

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

Uygulama Soruları ve Cevapları

Soru 1: Bir sanayi bölgesinde üç farklı tesis bulunmaktadır:

- Bir gıda işleme tesisi (organik atık üretmektedir)
- Bir plastik üretim tesisi (plastik hurda üretmektedir)
- Bir biyogaz tesisi

Bu üç tesis arasında döngüsel ekonomi yaklaşımına dayalı bir sistem kurulmak istenmektedir.

- a) Bu sistemde hangi döngüsel ekonomi modeli uygulanabilir?
b) Bu modelin çevresel ve ekonomik avantajlarını açıklayınız.

Cevap

Bu senaryoda uygulanabilecek en uygun model endüstriyel simbiyoz modelidir.

Endüstriyel simbiyoz, farklı sektörler arasında atıkların veya yan ürünlerin başka bir üretim sürecinde kaynak olarak kullanılmasını esas alan döngüsel ekonomi modelidir. Bu yaklaşım, sektörler arası iş birliği sayesinde kaynak verimliliğini artırmayı amaçlar.

Bu örnekte sistem şu şekilde çalışabilir:

- Gıda işleme tesisinde oluşan organik atıklar biyogaz tesisine gönderilir.
- Biyogaz tesisinde bu atıklar anaerobik süreçle enerjiye dönüştürülür.
- Üretilen enerji sanayi tesislerinde kullanılabilir.
- Plastik üretim tesisindeki hurda plastikler geri dönüşüm sistemine yönlendirilir.

Bu modelin **çevresel avantajları** şunlardır:

- Atık miktarının azalması
- doğal kaynak kullanımının azaltılması
- sera gazı emisyonlarının düşürülmesi

Ekonomik avantajları ise şunlardır:

- üretim maliyetlerinin azalması
- atıklardan ekonomik değer elde edilmesi
- enerji maliyetlerinin düşmesi

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

Endüstriyel simbiyoz bu nedenle organize sanayi bölgelerinde sürdürülebilir üretim için önemli bir araçtır.

Soru 2: Bir şehirde atık yönetimi sistemi kurulacaktır. Aşağıdaki atık türleri bulunmaktadır:

- organik atıklar
- plastik ve metal atıklar
- tehlikeli atıklar

Bu atık türleri için en uygun bertaraf veya geri kazanım yöntemlerini belirleyiniz ve teknik gerekçelerini açıklayınız.

Cevap

Atık yönetiminde her atık türü için farklı teknik yöntemlerin kullanılması gerekir. Atıkların doğru yönetilmesi çevresel risklerin azaltılması ve kaynak verimliliğinin artırılması açısından önemlidir.

1. Organik Atıklar

Organik atıklar için en uygun yöntemler:

- kompostlama
- biyogaz üretimi

Kompostlama sürecinde organik atıklar biyolojik olarak parçalanarak doğal gübreye dönüştürülür. Bu yöntem hem atık miktarını azaltır hem de tarımda kullanılacak değerli bir ürün ortaya çıkarır.

Biyogaz üretimi ise organik atıkların anaerobik çürütülmesiyle enerji üretimini sağlar. Bu yöntem enerji geri kazanımı açısından önemli bir teknolojidir.

2. Plastik ve Metal Atıklar

Bu atıklar için en uygun yöntem:

- geri dönüşüm

Plastik ve metaller mekanik veya kimyasal yöntemlerle ayrıştırılarak yeniden hammadde olarak kullanılabilir. Bu yöntem:

- enerji tasarrufu sağlar
- yeni hammadde ihtiyacını azaltır
- ekonomik değer yaratır.

3. Tehlikeli Atıklar

Tehlikeli atıklar için:

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

- kontrollü depolama
- özel yakma tesisleri

Bu atıklar çevre ve insan sağlığı açısından risk taşıdığı için sıkı regülasyonlar altında bertaraf edilir. Depolama alanları sızıntı kontrolü ve çevresel koruma sistemleri ile tasarlanmalıdır.

Soru 3: Bir elektronik cihazın çevresel etkileri değerlendirilmek istenmektedir.

- a) Bu değerlendirme için hangi metodoloji kullanılmalıdır?
- b) Bu metodolojinin temel aşamalarını açıklayınız.

Cevap

Bu değerlendirme için kullanılan yöntem Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) metodolojisidir.

LCA, bir ürünün ham madde çıkarımından üretim, kullanım ve bertaraf aşamalarına kadar tüm yaşam döngüsünü kapsayan çevresel etki analizidir. Bu yöntem ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarına dayanmaktadır.

LCA metodolojisi dört temel aşamadan oluşur:

1. Hedef ve kapsam belirleme

Analizin amacı ve sınırları belirlenir.

Örneğin elektronik cihaz için:

- üretim süreci
- kullanım süreci
- bertaraf aşaması

incelenebilir.

2. Envanter analizi (LCI)

Bu aşamada sistemde kullanılan:

- malzeme miktarları
- enerji tüketimi
- oluşan atıklar

detaylı olarak hesaplanır. Veri toplama saha ölçümleri, endüstriyel raporlar ve literatür verileri ile yapılır.

3. Etki değerlendirmesi (LCIA)

Toplanan veriler kullanılarak çevresel etkiler hesaplanır.

Örneğin:

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

- karbon ayak izi
- su tüketimi
- enerji kullanımı
- ekosistem etkileri

analiz edilir.

4. Yorumlama

Son aşamada analiz sonuçları yorumlanır ve çevresel etkileri azaltacak iyileştirme önerileri geliştirilir.

Örneğin:

- daha az enerji tüketen üretim teknikleri
- geri dönüştürülebilir malzeme kullanımı
- ürün tasarımında değişiklikler önerilebilir.

Soru 4: Bir organize sanayi bölgesinde faaliyet gösteren üç farklı tesis bulunmaktadır:

1. Gıda işleme tesisi
 - Yıllık 10.000 ton organik atık üretmektedir.
2. Elektronik montaj tesisi
 - Yıllık 500 ton elektronik atık üretmektedir.
3. Plastik ambalaj üretim tesisi
 - Yıllık 2.000 ton plastik üretim artığı oluşturmaktadır.

Sanayi bölgesinde ayrıca bir geri dönüşüm tesisi ve bir biyogaz tesisi kurulması planlanmaktadır.

Bu bilgiler doğrultusunda aşağıdaki soruları cevaplayınız:

- a) Bu sanayi bölgesi için uygun bir döngüsel ekonomi modeli tasarlayınız.
- b) Atık türlerine göre geri kazanım veya bertaraf yöntemlerini belirleyiniz.
- c) Kurulan sistemin çevresel ve ekonomik faydalarını değerlendiriniz.
- d) Bu sistemin çevresel performansını değerlendirmek için LCA metodolojisi nasıl uygulanabilir?

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

Cevap

a) Döngüsel ekonomi modeli tasarımı

Bu sanayi bölgesinde uygulanabilecek en uygun model endüstriyel simbiyoz temelli döngüsel ekonomi modelidir.

Endüstriyel simbiyoz yaklaşımı, farklı endüstriler arasında atıkların ve yan ürünlerin başka üretim süreçlerinde hammadde olarak kullanılmasını esas alır. Bu model, kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlar ve çevresel etkileri azaltır.

Bu sistem aşağıdaki şekilde tasarlanabilir:

1. Organik atık akışı

Gıda işleme tesisinde oluşan organik atıklar biyogaz tesisine gönderilir.

Burada:

- anaerobik çürütme süreci uygulanır
- biyogaz üretilir
- biyogaz elektrik veya ısı üretiminde kullanılır

Ayrıca biyogaz tesisinde oluşan fermente çamur, tarımda kullanılacak organik gübre olarak değerlendirilebilir.

2. Plastik atık akışı

Plastik ambalaj tesisinde oluşan üretim artıkları:

- mekanik geri dönüşüm tesisine gönderilir
- granül plastik haline getirilir
- tekrar üretim sürecine dahil edilir

Bu uygulama kapalı döngü üretim yaklaşımına örnektir.

3. Elektronik atık akışı

Elektronik montaj tesisinde oluşan elektronik atıklar:

- ayrıştırma tesisine gönderilir
- değerli metaller geri kazanılır

Elektronik atıklardan:

- altın
- gümüş
- bakır

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

gibi metaller geri kazanılabilir. Bu süreç hem ekonomik değer yaratır hem de doğal kaynak kullanımını azaltır.

b) Atık türlerine göre geri kazanım yöntemleri

Atık Türü	Yönetim Yöntemi	Açıklama
Organik atık	Biyogaz üretimi kompostlama	ve Organik atıkların anaerobik parçalanmasıyla enerji üretimi
Plastik atık	Mekanik geri dönüşüm	Plastiklerin granül haline getirilerek yeniden kullanılması
Elektronik atık	Metal geri kazanımı	Elektronik atıklardan değerli metallerin ayrıştırılması

Bu yöntemler, atıkların ekonomiye yeniden kazandırılmasını sağlayarak kaynak verimliliğini artırır.

c) Çevresel ve ekonomik faydalar

Çevresel faydalar

Bu sistemin çevresel katkıları şunlardır:

- atık depolama alanlarının azalması
- sera gazı emisyonlarının düşmesi
- doğal kaynak kullanımının azaltılması
- enerji geri kazanımı

Döngüsel ekonomi yaklaşımı, kaynakların yeniden kullanımı ve atıkların minimize edilmesi sayesinde çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkılar sağlar.

Ekonomik faydalar

Ekonomik açıdan sistem şu avantajları sağlar:

- hammadde maliyetlerinin düşmesi
- enerji üretimi sayesinde ekonomik gelir
- geri kazanılan metallerden ekonomik değer elde edilmesi
- atık bertaraf maliyetlerinin azalması

Bu nedenle döngüsel ekonomi modeli işletmelere rekabet avantajı sağlayabilir.

d) LCA metodolojisinin uygulanması

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

Kurulan sistemin çevresel performansını değerlendirmek için **Yaşam Döngüsü Analizi (LCA)** kullanılabilir.

LCA, bir ürün veya sistemin ham madde çıkarımından bertarafına kadar tüm yaşam döngüsündeki çevresel etkileri analiz eden bir yöntemdir.

LCA çalışması şu adımlarla uygulanır:

1. Hedef ve kapsam belirleme

Bu aşamada analiz edilecek sistem belirlenir.

Örnek:

- sanayi bölgesindeki atık yönetim sistemi
- biyogaz üretimi
- geri dönüşüm süreçleri

2. Envanter analizi (LCI)

Sistemde kullanılan:

- enerji miktarı
- hammadde kullanımı
- atık üretimi

verileri toplanır.

3. Etki değerlendirilmesi (LCIA)

Toplanan veriler kullanılarak çevresel etkiler hesaplanır.

Örneğin:

- karbon ayak izi
- enerji tüketimi
- su kullanımı
- ekosistem etkileri

4. Sonuç

Son aşamada sistemin hangi aşamalarında çevresel etkilerin yüksek olduğu belirlenir ve iyileştirme önerileri geliştirilir.

Bu sanayi bölgesi için tasarlanan döngüsel ekonomi modeli, endüstriyel simbiyoz yaklaşımına dayanarak atıkların enerji ve hammadde kaynağı olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır. Bu sistem sayesinde hem çevresel etkiler azaltılmakta hem de ekonomik değer yaratılmaktadır.

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

Ayrıca LCA metodolojisi kullanılarak sistemin çevresel performansı bilimsel olarak ölçülebilir ve iyileştirme stratejileri geliştirilebilir.

Soru 5: Nevşehir’de faaliyet gösteren bir patates işleme tesisinde yılda yüksek miktarda nişastalı atık oluşmaktadır. Bu atıkların döngüsel ekonomi kapsamında değerlendirilmesi için bir sistem öneriniz.

Cevap

En uygun çözüm biyogaz üretimi + organik gübre geri kazanımıdır.

- Nişastalı atıklar anaerobik çürütmeye gönderilir
- Metan gazı üretimi sağlanır (enerji kazanımı)
- Fermente çamur gübre olarak kullanılır

Bu yaklaşım hem atık azaltımı hem de enerji geri kazanımı sağlar. Ayrıca depolama ihtiyacını azaltır ve karbon emisyonlarını düşürür.

Soru 6: Kayseri Organize Sanayi Bölgesi’nde plastik üreticileri ve metal işleme tesisleri bulunmaktadır. Bu bölge için bir *endüstriyel simbiyoz modeli* tasarlayınız.

Cevap

Model şu şekilde kurulmalıdır:

- Plastik hurdalar → geri dönüşüm tesisine → yeniden hammadde
- Metal talaşları → ergitme tesisine → yeniden üretim
- Atık ısı → diğer tesislerde enerji olarak kullanılır

Bu yapı, atığın başka bir tesis için **kaynak haline gelmesini sağlar**. Bu doğrudan döngüsel ekonomi prensibidir.

Soru 7: Nevşehir’de turizm kaynaklı atıkların (otel, restoran) yönetiminde en kritik hata nedir ve nasıl çözülmelidir?

Cevap

En büyük hata: kaynağında ayrıştırmanın yapılmaması

Çözüm:

- organik atık → kompost / biyogaz
- ambalaj atığı → geri dönüşüm
- tehlikeli atık → ayrı toplama

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

Bu yaklaşım olmadan hiçbir sistem verimli çalışmaz. Çünkü LCA açısından en büyük kayıp burada başlar.

Soru 8: Bir elektronik atık toplama sistemi Kayseri’de kurulacaktır. Bu sistemin yanlış tasarlanması durumunda en büyük çevresel risk nedir?

Cevap

En büyük risk: tehlikeli bileşenlerin kontrolsüz salınımı

Elektronik atıklar:

- ağır metal içerir
- toksik bileşen barındırır

Bu nedenle:

- lisanslı tesislerde ayrıştırma
- kontrollü geri kazanım

zorunludur. Aksi durumda insan sağlığı ve yeraltı suyu ciddi risk altına girer.

Soru 9: Bir süt ürünleri tesisinde oluşan atık suyun LCA açısından en kritik etkisi hangi aşamada ortaya çıkar?

Cevap

En kritik aşama: envanter analizi (LCI)

Çünkü:

- su tüketimi
- organik yük
- enerji kullanımı

bu aşamada belirlenir. Veri hatalıysa tüm LCA yanlış çıkar. Bu yüzden veri kalitesi kritik unsurdur.

Soru 10. Kayseri’de bir tekstil fabrikasında yapılan LCA çalışmasında en yüksek çevresel etki enerji tüketiminde çıkmıştır. Ne önerirsiniz?

Cevap

Doğrudan çözüm:

- enerji verimliliği artırılmalı

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

- yenilenebilir enerjiye geçilmeli
- proses optimizasyonu yapılmalı

LCA'nın amacı zaten en kritik etkiyi bulup müdahale etmektir.

Soru 11: Nevşehir'de bir belediye "sıfır atık" sistemi kurmak istiyor. İlk yapılması gereken şey nedir?

Cevap

Net cevap: atık karakterizasyonu

Yani:

- hangi atık ne kadar çıkıyor?
- organik mi, plastik mi?
- sezonluk değişim var mı?

Bunu bilmeden sistem kurmak = başarısızlık garantisi.

Soru 12: Bir gıda ürününün LCA analizinde su tüketimi çok yüksek çıkmıştır. Bu neyi gösterir ve ne yapılmalıdır?

Cevap

Bu durum:

- üretimin su yoğun olduğunu gösterir.
- özellikle tarım aşamasında problem vardır.

Çözüm:

- damla sulama,
- su geri kazanımı,
- proses optimizasyonu

LCA burada iyileştirme noktası tespiti yapar.

Soru 12: Kayseri'de kurulacak bir biyogaz tesisinde en büyük operasyonel risk nedir?

Cevap

En kritik risk: girdi stabilitesi

Eğer:

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

- organik atık düzenli gelmezse
- içerik değişirse

reaktör verimi düşer, sistem çöker.

Bu yüzden:

- sürekli besleme
- homojen atık
- ön arıtım

şarttır.

Soru 13: Bir sanayi tesisinde yapılan LCA çalışmasında iki üretim yöntemi karşılaştırılıyor. Hangisinin daha iyi olduğuna nasıl karar verilir?

Cevap

Karar şu verilere bakılarak verilir:

- karbon ayak izi
- enerji tüketimi
- su kullanımı
- atık miktarı

En düşük toplam etkiye sahip olan yöntem seçilir.

Bu, LCA'nın temel kullanım amacıdır: alternatifler arasında bilimsel karar vermek.

Soru 14: Nevşehir'de turizm, tarım ve küçük ölçekli sanayinin birlikte bulunduğu bir bölgede entegre döngüsel atık yönetim sistemi tasarlayınız.

Sistem şu kaynakları içermelidir:

- Otellerden çıkan organik atıklar
- Tarımsal atıklar
- Ambalaj atıkları
- Küçük sanayi atıkları

Ayrıca sistemin:

- teknik işleyişi
- ekonomik sürdürülebilirliği

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

- çevresel etkileri

detaylı olarak açıklanmalıdır.

Cevap

Bu tür hibrit bölgelerde en doğru yaklaşım **çok bileşenli döngüsel ekonomi modeli** kurmaktır.

1. Sistem Kurgusu

Organik Atık Döngüsü

Oteller + restoranlar + tarım atıkları → biyogaz tesisi

Burada:

- anaerobik çürütme ile metan üretimi
- enerji üretimi (ısı + elektrik)
- digestat → organik gübre

Bu model hem turizm hem tarımı bağlar.

Ambalaj Atığı Döngüsü

- plastik, cam, metal → ayrıştırma
- geri dönüşüm tesisine gönderim

Bu sistemde kaynağında ayrıştırma zorunludur.

Sanayi Atıkları

- tehlikeli atık → lisanslı bertaraf
- geri kazanılabilir → geri dönüşüm

2. Ekonomik Model

Gelir kalemleri:

- biyogazdan enerji satışı
- geri dönüştürülmüş malzeme satışı
- gübre satışı

Giderler:

- lojistik
- tesis işletme maliyeti

Bu sistem doğru kurulursa **kendi kendini finanse eder.**

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

3. Çevresel Etki

- depolama sahası ihtiyacı azalır
- metan emisyonu kontrol altına alınır
- kaynak kullanımını azalır

Bu yaklaşım doğrudan döngüsel ekonomi prensipleriyle uyumludur.

Soru 15: Kayseri’de bir mobilya üretim tesisinde yapılan LCA çalışmasında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Enerji tüketimi: %45 etki
- Hammadde kullanımı: %30 etki
- Atık üretimi: %15 etki
- Taşıma: %10 etki

Bu sonuçları yorumlayarak:

- a) En kritik problem nedir?
- b) Hangi müdahaleler yapılmalıdır?
- c) Alternatif üretim senaryosu öneriniz.

Cevap

a) Kritik problem

En büyük etki enerji tüketiminden gelmektedir (%45)

Bu şu anlama gelir:

- üretim süreci enerji yoğun
- sistemin karbon ayak izi yüksek

LCA’da en yüksek etki hangi aşamada ise müdahale oraya yapılır.

b) Müdahaleler

1. Enerji verimliliği
 - eski makinelerin yenilenmesi
 - proses optimizasyonu
2. Enerji kaynağı değişimi
 - güneş enerjisi

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

- biyogaz entegrasyonu

3. Atık ısı geri kazanımı

c) Alternatif senaryo

- yerel hammadde kullanımı
- modüler üretim
- düşük enerji teknolojileri

Bu senaryo LCA sonuçlarını ciddi şekilde iyileştirir.

Soru 16: Nevşehir’de bir belediye iki alternatif arasında karar vermek zorundadır:

Seçenek 1: Katı atık düzenli depolama sahası genişletme,

Seçenek 2: Biyogaz + geri dönüşüm tesisi kurma.

LCA ve döngüsel ekonomi açısından karşılaştırmalı analiz yapınız ve karar veriniz.

Cevap

1. Düzenli depolama

Avantaj:

- düşük ilk yatırım

Dezavantaj:

- metan emisyonu
- uzun vadeli çevresel risk
- ekonomik değer üretmez

2. Biyogaz + geri dönüşüm

Avantaj:

- enerji üretimi
- atık azaltımı
- ekonomik gelir

Dezavantaj:

- yüksek başlangıç maliyeti

Net: **Seçenek 2**

Çünkü:

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

- LCA açısından daha düşük çevresel etki
- döngüsel ekonomi ile uyumlu
- uzun vadede ekonomik

Soru 17: Bir LCA çalışmasında kullanılan verilerin büyük kısmı literatürden alınmıştır.

Bu durum:

- a) hangi sorunlara yol açar?
- b) nasıl çözülür?

Cevap

a) Sorunlar

- bölgesel farklılıklar yansıtılamaz
- veri güncel olmayabilir
- sonuçlar yanıltıcı olur

LCA'da en büyük hata kaynağı veri kalitesidir.

b) Çözüm

- saha verisi toplamak
- doğrudan ölçüm yapmak
- belirsizlik analizi uygulamak

Soru 18: Kayseri'de iki üretim yöntemi karşılaştırılıyor:

- Geleneksel üretim
- Geri dönüştürülmüş hammadde kullanan üretim

LCA yaklaşımı ile senaryo analizi yaparak hangi sistemin daha sürdürülebilir olduğunu açıklayınız.

Cevap

1. Geleneksel üretim

- yüksek hammadde tüketimi
- yüksek enerji kullanımı
- yüksek karbon ayak izi

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

2. Geri dönüşümlü üretim

- düşük hammadde ihtiyacı
- daha düşük enerji kullanımı
- daha düşük emisyon

Sonuç: Geri dönüşümlü üretim açık ara daha sürdürülebilir.

LCA'da bu fark:

- karbon
- enerji
- atık

göstergeleriyle ölçülür.

Soru 18: Kayseri'de faaliyet gösteren bir gıda işleme ve ambalajlama tesisinde mevcut sistem ile döngüsel ekonomi temelli iyileştirilmiş sistem karşılaştırılacaktır. Tesis yılda **12.000 ton ürün** üretmektedir.

İki senaryo aşağıda verilmiştir:

Senaryo A: Mevcut Sistem

- Elektrik tüketimi: **1.500.000 kWh/yıl**
- Su tüketimi: **24.000 m³/yıl**
- Birincil (virgin) plastik ambalaj kullanımı: **300 ton/yıl**
- Oluşan plastik atık: **60 ton/yıl**
- Bu plastik atığın geri dönüştürülen kısmı: **15 ton/yıl**
- Organik atık: **1.200 ton/yıl**
- Organik atığın geri kazanılan kısmı: **0 ton/yıl**
- Yıllık toplam atık yönetim maliyeti: **4.200.000 TL/yıl**
- Ürün satışından bağımsız, atıklardan elde edilen ek gelir: **0 TL/yıl**

Senaryo B: Döngüsel Ekonomi Temelli İyileştirilmiş Sistem

- Elektrik tüketimi: **1.200.000 kWh/yıl**
- Su tüketimi: **18.000 m³/yıl**
- Birincil plastik ambalaj kullanımı: **220 ton/yıl**
- Oluşan plastik atık: **50 ton/yıl**

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

- Bu plastik atığın geri dönüştürülen kısmı: **40 ton/yıl**
- Organik atık: **1.200 ton/yıl**
- Organik atığın biyogaz/kompost yoluyla geri kazanılan kısmı: **900 ton/yıl**
- Yıllık toplam atık yönetim maliyeti: **3.000.000 TL/yıl**
- Geri dönüştürülen plastikten yıllık gelir: **600.000 TL/yıl**
- Biyogaz ve kompost çıktısından yıllık gelir: **1.400.000 TL/yıl**

Emisyon faktörleri

Hesaplamalarda aşağıdaki emisyon faktörleri kullanılacaktır:

- Elektrik için emisyon faktörü: **0,42 kg CO₂-eşd./kWh**
- Su temini ve kullanımı için emisyon faktörü: **0,35 kg CO₂-eşd./m³**
- Birincil plastik kullanımı için emisyon faktörü: **2,70 ton CO₂-eşd./ton plastik**
- Geri dönüştürülmeyip bertaraf edilen plastik atık için emisyon faktörü: **1,80 ton CO₂-eşd./ton plastik atık**
- Geri kazanılmadan bertaraf edilen organik atık için emisyon faktörü: **0,50 ton CO₂-eşd./ton organik atık**

Ek yatırım

Senaryo B'ye geçiş için gerekli toplam yatırım: **5.000.000 TL**

İstenenler

1. Her iki senaryo için toplam yıllık karbon ayak izini hesaplayınız.
2. Her iki senaryo için:
 - enerji yoğunluğu
 - su yoğunluğu
 - toplam geri kazanım oranı hesaplayınız.
3. Senaryo B'nin Senaryo A'ya göre yıllık net ekonomik kazancını bulunuz.
4. ROI'yi hesaplayınız.
5. Sonuçları LCA mantığıyla yorumlayınız: hangi aşamada iyileşme en büyüktür?

Cevap

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

1) Toplam yıllık karbon ayak izi hesabı

Bu soruda toplam karbon ayak izi, beş ana bileşenden hesaplanacaktır:

1. Elektrik kaynaklı emisyon
2. Su kullanımı kaynaklı emisyon
3. Birincil plastik kullanımı kaynaklı emisyon
4. Geri dönüştürülmeyen plastik atık kaynaklı emisyon
5. Geri kazanılmayan organik atık kaynaklı emisyon

Bu yaklaşım, ders notlarında verilen **envanter analizi + etki değerlendirmesi** mantığına uygundur. LCA'da enerji tüketimi, su kullanımı, atık üretimi ve geri dönüşüm oranları temel göstergeler arasında yer alır.

1.1) Senaryo A için karbon ayak izi

A. Elektrik kaynaklı emisyon

Formül

$$CF_{elektrik} = E \times EF_{elektrik}$$

Değişkenler

- $CF_{elektrik}$: elektrikten kaynaklanan karbon ayak izi
- E : yıllık elektrik tüketimi (kWh/yıl)
- $EF_{elektrik}$: elektrik emisyon faktörü (kg CO₂-eşd./kWh)

Hesap

$$\begin{aligned} CF_{elektrik,A} &= 1.500.000 \times 0,42 \\ CF_{elektrik,A} &= 630.000 \text{ kg CO}_2\text{-eşd./yıl} \\ 630.000 \text{ kg} &= 630 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl} \end{aligned}$$

B. Su kullanımı kaynaklı emisyon

Formül

$$CF_{su} = W \times EF_{su}$$

Değişkenler

- CF_{su} : su kullanımından kaynaklanan karbon ayak izi
- W : yıllık su tüketimi (m³/yıl)

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

- EF_{su} : su emisyon faktörü (kg CO₂-eşd./m³)

Hesap

$$CF_{su,A} = 24.000 \times 0,35$$

$$CF_{su,A} = 8.400 \text{ kg CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

$$8.400 \text{ kg} = 8,4 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

C. Birincil plastik kullanımı kaynaklı emisyon

Formül

$$CF_{plastik_birincil} = P_v \times EF_{plastik_birincil}$$

Değişkenler

- P_v : birincil plastik miktarı (ton/yıl)
- $EF_{plastik_birincil}$: birincil plastik emisyon faktörü (ton CO₂-eşd./ton)

Hesap

$$CF_{plastik_birincil,A} = 300 \times 2,70$$

$$CF_{plastik_birincil,A} = 810 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

D. Bertaraf edilen plastik atık kaynaklı emisyon

Önce geri dönüştürülmeyen plastik miktarı bulunur.

Formül

$$P_{bertaraf} = P_{atik} - P_{geri_donusum}$$

Hesap

$$P_{bertaraf,A} = 60 - 15 = 45 \text{ ton/yıl}$$

Şimdi emisyon hesaplanır:

$$CF_{plastik_bertaraf} = P_{bertaraf} \times EF_{plastik_bertaraf}$$

$$CF_{plastik_bertaraf,A} = 45 \times 1,80$$

$$CF_{plastik_bertaraf,A} = 81 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

E. Geri kazanılmayan organik atık kaynaklı emisyon

Önce bertaraf edilen organik atık bulunur.

Formül

$$O_{bertaraf} = O_{toplam} - O_{geri_kazanilan}$$

Hesap

$$O_{bertaraf,A} = 1.200 - 0 = 1.200 \text{ ton/yıl}$$

Emisyon:

$$CF_{organik} = O_{bertaraf} \times EF_{organik}$$

$$CF_{organik,A} = 1.200 \times 0,50$$

$$CF_{organik,A} = 600 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

F. Senaryo A toplam karbon ayak izi

Formül

$$CF_{toplam} = CF_{elektrik} + CF_{su} + CF_{plastik_birincil} + CF_{plastik_bertaraf} + CF_{organik}$$

Hesap

$$CF_{toplam,A} = 630 + 8,4 + 810 + 81 + 600$$

$$CF_{toplam,A} = 2.129,4 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

1.2) Senaryo B için karbon ayak izi

A. Elektrik kaynaklı emisyon

$$CF_{elektrik,B} = 1.200.000 \times 0,42 = 504.000 \text{ kg}$$

$$CF_{elektrik,B} = 504 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

B. Su kaynaklı emisyon

$$CF_{su,B} = 18.000 \times 0,35 = 6.300 \text{ kg}$$

$$CF_{su,B} = 6,3 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

C. Birincil plastik kullanımı kaynaklı emisyon

$$CF_{plastik_birincil,B} = 220 \times 2,70 = 594 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

D. Bertaraf edilen plastik atık kaynaklı emisyon

Önce bertaraf edilen plastik:

$$P_{bertaraf,B} = 50 - 40 = 10 \text{ ton/yıl}$$

Emisyon:

$$CF_{plastik_bertaraf,B} = 10 \times 1,80 = 18 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

E. Geri kazanılmayan organik atık kaynaklı emisyon

Önce bertaraf edilen organik atık:

$$O_{bertaraf,B} = 1.200 - 900 = 300 \text{ ton/yıl}$$

Emisyon:

$$CF_{organik,B} = 300 \times 0,50 = 150 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

F. Senaryo B toplam karbon ayak izi

$$CF_{toplamlam,B} = 504 + 6,3 + 594 + 18 + 150$$

$$CF_{toplamlam,B} = 1.272,3 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

1.3) Karbon ayak izi farkı

Formül

$$\Delta CF = CF_{toplamlam,A} - CF_{toplamlam,B}$$

Hesap

$$\Delta CF = 2.129,4 - 1.272,3$$

$$\Delta CF = 857,1 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

İyileştirilmiş sistem yılda **857,1 ton CO₂-eşd.** azaltım sağlamaktadır. Bu, LCA açısından ciddi bir iyileşmedir. Ders notlarında LCA'nın temel amacının, çevresel etkinin en yüksek olduğu aşamaları belirleyip iyileştirme stratejileri geliştirmek olduğu açıkça belirtilmektedir.

2) Performans göstergeleri

Ders notlarında ve el kitabında çevresel performans için karbon ayak izi, enerji tüketimi, su kullanımı ve geri dönüşüm/geri kazanım oranlarının temel göstergeler olduğu belirtilmektedir.

2.1) Enerji yoğunluğu

Formül

$$EY = \frac{E}{Q}$$

Değişkenler

- EY : enerji yoğunluğu (kWh/ton ürün)
- E : yıllık elektrik tüketimi (kWh/yıl)
- Q : yıllık ürün miktarı (ton/yıl)

Senaryo A

$$EY_A = \frac{1.500.000}{12.000} = 125 \text{ kWh/ton}$$

Senaryo B

$$EY_B = \frac{1.200.000}{12.000} = 100 \text{ kWh/ton}$$

İyileşme oranı

$$\% \text{ iyileşme} = \frac{125 - 100}{125} \times 100$$

$$\% \text{ iyileşme} = 20$$

Yani enerji yoğunluğunda **%20 iyileşme** vardır.

2.2) Su yoğunluğu

Formül

$$SY = \frac{W}{Q}$$

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

Değişkenler

- SY : su yoğunluğu (m^3/ton ürün)
- W : yıllık su tüketimi ($m^3/yıl$)
- Q : yıllık ürün miktarı ($ton/yıl$)

Senaryo A

$$SY_A = \frac{24.000}{12.000} = 2,0 \text{ m}^3/ton$$

Senaryo B

$$SY_B = \frac{18.000}{12.000} = 1,5 \text{ m}^3/ton$$

İyileşme oranı

$$\% iyileşme = \frac{2,0 - 1,5}{2,0} \times 100$$

$$\% iyileşme = 25$$

Su yoğunluğunda **%25 iyileşme** vardır.

2.3) Toplam geri kazanım oranı

Burada toplam geri kazanım oranını, **geri kazanılan toplam atık miktarının toplam oluşan atık miktarına oranı** olarak alıyoruz.

Formül

$$GKO = \frac{A_{geri_kazanilan}}{A_{toplam}} \times 100$$

Değişkenler

- GKO : geri kazanım oranı (%)
- $A_{geri_kazanilan}$: geri kazanılan toplam atık ($ton/yıl$)
- A_{toplam} : toplam oluşan atık ($ton/yıl$)

Toplam atık = plastik atık + organik atık

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

Senaryo A

Toplam atık:

$$A_{toplam,A} = 60 + 1.200 = 1.260 \text{ ton/yıl}$$

Geri kazanılan toplam atık:

$$A_{geri_kazanilan,A} = 15 + 0 = 15 \text{ ton/yıl}$$

$$GKO_A = \frac{15}{1.260} \times 100$$

$$GKO_A = 1,19\%$$

Senaryo B

Toplam atık:

$$A_{toplam,B} = 50 + 1.200 = 1.250 \text{ ton/yıl}$$

Geri kazanılan toplam atık:

$$A_{geri_kazanilan,B} = 40 + 900 = 940 \text{ ton/yıl}$$

$$GKO_B = \frac{940}{1.250} \times 100$$

$$GKO_B = 75,2\%$$

3) Yıllık net ekonomik kazanç

Bu soruda ekonomik kazanç iki bileşenden oluşur:

1. Maliyet azalması
2. Atıktan elde edilen ek gelir

Ders notlarında ekonomik değerlendirme için maliyet-fayda analizi ve ROI'nin kullanılması gerektiği açık biçimde belirtilmektedir.

3.1) Maliyet azalması

Formül

$$Tasarruf = Maliyet_A - Maliyet_B$$

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

Hesap

$$Tasarruf = 4.200.000 - 3.000.000$$
$$Tasarruf = 1.200.000 \text{ TL/yıl}$$

3.2) Atıktan elde edilen toplam ek gelir

Formül

$$Gelir_{ek} = Gelir_{plastik} + Gelir_{biyogaz/kompost}$$

Hesap

$$Gelir_{ek} = 600.000 + 1.400.000$$
$$Gelir_{ek} = 2.000.000 \text{ TL/yıl}$$

3.3) Yıllık net ekonomik kazanç

Formül

$$Kazanc_{net} = Tasarruf + Gelir_{ek}$$

Hesap

$$Kazanc_{net} = 1.200.000 + 2.000.000$$
$$Kazanc_{net} = 3.200.000 \text{ TL/yıl}$$

4) ROI hesabı

ROI nedir?

ROI = Return on Investment = yatırım geri dönüş oranı

Formül

$$ROI(\%) = \frac{Yillik \text{ Net Kazanc}}{Toplam \text{ Yatirim}} \times 100$$

Değişkenler

- *ROI*: yatırım geri dönüş oranı (%)

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

- *Yıllık Net Kazanç*: yatırım sonrası yıllık ekonomik fayda (TL/yıl)
- *Toplam Yatırım*: başlangıç yatırımı (TL)

Hesap

$$ROI = \frac{3.200.000}{5.000.000} \times 100$$
$$ROI = 64\%$$

4.1) Basit geri ödeme süresi

Bunu da hesaplamak gerekir. Çünkü sahada herkes ROI kadar buna da bakar.

Formül

$$Geri Odeme Suresi = \frac{Toplam Yatirim}{Yillik Net Kazanc}$$

Hesap

$$Geri Odeme Suresi = \frac{5.000.000}{3.200.000}$$
$$Geri Odeme Suresi = 1,56 \text{ yıl}$$

Yaklaşık **1 yıl 7 ay**.

Bu çok iyi bir geri ödeme süresidir.

5) LCA mantığıyla yorum

5.1) En büyük çevresel iyileşme hangi kalemdedir?

Her kalemdaki azalışı bulalım:

Elektrik kaynaklı azalış

$$630 - 504 = 126 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

Su kaynaklı azalış

$$8,4 - 6,3 = 2,1 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

Birincil plastik kaynaklı azalış

**NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi**

$$810 - 594 = 216 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

Bertaraf edilen plastik kaynaklı azalış

$$81 - 18 = 63 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

Organik atık kaynaklı azalış

$$600 - 150 = 450 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

5.2) Sonuç

En büyük iyileşme:

$$450 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

ile **organik atığın geri kazanımı** tarafında gerçekleşmiştir.

Yani bu tesiste çevresel açıdan en etkili müdahale:

- organik atığın bertaraf edilmesi yerine
- biyogaz/kompost yoluyla geri kazanılmasıdır.

İkinci büyük etki ise **birincil plastik kullanımının azaltılmasıdır.**

Bu sonuç, ders notlarındaki şu mantıkla tam uyumludur:

- LCA'da önce hedef ve kapsam belirlenir
- sonra envanter verileri toplanır
- ardından etki değerlendirmesi yapılır
- sonunda hangi aşamada çevresel yükün yüksek olduğu belirlenerek iyileştirme stratejisi önerilir.

Sonuç

Senaryo A

- Toplam karbon ayak izi: **2.129,4 ton CO₂-eşd./yıl**
- Enerji yoğunluğu: **125 kWh/ton**
- Su yoğunluğu: **2,0 m³/ton**
- Geri kazanım oranı: **%1,19**

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

Senaryo B

- Toplam karbon ayak izi: **1.272,3 ton CO₂-eşd./yıl**
- Enerji yoğunluğu: **100 kWh/ton**
- Su yoğunluğu: **1,5 m³/ton**
- Geri kazanım oranı: **%75,2**
- Yıllık net ekonomik kazanç: **3.200.000 TL/yıl**
- ROI: **%64**
- Geri ödeme süresi: **1,56 yıl**

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

Soru 19: Bir gıda ürününün LCA çalışması yapılacaktır.

- a) LCA'nın temel amacı nedir?
- b) Hangi aşamalardan oluşur?

Cevap

- a) LCA'nın amacı:

Bir ürün veya sürecin **ham maddeden bertarafa kadar tüm yaşam döngüsündeki çevresel etkilerini belirlemek ve en kritik etki noktalarını ortaya koymaktır.**

b) LCA dört temel aşamadan oluşur:

1. **Hedef ve kapsam belirleme**
2. **Envanter analizi (LCI)**
3. **Etki değerlendirilmesi (LCIA)**
4. **Yorum**

Bu yapı, çevresel etkilerin sistematik olarak analiz edilmesini sağlar.

Soru 20: Bir üretim tesisinde yıllık:

- Elektrik tüketimi: 100.000 kWh
- Emisyon faktörü: 0,5 kg CO₂/kWh

Toplam karbon ayak izini hesaplayınız.

Cevap

Formül

$$CF = E \times EF$$

Değişkenler

- CF : karbon ayak izi (kg CO₂)
- E : enerji tüketimi (kWh)
- EF : emisyon faktörü (kg CO₂/kWh)

Hesap

$$\begin{aligned} CF &= 100.000 \times 0,5 \\ CF &= 50.000 \text{ kg CO}_2 \\ &= 50 \text{ ton CO}_2 \end{aligned}$$

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

Soru 21: Bir sistemde,

- Elektrik: 200.000 kWh (0,4 kg CO₂/kWh)
- Su: 5.000 m³ (0,3 kg CO₂/m³)

Toplam karbon ayak izini hesaplayınız.

Cevap

Elektrik emisyonu

$$CF_{elektrik} = 200.000 \times 0,4 = 80.000 \text{ kg} = 80 \text{ ton}$$

Su emisyonu

$$CF_{su} = 5.000 \times 0,3 = 1.500 \text{ kg} = 1,5 \text{ ton}$$

Toplam

$$CF_{toplam} = 80 + 1,5 = 81,5 \text{ ton CO}_2$$

Soru 22: Bir tesiste:

- Plastik kullanımı: 100 ton
- Bunun %60'ı geri dönüştürülüyor
- Geri dönüştürülmeyen plastik için emisyon faktörü: 2 ton CO₂/ton

Karbon etkisini hesaplayınız.

Cevap

Geri dönüştürülmeyen miktar

$$P_{bertaraf} = 100 \times (1 - 0,60) = 40 \text{ ton}$$

Emisyon

$$CF = 40 \times 2 = 80 \text{ ton CO}_2$$

Geri dönüşüm oranı arttıkça karbon etkisi ciddi düşer.
Bu, LCA'nın en kritik çıktılarından biridir.

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

Soru 23: İki üretim yöntemi,

Yöntem A Yöntem B

Enerji (kWh) 500.000 350.000

Emisyon faktörü 0,4 0,4

Hangisi daha sürdürülebilir?

Cevap

Yöntem A

$$CF_A = 500.000 \times 0,4 = 200.000 \text{ kg} = 200 \text{ ton}$$

Yöntem B

$$CF_B = 350.000 \times 0,4 = 140.000 \text{ kg} = 140 \text{ ton}$$

Sonuç

Yöntem B daha sürdürülebilir.

Soru 24: Bir tesis:

- 10.000 ton ürün üretmektedir
- 800.000 kWh enerji tüketmektedir

Enerji yoğunluğunu hesaplayınız.

Cevap

$$EY = \frac{E}{Q}$$

$$EY = \frac{800.000}{10.000} = 80 \text{ kWh/ton}$$

Bu değer üretim verimliliğini gösterir. LCA'da önemli bir göstergedir.

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

Soru 25: Bir tesiste,

- Toplam atık: 1.000 ton
- Geri kazanılan: 650 ton

Geri kazanım oranını hesaplayınız.

Cevap

$$GKO = \frac{A_{geri}}{A_{toplam}} \times 100$$

$$GKO = \frac{650}{1000} \times 100 = 65\%$$

Soru 26: İki senaryo:

	A	B
Toplam karbon (ton)	900	600
Maliyet (TL)	2.000.000	2.400.000

Hangisi seçilmeli?

Cevap

- B çevresel olarak daha iyi
- A ekonomik olarak daha ucuz

LCA yaklaşımı: Uzun vadede **B seçilir**, çünkü çevresel etki daha düşüktür.

Soru 27: Bir sistemde:

- Enerji: 300.000 kWh (0,5 kg CO₂/kWh)
- Plastik: 50 ton (2 ton CO₂/ton)

Toplam karbon ayak izini hesaplayınız.

Cevap

Enerji

$$CF_{enerji} = 300.000 \times 0,5 = 150.000 \text{ kg} = 150 \text{ ton}$$

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

Plastik

$$CF_{plastik} = 50 \times 2 = 100 \text{ ton}$$

Toplam

$$CF_{toplam} = 150 + 100 = 250 \text{ ton CO}_2$$

Soru 28: Bir LCA çalışmasında sonuçlar:

- Enerji: %50
- Plastik: %30
- Su: %20

Hangi müdahale yapılmalı?

Cevap

En büyük etki: **enerji (%50)**

Bu nedenle:

1. Enerji verimliliği artırılmalı
2. Yenilenebilir enerji kullanılmalı
3. Proses optimizasyonu yapılmalı

Soru 29: Kayseri’de faaliyet gösteren bir meyve suyu üretim tesisinde yıllık **20.000 ton ürün** üretilmektedir. Tesis mevcut sistemini döngüsel ekonomi temelli yeni bir sisteme dönüştürmeyi planlamaktadır. LCA yaklaşımıyla mevcut durum ve iyileştirilmiş durum karşılaştırılacaktır. Gıda ürünlerinde LCA; tarımsal girdiler, üretim sürecindeki enerji ve su kullanımı ile atık oluşumunun değerlendirilmesine dayanır.

Fonksiyonel birim

1 ton nihai ürün

Sistem sınırı

Bu problemde yalnızca şu aşamalar dikkate alınacaktır:

- üretimde elektrik tüketimi
- su kullanımı
- ambalaj amaçlı birincil plastik kullanımı
- organik atıkların bertarafı veya geri kazanımı
- plastik atığın bertarafı veya geri dönüşümü

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

Bu yaklaşım, LCA'da hedef ve kapsam belirleme aşamasına uygundur.

Senaryo A: Mevcut Sistem

- Yıllık elektrik tüketimi: **2.400.000 kWh/yıl**
- Yıllık su tüketimi: **30.000 m³/yıl**
- Yıllık birincil plastik kullanımı: **400 ton/yıl**
- Yıllık organik atık oluşumu: **3.000 ton/yıl**
- Bu organik atığın geri kazanılan kısmı: **600 ton/yıl**
- Yıllık plastik atık oluşumu: **80 ton/yıl**
- Bu plastik atığın geri dönüştürülen kısmı: **20 ton/yıl**
- Toplam yıllık atık yönetim maliyeti: **6.000.000 TL/yıl**
- Atıklardan elde edilen yıllık gelir: **400.000 TL/yıl**

Senaryo B: Döngüsel Ekonomi Temelli Sistem

- Yıllık elektrik tüketimi: **1.900.000 kWh/yıl**
- Yıllık su tüketimi: **24.000 m³/yıl**
- Yıllık birincil plastik kullanımı: **280 ton/yıl**
- Yıllık organik atık oluşumu: **3.000 ton/yıl**
- Bu organik atığın geri kazanılan kısmı: **2.400 ton/yıl**
- Yıllık plastik atık oluşumu: **70 ton/yıl**
- Bu plastik atığın geri dönüştürülen kısmı: **56 ton/yıl**
- Toplam yıllık atık yönetim maliyeti: **4.500.000 TL/yıl**
- Atıklardan elde edilen yıllık gelir: **2.200.000 TL/yıl**
- Yeni sisteme geçiş için yatırım tutarı: **8.000.000 TL**

Emisyon faktörleri

- Elektrik: **0,45 kg CO₂-eşd./kWh**
- Su kullanımı: **0,40 kg CO₂-eşd./m³**
- Birincil plastik: **2,80 ton CO₂-eşd./ton plastik**
- Bertaraf edilen organik atık: **0,55 ton CO₂-eşd./ton**

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

- Bertaraf edilen plastik atık: **2,00 ton CO₂-eşd./ton**

İstenenler

1. Her iki senaryo için toplam yıllık karbon ayak izini hesaplayınız.
2. Her iki senaryo için:
 - enerji yoğunluğu
 - su yoğunluğu
 - toplam geri kazanım oranı hesaplayınız.
3. Senaryo B'nin yıllık net ekonomik avantajını bulunuz.
4. ROI ve basit geri ödeme süresini hesaplayınız.
5. LCA mantığıyla yorumlayınız: en kritik iyileştirme hangi aşamadadır?

Cevap

1) Toplam karbon ayak izi hesabı

Burada toplam karbon ayak izi beş bileşenden hesaplanacaktır:

$$CF_{toplam} = CF_{elektrik} + CF_{su} + CF_{birincil\ plastik} + CF_{organik\ bertaraf} + CF_{plastik\ bertaraf}$$

Burada:

- CF_{toplam} : toplam karbon ayak izi
- $CF_{elektrik}$: elektrik tüketiminden kaynaklı emisyon
- CF_{su} : su kullanımından kaynaklı emisyon
- $CF_{birincil\ plastik}$: birincil plastik kullanımından kaynaklı emisyon
- $CF_{organik\ bertaraf}$: geri kazanılmayan organik atığın emisyonu
- $CF_{plastik\ bertaraf}$: geri dönüştürülmeyen plastik atığın emisyonu

Bu tür göstergeler LCA ve döngüsel ekonomi değerlendirmelerinde temel performans ölçütleridir.

1.1 Senaryo A

A) Elektrik kaynaklı emisyon

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

Formül:

$$CF_{elektrik} = E \times EF_{elektrik}$$

Burada:

- E : elektrik tüketimi (kWh/yıl)
- $EF_{elektrik}$: elektrik emisyon faktörü (kg CO₂-eşd./kWh)

Hesap:

$$\begin{aligned} CF_{elektrik,A} &= 2.400.000 \times 0,45 \\ CF_{elektrik,A} &= 1.080.000 \text{ kg CO}_2\text{-eşd./yıl} \\ &= 1.080 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl} \end{aligned}$$

B) Su kullanımı kaynaklı emisyon

Formül:

$$CF_{Su} = W \times EF_{Su}$$

Burada:

- W : su tüketimi (m³/yıl)
- EF_{Su} : su emisyon faktörü (kg CO₂-eşd./m³)

Hesap:

$$\begin{aligned} CF_{Su,A} &= 30.000 \times 0,40 = 12.000 \text{ kg} \\ &= 12 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl} \end{aligned}$$

C) Birincil plastik kaynaklı emisyon

Formül:

$$CF_{birincil plastik} = P_v \times EF_{plastik}$$

Burada:

- P_v : birincil plastik miktarı (ton/yıl)
- $EF_{plastik}$: birincil plastik emisyon faktörü (ton CO₂-eşd./ton)

Hesap:

$$\begin{aligned} CF_{birincil plastik,A} &= 400 \times 2,80 \\ &= 1.120 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl} \end{aligned}$$

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

D) Geri kazanılmayan organik atık kaynaklı emisyon

Önce bertaraf edilen organik atık miktarı bulunur:

$$O_{bertaraf} = O_{toplam} - O_{geri kazanilan}$$
$$O_{bertaraf,A} = 3.000 - 600 = 2.400 \text{ ton/yıl}$$

Şimdi emisyon:

$$CF_{organik bertaraf} = O_{bertaraf} \times EF_{organik}$$
$$CF_{organik bertaraf,A} = 2.400 \times 0,55$$
$$= 1.320 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

E) Geri dönüştürülmeyen plastik atık kaynaklı emisyon

Önce bertaraf edilen plastik miktarı:

$$P_{bertaraf} = P_{atik} - P_{geri donusen}$$
$$P_{bertaraf,A} = 80 - 20 = 60 \text{ ton/yıl}$$

Emisyon:

$$CF_{plastik bertaraf} = P_{bertaraf} \times EF_{plastik bertaraf}$$
$$CF_{plastik bertaraf,A} = 60 \times 2,00$$
$$= 120 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

F) Senaryo A toplam karbon ayak izi

$$CF_{toplam,A} = 1.080 + 12 + 1.120 + 1.320 + 120$$
$$CF_{toplam,A} = 3.652 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

1.2 Senaryo B

A) Elektrik kaynaklı emisyon

$$CF_{elektrik,B} = 1.900.000 \times 0,45 = 855.000 \text{ kg}$$
$$= 855 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

B) Su kaynaklı emisyon

$$CF_{su,B} = 24.000 \times 0,40 = 9.600 \text{ kg}$$
$$= 9,6 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

C) Birincil plastik kaynaklı emisyon

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

$$CF_{\text{birincil plastik},B} = 280 \times 2,80$$
$$= 784 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

D) Geri kazanılmayan organik atık kaynaklı emisyon

$$O_{\text{bertaraf},B} = 3.000 - 2.400 = 600 \text{ ton/yıl}$$
$$CF_{\text{organik bertaraf},B} = 600 \times 0,55 = 330 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

E) Geri dönüştürülmeyen plastik atık kaynaklı emisyon

$$P_{\text{bertaraf},B} = 70 - 56 = 14 \text{ ton/yıl}$$
$$CF_{\text{plastik bertaraf},B} = 14 \times 2,00 = 28 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

F) Senaryo B toplam karbon ayak izi

$$CF_{\text{toplam},B} = 855 + 9,6 + 784 + 330 + 28$$
$$CF_{\text{toplam},B} = 2.006,6 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

1.3 Karbon azaltımı

$$\Delta CF = CF_{\text{toplam},A} - CF_{\text{toplam},B}$$
$$\Delta CF = 3.652 - 2.006,6$$
$$\Delta CF = 1.645,4 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

Bu sonuç, LCA'nın karşılaştırmalı senaryo analizlerinde hangi sistemin daha düşük çevresel etkiye sahip olduğunu belirlemek için kullanıldığı mantıkla uyumludur.

2) Performans göstergeleri

2.1 Enerji yoğunluğu

Formül:

$$EY = \frac{E}{Q}$$

Burada:

- EY : enerji yoğunluğu (kWh/ton ürün)
- E : yıllık enerji tüketimi
- Q : yıllık ürün miktarı

Senaryo A

**NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi**

$$EY_A = \frac{2.400.000}{20.000} = 120 \text{ kWh/ton}$$

Senaryo B

$$EY_B = \frac{1.900.000}{20.000} = 95 \text{ kWh/ton}$$

2.2 Su yoğunluğu

Formül:

$$SY = \frac{W}{Q}$$

Burada:

- SY : su yoğunluğu (m^3/ton ürün)
- W : yıllık su tüketimi
- Q : yıllık ürün miktarı

Senaryo A

$$SY_A = \frac{30.000}{20.000} = 1,5 \text{ m}^3/\text{ton}$$

Senaryo B

$$SY_B = \frac{24.000}{20.000} = 1,2 \text{ m}^3/\text{ton}$$

2.3 Toplam geri kazanım oranı

Toplam geri kazanım oranı:

$$GKO = \frac{A_{geri\ kazanilan}}{A_{toplam}} \times 100$$

Burada:

- $A_{geri\ kazanilan}$: geri kazanılan toplam atık
- A_{toplam} : toplam oluşan atık

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

Toplam atık = organik atık + plastik atık

Senaryo A

$$A_{toplam,A} = 3.000 + 80 = 3.080 \text{ ton/yıl}$$

$$A_{geri kazanilan,A} = 600 + 20 = 620 \text{ ton/yıl}$$

$$GKO_A = \frac{620}{3.080} \times 100$$

$$GKO_A = 20,13\%$$

Senaryo B

$$A_{toplam,B} = 3.000 + 70 = 3.070 \text{ ton/yıl}$$

$$A_{geri kazanilan,B} = 2.400 + 56 = 2.456 \text{ ton/yıl}$$

$$GKO_B = \frac{2.456}{3.070} \times 100$$

$$GKO_B = 80,00\%$$

Enerji verimliliği, su verimliliği ve geri dönüşüm/geri kazanım oranları döngüsel ekonomi performansının ana göstergeleri arasında sayılmaktadır.

3) Yıllık net ekonomik avantaj

Önce yıllık maliyet tasarrufu bulunur:

$$Tasarruf = Maliyet_A - Maliyet_B$$

$$Tasarruf = 6.000.000 - 4.500.000$$

$$Tasarruf = 1.500.000 \text{ TL/yıl}$$

Şimdi gelir artışı bulunur:

$$Gelir artisi = Gelir_B - Gelir_A$$

$$Gelir artisi = 2.200.000 - 400.000$$

$$Gelir artisi = 1.800.000 \text{ TL/yıl}$$

Toplam net ekonomik avantaj:

$$Net ekonomik avantaj = Tasarruf + Gelir artisi$$

$$Net ekonomik avantaj = 1.500.000 + 1.800.000$$

$$Net ekonomik avantaj = 3.300.000 \text{ TL/yıl}$$

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

Atık geri dönüşümü ve geri kazanımı, üretim maliyetlerini düşürmek ve ekonomik katma değer yaratmak açısından önemlidir; ROI de bu tür projelerin değerlendirilmesinde kullanılan temel ekonomik göstergelerden biridir.

4) ROI ve geri ödeme süresi

ROI

$$ROI(\%) = \frac{\text{Yillik net kazanç}}{\text{Toplam yatırım}} \times 100$$

$$ROI = \frac{3.300.000}{8.000.000} \times 100$$

$$ROI = 41,25\%$$

Basit geri ödeme süresi

$$\text{Geri ödeme süresi} = \frac{\text{Toplam yatırım}}{\text{Yillik net kazanç}}$$

$$\text{Geri ödeme süresi} = \frac{8.000.000}{3.300.000}$$

$$\text{Geri ödeme süresi} \approx 2,42 \text{ yıl}$$

Yani yaklaşık **2 yıl 5 ay**.

5) LCA mantığıyla yorum

LCA sonuçları, ürün ya da sürecin yaşam döngüsünde en yüksek çevresel etkinin hangi aşamada oluştuğunu belirlemek ve buna göre iyileştirme stratejileri geliştirmek için yorumlanır.

Şimdi her kalemdeki azalışı bulalım:

Elektrik kaynaklı azalış

$$1.080 - 855 = 225 \text{ ton CO}_2\text{-ésd./yıl}$$

Su kaynaklı azalış

$$12 - 9,6 = 2,4 \text{ ton CO}_2\text{-ésd./yıl}$$

Birincil plastik kaynaklı azalış

$$1.120 - 784 = 336 \text{ ton CO}_2\text{-ésd./yıl}$$

Organik atık bertarafı kaynaklı azalış

**NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi**

$$1.320 - 330 = 990 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

Plastik atık bertarafı kaynaklı azalış

$$120 - 28 = 92 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

En kritik iyileştirme

En büyük azalış:

$$990 \text{ ton CO}_2\text{-eşd./yıl}$$

ile organik atığın geri kazanımı tarafındadır.

Bu neyi gösterir?

Bu tesiste çevresel yükün ana kaynağı, organik atığın bertaraf edilmesidir. Organik atığın biyogaz/kompost gibi yollarla geri kazanılması hem karbon ayak izini düşürmüştür hem de ekonomik gelir üretmiştir. Gıda ürünü LCA örneklerinde de özellikle su tüketimi, enerji kullanımı ve atık oluşumu kritik alanlar olarak vurgulanmaktadır.

İkinci büyük iyileştirme, birincil plastik kullanımının azaltılmasıdır. Bu da ambalaj tasarımı ve malzeme seçiminin optimize edilmesi gerektiğini gösterir. LCA sonuçlarına dayalı iyileştirme stratejileri içinde ürün tasarımı, malzeme seçimi ve geri dönüşüm oranının artırılması özellikle önerilmektedir.

Soru 30: Kapadokya bölgesinde faaliyet gösteren bir otel, artan turist sayısı nedeniyle su tüketimini kontrol edememektedir.

Bu otel için sürdürülebilir su yönetim stratejisi geliştiriniz.

Cevap

Temel yaklaşım: su verimliliği + yeniden kullanım

- gri su geri kazanımı (duş ve lavabolardan)
- damla sulama ile peyzaj sulama
- düşük debili armatürler
- yağmur suyu hasadı

En kritik nokta: kullanım azaltımı + tekrar kullanım birlikte uygulanmalı

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

Soru 31: Bir tekstil fabrikasında enerji maliyetleri artmaktadır. Yönetim sürdürülebilirlik kapsamında çözüm istemektedir.

Hangi enerji dönüşüm stratejileri uygulanmalıdır?

Cevap

- enerji verimliliği (motor, kazan optimizasyonu)
- atık ısı geri kazanımı
- güneş enerjisi entegrasyonu
- proses optimizasyonu

En kritik hamle: önce tüketimi azalt, sonra yenilenebilir ekle

Soru 32: Patates üretiminde aşırı su kullanımı ve kimyasal gübre kullanımı söz konusudur.

Sürdürülebilir tarım modeli öneriniz.

Cevap

- damla sulama sistemi
- organik gübre (biyogaz çıktısı)
- toprak analizine dayalı gübreleme
- rotasyon sistemi

Bu model:

- su tüketimini azaltır
- toprak kalitesini korur

Soru 33: Bir belediyede geri dönüşüm oranı %10 seviyesindedir.

Bunu %50'nin üzerine çıkarmak için nasıl bir sistem kurarsınız?

Cevap

- kaynağında ayrıştırma zorunlu hale getirilmeli
- kapıdan kapıya toplama sistemi
- teşvik sistemi (depozito / puan)
- halk eğitimi

Gerçek cevap: altyapı + davranış değişimi birlikte

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

Soru 34: Kayseri’de aynı bölgede:

- gıda tesisi
- plastik üreticisi
- enerji tesisi

bulunmaktadır.

Sürdürülebilirlik açısından nasıl entegre edilir?

Cevap

- gıda atığı → biyogaz → enerji
- plastik atık → geri dönüşüm → üretime geri
- enerji tesisi → sanayiye enerji sağlar

Bu yapı: **atığı kaynağa çevirir (döngüsel ekonomi)**

Soru 35: Bir fabrikanın karbon ayak izi yüksek çıkmıştır. Yönetim “nereden başlamalıyız?” diye soruyor. Ne önerirsiniz?

Cevap

Öncelik sırası:

1. enerji tüketimi azalt
2. yenilenebilir enerjiye geç
3. atık azalt
4. karbon offset (en son)

En büyük hata: doğrudan offset’e gitmek

Soru 36: Yeraltı su seviyeleri düşmektedir. Bölgesel sürdürülebilirlik için ne yapılmalıdır?

Cevap

- su kullanım kotaları
- tarımda su verimliliği
- arıtılmış suyun yeniden kullanımı
- turizmde su yönetimi

NEVÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Döngüsel Ekonomi ve Atık Yönetimi Dersi

Ana ilke: yeraltı suyu = sınırlı kaynak

Soru 37: Bir gıda firması ambalaj atıklarını azaltmak istiyor. Ne yapmalı?

Cevap

- daha az malzeme kullanımı
- geri dönüştürülebilir ambalaj
- yeniden kullanılabilir ambalaj sistemi

En etkili yöntem: tasarım aşamasında azaltım

Soru 38: Bir sürdürülebilirlik projesi çevresel olarak çok iyi ama pahalı. Nasıl değerlendirilmeli?

Cevap

- ROI hesaplanmalı
- geri ödeme süresi analiz edilmeli
- uzun vadeli maliyetler dikkate alınmalı

Gerçek yaklaşım: kısa vadeli değil, yaşam döngüsü maliyeti

Soru 39: Bir şehir sürdürülebilir olmak istiyor. İlk 3 adım ne olmalı?

Cevap

1. veri toplama (enerji, su, atık)
2. öncelik belirleme (en büyük etki nerede?)
3. pilot projeler başlatma

En büyük hata: Plansız proje başlatmak