

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Öne Çıkan Sonuçlar:

- Ters osmoz ünitesinin çevresel yükteki payı diğerlerinden yüksektir. Bu üniteyi, ultrafiltrasyon, kimyasal arıtma ve biyolojik arıtma üniteleri takip etmektedir.
- Tesisin çevresel yükünü oluşturan iki temel faktör, elektrik enerjisi ve kimyasal madde tüketimidir.
- Nehir suyu kalitesinin en düşük olduğu zamanlarda ters osmoz, ultrafiltrasyon ve kimyasal arıtma ünitelerinin çevresel yükü %100, biyolojik arıtma ünitelerinin çevresel yükü %50 artmaktadır.

Yazışma yazarı:

Güray SALİHOĞLU,
gurays@uludag.edu.tr,
Tel: 0-224-2942120

Referans:

SALİHOĞLU, G., ÇAKIR, Z., SALİHOĞLU, N.K., (2018), Arıtma Tesislerinde Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi: Bursa Organize Sanayi Bölgesi Su Üretim Tesisi Örneği, İklim Değişikliği ve Çevre, 3, (2) 64–78,

Makale Gönderimi : 28 AĞUSTOS 2018
Online Kabul : 21 EYLÜL 2018
Online Basım : 10 EKİM 2018

Arıtma Tesislerinde Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi:

Bursa Organize Sanayi Bölgesi Su Üretim Tesisi Örneği

Güray SALİHOĞLU^{1*}, Zeynep ÇAKIR², Nezih Kamil SALİHOĞLU¹

¹ Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa, Türkiye

² Çevre Yüksek Mühendisi, Bursa Organize Sanayi Bölge Müdürlüğü, Bursa, Türkiye

Özet Bu çalışmada Bursa Organize Sanayi Bölgesi'nde (BOSB) yer alan işletmelerin proses suyu ihtiyacını karşılayan su üretim tesisinin çevresel yükünün belirlenebilmesi için yaşam döngüsü değerlendirme yöntemi uygulanmıştır. Su üretim tesisinde, Nilüfer deresi suları konvansiyonel ve ileri arıtma sistemleri ile proses suyu haline dönüştürülmektedir. Sistem sınırları beşikten kapiya olarak belirlenen yaşam döngüsü değerlendirmesinde, envanter analizinde tesis iç raporlarındaki veriler, SimaPro 8 yazılımı ve ReCiPe etki analizi metodu kullanılmıştır. Fonksiyonel birim olarak 1m³ proses suyu seçilmiştir. Tesisi oluşturan tüm alt sistemlerin iklim değişikliği, stratosferik ozon tabakasındaki incelmeye, ötrofikasyon, asidifikasyon, toksik emisyonlar gibi çevresel unsurlar üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda su üretim tesisinin ileri arıtma sisteminde yer alan ters osmoz ünitelerinin, tesisteki üniteler içerisinde en yüksek çevresel yüke sahip olan üniteler oldukları belirlenmiştir. Bunun temel nedeni, bu üniteler işletilirken ortaya çıkan yüksek orandaki elektrik tüketimidir. Çevresel yük oluşturan unsurlar sıralamasında ikinci sırayı ise tesiste kullanılan kimyasal maddeler almaktadır.

Anahtar Kelimeler: İklim değişikliği, İleri arıtma, Proses suyu, SimaPro 8

Life Cycle Assessment Of Wastewater Treatment Plant:

Bursa Organized Industrial District Water Treatment Plant Case Study

Abstract Environmental load of the water treatment plant, which meets the process water needs of the facilities in Bursa Organized Industrial District, were determined by applying life cycle assessment (LCA) as a tool. Water from the Nilüfer River is treated to prepare process water with conventional and advanced treatment methods at the water treatment plant. The data from the interior facility reports were used in the inventory analysis of LCA, where the system boundaries were selected as cradle to door. SimaPro 8 software and ReCiPe impact category analysis method were used. The functional unit was defined as 1m³ process water. The impacts of all the sub-systems of the treatment plant on environmental categories such as climate change, depletion of stratospheric ozone layer, eutrophication, acidification, and toxic emissions etc. were determined. The findings of the study suggested that reverse osmosis units bring the largest environmental burden compared to the other units within the plant. The main reason behind this result is the large consumption of electricity during the operation of reverse osmosis units. Chemical substances were found to be in the second order in terms of environmental burden.

Keywords: Climate change, Advanced treatment, Process water, SimaPro 8

1. Giriş

Yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD), ürünlerin, entegre sistemlerin ve hizmetlerin çevreye olan etkilerini, süreçlerin girdi ve çıktılarını çevresel yük açısından tanımlayan sistematik ve analitik bir yöntemdir. Söz konusu çevresel etkiler iklim değişikliği, stratosferik ozon tabakasındaki incelleme, ötrofikasyon, asidifikasyon, toksik emisyonlar gibi doğal kaynak tüketimi kategorilerinde değerlendirilmektedir. YDD yardımıyla detaylı çıkarımlar yapılabilmekte, tüm girdi ve çıktılar çevresel ve ekonomik açıdan yorumlanabilmekte ve çevreye daha az zararlı ve daha ekonomik ikame girdiler denkleme dâhil edilebilmektedir. Analize konu olan girdilerin çevresel etkilerinin araştırılması aşamasında, hammadde çıkarımı, lojistik, ana-yan üretimler, hizmetler, kullanım, atık, bertaraf, geri dönüşüm vs. tüm süreçler sisteme dâhil edilebilmektedir. YDD çalışmaları hedef ve kapsamın belirlenmesi, envanter analizi, etki analizi ve yorumlama olmak üzere birbiriyle ilgili dört basamaktan oluşmaktadır.

Bilimsel literatürde arıtma tesislerine YDD'nin uygulandığı sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Rodriguez ve diğ. (2016) İspanya'da bir farmasötik endüstrisinden kaynaklanan atıksuların arıtılmasında kullanılan fenton süreçlerini YDD yöntemiyle değerlendirmiştir. Bu çalışmada potansiyel çevresel etkiler, ReCiPe sürüm 1.06 ve ICCP 2007 yöntemlerini kullanarak Gabi 6.0 yazılımı ile hesaplanmıştır. Üretilen çamurun geri kazanım sürecinin, kimyasalların ve ısı gereksinimlerinin, süreçte çevresel etkilere en çok katkıda bulunan adım olduğunu rapor etmişlerdir. Pintilie ve diğ. (2016), İspanya'daki bir kentsel atıksu arıtma tesisine YDD yöntemini uygulamıştır. 150.00 eşdeğer nüfusa hizmet eden atıksu arıtma tesisinde arıtılan atıksuyun klasik arıtmadan sonra deşarjı veya üçüncül arıtma ile arıtılarak sanayide tekrar kullanımının çevresel etkileri karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar, klasik arıtmadan çıkan suyun üçüncü kademedan sonra arıtılarak endüstriyel kullanıma sunulması durumunun çevresel açıdan daha uygun olacağını göstermişlerdir (Pintilie ve diğ., 2016). Zang ve diğ. (2015) aktif çamur sistemi biyolojik arıtma üniteleri için uygulanacak YDD çalışmalarında en önemli etki kategorilerinin ötrofikasyon potansiyeli, küresel ısınma potansiyeli, toksisiteye bağlı etkiler, enerji dengesi, su kullanımı gibi çevresel etki kategorileri olduğunu belirtmiştir.

Garfi ve diğ. (2016) Barselona'da (İspanya) içme suyu tüketiminin neden olduğu çevresel etkileri YDD yöntemi ile değerlendirmiştir. Çalışmada beş farklı senaryo karşılaştırılmıştır:

a. Konvansiyonel arıtma yöntemi ile musluk suyu üretimi, b. Ters ozmos sistemi bulunan içme suyu arıtma tesisinde musluk suyu üretimi, c. Evsel ters ozmos sistemi ile musluk suyu üretimi,

d. Plastik şişelerde maden suyu, e. Cam şişelerde maden suyu. Fonksiyonel birim 1 m³ su seçilmiş olup YDD çalışması, SimaPro® yazılımı ile CML 2 temel metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar; musluk suyu tüketiminin çevreye etkilerinin az olmasından dolayı en uygun alternatif olduğunu, şişelenmiş suyun özellikle cam şişelerde şişe üretimi için gerekli olan daha yüksek hammadde ve enerji girdileri nedeniyle musluk suyu üretimine göre kötü çevresel sonuçlar sunduğunu göstermiştir. Rodriguez ve diğ. (2016), Kuzeydoğu Kolombiya'da bulunan dört içme suyu arıtma tesisinin çevresel yüklerini saptayabilmek için YDD metodolojisini uygulamışlardır. İçme suyu işleminin farklı aşamaları toplama noktasından pompalama yoluyla dağıtım şebekesine kadar kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Fonksiyonel birim, tesiste üretilen 1 m³ içme suyu olarak tanımlanmıştır. Veriler Ecoinvent v.3.01 veri tabanında analiz edilmiş ve YDD-Data Manager yazılımında modellenip işlenmiştir. Sonuçlar; iki tesiste flokülasyon prosesinin en yüksek çevre yüküne sahip olduğunu göstermiştir ve bu çevresel yükün koagülant kimyasalından kaynaklandığı düşünülmektedir. Diğer iki tesiste ise en büyük etki kaynağı elektrik enerjisi olarak tespit edilmiştir.

Tarnacki ve diğ. (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, enerji ihtiyacı oldukça yüksek olan iki farklı tuzdan arındırma teknolojisi YDD ile karşılaştırılmıştır. İncelenen teknolojiler ters ozmos ve elektrik enerjisi talebinin termal enerji kaynağı kullanılarak azaltılması ve kimyasalların kullanılması ile yeni geliştirilen teknoloji Memstill'dir. Sonuçlar, enerji talebinin tüm uygulanan çevresel etki değerlendirme yöntemlerinde hâkim etkisini göstermektedir. Nakliye, malzeme ve hatta kimyasal madde kullanımı toplam puan üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olduğu bu çalışmada ortaya konmuştur. Sharaai ve diğ. (2010) tarafından Malezya'da gerçekleştirilen bir çalışmada, içme suyu temini projelerinin hem inşaat hem de işletme aşamalarındaki çevresel etkiler, beşikten mezara sınırları ve Eco-Indicator 99 etki analiz yöntemi ile ortaya konmuştur. Bu projelerin inşaat aşamalarında çimento, çelik ve beton gibi yapı malzemelerine, içme suyu üretimi için ise alum, PAC, klor ve kireç gibi kimyasal bileşikler kullanılmaktadır. Üretim aşaması ile inşaat aşaması arasındaki karşılaştırma sonucunda, üretim aşamasının daha yüksek çevresel etkiye neden olduğu görülmüştür. İçme suyu üretiminde pıhtılaştırıcı olarak kullanılan PAC'ın

ekosistem kalitesine ve insan sağlığına zarar verdiği belirlenmiştir. Benzer şekilde yapı malzemesi olan çimento ve çelik malzemelerinin çevre kalitesinin bozulmasına ve insan sağlığına zarar vermesine sebep olduğu saptanmıştır.

Vince ve diğ. (2008) içme suyu üretiminde kullanılan alternatif (gelişmiş membran ve tuzdan arındırma teknolojileri) ve konvansiyonel su arıtma süreçlerini YDD metodu ile nesnel olarak karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda, tesis işletimi için ihtiyaç duyulan elektrik enerjisinin üretimi, çevresel etkilerin temel kaynağı olarak belirlenmiştir. Koagülasyon ve remineralizasyon için kimyasal üretim ve kullanımının, çevresel yüke ikinci büyük katkısı sağladığı belirlenmiştir. İçme suyu pompalama ve dağıtımının yüksek elektrik tüketimi nedeniyle, tesis etkilerinin toplam yüküne yüksek katkıda bulunduğu görülmüştür. Alternatif su kaynaklarına (gelişmiş membran ve tuzdan arındırma teknolojisi) yönelik arıtma işlemlerinin konvansiyonel yeraltı suyu ve yüzey suyu arıtma proseslerine göre daha yüksek kimyasal ve enerji tüketimine sahip olduğu ortaya konmuştur. Ioannou-Ttofa ve diğ. (2016) bir membran biyoreaktörün YDD metodolojisi ile çevresel analizini gerçekleştirmiştir. Çalışmada fonksiyonel birim olarak 1 m³ kentsel atıksu seçilmiştir. Membran biyoreaktör pilot ünitesinin çevresel anlamda kritik noktaları, enerji talebi ve membran ünitelerinin malzemesi olarak belirlenmiştir.

Ortiz ve diğ. (2007) atıksu arıtma tesisi (13.200 nüfus eşdeğeri için tasarlanmış konvansiyonel aktif çamur sistemi) ve arıtılmış suların tekrar kullanılmasına izin verilen bazı üçüncül arıtma sistemlerinin (Ultrafiltrasyon ve Membran Biyolojik Reaktörler-MBR) YDD tekniği ile çevresel analizini gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda üçüncül arıtmanın çevresel yükleri önemli ölçüde arttırmadığı, arıtılmış su için yeni kullanım alanları sağladığı rapor edilmiştir (Ortiz ve diğ. 2007). Ribera ve diğ. (2014) araştırmalarında içme suyu arıtma tesislerinde nanofiltrasyon sistemi ile filtrelenecek su yüzdesini seçmek için YDD ve insan sağlığı riski değerlendirmesi kullanan kombine bir metodoloji kullanmışlardır. Araştırma sonuçlarına göre; nanofiltrasyon(NF) prosesinin dahil edilmesi, içme suyu kalitesini iyileştirmekte, insan sağlığı risk kategorisindeki etkileri azaltmakta; bununla birlikte, enerji ve malzeme talebinin bir sonucu olarak çevresel etkileri arttırmaktadır. İçme suyunun % 43'ünün üretimi için tesise NF sisteminin dahil edilmesi, elektrik üretimi ile ciddi biçimde ilişkili olan kategorilerde çevresel etkinin konvansiyonel tesis ile karşılaştırıldığında neredeyse iki katına çıktığı görülmektedir. Öte yandan, trihalometan oluşum potansiyeline bağlı kanserojen riski, NF yüzdesi kullanımındaki artışla birlikte azalmaktadır. Sonuçlar, içme suyunun % 100'ü NF tarafından üretildiğinde kanserojen risk endeksi için bir azalma olduğunu göstermektedir.

Therogowda ve diğ. (2014), ikinci kademeye kadar arıtılmış kentsel atıksuların termo-elektrik güç santrallerinin soğutma sistemlerinde yeniden kullanılabilmesi için uygulanabilecek üçüncü kademe arıtma alternatiflerini değerlendirmek ve karşılaştırmak için YDD uygulanmıştır. Proses bazlı analiz girdileri içerisinde, üçüncü kademe arıtma sırasında ve sonrasında ilave edilen kimyasal madde dozları, kimyasal maddelerin üreticiden arıtma tesisine yaklaşık taşıma mesafesi ve arıtma esnasındaki temel ekipmanı çalıştırabilmek için enerji üretimi bulunmaktadır. Çevresel etki analizi, üçüncü kademe arıtma ve şartlandırma kimyasallarının ve elektrik enerjisi üretiminin, çevresel yükü oluşturan ana prosesler olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, çevresel etki bakış açısıyla ikinci kademeye kadar arıtılmış atıksuların soğutma sistemlerinde yeniden kullanılabilmesi için, üçüncü kademe arıtmanın az olduğu veya hiç olmadığı alternatiflerin kullanılması önerilmektedir. Le ve diğ. (2013), Çin'deki endüstriyel parklarda arıtılmış atıksuyun tekrar kullanılmasının çevresel etkilerini farklı senaryolarda karşılaştırmalı bir YDD ile incelemiştir. Envanter verileri çoğunlukla Jiangsu Eyaletindeki bir endüstri parkının atıksu arıtma ve yeniden kullanma sistemini yöneten bir tesisten elde edilmiştir. Sonuçlar suyun tekrar kullanılmasının yararlı olduğunu ve suyun yeniden kullanımı sistemin çevresel performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

Çalışmalar çevre yatırımları olarak sınıflandırılan atıksu arıtma tesislerinin de çevreye etkilerinin olabileceğini, bazen bu yatırımların fayda/maliyet oranının çok düşük düzeylerde olabileceğini göstermektedir. YDD bu değerlendirmeyi yapabilmek için önemli bir araçtır. Kurumsal düzeyde işletilen arıtma tesislerinde önemli bir veri arşivi bulunmasına rağmen YDD çalışmaları yapılmamaktadır. Türkiye'de bu tür çalışmalar çok sınırlı düzeydedir. Endüstriyel su üretim tesisi için yapılan bir YDD çalışmasına ise rastlanmamıştır. Bu çalışma kapsamında endüstriyel kullanım için su üreten bir arıtma tesisinin çevresel etkileri detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Çalışmada Susurluk havzasında yer alan Nilüfer Deresi'nden alınan suyu arıtarak Bursa Organize Sanayi Bölgesi'nde (BOSB) yer alan işletmelerin proses suyu ihtiyacını karşılayan arıtma tesisinin çevresel yükü YDD yöntemi uygulanarak belirlenmiştir.

2. Veri, Çalışma Alanı ve Yöntem

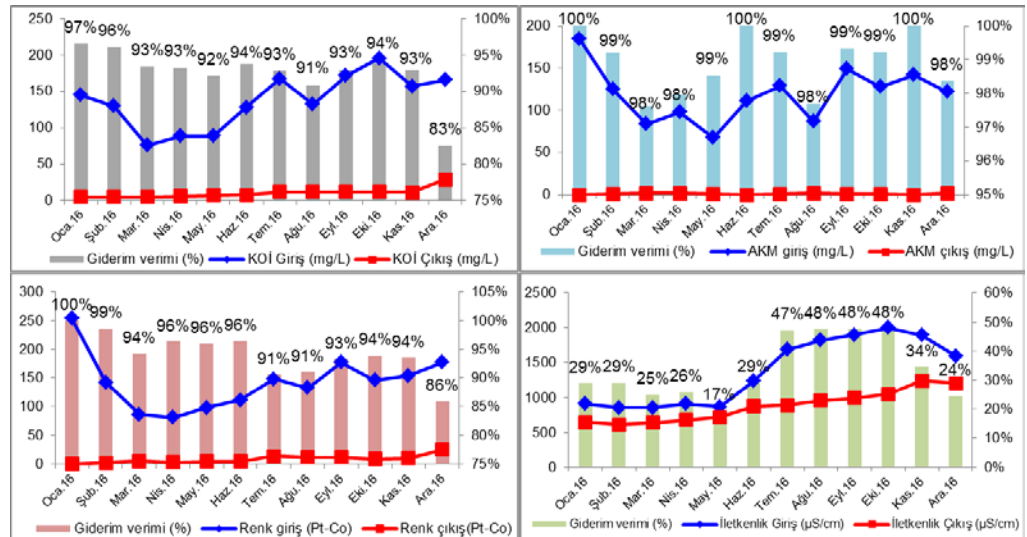
Bursa Organize Sanayi Bölgesi (BOSB) Su Üretim Tesisi'nde, Nilüfer deresi suları konvansiyonel ve ileri arıtma sistemleri ile proses suyu haline dönüştürülmektedir. Tesis, Nilüfer deresinden aldığı suyu fiziksel, kimyasal, biyolojik ve ileri arıtma teknolojileri ile arıtarak organize sanayi bölgesindeki fabrikaların proseslerinde kullanılmak üzere proses suyu (2. Kalite Su) dağıtımını yapmaktadır. Kapasitesi 50.000 m³/gün olan tesisin genel görünümü Şekil 1'de verilmektedir. Tesis, su alma yapısı, mekanik/fiziksel, biyolojik ve kimyasal arıtma ve kum filtresi ünitelerinden oluşan konvansiyonel arıtma ile ultrafiltrasyon ve ters ozmos teknolojilerine sahip ileri arıtma bölümlerinden oluşmaktadır.

YDD çalışması, sistem sınırları 'beşikten kapıya' değerlendirmesi sınıfına girecek şekilde, dere suyunun tesise terfi edilmesinden itibaren konvansiyonel ve ileri arıtma ünitelerinde arıtılması ve tesis içi su deposuna iletilmesi sürecini, bu süreçte kullanılan yardımcı kimyasal malzemelerin nakliyesini ve oluşan çevresel emisyonların bertaraf edilmesi aşamalarını içine almaktadır. Üretilen proses suyunun fabrikalarda kullanımı, atıksu haline dönüşüp yeniden arıtılması süreçleri bu çalışma kapsamında değerlendirilmemiştir.



Şekil 1. Bursa Organize Sanayi Bölgesi Su Üretim Tesisi.

Yaşam döngüsü envanter analizinde tesis iç raporlarındaki veriler kullanılmıştır. Bu verilere göre, tesis giriş ve çıkış sularının, kimyasal oksijen ihtiyacı(KOI), askıda katı madde(AKM), renk ve iletkenlik aylık ortalama değerleri(2016 yılına ait) ve bu parametrelerin tesisteki giderim verimleri Şekil 2'de verilmektedir. KOİ, AKM ve renk parametrelerinde gerçekleşen yıllık ortalama giderim verimleri %90'nın üzerinde iken iletkenlik parametresinde ortalama verim %34 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2. Su Üretim Tesisi giriş-çıkış suyu değerleri ve giderim verimleri (Çakır, 2016).

Fonksiyonel birim olarak 1m³ proses suyu seçilmiştir. Proses suyu hazırlanması sürecinde ihtiyaç duyulan enerji ve su kullanımları, kimyasal malzeme kullanım verileri ile birlikte oluşan çevresel

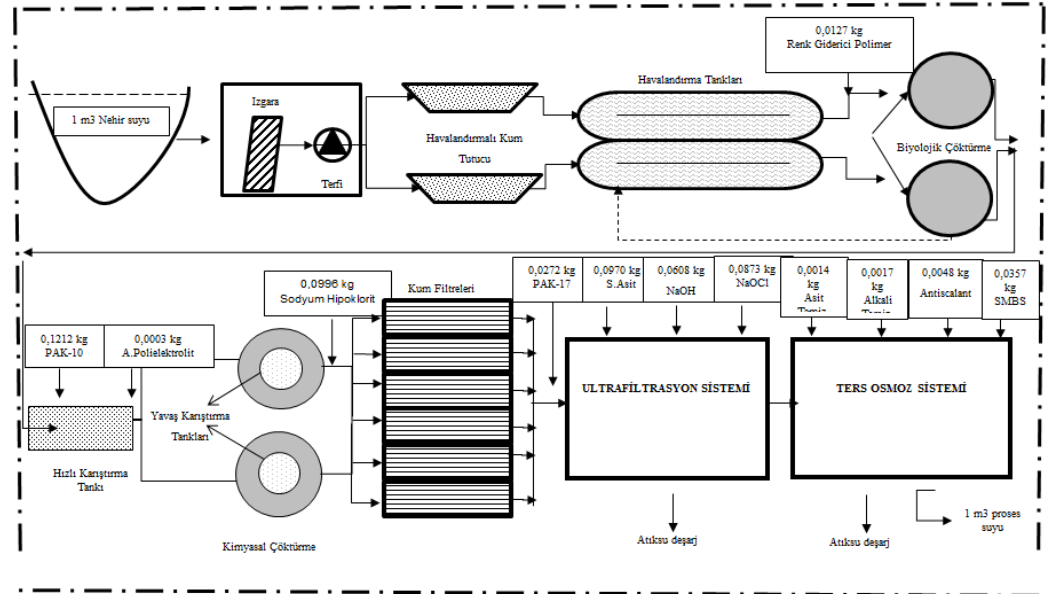
emasyonlar fonksiyonel birim ile ilişkilendirilerek belirlenmiştir. Çalışmada SimaPro 8.2.0 yazılımında yer alan Ecoinvent 3, YDD Food DK ve Agri-footprint veri tabanları kullanılmıştır. Elektrik enerjisi verileri, Su Üretim Tesisi iç raporlarından elde edilen veriler ile Ecoinvent 3 veri tabanının arka plan (ikincil) verileri birlikte değerlendirilmiştir. Türkiye ulusal elektrik kaynak dağılımı bilgilerini içeren ve tesise orta gerilim şebekesinden elektrik enerjisi temin edildiği göz önüne alınarak veri tabanından ilgili veri seçilmiştir. Kimyasal malzemelerin tesise taşıma verileri, Agri-footprint veri tabanı ikincil verileri ile birlikte analiz edilmiştir. Bu kimyasalların karayolu taşımasında kullanılan araçların, % 100 doluluk oranı ile taşıma yaptığı, kimyasal madde tesise ulaştırıldıktan sonra tedarikçi firmaya boş olarak dönüş yapacağı ve araçların motor standartlarının EURO 3 emisyon standartlarında olduğu varsayılmıştır. Taşıma verileri, 1 m³ başına tüketilen kimyasal miktarlarının, tedarik edilen firma ile tesis arasındaki mesafe değerinin çarpılmasıyla 'kg.km' birimine sahip değerler hesaplanarak yazılıma veri girişleri yapılmıştır.

Yaşam döngüsü envanter analizi safhasında sisteme giren hammadde ve enerji bileşenleri ile sistemden çıkan kirlenici bileşenler fonksiyonel birim ile ilişkilendirilerek tanımlandıktan sonra bu verilerin insan sağlığı, çevresel değerler ve doğal kaynakların tüketimi üzerine olan etkileri yaşam döngüsü etki analizi aşamasında incelenmiştir. Bu çalışmada hem orta nokta hem de son nokta analizlerini içeren ReCiPe Endpoint (H) Version 1.12 etki analiz metodu uygulanmıştır.

Proses suyunun konvansiyonel ve ileri arıtma ünitelerinde işlenmesi sürecinde sistem sınırları kapsamında olan üniteler aşağıdaki gibidir (Şekil 3):

- Su alma yapısı (terfi istasyonu)
- Havalandırmalı kum tutucu ünitesi
- Havalandırma tankları
- Biyolojik çöktürme tankları
- Hızlı karıştırma tankı
- Klariflokülatörler
- Hızlı kum filtreleri
- Ultrafiltrasyon sistemi
- Ters ozmos sistemi

Çamur susuzlaştırma ünitesi, son terfi yapısı sistem sınırlarına dâhil edilmemiştir.



Şekil 3. Sistem sınırları (Çakır, 2016).

Su Üretim Tesisi'nde yer alan ekipmanlar ve güçleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 2'de tesisin işletilmesinde kullanılan arıtma kimyasalları kullandıkları ünitelere göre listelenmiştir.

Tablo 1. Su Üretim Tesisi ekipman envanter verileri (Çakır, 2016).

Sıra No	Ekipman Adı	kW/Adet	Adet	Sıra No	Ekipman Adı	kW/Adet	Adet
1	Su Alma Yapısı Terfi Pompası 1	18,5	4	29	Beltpres Çamur Pompası	4	2
2	Su Alma Yapısı Terfi Pompası 2	22	3	30	Beltpres Poli Pompası	0,37	2
3	Kum Tutucu Blower	4	3	31	Beltpres Binası Kompresör	2,2	1
4	Havalandırma Havuzu Blower Tip 1	132	4	32	Çamur Yoğunlaştırıcı	0,55	1
5	Havalandırma Havuzu Blower Tip 2	150	1	33	Pak 17 Dozaj Pompası	0,09	2
6	Kum Tutucu Sıyırıcı	0,75	1	34	Pak 17 Tankı Karıştırıcı	1,5	2
7	Dalgıç mikser	5,7	4	35	Pak 17 Hattı Mikseri	22	1
8	Biyolojik Çöktürme Havuzu Sıyırıcı	0,75	2	36	Sodyum Hipoklorit Dozaj Pompası	0,25	2
9	Geri Devir Pompası	18,5	4	37	Kostik Dozaj Pompası	0,42	2
10	Fazla Çamur Pompası	1,5	1	38	Sülfürik Asit Dozaj Pompası	0,42	2
11	Hızlı Karıştırıcı	5,5	1	39	Ph Ayar Kostik Dozaj Pompası	0,18	1
12	Anyonik Poli Tankı Mikseri	0,37	2	40	CİP Tankı Kimyasal Dozaj Pompası	0,37	1
13	Anyonik Poli Besleme Pompası	0,37	1	41	UF Besleme Pompası	37	7
14	Anyonik Poli Dozlama Pompası	1,35	2	42	UF Geri Yıkama Pompası	110	3
15	Sodyum Hipoklorit Dozlama Pompası	0,37	2	43	Uf Kim.Geri Yıkama ve RO Durulama Pompası	45	2
16	Pak 10 Dozlama Pompası	0,37	2	44	RO Besleme Pompası	30	7
17	Yavaş Karıştırıcı	4	4	45	RO Yüksek Basınç Pompası	250	7
18	Klariflokülatör Sıyırıcı	0,75	2	46	ByPass Pompası	15	1
19	Kimyasal Çamur Pompası	5,5	2	47	SMBS Egzoz Fanı	0,18	1
20	Kum Filtreleri Geri Yıkama Pompası	45	2	48	Antiscalant Dolum Pompası	1,5	2
21	Kum Filtreleri Blower	18,5	3	49	İleri Arıtma Hava Kompresörü 1	15	1
22	Kum Filtreleri Kompresör	11	1	50	İleri Arıtma Hava Kompresörü 2	11	1
23	Geri Kazanım Havuzu Üst Su Pompası	28,5	1	51	SMBS Dolum Pompası	1,5	2
24	Son Terfi Pompası Tip 1	200	5	52	Antiscalant Dozaj Pompası	0,017	7
25	Eski Terfi Binası Havalandırma	11	1	53	SMBS Dozaj Pompası	0,017	7
26	Son Terfi Pompası Tip 2	110	7	54	İleri Arıtma Klima	4,3	2
27	Beltpres	1,8	2	55	Kum Filtresi UF Atıksu Besleme Pompası	4	2
28	Bant Konveyör	1,1	2	56	Yağmur Suyu Terfi Pompası	18,5	5

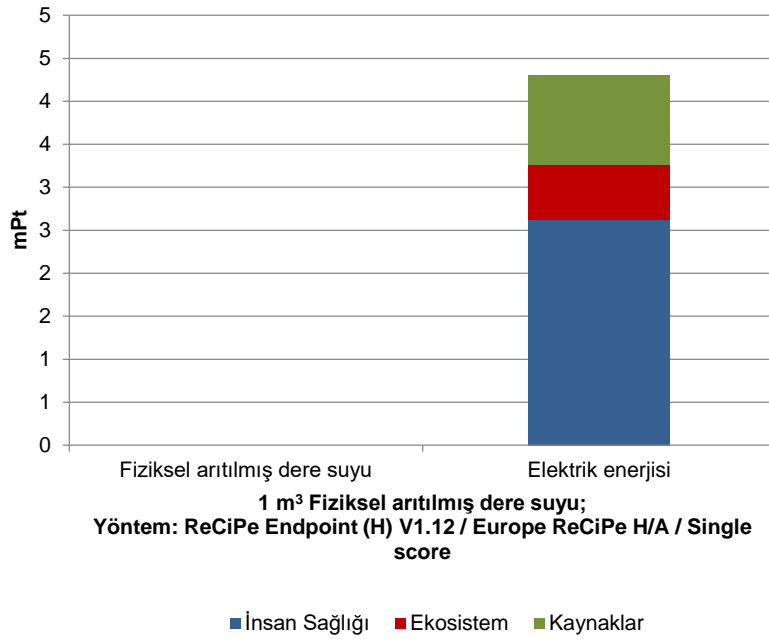
Tablo 2. Su Üretim Tesisi'nde kullanılan arıtma kimyasalları.

Arıtma Kademeleri		Arıtma Kimyasalları
Konvansiyonel Arıtma Üniteleri	Biyolojik Arıtma	Renk Giderici Polimer Koagülant (PAK-10)
	Kimyasal Arıtma	Flokülant (Anyonik Polielektrolit) Sodyum Hipoklorit (NaOCl) Koagülant (PAK-17)
İleri Arıtma Üniteleri	Ultrafiltrasyon Üniteleri	Sodyum Hidroksit (NaOH) Sülfürik Asit (H ₂ SO ₄) Sodyum Hipoklorit (NaOCl)
	Ters Ozmos Üniteleri	Sodyum Metabisülfid Antiscalant Alkali Yıkama Kimyasalı Asidik Yıkama Kimyasalı

3. Bulgular ve Tartışma

3.1 Fiziksel arıtma alt sisteminin çevresel yükü

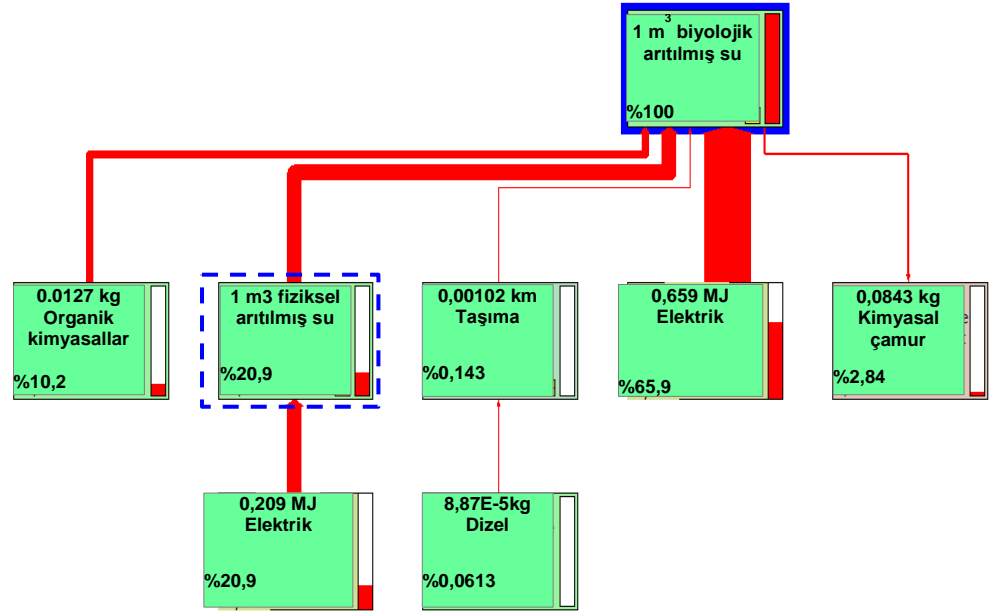
Fiziksel arıtma alt sisteminin girdileri dere suyu ve elektrik enerjisi olup elektrik enerjisinin bu alt sistemin çevresel yükünü yalnız başına oluşturduğu Şekil 4'te görülmektedir. Elektrik enerjisinin insan sağlığı kategorisine etkisi diğer kategorilere kıyasla en yüksek olduğu Şekil 4'ten anlaşılmaktadır. Bu alt sistemde elektrik enerjisi sarfiyatlarının ana kaynağı su alma yapısında yer alan terfi pompalarıdır.



Şekil 4. Fiziksel arıtma alt sisteminin çevresel yükü.

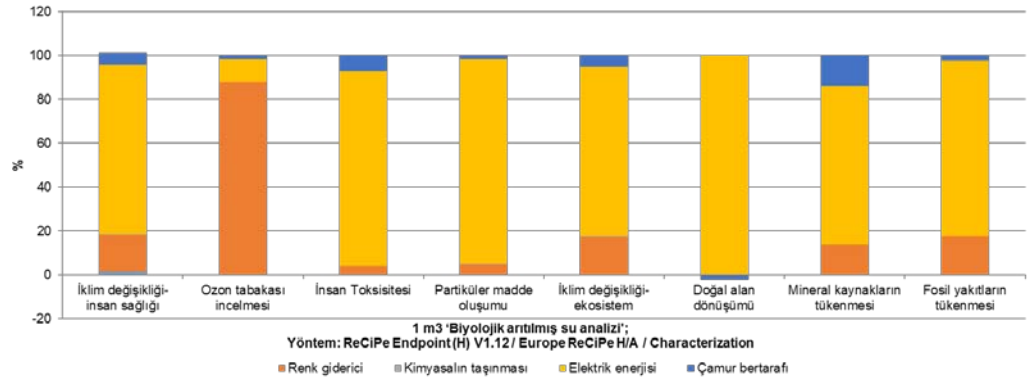
3.2 Biyolojik arıtma alt sisteminin çevresel yükü

Biyolojik arıtma alt sisteminin en fazla çevresel yüklere sahip olan girdi ve çıktıların ürün ağacı Şekil 5'te verilmektedir. Şekilde görülen akış çizgilerinin genişliği o bileşenin sahip olduğu çevresel yükün büyüklüğünü göstermektedir.



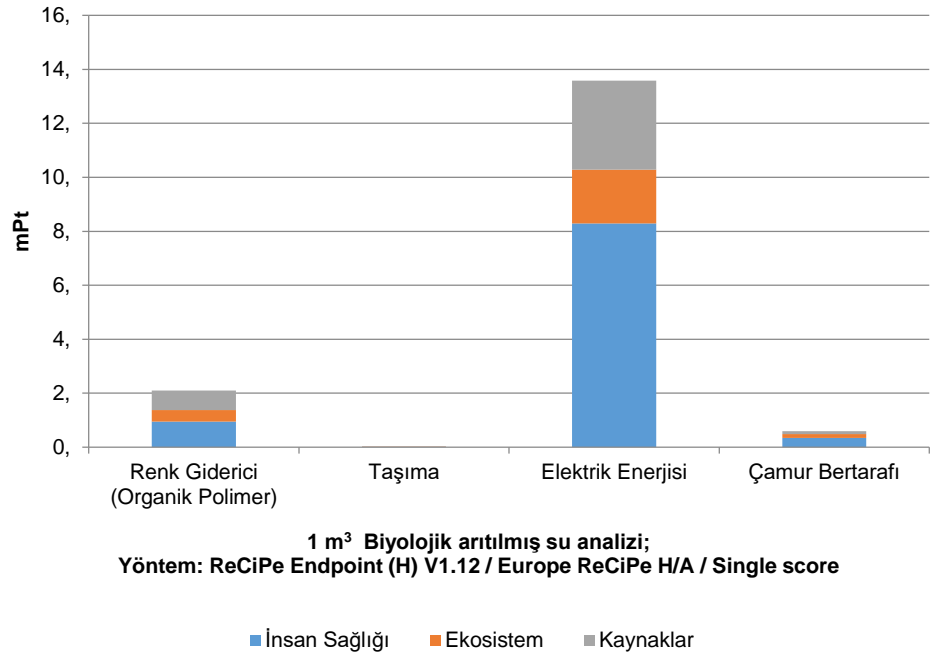
Şekil 5. Biyolojik arıtma alt sisteminin çevresel yüklerinin alt sistem girdilerine göre dağılımı (Çakır, 2016).

Şekil 6'da biyolojik arıtma sisteminin ele alınan girdi ve çıktıların etki kategorilerine katkısı yüzde (%) olarak verilmektedir.



Şekil 6. Biyolojik arıtma alt sisteminin etki kategorilerine göre değerlendirilmesi (Çakır, 2016).

Şekil 6'ya göre, ozon tabakası incelmeleri zarar sınıfında renk giderici organik polimerin etkisinin en yüksek, diğer orta nokta etki kategorilerinde ise elektrik enerjisinin etkili olduğu görülmektedir. Doğal alan dönüşümü zarar sınıfında negatif değer mevcut olup, tehlikesiz arıtma çamurunun yakma tesisinde bertarafının bu etki kategorisinde olumlu etkisi olduğu anlaşılmaktadır. Bu olumlu etkinin, arıtma çamurunun düzenli veya vahşi depolama sahalarında depolandığında oluşabilecek negatif etkileri engellediği için olabileceği düşünülmektedir. Ancak grafikten tehlikesiz çamur bertarafının diğer etki kategorilerinde olumsuz etki gösterdiği görülmektedir. Bu durum arıtma çamurunun yakılmasıyla açığa çıkacak sera gazı emisyonlarının ve atıksuların çevreye ve insan sağlığına vereceği zararlar ile açıklanabilir.

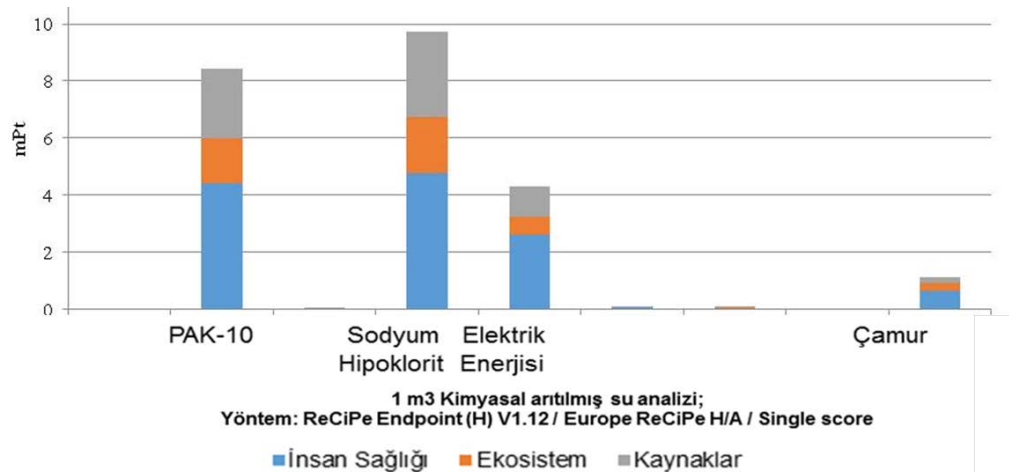


Şekil 7. Biyolojik arıtma alt sistemini oluşturan girdi ve çıktılarının çevresel yüklerinin karşılaştırılması (Çakır, 2016).

Şekil 7'de mPt birimi cinsinden yapılan hesaplamalar ile sistemin tüm girdi ve çıktıların son nokta etki kategorilerine göre analizi sonucunda oluşan grafik verilmiştir. 'Pt' birimi (point), Avrupa'da yapılan çevresel yük ile ilgili hesaplamalar sonucu ortaya çıkmıştır. Avrupa ülkelerinde yaşayan bir kişinin bir yılda çevreye verdiği yük 1 kPt olarak kabul edilmiştir. Bu birimin binde biri Pt (point)dir ve bu çalışmada ise mPt (mili-point) birimi kullanılmıştır. Biyolojik arıtma sisteminde en yüksek etkiye sahip parametrenin elektrik olduğu Şekil 7'de görülmektedir. Elektrik enerjisinin ise en fazla insan sağlığı üzerine etki yaptığı grafikten anlaşılmaktadır. Biyolojik arıtma sisteminde elektrik sarfiyatının oluşumuna sebep olan en önemli etken, havalandırma havuzlarında aktif biyokütlelerin canlılığının devam etmesi için gerekli oksijeni sağlayan blower ekipmanlarından kaynaklanmaktadır. Bu sistemde elektrik enerjisinden sonra en büyük etkiye renk giderici organik polimerin yaptığı görülmektedir.

3.3 Kimyasal arıtma alt sisteminin çevresel yükü

Kimyasal arıtma alt sistemine dahil olan tüm bileşenlerin izlenebildiği Şekil 8'den sodyum hipokloritin çevresel etkisinin en yüksek düzeyde olduğu çıkarılmaktadır.

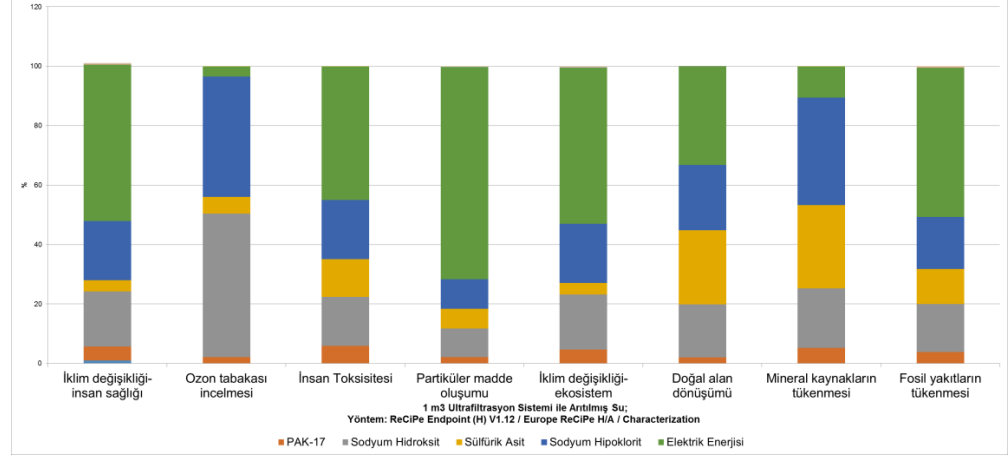


Şekil 8. Kimyasal arıtma alt sistemini oluşturan girdi ve çıktıların çevresel yüklerinin karşılaştırılması (Çakır, 2016).

Şekilde görüldüğü gibi sodyum hipoklorit kimyasalından kaynaklanan etkileri sırasıyla poli alüminyum klorür hidrokisit, elektrik enerjisi ve çamur bertarafı bileşenlerinden kaynaklanan çevresel etkiler takip etmektedir. Kimyasal arıtma alt sisteminde yaşam döngüsü etki analiz sonuçları ile envanter analizi sonuçları beraber değerlendirildiğinde, bu sistemde en fazla birim tüketime sahip kimyasalın poli alüminyum hidrokisit, ikinci olarak ise sodyum hipoklorit olduğu görülmektedir. Ancak etki analizi sonuçları, sodyum hipokloritin daha yüksek çevresel etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Etkinin yalnızca kimyasal madde tüketim miktarlarına bağlı olmadığı, kimyasal maddenin cinsinin de önemli olduğu anlaşılmaktadır.

3.4 Ultrafiltrasyon membran alt sisteminin çevresel yükü

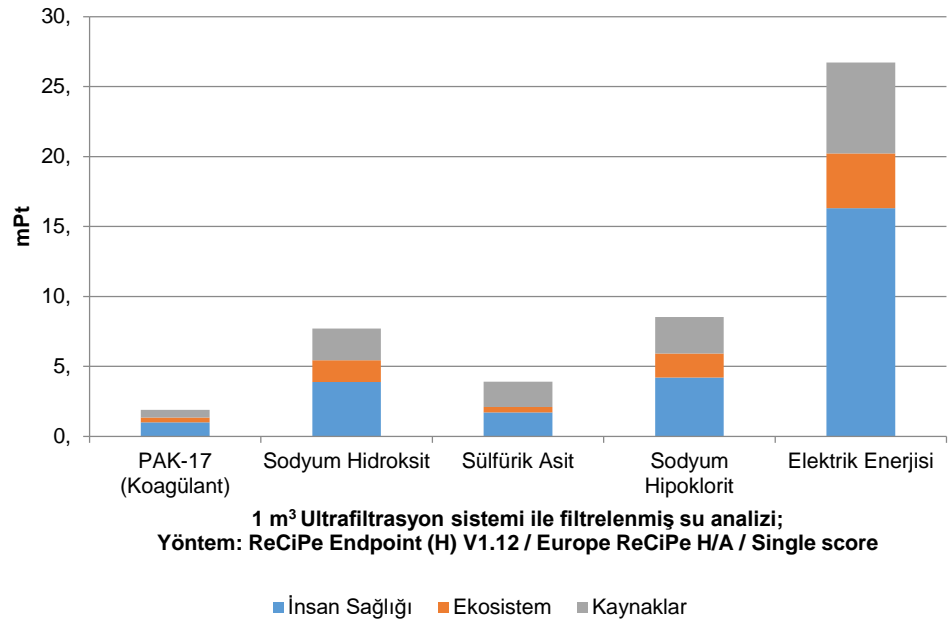
Şekil 9'da ultrafiltrasyon sisteminin, etki kategorilerine göre analiz sonuçları görülmektedir. Ozon tabakası incelmeleri ve mineral kaynakların tükenmesi etki kategorilerinde sodyum hidroksit ve sodyum hipoklorit kullanım ve eldesi etkilerinin yüksek, diğer kategorilerde elektrik enerjisinin elde ve kullanımlarından kaynaklanan çevresel etkilerin yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 9. Ultrafiltrasyon alt sisteminin orta nokta kategorilerine göre değerlendirilmesi (Çakır, 2016).

Ultrafiltrasyon sisteminin girdi ve çıktılarına ait çevresel yüklerinin analiz edilebildiği Şekil 11'de verilen grafik, elektrik enerjisinin en yüksek çevresel etkiye sahip olduğunu doğrulamaktadır. Ultrafiltrasyon membran sisteminin çalışma prensibine göre, beslenen ham su belli süre filtre edildikten sonra membranların üzerinde biriken kirliliklerin giderilmesi için filtrat suyu su akışının ters yönünde membrana verilmekte başka bir ifadeyle ters yıkama yapılmaktadır. Düzenli geri yıkama ile,filtrasyon sırasında istenen debi elde edilemiyorsa, geri yıkama verimi uygun kimyasal karışımı ile iyileştirilmektedir.

Şekil 10'da sodyum hidroksit(NaOH), sülfürik asit(H₂SO₄) ve sodyum hipokloritten(NaOCl) oluşan ve geri yıkama verimini arttırmak için kullanılan yıkama kimyasallarının etkilerinin elektrik enerjisinden sonra olduğu görülmektedir. PAK-17 ise ultrafiltrasyon verimini attırmak ve işletme koşullarının stabilitesini sağlamak için gerçekleştirilen koagülasyon işleminde kullanılan koagülant olup alt sistemin çevresel yüküne katkı koymaktadır.

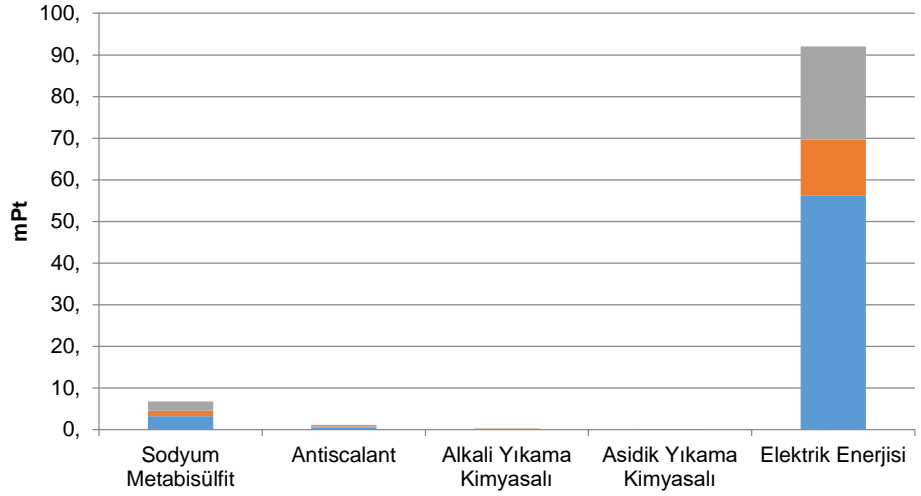


Şekil 10. Ultrafiltrasyon alt sisteminin oluşturduğu girdi ve çıktıların çevresel yüklerinin karşılaştırılması (Çakır, 2016).

3.5 Ters ozmos membran alt sisteminin çevresel yükü

Ters ozmos alt sisteminin bileşenlerinin çevresel yükleri Şekil 11'de karşılaştırılmaktadır. Elektrik enerjisinin bu alt sistemin çevresel yük dağılımında en fazla paya sahip olduğu görülmektedir. Elektrik enerjisi tüketimlerinin yüksek olması, ters ozmos sisteminin yüksek

basınç altında çalışma prensibinden ileri gelmektedir. Ultrafiltrasyon sisteminde filtrelenmiş su, ters ozmos membranlarına girmeden önce alçak basınç pompaları ile basınçlandırılarak kartuş filtre sistemine girmektedir. Kartuş filtrelerden sonra ise 250 kW gücündeki yüksek basınç pompaları ile ortalama 10-15 bar basınçla ters ozmos membranlarına iletilmektedir.



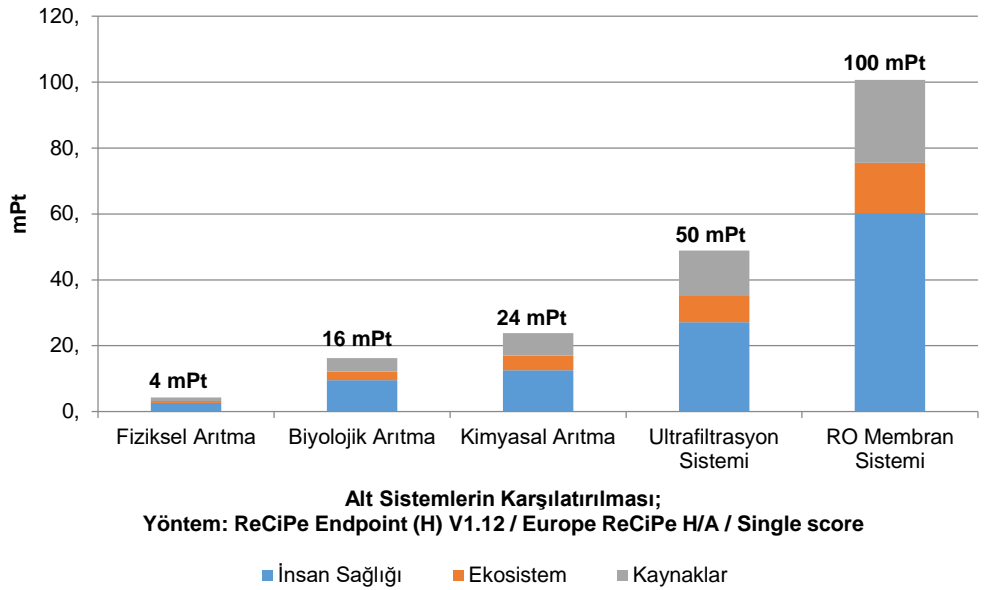
1 m³ RO sistemi ile filtrelenmiş su analizi;
Yöntem: ReCiPe Endpoint (H) V1.12 / Europe ReCiPe H/A / Single score

■ İnsan Sağlığı ■ Ekosistem ■ Kaynaklar

Şekil 11. Ters ozmos alt sistemini oluşturan bileşenlerin çevresel yüklerinin karşılaştırılması (Çakır, 2016).

3.6 Alt sistemlerin çevresel yüklerinin karşılaştırılması

Şekil 12'de her bir alt sistem son nokta kategorilerine göre analizi görülmektedir. Ters ozmos sisteminin çevresel etki boyutlarının diğer alt sistemlerden yüksek olduğu görülmüştür. İleri arıtma biriminin diğer alt sistemi olan ultrafiltrasyon sistemi ise ikinci büyük çevresel yükü oluşturmaktadır. Konvansiyonel arıtma alt sistemlerinin tesisin çevresel yük pastasında daha düşük paylara sahip olduğu, en fazla payın ileri arıtma sistemini oluşturan ultrafiltrasyon ve ters ozmos üniteleri olduğu etki analizleri sonucunda belirlenmiştir. Ters ozmos alt sisteminin etki analizi sonuçlarında, bu alt sistemin çevresel yükünün en önemli bileşeninin elektrik enerjisi olduğu tespit edilmiştir.

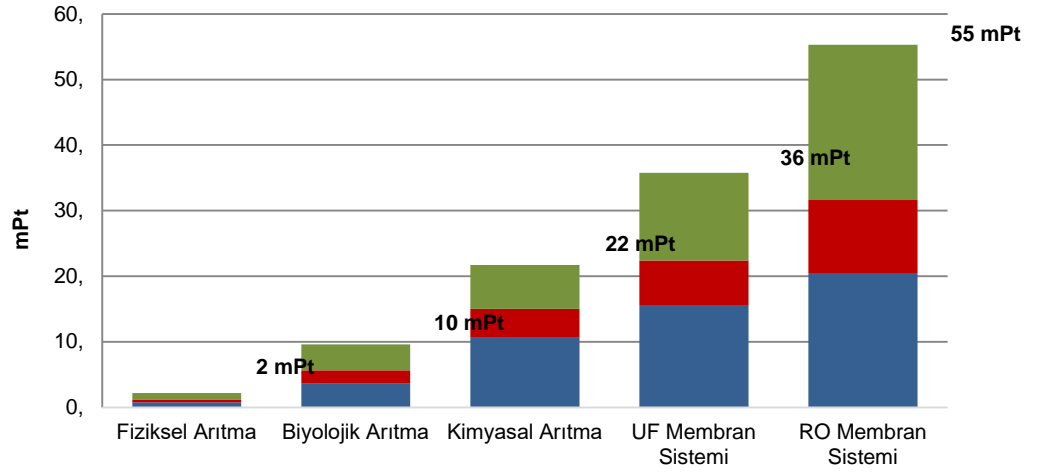


Alt Sistemlerin Karşılaştırılması;
Yöntem: ReCiPe Endpoint (H) V1.12 / Europe ReCiPe H/A / Single score

■ İnsan Sağlığı ■ Ekosistem ■ Kaynaklar

Şekil 12. Alt sistemlerin etki kategorilerine göre karşılaştırılması
(Elektrik enerjisi kaynağı: Türkiye elektrik elde dağılımı) (Çakır, 2016).

Şekil 13'te tesisin elektrik enerjisi elde kaynağının doğalgaz olduğu durumunda alt sistemlerin sahip çevresel yükler görülmektedir. Tüm alt sistemlerin çevresel yükünün önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Özellikle ters ozmos sisteminin çevresel etkisinin 100 mPt'den 55 mPt'e düşerek %45 oranında azaldığı belirlenmiştir.

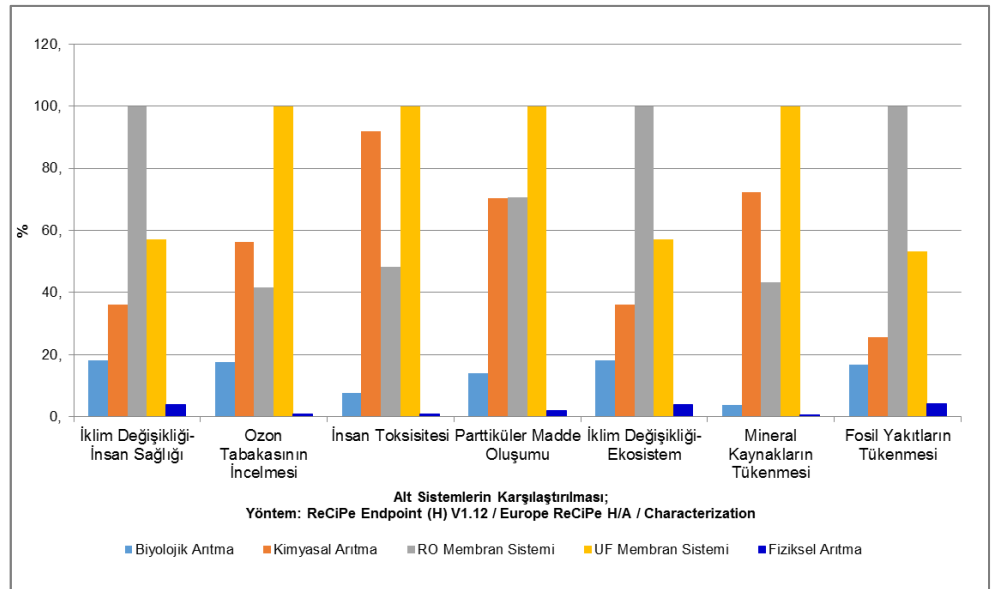


Alt Sistemlerin Karşılaştırılması;
Yöntem: ReCiPe Endpoint (H) V1.12 / Europe ReCiPe H/A / Single score

■ İnsan Sağlığı ■ Ekosistem ■ Kaynaklar

Şekil 13. Alt sistemlerin etki kategorilerine göre karşılaştırılması (Elektrik enerjisi kaynağı: Doğalgaz) (Çakır, 2016).

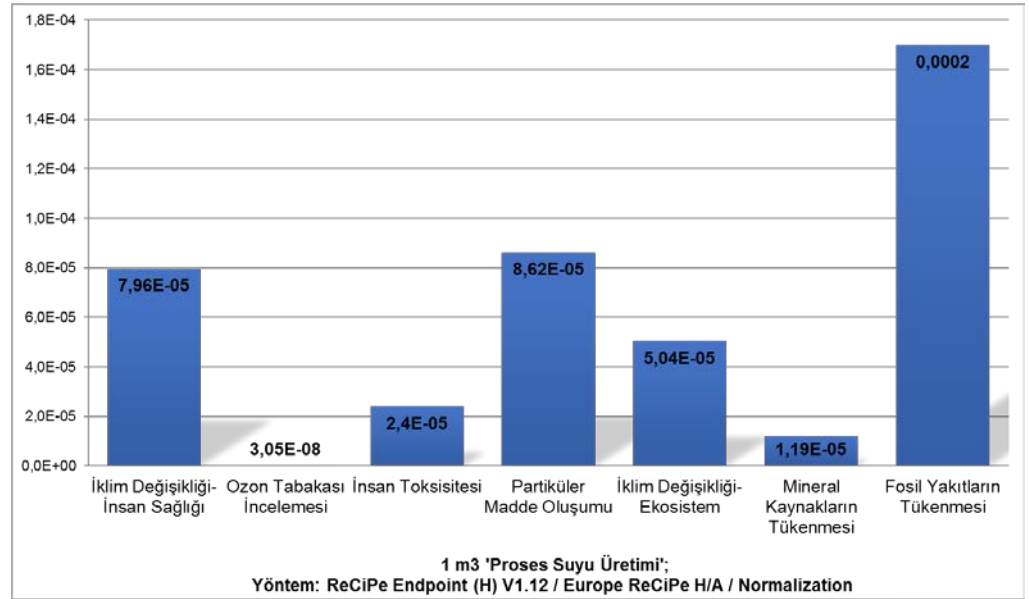
Şekil 14'te alt sistemlerin orta nokta etki kategorilerine göre analiz sonuçları görülmektedir. Bu grafik incelendiğinde; ozon tabakasının incelenmesi, insan toksisitesi, partiküler madde oluşumu ve mineral kaynakların tükenmesi zarar sınıflarında ultrafiltrasyon alt sisteminin, diğer sınıflarda ise ters ozmos alt sisteminin çevreye verdiği yükün oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Kimyasal arıtma alt sisteminin insan toksisitesi, mineral kaynakların tükenmesi, partiküler madde oluşumu ve ozon tabakasının incelenmesi kategorilerinde %50'nin üzerinde etki gösterdiği görülmekte olup bu etkinin kaynağı yoğun kimyasal kullanımı olduğu düşünülmektedir. Biyolojik arıtma tüm kategorilerde %20'nin altında çevresel etki oluşturmaktadır. Fiziksel arıtma alt sistemi tüm etki kategorilerinde en düşük seviyede çevresel etkiye sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 14. Alt sistemlerin orta nokta etki kategorilerine göre karşılaştırılması (Çakır, 2016).

3.7 Su üretim tesisinin toplam çevresel yükü

Su üretim tesisinin toplam çevresel yükünün orta nokta etki kategorilerine göre analizi Şekil 15'te verilmektedir. İncelenen tüm alt sistemlerdeki bileşenlerin oluşturduğu tesisin toplam yükünün, en yüksek etkisinin "Fosil Yakıtların Tükenmesi" kategorisinde olduğu görülmektedir. Bu etkinin ana kaynağı elektrik enerjisi temini ve kullanımı olup, elektrik enerjisinin yenilenebilir enerji kaynaklarından temin edilmesi ile tesisin çevreye olan yükünün önemli ölçüde azalacağı düşünülmektedir.

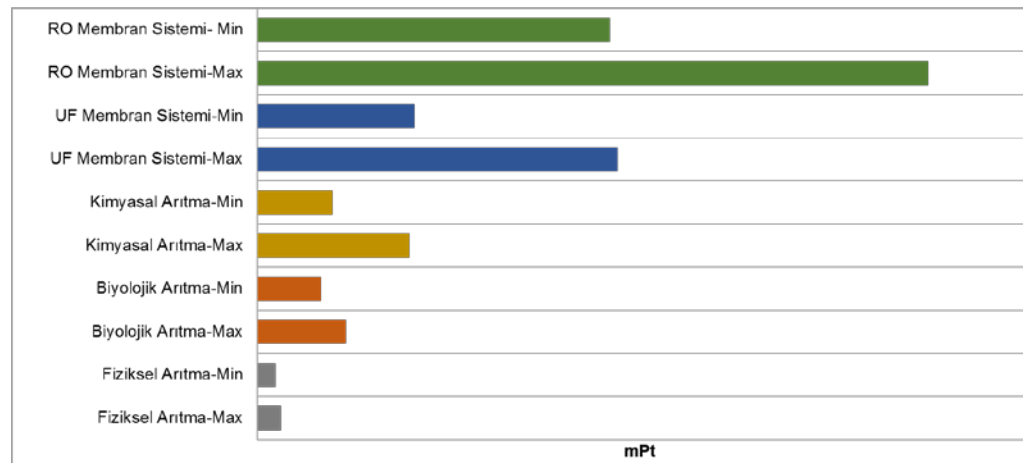


Şekil 15. Su Üretim Tesisinin toplam çevresel yükü (Çakır, 2016).

Tesisin etkilediği bir diğer kategorinin “Partiküler Madde Oluşumu” olduğu şekilden anlaşılmaktadır. Elektrik enerjisi ve kimyasal malzemelerin bu kategoride etki payı yüksek olan girdiler olduğu düşünülmektedir. Ayrıca iklim değişikliğinin insan sağlığı üzerindeki etkilerinin temsil eden orta nokta etki kategorisi, tesisin toplam çevresel yükünden önemli derecede etkilendiği görülmektedir.

3.8 Yüksek ve düşük kimyasal madde / elektrik tüketiminde çevresel yük

Sistemin ana girdisi olan Nilüfer Deresi'nden temin edilen suyun kalitesinde mevsim şartlarına bağlı olarak değişiklikler meydana gelmektedir. Bu durum kimyasal malzeme ve elektrik sarfiyatlarını doğrudan etkilemektedir. Çalışmanın daha hassas gerçekleştirilebilmesi için dere suyu kalitesi ile ilişkili olarak tesiste gerçekleşen en yüksek ve en düşük kimyasal ve elektrik sarfiyatları belirlenmiş ve ReCiPe Endpoint etki metodu kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Dere suyu kalitesine bağlı olarak alt sistemlerin çevresel yük değişimleri Şekil 16'da verilmiştir. Dere suyu kalitesinin düşük olduğu mevsimlerde, ters ozmos, ultrafiltrasyon ve kimyasal arıtma alt sistemlerinin çevresel yüklerinde yaklaşık %100 oranında, biyolojik arıtma alt sisteminin çevresel yükünde %50 oranında artış gözlenmiştir. Fiziksel arıtmanın çevresel yükünde görülen değişiklik diğer alt sistemlere kıyasla çok daha düşük miktarda bulunmuştur.



Şekil 16. En yüksek ve en düşük kimyasal-elektrik tüketiminde çevresel yük (Çakır, 2016).

5. Sonuç

Çalışmada BOSB su üretim biriminin bir bütün olarak ve alt sistemler olarak çevre üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Fiziksel arıtma alt sisteminin çevresel yükünü oluşturan tek kaynağın elektrik enerjisi olduğu ve bu girdinin insan sağlığı üzerine etkilerinin kaynaklar ve ekosisteme göre daha yüksek olduğu saptanmıştır. Bu alt sistemde yer alan terfi pompalarının, sistemde yer alan diğer ekipmana göre daha yüksek güce sahip olduğu için elektrik tüketiminin ana nedeni oldukları düşünülmektedir.

Biyolojik arıtma alt sisteminin etki analizi, alt sistem bileşenleri arasında yer alan elektrik enerjisinin çevresel etkisinin diğerlerine oranla en fazla paya sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu alt sistemde yer alan blower ünitelerinin bu etkinin ana kaynağı olduğu düşünülmektedir. Bu alt sistemin çevresel yükünde ikinci olarak en fazla paya sahip girdinin renk giderici olarak kullanılan organik polimer olduğu belirlenmiştir. Renk giderici organik polimerin etkilerini, biyolojik çamurun yakma tesisinde bertarafının çevresel etkileri izlemektedir. Bu alt sistemde son nokta kategorilerinden olan insan sağlığına verilen zararın diğer etki kategorilerinden yüksek olduğu sonucu çıkarılmıştır.

Konvansiyonel arıtma prosesinin son alt sistemi olan kimyasal arıtma sürecinde, diğer alt sistemlerden farklı olarak elektrik enerjisi etkileri daha düşük bir paya sahip iken, kullanılan kimyasalların etkilerinin diğer bileşenlerden yüksek olduğu anlaşılmıştır. Özellikle sodyum hipoklorit kimyasalının çevresel etkilerinin en fazla etkiye neden olduğu görülmüştür. Poli alüminyum klorür hidrosit kimyasalı ise sodyum hipokloritten sonra ikinci yüksek etkiye sahip olup, elektrik enerjisi ise bu alt sistemde çevresel yüke üçüncü derecede katkı sağlamaktadır.

İleri arıtma prosesinin ilk alt sistemi olan ultrafiltrasyon sisteminde, bu alt sistemin çevresel yüküne en fazla katkısı yapan bileşenin elektrik enerjisi olduğu görülmüştür. Ters ozmos ünitesinde ise, elektrik enerjisinden kaynaklanan çevresel yükün bu alt sistemin toplam yükünde en fazla paya sahip olan yük olduğu görülmüştür.

Alt sistemlerin sahip olduğu çevresel yükler karşılaştırıldığında, BOSB Su Üretim Tesisi proses suyu üretim sürecinde ters ozmos alt sisteminin diğer alt sistemler içinde en yüksek çevresel yüke neden olduğu belirlenmiştir. Ters ozmos sistemi sahip olduğu çevresel yükün ifade edebilmesi için 100 mPt puanı alırken, ultrafiltrasyon 50 mPt, kimyasal arıtma 24 mPt, biyolojik arıtma 16 mPt ve 4 mPt puan almıştır. Bu verilere göre, tesisin çevresel yükünde en fazla payın ileri arıtma sistemini oluşturan ultrafiltrasyon ve ters ozmos üniteleri olduğu belirlenmiştir.

Ortaya konulan ölçülebilir sonuçlar ışığında, tesiste elektrik enerjisi tasarrufu çalışmaları yapılarak tesiste etkili bir enerji yönetimi oluşturulmalıdır. Tesiste yoğun enerji tüketen ekipmanların durumu saptanmalı, enerji verimliliği için uygulanabilecek yatırımlar yapılmalıdır. Elektrik enerjisi tüketimleri asıl olarak pompa, blower, kompresör gibi ekipmanlarda bulunan elektrik motorlarından kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda, mevcut elektrik motorlarında verimliliğin artmasını sağlayacak uygulamalar yapılarak ya da yüksek verimli motorlar seçilerek tüketilen elektrik enerjisi miktarında tasarruf sağlanabilir. Ayrıca yüksek basınç ile çalışan ters ozmos membranları için gerçekleştirilecek yeni yatırımlarda 'ultra low pressure membrane' türü yeni teknoloji membranların tercih edilmesi ile elektrik enerjisi sarfiyat miktarında azalma olacağı düşünülmektedir.

Su Üretim Tesisi'nin çevresel yükünde, elektrik enerjisinden sonra en fazla payı kimyasal maddelerin çevresel etkilerinin aldığı görülmüştür. Kullanım ve kimyasallar maddesi elde edilirken açığa çıkan çevresel emisyonlar göz önüne alındığında, proses suyu üretim sürecinde aynı amaçla kullanılacak çevre dostu kimyasalların tercih edilmesinin bu bileşenlerden kaynaklanan çevresel yükü azaltacağı düşünülmektedir.

Sonuç olarak BOSB Su Üretim Tesisi'nin ileri arıtma sisteminde yer alan ters ozmos ünitelerinin tesisteki alt sistemler içinde en yüksek çevresel yüke sahip alt sistem olduğu tespit edilmiştir. Bunun temel nedeninin bu sistemde yüksek oranda tüketilen elektrik enerjisi olduğu sonucuna varılmıştır. Elektrik kaynağı olarak yenilenebilir kaynakların payının yüksek olduğu elektrik karışımının tercih edilmesi durumunda da sistemin çevresel yükünün önemli ölçüde azaldığı görülmüştür.

Tesis nehir suyunu doğrudan aldığı için nehir suyunun kalitesi tesisin çevresel yükünü büyük ölçüde etkilemektedir. Nehir suyu kalitesinin düşük olduğu zamanlarda, ters ozmos, ultrafiltrasyon ve kimyasal arıtma alt sistemlerinin çevresel yüklerinde yaklaşık %100 oranında, biyolojik arıtma alt sistemin çevresel yükünde %50 oranında artış gözlenmiştir.

6. Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesine destek veren Bursa Organize Sanayi Bölgesi Su Üretim Tesisi yönetici ve çalışanlarına teşekkür ederiz.

7. Kaynaklar

- Çakır, Z., (2016), Bursa Organize Sanayi Bölgesi Su Üretim Tesisi'nin Çevresel Performansının Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Yöntemiyle İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Teknolojisi Anabilim Dalı, 2016, Bursa.
- Garfi, M., Cadena E., Sanchez-Ramos D., and Ferrer I., (2016), Life cycle assessment of drinking water: Comparing conventional water treatment, reverse osmosis and mineral water in glass and plastic bottles, Journal of Cleaner Production, 137:997-1003.

- Ioannou-Ttofa, L., Foteinis, S., Chatzisyneon, E., and Fatta-Kassinou, D. (2016), The environmental footprint of a membrane bioreactor treatment process through life cycle analysis, *Science of the Total Environment*, 568:306-318.
- Le T., Xin L., XueWei L., ZengWei Y., and Qiong Z. (2013), Life cycle assessment of water reuse systems in an industrial park, *Journal of Environmental Management*, 129:471-478.
- Pintilie, L., Torres, C.M., Teodosiu, C., and Castells, F., (2016), Urban wastewater reclamation for industrial reuse: An LCA case study, *Journal of Cleaner Production*, 139, 1-14.
- Ribera, G., Clarens, F., Martinez-Llado, X., Jubany, I., Marti, V., and Rovira, M., (2014), Life cycle and human health risk assessments as tools for decision making in the design and implementation of nanofiltration in drinking water treatment plants, *Science of The Total Environment*, 466:377-386.
- Rodriguez, R., Espada, J.J., Pariente, M.I., Melero, J.A., Martinez, F., and Molina, R., (2016), Comparative life cycle assessment (LCA) study of heterogeneous and homogenous Fenton processes for the treatment of pharmaceutical wastewater, *Journal of Cleaner Production*, 124, 21-29.
- Rodriguez, O., Villamizar-Gallardo, R., García R., and (2016), Life cycle assessment of four potable water treatment plants in northeastern Colombia, *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 11(2):268-278.
- Sharaai, A.H., Mahmood N.Z., and Sulaiman, A.H. (2010), Life cycle impact assessment (Lcia) in potable water production in malaysia: potential impact analysis contributed from production and construction phase using eco-indicator 99 evaluation method, *World Applied Sciences Journal*, 11 (10): 1230-1237.
- Ortiz, M., Raluy, R.G., and Serra, L. (2007), Life cycle assessment of water treatment technologies: wastewater and water-reuse in a small town, *Desalination*, 204(1):121-131.
- Tarnacki, K., Melin, T., Jansen, A. E., Medevoort, and J. Van. (2011), Comparison of environmental impact and energy efficiency of desalination processes by LCA, *Water Science and Technology: Water Supply*, 11 (2):246-251.
- Theregowda, R., Vidic, R., Dzombak, D.A., and Landis, A.E. (2014), Life cycle impact analysis of tertiary treatment alternatives to treat secondary municipal wastewater for reuse in cooling systems, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 34(1):178-187.
- Vince, F., Aoustin, E., Bréant, P., and Marechal, F. (2008), LCA tool for the environmental evaluation of potable water production, *Desalination*, 220:37-56.
- Zang, Y.W., Li, Y., Wang, C., Zhang, W.L., and Xiong, W., (2015), Towards more accurate life cycle assessment of biological wastewater treatment plants: a review, *Journal of Cleaner Production*, 107, 676-692.