

DERLEME MAKALE

Türk Endüstrisi için Temiz Üretim ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Örnekleri

Yazışma yazarı:

Fatoş GERMİRLİ
BABUNA,
germirliba@itu.edu.tr

Referans:

Germirli Babuna, F., Baş, B., Atılgan Türkmen, B., Elginöz Kanat, N. (2023). Türk Endüstrisi için Temiz Üretim ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Örnekleri, Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik, 24, (2) 55-64.

Makale Gönderimi : 17 ŞUBAT 2023
Online Kabul : 25 TEMMUZ 2023
Online Basım : 2 AĞUSTOS 2023

Fatoş GERMİRLİ BABUNA¹, Bilge BAŞ², Burçin ATILGAN TÜRKMEN³, Nilay ELGINÖZ⁴

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.

ORCID:0000-0003-0365-2373

²İstanbul Bilgi Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eyüpsultan, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0002-6273-9527

³Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Gülümbe, Bilecik, Türkiye. ORCID: 0000-0003-3220-3817

⁴IVL - İsveç Çevre Araştırma Enstitüsü, Stokholm, İsveç. ORCID: 0000-0001-6635-6163

Özet Nüfus artışına paralel olarak ivme kazanan endüstriyel faaliyetler, küresel ölçekte çevre kirliliği yaratan odak noktalarının en önemlisidir. Güncel endüstriyel kirlenme kontrolü temiz üretim kavramını benimseyen bir yapıdadır. Temiz üretim ise proseslere, ürünlere ve hizmetlere sürekli uygulanan entegre, önleyici nitelik taşıyan bir çevre stratejisidir. Yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD), endüstriyel faaliyet kaynaklı istenmeyen çevresel etkilerin azaltılması, diğer bir deyişle temiz üretim yönünde doğru adımların atılması için kullanılacak objektif bir araçtır. Kimi durumda kullanılan enerji kaynağının değiştirilmesi, kimi durumda başka bir ülkede üretilerek ithal edilen girdilerin yerli yapım olanlarla değiştirilmesi ya da geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı veya çıkan atıkların geri dönüşüme gönderilmesi çevresel etkilerin azalmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada endüstride temiz üretim seçeneklerinin saptanmasında YDD kullanımına ait örnekler sunulmaktadır. Örneklerin tümü ülkemizde yerinden toplanmış verilerle yürütülen çalışmalara aittir. YDD'de girdi olarak başka coğrafyalar için oluşturulmuş veri tabanlarının kullanımı yerine ülkemize özel verilerin oluşturulmasının önemi vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yaşam döngüsü değerlendirmesi, endüstri, temiz üretim, atık azaltımı.

Cleaner Production and Life Cycle Assessment Examples for Turkish Industry

Abstract Industrial activities accelerated in parallel to population growth, are among the most important sources of environmental pollution on a global basis. Current understanding of industrial pollution control adopts a cleaner production concept. Cleaner production on the other hand, is a continuous, integrated, and preventive environmental strategy that can be applied to production processes, products and services. Life cycle assessment (LCA), is an objective tool that can be used to reduce the unwanted environmental impacts generated from industrial activities. In other words, with the help of LCA, sound steps towards cleaner production can be realized. Environmental impacts can be lowered for some industrial installations by shifting the energy source. In some cases, this can be achieved by substituting an imported input by a locally produced one or using recycled material or sending the wastes to a recycling facility. In this paper, examples of LCA applications to find out industrial cleaner production alternatives are presented. All the examples are obtained from our country with data collected from the actual production sites. The importance of using country specific data instead of data from databases of other geographic areas for LCA studies is emphasized.

Keywords: Life cycle assessment, industry, cleaner production, waste minimization.

1.Giriş

Artan nüfusun taleplerini karşılayabilmek için hız kazanan endüstriyel faaliyetler çevre kirliliğine de önemli katkıda bulunmaktadır.

Tarih boyunca endüstri kaynaklı kirliliğe yaklaşım farklılık göstermiştir. Kirliliğin göz ardı edilmesi ve bunu izleyen dönemlerde çevrede seyrelmenin çözüm olarak ele alındığı pasif yaklaşımlar daha sonra yerlerini boru-sonu arıtımın

öne çıkartıldığı reaktif yaklaşıma bırakmıştır. Çevre problemlerini çözmek yerine öteleyen pasif yaklaşımlar sonucunda hem insan sağlığı hem de çevre üzerinde, gelecek nesillere de yansiyabilecek olumsuz etkiler ortaya çıkmıştır. Reaktif boru-sonu arıtma ise maliyetli bir yaklaşımdır. Bu nedenle kirlenmeyi kaynağında kontrol etme üstüne kurulu, proaktif yani gelecekte karşılaşılabilecek problemleri öngörmeyi esas alan temiz üretim stratejileri geliştirmek zaman, para ve diğer kaynaklardan tasarruf edilmesini sağlayacaktır.

Temiz üretim Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) tarafından toplam verimliliğin artırılması, insan ve çevre üzerindeki risklerin azaltılması amacı ile proseslere, ürünlere ve hizmetlere sürekli uygulanan entegre, önleyici nitelikli bir çevre stratejisi olarak tanımlanmıştır (UNEP, 2017a, 2017b). Temiz üretim endüstriyel bir prosese, bir ürüne ve/veya hizmetlere yansıtılabilir. Temiz üretim ile çevre, üretimde çalışan işçi, tüketici korunurken, verimlilik, kar ve rekabet artırılmaktadır (UNEP, 2017b). Yeşil üretim, atık minimizasyonu, kirlilik önleme, eko-verimlilik gibi farklı isimler de temiz üretim ile örtüşmektedir (UNEP, 2017b). Sonuç olarak temiz üretimle, endüstriyel faaliyetlerin çevre üzerindeki olumsuz etkileri azaltılırken, verimlilik ve mali fayda artırılmış olacaktır. Öte yandan bir ürün veya süreç veya hizmet üzerinde; üretim, kullanım, atık uzaklaştırma aşamalarının tümü veya bazılarını ele alarak yürütülebilen Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) çalışmaları, temiz üretime erişmek için kullanılacak en etkin yöntemlerden biridir. YDD, ürün, süreç veya hizmetin çevre üzerindeki etkilerinin objektif ve bütüncül bir bakış açısı ile kantitatif olarak ortaya konmasını sağlayacak bir metodolojidir.

Yerinde elde edilmiş verilere dayalı şekilde yürütülmüş YDD çalışmaları, özellikle yaşam döngüsü yaklaşımını benimsememiş ya da bu konuda yapılmış yeterli sayıda örneğe sahip olmayan ve dolayısıyla konuya ilişkin bir veri tabanı oluşturamamış, Türkiye gibi ülkeler için önem taşımaktadır. Farklı ülkeler veya ülke toplulukları için geliştirilmiş veri tabanlarının kullanılması sonucu elde edilen bulguların, sınırlı YDD çalışmalarına sahip ülkelere uygulanması yanıltıcı sonuçlara yol açabilir. Bu açıdan enerji örneği konunun daha iyi anlaşılabilmesini sağlayacaktır. Endüstriyel sektörlerin çoğu yoğun enerji kullanımına sahiptir. Diğer bir deyişle enerji, endüstriyel faaliyetler açısından en önemli girdilerden bir tanesidir. Farklı ülkelerde yer alan farklı sektörler YYD ile temiz üretimin açısından değerlendirildiğinde, ancak değerlendirmelerin gerçekleştirildiği ülkeye ait öneriler sunulabilir. Yani, enerji kaynağı olarak şebeke elektriğini kullanan ve İsveç'te yer alan bir demir çelik fabrikasına yönelik yürütülen YDD sonuçlarının temiz üretim açısından irdelenmesi ve bulguların Türkiye'deki bir demir çelik endüstrisine uygulanması, İsveç ve Türkiye'deki şebeke elektriğine katkı veren kaynaklar farklı olduğundan hatalı sonuçlar doğurabilir.

Yüksek etki faktörlü International Journal of Life Cycle Assessment dergisinde yer alan editör yazılarında da, Klöpffer ve Curran (2014) henüz tam olarak YDD düşünce tarzını benimsememiş ülkelerde gerçekleştirilen çalışmaların önemini vurgulamışlardır. Bu açıdan bakıldığında Türkiye için ülkemize özel yerinde toplanan veriler doğrultusunda gerçekleştirilen öncü çalışmalara, yani arka plan verilerine ihtiyaç olduğu sonucuna varılabilir.

Yukarıda sunulan çerçevede, bu çalışma endüstride temiz üretim seçeneklerinin saptanmasında YDD kullanımına ait, tümü Türkiye'de yer alan endüstrilerde yerinde toplanmış verilerle yürütülen çalışmalara ait örnekler sunulmaktadır. YDD'de girdi olarak farklı coğrafyalar için oluşturulmuş veri tabanlarının kullanımı yerine ülkemize özel veriler ışığında değerlendirmelerin gerçekleştirilmesinin önemi de vurgulanmıştır.

2. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD)

YDD seçilen ürün, veya sistemin hammaddelerinin eldesinden başlayarak hammaddelerin işlenmesi, ulaşım, üretim, bakım ve onarım, kullanım ve kullanım sonu değerlendirilmesi ya da bertarafı yaşam döngüsü

basamaklarını kapsayan, uluslararası kabul görmüş sistematik bir çevresel etki değerlendirme yöntemidir (Baumann ve Tillman, 2004). Bu aşamalarda yer alan tüm girdi ve çıktılar kapsamlı envanterleri derlenerek bir arada değerlendirilir ve ürün veya sistemin potansiyel çevresel etkileri hesaplanır (Azapagic, 2010; EPA, 2006).

YDD yönteminin Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) gibi diğer çevresel etki analizi için kullanılan yöntemlere göre başlıca avantajı sadece tesis veya üretim sahası tarafından üretilen emisyon ve atıklara odaklanmak yerine, bir ürün veya sürecin yaşam döngüsündeki tüm çevresel etkileri kapsayacak şekilde belirlenen sistem sınırları için değerlendirme yapmasıdır.

YDD ürün, süreç, tesis, teknoloji ya da hizmet için doğrudan veya dolaylı etkileri ele alır (Azapagic, 1999). YDD planlamacılar ve karar vericilere çevresel etkiler ve maliyetlerle ilgili gerekli değerlendirmeleri yapmalarında yardımcı olmak için uygun bir araçtır (Baumann ve Tillman, 2004).

YDD metodolojisi, Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) tarafından oluşturulan ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarına (ISO, 2006a, 2006b) göre tanımlanmıştır. Bu standart serisine göre YDD, Şekil 1'de verildiği gibi birbirleriyle ilişkili dört basamaktan oluşmaktadır. Bunlar; amaç ve kapsam tanımı, envanter analizi, etki değerlendirme ve sonuçların yorumlanmasıdır (ISO, 2006a).

Bir ürün için gerçekleştirilecek YDD adımları ve değerlendirmede göz önüne alınabilecek süreçler Şekil 2'de verilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi beşikten mezara bir kapsam ele alındığında üretim adımında hammadde, yardımcı maddeler ve enerji eldesi, bunların üretimin gerçekleştirildiği tesise taşınması işlemleri ve üretim yer almaktadır. Kullanım adımında ise kullanım, bakım ve onarım gibi süreçler ele alınmaktadır. Ömür sonu adımında farklı malzemelerin ürün içinde bulunması durumunda parçalara ayırma, atıkların ya da geri dönüştürülebilir malzemelerin arıtım ya da geri dönüşüm tesisine taşınmaları, atık arıtımı ve bertarafı süreçleri incelenmektedir.

Aşağıda, yukarıda sözü edilen YDD adımlarının uygulama sırasına göre tanımları yer almaktadır:

Amaç ve Kapsam Tanımı: İlk aşamada çalışmanın amaç ve kapsamı belirlenmelidir. Amaç, çalışmanın yürütülme nedenleri ve hedef kitle dikkate alınarak tanımlanır. Çalışmanın amacına uygun olarak sistem sınırları belirlenmektedir. Yaşam döngüsü modellemesinde seçilen sistem için belirlenen sınırlar içerisinde oluşan girdi ve çıktı akışları modellenmektedir. YDD çalışmalarında sistem sınırları beşikten kapıya (hammaddeden fabrika kapısına kadar), kapıdan kapıya (sadece üretim süreçlerine odaklanarak) veya beşikten mezara (hammaddeden bertarafı kadar) olarak belirlenebilir. Bu aşamada ayrıca ürünün ya da sistemin işlevini nicelik olarak ölçeklendirmek için bir referans olan fonksiyonel birim tanımlaması yapılır (Baumann ve Tillman, 2004).

Envanter Analizi: Bu aşama, proses akış şemaları oluşturularak incelenen sistemin girdi ve çıktıları için veri toplama ve hesaplama prosedürünü içerir. Girdiler su, enerji ve hammadde iken çıktılar ürünler ve yan ürünler, atıklar ve emisyonlardır. Bu aşamada ayrıca veri kalitesi gereksinimleri belirlenmelidir (Rebitzer vd., 2004).

Etki Değerlendirmesi: YDD'nin üçüncü aşamasını oluşturan bu basamakta envanter değerlendirilmesi sonucunda elde edilen verilerin potansiyel çevre etkileri değerlendirilir (Guinée vd., 2004). İlk olarak çalışma ile ilgili ele alınacak çevresel etki kategorileri seçilip tanımlanır ve sonrasında ise envanter öğeleri ilgili katsayılarla çarpılarak çevresel etkiler hesaplanır (Baumann ve Tillman, 2004). YDD çalışmalarında genel olarak kullanılan çevresel etki kategorileri küresel ısınma potansiyeli (KIP), abiyotik tükenme potansiyeli (ATP fosil, su ve element), asidifikasyon potansiyeli (AP), ötrofikasyon potansiyeli (ÖP), tatlı su canlılarına ekotoksisite potansiyeli (TSEP), deniz canlılarına ekotoksisite potansiyeli (DEP), insan toksisite potansiyeli (İTP), ozon tabakası incelmesi potansiyeli (OTİP), fotokimyasal ozon oluşturma potansiyeli (FOOP), karasal ekotoksisite potansiyeli (KEP), partikül madde, radyoaktif emisyonlar ve arazi kullanım değişikliği şeklinde sıralanabilir.

Sonuçların Yorumlanması: Bu aşamada sonuçlar belirtilen hedef ve kapsama uygun olarak yorumlanır. Çevresel etkilerin en fazla olduğu noktalar belirlenirken iyileştirme alternatifleri değerlendirilir. Elde edilen sonuçların belirsizliği ve doğruluğu da bu adımda ele alınır (Baumann ve Tillman, 2004).

3. Endüstrilerde Temiz Üretim için Yaşam Döngüsü Değerlendirme Uygulamaları

Türkiye'deki farklı endüstriyel sektörler için tesislerden yerinden toplanan veriler doğrultusunda yürütülen YDD uygulamaları ve bunların temiz üretime yansımaları üzerine örnekler aşağıda verilmektedir:

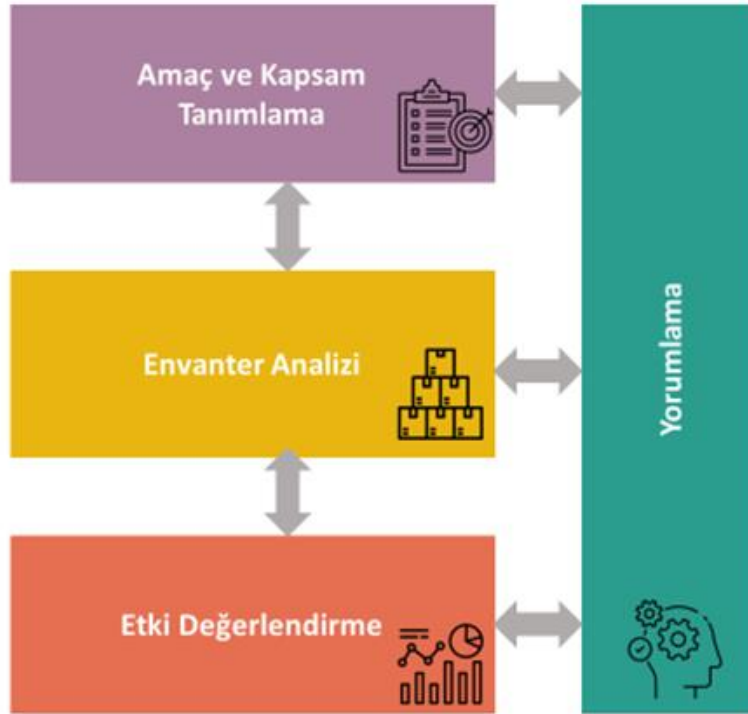
3.1. Baskılı devre kartı üretimi

Baskılı devre kartları tüm elektronik cihazlarda kullanılan ekipmanlardır. Elektronik eşya üreten bir firmanın baskılı devre kartı üretim hatlarından yerinde veri toplanarak oluşturulan çalışmada proseslerin çevresel etkilerinin belirlenmesi ve iyileştirmeler için öneriler getirilmesi amaçlanmıştır. Baskılı devre kartı hattında ele alınan prosesler ve çalışmanın sistem sınırları Şekil 3'te verilmiştir. Fonksiyonel birim olarak 1 m² baskılı devre kartı seçilmiştir. Yapılan çalışmada bakır aşındırma prosesinin, baskılı devre kartı üretiminin çevresel etkilerini en çok etkileyen proses olduğu belirlenmiştir (Ozkan vd., 2017).

Bakır geri dönüşümü için hassasiyeti belirlemek üzere oluşturulan senaryolarda bakır dönüşüm oranının %30'tan %47'ye çıkarılması durumunda tüm çevresel etkilerde %10'dan %103'e kadar değişen çeşitli oranlarda azalma olabileceği görülmüştür (Ozkan vd., 2020).

Bakır geri dönüşümünün yanı sıra taşımanın etkisi de incelenmiş; halihazırda Güney Kore'den ithalata gerçekleştirilen bakır yüzeyli levhanın aynı tesiste üretiminin gerçekleştirilmesi durumunda çevresel etkilerin önemli ölçüde azalacağı belirlenmiştir (Ozkan vd., 2020).

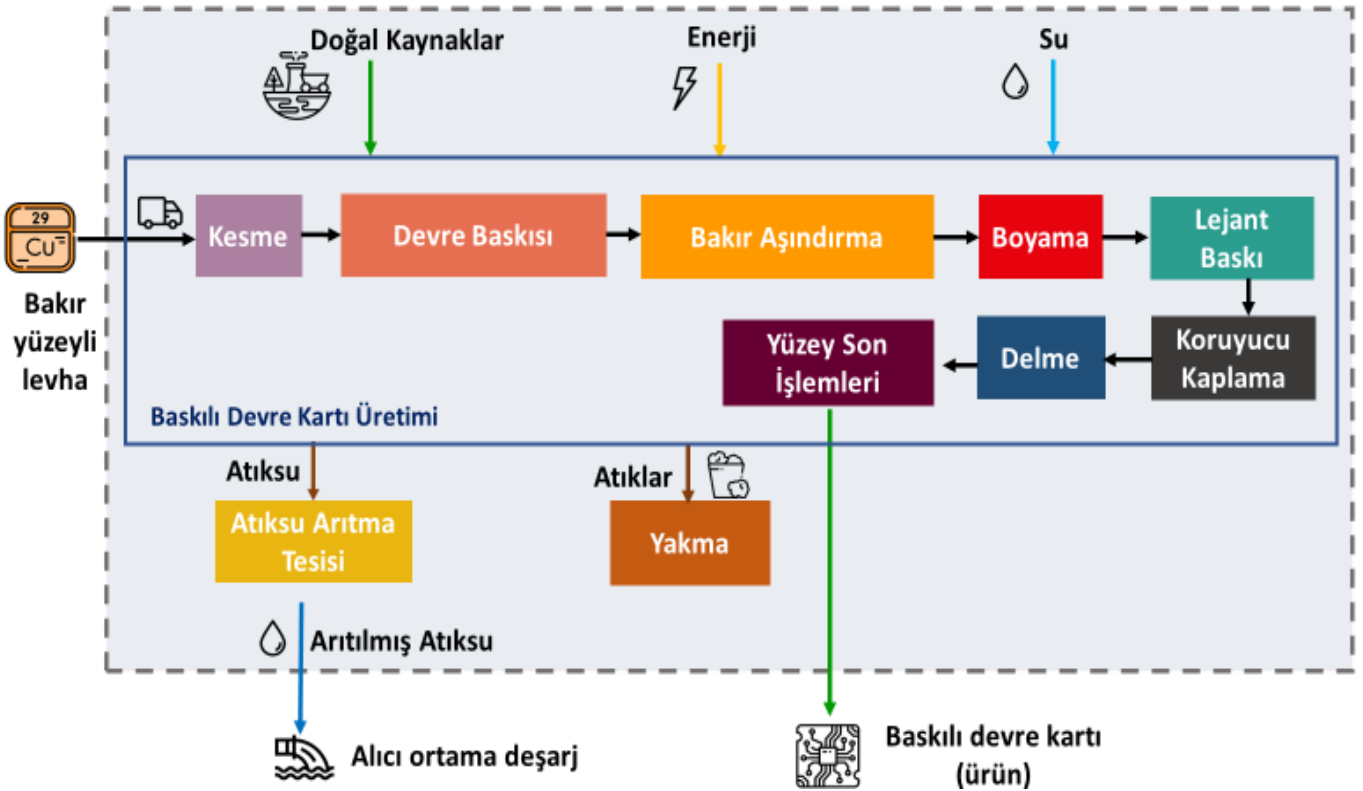
Tesiste kullanılan şehir şebekesi elektriğinin bir rüzgâr türbini ile temin edilmesi olasılığı değerlendirilerek, bu durumda İTP, KIP, ATP-fosil kategorilerinde sırasıyla %56, %39 ve %40 azalma olacağı belirlenmiştir (Ozkan vd., 2020).



Şekil 1. YDD süreci. (ISO 14040, 2006) (Simgeler: www.flaticon.com)



Şekil 2. Bir ürün için YDD adımları. (Simgeler: www.flaticon.com)



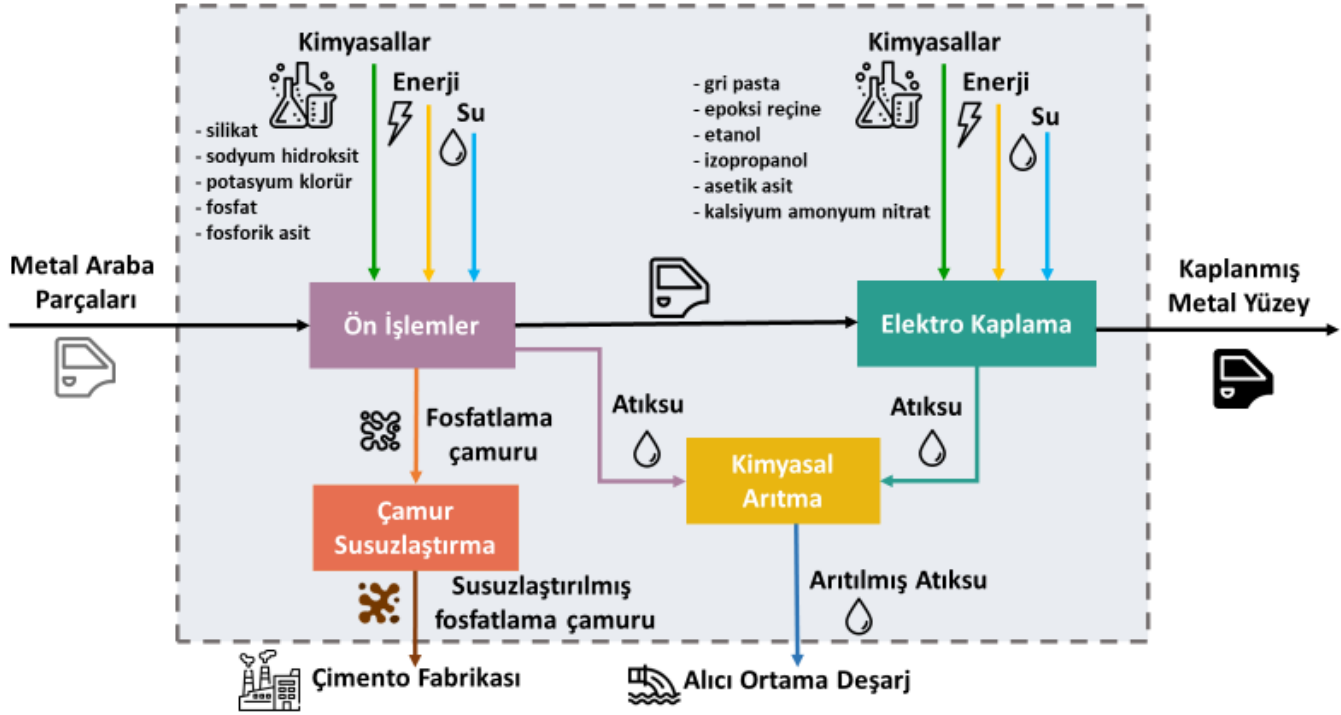
Şekil 3. Baskılı devre kartı üretimi sistem sınırları. (Özkan ve diğ., 2020'den uyarlanmıştır. Simgeler: www.flaticon.com)

3.2. Otomotiv endüstrisi kataforez prosesi

Yılda yaklaşık 6100 kamyon ve otobüs üreten Kocaeli'de kurulu 860 işçi çalışan bir fabrikadan alınan gerçek verilerle otomotiv endüstrisinde en yaygın yüzey kaplama işlemi olan kataforez prosesi üzerinde yürütülen YDD çalışmasına ait sistem sınırları Şekil 4'te verilmektedir.

Tesiste yer alan kataforez prosesinin çevresel etkileri YDD yaklaşımı ile saptanmıştır. Tesiste, otomotiv endüstrisinde kullanılacak metal parçalara uygulanan kataforez işlemi Şekil

4'te de görüldüğü gibi iki adımlı olarak yürütülmektedir. Her iki adımda toplam 10 banyo bulunmaktadır. İlk adım ön işlemler ikinci adım ise elektro kaplamadır (Karacal ve diğ., 2019). Ön işlemler sıcak su ile yıkama, yağ alma, su ile yıkama, yüzey aktifleştirme, fosfatlama, su ile yıkama ve deiyonize su ile yıkama banyolarından oluşmaktadır. Öte yandan elektro kaplama adımında kataforez boyama, ultrafiltre edilmiş su ile yıkama ve deionize su ile yıkama bulunmaktadır. 1 m2 kaplanmış metal yüzey fonksiyonel birim olarak ele alınmıştır (Karacal ve diğ., 2019).



Şekil 4. Otomotiv sanayi kataforez prosesi sistem sınırları (Karacal ve diğ., 2019'dan uyarlanmıştır. Simgeler: www.flaticon.com)

Kataforez prosesinin toplam enerji tüketimi 12,5 kWsa/m² düzeyindedir (Karacal vd., 2019). Elektro depozisyon kaplama ve ultra filtre edilmiş su ile yıkama banyoları ana çevresel etki kaynakları olarak saptanmışlardır. Öte yandan taşıma işlemlerinin çevresel etkileri ihmal edilebilecek düzeydedir. Enerji ihtiyacı tüm incelenen tüm çevresel etkiler için ana kaynak olarak saptanmıştır (Karacal vd., 2019). Halihazırda tesis enerji kaynağı olarak Türkiye şebeke elektriğini kullanmaktadır. Türkiye şebeke elektriği yerine rüzgâr enerjisi, fotovoltaik hücre ve kömür kullanım senaryoları kurularak, söz konusu enerji kaynaklarının çevresel etkiler üzerindeki tesiri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar rüzgâr enerjisinin enerji kaynağı olarak kullanılması durumunda tüm çevresel etkilerde azalma olduğunu göstermiştir (Karacal vd., 2019). Şebeke elektriği yerine güneş enerjisi kullanımı ise İTP hariç diğer tüm çevresel etkileri azaltmıştır (Karacal vd., 2019).

Tesisteki üretim prosesleri için gereken enerji tüketimi, üretimin banyolar vasıtasıyla yürütülmesi nedeniyle, gerçekleştirilen üretim kapasitesinden bağımsız ve sabittir. Tesisin halihazırdaki üretimi, üretim kapasitesinin %32'si düzeyindedir (Karacal vd., 2019). Bu nedenle tesisin tam kapasite ile çalışması yüksek oranda enerji tasarrufuna yol açarak istenmeyen çevresel etkilerin azalmasını sağlayacaktır (Karacal vd., 2019).

Elde edilen bu sonuçlar doğrultusunda tesisin çevresel etkilerinin azaltılması amacıyla tam kapasite çalıştırılması ve enerji kaynağı olarak da rüzgâr enerjisinin kullanımı önerilmiştir (Karacal vd., 2019).

3.3. Su arıtma tesisi

Yaklaşık 2.600.000 kişilik nüfusa hizmet eden, 400.000 m³/gün debili büyük ölçekli bir su arıtma tesisinin inşaa ve işletme aşamaları üzerine yerinden toplanan verilerle yürütülen ve bu açıdan ülkemizde su arıtma tesislerinde gerçekleştirilen ilk YDD çalışmasının bulguları aşağıda özetlenmektedir:

Tesis konvansiyonel bir arıtma teknolojisi içermektedir. Büyükçekmece Gölü'nden çekilen su, ızgaralardan geçirilmekte, ardından bir kaskat vasıtası ile havalandırılmakta, aktif karbon ilave edilmektedir. Daha sonra (alüminyum sülfat ve polielektrolit ilavesi gerçekleştirilen) koagülasyon-flokülasyon ve kum filtrelerinden geçen su klorlanarak dezenfeksiyona tabi tutulmaktadır. Fonksiyonel birim 1 m³ arıtılmış atıksudur (Elginöz vd., 2019).

Tesisin inşaa aşaması ele alındığında KIP, AP, ÖP ve İTP etki kategorilerinde en etkin faktörler beton ve çelik girdileri olarak saptanmıştır (Elginöz vd., 2019). TSEP ve KEP ise esas olarak polivinil klorür boru ve membranlar ile kullanılan beton kaynaklıdır (Elginöz vd., 2019). DEP kaynakları beton, alüminyum ve inşaat çeliğidir. Ulaşım inşaa aşaması çevresel etkileri üzerinde etkili değildir (Elginöz vd., 2019).

İşletme aşamasında bulunan sonuçlara göre bu tesiste 1 m³ arıtılmış su elde edebilmek için 0,57 kWsa enerji gereklidir (Saad vd., 2019). Giriş ve çıkış pompa istasyonları toplam enerji ihtiyacının %85'ini oluşturmaktadır (Saad vd., 2019). Çevresel etkiler ana olarak enerji ihtiyacından kaynaklanmaktadır. Tesisin enerji kaynağı ise şebeke elektriğidir. Şebeke elektriği yerine özellikle rüzgâr enerjisi gibi bir yenilenebilir kaynağın kullanımı tüm etki kategorilerindeki istenmeyen çevresel etkileri düşürecektir. Öte yandan enerji ihtiyacının şebeke elektriği yerine güneşten sağlanması durumunda İTP ve ATP-elementler haricindeki tüm etkiler azalmaktadır (Saad vd., 2019). Gerçekleştirilen hassasiyet analizi sonuçları tesisin işletme aşamasında, halihazırda %60 verim ile çalışan pompaların %90 verimlilikle değiştirilmesi durumunda 0,171 kWsa düzeyinde enerji kullanımından tasarruf edildiğini göstermektedir (Saad vd., 2019). Böylelikle çevresel etkilerde %15 ile %24 düşüş sağlanması mümkündür (Saad vd., 2019). Enerji kaynağının yenilenebilir rüzgâr veya güneş enerjisi ile değiştirilmesi ve pompaların yüksek verimlilikle yenilenmesi çevresel etkileri azaltıcı stratejiler olarak önerilmektedir (Saad vd., 2019).

3.4. Endüstriyel su arıtma sistemleri

Su, pek çok endüstride önemli girdiler arasında yer almaktadır. Tekstil, metal sanayii gibi sektörlerde kullanılan su miktarı oldukça yüksektir. Endüstriler farklı kalitede suya ihtiyaç duyabilmektedir. Bazı endüstri sektörlerinde, aynı tesis içinde musluk suyundan deiyonize suya kadar değişik bir yelpazede kaliteye sahip su ihtiyacı olabilmektedir.

Bir endüstri için kazan suyu hazırlama sistemlerinin çevresel etkilerinin incelendiği çalışmada kuyudan çekilen suyun ters osmoz ve iyon değiştirici sistemlerden geçirilmesi sonucu ortaya çıkan çevresel etkiler değerlendirilerek en az istenmeyen etkiyi yaratacak sistemin hangisi olduğu saptanmıştır. Kuyudan temin edilen ham suyun arıtılmış suya dönüştürülmesi sistem sınırları olarak belirlenmiştir (Yalamacılar vd., 2019).

İyon değiştirici sistemi ters osmoza göre yaklaşık %19 daha az enerji ihtiyacına sahiptir (Yalamacılar vd., 2021). Buna karşın iyon değiştirici kaynaklı istenmeyen çevresel etkiler ters osmoza göre daha yüksek olduğundan ters osmoz ile arıtma sistemi seçilmelidir (Yalamacılar vd., 2021).

Ters osmoz ile arıtmada çevresel etkilerin en önemli kaynağı elektrik tüketimidir. Öte yandan iyon değiştirici ile arıtmada çevresel etkilerin etkinin çoğunluğu kimyasal tüketiminden kaynaklanmaktadır (Yalamacılar vd., 2021).

Enerji kaynağını şebeke elektriğinden rüzgâr enerjisine çevirmek ATP (fosil), İTP, AP, ÖP ve KEP etki kategorilerinde azalmalara neden olmaktadır (Yalamacılar vd., 2021).

İyon değiştirici alternatifinin ATP (fosil) düzeyi kimyasal girdisi nedeni ile, ters osmoza göre %68 daha fazladır (Yalamacılar vd., 2021). İyon değiştirici rejenerasyonu esnasında ihtiyaç duyulan kimyasallar iyon değiştirici kaynaklı AP'nin ters osmoza göre %66 daha yüksektir (Yalamacılar vd., 2021). Benzer şekilde iyon değiştirici alternatifinde kullanılan NaOH ve HCl, ÖP değerinin ters osmoza göre %79 daha yüksek çıkmasına neden olmaktadır (Yalamacılar vd., 2021).

Ters osmoz sisteminde elektrik ve kimyasal tüketimi KIP üzerinde eş düzeyde etkinken, iyon değiştiricide kimyasal girdisi önem kazanmaktadır (Yalamacılar vd., 2021). İyon değiştirici sisteminin KIP'i, ters osmoza göre %68 yüksektir (Yalamacılar vd., 2021). Seçeneklerin İTP değerleri karşılaştırıldığında iyon değiştiricinin %64 daha fazla etki yaptığı saptanmıştır (Yalamacılar vd., 2021). OTTP üzerinde ise NaOH girdisi etkindir. İyon değiştiricinin OTTP değeri ters osmoza göre %86 daha yüksektir (Yalamacılar vd., 2021).

İyon değiştirici sistemine ait KEP ve TSEP değerleri de ters osmoza göre %78 daha yüksektir (Yalamacılar vd., 2021).

3.5. Rüzgâr santralleri tarlası

Bazı endüstri sektörlerinde istenmeyen çevresel etkilerin kaynağı enerji tüketimidir. Bu nedenle şebeke elektriği yerine güneş, rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile çevresel etkiler azaltılabilmektedir. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının da çevresel etkilere sahip olabileceği

unutulmamalıdır. Tüm diğer sanayi tesisleri gibi enerji üreten kuruluşların kurulum, işletme ve ömür sonu aşamalarından çevresel etkiler kaynaklanmaktadır.

Toplam 47,5 MW kurulu kapasiteye sahip, 2,5 MW Nordex türbinlerinden oluşan tam ölçekli bir rüzgâr tarlasından elde edilen gerçek veriler üzerinde yürütülen YDD çalışması yenilenebilir enerji sistemlerinin çevresel etkilerinin belirlenmesine dair bir örnek olup sonuçları aşağıda verilmektedir (Ozsahin vd., 2022).

Söz konusu çalışmada 1 kWh elektrik üretimi fonksiyonel birim olarak kullanılmıştır. Çalışmada malzeme üretimi, ana parçaların üretimi, kurulum, nakliye, işletme-bakım ve yaşam sonu aşamaları sistem sınırları olarak kapsamaktadır (Şekil 5) (Ozsahin vd., 2022).

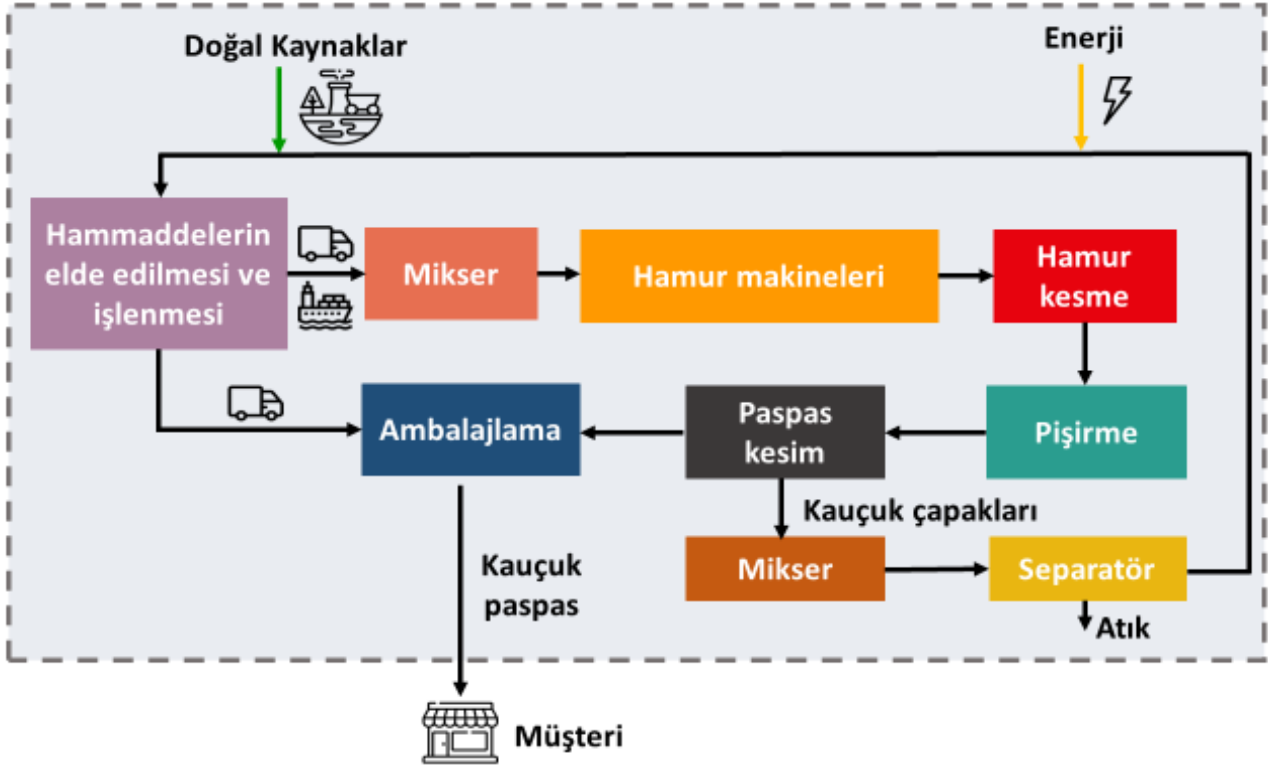
Tüm yaşam döngüsü ele alındığında çevresel etkilerin ana kaynağının üretim ve kurulum adımı olduğu ortaya çıkmaktadır (Ozsahin vd., 2022). Kule üretiminde kullanılan çelik, ATP (fosil), AP, ÖP, KIP ve DEP kategorilerine en yüksek katkıyı yapmaktadır (Ozsahin vd., 2022).

Metal geri dönüşümü nedeniyle, ömür sonu aşaması OTİP hariç tüm kategorilerde azalma sağlamaktadır. Metal geri dönüşümünün %90'dan %20'ye düşürülmesi AP'nin %110, KEP'in %102, DEP'in %92 ve KIP'nin %87 oranında artmasına neden olacaktır (Ozsahin vd., 2022).

Çalışmadaki rüzgâr tarlasındaki ana parçalar Almanya'da üretilmekte ve ardından deniz yolu ile ülkemize taşınmaktadır. Bunun yerine ana parça üretiminin Türkiye'de gerçekleştirilmesi ve parçaların kara yolu ile tarlaya taşınması sonucunda, nakliye değişikliği nedeniyle ATP (fosil) %31, TSEP %35 ve KIP %27 artarken, AP'de %11 ve ÖP'de ise %4 düzeyinde azalma olacağı saptanmıştır (Ozsahin vd., 2022).

3.6. Endüstriyel kimyasal seçiminde YDD

Temiz üretim, atıkları kaynaktan önlemeye dayalı, tesis-içi kirlenme kontrolü yaklaşımına öncelik veren bir yöntem olduğundan üretim sırasında aynı görevi yapabilecek farklı girdiler arasında çevre açısından uygun olanı seçmeyi de gerektirir. YDD metodolojisi endüstride birbirleri yerine kullanılacak kimyasalların hangisinin istenmeyen çevresel etkilerinin daha az olduğunun belirlenmesinde, diğer bir deyişle daha çevre dostu kimyasal seçiminde de net bilgiler elde edilmesini sağlayabilmektedir. Buna örnek olarak geniş kullanım alanına sahip, birbirini ikame edebilecek iki metal yüzey kaplama kimyasalının çevresel sürdürülebilirliğinin karşılaştırıldığı çalışma (Sezginer vd., 2022) verilebilir. Çalışmada formülasyonları değişik iki çinko fosfatlama kimyasalı (Ürün A ve Ürün B) üretimi için çevresel etkiler karşılaştırılmıştır. Fonksiyonel birim 1000 kg ürün olarak tanımlanmıştır. Sistem sınırları ise hammadde eldesinden ürünlerin paketlenerek fabrikadan çıkışına kadar işlemlerle beraber tüm ulaşım basamaklarını kapsamaktadır. Veriler Kocaeli'nde üretim yapmakta olan bir fabrikadan 2019 yılı temel alınarak sağlanmıştır. Çalışmada modelleme için GaBi 7.3 yazılımı (Sphera, 2017) ve Ecoinvent veritabanı (Ecoinvent, 2013) kullanılmıştır. Çevresel etkiler CML 2 (Guinee vd., 2001) etki değerlendirme yöntemi ile hesaplanmıştır (Sezginer vd., 2022).



Şekil 6. Araba paspası üretimi sistem sınırları (Örücü ve Atılan Türkmen, 2022'den uyarlanmıştır. Simgeler: www.flaticon.com)

4. Sonuç ve Değerlendirme

Endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan çevresel etkilerin objektif ve bütünlük bir sistematik izlenerek YDD metodolojisi ile ortaya koyulması temiz üretime ulaşılması açısından önemli ipuçları vermektedir. Yukarıda özetlenen çalışmalarda da sözü edildiği gibi YDD yöntemi kullanılarak bir üretim sisteminin çevresel etkileri, çevresel etkilerin oluşmasında en etkin üretim prosesleri (sıcak noktalar), bu etkilerin azaltılması için uygulanabilecek işlemler belirlenebilmektedir. Bu açıdan yaklaşıldığında enerji kullanımının yoğun olduğu endüstrilerde şebeke elektriği yerine örneğin rüzgâr enerjisinin kullanımı ile çevresel etkiler indirilebilmektedir. Öte yandan YDD aynı fonksiyona sahip iki farklı girdi arasında seçim yapmayı da kolaylaştırır. Örneğin bazı durumlarda üretim aşamasında daha fazla çevresel etkiler yaratan bir ürün kullanım ve ömür sonu adımları da ele alındığında muadili olan ve üretim esnasında daha az çevresel etki yaratan üründen daha çevreye duyarlı olabilmektedir.

Ele alınan bu sonuçlar endüstriyel ürünlerle ilgili Çevresel Ürün Beyanı hazırlamalarında da kullanılabilir.

YDD çalışmaları hazırlanırken temel olarak endüstrilerden toplanan 'birincil veriler' kullanılmakta, sahadan toplanamayan 'arka plan' verileri ise bu çalışmada örneklendirilen çalışmalarda da görüldüğü üzere YDD çalışmalarında kullanılmak üzere hazırlanan veri tabanlarından temin edilmektedir. Çevresel etkiler, her tesisin bulunduğu bölgedeki teknoloji olanakları, hammaddeler, diğer girdiler vb. birçok özelliğe göre değişmektedir. Söz konusu arka plan verileri ülke ve bölge (örneğin Avrupa) ortalama değerleri olarak verilmektedir. Bu sayede veri tabanını kullanılırken çalışmanın yer aldığı bölgedeki veriler seçilerek sonuçların doğruluğunun mümkün olduğunca yüksek olması sağlanmaktadır. Bu çerçevede özellikle henüz yaşam döngüsü bakış açısını tam olarak benimsememiş ülkelerde bu amaçla kullanılacak ulusal veri tabanlarının oluşturulması gerekli ve değerlidir.

Çeşitli endüstrilerde yerinden toplanmış veriler ile gerçekleştirilen YDD modelleme çıktıları özellikle ülkemiz gibi bir YDD veri tabanına sahip olmayan coğrafyalar için ayrıca değerlidir. Ülkemizde ulusal bir YDD veri tabanının oluşturulmasına yönelik çalışmalar belirlenen bazı sektörler doğrultusunda yürütülmekte olup (URL-1), buna yönelik sektörel ve akademik iş birliklerinin yoğunlaştırılması önerilmektedir.

Makale araştırma ve yayını etğine uygun olarak hazırlanmıştır. Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

5. Kaynaklar

- Azapagic, A. (1999). Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation. *Chemical Engineering Journal*, 73(1), 1-21. [https://doi.org/10.1016/s1385-8947\(99\)00042-x](https://doi.org/10.1016/s1385-8947(99)00042-x).
- Azapagic, A. (2010). Life cycle assessment as a tool for sustainable management of ecosystem services. In *Ecosystem Services* (Vol. 30, pp. 140-168). The Royal Society of Chemistry. <http://dx.doi.org/10.1039/9781849731058-00140>
- Baumann, H., & Tillman, A.-M. (2004). *The Hitch Hiker's Guide to LCA: An Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Application*. Studentlitteratur AB.
- Ecoinvent. (2013). Ecoinvent Database v3.1.
- Elginöz, N., M. Alzaboot, F. Germirli Babuna, G. Iskender (2019), "Construction of a large water treatment plant: appraisal of environmental hotspots", *Desalination and Water Treatment*, Volume 172, pp 309–315, <https://doi:10.5004/dwt.2019.25107>
- EPA. (2006). *Life Cycle Assessment: Principles and Practice* (Washington, DC, Issue).

- Guinée, J. B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppés, G., Kleijn, R., Koning, A. d., Oers, L. v., Sleeswijk, A. W., Suh, S., Haes, H. A. U. d., Bruijn, H. d., Duin, R. v., Huijbregts, M. A. J., Lindeijer, E., Roorda, A. A. H., Ven, B. L. v. d., & Weidema, B. P. (2004). Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards. Kluwer Academic Publishers.
- Guinee, J. B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppés, G., Kleijn, G.R., van Oers, R.L., Wegener, L., Sleeswijk, A., Suh, S., de Haes, H.A. Udo, de Bruijn, H., van Duin, H.R., Huijbregts, M. A.J. (2001). Life Cycle Assessment, an Operational Guide to the ISO Standards. Part 2a: Guide. In. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- ISO. (2006a). Life Cycle Assessment - Principles and Framework.
- ISO. (2006b). Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines.
- Karacal, P.N., N. Elginöz, F. Germirli Babuna (2019). "Environmental Burdens of Cataphoresis Process", Desalination and Water Treatment, Volume 172, pp. 301–308, December, doi: <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24800>.
- Klöpffer, W., & Curran, M. A. (2014). How many case studies should we publish, if any? The International Journal of Life Cycle Assessment, 19(1), 1-2. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0667-0>.
- Örücü, E., ve Atilgan Türkmen, B. (2022). Evaluating the sustainability of car mat manufacturing. Sustainable Materials and Technologies, 32, e00402. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2022.e00402>
- Özkan, E., B. Bas, N. Elginöz, F. Germirli Babuna (2020), Environmental sensitivity of printed circuit board manufacturing to Cu recycling rate, transportation and various energy sources, International Journal of Global Warming, Vol. 20 No. 3, pp. 237 – 248, <https://doi.org/10.1504/IJGW.2020.106596>.
- Özkan, E., N. Elginöz, F. Germirli Babuna (2017). Life cycle assessment of a printed circuit board manufacturing plant in Turkey. Environmental Science and Pollution Research, <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0280-z>.
- Özsahin, B., N. Elginöz, F. Germirli Babuna (2022). Life cycle assessment of a wind farm in Turkey. Environ Sci Pollut Res 29, 71000–71013. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20783-0>.
- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W. P., Suh, S., Weidema, B. P., & Pennington, D. W. (2004). Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. Environment International, 30(5), 701-720. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005>.
- Saad, A., N. Elginöz, F. Germirli Babuna, G. Iskender (2019), "Life cycle assessment of a large water treatment plant in Turkey", Environmental Science and Pollution Research, May 2019, Volume 26, Issue 15, pp 14823–14834, <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3826-9>.
- Sezginer, I., Atilgan Turkmen, B., & Germirli Babuna, F. (2022). Environmental impacts arising from the production of two surface coating formulations. Clean Technologies and Environmental Policy, 24(6), 1811-1822. <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02288-z>.
- Sphera. (2017). GaBi V7.3 software and database.
- UNEP (2017a), Environmental agreements and cleaner production, Rapor, 21 sayfa, ISBN: 92-807-2717-6.
- UNEP (2017b) Cleaner Production Assessment in Dairy Processing, Prepared by COWI Consulting Engineers and Planners AS, Denmark, United Nations Environment Programme, Division of Technology, Industry and Economics and Danish Environmental Protection Agency, Rapor, 95 sayfa.
- Yalamacılar, B.B., N. Elginöz, F. Germirli Babuna (2021), "Benchmarking industrial water purification systems with the aid of life cycle assessment", Desalination and Water Treatment, Vol.211, 422–431, <http://dx.doi.org/10.5004/dwt.2021.26574>.
- URL 1- https://www.temizuretimmerkezi.org/aktif-projelerimiz/ulusal-yasam-dongusu-degerlendirmesi-veri-tabaninin-gelistirilmesi-projesi_26

