

Sıfır atığa doğru: Su ürünleri yetiştiriciliğinde sürdürülebilir atık yönetimi

Towards zero waste: Sustainable waste management in aquaculture

Hijran Yavuzcan Yıldız^{1*} • Serap Pulatsü²

¹ Ankara University, Faculty of Agriculture Department of Fisheries and Aquaculture, 06100, Ankara, Türkiye

 <https://orcid.org/0000-0001-6567-7467>

² Ankara University, Faculty of Agriculture Department of Fisheries and Aquaculture, 06100, Ankara, Türkiye

 <https://orcid.org/0000-0001-5277-417X>

*Corresponding author: yavuzcan@ankara.edu.tr

Received date: 11.02.2022

Accepted date: 05.04.2022

How to cite this paper:

Yavuzcan Yıldız, H., & Pulatsü, S. (2022). Towards zero waste: sustainable waste management in aquaculture. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 39(4), 341-348. DOI: [10.12714/egejfas.39.4.11](https://doi.org/10.12714/egejfas.39.4.11)

Öz: Su ürünleri yetiştiriciliğine artan gereksinime paralel olarak artan üretim miktarı, işletmelerin atık miktarında da doğrusal bir artışa neden olmaktadır. Bu durum, yoğun su ürünleri yetiştiriciliğinde atık suların etkin bir şekilde arıtımı konusunu öne çıkarmaktadır. Günümüzde su ürünleri yetiştiriciliği kaynaklı atık suların arıtımında, geleneksel fiziksel ve kimyasal yöntemlerin yerine, ekosisteme duyarlı ve besin zincirinin farklı seviyelerinde üretimi devreye sokan sistemler daha fazla benimsenmeye başlanmıştır. Atık su içinde bulunan besin elementlerinin farklı bir gıda üretimiyle döngüye katılması, sıfır atık yaklaşımının esasını oluşturmaktadır. Su ürünleri yetiştiriciliği yapan işletmelerin çıkış sularını kullanan entegre üretim sistemleri (örneğin; akuaponik) atık içinde bulunan besin elementlerinin tekrar geri kazanımını sağlamaktadır. Entegre sistemler, su ürünleri atık sularının arıtımında hem atık içinde besin elementlerinin biyomasa dönüşümünü sağlamakta hem de çevreyle uyumlu arıtım yöntemi olarak değer kazanmaktadır. Su ürünleri yetiştiriciliği çıkış suları, entegre sistemler yardımıyla balık yanında ikili (örneğin; balık+midye) ya da üçlü (örneğin; balık+midye+yosun) yetiştiricilikte kullanılabilir. Su ürünleri yetiştiriciliği çıkış sularının yapay sulak alanlarda ya da bitki lagünlerinde belli besin elementlerinin azaltılması amacıyla kullanılması da sürdürülebilir yetiştiricilik ve atık su arıtımı için uygun yaklaşımlar arasındadır.

Bu derleme çalışmasında, su ürünleri yetiştiriciliğinden gelen atık suların arıtımına yönelik mevcut ve ekolojik bazda yenilikçi teknolojiler ele alınmış; sürdürülebilir su ürünleri yetiştiriciliği ve çevreyle uyumlu atık arıtımı için yapay sulak alanlar ve entegre multi-trofik yetiştiricilik sistemlerinin pratikte kullanımının artırılması gereği vurgulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Su ürünleri yetiştiriciliği, atık su arıtımı, akuaponik, entegre multi-trofik sistemler

Abstract: Increases in aquaculture production due to higher demand for aquatic foods result in an increase in the amount of aquaculture wastewater. This situation highlights the need for the effective treatment of wastewater in sustainable aquaculture. Today, instead of traditional physical and chemical methods in the treatment of wastewater originating from aquaculture, ecosystem-sensitive and by-product-oriented systems have begun to be adopted. The main principle of the zero-waste approach is the recycling of the nutrients in the wastewater to produce another food. In this new innovative approach, the production of other organisms from the different trophic levels using the wastewater of aquaculture in the integrated multi-trophic systems (such as aquaponics) is possible to recycle the nutrients. It has been considered the integrated multi-trophic systems (IMTA) more valuable as these systems can be used both in environment-friendly wastewater treatment and in the conversion of nutrients in wastewater to biomass. The nutrients such as nitrogen and phosphorus in aquaculture wastewater can be utilized to produce two organisms (i.e. fish+mussel) or three organisms (i.e. fish+mussel+seaweed) through IMTA. Aquaculture wastewater can be used to reduce the nutrients in constructed wetlands and plant lagoons representing the reasonable approach for sustainable aquaculture and wastewater treatment.

Here, the innovative approach to sustainable aquaculture wastewater treatment was reviewed for the current and innovative technologies. It was emphasized that the need for environment-friendly wastewater treatment Technologies such as aquaponics, enlargement of constructed wetlands, or increase in using the integrated multi-trophic production systems (IMTA) in practice are recommended for sustainable aquaculture.

Keywords: Aquaculture, wastewater treatment, aquaponics, integrated multi-trophic systems

GİRİŞ

Su ürünleri yetiştiriciliğinde 'suyun kendisinin üretim ortamı' olması nedeniyle yeterli ve sağlıklı suyun muhafazası, diğer tarımsal faaliyet alanlarından daha fazla önem taşımaktadır. Sürdürülebilir su ürünleri yetiştiriciliği, öncelikle su kaynaklarının akılcı kullanımına ihtiyaç duymaktadır (Yavuzcan vd., 2020). İklim değişikliğinin beklenen etkileri, ekonomik belirsizlikler ve doğal kaynaklar üzerindeki baskı gibi olumsuz koşullar altında, artan dünya nüfusunun nasıl besleneceği önemli ve global bir sorun olarak çözüm beklemektedir. Bu çerçevede insan tüketimine sunulacak su

ürünleri yetiştiriciliğinin stratejik önemi daha iyi kavranabilir. Yetiştiricilik yoluyla elde edilen su ürünleri gıda güvencesine ve sağlıklı beslenmeye sağlayacağı katkılar bağlamında vazgeçilmez bir gıda üretim kolu olarak varlığını büyüyerek devam ettirecektir. Bu bağlamda, su ürünleri yetiştiriciliğindeki artış, çıkış sularının askıda katı madde (AKM), toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP) yükünde de artışla sonuçlanmaktadır. Karada kurulu su ürünleri işletmesi çıkış sularının, sucul ekosisteme olan etkileri arasında, alıcı ortamın su-sediment kalitesinin bozulması yanında bentik organizma

ve floranın bozulması ile sonuçlanan ötrofikasyon önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle artan yoğun yetiştiricilik faaliyetleri sonucuna paralel olarak, işletmelerin çıkış suları yönetiminde uygulanmakta olan birtakım uygulamalar ve/veya arıtım teknolojileri de sürdürülebilir arıtım teknolojilerine doğru evrilmiştir.

Geleneksel atık su arıtımında kullanılan fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler, su ürünleri yetiştiricilik sistemlerine de uygulanmaktadır. Bu bağlamda, son yıllarda çıkış suyu yerine 'atık su' terimi de sıkça kullanılır hale gelmiştir. Atık sularının arıtımında, farklı ülkelerde farklı arıtım teknikleri kullanılmakta ve bazı yasal düzenlemelerle de izlenmektedir. Biyolojik yöntemler ucuz ve çevre dostu yöntemler olarak ön plana çıkmaktadır (Adekanmi vd., 2020; Sikder vd., 2016). Günümüzde sürdürülebilir su ürünleri yetiştiriciliği ve bu yetiştiricilik faaliyetinden kaynaklanan atıkların sürdürülebilir arıtımı için yenilikçi yaklaşımlar çerçevesinde atık içinde bulunan besin elementlerinin döngüsel olarak bitkiler aracılığıyla yararlı besin elementi formuna dönüştürülmesi ve sonuçta sıfır atığa ulaşma anlayışı benimsenmektedir. Atık içinde bulunan besin elementlerinin besin zincirinin farklı seviyelerindeki organizmaların üretiminde kullanımı entegre multi-trofik sistemler olarak ilgi görmektedir. Bu sistemlere en güncel örnek akuaponik ve özellikle deniz için entegre multi-trofik sistem (IMTA) verilebilir. Belirtilen teknolojiler yeni olmasına rağmen çıkış sularındaki besin elementi yükünün kontrolünde başka bir deyişle besin maddelerinin uzaklaştırılmasında yapay sulak alanların kullanımı da çevreyle uyumlu entegre sistemlerin farklı bir şeklidir (Cripps ve Bergheim, 2000; Hernandez vd., 2004; Sindilariu, 2007; Tom vd., 2021).

Bu çalışmada, sürdürülebilirlik ekseninde su ürünleri atıklarının arıtımına ilişkin güncel uygulamalar ile doğayla uyumlu, sıfır atık yaklaşımı çerçevesinde döngüsel yetiştiricilik sistemlerinin atık su arıtımında kullanılabilirliği anlatılmıştır. Özellikle atıklarda bulunan değerli besin elementlerinin yeniden üretim döngüsüne katılmasına ilişkin yenilikçi yaklaşımlar vurgulanmıştır.

SU ÜRÜNLERİ YETİŞTİRİCİLİĞİ ATIK SULARININ İÇERİĞİ VE MEVCUT ARITIM UYGULAMALARI

Atık sulardaki biyo-katılar

Su ürünleri yetiştiriciliğinde atık suların ana bileşenlerini yemler, kimyasallar ve patojenlerin de dahil olduğu tüm mikroorganizmalar oluşturmaktadır. Atıklar katı ve çözünmüş formları kapsamakta; katı atıklar yem, tüketilmemiş yem ve dışkılarından kaynaklanmaktadır. Katı atıkların bir bölümü askıda kalırken bir kısmı çökmektedir. Atık sulardaki çözünmüş formlar ise besin elementlerini kapsamakta olup, azot (N) ve fosforun (P) kaynağını genellikle tüketilmeyen yemler ve balık dışkıdır (Ahmad vd., 2022).

Genel olarak, bir uygulamaya tabi tutulmamış çıkış sularındaki askıda katı madde konsantrasyonları, yetiştiricilik sisteminin yönetimine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Katı maddelerin uzaklaştırılması işlemi sedimentasyon, kum veya mekanik filtrasyon şeklinde gerçekleştirilirken, sualtı biyofiltreler, damlatmalı filtreler, dönen biyolojik kontaktörler ve akışkanlı yatak reaktörleri de organik maddenin oksidasyonu, nitrifikasyon veya denitrifikasyon amacıyla uygulanmaktadır (Sindilariu, 2007). Adı geçen separatör ve damlatmalı filtrelerin etkinliği askıda katı madde için %75, sualtı filtrelerin ise %84 olarak bildirilmiştir (Tablo 1). Damlatmalı filtre ve ozonlamanın birlikte kullanıldığı sistemlerde ise, amonyum azotu, nitrit – azotu ve nitrat azotu için etkinliğin sırasıyla (%) 31; 13,2 ve 50 olduğu belirtilmiştir (Jegatheesan vd., 2011).

Tablo 1. Su ürünleri yetiştiriciliği atık sularında farklı filtre sistemlerinin etkinliği (Jegatheesan vd., 2011)

Table 1. The efficiency of different filtering methods of aquaculture wastewater (Jegatheesan vd., 2011)

Arıtım yöntemi	İşlem	Etkinlik (%)
Separatör ve damlatmalı filtre	Nitrifikasyon ve askıda katı madde uzaklaştırma	Askıda katı madde:75 KOI: 2-25
Damlatmalı filtre	Nitrifikasyon- denitrifikasyon	90
Akışkan yataklı filtre	Nitrifikasyon- denitrifikasyon	-
Damlatmalı filtre	Nitrifikasyon-denitrifikasyon	-
Sualtı filtre	Denitrifikasyon	84
Damlatmalı filtre ve ozonlama	Azot uzaklaştırma	NH ₄ -N=31 NO ₂ -N=13.2 NO ₃ -N=50

Atık sularda bulunan besin elementleri

Çıkış sularındaki besin elementi (azot, fosfor gibi) yükü, yetiştiricilik sistemine bağlı değişim göstererek alıcı ortamlarda olumsuz etkilere yol açabilen özellikle ötrofikasyonu tetikleyen bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Kafeslerde balık yetiştiriciliğinde, yem dönüşüm oranı 1.5 ve N-P düzeyi %7.2-%0.9 olan yemler kullanıldığında; ton/balık başına sırasıyla; 61 çözünmüş -N, 2.2 kg çözünmüş -P ve 17 kg partiküler-N, 7.3 kg partiküler-P'un alıcı ortama bırakıldığı (Ackefors ve Enell, 1990) tespit edilmiştir. Kesikköprü Baraj Gölü'nde geleneksel pelet yem kullanılarak yapılan gökkuşağı alabalığı yetiştiriciliğinde, azot yükü 56.00-62.92 kg/ton balık ve fosfor yükü 10.66-12.17 kg/ton balık; ekstrude yemin kullanıldığı kafeslerde ise azot yükü 33.47-25.97/ton balık ve fosfor yükü 7.32-7.96 kg/ton balık olarak tahmin edilmiştir. Özellikle azot yükündeki önemli düzeydeki azalma, ekstrude yemin sindirilebilirliğinin de yüksek olması bağlamında çevresel etki bakımından daha olumlu olduğu vurgulanmıştır (Aşır ve Pulatsü, 2008). Çıkış suyunda katı maddelerin genel olarak, %7-%32'si toplam azot (TN), %30-%84'ü toplam fosfor (TP) olarak bildirilmiştir. Besin elementleri ile ilgili kritik nokta,

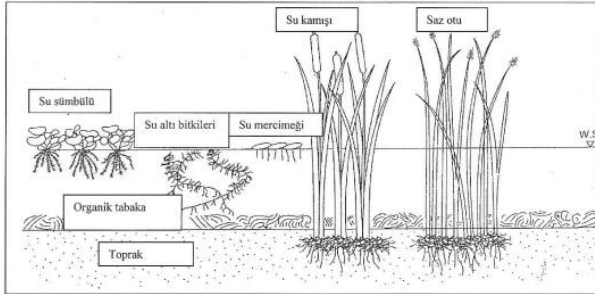
çözünmüş haldeki besin elementlerinin, partikül ayırma teknikleri ile uzaklaştırılmamasıdır (Cripps ve Bergheim, 2000).

Çıkış sularındaki katı madde ve besin elementi miktarı, yem kaynaklı atıklar ile doğrusal bir artış göstermektedir ve doğal olarak yemde bulunan besin elementlerinin miktarı ve kompozisyonu da etkilidir (Pulatsü ve Kaya, 2016). Örneğin, yüksek enerjili ekstrude yemlerin kullanımı, azotlu atıkların azaltılması için yemdeki sindirilebilir proteinin artırılması ve yeterli düzeyde sindirilebilir fosfor içeriğinin ayarlanması gibi girişimlerle çıkış sularının kalitesi iyileştirilebilmektedir (Cho ve Bureau, 2001).

SU ÜRÜNLERİ YETİŞTİRİCİLİĞİ ATIK SULARINDA ÇEVREYLE UYUMLU ARITIM UYGULAMALARI

Yapay sulak alanlar

Antropojenik kaynaklı ötrofikasyonu önlemede kullanılan yapay sulak alanların işlevleri, su ürünleri işletmeleri çıkış suyunun yönetiminde de benzer olup ana prensip, sudaki besin elementlerinin bitkiler tarafından kullanılmasıdır (Şekil 1). Çeşitli biyotik ve abiyotik prosesler, sulak alanlardaki kirleticilerin uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Nitrifikasyon ve denitrifikasyon gibi mikrobiyal mineralizasyon ve transformasyon süreçleri ile bitkiler tarafından alım işlemi temel biyotik prosesler iken, kimyasal çökme, sedimentasyon ve substrat adsorpsiyonu abiyotik proseslerdir.



Şekil 1. Yapay sulak alan kesiti (Ayaz vd., 2011)

Figure 1. Constructed wetland section (Ayaz et al., 2011)

Çıkış sularının sulak alanlara iletilmeden önce birincil çöktürme sisteminden geçirilmeleri zorunluluğu ve nispeten geniş bir araziye ihtiyaç duymaları gibi bazı dezavantajları olsa da, düşük yatırım maliyeti- enerji tüketimi ve bakım ihtiyaçları, görsel zenginlik, doğal yaşam habitatına destek sağlaması gibi avantajları da söz konusudur. Özellikle sulak alanların büyüklüğünün belirlenmesi önem taşımakta olup, kirlenmiş işletme çıkış sularının arıtımı için havuz alanından 0.7-2.7 kat daha fazla bir sulak alan büyüklüğüne ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir (Lin vd., 2002). Çıkış suları ile besin elementi yükleme oranı 30 kg/m² yıl olduğunda, askıda katı maddenin %95, azotun %80 ve fosforun %90 oranında uzaklaştırıldığı (Miller ve Simmens, 2002) ifade edilmiştir. Sindilariu vd. (2007) tarafından, toplam askıda katı madde için yüzey-altı akışlı sulak alanlarda, standart mekanik arıtım etkinliğinin mikro-eleme (ayırma) uygulaması ile benzer olduğu belirtilmiştir.

Hidrolik yükleme hızı 1.8–13.5 cm/gün olan bir sulak alanda ortalama uzaklaştırma etkinliği; NH₄-N için %86–98, NO₂-N için >%99.8, NO₃-N için %2–99 ve toplam inorganik azot (TİN) için %95–98 olarak bildirilmiştir. Sulak alan, kimyasal oksijen ihtiyacı-KOİ (%25–%55), askıda katılar (%47–%86) ve klorofil-a (%76–%95) gibi parametrelerin uzaklaştırılmasında oldukça etkin olmuştur (Lin vd., 2002). Sindilariu vd. (2009), yapay sulak alanların toplam fosfor, biyokimyasal oksijen ihtiyacı, kimyasal oksijen ihtiyacı, toplam askıda madde ve toplam amonyak azotu için %35'den fazla arıtım etkinliğine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Jegatheesan vd. (2011) yapay sulak alanların NH₄-N arıtımında %57-66, NO₂-N arıtımında %83-94 ve NO₃-N arıtımında %68 düzeyinde etkili olabileceğini saptamışlardır. Tom vd. (2021) ise azot bileşikleri içeren çıkış sularının arıtımı için önerilen yapay sulak alanların etkinliğinin oldukça yüksek olduğunu (NH₄-N: %86-98 ve NO₂-N: %99) belirtmişlerdir.

Su ürünleri işletmeleri çıkış sularının arıtımı için kullanılan filtrelerin ve sedimentasyon havuzlarının çözünmüş besin elementleri ve tuzlar açısından yeterli etkiye sahip olmadığı bilinmektedir (Lybery vd., 2007). Farklı konsantrasyonlarda toplam azot, toplam fosfor ve sodyum klorür bulunan gökkuşuğu alabalığı işletmeleri çıkış sularını, *Juncus kraussii* (sulak alanlarda yetişen bir bitki) barındıran yüzey-altı akışlı yapay sulak alana bırakılan bir çalışmada, yaklaşık bir ay sonra, toplam azot, toplam fosfor ve sodyum klorür miktarları sırasıyla %69, %88.5 ve %54.8 oranında azalmış ancak *J.kraussii*'nin büyümesi, tuzluluk konsantrasyonundan olumsuz etkilendiğinden yüksek tuzluluğa tolerans gösteren daha farklı türlerin kullanımı önerilmiştir. Ayrıca tuzluluk artışı toplam azotun uzaklaştırılmasında etkili bulunmamasına karşın toplam fosfor uzaklaştırma etkinliğini azaltmaktadır (Lybery vd., 2007).

Danimarka gibi bazı Avrupa ülkelerinde su ürünleri yetiştiricilik ünitelerinin çıkış noktalarında bitki lagünleri oluşturulmaktadır. Bitki lagünlerinde üretilen bitkilerin ticari bir değeri yoktur. Bitki lagünleri, zeminde yabancı bitkilerin gelişebileceği toprak tabanlı havuzları, kanalları ifade etmektedir. Bitki lagünleri, nitratın azota dönüşümü ve bitki biyoması için fosfor alımı açısından önemlidir. Fakat bitki lagünlerinin dibinde ya da dibe yakın kısmında anaerobik şartlar oluştuğunda amonyağın nitrate dönüşümü yeterince etkin olmamaktadır (Jokumsen ve Svendsen, 2010). Su ürünleri işletmeleri çıkış sularının yapay sulak alanlardan veya bitki lagünlerinden geçirildikten sonra doğal sulara ulaşması çevreyle uyumlu bir teknik olarak yaygınlaştırılabilir.

Akuaponik sistemler

Akuaponik, hidroponik ile kapalı devre yetiştiricilik sistemi (RAS) elementlerini bir araya getiren bir sistemdir. Geleneksel hidroponik sistemde (topraksız bitki üretimi) bitkilerin gerekli besin elementlerini alabilmesi için mineral gübre gereklidir. Akuaponik sistemde ise, içinde balık bulunan, bitki gelişimi için yeterli düzeyde besin maddesine zengin balık dışkısı içeren su kullanılır (Yavuzcan Yıldız vd., 2017). Bu kombinasyonun

temel avantajı, bol besin elementi bulunan suyu, geleneksel su ürünleri yetiştiriciliğinde olduğu gibi periyodik olarak temiz su ile değiştirme zorunluluğunun olmamasıdır. Temel ilke olarak, sistemde bulunan bitkilerin gelişiminde yararlanan besin elementlerin en az %50'sinin balık atığı ya da tüketilmemiş yemden gelmesi durumunda üretim sistemi "entegre multi-trofik su ürünleri yetiştiricilik sistemi" veya "akuaponik" olarak sınıflandırılabilir (Palm vd., 2019). Akuaponik sistem, balık, mikroorganizma ve bitkiler arasında bir simbiyozis oluşumuna zemin sağlar. Bu simbiyozis, su ve besin elementlerinin geri kazanımı kullanımı ile sürdürülebilirlik olgusuna katkı sağlar (Şekil 2). Bu sinerjistik etkileşim içinde su ürünleri yetiştiriciliğinin olumsuz ekolojik etkisinden ileri gelen zayıflık, güçlü yöne dönüşür. Akuaponikte oluşturulan kombinasyon ile besin elementi içeren atık çıktısı minimize edilir (Goddek vd., 2015). Ekolojik kapsamda akuaponik sistemler sürdürülebilir gıda üretimine ve yetiştiricilikten çıkan atıkları azaltma konusuna iyi bir örnek teşkil etmektedir (Turcios ve Papenbrock, 2014).



Şekil 2. Akuaponik sistem (Palm vd., 2019)

Figure 2. Aquaponic system (Palm et al., 2019)

Bitkiler gelişimleri için C, H, O, N, P, K, Ca, ve Mg gibi makro besin elementlerine ve Fe, Cl, Mn, Zn ve Cu gibi mikro besin elementlerine ihtiyaç duyarlar. Hidroponik sistemlerde bu elementlerin oranı iyi bilinmektedir ve C, H, ve O hariç iyonik formda sisteme eklenmektedir. Akuaponik sistemde balık dışkısının dönüşümünü sağlayacak mikroorganizma topluluklarına da gereksinim bulunmaktadır. Akuaponik sistemde birkaç farklı besin elementi döngüsünden söz edilebilir, fakat en fazla çalışılmış ve anlaşılmiş olan, biyofiltre seviyesinde olan azot döngüsüdür. Bu döngüde, azot üç farklı forma girebilir: amonyak (NH₃), nitrit (NO₂) ve nitrat (NO₃). Amonyak, balıktan gelen ana boşaltım ürünüdür. Hem iyonize olmamış amonyak hem de nitrit çok düşük dozlarda bile suyun pH'sına bağlı olarak balık için toksik olabilir. Nitrifikasyon sürecinde bazı ototrofik bakteriler (öncelikle Nitroso-bacter, örneğin: *Nitrosomonas* sp.) amonyağı nitrite ve nitriti nitrate (öncelikle Nitro-bacter, örneğin: *Nitrospira* sp., ve *Nitrobacter* sp.) yükseltgenmektedir (Sanchez, 2014; Thorarinsdottir, 2015). Azot dönüşümü sudan amonyağın eliminasyonu sağlar. Nitrat, belirtilen biyodönüşümün bitki için yararlı olabilecek son ürünüdür. Nitrat, çok yüksek dozlar söz konusu

olmadığı sürece balık için toksik değildir. Akuaponikte azotlu ürünler bitki faktörüyle birlikte ele alınır (Sanchez, 2014; Yavuzcan Yıldız vd., 2017). Kapalı devre yetiştiricilik sistemlerinde (RAS) biriken atığın yok edilmesi de önemli bir sorundur. Resirküle/dolaşımli sistemler, çevreye bırakılan atığın daha az hacimde olduğu sistemler olarak ön plana çıkarılmaktadır. Bu sistemlerde atık hacminin az olmasına karşın birim deşarj hacmine düşen kirlilik yükü (organik madde, çözünmüş besin elementleri) daha fazladır. Bu tip bir konsantrasyon deşarj çevre için daha tehlikelidir. Akuaponik sistemlerde ise bu besleyici elementlerin önemli bir kısmı bitki tarafından kullanılır, böylelikle çevreye bırakılan atık su çok daha az besin elementi içerir. Lennard ve Leonard (2006), akuaponik sistem (çakıl taşı sistemi) kullanıldığında, sadece balık (Tatlısu morinası, *Maccullochella peelii*) üreten sistemlere göre nitrat birikiminin %91 civarında azaldığını kanıtlamışlardır (Tablo 2). Ancak, akuaponik sistem tiplerine (çakıl taşı gibi maddelerin kullanıldığı dolgu basit teknik, besin film tekniği ya da sal tekniği gibi) bağlı olarak besin elementi uzaklaştırma başarısı da değişmektedir.

Tablo 2. Akuaponik ve sadece balık üretilen sistemde nitrat birikimi (Lennard ve Leonard, 2006)

Table 2. Nitrate deposition in aquaponic system and only-fish culture system (Lennard and Leonard, 2006)

Parametre	Sadece balık (tatlısu morinası) yetiştiriciliği	Akuaponik (çakıl taşı dolgu, basit teknik)
Balık yem değerlendirme katsayısı	1.01±0.08	1.07±0.07
Marul ürünü (kg/m ²)	-	5.05±0.25
NO ₃ birikimi (mg/l)	51.23±0.58	4.63±2.85
NO ₃ uzaklaştırma (%)	-	90.9

Akuaponik sistemde bulunan çözünmüş besin maddeleri bitkiler tarafından kullanıldığından biyolojik ve kimyasal filtrasyon ihtiyacı azalır. Bu çerçevede, su kalite yönetiminin farklı bir boyutta incelenmesi gerekir. Balık dışkısından gelen çözünmüş halde bulunan besin elementlerinin bitki gelişimi için kullanılabilirliği ve bitki biyomasını artırdığı, bağlantılı olarak gıda üretiminde oluşan çevresel etkinin azaltılabileceği bilinmektedir. Akuaponik balık ve bitkinin birlikte üretildiği entegre bir sistem olduğundan balık yetiştiriciliğinden gelen besin elementi miktarı ile bitkinin alacağı besin elementlerinin dengelenmesi bakımından balık türü ile bitki türü uyumu önemlidir. Akuaponik sistemde 1 kg balık yetiştiriciliği için harcanan yeme karşılık çıkış suyunda bulunan besin elementleriyle 7 kg bitki biyoması üretilebilmektedir (Wilson, 2005).

Su ürünleri yetiştiriciliğinde kullanılmış çıkış suyundan inorganik azot ve fosfat uzaklaştırılmasında, akuaponik performansı, sistemde su ispanağı (*Ipomoea aquatica*) ve yeşil hardal (*Brassica juncea*) bitkilerinin üretimi için incelenmiştir. Su ispanağı üretilmesi durumunda toplam amonyak azotu (NH₃-N), nitrit azotu (NO₂-N), nitrat azotu (NO₃-N) ve ortofosfatın (PO₄) sırasıyla %78.32–85.48, %82.93–92.22, %79.17–87.10, ve %75.36–84.94 oranında, yeşil hardal otu üretimi durumunda ise %69.0–75.85, %72.49–79.34, %66.67–80.65 ve %66.79–77.87 oranında azaldığı saptanmıştır. Akuaponik sistemlerde, kökleri daha fazla tutunma alanı sağlayan, atık suyu yeterli süre tutabilen, askıdaki maddelerin çökmesini sağlayan, kirleticinin adsorbsiyonu, alımı ve asimilasyonu için uygun yüzey alanı sağlayan bitkilerin inorganik azot ve fosfat uzaklaştırmada daha başarılı olduğu bildirilmiştir. Bu koşula su ispanağı iyi bir örnek teşkil etmektedir (Enduta vd., 2011). Cohen vd. (2018), tilapia ve marulun akuaponik ortamda birlikte yetiştiriciliği ile geleneksel olarak marulun serada ve tilapyanın da havuzda ayrı ayrı üretildiği koşullar için teorik bir modelleme çalışması yapmışlardır. Bu modellemede 5 ton marul ve 1 ton tilapya üretildiği varsayılmıştır. Sonuçlara göre akuaponik üretimle su kullanımının, ötrofikasyon riskinin ve bölgesel çapta ekolojik ayak izinin, ayrı ayrı yapılan tarımsal üretime kıyasla azalacağı öngörülmüştür. Benzer şekilde Greenfeld vd. (2022) tarafından yapılan analizlerde 54 ton marul ve 0.75 ton akvaryum balığının akuaponikte üretilmesi durumunda çevresel etkinin ayrı ayrı yapılan üretime göre yarı yarıya azalacağı öngörülmektedir.

Akuaponik sistemlerde azot transformasyonunda bitkinin türü de önemlidir. Bitki kökünün yüzey alanının geniş olması nitrifikasyonda görev alan bakterilerin gelişimi için daha uygundur. Örneğin, domates ile lahana bitkisinin azot kullanma etkinliği karşılaştırıldığında domatesin köklerinin daha geniş olması nedeniyle daha başarılı olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni domatesin kök yüzey alanında daha bol nitrifikasyon bakterisi bulunmasıdır (Hu vd., 2015). Karada kurulu deniz çiftliklerinde ise yüksek düzeyde tuza dayanıklı bitkiler sulak alanlarda biyofiltre olarak fayda sağlayabilmektedir (Buhmann ve Papenbrock, 2013).

Denizlerde özellikle kafeslerde su ürünleri yetiştiriciliğinin artması doğal olarak sürdürülebilirlik hakkında çok yönlü sorunları gündeme getirmektedir, bu sorunların başında da besin elementlerince zengin olan kafeslerde kullanılmış olan suların ekosisteme olan etkileri gelmektedir. Entegre multi-trofik su ürünleri yetiştiriciliği son zamanlarda hız kazandığından su ürünleri yetiştiriciliği çıkış sularının fitoremediasyonunda halofit bitkilerin kullanımı, özellikle akuaponik sistemler içinde kullanımı öne çıkmaktadır.

Alglerin kullanımı

Alglerin entegre edildiği atık su arıtımı, kimyasal arıtım gibi birtakım olumsuz durumlara yol açmayan ve toksik olmayan bir yöntem olup, atık suların arıtımında ucuz ve çevre dostu yöntemlerden biridir. Bu amaçla *Olithodiscus*, *Chlorella*, *Tetraselmis*, *Chaetoceros*, *Pyramimonas*, *Scenedesmus*,

Phormidium, *Botryococcus*, *Chlamydomonas* ve *Spirulina*'nın atıkların uzaklaştırılmasında etkin ve umut verici olarak kullanıldığı bildirilmiştir (Sikder vd., 2016; Adekanmi vd., 2020). Adekanmi vd. (2020), *Coelastrum* morum ile muamele edilmiş atık suya ilişkin biyolojik arıtımın, bu sudaki besin elementi ve diğer kirleticileri uzaklaştırmada kullanılabileceğine işaret etmişlerdir. Bununla birlikte bitkili ve bitkisiz ortama bırakılan balıkçılık işletmesi atık sularında, bitkisiz ortamda yalnızca elektrik iletkenliği ve pH değerlerinde bir düşme olduğu, *Azolla caroliniana* ve *Salvinia auriculata*'nın bulunduğu bitkili ortamda ise çıkış suyu kalitesinin iyileştirilmesinde belirtilen bitkilerin düşük bir etkiye sahip olduğu bildirilmiştir (Toledo ve Penha, 2011).

Mekanik sedimantasyon ve biyolojik arıtımın birlikte çıkış suları arıtımında kullanıldığı havuzlarda, arıtım verimlilikleri askıda katı madde için % 54, toplam fosfor için % 35 olarak belirtilmiştir (Sindilariu, 2007). Jusoh vd. (2019), su ürünleri işletmeleri çıkış sularının arıtımı için bir arada kullandıkları fiziksel ve biyolojik yöntemleri –yeşil teknoloji- olarak ifade etmişlerdir. Besin elementlerince zengin çıkış sularının temel etkisinin ötrofikasyon üzerinde olduğunu, bu sorunun ise besin elementlerini kullanan mikroalglerin arıtmadan sonra hasat edilmesi ile aşılabileceğini bildirmişlerdir.

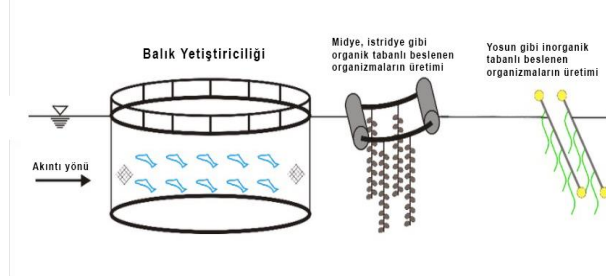
Entegre multi-trofik sistemler (IMTA)

Entegre multi-trofik sistemler, temel olarak iki ya da daha fazla sayıda ürünün bütünlüklü bir ortamda birlikte üretilmesini ifade eder. Su ürünleri yetiştiriciliği alanında entegre multi-trofik sistemler, balık ürününün yanı sıra bitkisel üretimin de sağlandığı akuaponik ve özellikle denizlerde balık, midye ve yosun gibi farklı trofik seviyelerdeki ürünlerin üretildiği entegre multi-trofik su ürünleri yetiştiriciliği (IMTA) olarak karşımıza çıkmaktadır. Entegre multi-trofik sistemlerin su ürünleri yetiştiriciliği atık sularının zararlı etkilerinin azaltılmasında kullanılabileme potansiyeli günümüz koşullarında yoğun ilgi görmektedir.

Entegre multi-trofik yetiştiriciliğin temel prensibi, su ürünleri yetiştiriciliğinden gelen atık suda bulunan organik partikül ve çözülmüş besin elementlerinin trofik zincirin daha alt seviyelerinde bulunan türler tarafından alınmasıdır. Akuaponik sistemde olduğu gibi burada da simbiyotik ilişki söz konusudur. IMTA'de farklı trofik seviyelerdeki çeşitli organizmaların yetiştiriciliği ile doğal ekosistem taklit edilmiştir. IMTA'nın dayanağı esasen ekosistem taklididir (Chopin, 2013). Basit olarak, IMTA; balık, kabuklu (midye, istiridye gibi) ve deniz yosunlarının aynı alan içinde üretilmesini ifade eder. Burada balık atıkları içinde bulunan inorganik besin elementlerinden yosun, fazlaca bulunan organik besin elementlerinden ise midye, istiridye gibi süzerek beslenen organizmalar yararlanır (Şekil 3).

Sistem kafes çiftliklerinden gelen partikül organik ve inorganik besinsel atıkların geri dönüşümü için üretime alınan balıkların yanı sıra atıkların uzaklaştırılması için fayda sağlayan diğer türlerin (süspanse tüketiciler, makroalgler gibi)

bir arada yetiştiriciliğini sağlama prensibine dayalıdır. Böylece tek bir türün yetiştirilmesine ve ihtiyaçlarına odaklanmak yerine, besin zincirinin farklı seviyelerinden tamamlayıcı türlerin üretim kombinasyonu ile doğal ekosistemi taklit ederek geri dönüşüm kavramına dayalı bir sistem oluşturulur.



Şekil 3. Entegre Multi-trofik Yetiştiricilik Sisteminde (IMTA) üretilen organizmaların yerleşimi (Angel ve Freeman, 2009)

Figure 3. Configuration of the Organisms in Integrated Multi-Trophic System (Angel and Freeman, 2009).

Entegre multi-trofik sistemler (IMTA) hem çevreye olan olumsuz etkinin azaltılmasına hem de ürün seçenekleri sınırlı bir alanın üretim kapasitesini artırmaya imkân sağlamasıyla çevresel ve ekonomik yönden avantaj sağlayarak sürdürülebilir su ürünleri yetiştiriciliğine katkıda bulunur (Sarıpek ve Karayücel, 2015). IMTA gerçekte çok yeni bir uygulama değildir çünkü Asya ülkelerinde yüzyıllardır "polikültür" olarak uygulanmaktadır. Fakat su ürünleri yetiştiriciliğinden kaynaklanan kirlilik, hastalık ve ekonomik sıkıntılar, polikültür uygulamasının özellikle batıda yeniden gözden geçirilmesini gerekli kılmıştır. IMTA'nın, yenilikçi bir atık yönetim modeli ve yetiştiricilik verimini artırıcı gıda üretim sistemi olduğu dikkate alınmaktadır (Çantaş ve Yıldırım, 2019). Ferreira vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada, off-shore çipura (*Sparus aurata*) ve Pasifik istiridyasının (*Crassostrea gigas*), ayrı ayrı ve IMTA kapsamında üretilmesi durumunda çevresel çıktılar karşılaştırılmıştır. Tek başına off-shore çipura yetiştiriciliğine göre sisteme istiridye ekleyerek IMTA'ye dönüştürülmesi durumunda organik birikimde bariz bir azalma meydana gelmiştir. Reid vd. (2013) tarafından yapılan araştırmalar, IMTA'nın çevreye olan etkileri ile ilgili olumlu sonuçları net olarak ortaya koymaktadır. Atlantik salmonu (*Salmo salar*) kafeslerinin yakınında kelp (*Alaria esculenta* ve *Saccharina latissima*) yetiştirilmesi durumunda her bir kg kelpin 2.3-4.4 kg çözünmüş azotu uzaklaştırdığı saptanmıştır. IMTA, uygulamada bazı teknik kritik noktalar içermektedir. Örneğin, IMTA sisteminde deniz hıyarı (*Holothuria scabra*) ile *Sciaenops ocellatus* türü balıkların birlikte yetiştiriciliğinde, partikül olarak bulunan balık dışkısının %100 uzaklaştırılabilmesi için her bir kg balık ürününe karşı 1.3 kg deniz hıyarı bulunması gereklidir. Ancak deniz hıyarının stok yoğunluğu az da olsa atık yükünün ve olumsuz bentik etkinin azaltılmasında kesinlikle yararlı etkilerinin bulunduğu bildirilmiştir (Chary vd., 2020). Doğu Akdeniz'de su ürünleri (çipura/levrek) yetiştiriciliği alanı olarak belirlenen alanlarda (Yunanistan) balık çiftliklerinden gelen atıkların artışıyla dinoflagellat artışı olduğu, bu artışın besin ağının değişimini gösterdiği Tsagaraki vd.

(2011) tarafından ortaya konulmuştur. Çevreye etkinin en aza indirilmesini sağlayan ve farklı trofik seviyelerde ekolojik işlevi olan yetiştiricilik sistemlerinin su ürünleri üretim çiftliklerine entegrasyonu en fazla faydayı sağlayacak yenilikçi yaklaşım olarak dikkate alınmaktadır. Karada ve su içinde kurulacak IMTA sistemlerinin önümüzdeki 30 yılda özellikle kirliliğe karşı tercih edilen ve kullanımı yaygınlaşacak bir yetiştiricilik sistemi olacağı öngörülmektedir (Costa-Pierce, 2013).

SONUÇ

Su ürünleri yetiştiriciliğinden kaynaklanan atık suların arıtımı, su ürünleri yetiştiriciliğinin sürdürülebilirliği ile ilgili kritik faktörlerin başında gelmektedir. Bu kritik konu kapsamında çevreye uyumlu ancak döngüsel olmayan biyoreaktör gibi biyolojik arıtım uygulamaları ile adsorpsiyon, ileri oksidasyon prosesleri, membran teknolojileri gibi fizikokimyasal arıtım metotları da etkin arıtım teknikleri olarak önerilmektedir (Ahmad vd., 2022). Yetiştiricilik atık sularının arıtımında, yine çevreye en düşük düzeyde etki gösteren, ancak maliyeti yüksek, düşük-basınçlı polieterefülfon membranlar (Nora'aini vd., 2005), ters osmoz membran (Cao vd., 2007), potasyum ferrata dayalı arıtım uygulamaları (Tanveer vd., 2016) mevcuttur ancak, henüz pratik anlamda geniş çapta uygulama alanları yetersizdir. Bu tekniklerin kullanımını sınırlayıcı ana faktör maliyetinin yüksek oluşudur. Buna karşın çevreye uyumlu ve döngüsel teknikler (akuaponik, IMTA gibi) aynı zamanda atık bünyesinde bulunan besin elementlerinin yeni bir ürüne dönüşümünü sağlayan arıtım yöntemleri uygulama ve verimlilik açısından daha değerlidir. Bu bağlamda, işletmelerin yetiştiricilik kapasitesine bağlı olarak artış gösteren çıkış sularının arıtımında; alıcı ortamın sağlıklı bir şekilde muhafaza edildiği, karasal ya da sucul bitki ile birlikte su ürünleri yetiştiricilik ağırlıklı ve ekosisteme duyarlılığı yüksek yaklaşımlar hız kazanmıştır. Bu noktada aşağıdaki bazı çıkarımların dikkate alınmasının uygun olacağı öngörülmektedir:

1. Su ürünleri yetiştiriciliği faaliyetlerinin konumlandırılması, inşası, işletilmesi ve işlenmesi hakkında ayrıntılı rehberlik sağlayan- İyi Yönetim Uygulamaları (IYU)- çevresel etki düzeyini azaltma adına su ürünleri işletmeleri çıkış sularının arıtımında da uygulanmalıdır.
2. Sıfır atık yaklaşımı kapsamında azot, fosfor gibi atık su içindeki elementler olmaktan öte, gıda ürününe dönüşecek değerli besin elementleri olarak düşünülmelidir.
3. Yapay sulak alanların atık sudaki nitrit azotunun tamamına yakınının uzaklaştırabilmesi arıtımda başarıyla kullanılabileceğinin bir göstergesi olarak dikkate alınmalıdır.
4. Farklı trofik seviyelerden yararlanmayı ve aynı zamanda farklı organizma ve besinlerin de üretimini sağlayan akuaponik gibi entegre sistemlerde su ürünleri işletmeleri çıkış sularının kullanımı su ürünleri yetiştiriciliğinin sürdürülebilirliğini destekleyen atık arıtım yöntemleri bu bağlamda değerlendirilebilir.
5. Kafeslerde açık denizde yapılan geleneksel su ürünleri yetiştiriciliğine IMTA gibi sistemlerin eklenmesi ile hem su

ürünleri yetiştiriciliğinden gelen organik yükün azaltılmış olması hem de farklı organizmaların yetiştirilmesi şeklinde iki yönlü yarar sağlanması yine çevreyle uyumlu, sürdürülebilir su ürünleri yetiştiriciliği için önem taşımaktadır. Entegre gıda üretim sistemleri (akuaponik, IMTA gibi) yenilikçi yaklaşımlar olarak son yıllarda ivme kazanmakla birlikte, bu sistemlerin uygulamaya aktarılması için gerekli planlamalara öncelik verilmelidir.

6. Atık su içinde bulunan besin elementlerinin, çevreyle uyumlu atık su arıtım sistemleri yardımıyla biyomasa dönüştürülmesi yalnızca çevresel sürdürülebilirlik açısından değil aynı zamanda mali anlamda karlı bir yetiştiricilik modeli olarak değerlendirilmeye alınmalıdır.

7. Bu çerçevede, yetiştiricilik kaynaklı atık sularının döngüsel yetiştiricilikte kullanılarak gıda ürününe dönüştüğü sistem ve yöntemler, sürdürülebilir su ürünlerinin temel prensiplerinden biri olarak benimsenmelidir.

KAYNAKÇA

- Ackefors, H., & Enell, M. (1990). Discharge of nutrients from Swedish fish farming to adjacent sea areas. *Ambio*, 19, 29-35.
- Adekanmi, A.A., Adekanmi, S.A., & Adekanmi, O.S. (2020). Biological treatment of fish pond waste water by *Coelastrum morum*, a green microalgae. *International Journal of Engineering and Information Systems*, 4, 4, 62-77.
- Ahmad, A.L., Chin, J.Y., Harun, M.H.Z.M., & Low, S.C. (2022). Environmental impacts and imperative technologies towards sustainable treatment of aquaculture wastewater: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 46, 102553. DOI: [10.1016/j.jwpe.2021.102553](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102553)
- Angel, D., & Freeman, S. (2009). Integrated aquaculture (INTAQ) as a tool for an ecosystem approach in the Mediterranean Sea. *Integrated Mariculture: A Global Review*, 133-183.
- Ayaz, S., Fındık, N., Kinacı, C., Tunçsiper, B., & Güneş, E. (2011). *Manual of Artificial Wetlands*. (in Turkish). Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi Çevre Enstitüsü, Gebze, Kocaeli, 107p. Retrieved from https://webdosya.csb.gov.tr/db/destek/icerikler/yapay_sulak_alanlar_el_k-tab-20191127122415.pdf (01.01.2022).
- Aşır, U., & Pulatsü, S. (2008). Estimation of the nitrogen-phosphorus load due to cage cultured rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum, 1792) in Kesikköprü Dam Lake: Comparison of pelleted and extruded feed. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 32, 417-422.
- Buhmann, A., J. & Papenbrock, J. (2013). Biofiltering of aquaculture effluents by halo-phytic plants: basic principles, current uses and future perspectives. *Environmental and Experimental Botany*, 92, 122-133. DOI: [10.1016/j.envexpbot.2012.07.005](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.07.005)
- Cao, L., Wang, W., Yang, Y., Yang, C., Yuan, Z., Xiong, S., & Diana, J. (2007). Environmental impact of aquaculture and countermeasures to aquaculture pollution in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 14(7), 452-462. DOI: [10.1065/espr2007.05.426](https://doi.org/10.1065/espr2007.05.426)
- Chary, K., Aubin, J., Sadoul, B., Fiandrino, A., & Covès, D. (2020). Integrated multi-trophic aquaculture of red drum (*Sciaenops ocellatus*) and sea cucumber (*Holothuria scabra*): Assessing bioremediation and life-cycle impacts. *Aquaculture*, 516, 1-17. DOI: [10.1016/j.aquaculture.2019.734621](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734621)
- Cho C. Y., & Bureau D. P. (2001). A review of diet formulation strategies and feeding systems to reduce excretory and feed wastes in aquaculture. *Aquaculture Research*, 32 (Suppl. 1), 349-360. DOI: [10.1046/j.1355-557x.2001.00027.x](https://doi.org/10.1046/j.1355-557x.2001.00027.x)

YAZARLIK KATKISI

Fikir, Hijran Yavuzcan Yıldız, literatür taraması, veri analizi, kaleme alma ve eleştirilerin revizyonu ortak katkı ile Hijran Yavuzcan Yıldız ve Serap Pulatsü tarafından yapılmıştır.

ÇIKAR/REKABET ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar (Hijran Yavuzcan Yıldız, Serap Pulatsü) herhangi bir çıkar çatışması veya rekabet eden çıkarlar olmadığını beyan ederler.

ETİK ONAY

Yazarlar (Hijran Yavuzcan Yıldız, Serap Pulatsü) derleme niteliğindeki makalenin etik onay gerektirmediğini beyan ederler.

VERİ KULLANILABİLİRLİĞİ

Makalede kullanılan verilerle ilgili sorular için, sorumlu yazar ile iletişime geçilmelidir.

- Chopin T. (2013). Aquaculture, Integrated Multi-trophic (IMTA). In Christou P., Savin R., Costa-Pierce B.A., Misztal I., Whitelaw C.B.A. (Eds) *Sustainable Food Production*. Springer, New York, NY. DOI: [10.1007/978-1-4614-5797-8_173](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5797-8_173)
- Cohen, A., Malone, S., Morris, Z., Weissburg, M., & Bras, B. (2018). Combined fish and lettuce cultivation: an aquaponics life cycle assessment. *Procedia CIRP*, 69, 551-556. DOI: [10.1016/j.procir.2017.11.029](https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.029)
- Costa-Pierce B.A. (2013). Aquaculture, Ecological. In P. Christou, R. Savin, B.A. Costa-Pierce, I. Misztal, I., C.B.A. Whitelaw (Eds.) *Sustainable Food Production*. Springer, New York, NY. DOI: [10.1007/978-1-4614-5797-8_172](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5797-8_172)
- Cripps, S.J., & Bergheim, A. (2000). Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. *Aquacultural Engineering*, 22, 33-56. DOI: [10.1016/S0144-8609\(00\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(00)00031-5)
- Çantaş, İ. B., & Yıldırım, Ö. (2019). Reducing the impact of feeds on the environment in sustainable aquaculture. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 36(1), 87-97. DOI: [10.12714/egejfas.2019.36.1.12](https://doi.org/10.12714/egejfas.2019.36.1.12)
- Enduta, A. Jusoh, A., Ali, N., & Wan Nik, W.B. (2011). Nutrient removal from aquaculture wastewater by vegetable production in aquaponics recirculation system. *Desalination and Water Treatment*, 32:1-3, 422-430. DOI: [10.5004/dwt.2011.2761](https://doi.org/10.5004/dwt.2011.2761)
- Ferreira, J.G., Saurel, C., & Ferreira, J.M. (2012). Cultivation of gilthead bream in monoculture and integrated multi-trophic aquaculture. Analysis of production and environmental effects by means of the FARM model. *Aquaculture*, 359, 23-34. DOI: [10.1016/j.aquaculture.2012.06.015](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.06.015)
- Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K.V., Jijakli, H., & Thorarinsdottir, R. (2015). Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustainability*, 7(4), 4199-4224. DOI: [10.3390/su7044199](https://doi.org/10.3390/su7044199)
- Greenfeld, A., Becker, N., Bornman, J. F., Spatari, S., & Angel, D. L. (2022). Is aquaponics good for the environment?—evaluation of environmental impact through life cycle assessment studies on aquaponics systems. *Aquaculture International*, (0123456789). DOI: [10.1007/s10499-021-00800-8](https://doi.org/10.1007/s10499-021-00800-8)
- Hernandez, A., Satoh, S., Kiron, V., & Watanabe, T. (2004). Phosphorus retention efficiency in rainbow trout fed diets with low fish meal and alternative protein ingredients. *Fisheries Science*, 70, 580-586. DOI: [10.1111/j.1444-2906.2004.00844.x](https://doi.org/10.1111/j.1444-2906.2004.00844.x)
- Hu, Z., Lee, J.W., Chandran, K., Kim, S., Coelho-Brotto, A., & Khanal, S.K. (2015). Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics. *Bioresource Technology*, 188, 92-98. DOI: [10.1016/j.biortech.2015.01.013](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.013)

- Jegatheesan, V., Shu., L., & Visvanathan, C. (2011). Aquaculture effluent: Impacts and remedies for protecting the environment and human health. *Encyclopedia of Environmental Health*, 123-135. DOI: [10.1016/B978-0-444-52272-6.00340-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52272-6.00340-8)
- Jokumsen, A. and Svendsen, L. M. (2010). *Farming of freshwater rainbow trout in Denmark, DT*. Retrieved from: https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/6581106/219-10_Farming-of-freshwater-rainbow-trout-in-denmark-v2.pdf (08.02.2020)
- Jusoh, A., Nasir, N.M., Hanis, F., & Yunos, M. (2019). Green technology in treating aquaculture wastewater. AIP Conference Proceedings 2197, 020001. DOI: [10.1063/1.5140892](https://doi.org/10.1063/1.5140892).
- Lennard, W.A., & Leonard, B.V. (2006). A comparison of three different hydroponic subsystems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an aquaponic test system. *Aquaculture International*, 14(6): 539–550. DOI: [10.1007/s10499-006-9053-2](https://doi.org/10.1007/s10499-006-9053-2)
- Lin, Y.F., Jing, S.R., Lee, D.Y., & Wang, T.W. (2002). Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system. *Aquaculture*, 209, 169–184. DOI: [10.1016/S0044-8486\(01\)00801-8](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00801-8)
- Lymbery, A., Starcevic, M., & Doupe, R. (2007). Managing environmental impacts from inland saline aquaculture-a case study of trout production from saline groundwater in Western Australia. A report for the Rural Industries Research and Development Corporation. Publication No 05/166. 78 s.
- Miller, D., & Simmens, K. (2002). Waste management in aquaculture. *West Virginia University, Aquaculture Information Series, Publication, AQ02-1*.
- Nora'aini, A.A., Wahab., M., & Ahmad, J. (2005). Treatment of aquaculture wastewater using ultra-low pressure asymmetric polyethersulfone (PES) membrane. *Desalination*, 185, 317–326. DOI: [10.1016/j.desal.2005.03.084](https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.03.084)
- Palm, H.W., Knaus, U., Appelbaum, S., Strauch, S.M., & Kotzen, B. (2019). Coupled Aquaponics Systems. In S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, G.M. Bumell (Eds.), *Aquaponics Food Production Systems*. Springer, Cham. DOI: [10.1007/978-3-030-15943-6_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_7)
- Pulatsü, S., & Kaya, D. (2016). Environmental aspect of fish nutrition in aquaculture [Su ürünleri yetiştiriciliğinde balık beslemenin çevresel boyutu.] (in Turkish with English abstract). *Türkiye Klinikleri Animal Nutrition and Nutritional Diseases-Special Topics*, 2(1): 33-41.
- Reid, G.K., Chopin, T., Robinson, S.M.C., Azevedo, P., Quinton, M., & Belyea, E. (2013). Weight ratios of the kelps, *Alaria esculenta* and *Saccharina latissima*, required to sequester dissolved inorganic basin elements and supply oxygen for Atlantic salmon, *Salmo salar*, in Integrated Multi-Trophic Aquaculture systems. *Aquaculture* 408–409, 34–46. DOI: [10.1016/j.aquaculture.2013.05.004](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.05.004)
- Sánchez, H. (2014). *Aquaponics and its potential aquaculture wastewater treatment and human urine treatment*. Retrieved from <https://www.hemmaodlat.se/research/sanchez%202014.pdf> (08.02.2022).
- Sariipek M., & Karayücel, S. (2015). Integrated Multi-Trophic System Approach in Sustainable Aquaculture Production [Sürdürülebilir Su Ürünleri Üretiminde Entegre Multi-Trofik Sistem Yaklaşımı] (in Turkish). *18. Ulusal Su Ürünleri Kongresi*. 1-4 Eylül 2015. İzmir.
- Sikder, M.N.A., Min, W.W., Ziyad, A.O., Kumar, P.P., & Kumar, R.D. (2016). Sustainable treatment of aquaculture effluents in future-A review. *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*, 1, 4, 190-193.
- Sindilariu, P.D. (2007). Reduction in effluent nutrient loads from flow-through facilities for trout production. *Aquaculture Research*, 38, 1005-1036. DOI: [10.1111/j.1365-2109.2007.01751.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2007.01751.x)
- Sindilariu, P.D., Schulz, C., & Reiter, R. (2007). Treatment of flow-through trout aquaculture effluents in a constructed wetland. *Aquaculture*, 270, 92–104. DOI: [10.1016/j.aquaculture.2007.03.006](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.03.006)
- Sindilariu, P.D., Brinker, A., & Reiter, R. (2009) Factors influencing the efficiency of constructed wetlands used for the treatment of intensive trout farm effluent. *Ecological Engineering*, 35, 711–722. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2008.11.007](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.11.007)
- Tanveer, M., Sukumaran, M., & Devarayan, K. (2016). Application of green technology in aquaculture wastewater treatment: a conceptual approach. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 5, 4, 2546 – 2550.
- Thorarinsdottir, R.I. (2015). *Aquaponics Guidelines*. Retrieved from https://skemman.is/bitstream/1946/23343/1/Guidelines_Aquaponics_20151112.pdf (08.02.2022).
- Toledo, J.J., & Penha, J. (2011). Performance of *Azolla caroliniana* Willd. and *Salvinia auriculata* Aubl. on fish farming effluent. *Brazilian Journal of Biology*, 71, 1, 37-45. DOI: [10.1590/s1519-69842011000100007](https://doi.org/10.1590/s1519-69842011000100007)
- Tom, A.P., Jayakumar, J.S., Biju, M., Somarajan, J., & Ibrahim, M.A. (2021). Aquaculture wastewater treatment technologies and their sustainability: A review. *Energy Nexus*, 4, 100022. DOI: [10.1016/j.nexus.2021.100022](https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.100022)
- Tsagaraki, T. M., Petihakis, G., Tsiras, K., Triantafyllou, G., Tsapakis, M., Korres, G., & Karakassis, I. (2011). Beyond the cage: Ecosystem modelling for impact evaluation in aquaculture. *Ecological Modelling*, 222(14), 2512–2523. DOI: [10.1016/j.ecolmodel.2010.11.027](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.11.027)
- Turcios, A. E., & Papenbrock, J. (2014). Sustainable treatment of aquaculture effluents-What can we learn from the past for the future? *Sustainability*, 6(2), 836–856. DOI: [10.3390/su6020836](https://doi.org/10.3390/su6020836)
- Wilson, G. (2005). Australian barramundi farm goes aquaponic. *Aquaponics Journal*, 37, 12-16.
- Yavuzcan, H., Atar, H.H., & Pulatsü, S. (2020). Current Situation and Future in Aquaculture and Fishing. [Su ürünleri yetiştiriciliğinde ve avcılığında mevcut durum ve gelecek] (in Turkish) Türkiye Ziraat Mühendisliği 9. Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı (ISBN-978-605-01-1322-8) 299-319. Ankara
- Yavuzcan Yıldız, H., Robaina, L., Pirhonen, J., Mente, E., Domínguez, D., & Parisi, G. (2017). Fish welfare in aquaponic systems: its relation to water quality with an emphasis on feed and faeces—A review. *Water*, 9(1), 13. DOI: [10.3390/w9010013](https://doi.org/10.3390/w9010013)