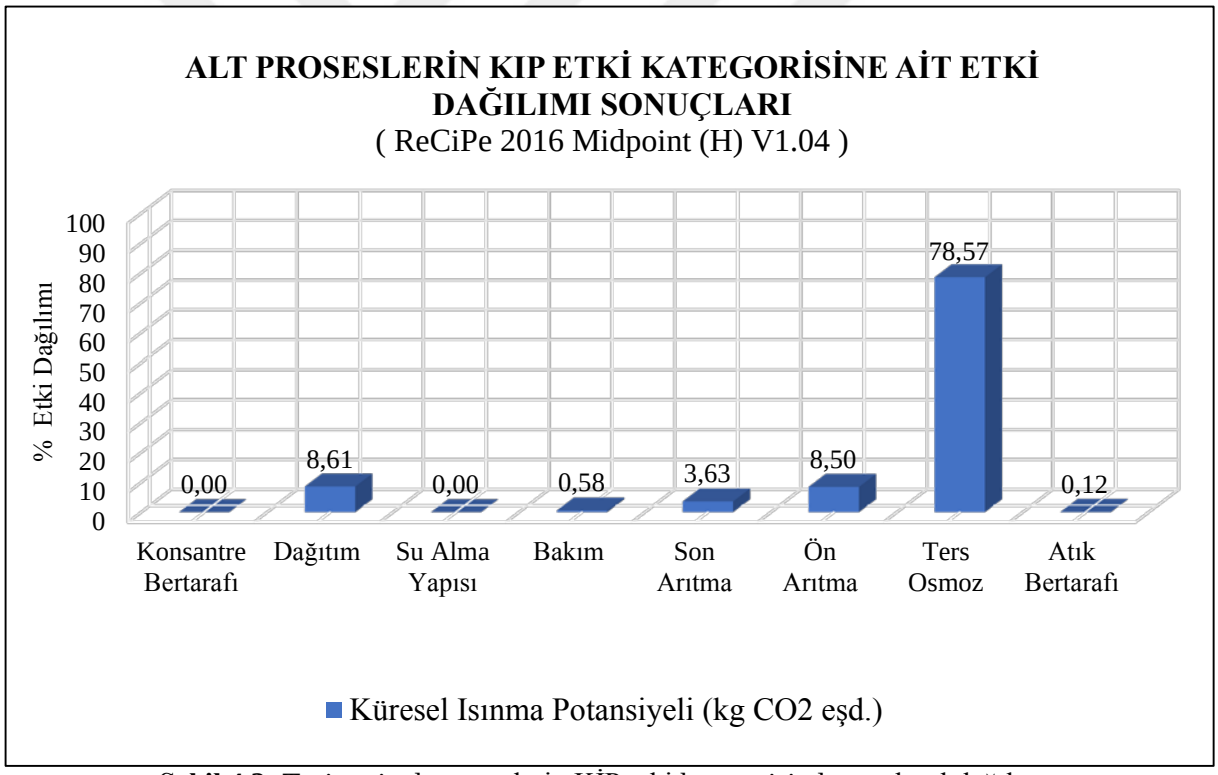


Kısaltmalar ; (KIP : Küresel Isınma Potansiyeli), (SOTP : Stratosferik Ozon Tüketimi Potansiyeli), (İRP : İyonlaşmış Radyasyon Potansiyeli), (OOP, İS : Ozon Oluşumu Potansiyeli, İnsan Sağlığı), (İPMOP : İnce Partikül Madde Oluşumu Potansiyeli), (OOP, KE : Ozon Oluşumu Potansiyeli, Karasal Ekosistemler), (KAP : Karasal Asidifikasyon Potansiyeli), (TSSÖP : Tatlı Su Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli), (DAÖP : Deniz Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli), (KCEP : Kara Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli), (TSCEP : Tatlı Su Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli), (DCEP : Deniz Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli), (T-İS (Kanser) : Toksisite - İnsan Sağlığı (Kanser)), (T-İS (Kanser dışı): Toksisite - İnsan Sağlığı (Kanser Dışı)), (AK : Arazi Kullanımı), (MKK : Mineral Kaynak Kıtlığı), (FKK : Fosil Kaynak Kıtlığı), (ST : Su Tüketimi).

Şekil 4.1: Tesise ait ReCiPe Midpoint (H) V1.04 orta nokta etki analizi sonuçları.

4.1.1. Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)

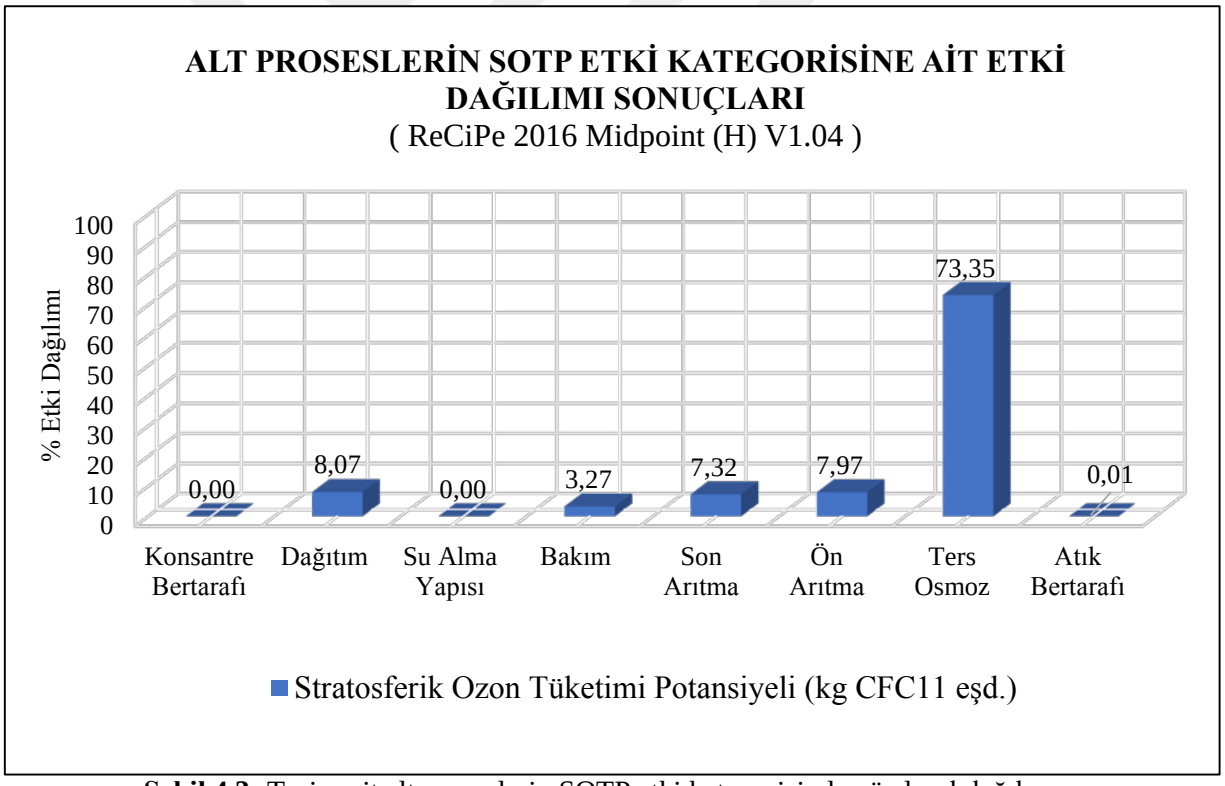
KIP etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin çevresel etki sonucu (kg CO_2 eşd.) ve üretim aşamalarının yüzdesel dağılım katkısı, Şekil 4.2'de verilmiştir. KIP etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin toplam çevresel etkisi 1,72 kg CO_2 eşd.'dir (Tablo 4.1). Etki kategorisine ait toplam çevresel etkinin %78,57 ile büyük bir bölümünü ters osmoz aşaması oluşturmaktadır. Ters osmoz aşamasının ardından etki dağılımında önemli ölçüde katkısı olan aşamalar %8,61 ile dağıtım, %8,5 ile ön arıtma ve %3,63 ile son arıtma aşamalarıdır (Şekil 4.2). Konsantre bertarafı, bakım ve atık bertarafı aşamalarının sürece yüzde katkısı %1'in altındadır. Envanter analizi sonuçlarına göre (EK 1), 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin KIP etki kategorisinde kesme kriteri %1'in üzerinde katkısı olan maddelerin başında %91,33 ile karbondioksit ve %5,07 ile metan gelmektedir.



Şekil 4.2: Tesise ait alt proseslerin KİP etki kategorisinde yüzdesel dağılımı.

4.1.2. Stratosferik Ozon Tüketimi Potansiyeli (SOTP)

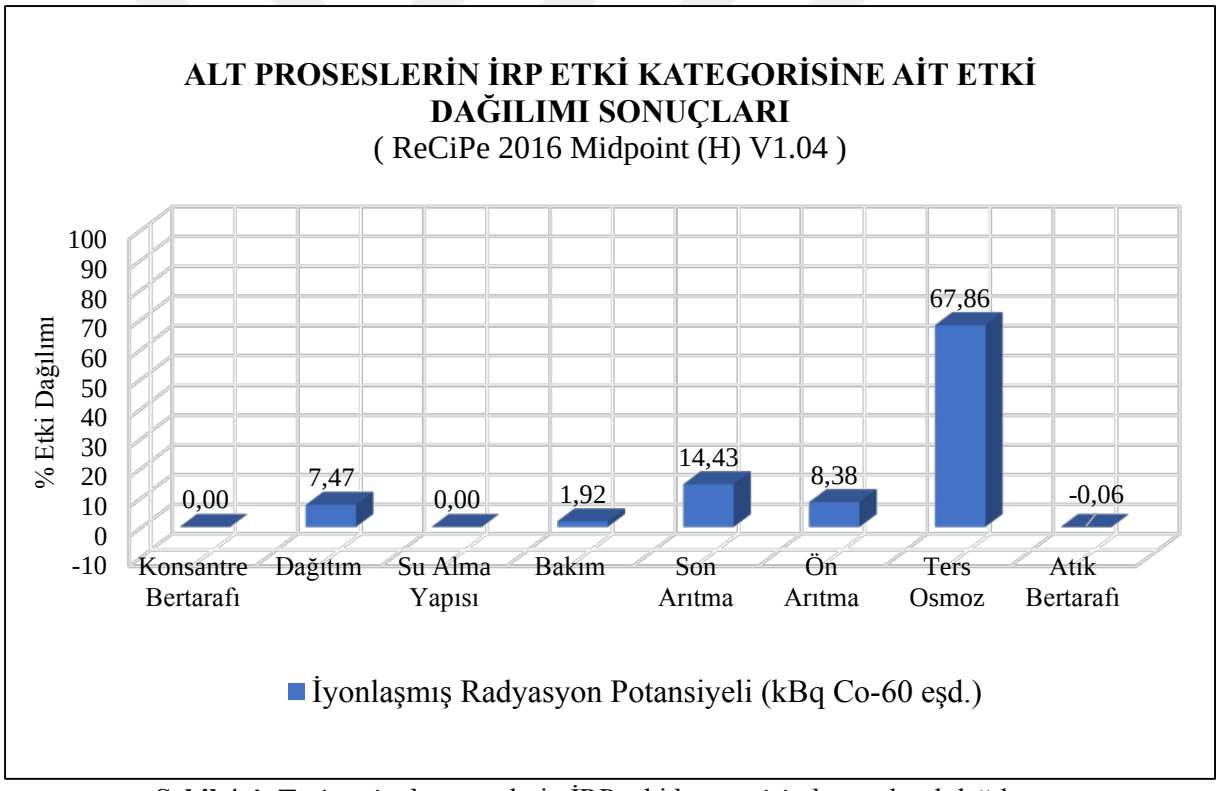
SOTP etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin çevresel etki sonucu (kg CFC-11 eşd.) ve üretim aşamalarının yüzdesel dağılım katkısı, Şekil 4.3'de verilmiştir. SOTP etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin toplam çevresel etkisi 5,96E-07 kg CFC-11 eşd.'dir (Tablo 4.1). Etki kategorisine ait toplam çevresel etkinin %73,35 ile büyük bir bölümünü ters osmoz aşaması oluşturmaktadır (Şekil 4.3). Ters osmoz aşamasının ardından %8,07 ile dağıtım, %7,97 ile ön arıtma, %7,32 ile son arıtma ve %3,27 ile bakım aşaması gelmektedir. Konsantre bertarafı ve atık bertarafı aşamalarının sürece yüzde katkısı %1'in altındadır. Envanter analizi sonuçlarına göre (EK 2), 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin SOTP etki kategorisinde kesme kriteri %1'in üzerinde katkısı olan maddelerin başında %88,20 ile diazot monoksit, %6,84 ile metan (bromoboranür, halon 1301) ve %4,12 ile metan (tetrakloro-,CFC-10) gelmektedir.



Şekil 4.3: Tesise ait alt proseslerin SOTP etki kategorisinde yüzdesel dağılımı.

4.1.3. İyonlaşmış Radyasyon Potansiyeli (İRP)

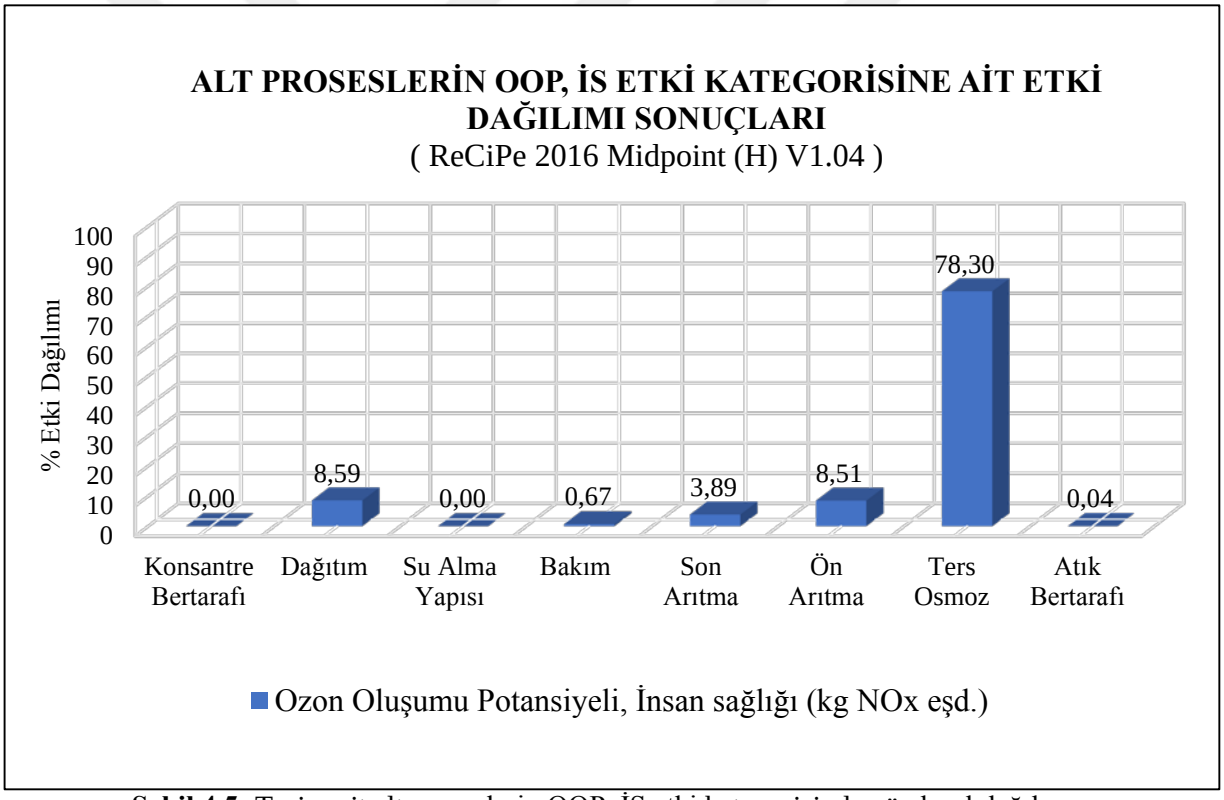
İRP etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin çevresel etki sonucu (kBq Co-60 eşd.) ve üretim aşamalarının yüzdesel dağılım katkısı, Şekil 4.4'te verilmiştir. İRP etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin toplam çevresel etkisi 2,33E-02 kBq Co-60 eşd.'dir (Tablo 4.1). Etki kategorisine ait toplam çevresel etkinin %67,86 ile büyük bir bölümünü ters osmoz aşaması oluşturmaktadır (Şekil 4.4). Ters osmoz aşamasının ardından %13,43 ile son arıtma, %8,38 ile ön arıtma, %7,47 ile dağıtım ve %1,92 ile bakım aşaması gelmektedir. Konsantre bertarafı ve atık bertarafı aşamalarının etkisi %1'in altındadır. Envanter analizi sonuçlarına göre (EK 3), 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin İRP etki kategorisinde kesme kriteri %1'in üzerinde katkısı olan maddelerin başında %93,02 ile radon-222 ve %5,20 ile karbon-14 gelmektedir.



Şekil 4.4: Tesise ait alt proseslerin İRP etki kategorisinde yüzdesel dağılımı.

4.1.4. Ozon Oluşumu Potansiyeli, İnsan Sağlığı (OOP, İS)

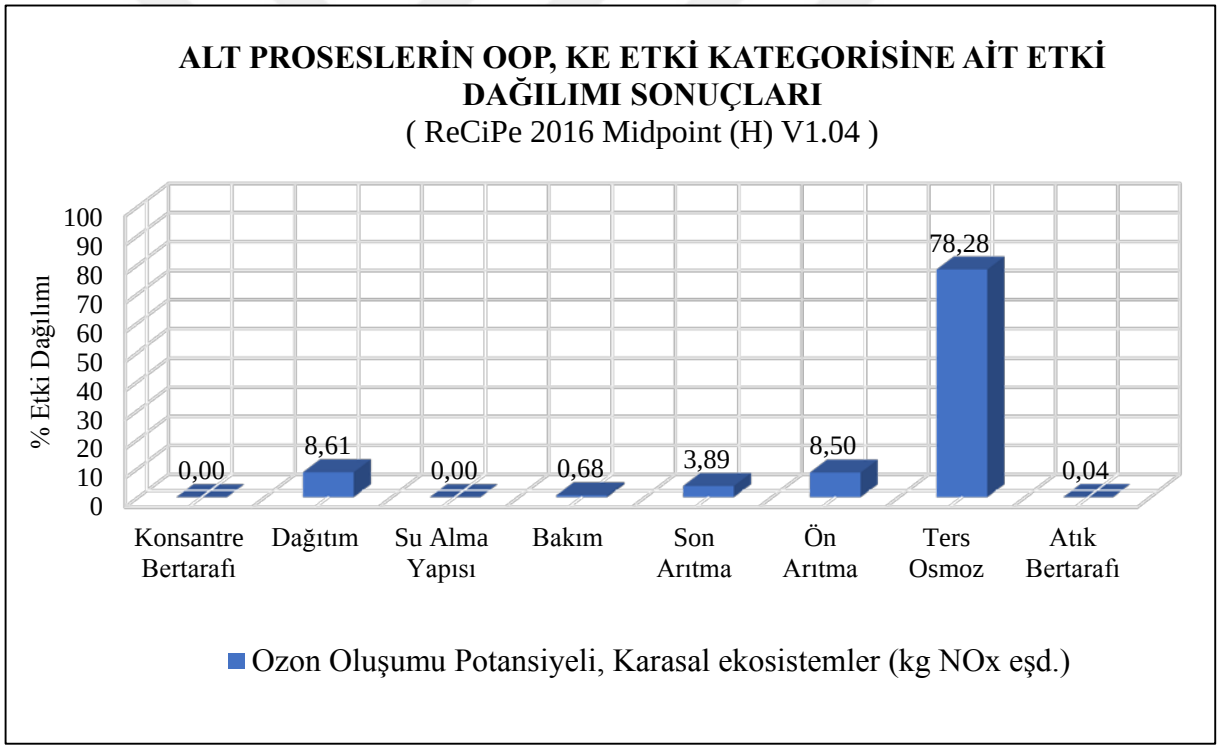
OOP,İS etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin çevresel etki sonucu (kg NO_x eşd.) ve üretim aşamalarının yüzdesel dağılım katkısı, Şekil 4.5'te verilmiştir. OOP,İS etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin toplam çevresel etkisi 3,68E-03 kg NO_x eşd.'dir (Tablo 4.1). Etki kategorisine ait toplam çevresel etkinin %78,30 ile büyük bir bölümünü ters osmoz aşaması oluşturmaktadır (Şekil 4.5). Ters osmoz aşamasının ardından %8,59 ile dağıtım, %8,51 ile ön arıtma, %3,89 ile son arıtma aşaması gelmektedir. Konsantre bertarafı, atık bertarafı ve bakım aşamalarının etkisi %1'in altındadır. Envanter analizi sonuçlarına göre (EK 4), 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin OOP,İS etki kategorisinde kesme kriteri %1'in üzerinde katkısı olan tek madde %100 ile azot oksitlerdir.



Şekil 4.5: Tesise ait alt proseslerin OOP, İS etki kategorisinde yüzdesel dağılımı.

4.1.5. Ozon Oluşumu Potansiyeli, Karasal Ekosistemler (OOP, KE)

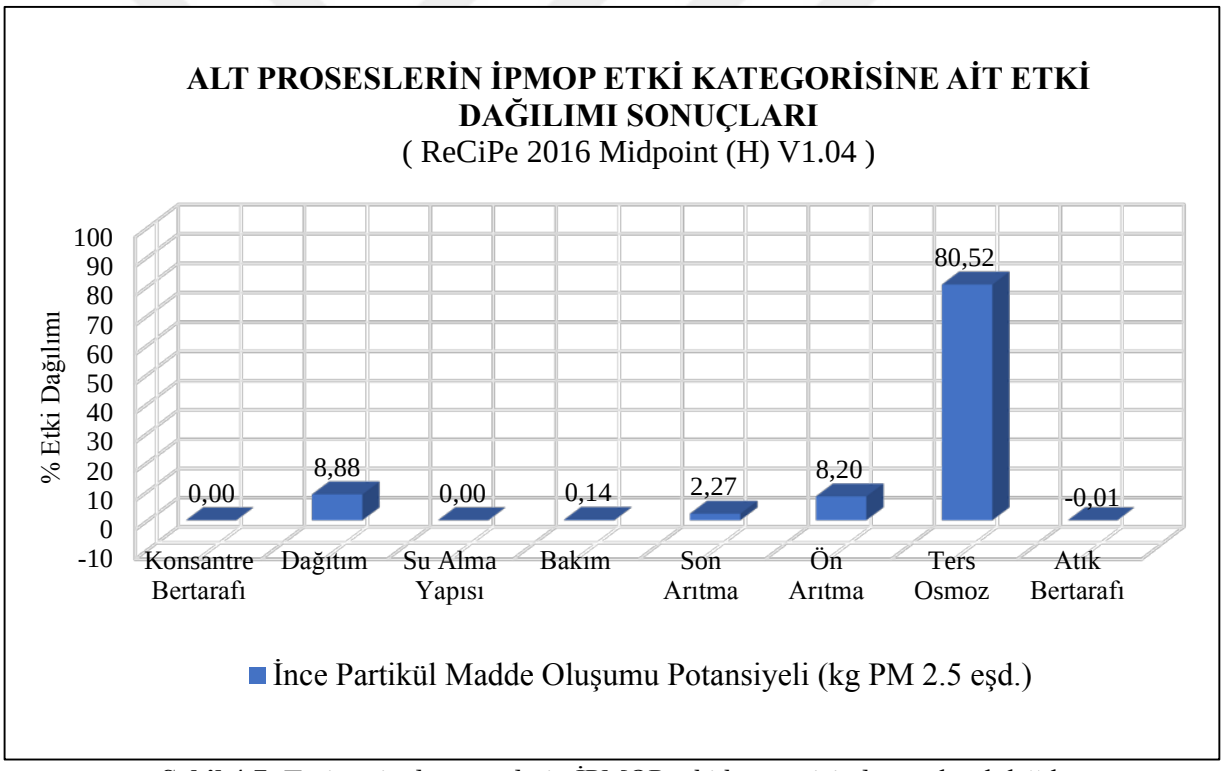
OOP, KE etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin çevresel etki sonucu (kg NO_x eşd.) ve üretim aşamalarının yüzdesel dağılım katkısı, Şekil 4.6'da verilmiştir. OOP, KE etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin toplam çevresel etkisi 3,70E-03 kg NO_x eşd.'dir (Tablo 4.1). Etki kategorisine ait toplam çevresel etkinin %78,28 ile büyük bir bölümünü ters osmoz aşaması oluşturmaktadır (Şekil 4.6). Ters osmoz aşamasının ardından %8,61 ile dağıtım, %8,50 ile ön arıtma, %3,89 ile son arıtma aşaması gelmektedir. Konsantre bertarafı, atık bertarafı ve bakım aşamalarının etkisi %1'in altındadır. Envanter analizi sonuçlarına göre (EK 5), 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin OOP, KE etki kategorisinde kesme kriteri %1'in üzerinde katkısı olan maddeler %99 ile azot oksitler ve %1 ile metan olmayan uçucu organik bileşiklerdir.



Şekil 4.6: Tesise ait alt proseslerin OOP, KE etki kategorisinde yüzdesel dağılımı.

4.1.6. İnce Partikül Madde Oluşumu Potansiyeli (İPMOP)

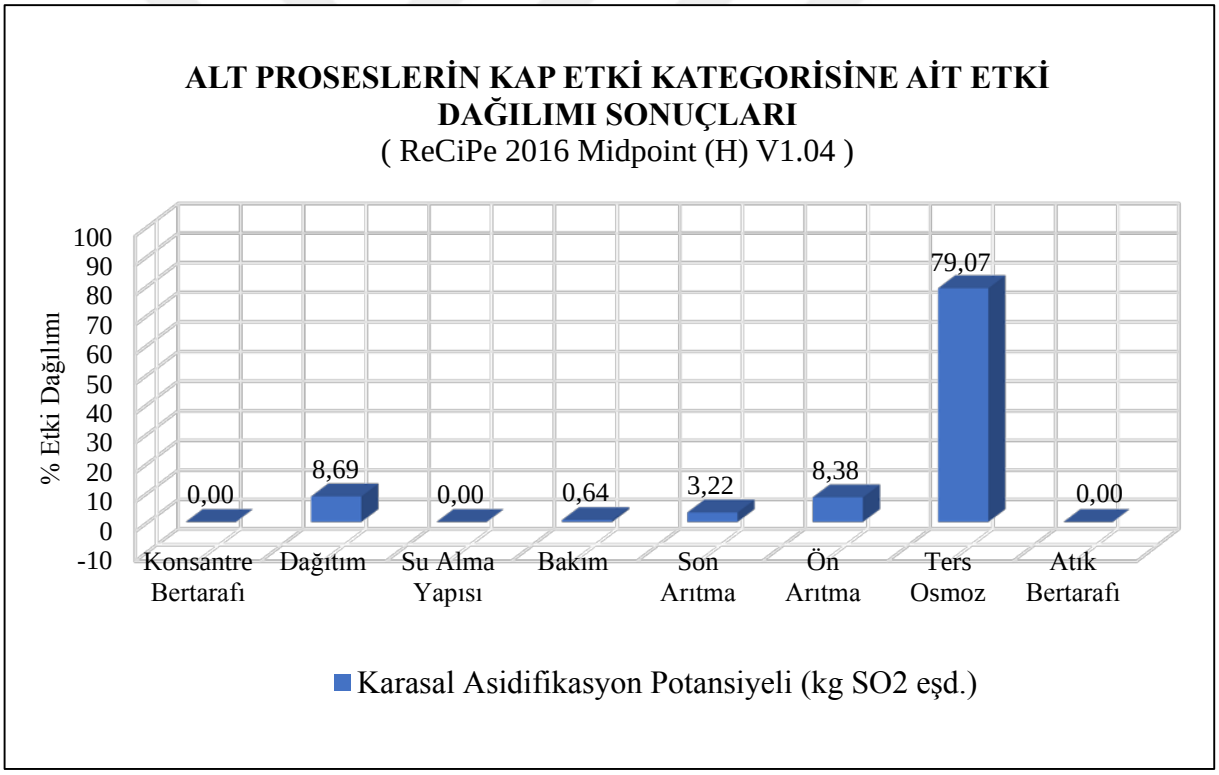
İPMOP etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin çevresel etki sonucu (kg PM 2.5 eşd.) ve üretim aşamalarının yüzdesel dağılım katkısı, Şekil 4.7'de verilmiştir. İPMOP etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin toplam çevresel etkisi 1,33E-02 kg PM 2.5 eşd.'dir (Tablo 4.1). Etki kategorisine ait toplam çevresel etkinin %80,52 ile büyük bir bölümünü ters osmoz aşaması oluşturmaktadır (Şekil 4.7). Ters osmoz aşamasının ardından %8,88 ile dağıtım, %8,20 ile ön arıtma, %2,27 ile son arıtma aşaması gelmektedir. Konsantre bertarafı, atık bertarafı ve bakım aşamalarının etkisi %1'in altındadır. Envanter analizi sonuçlarına göre (EK 6), 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin İPMOP etki kategorisinde kesme kriteri %1'in üzerinde katkısı olan maddeler %2,8 ile azot oksitler, %13,18 ile kükürt dioksit ve %82,97 ile <2.5 µm partiküllerdir.



Şekil 4.7: Tesise ait alt proseslerin İPMOP etki kategorisinde yüzdesel dağılımı.

4.1.7. Karasal Asidifikasyon Potansiyeli (KAP)

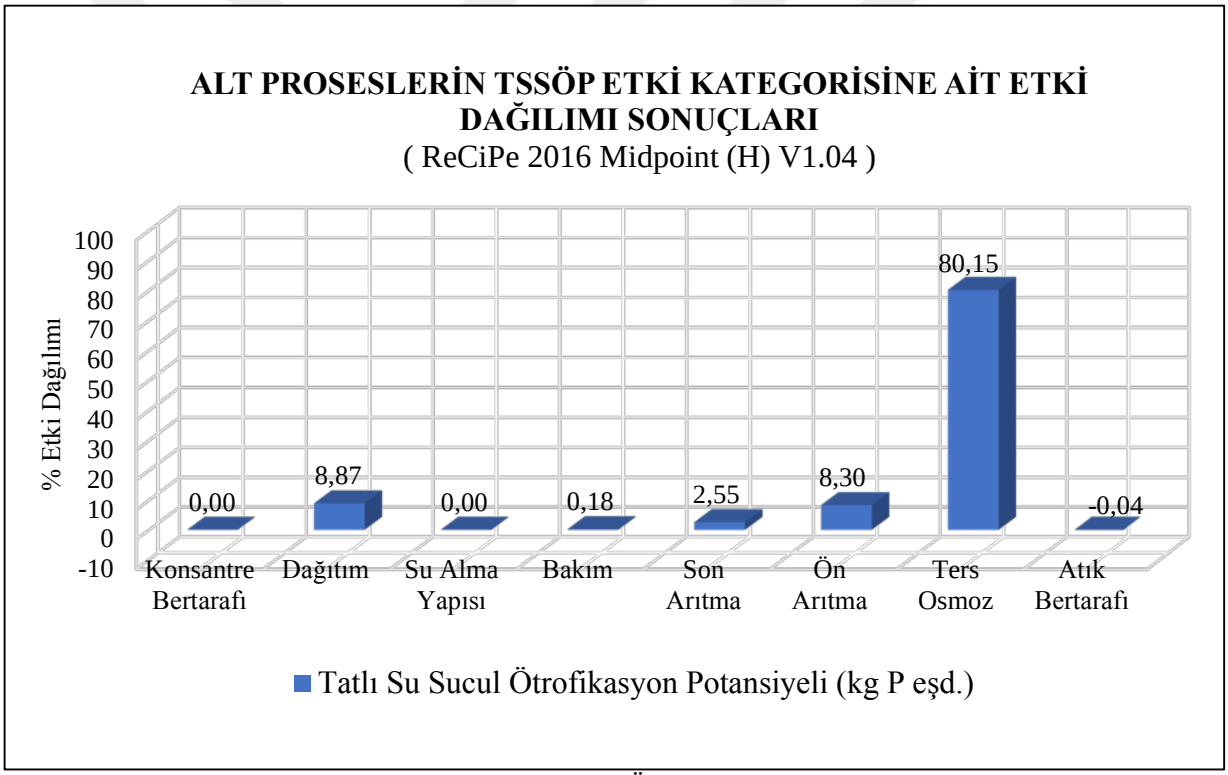
KAP etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin çevresel etki sonucu (kg SO_2 eşd.) ve üretim aşamalarının yüzdesel dağılım katkısı, Şekil 4.8'de verilmiştir. KAP etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin toplam çevresel etkisi 7,64E-03 kg SO_2 eşd.'dir (Tablo 4.1). Etki kategorisine ait toplam çevresel etkinin %79,07 ile büyük bir bölümünü ters osmoz aşaması oluşturmaktadır (Şekil 4.8). Ters osmoz aşamasının ardından %8,69 ile dağıtım, %8,38 ile ön arıtma ve %3,22 ile son arıtma aşaması gelmektedir. Konsantre bertarafı, atık bertarafı ve bakım aşamalarının etkisi %1'in altındadır. Envanter analizi sonuçlarına göre (EK 7), 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin KAP etki kategorisinde kesme kriteri %1'in üzerinde katkısı olan maddeler %15,93 ile azot oksitler ve %80,79 ile kükürt dioksitdir.



Şekil 4.8: Tesise ait alt proseslerin KAP etki kategorisinde yüzdesel dağılımı.

4.1.8. Tatlı Su Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (TSSÖP)

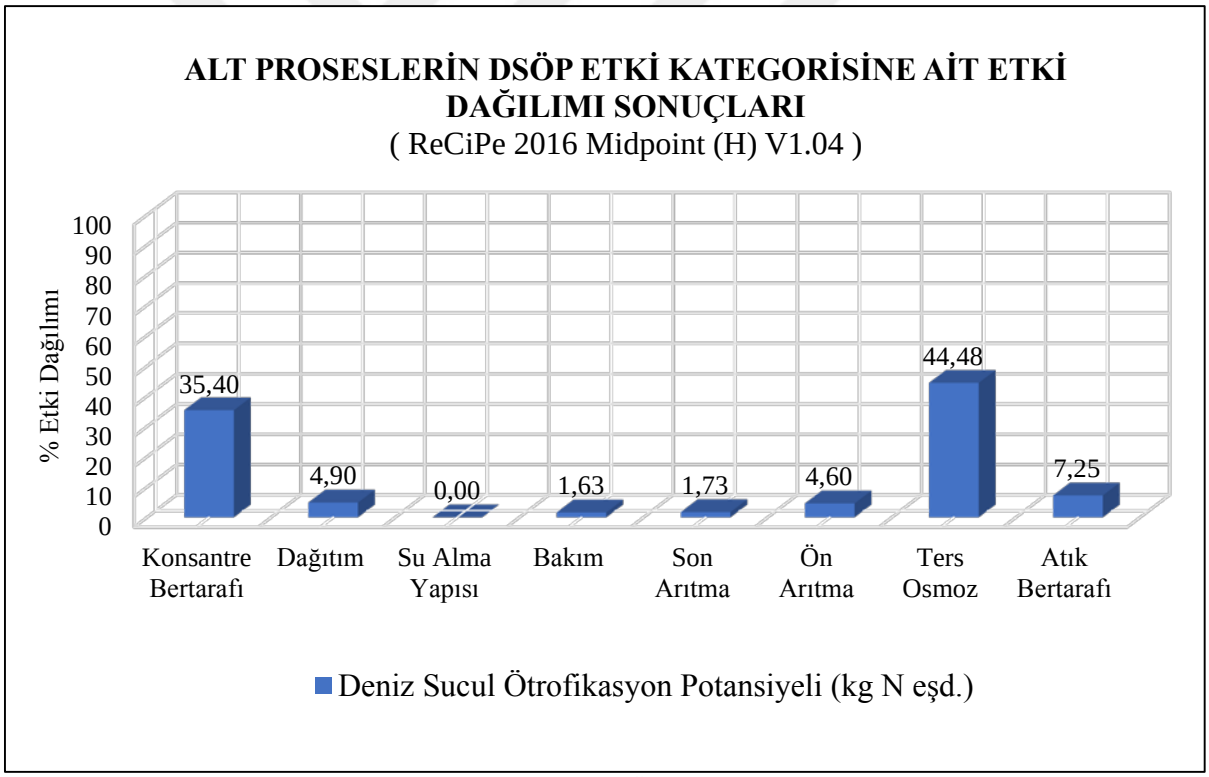
TSSÖP etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin çevresel etki sonucu (kg P eşd.) ve üretim aşamalarının yüzdesel dağılım katkısı, Şekil 4.9'da verilmiştir. TSSÖP etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin toplam çevresel etkisi 1,76E-03 kg P eşd.'dir (Tablo 4.1). Etki kategorisine ait toplam çevresel etkinin %80,15 ile büyük bir bölümünü ters osmoz aşaması oluşturmaktadır (Şekil 4.9). Ters osmoz aşamasının ardından %8,87 ile dağıtım, %8,30 ile ön arıtma, %2,55 ile son arıtma aşaması gelmektedir. Konsantre bertarafı, atık bertarafı ve bakım aşamalarının etkisi %1'in altındadır. Envanter analizi sonuçlarına göre (EK 8), 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin TSSÖP etki kategorisinde kesme kriteri %1'in üzerinde katkısı olan maddeler %100 ile fosfat'dır.



Şekil 4.9: Tesise ait alt proseslerin TSSÖP etki kategorisinde yüzdesel dağılımı.

4.1.9. Deniz Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (DSÖP)

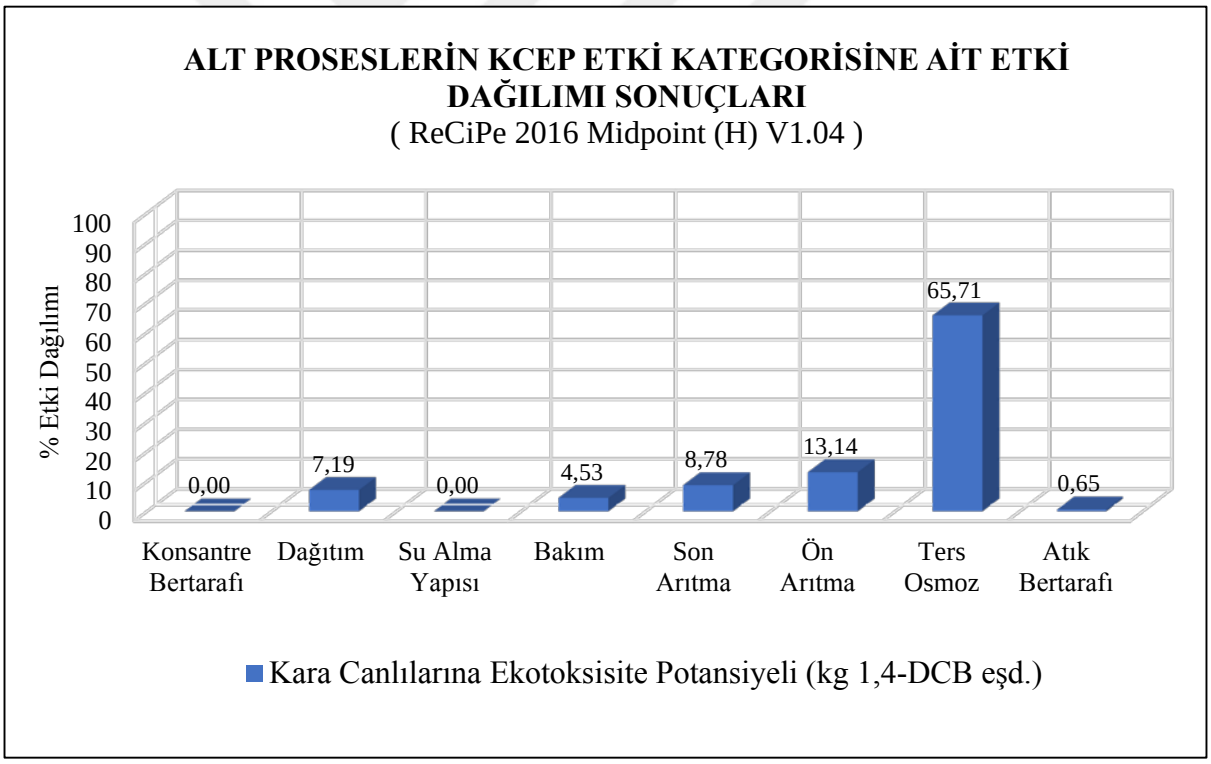
DSÖP etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin çevresel etki sonucu (kg N eşd.) ve üretim aşamalarının yüzdesel dağılım katkısı, Şekil 4.10'da verilmiştir. DSÖP etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin toplam çevresel etkisi 1,76E-03 kg N eşd.'dir (Tablo 4.1). Etki kategorisine ait toplam çevresel etkinin büyük bir bölümünü %44,48 ters osmoz ve %35,40 ile konsantre bertarafı aşaması oluşturmaktadır (Şekil 4.10). Ters osmoz ve konsantre bertarafı aşamasının ardından %7,25 ile atık bertarafı, %4,90 ile dağıtım, %4,60 ile ön arıtma, %1,73 ile son arıtma ve %1,63 bakım aşaması gelmektedir. Diğer aşamaların etkisi %1'in altındadır. Envanter analizi sonuçlarına göre (EK 9), 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin DSÖP etki kategorisinde kesme kriteri %1'in üzerinde katkısı olan maddeler %37,68 amonyum (iyon), %56,42 ile nitrat ve %4,82 ile organik bağlı azot'dur.



Şekil 4.10: Tesise ait alt proseslerin DSÖP etki kategorisinde yüzdesel dağılımı.

4.1.10. Kara Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (KCEP)

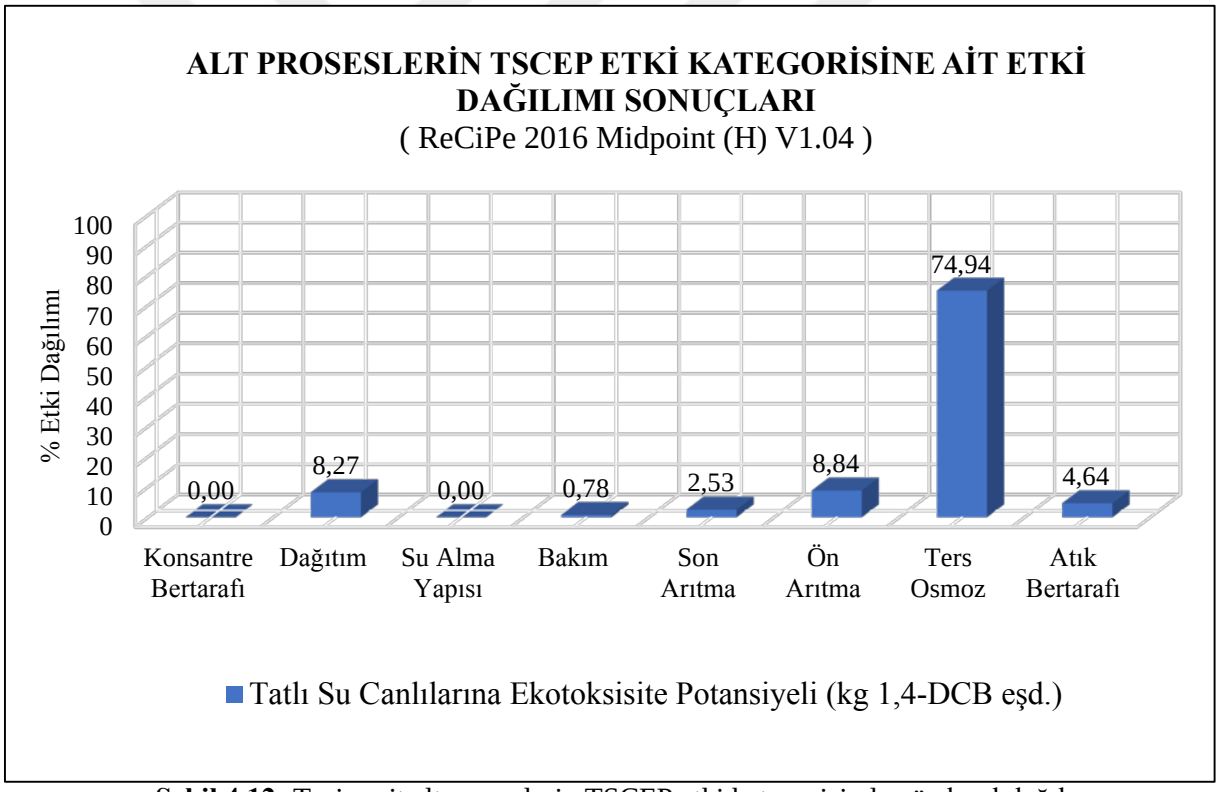
KCEP etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin çevresel etki sonucu (kg 1,4 DCB eşd.) ve üretim aşamalarının yüzdesel dağılım katkısı, Şekil 4.11'de verilmiştir. KCEP etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin toplam çevresel etkisi 6,80E-01 kg 1,4 DCB eşd.'dir (Tablo 4.1). Etki kategorisine ait toplam çevresel etkinin büyük bir bölümünü %65,71 ters osmoz aşaması oluşturmaktadır (Şekil 4.11). Ters osmoz aşamasının ardından %13,14 ile ön arıtma, %8,78 ile son arıtma, %7,19 ile dağıtım ve %4,53 ile bakım aşaması gelmektedir. Diğer aşamaların etkisi %1'in altındadır. Envanter analizi sonuçlarına göre (EK 10), 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin KCEP etki kategorisinde kesme kriteri %1'in üzerinde katkısı olan maddeler %3,33 ile antimon, %1,00 ile arsenik, %40,18 ile bakır, %19,30 ile kurşun, %13,36 ile civa, %23,50 ile nikel, %15,09 ile selenyum, %8,96 ile vanadyum ve %9,11 ile çinko'dur.



Şekil 4.11: Tesise ait alt proseslerin KCEP etki kategorisinde yüzdesel dağılımı.

4.1.11. Tatlı Su Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (TSCEP)

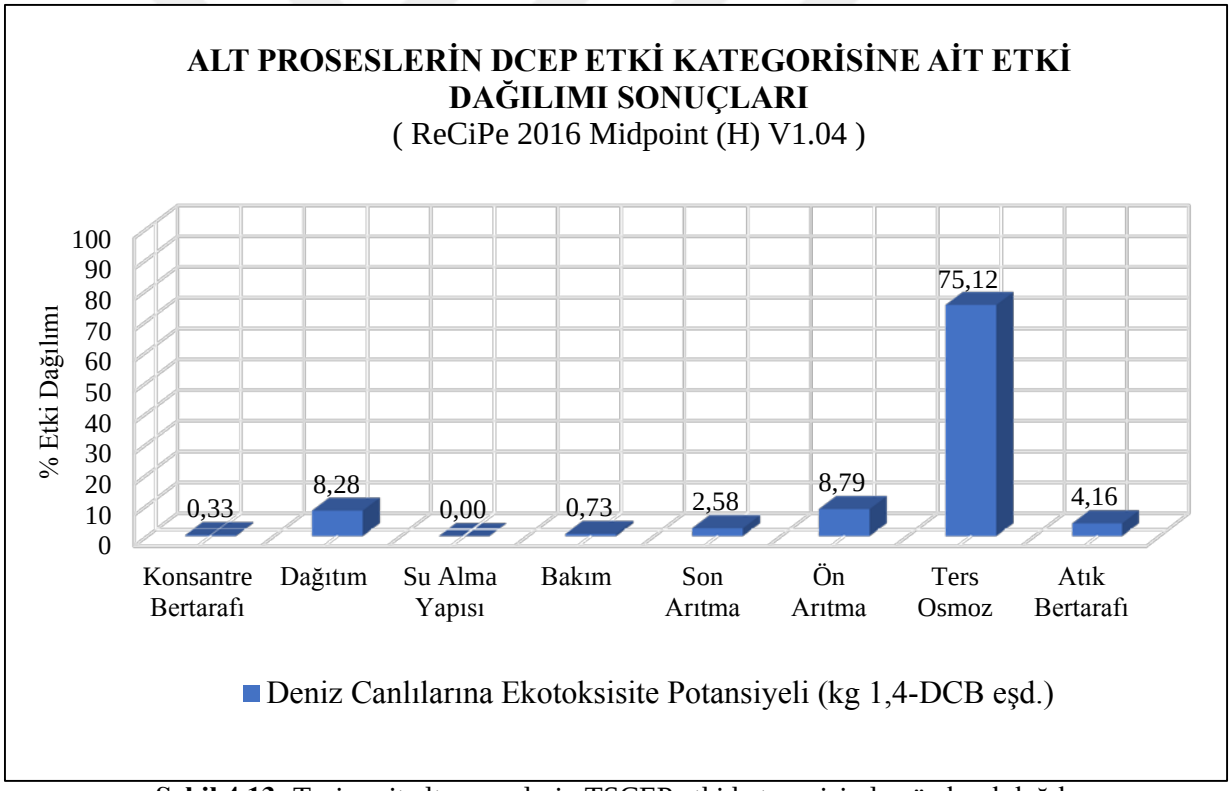
TSCEP etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin çevresel etki sonucu (kg 1,4 DCB eşd.) ve üretim aşamalarının yüzdesel dağılım katkısı, Şekil 4.12'de verilmiştir. TSCEP etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin toplam çevresel etkisi 4,90E-02 kg 1,4 DCB eşd.'dir (Tablo 4.1). Etki kategorisine ait toplam çevresel etkinin büyük bir bölümünü %74,94 ters osmoz aşaması oluşturmaktadır (Şekil 4.12). Ters osmoz aşamasının ardından %8,84 ile ön arıtma, %8,27 ile dağıtım, %4,65 ile atık bertarafı ve %2,53 ile son arıtma aşaması gelmektedir. Diğer aşamaların etkisi %1'in altındadır. (EK 11), 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin TSCEP etki kategorisinde kesme kriteri %1'in üzerinde katkısı olan maddeler %1,97 ile krom (VI), %8,21 ile bakır, %13,28 ile nikel, %5,91 ile vanadyum ve %66,69 ile çinko'dur.



Şekil 4.12: Tesise ait alt proseslerin TSCEP etki kategorisinde yüzdesel dağılımı.

4.1.12. Deniz Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (DCEP)

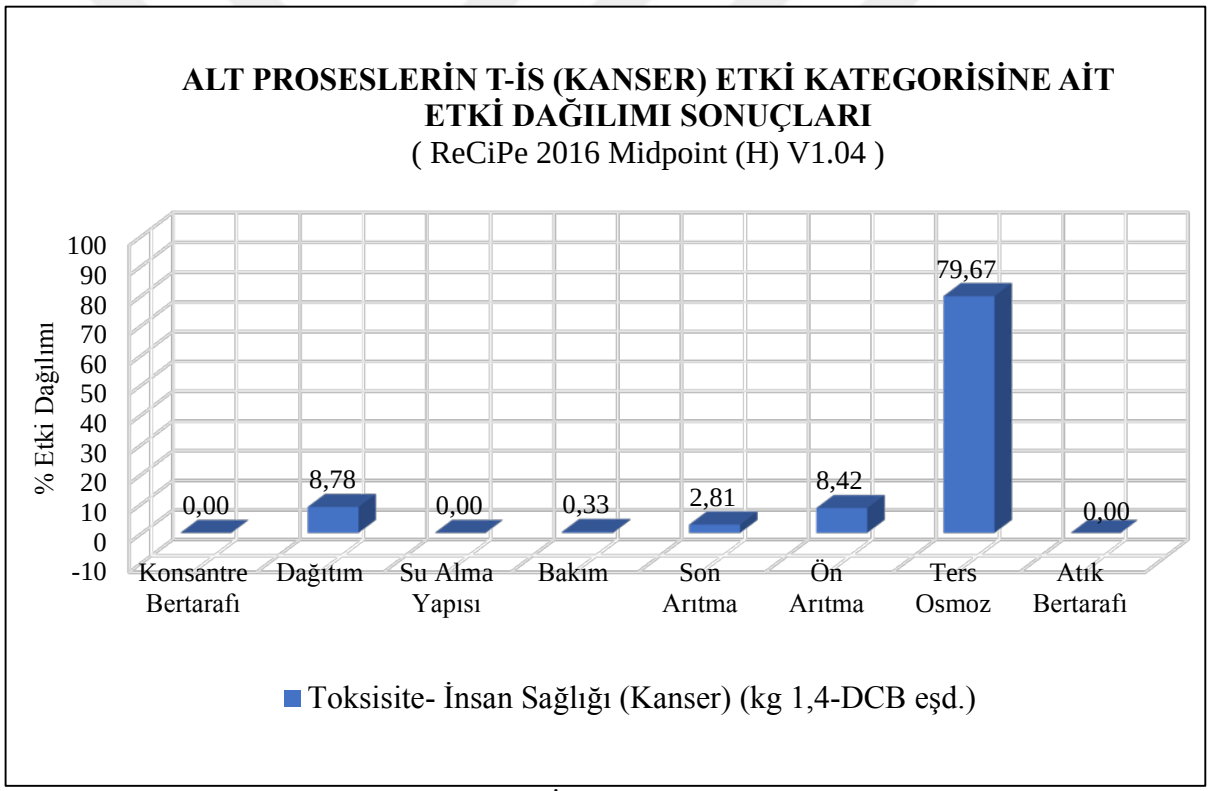
DCEP etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin çevresel etki sonucu (kg 1,4 DCB eşd.) ve üretim aşamalarının yüzdesel dağılım katkısı, Şekil 4.13'de verilmiştir. DCEP etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin toplam çevresel etkisi 6,75E-02 kg 1,4 DCB eşd.'dir (Tablo 4.1). Etki kategorisine ait toplam çevresel etkinin büyük bir bölümünü %75,12 ters osmoz aşaması oluşturmaktadır (Şekil 4.13). Ters osmoz aşamasının ardından %8,79 ile ön arıtma, %8,28 ile dağıtım, %4,16 ile atık bertarafı ve %2,58 ile son arıtma aşaması gelmektedir. Diğer aşamaların etkisi %1'in altındadır. Envanter analizi sonuçlarına göre (EK 12), 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin DCEP etki kategorisinde kesme kriteri %1'in üzerinde katkısı olan maddeler %2,15 ile krom (VI), %7,09 ile bakır, %11,97 ile nikel, %6,07 ile vanadyum ve %68,46 ile çinko'dur.



Şekil 4.13: Tesise ait alt proseslerin TSCEP etki kategorisinde yüzdesel dağılımı.

4.1.13. Toksisite-İnsan Sağlığı (Kanser) (T-İS (Kanser))

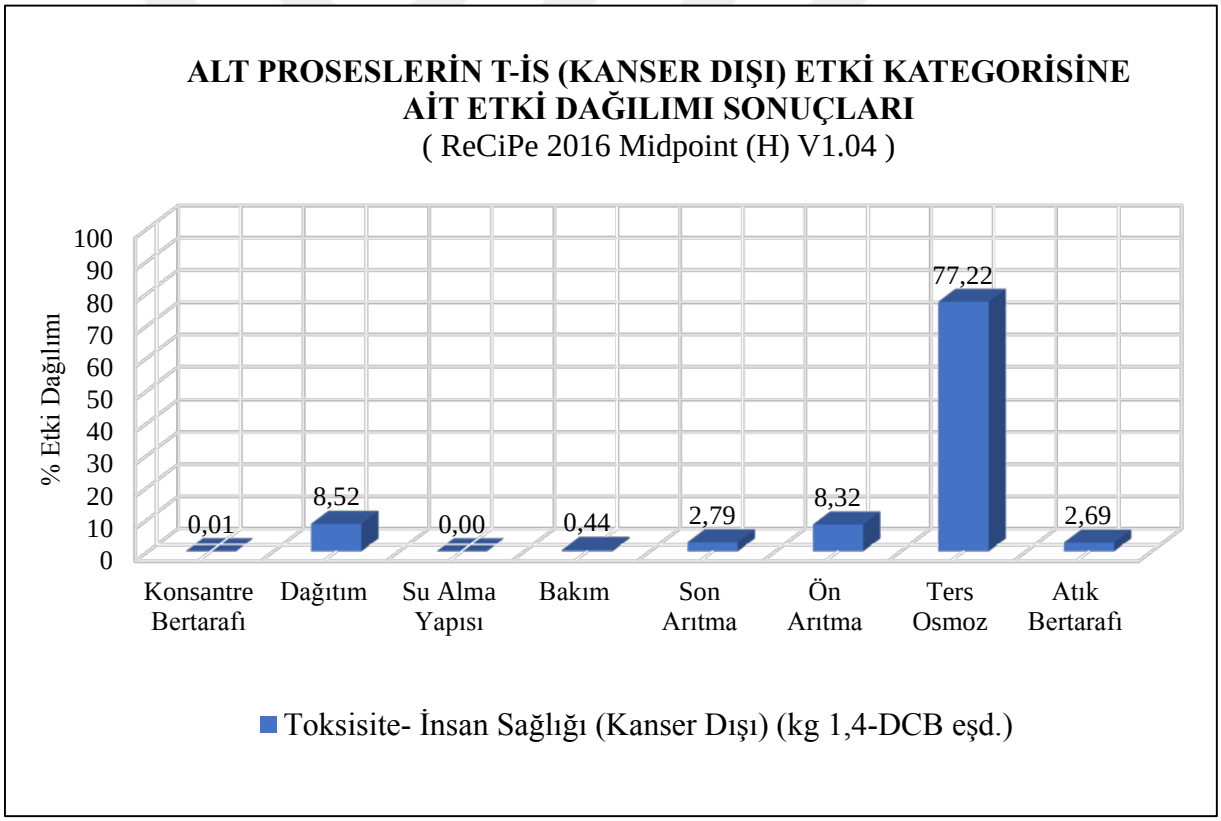
T-İS (kanser) etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin çevresel etki sonucu (kg 1,4 DCB eşd.) ve üretim aşamalarının yüzdesel dağılım katkısı, Şekil 4.14'te verilmiştir. T-İS (kanser) etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin toplam çevresel etkisi 9,55E-02 kg 1,4 DCB eşd.'dir (Tablo 4.1). Etki kategorisine ait toplam çevresel etkinin büyük bir bölümünü %79,67 ters osmoz aşaması oluşturmaktadır (Şekil 4.14). Ters osmoz aşamasının ardından %8,78 ile dağıtım, %8,42 ile ön arıtma, %2,81 ile son arıtma aşaması gelmektedir. Diğer aşamaların etkisi %1'in altındadır. Envanter analizi sonuçlarına göre (EK 13), 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin T-İS (kanser) etki kategorisinde kesme kriteri %1'in üzerinde katkısı olan maddeler %93,42 ile krom (VI), %1,77 ile arsenik ve %3,37 ile nikel'dir.



Şekil 4.14: Tesise ait alt proseslerin T-İS (Kanser) etki kategorisinde yüzdesel dağılımı.

4.1.14. Toksiste- İnsan Sağlığı (Kanser Dışı) (T-İS (Kanser Dışı))

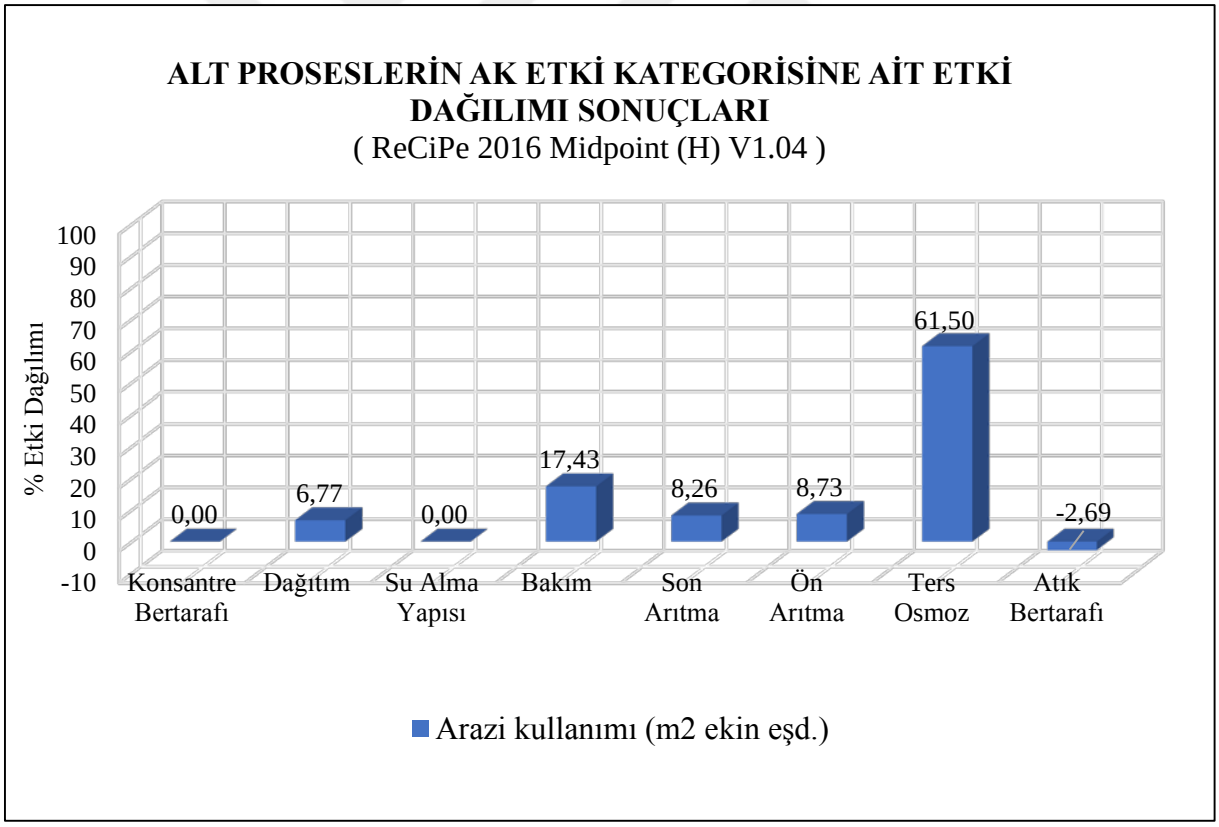
T-İS (kanser dışı) etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin çevresel etki sonucu (kg 1,4 DCB eşd.) ve üretim aşamalarının yüzdesel dağılım katkısı, Şekil 4.15'te verilmiştir. T-İS (kanser dışı) etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin toplam çevresel etkisi 1,99 kg 1,4 DCB eşd.'dir (Tablo 4.1). Etki kategorisine ait toplam çevresel etkinin büyük bir bölümünü %77,22 ters osmoz aşaması oluşturmaktadır (Şekil 4.15). Ters osmoz aşamasının ardından %8,52 ile dağıtım, %8,32 ile ön arıtma, %2,79 ile son arıtma ve %2,69 ile atık bertarafı aşaması gelmektedir. Diğer aşamaların etkisi %1'in altındadır. Envanter analizi sonuçlarına göre (EK 14), 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin T-İS (kanser) etki kategorisine kesme kriteri %1'in üzerinde katkısı olan maddeler %1,20 ile civa, %31,27 ile arsenik ve %63,77 ile çinkodur.



Şekil 4.15: Tesise ait alt proseslerin T-İS (Kanser Dışı) etki kategorisinde yüzdesel dağılımı.

4.1.15. Arazi Kullanımı (AK)

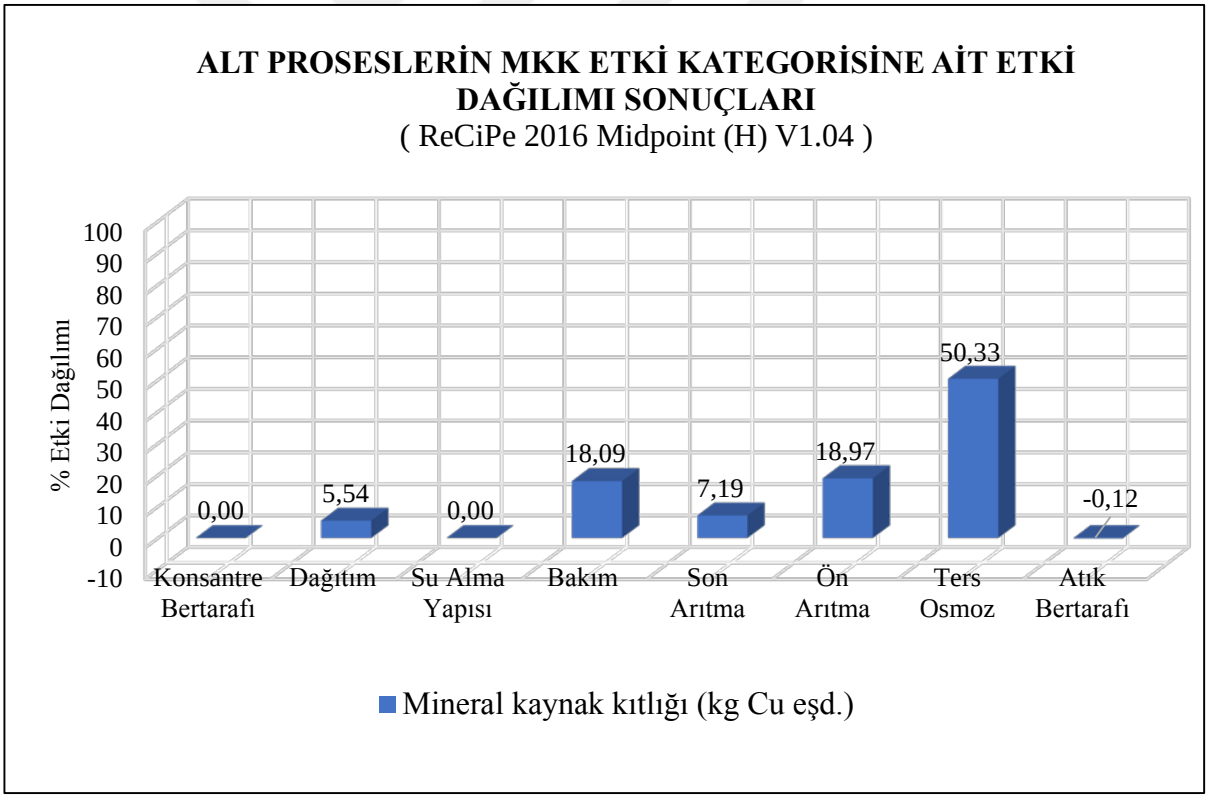
AK etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin çevresel etki sonucu (m^2 ekin eşd.) ve üretim aşamalarının yüzdesel dağılım katkısı, Şekil 4.16'da verilmiştir. AK etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin toplam çevresel etkisi 5,12E-03 m^2 ekin eşd.'dir (Tablo 4.1). Etki kategorisine ait toplam çevresel etkinin büyük bir bölümünü %61,50 ters osmoz aşaması oluşturmaktadır (Şekil 4.16). Ters osmoz aşamasının ardından %17,43 ile bakım, %8,73 ile ön arıtma, %8,26 ile son arıtma ve %6,77 ile dağıtım aşaması gelmektedir. Diğer aşamaların etkisi %1'in altındadır. Envanter analizi sonuçlarına göre (EK 15), 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin AK etki kategorisinde kesme kriteri %1'in üzerinde katkısı olan maddelerin dağılımı; %10,41 işgal, yıllık ürün, %2,32 ile yıllık ürün (sulanmayan), %39,84 ile işgal, çöplük alanı, %16,48 işgal, orman (yoğun), %3,94 ile işgal, endüstriyel alan, %23 ile işgal, maden çıkarma sahası, %1,17 ile değişim, çalılık arazidir.



Şekil 4.16: Tesise ait alt proseslerin AK etki kategorisinde yüzdesel dağılımı.

4.1.16. Mineral Kaynak Kıtlığı (MKK)

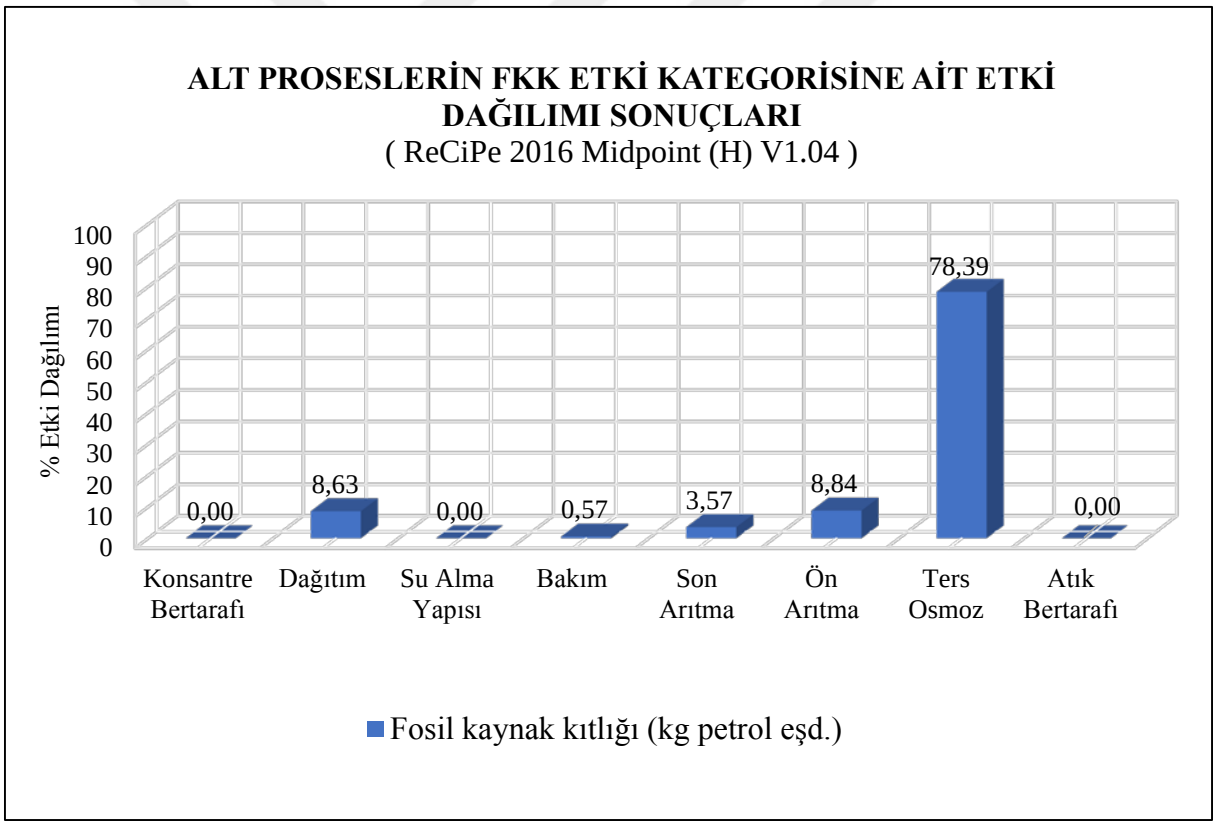
MKK etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin çevresel etki sonucu (kg Cu eşd.) ve üretim aşamalarının yüzdesel dağılım katkısı, Şekil 4.17'de verilmiştir. MKK etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin toplam çevresel etkisi 2,74E-04 kg Cu eşd.'dir (Tablo 4.1). Etki kategorisine ait toplam çevresel etkinin büyük bir bölümünü %50,33 ters osmoz aşaması oluşturmaktadır (Şekil 4.17). Ters osmoz aşamasının ardından %18,09 ile bakım, %18,97 ile ön arıtma, %7,19 ile son arıtma ve %5,54 ile dağıtım aşaması gelmektedir. Diğer aşamaların etkisi %1'in altındadır. Envanter analizi sonuçlarına göre (EK 16), 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin MKK etki kategorisinde kesme kriteri %1'in üzerinde katkısı olan maddelerin dağılımı; %1,13 ile kil, %1,24 ile çinko, %1,31 ile titanyum, %1,47 ile aluminyum, %3,92 ile demir, %4,46 ile bakır, %4,84 ile nikel, %7,04 ile uranyum ve %69,95 ile altındır.



Şekil 4.17: Tesise ait alt proseslerin MKK etki kategorisinde yüzdesel dağılımı.

4.1.17. Fosil Kaynak Kıtlığı (FKK)

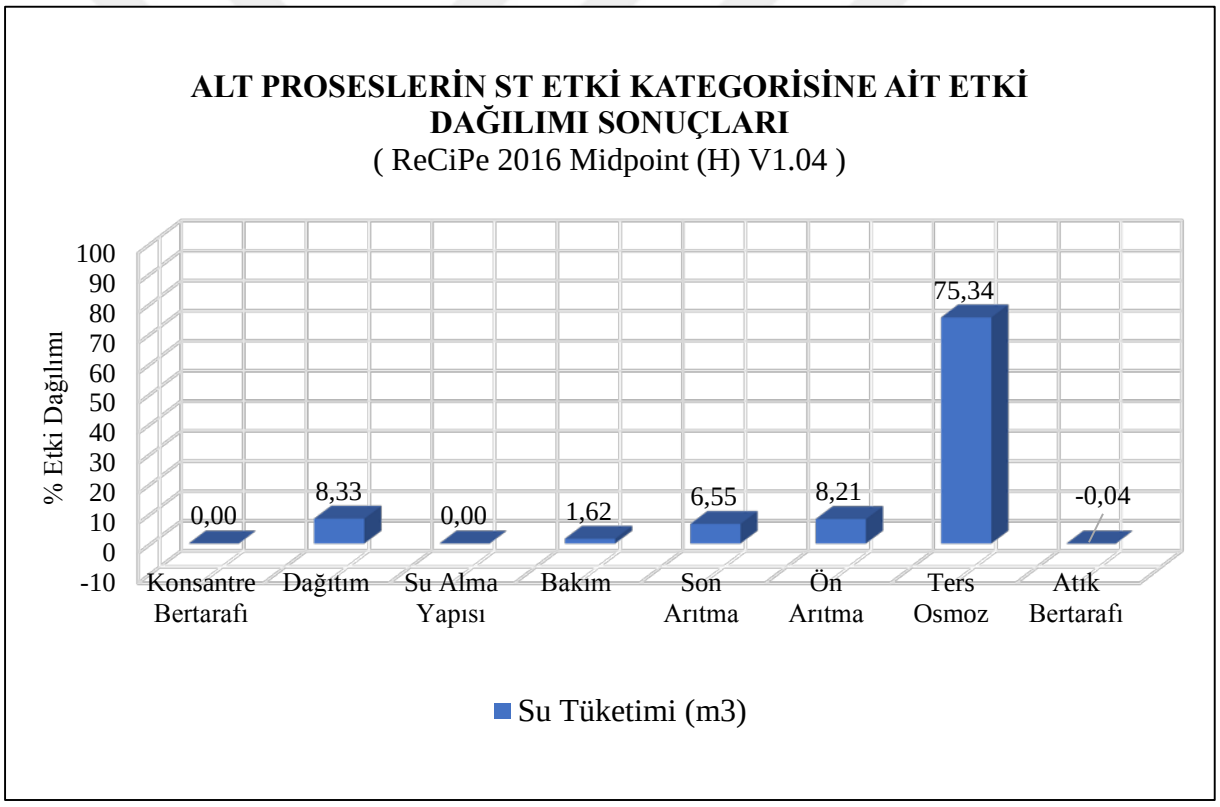
FKK etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin çevresel etki sonucu (kg petrol eşd.) ve üretim aşamalarının yüzdesel dağılım katkısı, Şekil 4.18'de verilmiştir. FKK etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin toplam çevresel etkisi 4,40E-01 kg petrol eşd.'dir (Tablo 4.1). Etki kategorisine ait toplam çevresel etkinin büyük bir bölümünü %78,39 ile ters osmoz aşaması oluşturmaktadır (Şekil 4.18). Ters osmoz aşamasının ardından %8,84 ile ön arıtma, %8,63 ile dağıtım ve %3,57 ile son arıtma aşaması gelmektedir. Diğer aşamaların etkisi %1'in altındadır. Envanter analizi sonuçlarına göre (EK 17), 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin FKK etki kategorisine kesme kriteri %1'in üzerinde katkısı olan maddelerin dağılımı; %31,27 ile kömür (linyit), %28,75 ile kömür (antrasit), %37,06 ile gaz (doğal/m^3), %2,92 ile petroldür.



Şekil 4.18: Tesise ait alt proseslerin FKK etki kategorisinde yüzdesel dağılımı.

4.1.18. Su Tüketimi (ST)

ST etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin çevresel etki sonucu (m^3) ve üretim aşamalarının yüzdesel dağılım katkısı, Şekil 4.19'da verilmiştir. ST etki kategorisine ait 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin toplam çevresel etkisi 1,63E-02 m^3'dür (Tablo 4.1). Etki kategorisine ait toplam çevresel etkinin büyük bir bölümünü %75,34 ters osmoz aşaması oluşturmaktadır (Şekil 4.19). Ters osmoz aşamasının ardından %8,33 ile dağıtım, %8,21 ile ön arıtma, %6,55 ile son arıtma, %1,62 ile bakım aşaması gelmektedir. Diğer aşamaların etkisi %1'in altındadır. Envanter analizi sonuçlarına göre (EK 18), 1 m^3 arıtılmış deniz suyu üretiminin ST etki kategorisine kesme kriteri %1'in üzerinde katkısı olan maddelerin büyük bir yüzdesini; Su, (TR) ve Su, (turbin kullanmı, belirtilmemiş, TR), oluşturmaktadır.



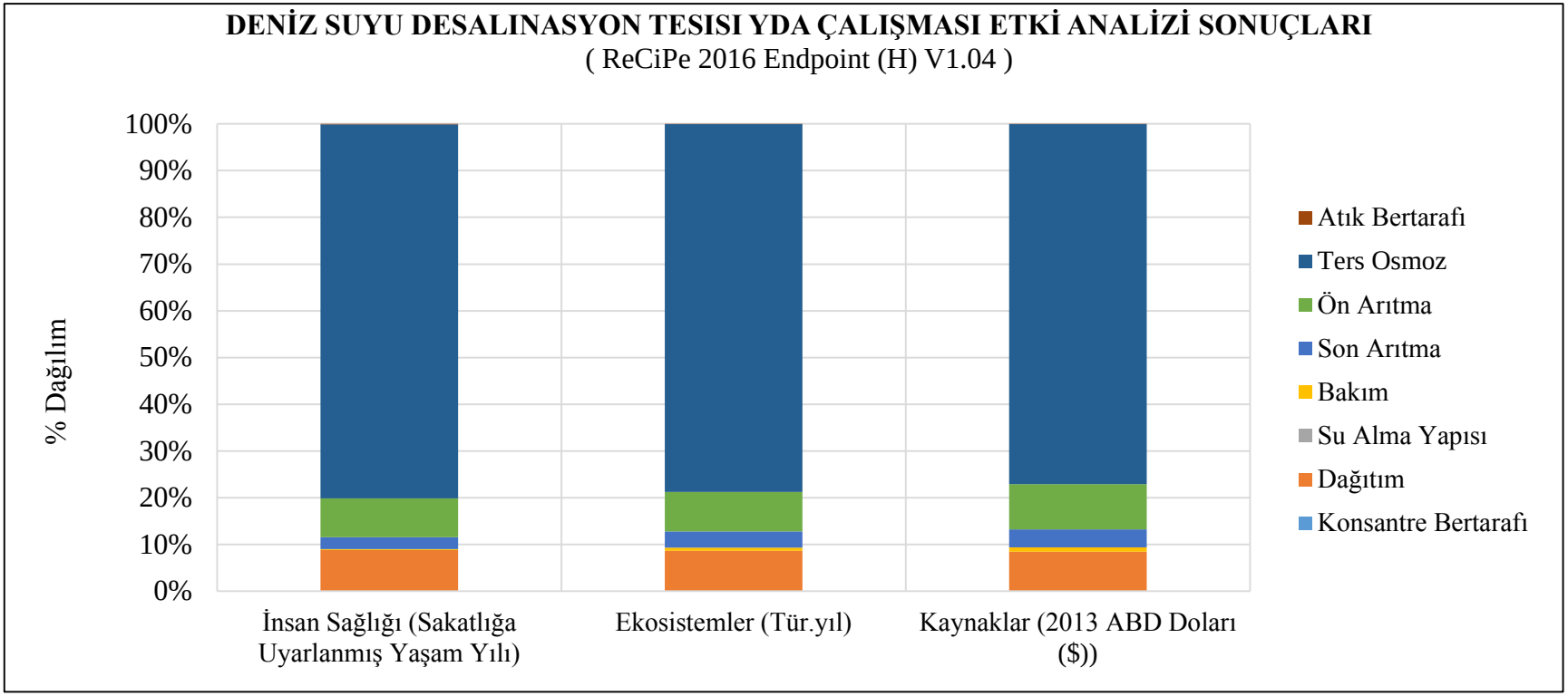
Şekil 4.19: Tesise ait alt proseslerin ST etki kategorisinde yüzdesel dağılımı.

Desalinasyon ile içme suyu üretiminde, kapıdan kapıya yaklaşımının içerdiği aşamaların çevresel etkilerin son nokta yaklaşımı ile değerlendirilmesi için oluşturulan YDA modeli ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.04 son nokta etki analizi metodu ile *İnsan Sağlığı, Ekosistemler* ve *Kaynaklar* olarak 3 etki kategorisinde 1 m^3 arıtılmış deniz suyu için değerlendirilmiştir (Tablo 4.2) (Şekil 4.20).

İnsan Sağlığı etki kategorisinin toplam çevresel etkisi, 1,07E-05 sakatlığa uğramış yaşam yılı olarak hesaplanmış olup, alt proseslerin etki kategorisindeki dağılımları yüksekten düşüğe sırayla; 8,90E-07 sakatlığa uğramış yaşam yılı ile ters osmoz, 9,45E-07 sakatlığa uğramış yaşam yılı ile dağıtım, 8,90E-07 sakatlığa uğramış yaşam yılı ile ön arıtma ve 2,70E-07 sakatlığa uğramış yaşam yılı ile son arıtmadır. Diğer alt proseslerin sürece katkısı ihmal edilebilir düzeyde olup %1'in altında kalmaktadır. Ekosistemler etki kategorisinin toplam çevresel etkisi, 8,34E-09 tür.yıl olarak hesaplanmış olup, alt proseslerin etki kategorisindeki dağılımları yüksekten düşüğe sırayla; 6,56E-09 tür.yıl ile ters osmoz, 7,22E-10 tür.yıl ile dağıtım, 7,04E-10 tür.yıl ile ön arıtma ve 2,93E-10 tür.yıl ile son arıtmadır. Diğer alt proseslerin sürece katkısı ihmal edilebilir düzeyde olup %1'in altında kalmaktadır. Kaynaklar etki kategorisinin toplam çevresel etkisi 7,48E-02 2013 ABD Doları ($) olarak hesaplanmış olup, alt proseslerin etki kategorisindeki dağılımları yüksek düşüğe sırayla; 5,76E-02 2013 ABD Doları ($) ile ters osmoz, 7,26E-03 ABD Doları ($) ile ön arıtma, 6,34E-03 ABD Doları ($) ile dağıtım ve 2,89E-03 ABD Doları ($) ile son arıtmadır. Diğer alt proseslerin sürece katkısı ihmal edilebilir düzeyde olup %1'in altında kalmaktadır.

Tablo 4.2: Tesise ait ReCiPe Endpoint (H) V1.04 son nokta etki analizi sonuçları.

Etki Kategorisi	Birim	Su Alma Yapısı	Ön Arıtma	Ters Osmoz	Son Arıtma	Dağıtım	Bakım	Konsantre Bertarafı	Atık Bertarafı	Toplam
İnsan Sağlığı	Sakatlığa Uyarlanmış Yaşam Yılı	0,00E+00	8,90E-07	8,58E-06	2,70E-07	9,45E-07	2,46E-08	6,60E-11	1,30E-08	1,07E-05
Ekosistemler	Tür.yıl	0,00E+00	7,04E-10	6,56E-09	2,93E-10	7,22E-10	5,43E-11	1,42E-13	6,19E-12	8,34E-09
Kaynaklar	2013 ABD Doları ($)	0,00E+00	7,26E-03	5,76E-02	2,89E-03	6,34E-03	6,63E-04	0,00E+00	3,38E-05	7,48E-02



Şekil 4.20: Tesise ait ReCiPe Endpoint (H) V1.04 son nokta etki analizi sonuçları.

4.2. ALTERNATİF SENARYOLARIN ÇEVRESEL ETKİLERİ

TO desalinasyon sistemlerinin işletimi sırasında önemli düzeyde elektrik enerjisi tüketimi gerçekleşmekte olup, bu durum söz konusu teknolojilerin çevresel sürdürülebilirliğini doğrudan etkilemektedir. Mevcut uygulamalarda bu enerji ihtiyacı büyük ölçüde kömür, petrol ve doğalgaz gibi yenilenemeyen enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Bu fosil kaynaklı enerji kullanımı, sera gazı emisyonları başta olmak üzere çok çeşitli çevresel etki kategorilerinde yüksek yük oluşturarak, sistemin genel çevresel performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu çerçevede yürütülen çalışmada, elektrik enerjisinin temin edildiği enerji kaynaklarına bağlı olarak biçimlenen çevresel farklılıkları ortaya koymak amacıyla, çeşitli alternatif senaryolar geliştirilmiştir. Bu senaryolar, farklı yenilemeyen enerji temelli elektrik enerjisi kaynaklarının kullanımı, yenilenebilir enerji temelli elektrik enerjisi kaynaklarının kullanımı ve yenilebilir ve yenilenemeyen enerji temelli elektrik enerjisi kaynaklarının karması ile yapılandırılmıştır.

(1) Birinci senaryo için yenilebilir ve yenilenemeyen farklı enerji kaynaklarına ait çevresel etkilerin daha etkili bir şekilde ortaya konabilmesi için farklı elektrik enerjileri; %100 şebeke karması, %100 kömür kaynaklı elektrik enerjisi, %100 petrol kaynaklı elektrik enerjisi, %100 doğalgaz kaynaklı elektrik enerjisi, %100 rüzgar kaynaklı elektrik enerjisi, %100 fotovoltaik kaynaklı elektrik enerjisi, %100 hidroelektrik enerjisi senaryoları tüm orta nokta etki kategorileri için karşılaştırılmıştır. **(2)** İkinci senaryo için fotovoltaik kaynaklı elektrik enerjisi ile şebeke elektriği karmalarının çevresel etkileri de analiz edilmiştir. Bu analizlerde, %100 Şebeke, %90 Şebeke + %10 Fotovoltaik, %80 Şebeke + %20 Fotovoltaik, %70 Şebeke + %30 Fotovoltaik, %60 Şebeke + %40 Fotovoltaik ve %50 Şebeke + %50 Fotovoltaik dikkate alınarak farklı enerji paylarının tüm orta nokta etki kategorilerine ait çevresel etki değerleri değerlendirilmiştir

4.2.1. Yenilebilir ve Yenilenemeyen Enerji Kaynaklarının %100 Kullanımı

Yenilebilir ve yenilenemeyen enerji kaynakların %100 kullanımı senaryolarına ait yaşam döngüsü etki analizi sonuçları ve elde edilen değişimler Tablo 4.3 ve Tablo 4.4'te verilmiştir. Bu kapsamda enerji kaynakları arasındaki net değişimlerin karşılaştırmalı olarak değerlendirebilmesi için, her bir enerji türüne ait senaryolar ayrı ayrı analiz edilmiştir ve sistematik bir biçimde ortaya konulmuştur.

Tablo 4.3: Yenilebilir ve yenilenemeyen enerji kaynaklarının %100 kullanımı senaryolarına ait yaşam döngüsü etki analizi sonuçları**.**

Etki Kategorisi	Birim	Şebeke Karması	%100 Kömür	%100 Petrol	%100 Doğalgaz	%100 Rüzgar	%100 Fotovoltaik	%100 Hidroelektrik
Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)	kg CO_2 eşd.	1,72E+00	3,16E+00	2,61E+00	1,27E+00	5,50E-02	5,48E-02	1,85E-01
Stratosferik Ozon Tüketimi Potansiyeli (SOTP)	kg CFC-11 eşd.	5,96E-07	6,50E-07	1,88E-06	3,75E-07	5,75E-08	5,74E-08	5,74E-08
İyonlaşmış Radyasyon Potansiyeli (İRP)	kBq Co-60 eşd.	2,33E-02	1,70E-02	2,18E-02	5,25E-03	3,81E-03	3,81E-03	3,81E-03
Ozon Oluşumu Potansiyeli, İnsan sağlığı (OOP,İS)	kg NO_x eşd.	3,68E-03	1,01E-02	8,83E-03	9,44E-04	1,40E-04	1,40E-04	1,40E-04
Ozon Oluşumu Potansiyeli, Karasal ekosistemler (OOP,KE)	kg NO_x eşd.	1,33E-02	3,35E-03	5,52E-03	3,42E-04	1,03E-04	1,03E-04	1,03E-04
İnce Partikül Madde Oluşumu Potansiyeli (İPMOP)	kg PM 2.5 eşd.	3,70E-03	1,01E-02	8,91E-03	9,99E-04	1,42E-04	1,41E-04	1,42E-04
Karasal Asidifikasyon Potansiyeli (KAP)	kg SO_2 eşd.	7,64E-03	1,05E-02	1,76E-02	9,33E-04	2,04E-04	2,04E-04	2,04E-04
Tatlı Su Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (TSSÖP)	kg P eşd.	1,76E-03	1,66E-03	2,98E-05	2,47E-05	1,92E-05	1,91E-05	1,91E-05
Deniz Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (DSÖP)	kg N eşd.	1,97E-04	1,95E-04	9,04E-05	9,16E-05	8,90E-05	8,91E-05	8,90E-05
Kara Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (KCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	6,90E-01	1,62E+00	9,80E+00	1,56E-01	1,33E-01	1,33E-01	1,33E-01
Tatlı Su Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (TSCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	4,90E-02	5,76E-02	6,05E-03	4,86E-03	3,71E-03	3,71E-03	3,71E-03
Deniz Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (DCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	6,75E-02	8,03E-02	1,45E-02	6,44E-03	4,96E-03	4,96E-03	4,96E-03
Toksisite- İnsan Sağlığı (Kanser) (T-İS (Kanser))	kg 1,4-DCB eşd.	9,55E-02	1,38E-01	7,81E-03	2,22E-03	1,68E-03	1,68E-03	1,68E-03
Toksisite- İnsan Sağlığı (Kanser Dışı) (T-İS (Kanser Dışı))	kg 1,4-DCB eşd.	1,99E+00	2,64E+00	2,40E-01	1,41E-01	9,50E-02	9,49E-02	9,49E-02
Arazi Kullanımı (AK)	m^2 ekin eşd.	5,12E-03	1,64E-02	1,84E-03	1,36E-03	1,24E-03	1,24E-03	1,24E-03
Mineral Kaynak Kıtlığı (MKK)	kg Cu eşd.	2,74E-04	5,40E-04	1,39E-04	1,09E-04	1,05E-04	1,04E-04	1,04E-04
Fosil Kaynak Kıtlığı (FKK)	kg petrol eşd.	4,40E-01	7,11E-01	7,53E-01	4,71E-01	1,49E-02	1,48E-02	1,48E-02
Su Tüketimi (ST)	m^3	1,63E-02	6,62E-03	3,52E-03	2,89E-03	1,16E-03	1,16E-03	8,40E-02

Tablo 4.4: Yenilebilir ve yenilenemeyen enerji kaynaklarının %100 kullanımında çevresel etki kategorilerinde gerçekleşen değişimler.

Etki Kategorisi	Birim	%100 Kömür (%)	%100 Petrol (%)	%100 Doğalgaz (%)	%100 Rüzgar (%)	%100 Fotovoltaik (%)	%100 Hidroelektrik (%)
Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)	kg CO_2 eşd.	+84,07	+51,72	-26,24	-96,80	-96,81	-89,24
Stratosferik Ozon Tüketimi Potansiyeli (SOTP)	kg CFC-11 eşd.	+9,13	+215,86	-37,05	-90,35	-90,36	-90,36
İyonlaşmış Radyasyon Potansiyeli (İRP)	kBq Co-60 eşd.	-27,02	-6,36	-77,45	-83,64	-83,65	-83,65
Ozon Oluşumu Potansiyeli, İnsan sağlığı (OOP,İS)	kg NO_x eşd.	+173,72	+140,15	-74,33	-96,19	-96,20	-96,20
Ozon Oluşumu Potansiyeli, Karasal ekosistemler (OOP,KE)	kg NO_x eşd.	+172,43	+140,50	-73,03	-96,16	-96,18	-96,18
İnce Partikül Madde Oluşumu Potansiyeli (İPMOP)	kg PM 2.5 eşd.	-74,76	-58,43	-97,43	-99,22	-99,22	-99,22
Karasal Asidifikasyon Potansiyeli (KAP)	kg SO_2 eşd.	+37,78	+130,27	-87,79	-97,33	-97,33	-97,33
Tatlı Su Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (TSSÖP)	kg P eşd.	-5,74	-98,30	-98,60	-98,91	-98,91	-98,91
Deniz Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (DSÖP)	kg N eşd.	-1,20	-54,14	-53,56	-54,86	-54,82	-54,86
Kara Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (KCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	+138,38	+1340,47	-77,02	-80,44	-80,49	-80,47
Tatlı Su Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (TSCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	+17,62	-87,65	-90,09	-92,43	-92,43	-92,43
Deniz Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (DCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	+18,97	-78,53	-90,47	-92,65	-92,65	-92,65
Toksisite- İnsan Sağlığı (Kanser) (T-İS (Kanser))	kg 1,4-DCB eşd.	+44,93	-91,82	-97,68	-98,24	-98,24	-98,24
Toksisite- İnsan Sağlığı (Kanser Dışı) (T-İS (Kanser Dışı))	kg 1,4-DCB eşd.	+32,15	-87,95	-92,92	-95,24	-95,24	-95,24
Arazi Kullanımı (AK)	m^2 ekin eşd.	+220,11	-64,02	-73,44	-75,81	-75,82	-75,82
Mineral Kaynak Kıtlığı (MKK)	kg Cu eşd.	+96,80	-49,22	-60,33	-61,87	-62,02	-61,99
Fosil Kaynak Kıtlığı (FKK)	kg petrol eşd.	+61,64	+71,14	+7,00	-96,62	-96,65	-96,64
Su Tüketimi (ST)	m^3	-59,47	-78,43	-82,28	-92,92	-92,92	+414,65

Alternatif enerji kaynaklarının çevresel etkilerinin daha kolay incelenebilmesi için değerlendirilen toplam 18 çevresel etki kategorisinin büyük çoğunluğunda önemli çevresel iyileşmeler sağlandığı tespit edilmiştir. KIP etki kategorisinde çevresel etkide, rüzgar ve güneş enerjisi senaryolarında sırasıyla %96,80 ve %96,21 oranında bir azalma elde edilmiştir (Tablo 4.4). Benzer şekilde, SOTP, İPMOP, T-İS (kanser) ve T-İS (kanser dışı), OOP,İS, OOP,KE, KAP ve benzeri insan sağlığını ve ekosistemleri doğrudan etkileyen etki kategorileri değerlerinde %90'ların üzerinde düşüşler gözlemlenmektedir. Bu bulgular, yenilenebilir enerji kaynaklarının yalnızca sera gazı emisyonlarını değil, aynı zamanda çevresel toksisite ve ekosistem üzerindeki yaygın baskıyı da önemli ölçüde azalttığını ortaya koymaktadır.

Öte yandan, kömür ve petrol gibi yüksek karbon içerikli fosil kaynakların kullanımı, çevresel etkilerin tamamına yakında ciddi düzeyde artışlara yol açmaktadır. Özellikle KAP, AK, T-İS (Kanser) ve İPMOP etki kategorilerinde %100 kömür senaryosunda etkilerin %100'ü aşan oranlarda arttığı dikkate değer bulunmuştur. %100 petrol bazlı senaryoda ise daha düşük oranlarda olmakla birlikte, benzer eğilimler izlenmektedir. Bu durum, fosil kaynakların çevresel sürdürülebilirlik açısından ciddi sınırlılıklara sahip olduğunu göstermektedir. Doğalgaz kullanımı ise, özellikle küresel ısınma, tatlı su toksisitesi ve fosil kaynak kıtlığı gibi bazı kategorilerde göreli iyileşmeler sağlamakla birlikte; asidifikasyon, mineral kaynak kullanımı ve arazi etkileri açısından halen belirgin çevresel yük oluşturmaktadır. Bu bağlamda, doğalgazın sınırlı süreli bir geçiş kaynağı olarak değerlendirilmesi gerektiğine dikkat çekmek yerinde olacaktır.

Hidroelektrik enerjinin ise çok sayıda kategoride olumlu çevresel etkiler sağladığı görülmekle birlikte, özellikle su tüketimi başlığında diğer tüm senaryolara kıyasla %414,65 oranında bir artışa neden olduğu saptanmıştır. Bu bulgu, hidroelektrik üretiminde barajların oluşturduğu buharlaşma ve su kaybı etkisinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Sonuç olarak, yenilenebilir enerji kaynaklarının (özellikle rüzgar ve fotovoltaik sistemlerin) kullanılması ile çevresel etkilerde anlamlı azalmalar sağlandığı, bu bağlamda şebeke elektriğine kıyasla çok daha sürdürülebilir bir seçenek sunduğu ortaya konmaktadır. Fosil kaynakların ise yaşam döngüsü boyunca oluşturduğu çevresel yükler nedeniyle sistemden çıkarılmasının, çevresel performansın iyileştirilmesi açısından temel bir strateji olduğu değerlendirilmelidir.

4.2.2. Yenilebilir ve Yenilemeyen Enerji Kaynaklarının Karma Kullanımı

Türkiye'nin elektrik enerjisi üretim kaynaklarına ilişkin 2017 yılı verileri incelendiğinde; üretimin %32,8'inin kömür, %0,4'ünün sıvı yakıtlar, %37,2'sinin doğalgaz, %19,6'sının hidrolik kaynaklar ve %10'unun yenilenebilir enerji ile atıklardan sağlandığı görülmektedir (TÜİK, 2025). Bu dağılım, elektrik üretiminin yaklaşık %70'inin yenilenemeyen enerji kaynaklarına dayandığını ortaya koymaktadır. Bu durum, enerji üretiminde sürdürülebilirlik ilkeleri açısından önemli bir sorun teşkil etmektedir. Dolayısıyla, enerji ihtiyacının yenilenebilir kaynaklardan karşılanması, çevresel etkilerin azaltılması ve kaynak verimliliğinin artırılması açısından önem arz etmektedir. Bu doğrultuda, yürütülen tez çalışmasında deniz suyundan TO desalinasyon prosesiyle içme suyu üretiminin YDA'ya dayalı çevresel etkileri değerlendirilmesini takiben mevcut çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik olarak yenilebilir ve yenilenemeyen enerji kaynakların karma kullanımı senaryolarına oluşturulmuştur. Senaryoların orta nokta yaklaşımına ait yaşam döngüsü etki analizi sonuçları Tablo 4.5'da ve elde edilen değişimler Tablo 4.6 ve Şekil 4.21'de verilmiştir. Etki kategorileri değerlendirilir ise her etki kategorisinde sistematik bir azalma açıkça görülebilmektedir. Tesisin enerji kaynağının %50'sini fotovoltaikden karşılaması dikkate alınırsa; KIP etki kategorisinde %48,57, SOTP etki kategorisinde %45,30, İRP etki kategorisinde %41,93, OOP, İS etki kategorisinde %47,98, OOP, KE etki kategorisinde %47,97, İPMOP etki kategorisinde %49,70, KAP etki kategorisinde %48,74, TSSÖP etki kategorisinde %49,42, DSÖP etki kategorisinde %27,40, KCEP etki kategorisinde %40,25, TSCEP etki kategorisinde %46,12, DCEP etki kategorisinde %46,24, T-İS (Kanser) etki kategorisinde %49,07, T-İS (Kanser Dışı) etki kategorisinde %47,58, AK etki kategorisinde %38,03, MKK etki kategorisinde %31,12, FKK etki kategorisinde %48,24, ST etki kategorisinde %46,40 azalma görülmektedir.

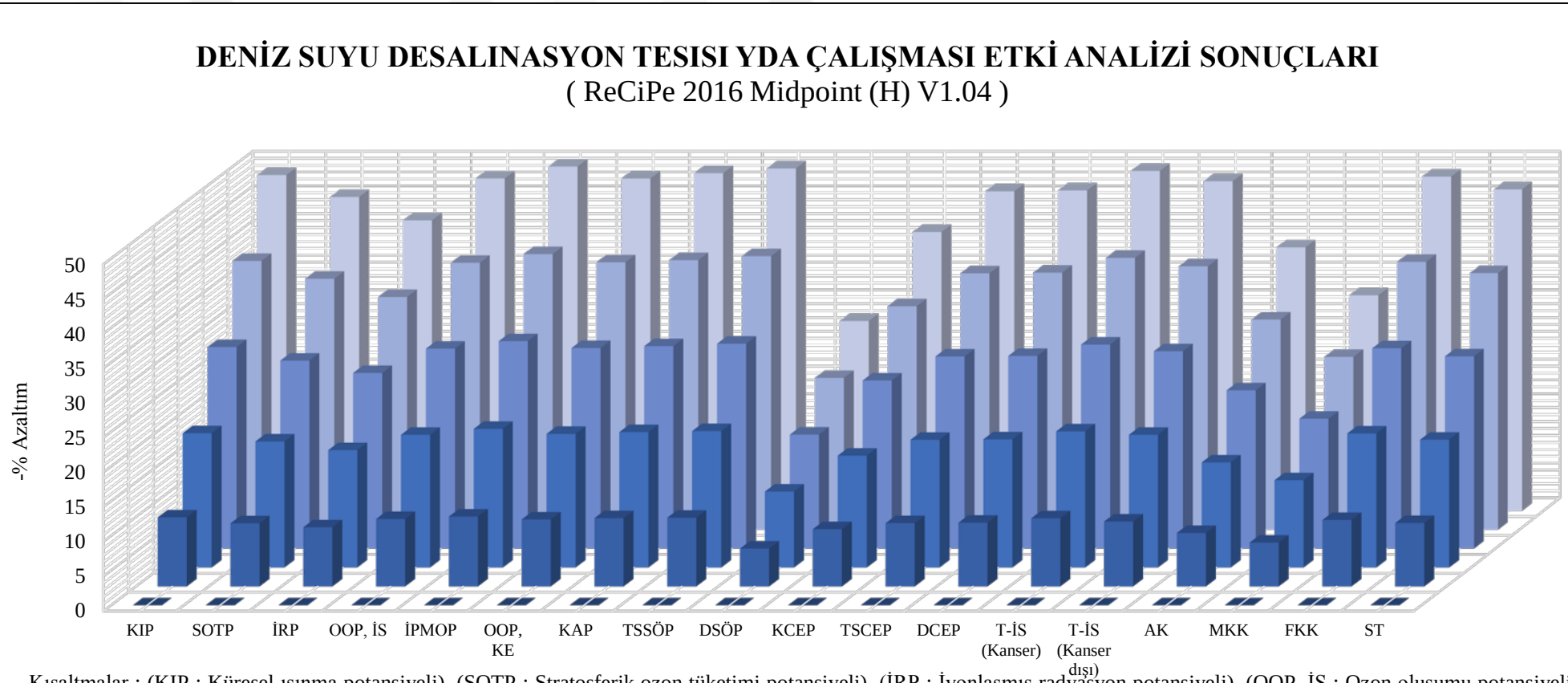
KCEP, AK, MKK ve DSÖP gibi etki kategorileri sırasıyla %40,25, %38,03, %31,12 ve %27,40 azalmaları ile yenilebilir enerji kaynaklarına geçiş sürecinde çevresel etki düzeyleri en az azalan etki kategorileri olup, bu etki kategorilerin enerji kaynağına karşı duyarlılık düzeyi diğer etki kategorilere oranla daha düşük düzeyde olduğu görülebilmektedir. İPMOP, TSSÖP, T-İS (Kanser) ve KAP etki kategorileri %49,70, %49,42, %49,07 ve %48,74 azalmaları ile yenilebilir enerji kaynaklarına geçiş sürecinde çevresel etki düzeyleri en çok azalan etki kategorileri olup, bu etki kategorilerin enerji kaynağına karşı duyarlılık düzeyi diğer etki kategorilere oranla daha yüksek düzeyde olduğu görülebilmektedir.

Tablo 4.5: Yenilebilir ve yenilenemeyen enerji kaynaklarının karma kullanımına ait yaşam döngüsü etki analizi sonuçları.

Etki Kategorisi	Birim	%100 Şebeke	%90 Şebeke, %10 Fotovoltaik	%80 Şebeke, %20 Fotovoltaik	%70 Şebeke, %30 Fotovoltaik	%60 Şebeke, %40 Fotovoltaik	%50 Şebeke, %50 Fotovoltaik
Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)	kg CO_2 eşd.	1,72E+00	1,55E+00	1,39E+00	1,22E+00	1,05E+00	8,85E-01
Stratosferik Ozon Tüketimi Potansiyeli (SOTP)	kg CFC-11 eşd.	5,96E-07	5,42E-07	4,87E-07	4,34E-07	3,80E-07	3,26E-07
İyonlaşmış Radyasyon Potansiyeli (İRP)	kBq Co-60 eşd.	2,33E-02	2,13E-02	1,93E-02	1,74E-02	1,55E-02	1,35E-02
Ozon Oluşumu Potansiyeli, İnsan sağlığı (OOP,İS)	kg NO_x eşd.	3,68E-03	3,32E-03	2,97E-03	2,62E-03	2,26E-03	1,91E-03
Ozon Oluşumu Potansiyeli, Karasal ekosistemler (OOP,KE)	kg NO_x eşd.	3,70E-03	3,35E-03	2,99E-03	2,63E-03	2,27E-03	1,93E-03
İnce Partikül Madde Oluşumu Potansiyeli (İPMOP)	kg PM 2.5 eşd.	1,33E-02	1,20E-02	1,06E-02	9,31E-03	8,00E-03	6,68E-03
Karasal Asidifikasyon Potansiyeli (KAP)	kg SO_2 eşd.	7,64E-03	6,89E-03	6,15E-03	5,41E-03	4,67E-03	3,92E-03
Tatlı Su Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (TSSÖP)	kg P eşd.	1,76E-03	1,59E-03	1,41E-03	1,24E-03	1,06E-03	8,90E-04
Deniz Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (DSÖP)	kg N eşd.	1,97E-04	1,86E-04	1,76E-04	1,65E-04	1,54E-04	1,43E-04
Kara Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (KCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	6,80E-01	6,24E-01	5,71E-01	5,15E-01	4,61E-01	4,06E-01
Tatlı Su Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (TSCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	4,90E-02	4,45E-02	4,00E-02	3,54E-02	3,08E-02	2,64E-02
Deniz Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (DCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	6,75E-02	6,13E-02	5,50E-02	4,87E-02	4,25E-02	3,63E-02
Toksisite- İnsan Sağlığı (Kanser) (T-İS (Kanser))	kg 1,4-DCB eşd.	9,55E-02	8,62E-02	7,68E-02	6,74E-02	5,80E-02	4,87E-02
Toksisite- İnsan Sağlığı (Kanser Dışı) (T-İS (Kanser Dışı))	kg 1,4-DCB eşd.	1,99E+00	1,81E+00	1,61E+00	1,43E+00	1,24E+00	1,05E+00
Arazi Kullanımı (AK)	m^2 ekin eşd.	5,12E-03	4,73E-03	4,35E-03	3,95E-03	3,57E-03	3,17E-03
Mineral Kaynak Kıtlığı (MKK)	kg Cu eşd.	2,74E-04	2,57E-04	2,40E-04	2,23E-04	2,06E-04	1,89E-04
Fosil Kaynak Kıtlığı (FKK)	kg petrol eşd.	4,40E-01	3,98E-01	3,55E-01	3,13E-01	2,70E-01	2,28E-01
Su Tüketimi (ST)	m^3	1,63E-02	1,48E-02	1,33E-02	1,18E-02	1,03E-02	8,75E-03

Tablo 4.6: Yenilebilir ve yenilenemeyen enerji kaynaklarının karma kullanımı ile elde edilen azalmalar.

Etki Kategorisi	Birim	%90 Şebeke, %10 Fotovoltaik (%)	%80 Şebeke, %20 Fotovoltaik (%)	%70 Şebeke, %30 Fotovoltaik (%)	%60 Şebeke, %40 Fotovoltaik (%)	%50 Şebeke, %50 Fotovoltaik (%)
Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)	kg CO_2 eşd.	-9,95	-19,37	-29,08	-38,79	-48,47
Stratosferik Ozon Tüketimi Potansiyeli (SOTP)	kg CFC-11 eşd.	-9,08	-18,18	-27,13	-36,22	-45,30
İyonlaşmış Radyasyon Potansiyeli (İRP)	kBq Co-60 eşd.	-8,50	-16,92	-25,34	-33,59	-41,93
Ozon Oluşumu Potansiyeli, İnsan sağlığı (OOP,İS)	kg NO_x eşd.	-9,71	-19,14	-28,84	-38,52	-47,98
Ozon Oluşumu Potansiyeli, Karasal ekosistemler (OOP,KE)	kg NO_x eşd.	-9,64	-19,27	-28,94	-38,60	-47,97
İnce Partikül Madde Oluşumu Potansiyeli (İPMOP)	kg PM 2.5 eşd.	-10,06	-20,00	-29,93	-39,78	-49,70
Karasal Asidifikasyon Potansiyeli (KAP)	kg SO_2 eşd.	-9,83	-19,53	-29,22	-38,91	-48,74
Tatlı Su Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (TSSÖP)	kg P eşd.	-9,90	-19,68	-29,57	-39,48	-49,42
Deniz Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (DSÖP)	kg N eşd.	-5,45	-10,95	-16,45	-21,90	-27,40
Kara Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (KCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	-8,25	-16,13	-24,26	-32,25	-40,25
Tatlı Su Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (TSCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	-9,11	-18,42	-27,73	-37,01	-46,12
Deniz Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (DCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	-9,17	-18,48	-27,80	-37,10	-46,24
Toksisite- İnsan Sağlığı (Kanser) (T-İS (Kanser))	kg 1,4-DCB eşd.	-9,81	-19,63	-29,44	-39,25	-49,07
Toksisite- İnsan Sağlığı (Kanser Dışı) (T-İS (Kanser Dışı))	kg 1,4-DCB eşd.	-9,34	-19,14	-28,48	-38,02	-47,58
Arazi Kullanımı (AK)	m^2 ekin eşd.	-7,69	-15,15	-22,84	-30,34	-38,03
Mineral Kaynak Kıtlığı (MKK)	kg Cu eşd.	-6,31	-12,58	-18,75	-24,95	-31,12
Fosil Kaynak Kıtlığı (FKK)	kg petrol eşd.	-9,57	-19,34	-28,90	-38,67	-48,24
Su Tüketimi (ST)	m^3	-9,13	-18,44	-27,75	-37,04	-46,40



Şekil 4.21: Yenilebilir ve yenilenemeyen enerji kaynaklarının karma kullanımları ile elde edilen azalmalar.

Bu çalışmada, şebeke elektriği ile birleşik fotovoltaik enerji kullanılması durumunda çeşitli çevresel etki kategorilerinde meydana gelen değişimlerin YDA yöntemi ile analizi hedeflenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, fotovoltaik enerji oranı arttıkça tüm etki kategorilerinde belirgin çevresel iyileşmeler elde edilmektedir.

KİP etki kategorisi açısından, %100 şebeke kullanımında 1,72 kg CO_2 eşd. olan değer, %50 fotovoltaik senaryosunda 8,55E-01 kg CO_2 eşd. seviyesine kadar düşmektedir. Benzer şekilde SOTP 5,96E-07 kg CFC-11 eşd.'den 3,26E-07 kg CFC-11 eşd.'e, IRP ise 2,33E-02 kBq Co-60 eşd.'den 1,35E-02 kBq Co-60 eşd.seviyesine inerek önemli oranlarda azalma göstermektedir. OOP, İS ve OOP, KE gibi insan sağlığını etkileyen ozon oluşumu potansiyeli kategorilerinde de fotovoltaik oranı arttıkça etki değerlerinde azalma görülmektedir. İPMOP etki kategorisi %50 fotovoltaik katkısı ile 6,68E-03 kg NOx eşd. seviyesine kadar gerilemekte, KAP ise 7,64E-03 kg SO2 eşd.'den 3,92E-03 kg SO2 eşd.'e düşmektedir.

TSSÖP, DSÖP, KCEP ve TSCEP gibi sucul ve karasal ekosistemlere ait ötrofikasyon ve toksisite başlıklarında da fotovoltaik oranı yükseldikçe düzenli azalma eğilimleri gözlemlenmektedir. TSSÖP etki kategorisinde 1,76E-03 kg P eşd.'den 8,90E-04 kg P eşd.'e, DSÖP etki kategorisinde 1,97E-04 kg N eşd.'den 1,43E-04 kg N eşd.'e, KCEP etki kategorisinde 6,80E-01 kg 1,4-DCB eşd.'den 4,06E-01 kg 1,4-DCB eşd.'e, TSCEP etki kategorisinde 4,90E-02 kg 1,4-DCB eşd.'den 2,64E-02 kg 1,4-DCB eşd.'e düşmektedir.

T-İS başlıklarında da belirgin düşüşler tespit edilmektedir. T-İS (Kanser) etki kategorisinde 9,55E-02 kg 1,4-DCB eşd. olan değer, %50 fotovoltaik oranında 4,37E-02' kg 1,4-DCB eşd.'ye; T-İS (Kanser dışı) etki kategorisinde ise 1,99 kg 1,4-DCB eşd.'den 1,05 kg 1,4-DCB eşd.'ye gerilemektedir.

AK, MKK, FKK ve ST gibi kaynak ve alan kullanımıyla ilişkili kategorilerde de fotovoltaik katkı arttıkça sistemin çevresel yükü düşmektedir. AK etki kategorisinde 5,12E-03 m^2 ekin eşd.'den 3,17E-03 m^2 ekin eşd.'e, MKK etki kategorisinde 2,74E-04 kg Cu eşd.'den 1,89E-04 kg Cu eşd.'e, FKK 4,40E-01 kg petrol eşd.'ten 2,28E-01 kg petrol eşd.'e, ST etki kategorisinde 1,63E-02 m^3'den 8,75E-03 m^3'e düşmektedir. Bu değerler, enerji üretiminde doğrudan hammadde tüketiminin azalmasıyla ilişkilendirilebilmektedir.

4.3. HASSASİYET ANALİZİ VE BELİRSİZLİK ANALİZİ

YDA çalışmalarında, sistem sınırları, veri kaynakları ve varsayımlar doğrultusunda elde edilen sonuçlar belirli belirsizlikler içerebilmektedir. Bu belirsizliklerin karar vericiler üzerinde yanıltıcı etkiler oluşturmaması adına, yapılan analizlerin güvenilirliğinin test edilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda uygulanan hassasiyet analizi, modelde kullanılan girdilerin ve parametrelerin nihai çevresel etki çıktıları üzerindeki etkisinin ölçülmesini sağlamaktadır. Özellikle enerji tüketimi ve tipi, taşınım mesafesi, kimyasal tüketimi gibi değişkenler üzerinde yapılan duyarlılık testleri, sistemin hangi bileşenlerinin çevresel yükleri kritik ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu sayede, hem karar destek süreci bilimsel temele oturtulmakta, hem de önerilen iyileştirme senaryolarının uygulanabilirliği ve etkinliği somut verilerle desteklenebilmektedir. Dolayısıyla, YDA çalışmalarında hassasiyet analizinin gerçekleştirilmesi, hem metodolojik bütünlük hem de sonuçların güvenilirliği açısından vazgeçilmez bir bileşen olarak değerlendirilmektedir.

Hassasiyet analizi **2** şekilde gerçekleştirilmiştir: **(1)** Ana senaryoya ait enerji tüketimi düzeyleri %10 artırılarak ve azaltılarak tüm etki kategorilerindeki değişimler incelenmiştir. **(2)** Tez çalışmasında kullanılan etki analizi metodu olan ReCiPe 2016 V1.04 metodu sonuçlarının kontrol edilmesi amacıyla ana senaryoya ait *Küresel Isınma Potansiyeli (KIP) (kg CO_2 eşd.), Stratosferik Ozon Tüketimi Potansiyeli (SOTP) (kg CFC-11 eşd.) ve Karasal Asidifikasyon Potansiyeli (KAP) (kg SO_2 eşd.)* orta nokta etki kategorileri IMPACT 2002+ ve CML-IA Baseline V3.06 etki analizi metodları için de hesaplanmıştır ve karşılaştırılmıştır. Ayrıca, YDA çalışmalarında önemli bir belirsizlik analizi metodu olan Monte Carlo metodu ReCiPe 2016 V1.04 orta nokta yaklaşımı için uygulanmıştır.

4.3.1. Sistem Girdisi ile Hassasiyet Analizi

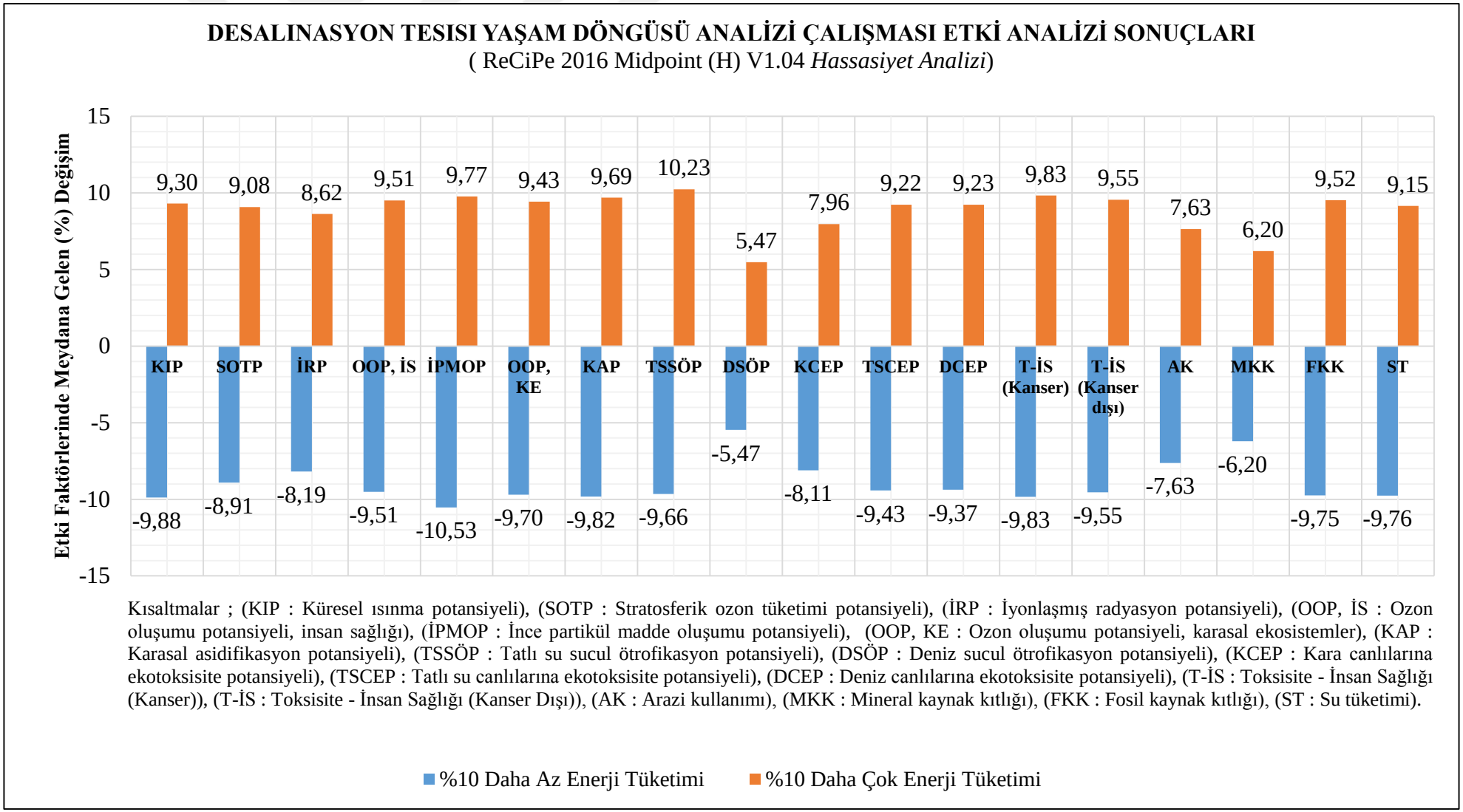
Çalışmada gerçekleştirilen hassasiyet analizi kapsamında, ana senaryoda hesaplanan enerji tüketimi düzeyleri %10 oranında artırılmış ve azaltılmıştır. Bu değişimlerin çevresel etki kategorileri üzerindeki yansımaları incelenmiştir. Bu yöntem, enerji girdisinin sistem üzerindeki çevresel duyarlılığını ortaya koymayı amaçlamaktadır. Enerji tüketiminin ±%10 oranında değiştirilmesiyle, tüm etki kategorilerinde meydana gelen yüzde değişimler değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, enerji kaynağının YDA sonuçları üzerindeki etkisini sayısal olarak ortaya koymakta ve sistemin enerjiye olan çevresel bağımlılığını değerlendirme imkânı sunmaktadır. Bu sayede, enerji verimliliği artırıldığında hangi kategorilerde daha büyük

çevresel iyileşmeler sağlanabileceği net olarak görülebilmektedir. Dolayısıyla bu yöntem, modelin duyarlılığını test etmek ve karar destek sürecini güçlendirmek adına etkili bir araç olarak değerlendirilmektedir. Bu kapsamda mevcut enerji tüketimimiz olan 2,8357 kWh/m^3 arıtılmış deniz suyu değeri SimaPro 9.1.1.7 programına; +%10 artış senaryosu için 3,1193 kWh/m^3 arıtılmış deniz suyu olarak girilmiştir ve -%10 azalış senaryosu için 2,5521 kWh/m^3 arıtılmış deniz suyu olarak girilmiştir. Sonuçlar Tablo 4.7'de ve Şekil 4.22'de görülmektedir.

Sonuçlar içme suyu desalinasyon tesisinin çevrel etkilerinin enerji girdisine hassas olduğunu göstermiştir. Hassasiyet analizi, enerji girdilerinde %10 oranında bir azalmanın, desalinasyon tesisinin tüm orta nokta çevresel etkilerini %5,47-10,53 oranında azaltacağını ortaya koymuştur. Enerji girdilerinde %10 oranında bir artışın ise, desalinasyon tesisinin tüm orta nokta çevresel etkilerini %5,47-10,23 oranında artıracağı ortaya koyulmuştur. En düşük hassasiyet DSÖP (%5,47 ve -%5,47) ve MKK (%6,20 ve -%6,20) için elde edilmiştir.

Tablo 4.7: Enerji girdilerinin değişimi ile elde edilen hassasiyet analizi sonuçları.

Etki Kategorisi	Birim	-%10 Enerji Tüketimi	Desalinasyon Tesisi	+%10 Enerji Tüketimi
Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)	kg CO_2 eşd.	1,55E+00	1,72E+00	1,88E+00
Stratosferik Ozon Tüketimi Potansiyeli (SOTP)	kg CFC-11 eşd.	5,42E-07	5,95E-07	6,49E-07
İyonlaşmış Radyasyon Potansiyeli (İRP)	kBq Co-60 eşd.	2,13E-02	2,32E-02	2,52E-02
Ozon Oluşumu Potansiyeli, İnsan sağlığı (OOP,İS)	kg NO_x eşd.	3,33E-03	3,68E-03	4,03E-03
Ozon Oluşumu Potansiyeli, Karasal ekosistemler (OOP,KE)	kg NO_x eşd.	3,35E-03	3,71E-03	4,06E-03
İnce Partikül Madde Oluşumu Potansiyeli (İPMOP)	kg PM 2.5 eşd	1,19E-02	1,33E-02	1,46E-02
Karasal Asidifikasyon Potansiyeli (KAP)	kg SO_2 eşd.	6,89E-03	7,64E-03	8,38E-03
Tatlı Su Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (TSSÖP)	kg P eşd.	1,59E-03	1,76E-03	1,94E-03
Deniz Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (DSÖP)	kg N eşd.	1,90E-04	2,01E-04	2,12E-04
Kara Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (KCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	6,23E-01	6,78E-01	7,32E-01
Tatlı Su Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (TSCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	4,42E-02	4,88E-02	5,33E-02
Deniz Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (DCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	6,09E-02	6,72E-02	7,34E-02
Toksisite- İnsan Sağlığı (Kanser) (T-İS (Kanser))	kg 1,4-DCB eşd.	8,62E-02	9,56E-02	1,05E-01
Toksisite- İnsan Sağlığı (Kanser Dışı) (T-İS (Kanser Dışı))	kg 1,4-DCB eşd.	1,80E+00	1,99E+00	2,18E+00
Arazi Kullanımı (AK)	m^2 ekin eşd.	4,72E-03	5,11E-03	5,50E-03
Mineral Kaynak Kıtlığı (MKK)	kg Cu eşd.	2,57E-04	2,74E-04	2,91E-04
Fosil Kaynak Kıtlığı (FKK)	kg petrol eşd.	3,98E-01	4,41E-01	4,83E-01
Su Tüketimi (ST)	m^3	1,48E-02	1,64E-02	1,79E-02



Şekil 4.22: Enerji girdilerinin değişimi ile elde edilen hassasiyet analizi sonuçları.

4.3.2. Etki Analizi Metodları ile Hassasiyet Analizi

Etki analizi metodları ile gerçekleşen hassasiyet analizi çalışması ile modelin metodolojik duyarlılığını değerlendirmek amacıyla farklı etki analiz yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Aynı yaşam döngüsü envanteri üzerinden farklı metotlarla elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış, çevresel etki kategorilerindeki sapmalar analiz edilmiştir. Bu yaklaşım, seçilen metodolojinin sonuçlar üzerindeki etkisini görmeye ve hangi metodun sisteme daha duyarlı ya da daha tutarlı tepki verdiğini belirlemeye olanak tanımaktadır. Dolayısı ile etki analizi metodunun seçiminde dikkatli olunması gerektiği ve bu tür karşılaştırmaların modelin metodolojik sağlamlığını artırdığı değerlendirilmektedir. Bu kapsamda hassasiyet analizinin gerçekleştirilmesi için ReCiPe V1.04, IMPACT 2002+ ve CML-IA Baseline V3.06 etki analizi metodlarının orta nokta yaklaşımı kullanılmış olup, benzer kapsamları içeren etki kategorileri olarak Küresel Isınma Potansiyeli (KIP) (kg CO_2 eşd.), Stratosferik Ozon Tüketimi Potansiyeli (SOTP) (kg CFC-11 eşd.) ve Karasal Asidifikasyon Potansiyeli (KAP) (kg SO_2 eşd.) başlıkları seçilmiştir. Sonuçlar Tablo 4.8'de verilmiştir. 3 etki analizi metodu ile KIP etki kategorisinde çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. SOTP için diğer etki analiz metotları ile %90'a yakın daha az etki hesaplanırken KAP için daha yüksek etki değerleri elde edilmiştir.

Tablo 4.8: Ortak etki kategorilerinin farklı etki analizi metodları ile değerlendirilmesi.

Ortak Kategoriler	Değer	Birim	ReCiPe 2016 V1.04 Farkı
Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)			
CML-IA Baseline	1,69E+00	kg CO_2 eşd.	-%1,43
ReCiPe 2016 Midpoint (H)	1,72E+00	kg CO_2 eşd.	
IMPACT 2002+	1,64E+00	kg CO_2 eşd.	-%4,55
Stratosferik Ozon Tüketimi Potansiyeli (SOTP)			
CML-IA Baseline	6,03E-08	kg CFC-11 eşd.	-%89,88
ReCiPe 2016 Midpoint (H)	5,96E-07	kg CFC-11 eşd.	
IMPACT 2002+	6,03E-08	kg CFC-11 eşd.	-%89,88
Karasal Asidifikasyon Potansiyeli (KAP)			
CML-IA Baseline	9,37E-03	kg SO_2 eşd.	%22,71
ReCiPe 2016 Midpoint (H)	7,64E-03	kg SO_2 eşd.	
IMPACT 2002+	2,69E-02	kg SO_2 eşd.	%252,14

4.3.3. Monte Carlo Metodu ile Belirsizlik Analizi

YDA çalışmalarında kullanılan girdiler ve parametreler genellikle belirli düzeyde belirsizlik içermektedir. Bu belirsizlikler; ölçüm hataları, coğrafi farklar, sistem sınırı varsayımları veya veri eksikliği gibi etkenlerden kaynaklanabilmektedir. Monte Carlo metodu, bu tür belirsizlikleri istatistiksel olarak dikkate alan güçlü bir analiz tekniğidir. Monte Carlo yöntemi, sistemde yer alan değişkenlerin (enerji tüketimi, malzeme girdileri, taşıma mesafesi vb.) belirli dağılımlar çerçevesinde rastsal olarak tekrar tekrar simüle edilmesi esasına dayanmaktadır. Genellikle 1000 ile 10.000 arası deneme (iterasyon) yapılmakta; her bir denemede veriler küçük varyasyonlarla değiştirilerek çevresel etki sonuçları hesaplanmaktadır (Sun ve Ertz, 2020).

Bu kapsamda, modelin belirsizlik karşısındaki tepkisini değerlendirmek ve sonuçların istatistiksel güvenilirliğini test etmek amacıyla Monte Carlo belirsizlik analizi gerçekleştirilmiştir. ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 metodu kullanılarak yapılan analizde, 1 m^3 arıtılmış içme suyu üretimine ilişkin 18 etki kategorisi temel alınmış ve sistem parametreleri üzerinden rastgele simülasyonlar %95 güven aralığında 1000 kez rastgele değerler ile yeniden hesaplanmıştır (Tablo 4.9) (EK 19 – EK 36). Monte Carlo belirsizlik analizinde, YDA sonuçlarının güvenirliğini ortaya koymak için analiz sonuçları değerlendirilmektedir. Örnek ortalamasındaki hata, varyasyon katsayısı ve standart sapma gibi sonuçların değerlendirilmesi için parametreler ve yöntemler mevcuttur (Goedkoop ve diğ., 2016; Ivanov ve diğ., 2018). Örnek ortalamasındaki hatalar (YDA çalışmasının sonuçları), gözlemlerin (simulasyon sayısı) miktarına bağlıdır ve ortalamanın standart hatası olarak adlandırılmaktadır. Ortalamanın standart hatası değeri genellikle örneğin standart sapmasıyla hesaplanmaktadır (Ivanov ve diğ., 2018). Monte Carlo Metodu ile gerçekleştirilen belirsizlik analizlerinde 1,00E-02 değerinin altındaki bir ortalamanın standart hatası değeri oldukça kabul edilebilir düzeydedir (Goedkoop ve diğ., 2016). Tablo 4.10'da görüldüğü üzere ST ve T-İS (Kanser dışı) etki kategorisi dışında kalan tüm etki kategorileri bu değerin altındadır. Varyasyon analizi değeri ise Monte Carlo analizinde düşük değişkenliği ifade etmekle beraber, değerin düşüklüğü sonucun güvenirliğini artıran unsurlardan biridir (Ivanov ve diğ., 2018).

Tablo 4.9: Monte Carlo metodu ile gerçekleştirilen belirsizlik analizi sonuçları.

Etki Kategorisi	Birim	Ortalama	Medyan	Standart Sapma	Varyasyon Katsayısı	%95 Güven Aralığı (%2,5-%97,5)		Standart Ortalama Hata
Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)	kg CO_2 eşd.	1,71E+00	1,71E+00	1,95E-01	1,14E+01	1,35E+00	2,10E+00	6,15E-03
Stratosferik Ozon Tüketimi Potansiyeli (SOTP)	kg CFC-11 eşd.	5,92E-07	5,69E-07	1,29E-07	2,17E+01	4,06E-07	9,05E-07	4,07E-09
İyonlaşmış Radyasyon Potansiyeli (İRP)	kBq Co-60 eşd.	2,38E-02	1,36E-02	3,87E-02	1,63E+02	3,37E-03	1,15E-01	1,22E-03
Ozon Oluşumu Potansiyeli, İnsan sağlığı (OOP,İS)	kg NO_x eşd.	3,67E-03	3,65E-03	3,65E-04	9,95E+00	3,00E-03	4,44E-03	1,16E-05
Ozon Oluşumu Potansiyeli, Karasal ekosistemler (OOP,KE)	kg NO_x eşd.	3,70E-03	3,68E-03	3,68E-04	9,94E+00	3,02E-03	4,47E-03	1,16E-05
İnce Partikül Madde Oluşumu Potansiyeli (İPMOP)	kg PM 2.5 eşd.	1,33E-02	1,32E-02	1,71E-03	1,29E+01	1,03E-02	1,68E-02	5,42E-05
Karasal Asidifikasyon Potansiyeli (KAP)	kg SO_2 eşd.	7,63E-03	7,62E-03	7,46E-04	9,78E+00	6,18E-03	9,21E-03	2,36E-05
Tatlı Su Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (TSSÖP)	kg P eşd.	1,82E-03	1,51E-03	1,26E-03	6,91E+01	5,10E-04	4,76E-03	3,98E-05
Deniz Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (DSÖP)	kg N eşd.	2,00E-04	2,00E-04	1,84E-05	9,14E+00	1,70E-04	2,40E-04	5,82E-07
Kara Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (KCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	6,67E-01	6,45E-01	1,56E-01	2,34E+01	4,41E-01	1,04E+00	4,93E-03
Tatlı Su Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (TSCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	4,80E-02	3,85E-02	3,73E-02	7,78E+01	1,83E-02	1,33E-01	1,18E-03
Deniz Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (DCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	6,60E-02	5,27E-02	5,28E-02	8,00E+01	2,46E-02	1,85E-01	1,67E-03
Toksisite- İnsan Sağlığı (Kanser) (T-İS (Kanser))	kg 1,4-DCB eşd.	8,50E-02	4,26E-02	1,66E-01	1,95E+02	1,57E-02	4,40E-01	5,24E-03
Toksisite- İnsan Sağlığı (Kanser Dışı) (T-İS (Kanser Dışı))	kg 1,4-DCB eşd.	1,99E+00	1,52E+00	2,42E+00	1,22E+02	6,39E-01	5,83E+00	7,66E-02
Arazi Kullanımı (AK)	m^2 ekin eşd.	5,10E-03	4,83E-03	1,23E-03	2,42E+01	3,53E-03	8,15E-03	3,90E-05
Mineral Kaynak Kıtlığı (MKK)	kg Cu eşd.	2,70E-04	2,70E-04	2,26E-05	8,31E+00	2,30E-04	3,20E-04	7,16E-07
Fosil Kaynak Kıtlığı (FKK)	kg petrol eşd.	4,38E-01	4,35E-01	5,73E-02	1,31E+01	3,40E-01	5,62E-01	1,81E-03
Su Tüketimi (ST)	m^3	3,61E-02	3,09E-01	3,77E+00	1,04E+04	-8,31E+00	6,40E+00	1,19E-01

4.4. DENİZ SUYU İLE YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.4.1. Deniz Suyu Karakterizasyonu

Tesisin yakın bölgesinden alınan deniz suyu karakterizasyonu Tablo 4.10'de verilmiştir.

Tablo 4.10: Tesis yakınından alınan deniz suyu karakterizasyonu.

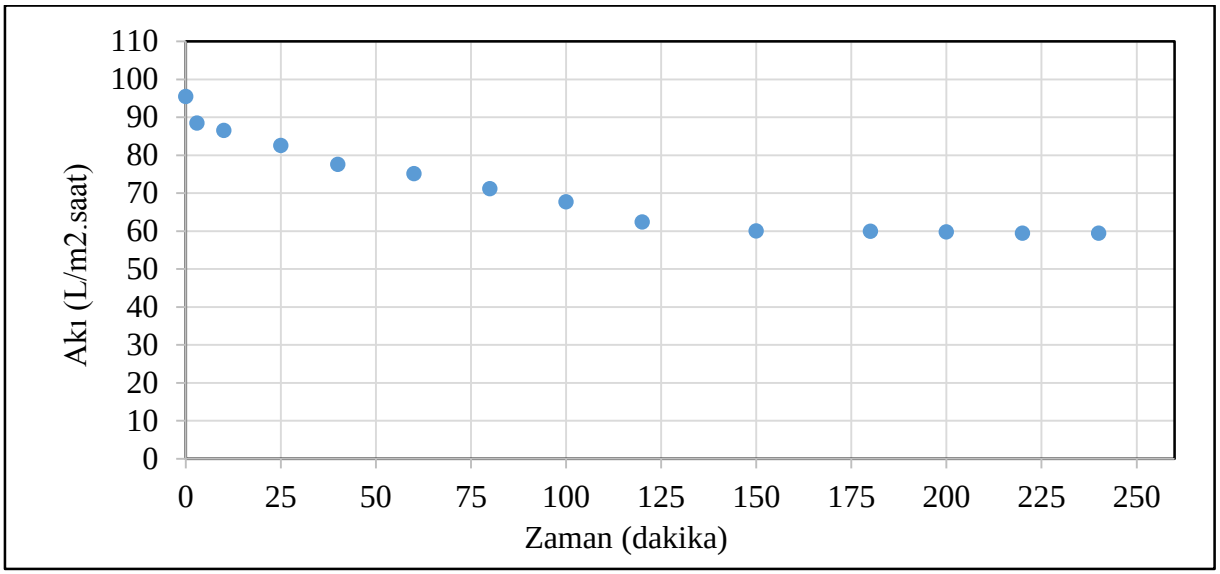
Parametre	Birim	Değer
pH	-	7,8
Klorür	mg/L	25800
Sertlik	mg $CaCO_3$/L	4140
Alkalinite	mg $CaCO_3$/L	190
Sülfat	mg/L	455
İletkenlik	mS/cm	34,9

4.4.2. Deniz Suyunun NF Membranı ile Ön Arıtımı

Hibrit 2 adımlı NF-TO prosesinin ilk adımını oluşturan NF membranına ait süzüntü değerleri Tablo 4.11'de verilmiştir ve NF membranına ait akı grafiği ise Şekil 4.23'te verilmiştir.

Tablo 4.11: NF süzüntüsüne ait analiz sonuçları.

Parametre	Birim	NF Süzüntü
pH	-	7,45
Klorür	mg/L	22.420
Sertlik	mg $CaCO_3$/L	3540
Alkalinite	mg $CaCO_3$/L	160
Sülfat	mg/L	765
İletkenlik	mS/cm	30



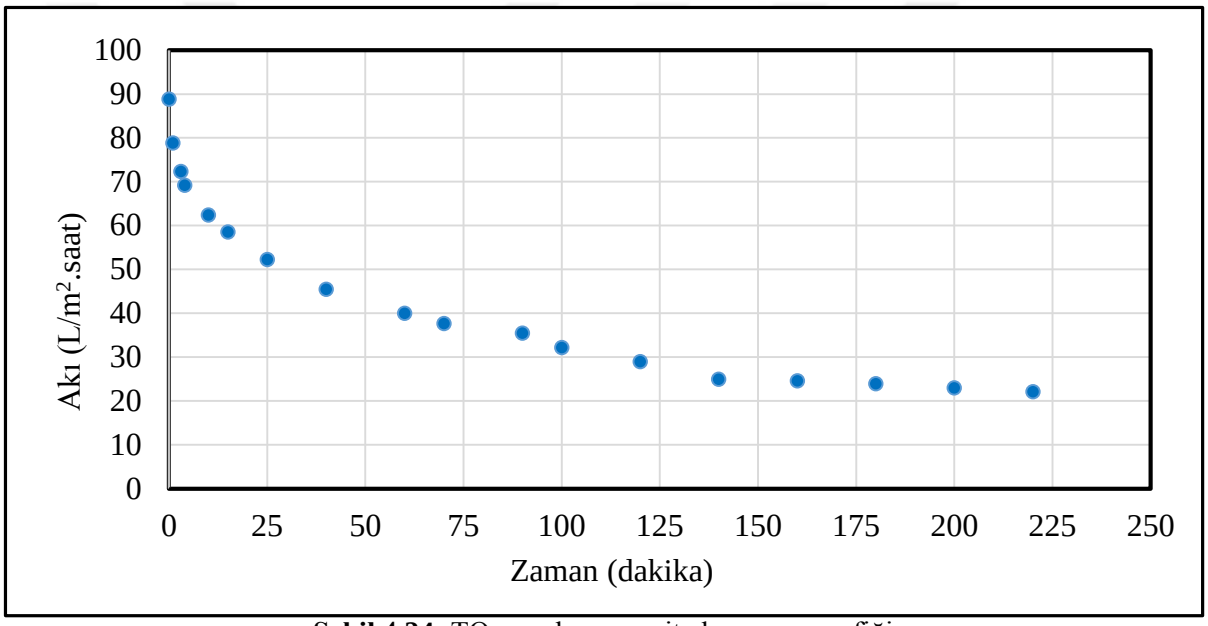
Şekil 4.23: NF membranına ait akı zaman grafiği.

4.4.3. Deniz Suyunun TO Membranı ile Arıtımı

TO membranına ait süzüntü değerleri Tablo 4.12'de verilmiştir ve TO membranına ait akı grafiği ise Şekil 4.24'de verilmiştir.

Tablo 4.12: TO süzüntüsüne ait analiz sonuçları.

Parametre	Birim	TO Süzüntü
pH	-	7,08
Klorür	mg/L	3340
Sertlik	mg $CaCO_3$/L	550
Alkalinite	mg $CaCO_3$/L	20
Sülfat	mg/L	209
İletkenlik	mS/cm	4,56

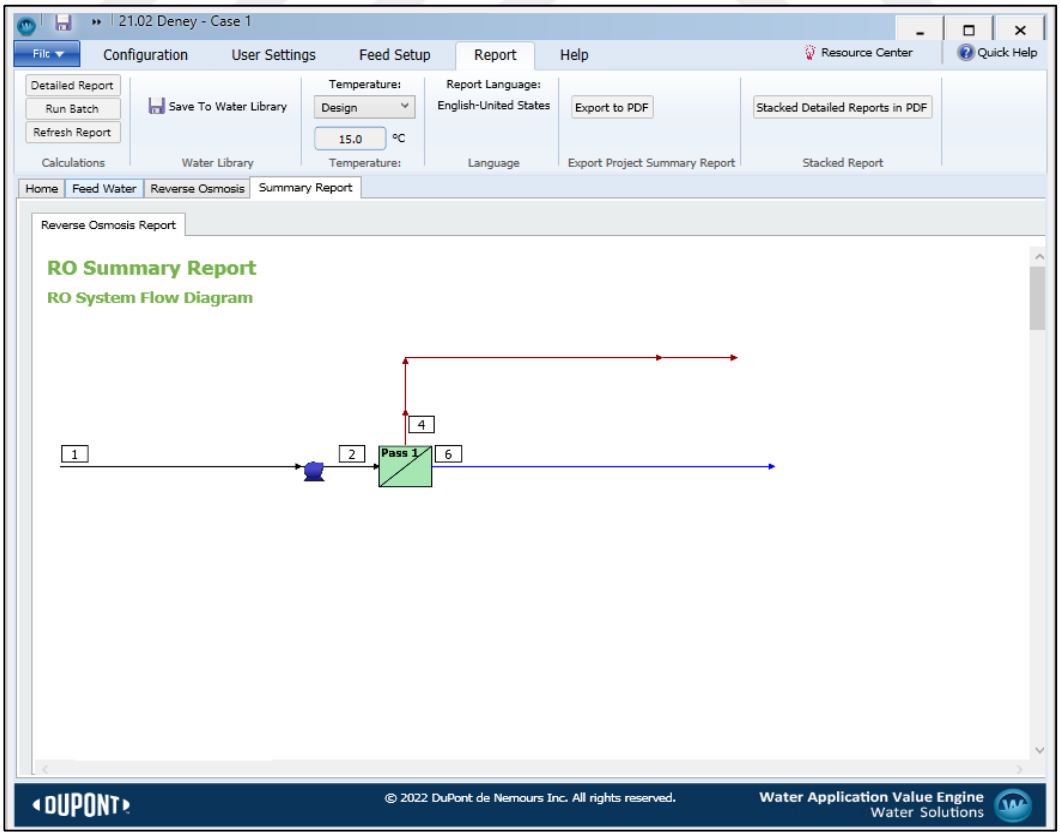


Şekil 4.24: TO membranına ait akı zaman grafiği.

4.4.4. Laboratuvar Ölçekli Alternatif Desalinasyon Sistemine ait YDA Çalışması

Çalışmanın gerçekleştirilme amacı, desalinasyon tesisinin deneysel sistemin çalışma parametreleri ile çalışması durumunda çevresel etkilerin nasıl değişim göstereceğinin belirlenmesidir. Bu kapsamda deneysel sisteme ait giriş suyu karakteristikleri ve çalışma parametreleri, TO membranlarının temin edildiği DuPont firmasının geliştirmiş olduğu "WAVE Water Treatment Design Software" adlı modelleme yazılımına aktarılmıştır (Şekil 4.25). Bu yazılım aracılığıyla, sistemin gerçek çalışma koşullarına uygun şekilde simülasyonu gerçekleştirilmiş ve bu simülasyon sonucunda membran yüzey alanı ihtiyacı yeniden hesaplanmıştır. Yapılan modelleme sonucunda, mevcut deney sisteminden 348 adet daha az sayıda membran modülüyle (252 adet) (Filmtec SW30XLE-440) çalışabileceği belirlenmiştir.

Membran modülü sayısında sağlanan bu azalma, fonksiyonel birim (1 m^3 arıtılmış içme suyu) başına düşen membran yüzey alanı (m^2) ihtiyacını 24.600 m^2'den 10.332 m^2'ye düşürmüştür; buna bağlı olarak membran modüllerinin taşınım ihtiyacı (kg*kilometre) karayolu için toplam 1,155247 kg*km'den 0,5068872 kg*km'ye, denizyolu için toplam 47,661460 kg*km'den, 20,912397 kg*km'ye düşmüştür. Membran modüllerinin ömrünü tamamlaması sonucunda oluşan atık membran modülü miktarı da 2067,6 kg'dan, 907,2 kg'a doğrudan azalmıştır. Modül sayısındaki bu düşüş, hem bertaraf edilen atık membran miktarını hem de bu atıkların taşınım yükünü azaltıcı bir etki yaratmıştır. Bu değişikliklerin sistemin toplam çevresel etkilerine yansımasını değerlendirmek amacıyla, mevcut sistemle kıyaslamalı olarak ek bir YDA analizi gerçekleştirilmiştir. Azaltılmış membran modülü senaryosu için oluşturulan envanter verileri, ReCiPe 2016 Midpoint V1.04 etki analizi metodu ile değerlendirilmiştir ve çevresel etkiler orta nokta yaklaşımı esas alınarak hesaplanmıştır. Deneysel çalışmaya ait YDA etki analizinin sonuçları (Tablo 4.13) incelendiğinde ekotoksisite etki kategorileri TSCEP, DCEP ve KCEP etki kategorilerinde %0,33-0,55 azalma görülmektedir. Çevresel etkilerde gerçekleşen bu azalma, membran sayısında ve taşınımda elde edilen azalmanın etkisi olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.25: WAVE yazılımı sistem akış diyagramı ekran görüntüsü.

Tablo 4.13: Deney düzeneğine ait etki analizi sonuçları ve mevcut tesis ile karşılaştırılması.

Etki Kategorisi	Birim	Su Alma Yapısı	Ön Arıtma	Ters Osmoz	Son Arıtma	Dağıtım	Bakım	Konsantre Bertarafı	Atık Bertarafı	Toplam	Değişim (%)
Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)	kg CO_2 eşd.	0,00E+00	1,46E-01	1,35E+00	6,23E-02	1,48E-01	9,88E-03	0,00E+00	1,84E-03	1,72E+00	-0,12
Stratosferik Ozon Tüketimi Potansiyeli (SOTP)	kg CFC-11 eşd.	0,00E+00	4,75E-08	4,36E-07	4,36E-08	4,81E-08	1,95E-08	0,00E+00	3,89E-11	5,95E-07	-0,21
İyonlaşmış Radyasyon Potansiyeli (İRP)	kBq Co-60 eşd.	0,00E+00	1,95E-03	1,58E-02	3,36E-03	1,74E-03	4,46E-04	0,00E+00	-1,41E-05	2,33E-02	-0,08
Ozon Oluşumu Potansiyeli, İnsan sağlığı (OOP,İS)	kg NO_x eşd.	0,00E+00	3,13E-04	2,88E-03	1,43E-04	3,16E-04	2,47E-05	0,00E+00	1,31E-06	3,68E-03	-0,05
Ozon Oluşumu Potansiyeli, Karasal ekosistemler (OOP,KE)	kg NO_x eşd.	0,00E+00	3,15E-04	2,89E-03	1,44E-04	3,19E-04	2,51E-05	0,00E+00	1,33E-06	3,69E-03	-0,15
İnce Partikül Madde Oluşumu Potansiyeli (İPMOP)	kg PM 2.5 eşd.	0,00E+00	1,09E-03	1,07E-02	3,01E-04	1,18E-03	1,91E-05	0,00E+00	-1,93E-06	1,33E-02	-0,09
Karasal Asidifikasyon Potansiyeli (KAP)	kg SO_2 eşd.	0,00E+00	6,40E-04	6,03E-03	2,46E-04	6,64E-04	4,92E-05	0,00E+00	-4,72E-07	7,63E-03	-0,15
Tatlı Su Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (TSSÖP)	kg P eşd.	0,00E+00	1,46E-04	1,41E-03	4,48E-05	1,56E-04	3,12E-06	0,00E+00	-6,23E-07	1,76E-03	-0,04
Deniz Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (DSÖP)	kg N eşd.	0,00E+00	9,08E-06	8,77E-05	3,42E-06	9,67E-06	3,21E-06	6,98E-05	1,38E-05	1,97E-04	-0,16
Kara Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (KCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	0,00E+00	8,94E-02	4,45E-01	5,97E-02	4,89E-02	3,08E-02	1,20E-21	3,93E-03	6,78E-01	-0,33
Tatlı Su Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (TSCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	0,00E+00	4,33E-03	3,67E-02	1,24E-03	4,05E-03	3,84E-04	1,83E-25	2,01E-03	4,87E-02	-0,58
Deniz Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (DCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	0,00E+00	5,93E-03	5,07E-02	1,74E-03	5,59E-03	4,96E-04	2,24E-04	2,45E-03	6,71E-02	-0,55
Toksisite- İnsan Sağlığı (Kanser) (T-İS (Kanser))	kg 1,4-DCB eşd.	0,00E+00	8,04E-03	7,61E-02	2,68E-03	8,39E-03	3,13E-04	0,00E+00	-3,86E-06	9,55E-02	0,02
Toksisite- İnsan Sağlığı (Kanser Dışı) (T-İS (Kanser Dışı))	kg 1,4-DCB eşd.	0,00E+00	1,66E-01	1,54E+00	5,56E-02	1,70E-01	8,75E-03	2,90E-04	4,96E-02	1,99E+00	0,01
Arazi Kullanımı (AK)	m^2 ekin eşd.	0,00E+00	4,47E-04	3,15E-03	4,23E-04	3,47E-04	8,93E-04	0,00E+00	-1,40E-04	5,12E-03	0,00
Mineral Kaynak Kıtlığı (MKK)	kg Cu eşd.	0,00E+00	5,20E-05	1,38E-04	1,97E-05	1,52E-05	4,96E-05	0,00E+00	-3,26E-07	2,74E-04	0,06
Fosil Kaynak Kıtlığı (FKK)	kg petrol eşd.	0,00E+00	3,89E-02	3,45E-01	1,57E-02	3,80E-02	2,50E-03	0,00E+00	-3,47E-06	4,40E-01	0,02
Su Tüketimi (ST)	m^3	0,00E+00	1,34E-03	1,23E-02	1,07E-03	1,36E-03	2,64E-04	0,00E+00	-7,12E-06	1,63E-02	0,16

5. TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında Marmara Bölgesi'nde kurulu bir desalinasyon tesisinde deniz suyundan içme suyu üretiminin çevresel etkileri yaşam döngüsü analizi (YDA) ile ortaya konmuştur. Çalışma, amaç ve kapsamın tanımlanması ile başlatılmış; bu doğrultuda çalışmanın amacı, fonksiyonel birim ve sistem sınırı belirlenmiştir. Ardından, yaşam döngüsü envanteri (YDE) kapsamında sisteme ait tüm girdiler ve çıktılar saha verileri, literatür kaynakları ve veri tabanlarından derlenerek modellenmiştir. Elde edilen envanter verileri, yaşam döngüsü etki analizi (YDEA) için uygun yazılımlar aracılığıyla analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanarak değerlendirilmiştir. Sistemin çevresel performansının iyileştirilmesi amacı ile alternatif senaryolar oluşturulmuş ve ana senaryo ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların doğruluğunun sınanması doğrultusunda çeşitli hassasiyet ve belirsizlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak deneysel veriler ticari bir proses modelleme yazılımı olan "WAVE" programı ile modellenmiştir ve gerçek sistem ile karşılaştırılmak üzere çevresel etkileri analiz edilmiştir.

Ülkemizde kurulu bir deniz suyu desalinasyon tesisi için yapılan ilk YDA çalışması olması tez çalışmasının özgünlüğünü oluşturmaktadır. Çalışmanın bir başka özgün yanı ise Marmara Denizi'nden alınan deniz suyu numunesi ile yapılan laboratuvar ölçekli TO deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak bir desalinasyon tesisi boyutlandırma yazılımı "WAVE" ile tesisin yeniden boyutlandırılması ve mevcut tesis ile çevresel etkilerinin karşılaştırılmasıdır. Deniz suyundan içme suyu eldesine yönelik gerçekleştirilen YDA çalışması, içme suyu üretiminde enerji tüketiminin en yüksek olduğu aşama olan TO aşamasının çevresel etkilere en yüksek katkıyı yapan aşama olduğunu ortaya koymuştur. Alternatif enerji kaynakları senaryoları da kullanılan enerji kaynağının türünün çevresel etkiler üzerinde belirleyici bir rol oynadığını açık şekilde ortaya koymuştur ki enerji girdilerinin değişimi ile elde edilen hassasiyet analizinde (Tablo 4.22), sisteme ait enerji girdilerinin arttırılması durumunda DSÖP, KCEP, MKK ve AK etki kategorileri dışında kalan tüm etki kategorilerinin çevresel etkilerinde %8,62 ve %10,23 aralığında artış görülmüştür.

YDA çalışmaları ile ortaya konan çevresel etkiler, girdilerin yanı sıra fonksiyonel birim, sistem sınırı, kullanılan yazılım, kullanılan etki analizi gibi faktörler nedeniyle önemli ölçüde değişiklik göstrmektedir. Farklı yazılımlarda ve/veya etki analizi metotlarında çevresel etkilerin değerlendirmesi kapsamında farklı kapsamlar ve/veya girdiler kullanılmaktadır. Bu nedenlerden ve "Kapıdan kapıya" yaklaşımı ile gerçekleştirilen YDA çalışmalarının sayıca az olmasından kaynaklı (Şekil 2.8) YDA çalışmalarının birbiriyle karşılaştırılması kısıtlı olarak yapılabilmektedir. Bu kapsamda, bu tez çalışmasının bulguları Abdul Ghani ve diğ. (2021) ve Fayyaz ve diğ. (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Bu iki çalışmada bu tez çalışmasındakine benzer şekilde SimaPro yazılımı ve ReCiPe 2016 etki analizi metodu kullanılmıştır. Her iki çalışmada da sistem sınırı "Kapıdan kapıya" olarak belirlenmiş, fonksiyonel birim ise "1 m³ arıtılmış içme suyu" olarak tanımlanmıştır. Ayrıca söz konusu çalışmalarda değerlendirilen arıtma prosesleri, bu çalışmada analiz edilen tesis ile büyük ölçüde benzerlik taşımaktadır. Bu tez çalışmasının sonucunda fonksiyonel birim başına gerçekleşen enerji tüketimi ve enerji kaynağının özelliklerinin çevresel etkiler üzerindeki belirleyici rolü söz konusudur. Bu kapsamda bu iki çalışma ile tez çalışmasının sonuçlarını karşılaştırabilmek için öncelikle bu çalışmalara ait enerji tüketimi düzeyleri ve enerji kaynaklarının karakteristik yapılarındaki farklılıklar aşağıda verilmiştir.

Abdul Ghani ve diğ. (2021) çalışmasında şebeke elektriği; %52,6 oranında kömür, %35,3 oranında doğalgaz ve %8–9 oranında petrol bazlı fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Fayyaz ve diğ. (2023) çalışmasında ise enerji ihtiyacı, şebeke elektriği ile karşılanmakta olup bu elektriğin yaklaşık %73'ü doğalgaz, %19–20'si petrol ve %7–8'i kömür kaynaklıdır. Elektrik tüketim düzeylerine bakıldığında, Fayyaz ve diğ. (2023) çalışmasında 1 m³ arıtılmış deniz suyu için 4,95 kWh, Abdul Ghani ve diğ. (2021) çalışmasında ise 3,1 kWh elektrik enerjisi harcandığı belirtilmiştir. Her iki çalışmada da fonksiyonel birim başına gerçekleşen elektrik enerjisi tüketimi mevcut çalışmamızda elde edilen değerden (2,8357 kWh/m^3 arıtılmış deniz suyu) daha yüksektir.

Fayyaz ve diğ. (2023) çalışması ile bu tez çalışmasının etki analizi sonuçları 18 orta nokta ve 3 son nokta etki kategorisinde karşılaştırılabilmektedir. Çalışmamız sonuçlarına göre 11 orta nokta etki kategorisinde (KIP, SOTP, İRP, OOP,İS, OOP,KE, KAP, DSÖP, KCEP, AK, MKK ve FKK) daha düşük sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle DSÖP, SOTP, KCEP ve İRP orta nokta kategorilerindeki yüksek fark dikkat çekmektedir. 7 orta nokta etki kategorisinde de (İPMOP, TSSÖP, TSCEP, DCEP, T-İS (Kanser), T-İS (Kanser Dışı) ve ST) %40,89-78,65

arasında daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, 3 son nokta etki kategorisinin 3'ünde de dikkat çekici oranda düşük sonuçlar elde edilmiştir. KAP etki kategorisinde elde edilen sonuçlar ise birbirine çok yakındır. Abdul Ghani ve diğ. (2021) çalışması ile bu tez çalışmasının etki analizi sonuçları söz konusu çalışmada değerlendirilen 10 orta nokta etki kategorisi ile karşılaştırılabilmektedir. Sonuçlara bakıldığında Fayyaz ve diğ. (2023) çalışmasına göre bu çalışmayla nispeten sonuçların daha benzer olduğu söylenebilmektedir 4 orta nokta etki kategorisinde (KIP, KAP, DSÖP ve FKK) daha düşük sonuçlar elde edilirken 6 orta nokta etki kategorisinde (SOTP, TSSÖP, KCEP, TSCEP, DCEP ve ST) daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Tez çalışmasına ait sonuçların literatür ile karşılaştırılması Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'de verilmektedir.

Sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde fonksiyonel birim başına elektrik tüketimi bu tez çalışmasındaki tesise oranla yaklaşık 2 katı olan Fayyaz ve diğ. (2023) çalışması ile sonuçların daha farklı olduğu ve elektrik tüketiminin yaklaşık aynı olduğu Abdul Ghani ve diğ. (2021) çalışması ile ise daha yakın sonuçların elde edildiği görülmektedir. Abdul Ghani ve diğ. (2021) çalışmasında çevresel etkilerin büyük oranda doğalgaz kullanımından kaynaklandığı rapor edilmiştir.

Tablo 5.1: Tesise ait çalışma sonuçlarının literatür çalışmaları ile karşılaştırılması.

Etki Kategorisi	Birim	Çalışmamız	Abdul Ghani ve diğ. (2021)	Fayyaz ve diğ. (2023)
Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)	kg CO_2 eşd.	1,72E+00	2,60E+00	3,44E+00
Stratosferik Ozon Tüketimi Potansiyeli (SOTP)	kg CFC11 eşd.	5,96E-07	1,00E-08	4,19E-06
İyonlaşmış Radyasyon Potansiyeli (İRP)	kBq Co-60 eşd.	2,33E-02	-	1,04E-01
Ozon Oluşumu Potansiyeli, İnsan sağlığı (OOP,İS)	kg NO_x eşd.	3,68E-03	-	5,00E-03
Ozon Oluşumu Potansiyeli, Karasal ekosistemler (OOP,KE)	kg NO_x eşd.	3,70E-03	-	5,15E-03
İnce Partikül Madde Oluşumu Potansiyeli (İPMOP)	kg PM 2.5 eşd.	1,33E-02	-	2,84E-03
Karasal Asidifikasyon Potansiyeli (KAP)	kg SO_2 eşd.	7,64E-03	3,20E-02	7,70E-03
Tatlı Su Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (TSSÖP)	kg P eşd.	1,76E-03	1,20E-05	8,72E-04
Deniz Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (DSÖP)	kg N eşd.	1,97E-04	2,70E-04	9,68E-03
Kara Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (KCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	6,80E-01	4,10E-05	3,96E+00
Tatlı Su Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (TSCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	4,90E-02	4,00E-03	2,89E-02
Deniz Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (DCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	6,75E-02	4,10E-03	3,99E-02
Toksisite- İnsan Sağlığı (Kanser) (T-İS (Kanser))	kg 1,4-DCB eşd.	9,55E-02	-	2,75E-02
Toksisite- İnsan Sağlığı (Kanser Dışı) (T-İS (Kanser Dışı))	kg 1,4-DCB eşd.	1,99E+00	-	7,11E-01
Arazi Kullanımı (AK)	m^2 ekin eşd.	5,12E-03	-	4,95E-02
Mineral Kaynak Kıtlığı (MKK)	kg Cu eşd.	2,74E-04	-	3,15E-03
Fosil Kaynak Kıtlığı (FKK)	kg petrol eşd.	4,40E-01	9,10E-01	1,20E+00
Su Tüketimi (ST)	m^3	1,63E-02	8,60E-04	8,52E-03

Tablo 5.2: Tesise ait çalışma sonuçlarının literatür çalışmaları ile yüzdesel karşılaştırılması.

Etki Kategorisi	Birim	Abdul Ghani ve diğ. (2021) (%)	Fayyaz ve diğ. (2023) (%)
Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)	kg CO_2 eşd.	+51,16	+100,00
Stratosferik Ozon Tüketimi Potansiyeli (SOTP)	kg CFC11 eşd.	-98,32	+603,02
İyonlaşmış Radyasyon Potansiyeli (İRP)	kBq Co-60 eşd.		+346,35
Ozon Oluşumu Potansiyeli, İnsan sağlığı (OOP,İS)	kg NO_x eşd.		+35,87
Ozon Oluşumu Potansiyeli, Karasal ekosistemler (OOP,KE)	kg NO_x eşd.		+39,19
İnce Partikül Madde Oluşumu Potansiyeli (İPMOP)	kg PM 2.5 eşd.		-78,65
Karasal Asidifikasyon Potansiyeli (KAP)	kg SO_2 eşd.	+318,85	+0,79
Tatlı Su Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (TSSÖP)	kg P eşd.	-99,32	-50,45
Deniz Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli (DSÖP)	kg N eşd.	+37,06	+4813,71
Kara Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (KCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	-99,99	+482,35
Tatlı Su Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (TSCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	-91,84	-41,02
Deniz Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli (DCEP)	kg 1,4-DCB eşd.	-93,93	-40,89
Toksisite- İnsan Sağlığı (Kanser) (T-İS (Kanser))	kg 1,4-DCB eşd.		-71,20
Toksisite- İnsan Sağlığı (Kanser Dışı) (T-İS (Kanser Dışı))	kg 1,4-DCB eşd.		-64,27
Arazi Kullanımı (AK)	m^2 ekin eşd.		+866,80
Mineral Kaynak Kıtlığı (MKK)	kg Cu eşd.		+1049,64
Fosil Kaynak Kıtlığı (FKK)	kg petrol eşd.	+106,82	+172,73
Su Tüketimi (ST)	m^3	-94,72	-47,73

YDA çalışmasının sonuçlarının güvenirliğinin kontrolü amacı ile hassasiyet ve belirsizlik analizi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Hassasiyet analizi kapsamında ana senaryoya ait enerji tüketimi düzeyleri %10 artırılarak ve azaltılarak tüm etki kategorilerindeki değişimler incelenmiştir ve ReCiPe etki analizi metodu dışında CML-IA Baseline ve IMPACT 2002+ etki analizi metodları kullanılarak KIP, SOTP ve KAP etki başlıkları karşılaştırılmıştır. KIP etki kategorisi için yakın sonuçlar (CML-IA Baseline için -%1,43, IMPACT 2002+ için -%4,55) elde edilmiştir. Goedkoop ve diğ. (2016), belirsizlik analizlerinde 1,00E-02'nin altındaki standart hata değerlerini kabul edilebilir olarak belirtmiştir. Tablo 4.10'a göre ST ve T-İS (Kanser dışı) dışındaki tüm kategoriler bu sınırın altındadır ve sonuçlar güvenilirdir.

Deney sistemininin modellenmesi sonucunda gerçek tesise oranla daha az membran modülü, dolayısıyla toplamda daha az taşınım mesafesi ve bertaraf edilecek daha az modül sayısı bulunmuştur. Bu girdiler ile gerçekleştirilen YDA çalışması; KIP, SOTP, İRP, OOP,İS, OOP,KE, İPMOP, KAP, TSSÖP, DSÖP, KCEP, TSCEP ve DCEP etki kategorilerinde %0,04-%0,58 arasında azalma göstermiştir. T-İS (Kanser), T-İS (Kanser dışı), MKK, FKK ve ST etki kategorilerinde %0,01-%0,16 arasında artış gerçekleşmiştir. AK etki kategorisinde ise herhangi bir değişim gerçekleşmemiştir. Sistem girdilerinde azalma gerçekleşmesine ragmen (modül sayısı vs), T-İS (Kanser), T-İS (Kanser dışı), MKK, FKK ve ST etki kategorilerinde artış gerçekleşmiştir. Bu durumun T-İS (Kanser), T-İS (Kanser dışı), MKK, FKK ve ST etki kategorilerinde hassasiyetin düşük olması sebebi ile gerçekleştiği düşünülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Deniz suyundan ters osmoz (TO) desalinasyonu ile içme suyu eldesinin çevresel etkilerinin azaltılması, daha sürdürülebilir bir içme suyu üretiminin sağlanması açısından kritik bir gerekliliktir. Bu doğrultuda alınacak önlemler, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir rol oynamaktadır. Tez çalışmasında yürütülen YDA çalışması ile ortaya konduğu üzere desalinasyon tesislerinin enerji yoğun prosesler olan TO prosesleri ile işletilmesi çevresel etkisinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Bu tez çalışmasında yenilenebilir ve yenilenemeyen enerji kaynaklarına dayalı senaryolarla gerçekleştirilen analizler, çevresel etki kategorilerinin enerji türlerine karşı duyarlılığını net bir biçimde ortaya koymaktadır. Yenilebilir ve yenilenemeyen enerji kaynaklarının %100 kullanımında çevresel etki kategorilerinde gerçekleşen değişimler (Tablo 4.4) ile yenilebilir ve yenilenemeyen enerji kaynaklarının karma kullanımı ile elde edilen azalmalar (Tablo 4.6) ile yenilenebilir enerjiye geçişin etki kategorilerine olan etkisi net bir şekilde gösterilmiştir.

Desalinasyon tesisinin tüm enerji ihtiyacının (%100) rüzgar enerjisi, güneş enerjisi (fotovoltaik enerji) ve hidroelektrik enerji ile karşılandığı senaryolarda orta etki kategorilerinden FKK, İPMOP, KAP, KIP, OOP, OOP,KE T-İS (Kanser), T-İS (Kanser dışı) ve TSSÖP etki kategorilerinde %95 in üzerinde çevresel etki azalımı gerçekleşmiştir. %100 yenilenebilir enerjiye geçiş ile İPMOP etki kategorisinde gerçekleşen çevresel etkilerdeki azalma ile enerji kaynaklı partikül emisyonlarının azalması ile bu emisyonlardan kaynaklanabilecek solunum yolu hastalıkları ve kardiyovasküler ölümler gibi sağlık risklerinin azalması söz konusu olabilecektir (Huijbregts ve diğ. 2016). TSSÖP etki kategorisinde gerçekleşen çevresel etkilerdeki azalma fosfor ve azot deşarjlarının azalması anlamına gelmekte olup bunun sonucunda göl ve akarsularda alg patlamalarının (ötrofikasyon) önlenebilmesi ve sudaki oksijen dengesinin ve biyolojik çeşitliliğni korunması söz konusu olabilecektir (Huijbregts ve diğ. 2016). T-İS (Kanser) ve T-İS (Kanser dışı) etki kategorilerinde gerçekleşen çevresel etkilerdeki azalım ise çevre üzerindeki kimyasal yükün azalması anlamına gelmekte olup sonuç olarak canlı türlerinde ölüm ve habitat kayıplarının önüne geçilmesi öngörülmektedir. (Huijbregts ve diğ. 2016). KAP etki kategorisinde gerçekleşen çevresel etkilerdeki azalım ile NO_x, NH_3 veya SO_2 emisyonlarının atmosfere salınımı azalmasına işaret etmekte olup, bu azalma ile toprakların biyokimyasal dengesinin korunarak bitki çeşitliliğinin kaybının önlenebileceği öngörülmektedir (Huijbregts ve diğ., 2016). KIP etki kategorisinde gerçekleşen çevresel etkilerdeki azalma ile sera gazı emisyonları azalmaktadır. Böylelikle,

insan sağlığına bağlı hastalık yükü ve ekosistemlerde tür kayıpları olasılığı azaltılmış olacaktır (Huijbregts ve diğ., 2016). OOP,İS ve OOP,KE etki kategorilerinde gerçekleşen çevresel etkilerdeki azalma VOC ve NO_x emisyonlarının azalması anlamına gelmektedir. Sonuç olarak bu azalma ile de ozon kaynaklı solunum problemleri ve tarımsal ürünlerdeki zararlar sınırlanabilecektir (Huijbregts ve diğ., 2016).

Desalinasyon tesisinin enerji ihtiyacının tümünün yenilenebilir enerji kaynaklarından biri (rüzgar, fotovoltaik, hidroelektrik) ile karşılanması durumunda nispeten daha az azalma elde edilen etki kategorileri ise orta nokta etki kategori DSÖP (%54,86) AK (%75,81) ve MKK (%61,87)'dır. AK etki kategorisinde ölçülen çevresel etkideki azalma ile arazi kullanım baskısınının azalabileceği ve biyolojik çeşitliliğin korunmasına katkı sağlanacağı öngörülmektedir (Huijbregts ve diğ., 2016). MKK etki kategorisinde ölçülen çevresel etki azalması madenciliğe dayalı hammadde çıkarım ihtiyacının azalması anlamına gelmektedir. Bu da ekosistem üzerindeki fiziksel tahribatın ve ekonomik kaynak kullanımı baskısının azalmasına işaret etmektedir (Huijbregts ve diğ., 2016). DSÖP etki kategorisinde ölçülen çevresel etki azalması, azot temelli besin maddesi yükünün düştüğünü göstermektedir. Sonuç olarak, yenilenebilir enerji kaynağına tümden geçilmesi ile kıyı ve açık deniz ekosistemlerinde oksijen yetersizliğini önlenmesi ve sucul canlı çeşitliliğinin korunmasına katkıda bulunulması söz konusu olacaktır (Huijbregts ve diğ., 2016). AK, MKK ve DSÖP etki kategorilerinin enerji tüketimine bağlı değişimleri diğer etki kategorilerine göre düşük kalması bu etki kategorilerinin enerji tüketimi kaynaklı çevresel etkilerinin diğer etki kategorilerine göre daha düşük olduğunu göstermektedir. AK etki kategorisinde alt proseslerin dağılımı incelendiği takdirde, hammadde tüketiminin mevcut olduğu ön arıtma, son arıtma ve bakım alt proseslerinin toplam yüzdesi 34,42'dir. MKK etki kategorisinde alt proseslerin dağılımı incelendiği takdirde, hammadde tüketiminin mevcut olduğu ön arıtma, son arıtma ve bakım alt proseslerinin toplam yüzdesi 44,25'dir. DSÖP etki kategorisinde alt proseslerin dağılımı incelendiği takdirde, alt proses olan konsantre bertarafının toplam yüzdesi 35,40'dır. Bu kapsamda, hammadde tüketiminin çevresel etkileri, özellikle AK ve MKK etki kategorilerinde, diğer etki kategorilerine kıyasla daha yüksek oranlarda ortaya çıkmaktadır. Benzer şekilde, konsantre bertarafı işlemi, DSÖP etki kategorisinde çevresel yükün %35,40'lık bölümünü oluşturmaktadır.

Desalinasyon tesislerinde %100 yenilenebilir enerji kaynağına geçiş senaryolarından hidroelektrik enerjisi senaryosunda ST orta nokta etki kategorisinde ise çevresel etkide artış gözlenmiştir. Bunun nedeni enerji eldesinin doğrudan su ile sağlanmasıdır.

Yenilebilir ve yenilenemeyen enerji kaynaklarının karma kullanımı ile elde edilen azalmalar (Tablo 4.6) incelenir ise; yenilenebilir enerjiye geçiş sırasında çevresel etkisi en çok azalan etki kategorileri %100 yenilenebilir enerjiye geçiş senaryolarında elde edilen sonuçlarla uyumlu olarak FKK, İPMOP, KAP, KIP, OOP,İS, OOP,KE T-İS (Kanser), T-İS (Kanser dışı) ve TSSÖP dir. AK, MKK ve DSÖP etki kategorilerinin enerji tüketimine bağlı değişimleri ise yine %100 yenilenebilir enerjiye geçiş senaryolarında elde edilen sonuçlarla uyumlu olarak diğer etki kategorilerine göre düşük kalmaktadır.

Alt proseslerin etki kategorilerinde aldığı en yüksek yüzde etkiler incelenir ise; su alma yapısına ait herhangi bir girdi ve çıktı mevcut olmadığından herhangi bir çevresel etkisi bulunmamaktadır. Ön arıtma prosesinin %18,97 ile en yüksek katkı verdiği etki kategorisi MKK etki kategorisidir. Ters osmoz prosesinin %80,52 ile en yüksek katkı verdiği etki kategorisi ise İPMOP etki kategorisidir. Son arıtma prosesinin %14,43 ile en yüksek katkı verdiği etki kategorisi İRP etki kategorisidir. Dağıtım prosesinin %8,88 ile en yüksek katkı verdiği etki kategorisi TSSÖP etki kategorisidir. Bakım prosesinin %18,09 ile en yüksek katkı verdiği etki kategorisi MKK etki kategorisidir. Konsantre bertarafı prosesinin %35,40 ile en yüksek katkı verdiği etki kategorisi DSÖP etki kategorisidir. Atık bertarafı prosesinin %4,64 ile en yüksek katkı verdiği etki kategorisi TSCEP etki kategorisidir.

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen YDA sonuçları, deniz suyundan içme suyu üretiminin çevresel etkisinin ağırlıklı olarak yüksek enerji talebi ve hammadde tüketiminden kaynaklı olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Tesisin enerji ihtiyacının yenilenebilir kaynaklardan karşılanması durumunda, FKK, İPMOP, KAP, KIP, OOP,İS, OOP,KE T-İS (Kanser), T-İS (Kanser dışı) ve TSSÖP gibi enerjiye duyarlı etki kategorilerinde %95'in üzerinde çevresel etki azalımı sağlandığı görülmektedir. Bu azalmalar, sera gazlarının, azot-fosfor bazlı kirleticilerin, uçucu organik bileşiklerin ve partikül emisyonlarının düşürülmesi ile doğrudan ilişkilidir. Bu durum, rüzgar, güneş enerjisi ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının, çevresel performansı büyük oranda iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Deney sistemininin modellenmesi ile gerçekleştirilen YDA çalışmasının sonuçları, gerçek tesis verileri ile karşılaştırıldığında membran modülü sayısında, modüllerin taşınımı için gereken taşınım ihtiyacında ve atık modüllerin bertaraf miktarında oluşan azalmaların çevresel etkilere yansıması düşük kalmıştır. Bunun nedeni tesisin çevresel etkilerinin ağırlıklı olarak enerji tüketiminden kaynaklanmasıdır.

Sonuç olarak, yapılan çevresel etki analizi çalışması TO prosesinin kullanıldığı desalinasyon ile içme suyu üretiminde fosil kaynaklar yerine enerji kaynaklarına geçişin önemini ortaya koymuştur. Desalinasyon tesislerinde yenilenebilir enerji kaynağına geçişin yanı sıra bu tesislerde kullanılan enerji miktarlarının düşürülmesi de önem arz etmektedir. Enerji miktarlarındaki azalmalar ile çevresel etkilerin azaltılabildiği de bu çalışma ile nicel veriler halinde ortaya konmuştur. Bu kapsamda desalinasyon ile içme suyu üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişin yanı sıra enerji verimliliği yüksek pompa ve cihazların kullanımı da önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Abdul Ghani, L., Ali, N., Nazaran, I. S., Hanafiah, M. M., 2021, Environmental Performance of Small-Scale Seawater Reverse Osmosis Plant for Rural Area Water Supply, *Membranes*, *11*(1), 40.

Ahmed, F. E., Khalil, A., Hilal, N., 2021, Emerging desalination technologies: Current status, challenges and future trends, *Desalination*, Volume 517, 115183, ISSN 0011-9164.

Al-Kaabi, A. H., Mackey, H. R., 2019, Environmental assessment of intake alternatives for seawater reverse osmosis in the Arabian Gulf, *Journal of Environmental Management*, Volume 242, Pages 22-30, ISSN 0301-4797.

Al-Sarkal, T., Arafat, H. A., 2013, Ultrafiltration versus sedimentation-based pretreatment in Fujairah-1 RO plant: Environmental impact study, *Desalination*, Volume 317, Pages 55-66, ISSN 0011-9164.

Ayaz, M., Namazi, M. A., Ammad ud Din, M., Mohamed Ershath, M. I., Mansour, A., Aggoune, E. H. M., 2022, Sustainable seawater desalination: Current status, environmental implications and future expectations, *Desalination*, 540, 116022.

Aziz, N. I. H. A., Hanafiah, M. M., 2021, Application of life cycle assessment for desalination: Progress, challenges and future directions, *Environmental Pollution*, Volume 268, Part B, 115948, ISSN 0269-7491.

Badurzzaman, M., Voutchkov, N., Weinrich, L. Jacangelo, J. G., 2019, Selection of pretreatment technologies for seawater reverse osmosis plants: A review, *Desalination*, Volume 449, Pages 78-91, ISSN 0011-9164.

Beery, M., Wozny, G., Repke, J.-U., 2010, Sustainable design of different seawater reverse osmosis desalination pretreatment processes, In S. Pierucci & G. Buzzi Ferraris (Der.), *Computer aided chemical engineering*, Volume 28, Pages 1069-1074, ISSN 1570-7946.

Eke, J., Yusuf, A., Giwa, A., Sodiq, A., 2020, The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity, *Desalination*, 495, 114633.

Fayyaz, S., Masjedi, S. K., Kazemi, A., Khaki, E., Moeinaddini, M., Olsen, S. I., 2023, Life cycle assessment of reverse osmosis for high-salinity seawater desalination process: Potable and industrial water production, *Journal of Cleaner Production*, Volume 382, 135299, ISSN 0959-6526.

Goedkoop, M., Oele, M., Leijting, J., Ponsioen, T., Meijer, E., 2016, Introduction to LCA with SimaPro (Version 5.2), Amersfoort, The Netherlands: PRé Sustainability.

Goga, T., Friedrich, E., & Buckley, C., 2019, Environmental life cycle assessment for potable water production – A case study of seawater desalination and mine-water reclamation in South Africa, *Water SA, 45*(4), Art. #7552.

Guinée, J. B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes G., Kleijn, R., Koning, A., Sleeswijk, L. O. A. W., 2002, Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Hasar, H., Ürper, G. M., Güçlü, S., Koyuncu, İ., 2018, *Membran Prosesler*, Cilt 1: Membran Teknolojileri ve Su Arıtma, Su/Atıksu Arıtılması ve Geri Kazanılmasında Membran Teknolojileri ve Uygulamaları, In: Koyuncu, İ. (ed.), Bölüm 3, T.C. ÇEVRE VE ŞEHİRCİLİK BAKANLIĞI, ANKARA, ISBN: 978-605-9351-22-5.

Hauschild, M., Goedkoop, M., Guinee, J., Heijungs, R., Huijbregts, M., Jolliet, O., Margni, M., De Schryver, A., Pennington, D., Pant, R., Sala, S., Brandão, M., Wolf, M., 2011, *Recommendations for life cycle impact assessment in the European context – based on existing environmental impact assessment models and factors (International Reference Life Cycle Data System – ILCD Handbook)* (EUR 24571 EN). Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Henthorne, L., Boysen, B., 2015, State-of-the-art of reverse osmosis desalination pretreatment, *Desalination*, Volume 356, Pages 129-139, ISSN 0011-9164.

Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M. D. M., Hollander, A., Zijp, M., van Zelm, R., 2016, ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization. RIVM, Netherlands.

International Organization for Standardization, 2006, *ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.* Geneva, Switzerland: ISO.

Ivanov, O., Honfi, D., Stripple, H, 2018, uncertainty and variation in LCA - Implementation of probabilistic methods to assess environmental impacts of infrastructures, (TVBK; No. 3070). Lunds tekniska högskola, Avdelningen för konstruktionsteknik.

Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., Rosenbahum, R, 2003, IMPACT 2002+: a new life cycle assessment methodology, Int J Life Cycle Assess 8:324-330, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8, 324-330. 10.1007/BF02978505.

Kim, S., Oh, B. S., Hwang, M.-H., Hong, S., Kim, J. H., Lee, S., Kim, I., 2011, An ambitious step to the future desalination technology: SEAHERO R&D program (2007–2012), *Applied Water Science*, 1(1), 11–17.

Koyuncu, İ., Yüksekdağ, A., Ağtaş, M., Türken, T., 2018, *Su Arıtımında Membran Teknolojileri*, Cilt 1: Membran Teknolojileri ve Su Arıtma, Su/Atıksu Arıtılması ve Geri Kazanılmasında Membran Teknolojileri ve Uygulamaları, In: Koyuncu, İ. (ed.), Bölüm 7, T.C. ÇEVRE VE ŞEHİRCİLİK BAKANLIĞI, ANKARA, ISBN: 978-605-9351-22-5

Kurihara, M., 2021, Current Status and Future Trend of Dominant Commercial Reverse Osmosis Membranes. *Membranes*, 11(11), 906.

Le, N. L., Nunes, S. P., 2016, Materials and membrane technologies for water and energy sustainability, *Sustainable Materials and Technologies*, Volume 7, Pages 1-28, ISSN 2214-9937.

Lee, K., Jepson, W., 2021, Environmental impact of desalination: A systematic review of Life Cycle Assessment, *Desalination*, Volume 509, 115066, ISSN 0011-9164.

Missimer, T. M., Maliva, R. G., 2018, Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls, *Desalination*, Volume 434, Pages 198-215, ISSN 0011-9164.

Najid, N. Hakizimana, J. N., Kouzbour, S., Gourich, B., Ruiz-Garcia, A., Vial, C., Stiriba, Y., Semiat, R., 2022, Fouling control and modeling in reverse osmosis for seawater desalination: A review, *Computers & Chemical Engineering*, Volume 162, 107794, ISSN 0098-1354.

Najjar, E., Al-Hindi, M., Massoud, M., Saad, W., 2022, Life cycle assessment and cost of a seawater reverse osmosis plant operated with different energy sources, *Energy Conversion and Management*, Volume 268, 115964, ISSN 0196-8904.

Northern Ireland Environment Agency, 2014, *Waste report: Waste density conversion factors – survey results 2014*. Belfast: Northern Ireland Environment Agency.

Sun, S., Ertz, M., 2020, Life cycle assessment and Monte Carlo simulation to evaluate the environmental impact of promoting LNG vehicles, *MethodsX*, Volume 7, 101046, ISSN 2215-0161.

Shahabi, M. P., McHugh, A., Anda, M., Ho, G., 2014, Environmental life cycle assessment of seawater reverse osmosis desalination plant powered by renewable energy, *Renewable Energy*, Volume 67, Pages 53-58, ISSN 0960-1481.

Shahabi, M. P., McHugh, A., Ho, G., 2015, Environmental and economic assessment of beach well intake versus open intake for seawater reverse osmosis desalination, *Desalination*, Volume 357, Pages 259-266, ISSN 0011-9164.

Shemer, H., Semiat, R., 2017, Sustainable RO desalination – Energy demand and environmental impact, *Desalination*, Volume 424, Pages 10-16, ISSN 0011-9164.

Türkiye İstatistik Kurumu (TUİK), 2025, Enerji kaynaklarına göre elektrik enerjisi üretimi ve payları, Elektrik İstatistikleri, Enerji İstatistikleri, Çevre ve Enerji, TÜRKİYE İSTATİSTİK KURUMU.

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021, *Marmara Denizi atık yönetimi ve deniz çöpleri bölgesel eylem planı (2021–2026): Nihai rapor*, T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Ankara.

U.S. Environmental Protection Agency, 2016, *Life cycle assessment: Principles and practice*, Washington, DC: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development.

Voutchkov, N., 2013a, *Fundamentals of Reverse Osmosis Desalination*, Desalination Engineering: Planning and Design, Chapter 3, McGraw-Hill Professional, New York, ISBN: 978-0-07-177716-2, 43–78.

Voutchkov, N., 2013b, *Intakes for Source Water Collection*, Desalination Engineering: Planning and Design, Chapter 6, McGraw-Hill Professional, New York, ISBN: 978-0-07-177716-2, 193–224.

Voutchkov, N., 2013c, *Post-Treatment of Desalinated Water*, Desalination Engineering: Planning and Design, Chapter 15, McGraw-Hill Professional, New York, ISBN: 978-0-07-177716-2, 445–489.

Voutchkov, N., 2013d, *Desalination Plant Discharge Management*, Desalination Engineering: Planning and Design, Chapter 16, McGraw-Hill Professional, New York, ISBN: 978-0-07-177716-2, 491–593.

Voutchkov, N., 2017a, *Saline Water Intakes and Pretreatment*, Pretreatment for Reverse Osmosis Desalination, Chapter 4, Elsevier, ISBN: 9780128099537, 65–94.

Voutchkov, N., 2017b, *Conditioning of Saline Water*, Pretreatment for Reverse Osmosis Desalination, Chapter 6, Elsevier, ISBN: 9780128099537, 113–135.

Voutchkov, N., 2017c, *Sand Removal, Sedimentation and Dissolved Air Flotation*, Pretreatment for Reverse Osmosis Desalination, Chapter 7, Elsevier, ISBN: 9780128099537, 137–152.

Voutchkov, N., 2017d, *Granular Media Filtration*, Pretreatment for Reverse Osmosis Desalination, Chapter 8, Elsevier, ISBN: 9780128099537, 153–186.

Voutchkov, N., 2017e, *Membrane Filtration*, Pretreatment for Reverse Osmosis Desalination, Chapter 9, Elsevier, ISBN: 9780128099537, 188–219.

Zaidi, S. J., Saleem, H., 2022a, *Introduction to Reverse Osmosis*, Reverse Osmosis Systems, Chapter 1, Elsevier, ISBN: 9780128239650, 1–32.

Zaidi, S. J., Saleem, H., 2022b, *Pretreatment: Fouling and Scaling Control*, Reverse Osmosis Systems, Chapter 5, Elsevier, ISBN: 9780128239650, 141–177.

Zaidi, S. J., Saleem, H., 2022c, *Reverse Osmosis Principles and System Components*, Reverse Osmosis Systems, Chapter 2, Elsevier, ISBN: 9780128239650, 33–69.

Zhou, J., Victor, Chang, W. -C., Fane, A. G., 2014, Life Cycle Assessment for desalination: A review on methodology feasibility and reliability, *Water Research*, Volume 61, 210-223, ISSN 0043-1354.

EKLER

EK 1. 1 m^3 arıtılmış deniz suyunun KIP etki kategorisine etki eden yaşam döngüsü analizi envanter sonuçları.

Hesaplama:	Karşılaştırma
Sonuçlar:	Envanter
Girdi 1 :	Su Alma Yapısı
Girdi 2 :	Ön Arıtma
Girdi 3 :	Ters Osmoz
Girdi 4 :	Son Arıtma
Girdi 5 :	Dağıtım
Girdi 6 :	Bakım
Girdi 7 :	Konsantre Bertarafı
Girdi 8 :	Atık Bertarafı
Metot :	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 / World (2010) H
İndikatör	Karakterizasyon
Kısım :	Tüm Kısımlar
Kategori :	**Küresel Isınıma Potansiyeli**
Kesme Kriteri :	%1
Altyapı süreçlerini dahil etme :	Evet
Uzun vadeli emisyonları dahil etme :	Hayır
Öğeye göre sıralandı :	Madde
Sıralama düzeni :	Artan

No	Madde	Bölüm	Alt Bölüm	Birim	Su Alma Yapısı	Ön Arıtma	Ters Osmoz	Son Arıtma	Dağıtım	Bakım	Konsantre Bertarafı	Atık Bertarafı
	Tüm kısımların toplamı			kg CO_2 eşd.	0	0,146	1,35	0,0623	0,148	0,00988	-	0,00206
	Kalan kısımlar			kg CO_2 eşd.	0	0,00592	0,0416	0,00339	0,00457	0,00154	-	-2,7E-5
1	Karbondioksit, fosil	Hava	Yüksek pop.	kg CO_2 eşd.	0	0,00598	0,0165	0,00365	0,00182	0,00341	0	0,00124
2	Karbondioksit, fosil	Hava	Düşük pop.	kg CO_2 eşd.	0	0,127	1,22	0,0508	0,135	0,00413	0	-9,66E-5
3	Metan, fosil	Hava		kg CO_2 eşd.	0	0,0016	0,0154	0,000631	0,0017	6,96E-5	0	-6,91E-7
4	Metan, fosil	Hava	Düşük pop.	kg CO_2 eşd.	0	0,00554	0,0512	0,00379	0,00564	0,000734	0	0,00094

*pop : popülasyon

EK 2. 1 m^3 arıtılmış deniz suyunun SOTP etki kategorisine etki eden yaşam döngüsü analizi envanter sonuçları.

Hesaplama:	Karşılaştırma
Sonuçlar:	Envanter
Girdi 1 :	Su Alma Yapısı
Girdi 2 :	Ön Arıtma
Girdi 3 :	Ters Osmoz
Girdi 4 :	Son Arıtma
Girdi 5 :	Dağıtım
Girdi 6 :	Bakım
Girdi 7 :	Konsantre Bertarafı
Girdi 8 :	Atık Bertarafı
Metot :	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 / World (2010) H
İndikatör	Karakterizasyon
Kısım :	Tüm Kısımlar
Kategori :	**Stratosferik Ozon Tüketimi Potansiyeli**
Kesme Kriteri :	%1
Altyapı süreçlerini dahil etme :	Evet
Uzun vadeli emisyonları dahil etme :	Hayır
Öğeye göre sıralandı :	Madde
Sıralama düzeni :	Artan

No	Madde	Bölüm	Alt Bölüm	Birim	Su Alma Yapısı	Ön Arıtma	Ters Osmoz	Son Arıtma	Dağıtım	Bakım	Konsantre Bertarafı	Atık Bertarafı
	Tüm kısımların toplamı			kg CFC11 eşd.	-	4,75E-8	4,37E-7	4,36E-8	4,81E-8	1,95E-8	-	5,71E-11
	Kalan kısımlar			kg CFC11 eşd.	-	3,67E-10	2,87E-9	5,02E-10	3,16E-10	2,79E-10	-	4E-12
1	Diazot monoksit	Hava		kg CFC11 eşd.	0	1,56E-8	1,48E-7	7,04E-9	1,63E-8	6,58E-10	0	7,26E-11
2	Diazot monoksit	Hava	Yüksek pop.	kg CFC11 eşd.	0	2,62E-9	1,91E-8	2,09E-9	2,1E-9	5,05E-9	0	-4,84E-11
3	Diazot monoksit	Hava	Düşük pop.	kg CFC11 eşd.	0	2,44E-8	2,35E-7	1,02E-8	2,59E-8	1,14E-8	0	-2,27E-11
4	Metan, Bromoboranür, Halon 1301	Hava	Düşük pop.	kg CFC11 eşd.	0	3,77E-9	3,14E-8	1,72E-9	3,45E-9	3,7E-10	0	5,14E-11
5	Metan, tetrakloro-, CFC-10	Hava	Yüksek pop.	kg CFC11 eşd.	0	7,41E-10	5,43E-11	2,2E-8	5,98E-12	1,76E-9	0	2,26E-13

*pop : popülasyon

EK 3. 1 m^3 arıtılmış deniz suyunun İRP etki kategorisine etki eden yaşam döngüsü analizi envanter sonuçları.

Hesaplama:	Karşılaştırma
Sonuçlar:	Envanter
Girdi 1 :	Su Alma Yapısı
Girdi 2 :	Ön Arıtma
Girdi 3 :	Ters Osmoz
Girdi 4 :	Son Arıtma
Girdi 5 :	Dağıtım
Girdi 6 :	Bakım
Girdi 7 :	Konsantre Bertarafı
Girdi 8 :	Atık Bertarafı
Metot :	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 / World (2010) H
İndikatör	Karakterizasyon
Kısım :	Tüm Kısımlar
Kategori :	**İyonlaşmış Radyasyon Potansiyeli**
Kesme Kriteri :	%1
Altyapı süreçlerini dahil etme :	Evet
Uzun vadeli emisyonları dahil etme :	Hayır
Öğeye göre sıralandı :	Madde
Sıralama düzeni :	Artan

No	Madde	Bölüm	Alt Bölüm	Birim	Su Alma Yapısı	Ön Arıtma	Ters Osmoz	Son Arıtma	Dağıtım	Bakım	Konsantre Bertarafı	Atık Bertarafı
	Tüm kısımların toplamı			kBq Co-60	-	0,00195	0,0158	0,00336	0,00174	0,000446	-	-1,36E-5
	Kalan kısımlar			kBq Co-60	-	3,18E-5	0,000286	3,45E-5	3,15E-5	4,2E-6	-	-7,74E-7
1	Karbon-14	Hava	Düşük pop.	kBq Co-60	0	0,000114	0,00079	0,00019	8,67E-5	3,01E-5	0	1,36E-6
2	Radon-222	Hava	Düşük pop.	kBq Co-60	0	5E-5	0,00041	8,56E-5	4,52E-5	1,13E-5	0	-3,86E-7
3	Radon-222	Hava	Düşük pop., uzun dönem	kBq Co-60	0	0,00175	0,0143	0,00305	0,00157	0,0004	0	-1,38E-5

*pop : popülasyon

EK 4. 1 m^3 arıtılmış deniz suyunun OOP, İS etki kategorisine etki eden yaşam döngüsü analizi envanter sonuçları.

Hesaplama:	Karşılaştırma
Sonuçlar:	Envanter
Girdi 1 :	Su Alma Yapısı
Girdi 2 :	Ön Arıtma
Girdi 3 :	Ters Osmoz
Girdi 4 :	Son Arıtma
Girdi 5 :	Dağıtım
Girdi 6 :	Bakım
Girdi 7 :	Konsantre Bertarafı
Girdi 8 :	Atık Bertarafı
Metot :	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 / World (2010) H
İndikatör	Karakterizasyon
Kısım :	Tüm Kısımlar
Kategori :	**Ozon Oluşumu Potansiyeli, İnsan Sağlığı**
Kesme Kriteri :	%1
Altyapı süreçlerini dahil etme :	Evet
Uzun vadeli emisyonları dahil etme :	Hayır
Öğeye göre sıralandı :	Madde
Sıralama düzeni :	Artan

No	Madde	Bölüm	Alt Bölüm	Birim	Su Alma Yapısı	Ön Arıtma	Ters Osmoz	Son Arıtma	Dağıtım	Bakım	Konsantre Bertarafı	Atık Bertarafı
	Tüm kısımların toplamı			kg NO_x eşd.	-	0,000313	0,00288	0,000143	0,000316	2,47E-5	-	1,61E-6
	Kalan kısımlar			kg NO_x eşd.	-	4,37E-6	3,11E-5	1,64E-6	3,42E-6	6E-7	-	-1,36E-7
1	Azot oksitler	Hava		kg NO_x eşd.	0	1,89E-5	0,000129	1,79E-5	1,42E-5	5,15E-6	0	1,42E-6
2	Azot oksitler	Hava	Düşük pop.	kg NO_x eşd.	0	8,41E-6	3,96E-5	1,06E-5	4,37E-6	7,22E-6	0	-8,24E-8
3	Azot oksitler	Hava	Yüksek pop.	kg NO_x eşd.	0	0,000281	0,00268	0,000113	0,000294	1,18E-5	0	4,14E-7

*pop : popülasyon

EK 5. 1 m^3 arıtılmış deniz suyunun OOP, KE etki kategorisine etki eden yaşam döngüsü analizi envanter sonuçları.

Hesaplama:	Karşılaştırma
Sonuçlar:	Envanter
Girdi 1 :	Su Alma Yapısı
Girdi 2 :	Ön Arıtma
Girdi 3 :	Ters Osmoz
Girdi 4 :	Son Arıtma
Girdi 5 :	Dağıtım
Girdi 6 :	Bakım
Girdi 7 :	Konsantre Bertarafı
Girdi 8 :	Atık Bertarafı
Metot :	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 / World (2010) H
İndikatör	Karakterizasyon
Kısım :	Tüm Kısımlar
Kategori :	**Ozon Oluşumu Potansiyeli, Karasal Ekosistemler**
Kesme Kriteri :	%1
Altyapı süreçlerini dahil etme :	Evet
Uzun vadeli emisyonları dahil etme :	Hayır
Öğeye göre sıralandı :	Madde
Sıralama düzeni :	Artan

No	Madde	Bölüm	Alt Bölüm	Birim	Su Alma Yapısı	Ön Arıtma	Ters Osmoz	Son Arıtma	Dağıtım	Bakım	Konsantre Bertarafı	Atık Bertarafı
	Tüm kısımların toplamı			kg NO_x eşd.	-	0,000315	0,0029	0,000144	0,000319	2,51E-5	-	1,63E-6
	Kalan kısımlar			kg NO_x eşd.	-	3,53E-6	2,14E-5	1,27E-6	2,35E-6	6,43E-7	-	-1,4E-7
1	Azot oksitler	Hava		kg NO_x eşd.	0	1,89E-5	0,000129	1,79E-5	1,42E-5	5,15E-6	0	1,42E-6
2	Azot oksitler	Hava	Yüksek pop.	kg NO_x eşd.	0	8,41E-6	3,96E-5	1,06E-5	4,37E-6	7,22E-6	0	-8,24E-8
3	Azot oksitler	Hava	Düşük pop.	kg NO_x eşd.	0	0,000281	0,00268	0,000113	0,000294	1,18E-5	0	4,14E-7
4	Metan olmayan uçucu organik bileşikler*	Hava	Düşük pop.	kg NO_x eşd.	0	3,52E-6	2,87E-5	1,37E-6	3,15E-6	3,23E-7	0	2,08E-8

"pop" : popülasyon
*NMVOC : Metan olmayan uçucu organik bileşikler

EK 6. 1 m^3 arıtılmış deniz suyunun İPMOP etki kategorisine etki eden yaşam döngüsü analizi envanter sonuçları.

Hesaplama:	Karşılaştırma
Sonuçlar:	Envanter
Girdi 1 :	Su Alma Yapısı
Girdi 2 :	Ön Arıtma
Girdi 3 :	Ters Osmoz
Girdi 4 :	Son Arıtma
Girdi 5 :	Dağıtım
Girdi 6 :	Bakım
Girdi 7 :	Konsantre Bertarafı
Girdi 8 :	Atık Bertarafı
Metot :	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 / World (2010) H
İndikatör	Karakterizasyon
Kısım :	Tüm Kısımlar
Kategori :	**İnce Partikül Madde Oluşum Potansiyeli**
Kesme Kriteri :	%1
Altyapı süreçlerini dahil etme :	Evet
Uzun vadeli emisyonları dahil etme :	Hayır
Öğeye göre sıralandı :	Madde
Sıralama düzeni :	Artan

No	Madde	Bölüm	Alt Bölüm	Birim	Su Alma Yapısı	Ön Arıtma	Ters Osmoz	Son Arıtma	Dağıtım	Bakım	Konsantre Bertarafı	Atık Bertarafı
	Tüm kısımların toplamı			kg PM 2.5 eşd.	-	0,00109	0,0107	0,000301	0,00118	1,91E-5	-	-1,85E-6
	Kalan kısımlar			kg PM 2.5 eşd.	-	1,08E-5	6,49E-5	1,51E-5	7,14E-6	9,92E-6	-	2,4E-7
1	Azot oksitler	Hava	Düşük pop.	kg PM 2.5 eşd.	0	3,09E-5	0,000295	1,25E-5	3,24E-5	1,29E-6	0	4,56E-8
2	Partiküller, < 2.5 μm	Hava	Düşük pop.	kg PM 2.5 eşd.	0	0,000907	0,00891	0,000225	0,000982	4,25E-6	0	-1,89E-6
3	Kükürt dioksit	Hava	Düşük pop.	kg PM 2.5 eşd.	0	0,000146	0,0014	4,85E-5	0,000154	3,6E-6	0	-2,39E-7
“pop” : popülasyon												

EK 7. 1 m^3 arıtılmış deniz suyunun KAP etki kategorisine etki eden yaşam döngüsü analizi envanter sonuçları.

Hesaplama:	Karşılaştırma
Sonuçlar:	Envanter
Girdi 1 :	Su Alma Yapısı
Girdi 2 :	Ön Arıtma
Girdi 3 :	Ters Osmoz
Girdi 4 :	Son Arıtma
Girdi 5 :	Dağıtım
Girdi 6 :	Bakım
Girdi 7 :	Konsantre Bertarafı
Girdi 8 :	Atık Bertarafı
Metot :	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 / World (2010) H
İndikatör	Karakterizasyon
Kısım :	Tüm Kısımlar
Kategori :	**Karasal Asidifikasyon Potansiyeli**
Kesme Kriteri :	%1
Altyapı süreçlerini dahil etme :	Evet
Uzun vadeli emisyonları dahil etme :	Hayır
Öğeye göre sıralandı :	Madde
Sıralama düzeni :	Artan

No	Madde	Bölüm	Alt Bölüm	Birim	Su Alma Yapısı	Ön Arıtma	Ters Osmoz	Son Arıtma	Dağıtım	Bakım	Konsantre Bertarafı	Atık Bertarafı
	Tüm kısımların toplamı			kg SO_2 eşd.	-	0,00064	0,00604	0,000246	0,000664	4,92E-5	-	-2,61E-7
	Kalan kısımlar			kg SO_2 eşd.	-	2,32E-5	0,000173	1,77E-5	1,9E-5	1,49E-5	-	4,02E-7
1	Azot oksitler	Hava	Düşük pop.	kg SO_2 eşd.	0	0,000101	0,000965	4,08E-5	0,000106	4,23E-6	0	1,49E-7
2	Kükürt dioksit	Hava	Yüksek pop.	kg SO_2 eşd..	0	1,2E-5	6,16E-5	2,06E-5	6,79E-6	1,76E-5	0	1,19E-8
3	Kükürt dioksit	Hava	Düşük pop.	kg SO_2 eşd.	0	0,000503	0,00484	0,000167	0,000532	1,24E-5	0	-8,24E-7

“pop” : popülasyon

EK 8. 1 m^3 arıtılmış deniz suyunun TSSÖP etki kategorisine etki eden yaşam döngüsü analizi envanter sonuçları.

Hesaplama:	Karşılaştırma
Sonuçlar:	Envanter
Girdi 1 :	Su Alma Yapısı
Girdi 2 :	Ön Arıtma
Girdi 3 :	Ters Osmoz
Girdi 4 :	Son Arıtma
Girdi 5 :	Dağıtım
Girdi 6 :	Bakım
Girdi 7 :	Konsantre Bertarafı
Girdi 8 :	Atık Bertarafı
Metot :	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 / World (2010) H
İndikatör	Karakterizasyon
Kısım :	Tüm Kısımlar
Kategori :	**Tatlı Su Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli**
Kesme Kriteri :	%1
Altyapı süreçlerini dahil etme :	Evet
Uzun vadeli emisyonları dahil etme :	Hayır
Öğeye göre sıralandı :	Madde
Sıralama düzeni :	Artan

No	Madde	Bölüm	Alt Bölüm	Birim	Su Alma Yapısı	Ön Arıtma	Ters Osmoz	Son Arıtma	Dağıtım	Bakım	Konsantre Bertarafı	Atık Bertarafı
	Tüm kısımların toplamı			kg P eşd.	-	0,000146	0,00141	4,48E-5	0,000156	3,12E-6	-	-6,22E-7
	Kalan kısımlar			kg P eşd.	-	1,87E-8	3,95E-8	8,48E-8	4,35E-9	2,78E-7	-	-1,73E-8
1	Fosfat	Su	Yeraltı suyu.	kg P eşd.	0	1,56E-5	0,000151	4,84E-6	1,66E-5	3,25E-7	0	-6,39E-8
2	Fosfat	Su	Yeraltı suyu, uzun dönem.	kg P eşd.	0	0,00013	0,00126	3,98E-5	0,000139	2,52E-6	0	-5,4E-7

EK 9. 1 m^3 arıtılmış deniz suyunun DSÖP etki kategorisine etki eden yaşam döngüsü analizi envanter sonuçları.

Hesaplama:	Karşılaştırma
Sonuçlar:	Envanter
Girdi 1 :	Su Alma Yapısı
Girdi 2 :	Ön Arıtma
Girdi 3 :	Ters Osmoz
Girdi 4 :	Son Arıtma
Girdi 5 :	Dağıtım
Girdi 6 :	Bakım
Girdi 7 :	Konsantre Bertarafı
Girdi 8 :	Atık Bertarafı
Metot :	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 / World (2010) H
İndikatör	Karakterizasyon
Kısım :	Tüm Kısımlar
Kategori :	**Deniz Sucul Ötrofikasyon Potansiyeli**
Kesme Kriteri :	%1
Altyapı süreçlerini dahil etme :	Evet
Uzun vadeli emisyonları dahil etme :	Hayır
Öğeye göre sıralandı :	Madde
Sıralama düzeni :	Artan

No	Madde	Bölüm	Alt Bölüm	Birim	Su Alma Yapısı	Ön Arıtma	Ters Osmoz	Son Arıtma	Dağıtım	Bakım	Konsantre Bertarafı	Atık Bertarafı
	Tüm kısımların toplamı			kg N eşd.	-	9,08E-6	8,77E-5	3,42E-6	9,67E-6	3,21E-6	6,98E-5	1,43E-5
	Kalan kısımlar			kg N eşd.	-	8,27E-8	5,35E-7	2,2E-7	5,9E-8	1,09E-6	0	1,54E-7
1	Amonyum, iyon	Su	Yeraltı suyu, uzun dönem.	kg N eşd.	0	6,9E-9	1,87E-8	2,04E-9	2,06E-9	2,45E-9	0	4,47E-6
2	Amonyum, iyon	Su	Okyanus	kg N eşd.	0	1,12E-11	4,92E-11	4,18E-12	5,42E-12	1,47E-11	6,98E-5	5,44E-15
3	Nitrat	Su	Yeraltı suyu,	kg N eşd.	0	1,29E-7	1,21E-6	7,28E-8	1,33E-7	1,18E-6	0	-5,97E-10
4	Nitrat	Su	Yeraltı suyu, uzun dönem.	kg N eşd.	0	8,74E-6	8,5E-5	2,82E-6	9,37E-6	1,66E-7	0	1,01E-7
5	Nitrat	Su	Nehir	kg N eşd.	0	1,08E-7	8,94E-7	2,95E-7	9,86E-8	7,71E-7	0	1,69E-7
6	Azot, organik bağlı	Su	Yeraltı suyu, uzun dönem.	kg N eşd.	0	1,36E-8	3,94E-8	4,28E-9	4,34E-9	4,69E-9	0	9,44E-6

EK 10. 1 m^3 arıtılmış deniz suyunun KCEP etki kategorisine etki eden yaşam döngüsü analizi envanter sonuçları.

Hesaplama:	Karşılaştırma
Sonuçlar:	Envanter
Girdi 1 :	Su Alma Yapısı
Girdi 2 :	Ön Arıtma
Girdi 3 :	Ters Osmoz
Girdi 4 :	Son Arıtma
Girdi 5 :	Dağıtım
Girdi 6 :	Bakım
Girdi 7 :	Konsantre Bertarafı
Girdi 8 :	Atık Bertarafı
Metot :	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 / World (2010) H
İndikatör	Karakterizasyon
Kısım :	Tüm Kısımlar
Kategori :	**Kara Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli**
Kesme Kriteri :	%1
Altyapı süreçlerini dahil etme :	Evet
Uzun vadeli emisyonları dahil etme :	Hayır
Öğeye göre sıralandı :	Madde
Sıralama düzeni :	Artan

No	Madde	Bölüm	Alt Bölüm	Birim	Su Alma Yapısı	Ön Arıtma	Ters Osmoz	Son Arıtma	Dağıtım	Bakım	Konsantre Bertarafı	Atık Bertarafı
	Tüm kısımların toplamı			kg 1,4 DCB eşd.	-	0,0894	0,447	0,0597	0,0489	0,0308	1,2E-21	0,00441
	Kalan kısımlar			kg 1,4 DCB eşd.	-	0,00665	0,0251	0,00581	0,00275	0,00386	1,2E-21	0,000703
1	Antimon	Hava		kg 1,4 DCB eşd.	0	0,00355	0,00457	0,00779	0,00289	0,00289	0	0,00101
2	Arsenik	Hava	Düşük pop.	kg 1,4 DCB eşd.	0	0,000924	0,00527	0,000273	0,000183	0,000183	0	-7,28E-7
3	Bakır	Hava		kg 1,4 DCB eşd.	0	0,0111	0,0177	0,0226	0,00865	0,00865	0	0,00283
4	Bakır	Hava	Yüksek pop.	kg 1,4 DCB eşd.	0	0,00171	0,00818	0,00169	0,000897	0,000897	0	-9,62E-5
5	Bakır	Hava	Düşük pop.	kg 1,4 DCB eşd.	0	0,0342	0,13	0,00552	0,00943	0,00943	0	-3,7E-5
6	Kurşun	Hava	Düşük pop.	kg 1,4 DCB eşd.	0	0,00178	0,0106	0,000601	0,000414	0,000414	0	-1,48E-6

7	Civa	Hava	Düşük pop.	kg 1,4 DCB eşd	0	0,0082	0,0792	0,00307	0,000218	0,000218	0	-2,5E-5
8	Nikel	Hava	Yüksek pop.	kg 1,4 DCB eşd	0	0,000975	0,00705	0,00128	0,000539	0,000539	0	-9,02E-6
9	Nikel	Hava	Düşük pop.	kg 1,4 DCB eşd	0	0,00744	0,0488	0,00251	0,00122	0,00122	0	7,02E-5
10	Selenyum	Hava	Düşük pop.	kg 1,4 DCB eşd	0	0,00126	0,0118	0,000547	5,94E-5	5,94E-5	0	-3,17E-6
11	Vanadyum	Hava	Yüksek pop.	kg 1,4 DCB eşd	0	0,0029	0,025	0,00421	0,00159	0,00159	0	-2,03E-5
12	Vanadyum	Hava	Düşük pop.	kg 1,4 DCB eşd	0	0,00229	0,0218	0,00133	0,00013	0,00013	0	3,35E-7
13	Çinko	Hava	Düşük pop.	kg 1,4 DCB eşd	0	0,0064	0,0518	0,00246	0,000669	0,000669	0	-1,14E-5
“pop” : popülasyon												

EK 11. 1 m^3 arıtılmış deniz suyunun TSCEP etki kategorisine etki eden yaşam döngüsü analizi envanter sonuçları.

Hesaplama:	Karşılaştırma
Sonuçlar:	Envanter
Girdi 1 :	Su Alma Yapısı
Girdi 2 :	Ön Arıtma
Girdi 3 :	Ters Osmoz
Girdi 4 :	Son Arıtma
Girdi 5 :	Dağıtım
Girdi 6 :	Bakım
Girdi 7 :	Konsantre Bertarafı
Girdi 8 :	Atık Bertarafı
Metot :	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 / World (2010) H
İndikatör	Karakterizasyon
Kısım :	Tüm Kısımlar
Kategori :	**Tatlı Su Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli**
Kesme Kriteri :	%1
Altyapı süreçlerini dahil etme :	Evet
Uzun vadeli emisyonları dahil etme :	Hayır
Öğeye göre sıralandı :	Madde
Sıralama düzeni :	Artan

No	Madde	Bölüm	Alt Bölüm	Birim	Su Alma Yapısı	Ön Arıtma	Ters Osmoz	Son Arıtma	Dağıtım	Bakım	Konsantre Bertarafı	Atık Bertarafı
	Tüm kısımların toplamı			kg 1,4 DCB eşd	-	0,00433	0,0367	0,00124	0,00405	0,000384	1,83E-25	0,00227
	Kalan kısımlar			kg 1,4 DCB eşd	-	0,000165	0,00137	5,61E-5	0,000151	3,01E-5	1,83E-25	0,000254
1	Hekzavalent Krom	Su	Yeraltı suyu, uzun dönem.	kg 1,4 DCB eşd	0	8,11E-5	0,000773	2,68E-5	8,52E-5	2,57E-6	0	-1,42E-7
2	Bakır	Su	Yeraltı suyu, uzun dönem.	kg 1,4 DCB eşd	0	0,000649	0,00244	8,71E-5	0,000268	0,000207	0	0,000374
3	Nikel	Su	Yeraltı suyu, uzun dönem.	kg 1,4 DCB eşd	0	0,00054	0,00521	0,000167	0,000574	1,31E-5	0	4,38E-6
4	Vanadyum	Su	Yeraltı suyu, uzun dönem.	kg 1,4 DCB eşd	0	0,000208	0,00198	8,29E-5	0,000218	8,17E-6	0	0,000401
5	Çinko	Su	Yeraltı suyu, uzun dönem.	kg 1,4 DCB eşd	0	0,00269	0,025	0,000823	0,00275	0,000123	0	0,00123

EK 12. 1 m^3 arıtılmış deniz suyunun DCEP etki kategorisine etki eden yaşam döngüsü analizi envanter sonuçları.

Hesaplama:	Karşılaştırma
Sonuçlar:	Envanter
Girdi 1 :	Su Alma Yapısı
Girdi 2 :	Ön Arıtma
Girdi 3 :	Ters Osmoz
Girdi 4 :	Son Arıtma
Girdi 5 :	Dağıtım
Girdi 6 :	Bakım
Girdi 7 :	Konsantre Bertarafı
Girdi 8 :	Atık Bertarafı
Metot :	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 / World (2010) H
İndikatör	Karakterizasyon
Kısım :	Tüm Kısımlar
Kategori :	**Deniz Canlılarına Ekotoksisite Potansiyeli**
Kesme Kriteri :	%1
Altyapı süreçlerini dahil etme :	Evet
Uzun vadeli emisyonları dahil etme :	Hayır
Öğeye göre sıralandı :	Madde
Sıralama düzeni :	Artan

No	Madde	Bölüm	Alt Bölüm	Birim	Su Alma Yapısı	Ön Arıtma	Ters Osmoz	Son Arıtma	Dağıtım	Bakım	Konsantre Bertarafı	Atık Bertarafı
	Tüm kısımların toplamı			kg 1,4 DCB eşd	-	0,00593	0,0507	0,00174	0,00559	0,000496	0,000224	0,00281
	Kalan kısımlar			kg 1,4 DCB eşd	-	0,000262	0,00203	0,000105	0,000224	4,37E-5	0,000224	4,23E-5
1	Hekzavalent Krom	Su	Yeraltı suyu, uzun dönem.	kg 1,4 DCB eşd	0	0,000122	0,00116	4,02E-5	0,000128	3,86E-6	0	-2,12E-7
2	Bakır	Su	Yeraltı suyu, uzun dönem.	kg 1,4 DCB eşd	0	0,000773	0,0029	0,000104	0,00032	0,000247	0	0,000446
3	Nikel	Su	Yeraltı suyu, uzun dönem.	kg 1,4 DCB eşd	0	0,000671	0,00647	0,000207	0,000713	1,63E-5	0	5,44E-6
4	Vanadyum	Su	Yeraltı suyu, uzun dönem.	kg 1,4 DCB eşd	0	0,000294	0,0028	0,000117	0,000309	1,16E-5	0	0,000567
5	Çinko	Su	Yeraltı suyu, uzun dönem.	kg 1,4 DCB eşd	0	0,00381	0,0354	0,00117	0,0039	0,000174	0	0,00175

EK 13. 1 m^3 arıtılmış deniz suyunun T-İS (Kanser) etki kategorisine etki eden yaşam döngüsü analizi envanter sonuçları.

Hesaplama:	Karşılaştırma
Sonuçlar:	Envanter
Girdi 1 :	Su Alma Yapısı
Girdi 2 :	Ön Arıtma
Girdi 3 :	Ters Osmoz
Girdi 4 :	Son Arıtma
Girdi 5 :	Dağıtım
Girdi 6 :	Bakım
Girdi 7 :	Konsantre Bertarafı
Girdi 8 :	Atık Bertarafı
Metot :	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 / World (2010) H
İndikatör	Karakterizasyon
Kısım :	Tüm Kısımlar
Kategori :	**Toksisite – İnsan Sağlığı (Kanser)**
Kesme Kriteri :	%1
Altyapı süreçlerini dahil etme :	Evet
Uzun vadeli emisyonları dahil etme :	Hayır
Öğeye göre sıralandı :	Madde
Sıralama düzeni :	Artan

No	Madde	Bölüm	Alt Bölüm	Birim	Su Alma Yapısı	Ön Arıtma	Ters Osmoz	Son Arıtma	Dağıtım	Bakım	Konsantre Bertarafı	Atık Bertarafı
	Tüm kısımların toplamı			kg 1,4 DCB eşd	-	0,00804	0,0761	0,00268	0,00839	0,000313	-	-2,14E-6
	Kalan kısımlar			kg 1,4 DCB eşd	-	0,000133	0,00105	6,56E-5	0,000115	3,96E-5	-	2,97E-6
1	Arsenik	Su	Yeraltı suyu, uzun dönem.	kg 1,4 DCB eşd	0	0,00014	0,00135	4,81E-5	0,000148	5,64E-6	0	5,32E-6
2	Hekzavalent Krom	Su	Yeraltı suyu,	kg 1,4 DCB eşd	0	0,000341	0,00334	9,18E-5	0,000368	2,75E-6	0	-6,41E-7
3	Hekzavalent Krom	Su	Yeraltı suyu, uzun dönem.	kg 1,4 DCB eşd	0	0,00697	0,0664	0,0023	0,00732	0,000221	0	-1,22E-5
4	Hekzavalent Krom	Su	Nehir	kg 1,4 DCB eşd	0	0,000191	0,00142	9,71E-5	0,000157	3,75E-5	0	2,02E-7
5	Nikel	Su	Yeraltı suyu, uzun dönem.	kg 1,4 DCB eşd	0	0,000268	0,00258	8,27E-5	0,000285	6,52E-6	0	2,17E-6

EK 14. 1 m^3 arıtılmış deniz suyunun T-İS (Kanser dışı) etki kategorisine etki eden yaşam döngüsü analizi envanter sonuçları.

Hesaplama:	Karşılaştırma
Sonuçlar:	Envanter
Girdi 1 :	Su Alma Yapısı
Girdi 2 :	Ön Arıtma
Girdi 3 :	Ters Osmoz
Girdi 4 :	Son Arıtma
Girdi 5 :	Dağıtım
Girdi 6 :	Bakım
Girdi 7 :	Konsantre Bertarafı
Girdi 8 :	Atık Bertarafı
Metot :	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 / World (2010) H
İndikatör	Karakterizasyon
Kısım :	Tüm Kısımlar
Kategori :	**Toksisite – İnsan Sağlığı (Kanser Dışı)**
Kesme Kriteri :	%1
Altyapı süreçlerini dahil etme :	Evet
Uzun vadeli emisyonları dahil etme :	Hayır
Öğeye göre sıralandı :	Madde
Sıralama düzeni :	Artan

No	Madde	Bölüm	Alt Bölüm	Birim	Su Alma Yapısı	Ön Arıtma	Ters Osmoz	Son Arıtma	Dağıtım	Bakım	Konsantre Bertarafı	Atık Bertarafı
	Tüm kısımların toplamı			kg 1,4 DCB eşd	-	0,166	1,54	0,0556	0,17	0,00875	0,00029	0,0537
	Kalan kısımlar			kg 1,4 DCB eşd	-	0,00739	0,0533	0,0033	0,00587	0,00161	0,00029	0,00392
1	Arsenik	Su	Yeraltı suyu,	kg 1,4 DCB eşd	0	0,00859	0,0835	0,00298	0,0092	0,000185	0	-1,7E-5
2	Arsenik	Su	Yeraltı suyu, uzun dönem.	kg 1,4 DCB eşd	0	0,0354	0,341	0,0122	0,0376	0,00143	0	0,00135
3	Arsenik	Su	Nehir	kg 1,4 DCB eşd	0	0,00779	0,0698	0,0044	0,0077	0,000691	0	8,89E-7
4	Civa	Su	Yeraltı suyu, uzun dönem.	kg 1,4 DCB eşd	0	0,00199	0,0189	0,000602	0,00209	5,69E-5	0	0,000334
5	Çinko	Su	Yeraltı suyu, uzun dönem.	kg 1,4 DCB eşd	0	0,105	0,975	0,0321	0,107	0,00479	0	0,0481

EK 15. 1 m^3 arıtılmış deniz suyunun AK etki kategorisine etki eden yaşam döngüsü analizi envanter sonuçları.

Hesaplama:	Karşılaştırma
Sonuçlar:	Envanter
Girdi 1 :	Su Alma Yapısı
Girdi 2 :	Ön Arıtma
Girdi 3 :	Ters Osmoz
Girdi 4 :	Son Arıtma
Girdi 5 :	Dağıtım
Girdi 6 :	Bakım
Girdi 7 :	Konsantre Bertarafı
Girdi 8 :	Atık Bertarafı
Metot :	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 / World (2010) H
İndikatör	Karakterizasyon
Kısım :	Tüm Kısımlar
Kategori :	**Arazi Kullanımı**
Kesme Kriteri :	%1
Altyapı süreçlerini dahil etme :	Evet
Uzun vadeli emisyonları dahil etme :	Hayır
Öğeye göre sıralandı :	Madde
Sıralama düzeni :	Artan

No	Madde	Bölüm	Alt Bölüm	Birim	Su Alma Yapısı	Ön Arıtma	Ters Osmoz	Son Arıtma	Dağıtım	Bakım	Konsantre Bertarafı	Atık Bertarafı
	Tüm kısımların toplamı			m^2 ekin eşd.	-	0,000447	0,00315	0,000423	0,000347	0,000893	-	-0,000138
	Kalan kısımlar			m^2 ekin eşd.	-	2,15E-5	3,28E-5	2,11E-5	3,61E-6	6,94E-5	-	-2,55E-6
1	İşgal, yıllık ürün	Hammadde	Arazi	m^2 ekin eşd.	0	3,66E-7	2,43E-6	1,94E-7	2,68E-7	0,00053	0	3,36E-8
2	İşgal, yıllık ürün, sulanmayan	Hammadde	Arazi	m^2 ekin eşd.	0	1,33E-7	4,32E-7	8,89E-8	4,76E-8	0,000118	0	4,56E-9
3	İşgal, çöplük alanı	Hammadde	Arazi	m^2 ekin eşd.	0	0,000171	0,00154	0,000125	0,00017	2,33E-5	0	1,11E-5
4	İşgal, orman, yoğun	Hammadde	Arazi	m^2 ekin eşd.	0	0,000123	0,000472	0,000219	5,21E-5	0,000125	0	-0,000147
5	İşgal, endüstriyel alan	Hammadde	Arazi	m^2 ekin eşd.	0	2,63E-5	0,00013	1,03E-5	1,43E-5	2,1E-5	0	-1,45E-7
6	İşgal, maden çıkarma sahası	Hammadde	Arazi	m^2 ekin eşd.	0	9,95E-5	0,000925	4,6E-5	0,000102	6,86E-6	0	-1,55E-6
7	Dönüşüm, çalılık araziden	Hammadde	Arazi	m^2 ekin eşd.	0	4,81E-6	4,55E-5	2,01E-6	5,01E-6	2,59E-7	0	2,17E-6

EK 16. 1 m^3 arıtılmış deniz suyunun MKK etki kategorisine etki eden yaşam döngüsü analizi envanter sonuçları.

Hesaplama:	Karşılaştırma
Sonuçlar:	Envanter
Girdi 1 :	Su Alma Yapısı
Girdi 2 :	Ön Arıtma
Girdi 3 :	Ters Osmoz
Girdi 4 :	Son Arıtma
Girdi 5 :	Dağıtım
Girdi 6 :	Bakım
Girdi 7 :	Konsantre Bertarafı
Girdi 8 :	Atık Bertarafı
Metot :	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 / World (2010) H
İndikatör	Karakterizasyon
Kısım :	Tüm Kısımlar
Kategori :	**Mineral Kaynak Kıtlığı**
Kesme Kriteri :	%1
Altyapı süreçlerini dahil etme :	Evet
Uzun vadeli emisyonları dahil etme:	Hayır
Öğeye göre sıralandı :	Madde
Sıralama düzeni :	Artan

No	Madde	Bölüm	Alt Bölüm	Birim	Su Alma Yapısı	Ön Arıtma	Ters Osmoz	Son Arıtma	Dağıtım	Bakım	Konsantre Bertarafı	Atık Bertarafı
	Tüm kısımların toplamı			kg Cu eşd.	-	5,2E-5	0,000138	1,97E-5	1,52E-5	4,96E-5	-	-3,22E-7
	Kalan kısımlar			kg Cu eşd.	-	2,47E-6	4,91E-6	8,71E-7	5,4E-7	3,45E-6	-	-3,43E-7
1	Aluminyum	Hammadde	Toprak	kg Cu eşd.	0	1,33E-6	1,84E-6	1,15E-7	2,03E-7	5,3E-7	0	7,86E-10
2	Kil, belirtilmemiş,	Hammadde	Toprak	kg Cu eşd.	0	1,94E-6	1,9E-8	1,45E-7	2,09E-9	9,74E-7	0	1,44E-8
3	Bakır	Hammadde	Toprak	kg Cu eşd.	0	7,45E-6	8,1E-7	1,69E-7	8,91E-8	3,71E-6	0	1,59E-9
4	Altın	Hammadde	Toprak	kg Cu eşd.	0	2,37E-5	0,00011	1,4E-5	1,22E-5	3,19E-5	0	-2,08E-8
5	Demir	Hammadde	Toprak	kg Cu eşd.	0	4,14E-6	2,32E-6	4,52E-7	2,56E-7	3,58E-6	0	4,34E-9
6	Nikel	Hammadde	Toprak	kg Cu eşd.	0	7,33E-6	1,32E-6	3,2E-7	1,46E-7	4,16E-6	0	-2,44E-9
7	Titanyum	Hammadde	Toprak	kg Cu eşd.	0	1,53E-6	9,51E-7	5,86E-7	1,04E-7	3,83E-7	0	3,58E-8
8	Uranyum	Hammadde	Toprak	kg Cu eşd.	0	1,71E-6	1,3E-5	2,78E-6	1,43E-6	3,86E-7	0	-1,26E-8
9	Çinko	Hammadde	Toprak	kg Cu eşd.	0	3,97E-7	1,97E-6	2,51E-7	2,17E-7	5,67E-7	0	-3,71E-10

EK 17. 1 m^3 arıtılmış deniz suyunun FKK etki kategorisine etki eden yaşam döngüsü analizi envanter sonuçları.

Hesaplama:	Karşılaştırma
Sonuçlar:	Envanter
Girdi 1 :	Su Alma Yapısı
Girdi 2 :	Ön Arıtma
Girdi 3 :	Ters Osmoz
Girdi 4 :	Son Arıtma
Girdi 5 :	Dağıtım
Girdi 6 :	Bakım
Girdi 7 :	Konsantre Bertarafı
Girdi 8 :	Atık Bertarafı
Metot :	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 / World (2010) H
İndikatör	Karakterizasyon
Kısım :	Tüm Kısımlar
Kategori :	**Fosil Kaynak Kıtlığı**
Kesme Kriteri :	%1
Altyapı süreçlerini dahil etme :	Evet
Uzun vadeli emisyonları dahil etme :	Hayır
Öğeye göre sıralandı :	Madde
Sıralama düzeni :	Artan

No	Madde	Bölüm	Alt Bölüm	Birim	Su Alma Yapısı	Ön Arıtma	Ters Osmoz	Son Arıtma	Dağıtım	Bakım	Konsantre Bertarafı	Atık Bertarafı
	Tüm kısımların toplamı			kg petrol eşd.	-	0,0389	0,345	0,0157	0,038	0,0025	-	6,96E-6
	Kalan kısımlar			kg petrol eşd.	-	7,5E-7	3,64E-6	1,73E-6	4,01E-7	3,67E-7	-	-8,26E-6
1	Kömür, linyit	Hammadde	Toprak	kg petrol eşd.	0	0,0113	0,111	0,00309	0,0122	9,28E-5	0	-5,76E-5
2	Kömür, antrasit	Hammadde	Toprak	kg petrol eşd.	0	0,0105	0,098	0,00631	0,0108	0,000967	0	-1,12E-5
3	Gaz, doğal/m^3	Hammadde	Toprak	kg petrol eşd.	0	0,0141	0,129	0,00496	0,0142	0,000843	0	5,76E-6
4	Petrol, işlenmemiş	Hammadde	Toprak	kg petrol eşd.	0	0,00294	0,0072	0,00129	0,000777	0,000592	0	7,82E-5

EK 18. 1 m^3 arıtılmış deniz suyunun ST etki kategorisine etki eden yaşam döngüsü analizi envanter sonuçları.

Hesaplama:	Karşılaştırma
Sonuçlar:	Envanter
Girdi 1 :	Su Alma Yapısı
Girdi 2 :	Ön Arıtma
Girdi 3 :	Ters Osmoz
Girdi 4 :	Son Arıtma
Girdi 5 :	Dağıtım
Girdi 6 :	Bakım
Girdi 7 :	Konsantre Bertarafı
Girdi 8 :	Atık Bertarafı
Metot :	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 / World (2010) H
İndikatör	Karakterizasyon
Kısım :	Tüm Kısımlar
Kategori :	**Su Tüketimi**
Kesme Kriteri :	%1
Altyapı süreçlerini dahil etme :	Evet
Uzun vadeli emisyonları dahil etme :	Hayır
Öğeye göre sıralandı :	Madde
Sıralama düzeni :	Artan

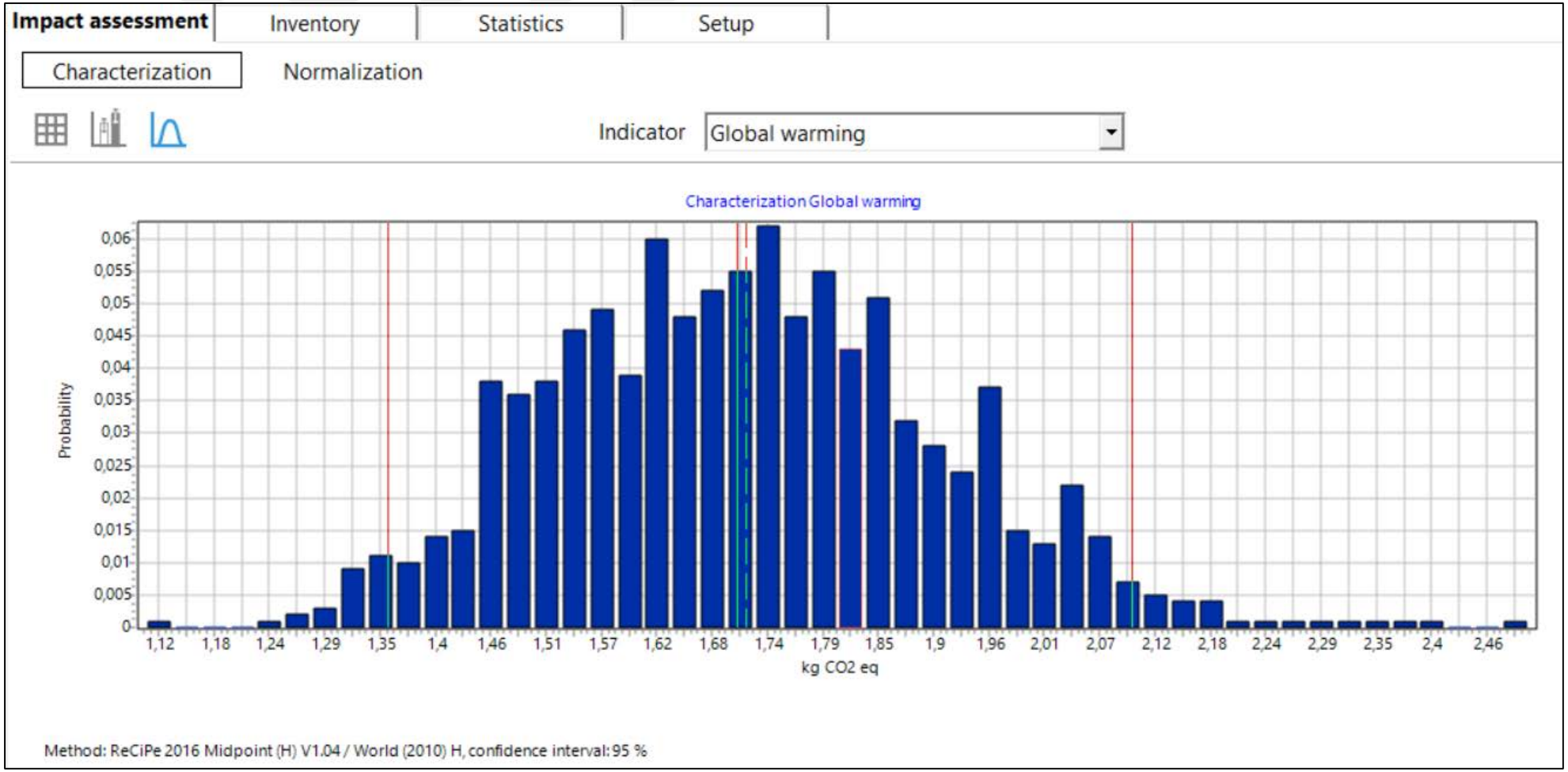
No	Madde	Bölüm	Alt Bölüm	Birim	Su Alma Yapısı	Ön Arıtma	Ters Osmoz	Son Arıtma	Dağıtım	Bakım	Konsantre Bertarafı	Atık Bertarafı
	Tüm kısımların toplamı			m^3	-	0,00134	0,0123	0,00107	0,00136	0,000264	-	-7,1E-6
	Kalan kısımlar			m^3	-	9,38E-5	0,000861	0,00074	9,48E-5	0,000162	-	-9,85E-6
1	Su, AR	Su		m^3	0	-2,58E-5	-0,000248	-0,000261	-2,74E-5	-1,67E-5	0	-4,04E-6
2	Su, AT	Su		m^3	0	-0,000149	-0,00142	-0,00181	-0,000156	-0,000198	0	-5,65E-6
3	Su, AU	Su		m^3	0	-0,000176	-0,0017	-0,00157	-0,000187	-0,0001	0	-1,81E-6
4	Su, BA	Su		m^3	0	-2,69E-5	-0,000258	-0,000246	-2,84E-5	-2,67E-5	0	-1,57E-8
5	Su, BG	Su		m^3	0	-0,0196	-0,193	-0,00446	-0,0213	-2,85E-5	0	-3,6E-7
6	Su, BR	Su		m^3	0	-0,00037	-0,00358	-0,00311	-0,000394	-0,000199	0	-7,69E-6
7	Su, CA	Su		m^3	0	-0,000541	-0,00521	-0,00453	-0,000574	-0,000271	0	-0,000195
8	Su, CH	Su		m^3	0	-0,000419	-0,00389	-0,00153	-0,000428	-0,000152	0	-3,6E-5
9	Su, CL	Su		m^3	0	-0,00022	-0,00212	-0,00228	-0,000233	-0,000146	0	-3,21E-6

10	Su, CN	Su		m^3	0	-0,000883	-0,0074	-0,0792	-0,000815	-0,0189	0	-0,000132
11	Su, CO	Su		m^3	0	-4,01E-5	-0,000385	-0,000415	-4,24E-5	-2,66E-5	0	-2,59E-6
12	Su, soğutma, belirtilmemiş, BG	Hammadde	Suda	m^3	0	0,000289	0,00285	6,56E-5	0,000314	4,23E-7	0	5,42E-9
13	Su, soğutma, belirtilmemiş, CN	Hammadde	Suda	m^3	0	4,95E-6	4,16E-5	0,000436	4,58E-6	0,000197	0	9,74E-7
14	Su, soğutma, belirtilmemiş, IN	Hammadde	Suda	m^3	0	4,9E-6	4,49E-5	0,000154	4,94E-6	9,92E-6	0	3,4E-7
15	Su, soğutma, belirtilmemiş, RER	Hammadde	Suda	m^3	0	2,43E-6	8,15E-6	0,000158	8,98E-7	5,19E-5	0	4,47E-8
16	Su, soğutma, belirtilmemiş, RO	Hammadde	Suda	m^3	0	3,97E-5	0,000392	1,47E-5	4,32E-5	7,22E-7	0	5,36E-9
17	Su, soğutma, belirtilmemiş, RoW	Hammadde	Suda	m^3	0	0,000411	0,000203	0,00165	2,23E-5	0,000151	0	-8,68E-5
18	Su, soğutma, belirtilmemiş, RU	Hammadde	Suda	m^3	0	0,000103	0,00102	4,98E-5	0,000112	3,71E-6	0	-3,2E-5
19	Su, soğutma, belirtilmemiş, TR	Hammadde	Suda	m^3	0	0,00816	0,0805	0,00176	0,00887	1,22E-6	0	-2,71E-6
20	Su, soğutma, belirtilmemiş, US	Hammadde	Suda	m^3	0	2,86E-5	0,000274	0,000323	3,02E-5	2,09E-5	0	6,98E-7
21	Su, CZ	Su		m^3	0	-1,16E-5	-0,00011	-0,000142	-1,21E-5	-1,54E-5	0	4,2E-7
22	Su, DE	Su		m^3	0	-7,55E-5	-0,000707	-0,00121	-7,79E-5	-0,000132	0	-3,01E-6
23	Su, ES	Su		m^3	0	-0,000115	-0,00108	-0,00165	-0,000119	-0,000181	0	-2,27E-6
24	Su, FI	Su		m^3	0	-5,93E-5	-0,000562	-0,000734	-6,19E-5	-8,02E-5	0	-1,04E-6
25	Su, FR	Su		m^3	0	-0,000425	-0,00397	-0,00412	-0,000437	-0,000443	0	-8,67E-6
26	Su, GB	Su		m^3	0	-2,08E-5	-0,000196	-0,000302	-2,16E-5	-3,31E-5	0	-4,46E-7
27	Su, GR	Su		m^3	0	-0,000376	-0,0037	-0,000429	-0,000408	-3,87E-5	0	3,13E-8
28	Su, ID	Su		m^3	0	-3,21E-6	-2,72E-5	-0,000269	-2,99E-6	-1,73E-5	0	-3,68E-7
29	Su, IN	Su		m^3	0	-0,000235	-0,00218	-0,00764	-0,000241	-0,000492	0	-9,65E-6
30	Su, IR	Su		m^3	0	-5,75E-5	-0,00054	-0,00167	-5,95E-5	-0,000107	0	-9,3E-6
31	Su, IS	Su		m^3	0	-1,57E-5	-0,00015	-0,000152	-1,65E-5	-1,65E-5	0	-1,84E-7
32	Su, IT	Su		m^3	0	-8,62E-5	-0,00082	-0,000987	-9,03E-5	-0,000108	0	-1,68E-6
33	Su, JP	Su		m^3	0	-0,000209	-0,00196	-0,0061	-0,000216	-0,000393	0	0,000106
34	Su, LV	Su		m^3	0	-2,72E-5	-0,000263	-0,000166	-2,9E-5	-1,79E-5	0	-2,65E-7
35	Su, MX	Su		m^3	0	-0,000291	-0,00281	-0,00302	-0,000309	-0,000193	0	-1,05E-5
36	Su, MY	Su		m^3	0	-1,23E-5	-0,000116	-0,000358	-1,27E-5	-2,3E-5	0	-4,39E-7
37	Su, NO	Su		m^3	0	-1,52E-5	-0,000144	-0,000174	-1,59E-5	-1,92E-5	0	-2,94E-7
38	Su, NP	Su		m^3	0	-1,36E-5	-0,000128	-0,000398	-1,41E-5	-2,56E-5	0	-5,97E-7
39	Su, PL	Su		m^3	0	-1,46E-5	-0,000139	-0,00018	-1,53E-5	-1,97E-5	0	-2,16E-6
40	Su, PT	Su		m^3	0	-5,84E-5	-0,000552	-0,00075	-6,09E-5	-8,2E-5	0	-8,27E-6
41	Su, RER	Su		m^3	0	-9,5E-6	-8,71E-5	-0,0001	-9,6E-6	-0,00178	0	-1,95E-8
42	Su, nehir, CN	Hammadde	Suda	m^3	0	1,58E-6	1,52E-5	2,12E-5	1,68E-6	0,000134	0	3,36E-7

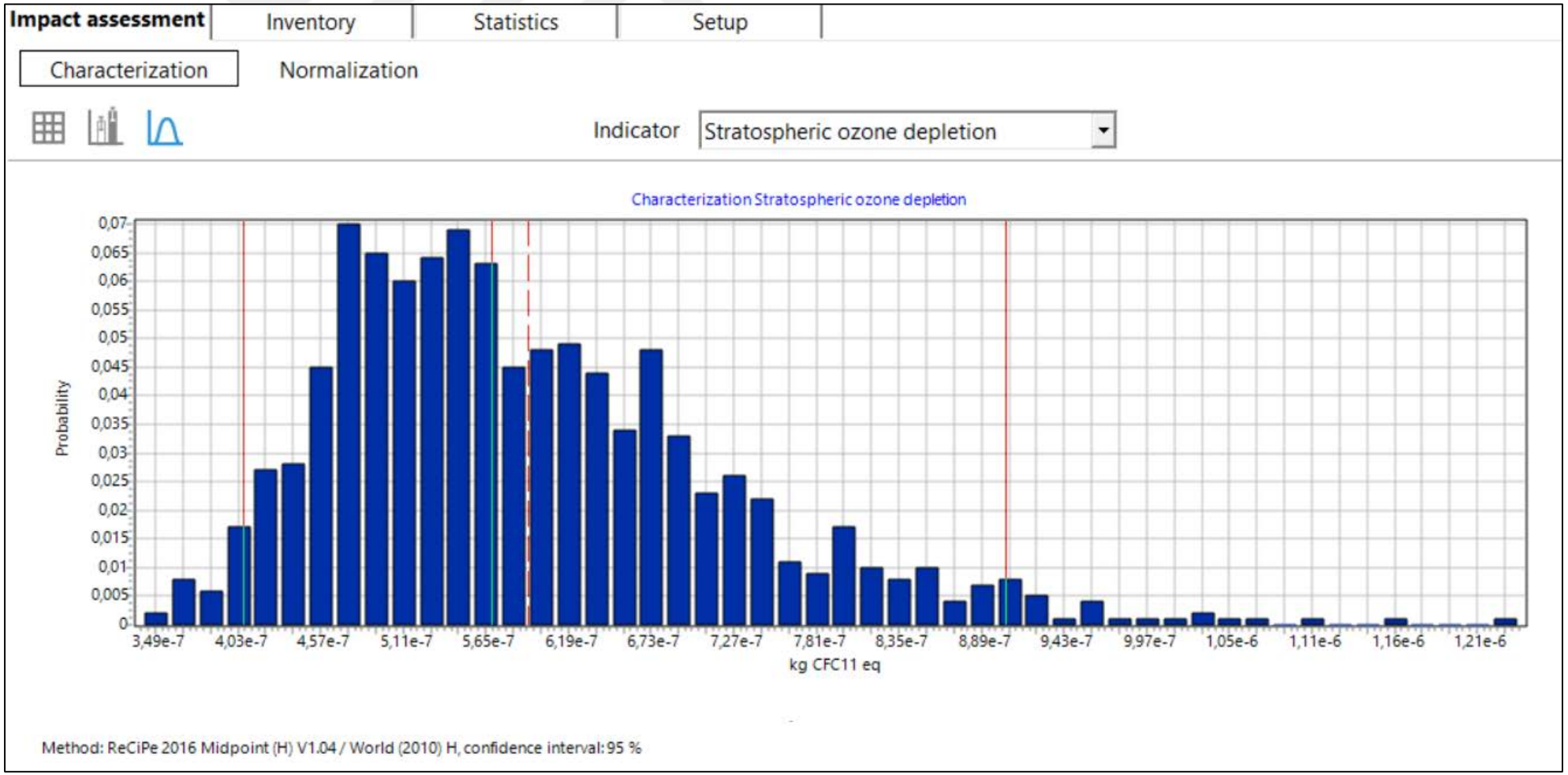
43	Su, nehir, RoW	Hammadde	Suda	m^3	0	0,000328	0,00307	8,56E-5	0,000338	1,3E-5	0	1,79E-7
44	Su, RNA	Su		m^3	0	-1,49E-6	-1,47E-5	-9,42E-7	-1,61E-6	-0,000973	0	2,69E-10
45	Su, RO	Su		m^3	0	-0,00699	-0,0689	-0,00258	-0,0076	-0,00012	0	-1,33E-6
46	Su, RO	Su	Nehir	m^3	0	-1,38E-5	-0,000136	-5,09E-6	-1,5E-5	-2,37E-7	0	-2,94E-9
47	Su, RoW	Su		m^3	0	-0,0278	-0,0526	-0,0505	-0,0058	-0,00523	0	-0,000255
48	Su, RS	Su		m^3	0	-0,000368	-0,00361	-0,000723	-0,000397	-7,16E-5	0	-1,27E-6
49	Su, RU	Su		m^3	0	-0,00528	-0,0521	-0,00136	-0,00574	-2,73E-5	0	-0,000436
50	Su, SE	Su		m^3	0	-0,00028	-0,00266	-0,00333	-0,000293	-0,000363	0	-4,57E-6
51	Su, SI	Su		m^3	0	-2,35E-5	-0,000223	-0,000279	-2,46E-5	-3,04E-5	0	-2,67E-6
52	Su, SK	Su		m^3	0	-2,47E-5	-0,000237	-0,000225	-2,61E-5	-2,45E-5	0	-3,35E-7
53	Su, TH	Su		m^3	0	-4,54E-6	-4,26E-5	-0,000132	-4,69E-6	-8,49E-6	0	-1,72E-7
54	Su, TR	Su		m^3	0	-1,78	-17,5	-0,383	-1,93	-0,000249	0	0,00043
55	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, AR	Hammadde	Suda	m^3	0	2,52E-5	0,000243	0,000255	2,68E-5	1,63E-5	0	4,04E-6
56	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, AT	Hammadde	Suda	m^3	0	0,000149	0,00142	0,00181	0,000156	0,000198	0	5,64E-6
57	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, AU	Hammadde	Suda	m^3	0	0,000173	0,00167	0,00155	0,000184	9,87E-5	0	1,78E-6
58	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, BA	Hammadde	Suda	m^3	0	2,68E-5	0,000257	0,000246	2,83E-5	2,66E-5	0	1,49E-8
59	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, BG	Hammadde	Suda	m^3	0	0,0193	0,19	0,00439	0,021	2,81E-5	0	3,54E-7
60	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, BR	Hammadde	Suda	m^3	0	0,000372	0,00359	0,00313	0,000396	0,000199	0	7,74E-6
61	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, CA	Hammadde	Suda	m^3	0	0,000542	0,00522	0,00453	0,000575	0,000271	0	0,000194
62	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, CH	Hammadde	Suda	m^3	0	0,000418	0,00389	0,00153	0,000428	0,000152	0	3,61E-5
63	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, CL	Hammadde	Suda	m^3	0	0,000219	0,00211	0,00228	0,000233	0,000146	0	3,2E-6
64	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, CN	Hammadde	Suda	m^3	0	0,000878	0,00736	0,0787	0,00081	0,0187	0	0,000131
65	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, CO	Hammadde	Suda	m^3	0	3,99E-5	0,000383	0,000413	4,22E-5	2,65E-5	0	2,58E-6
66	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, CZ	Hammadde	Suda	m^3	0	7,03E-6	6,67E-5	8,53E-5	7,35E-6	9,32E-6	0	1,02E-6
67	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, DE	Hammadde	Suda	m^3	0	7,34E-5	0,000687	0,00117	7,57E-5	0,000129	0	3,43E-6
68	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, ES	Hammadde	Suda	m^3	0	0,000114	0,00108	0,00164	0,000119	0,00018	0	2,25E-6
69	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, FI	Hammadde	Suda	m^3	0	5,91E-5	0,00056	0,000732	6,17E-5	7,99E-5	0	9,9E-7
70	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, FR	Hammadde	Suda	m^3	0	0,000421	0,00393	0,00408	0,000433	0,000438	0	8,61E-6
71	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, GB	Hammadde	Suda	m^3	0	1,96E-5	0,000184	0,000283	2,03E-5	3,1E-5	0	3,82E-7
72	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, GR	Hammadde	Suda	m^3	0	0,000366	0,0036	0,000418	0,000397	3,77E-5	0	4,54E-7
73	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, ID	Hammadde	Suda	m^3	0	2,89E-6	2,44E-5	0,000246	2,69E-6	1,59E-5	0	2,84E-7
74	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, IN	Hammadde	Suda	m^3	0	0,00023	0,00214	0,00749	0,000236	0,000482	0	9,88E-6
75	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, IR	Hammadde	Suda	m^3	0	5,62E-5	0,000527	0,00163	5,81E-5	0,000105	0	9,21E-6

76	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, IS	Hammadde	Suda	m^3	0	1,58E-5	0,000151	0,000153	1,66E-5	1,66E-5	0	1,84E-7
77	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, IT	Hammadde	Suda	m^3	0	8,53E-5	0,000811	0,000976	8,94E-5	0,000107	0	1,65E-6
78	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, JP	Hammadde	Suda	m^3	0	0,000207	0,00194	0,00603	0,000214	0,000389	0	-0,000103
79	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, LV	Hammadde	Suda	m^3	0	2,71E-5	0,000262	0,000166	2,89E-5	1,78E-5	0	2,64E-7
80	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, MX	Hammadde	Suda	m^3	0	0,000289	0,00278	0,00299	0,000307	0,000192	0	1,05E-5
81	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, MY	Hammadde	Suda	m^3	0	1,19E-5	0,000111	0,000344	1,23E-5	2,21E-5	0	3,87E-7
82	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, NO	Hammadde	Suda	m^3	0	1,57E-5	0,000149	0,00018	1,64E-5	1,98E-5	0	3,04E-7
83	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, NP	Hammadde	Suda	m^3	0	1,36E-5	0,000128	0,000398	1,41E-5	2,56E-5	0	5,97E-7
84	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, PL	Hammadde	Suda	m^3	0	1,16E-5	0,00011	0,000142	1,21E-5	1,55E-5	0	4,47E-6
85	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, PT	Hammadde	Suda	m^3	0	5,83E-5	0,000552	0,000748	6,08E-5	8,18E-5	0	8,27E-6
86	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, RER	Hammadde	Suda	m^3	0	9,6E-8	5,86E-7	1,66E-7	6,35E-8	0,00173	0	1,46E-8
87	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, RNA	Hammadde	Suda	m^3	0	3,73E-12	3,66E-11	3,03E-12	4,03E-12	0,000951	0	-5,71E-13
88	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, RO	Hammadde	Suda	m^3	0	0,00697	0,0687	0,00257	0,00757	0,000119	0	1,33E-6
89	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, RoW	Hammadde	Suda	m^3	0	0,0273	0,0511	0,0493	0,00563	0,00511	0	0,00034
90	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, RS	Hammadde	Suda	m^3	0	0,00036	0,00353	0,000708	0,000389	7,01E-5	0	1,25E-6
91	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, RU	Hammadde	Suda	m^3	0	0,00517	0,051	0,00131	0,00562	2,35E-5	0	0,000464
92	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, SE	Hammadde	Suda	m^3	0	0,00028	0,00266	0,00332	0,000293	0,000363	0	4,54E-6
93	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, SI	Hammadde	Suda	m^3	0	2,31E-5	0,000219	0,000273	2,41E-5	2,98E-5	0	2,91E-6
94	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, SK	Hammadde	Suda	m^3	0	2,43E-5	0,000233	0,000221	2,56E-5	2,4E-5	0	5,2E-7
95	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, TH	Hammadde	Suda	m^3	0	4,1E-6	3,85E-5	0,000119	4,24E-6	7,67E-6	0	1,33E-7
96	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, TR	Hammadde	Suda	m^3	0	1,77	17,5	0,381	1,92	0,000248	0	-0,000427
97	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, TW	Hammadde	Suda	m^3	0	2,23E-5	0,000209	0,00065	2,31E-5	4,18E-5	0	-0,000417
98	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, UA	Hammadde	Suda	m^3	0	0,000107	0,00104	0,000529	0,000114	5,62E-5	0	5,3E-6
99	Su, turbin kullanımı, belirtilmemiş, US	Hammadde	Suda	m^3	0	0,00191	0,0184	0,0215	0,00203	0,00138	0	1,99E-5
100	Su, TW	Su		m^3	0	-2,31E-5	-0,000217	-0,000673	-2,39E-5	-4,33E-5	0	0,000419
101	Su, UA	Su		m^3	0	-0,00011	-0,00107	-0,000544	-0,000118	-5,79E-5	0	-5,35E-6
102	Su, US	Su		m^3	0	-0,00194	-0,0187	-0,0219	-0,00206	-0,00141	0	-2,06E-5
103	Su, kuyu, RoW	Hammadde	Suda	m^3	0	0,000203	0,00192	5,38E-5	0,000212	3,08E-6	0	-2,66E-7

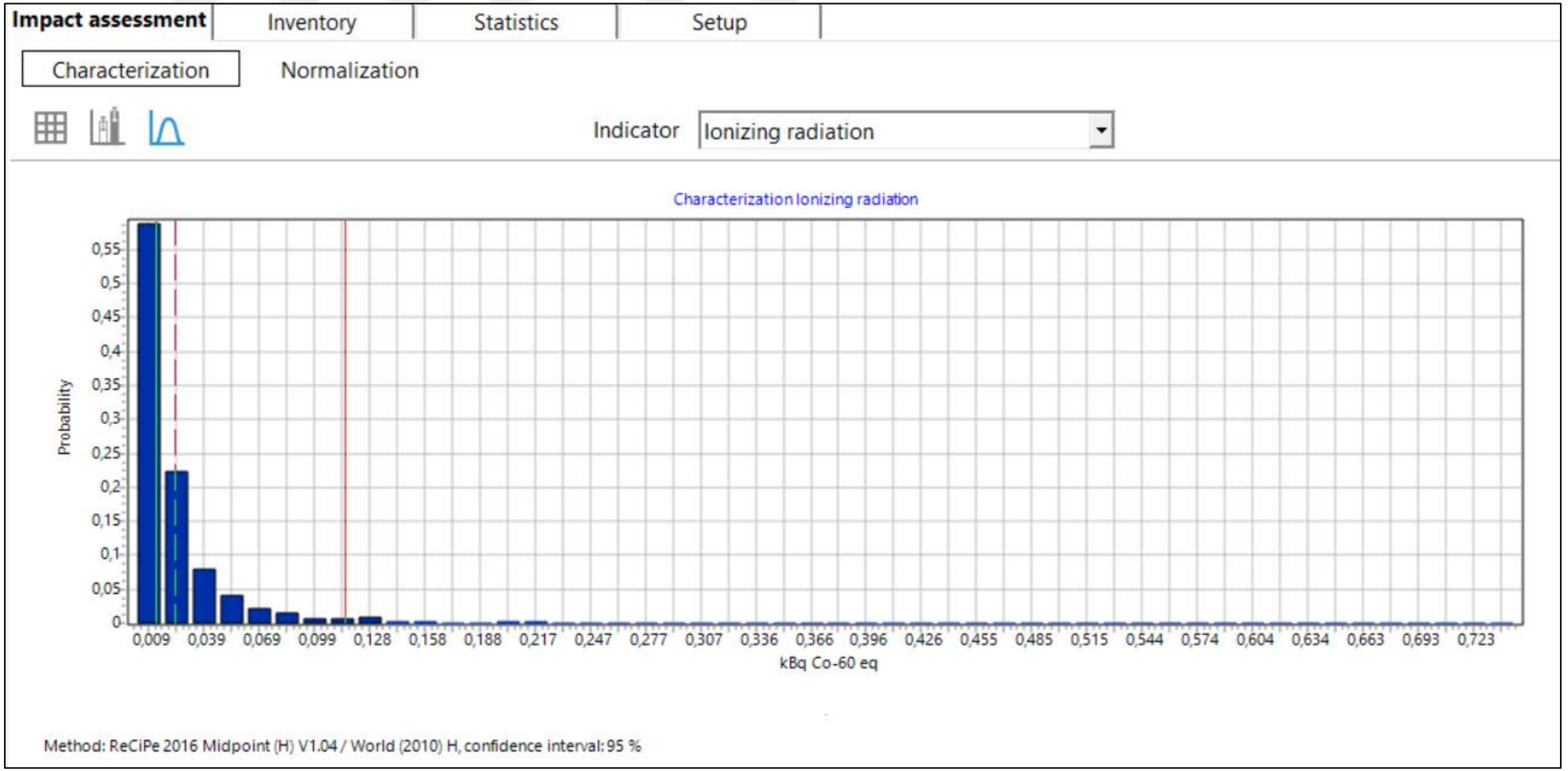
EK 19. KIP etki kategorisine ait Monte Carlo metodu ile hassasiyet analizi.



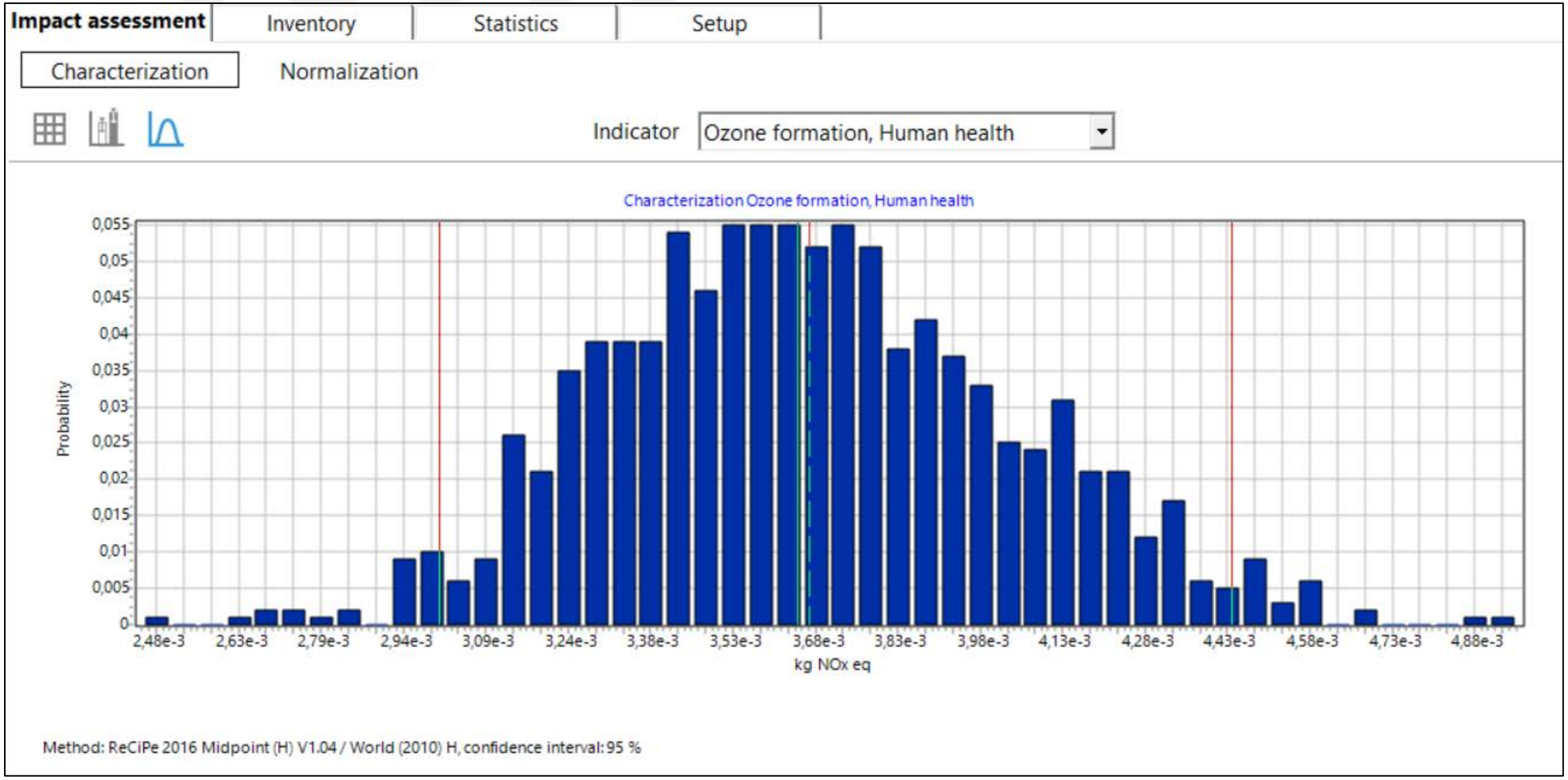
EK 20. SOTP etki kategorisine ait Monte Carlo metodu ile hassasiyet analizi.



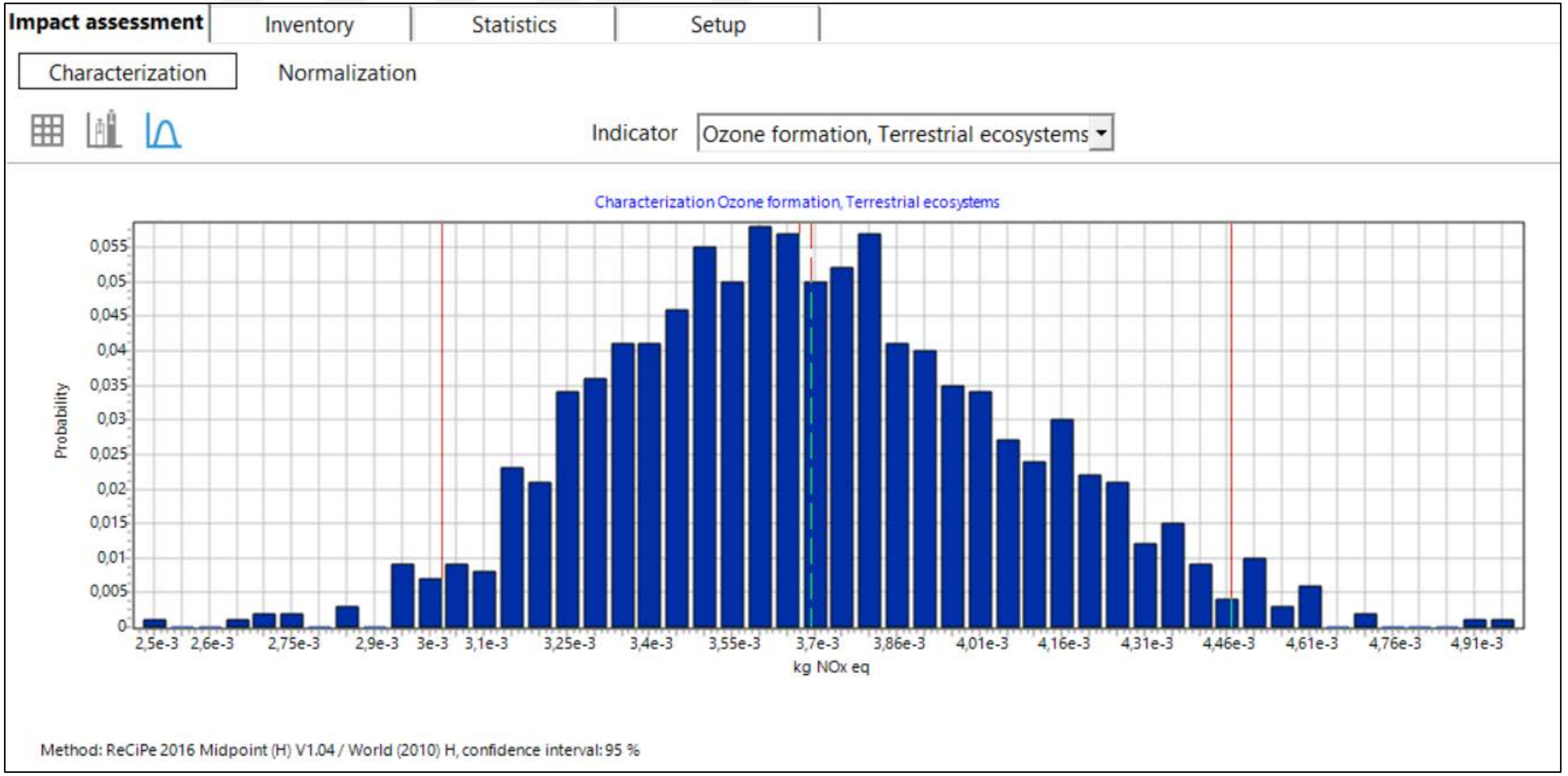
EK 21. İRP etki kategorisine ait Monte Carlo metodu ile hassasiyet analizi.



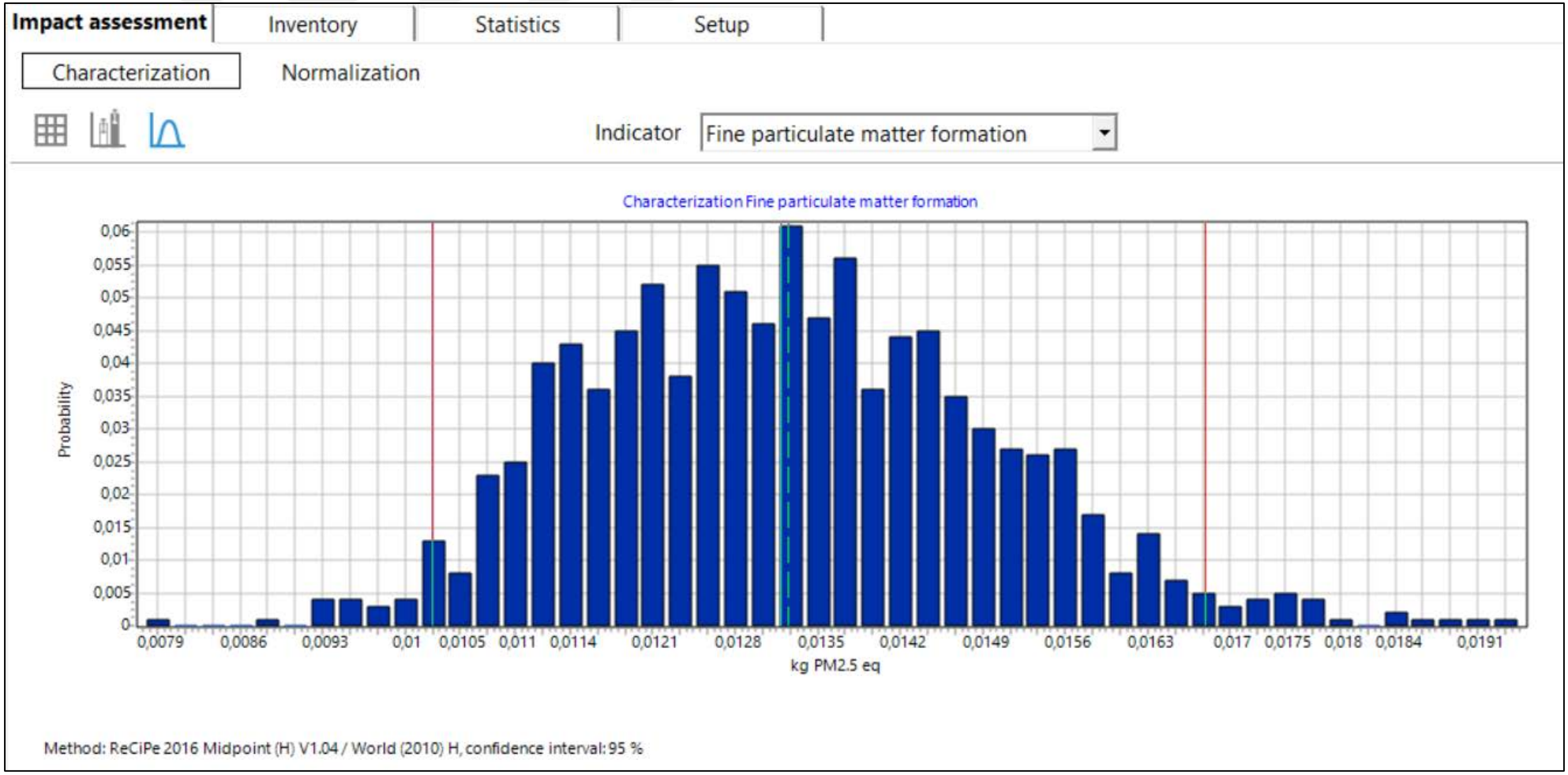
EK 22. OOP, İS etki kategorisine ait Monte Carlo metodu ile hassasiyet analizi.



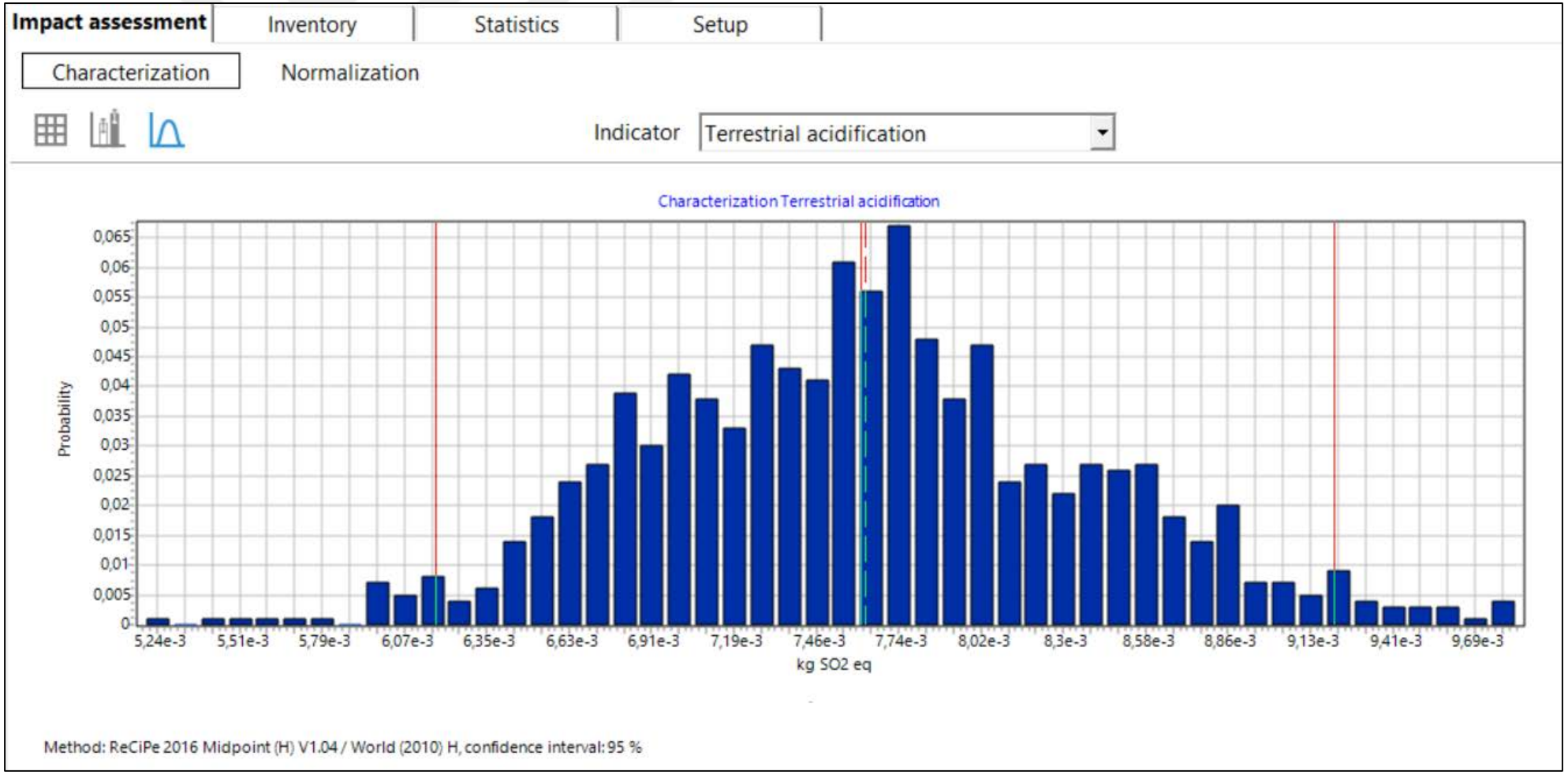
EK 23. OOP, KE etki kategorisine ait Monte Carlo metodu ile hassasiyet analizi.



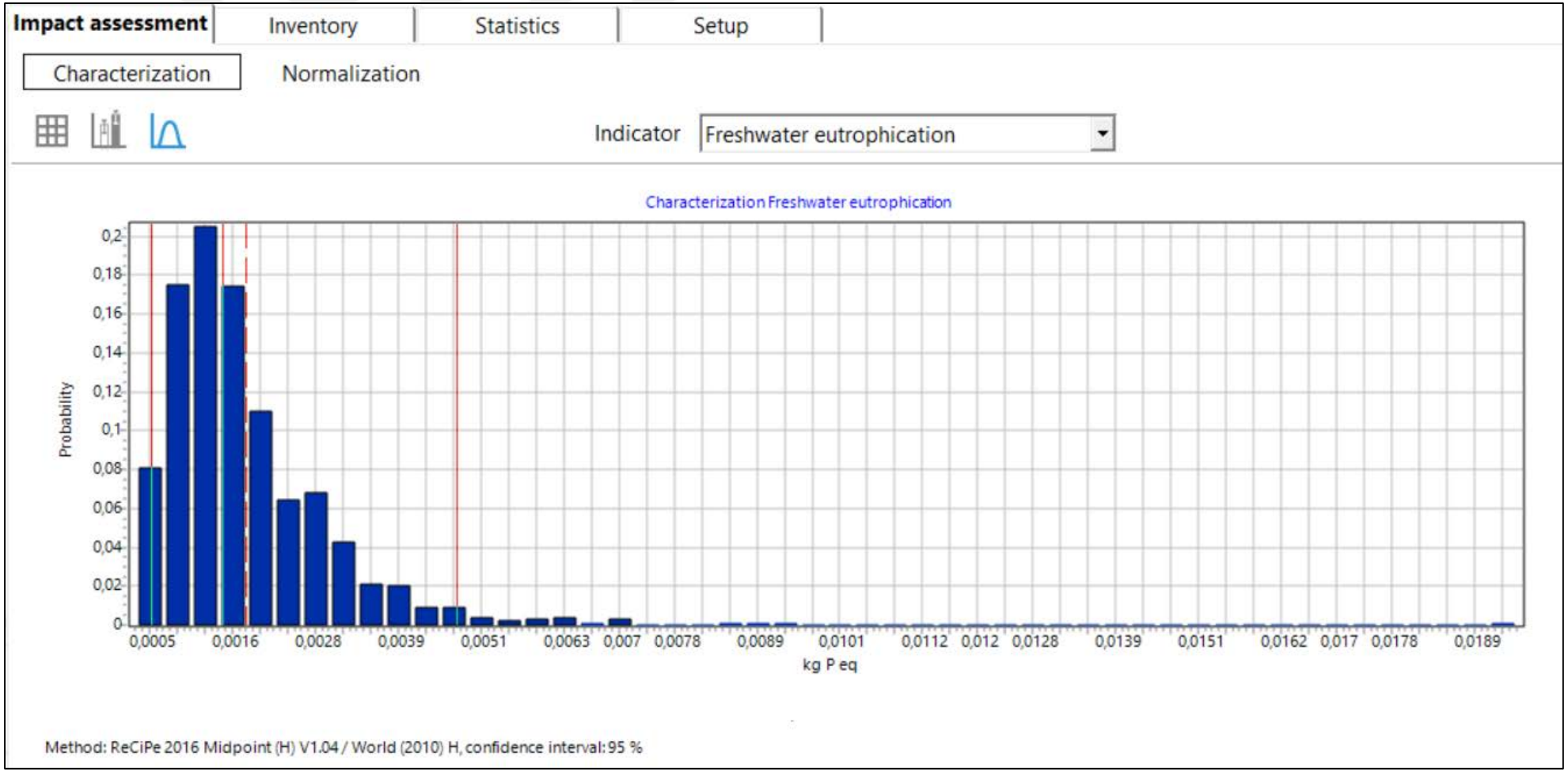
EK 24. İPMOP etki kategorisine ait Monte Carlo metodu ile hassasiyet analizi.



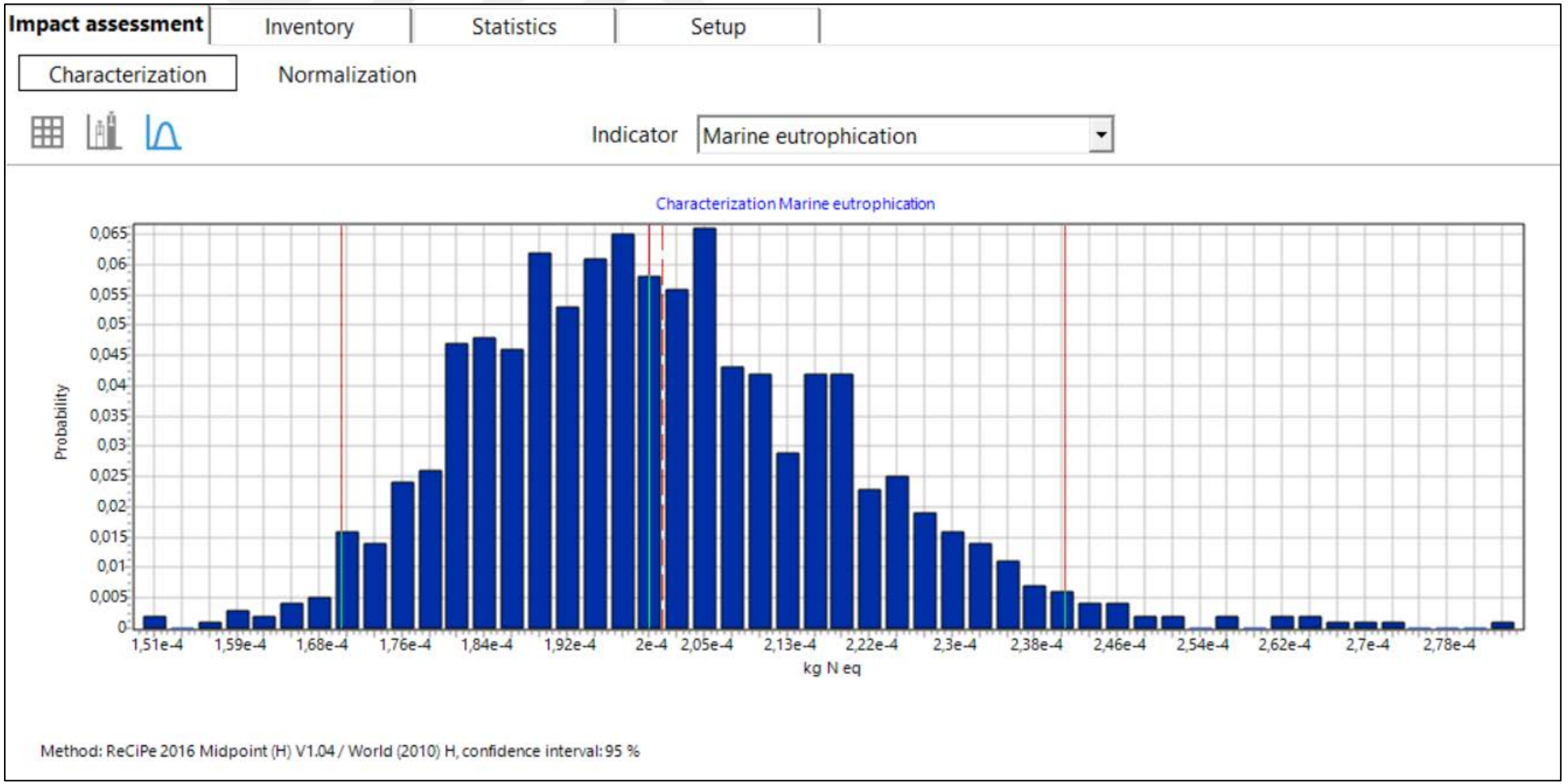
EK 25. KAP etki kategorisine ait Monte Carlo metodu ile hassasiyet analizi.



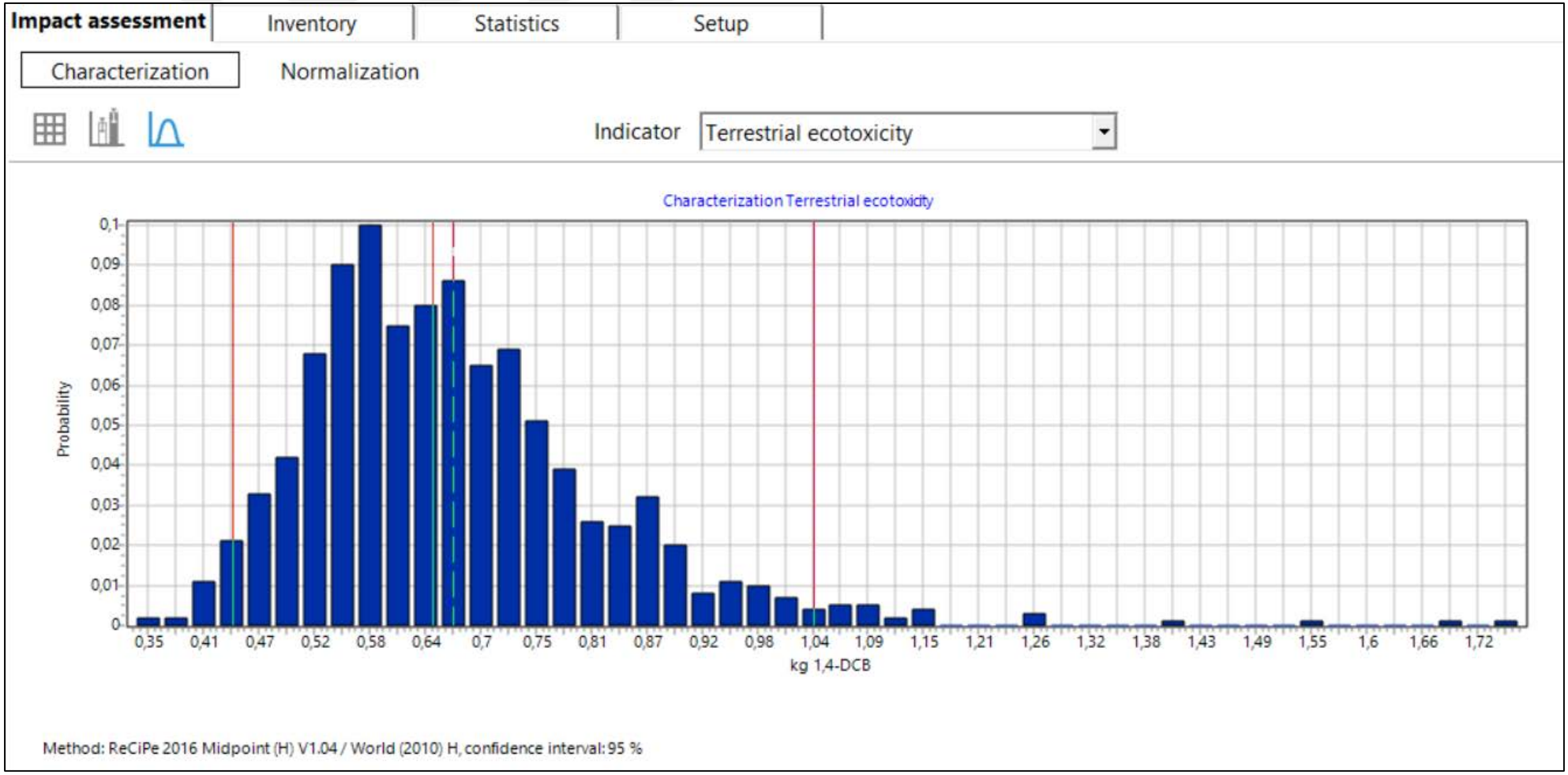
EK 26. TSSÖP etki kategorisine ait Monte Carlo metodu ile hassasiyet analizi.



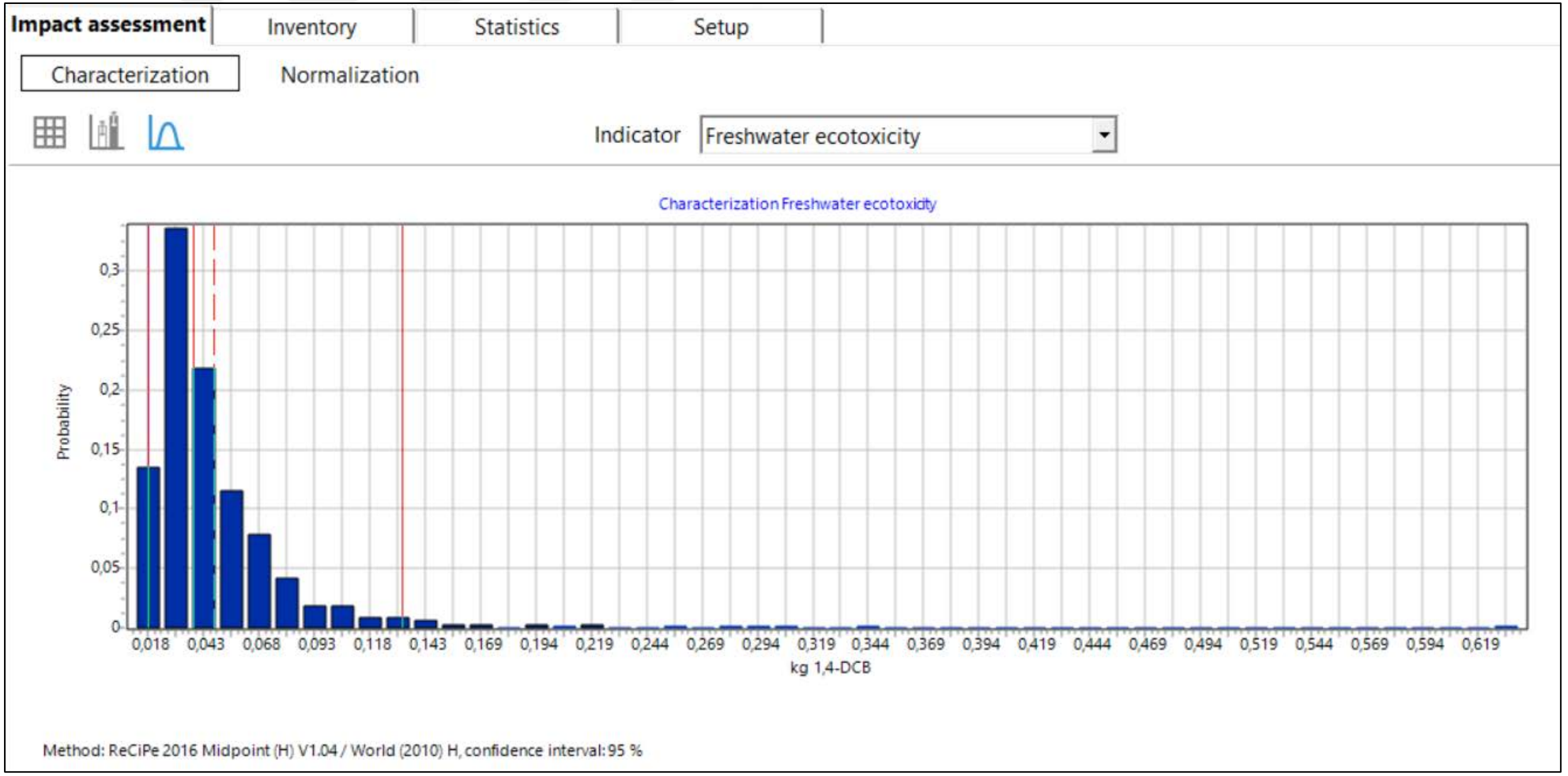
EK 27. DSÖP etki kategorisine ait Monte Carlo metodu ile hassasiyet analizi.



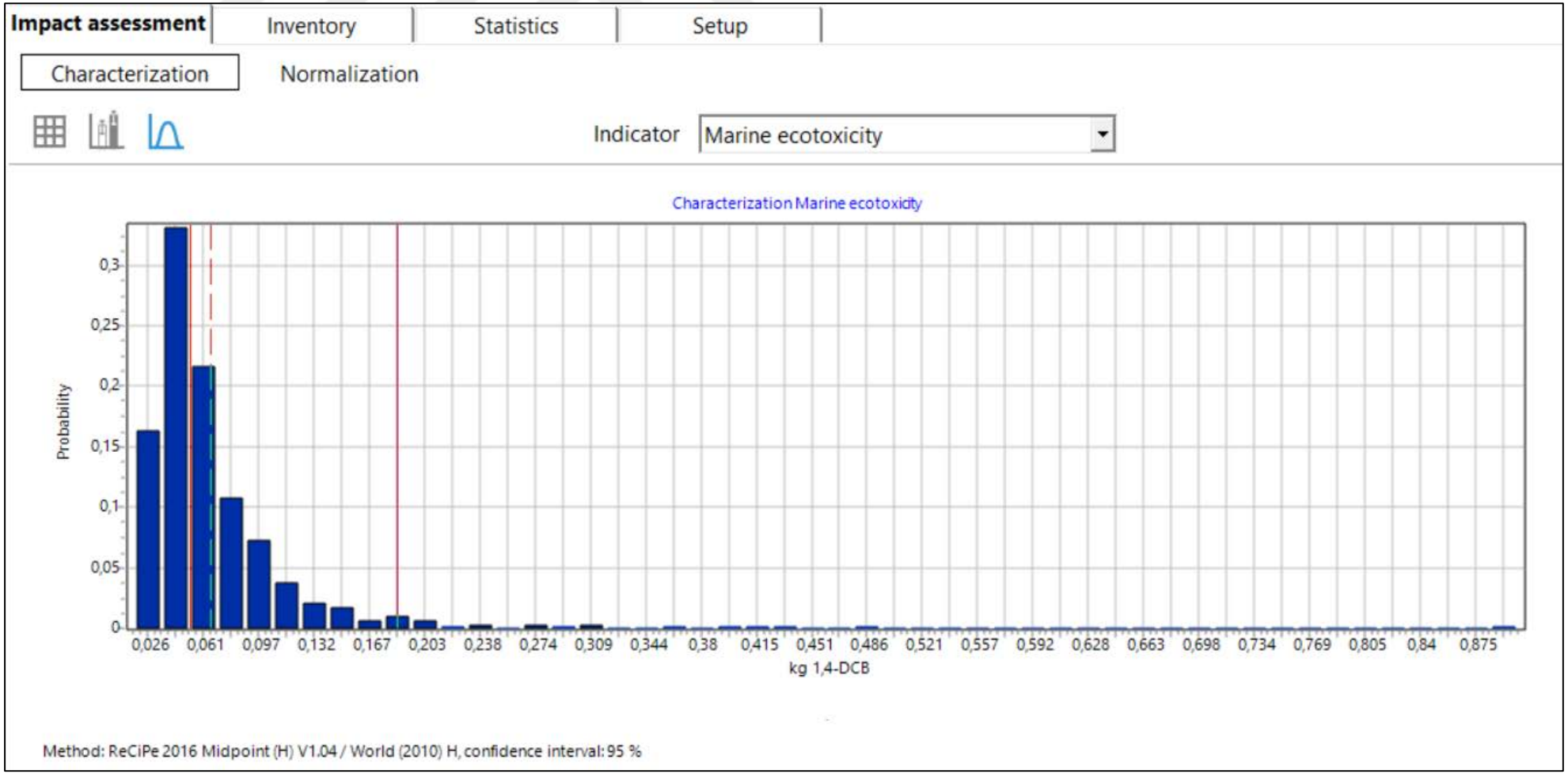
EK 28. KCEP etki kategorisine ait Monte Carlo metodu ile hassasiyet analizi.



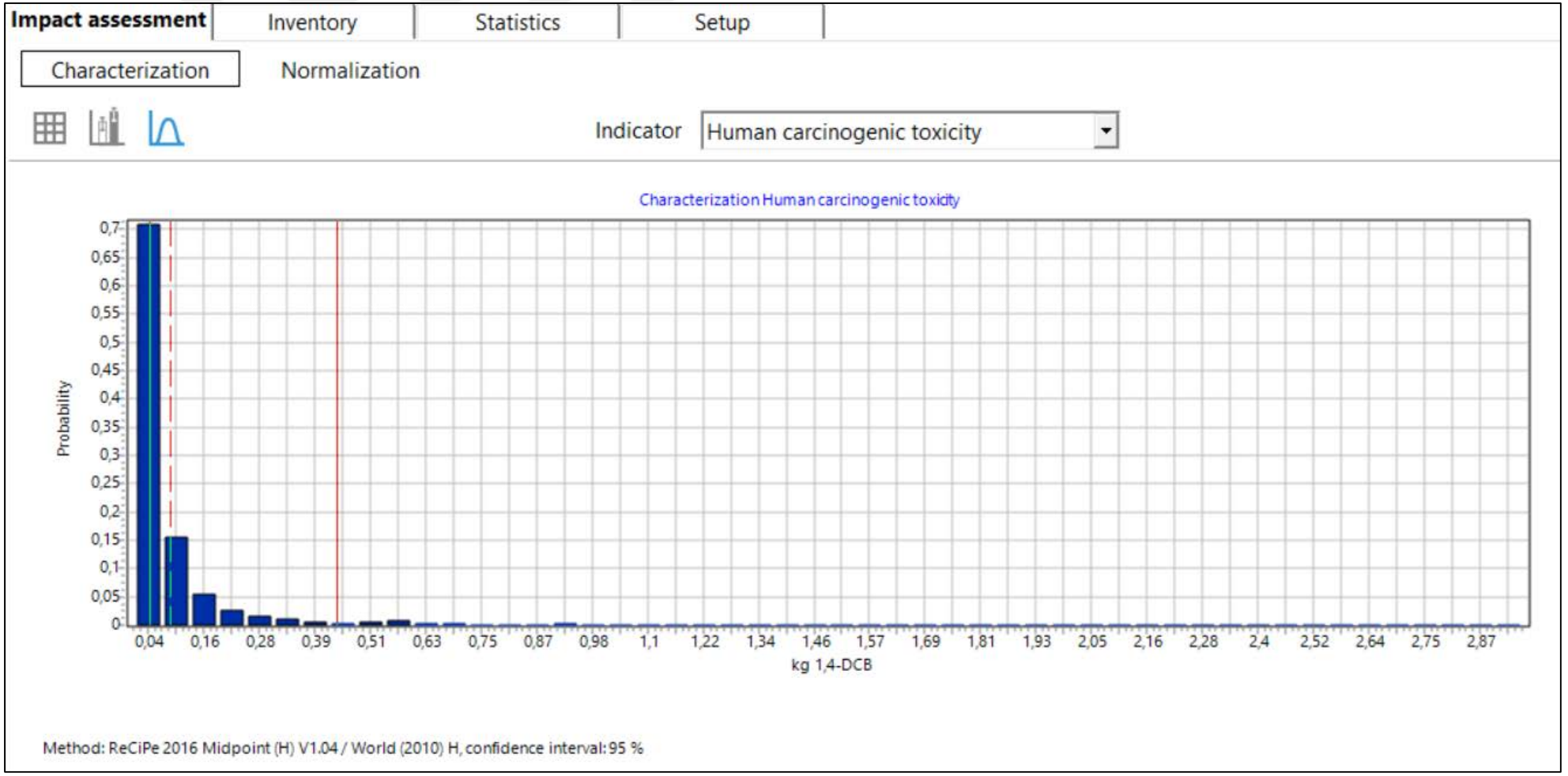
EK 29. TSCEP etki kategorisine ait Monte Carlo metodu ile hassasiyet analizi.



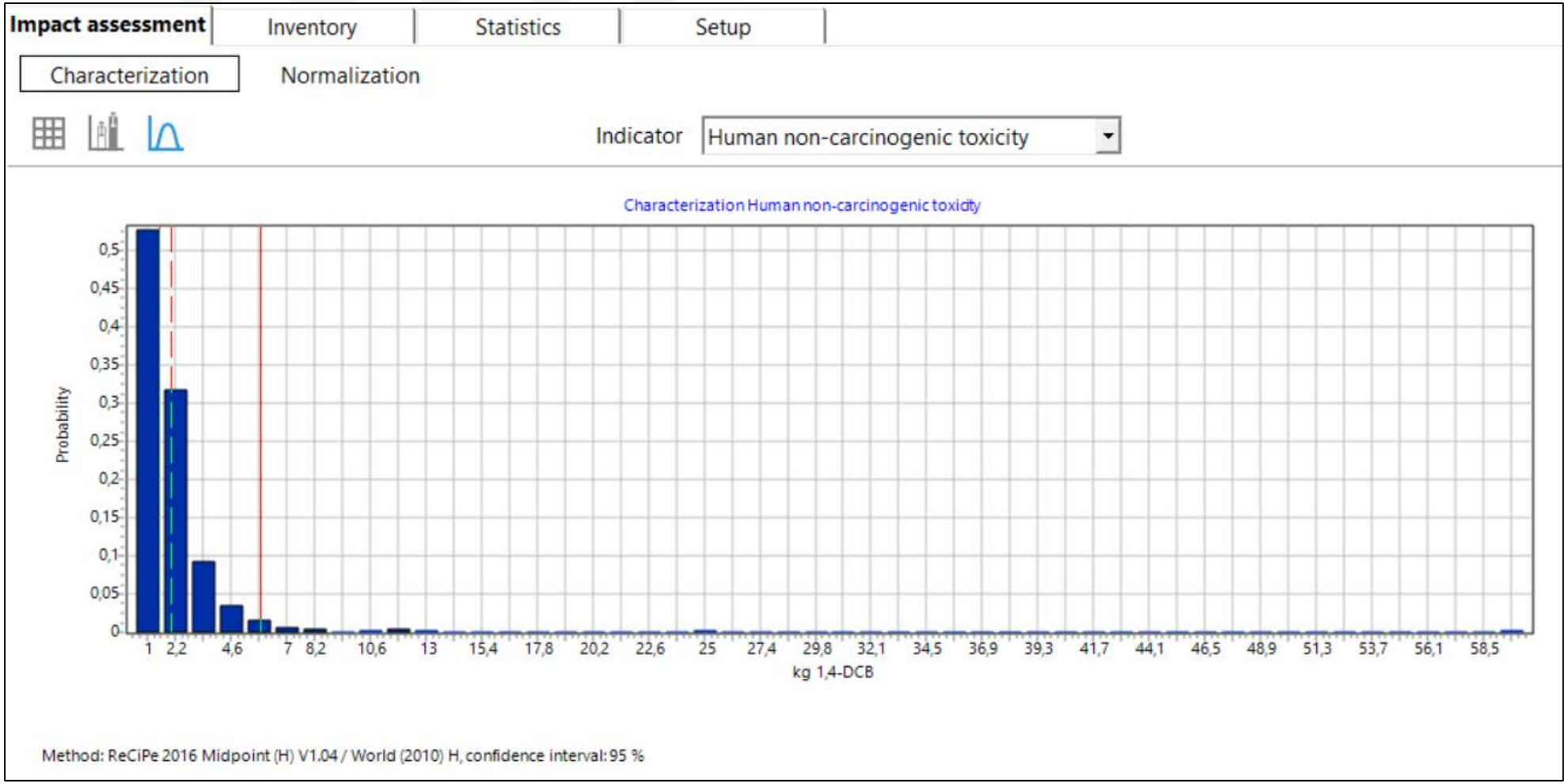
EK 30. DCEP etki kategorisine ait Monte Carlo metodu ile hassasiyet analizi.



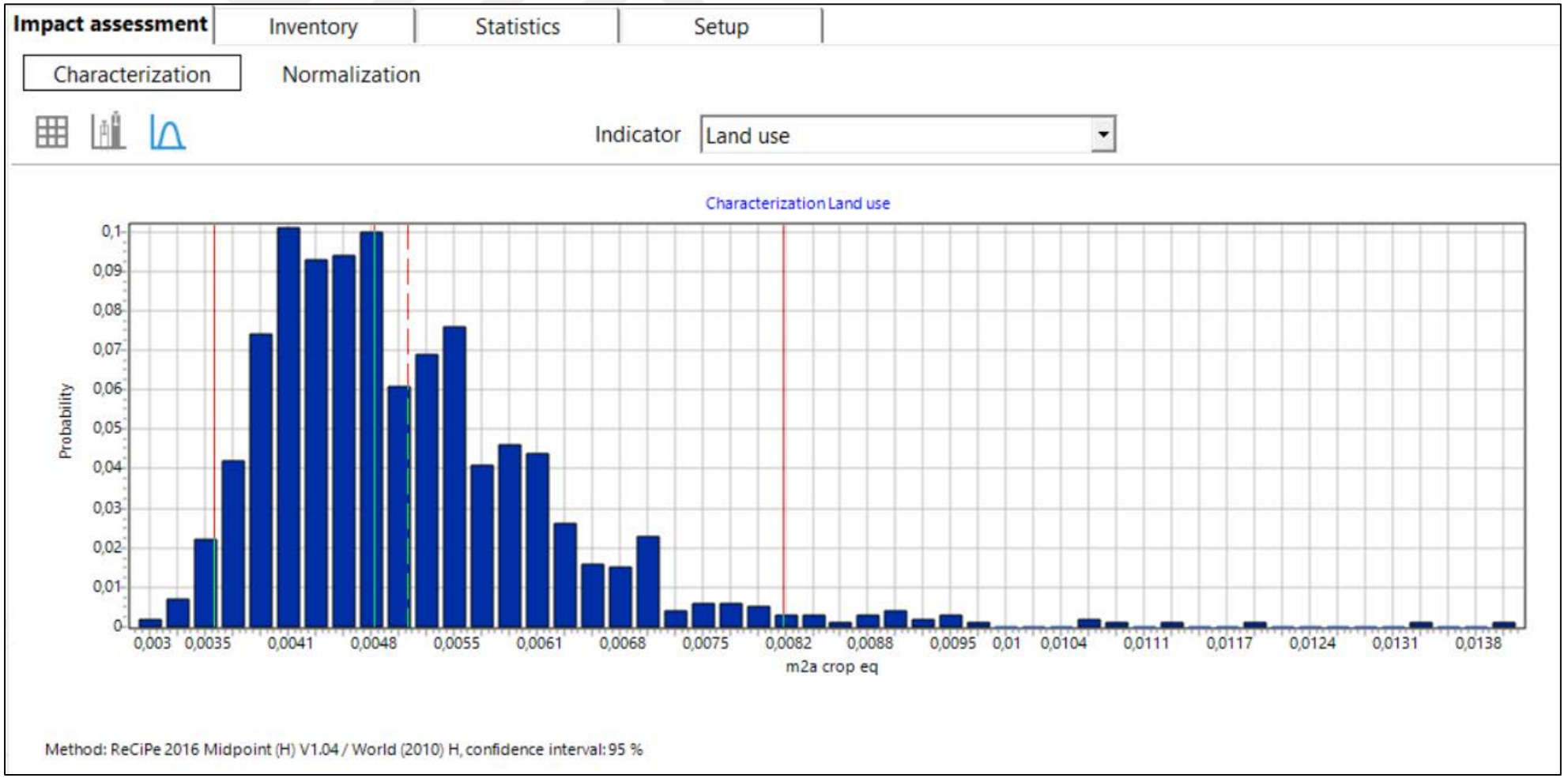
EK 31. T-İS (Kanser) etki kategorisine ait Monte Carlo metodu ile hassasiyet analizi.



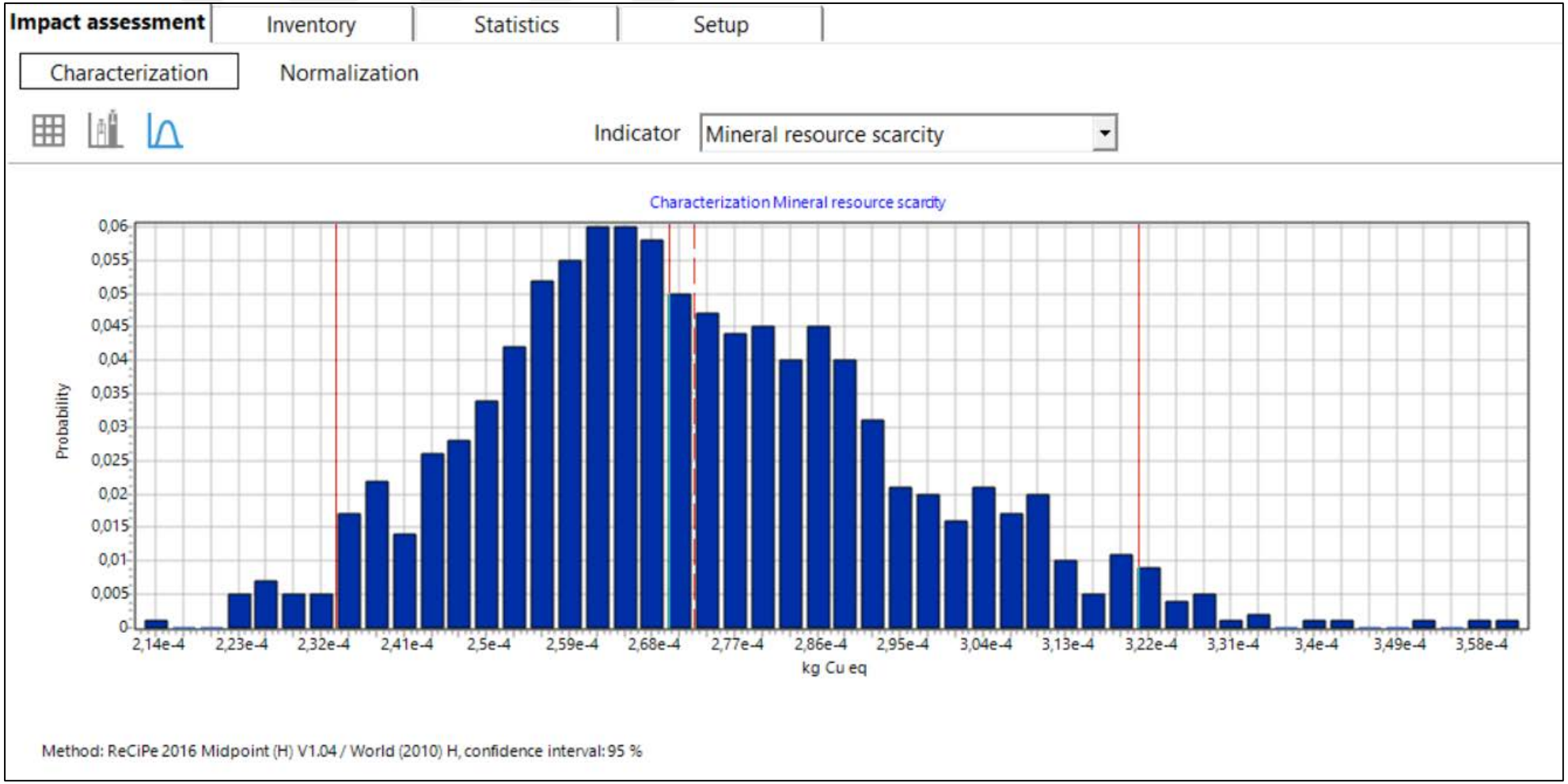
EK 32. T-İS (Kanser Dışı) etki kategorisine ait Monte Carlo metodu ile hassasiyet analizi.



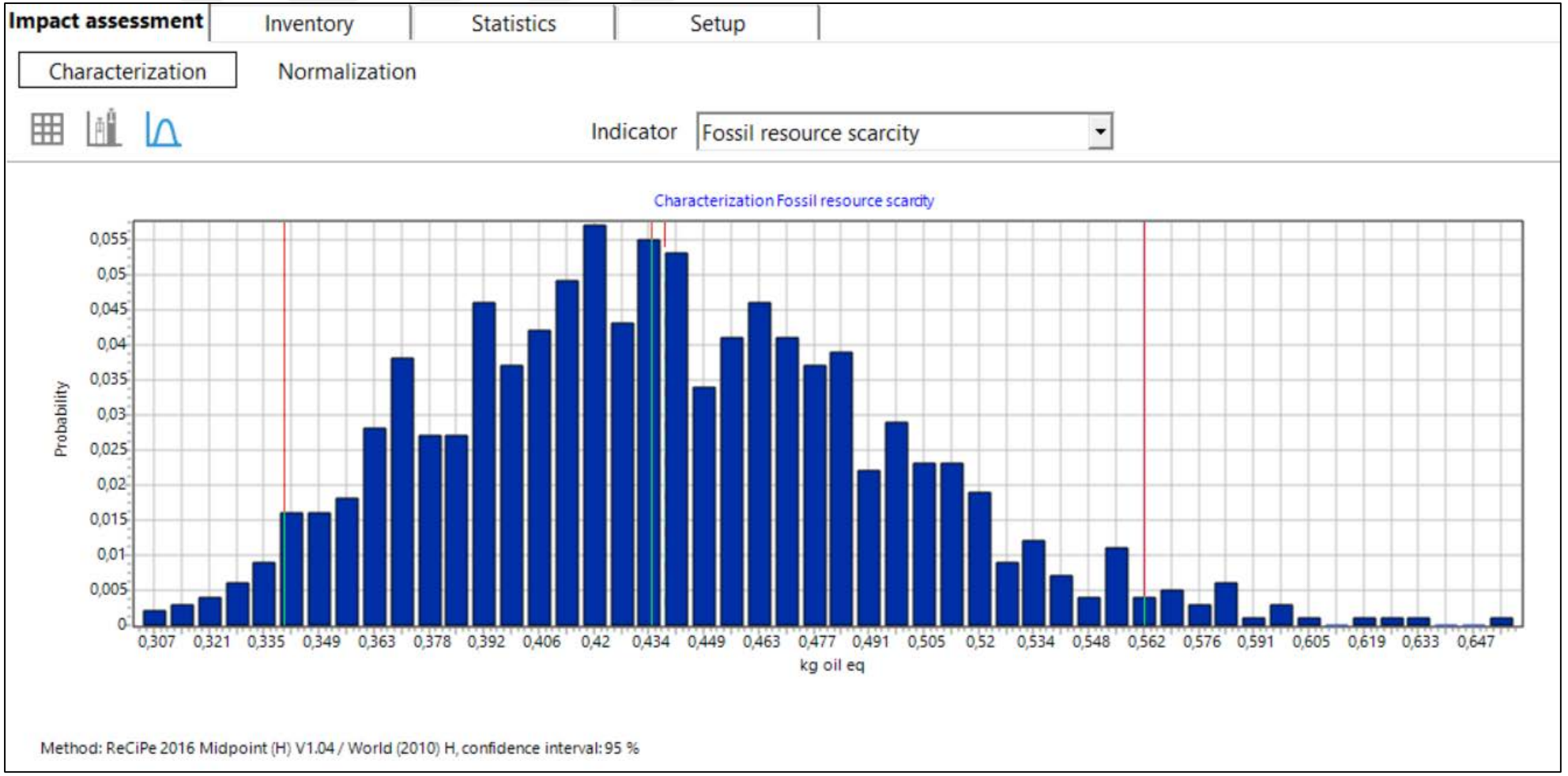
EK 33. AK etki kategorisine ait Monte Carlo metodu ile hassasiyet analizi.



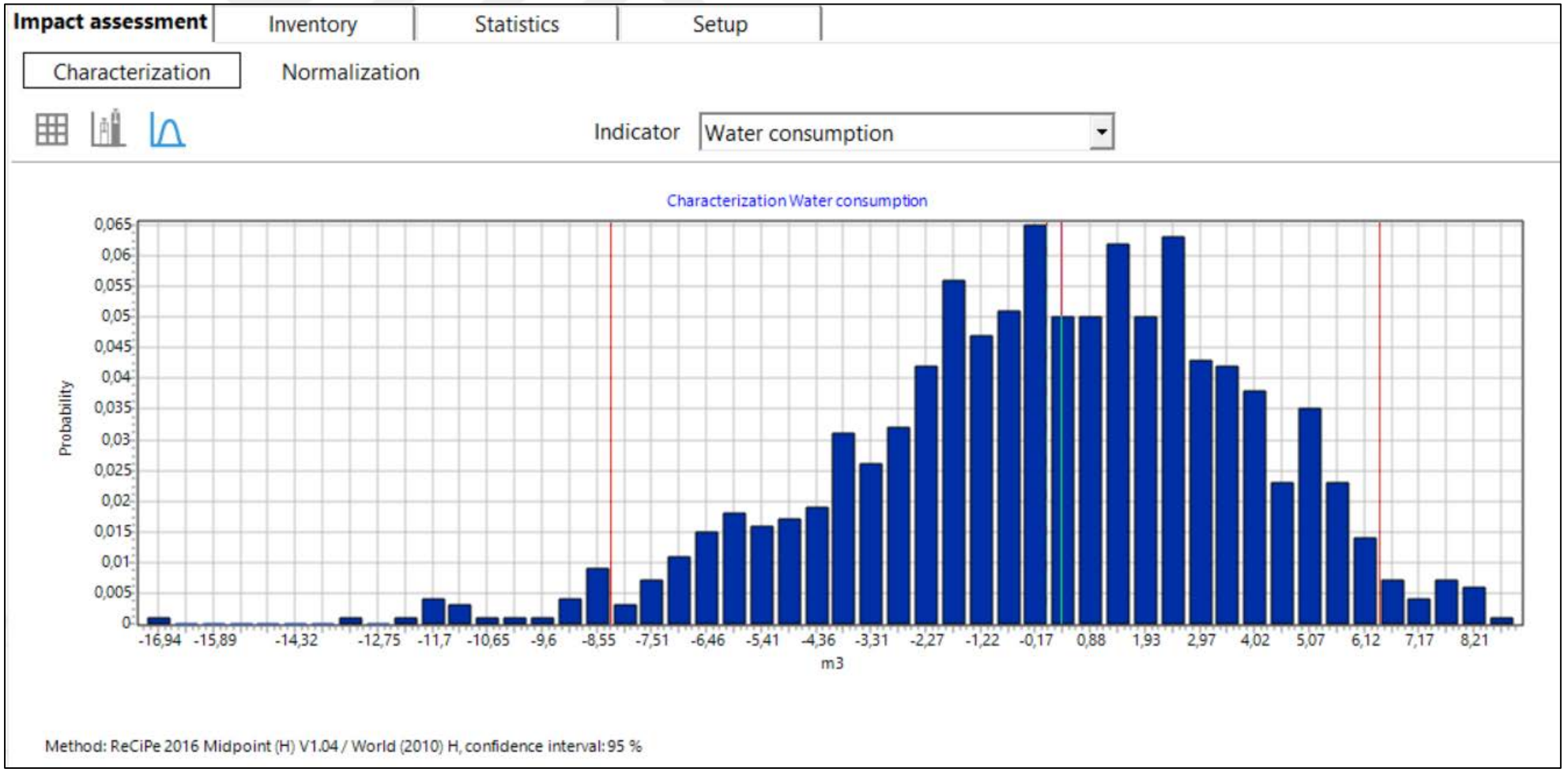
EK 34. MKK etki kategorisine ait Monte Carlo metodu ile hassasiyet analizi.



EK 35. FKK etki kategorisine ait Monte Carlo metodu ile hassasiyet analizi.



EK 36. ST etki kategorisine ait Monte Carlo metodu ile hassasiyet analizi.



İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

DENİZ SUYU DESALİNASYON TESİSLERİNDE YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ UYGULAMASI

ORİJİNALLİK RAPORU

%8	%7	%2	%2
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%1
2	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	%1
3	www.cevresehirkutuphanesi.com İnternet Kaynağı	%1
4	tama.green.gifu-u.ac.jp İnternet Kaynağı	%1
5	uvb.nrel.colostate.edu İnternet Kaynağı	<%1
6	mcf.gsfc.nasa.gov İnternet Kaynağı	<%1
7	norlx65.nordita.org İnternet Kaynağı	<%1
8	www.mdpi.com İnternet Kaynağı	<%1
9	dergipark.org.tr İnternet Kaynağı	<%1
10	www.mem-tek.org İnternet Kaynağı	<%1
	www-nds.iaea.org	

KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

☐ **Kurum izni gerekmektedir.**

☒ **Kurum izni gerekmemektedir.**

Ali Berkant BALKIŞ