

## DERLEME MAKALE

## Döngüsel Ekonomi Kapsamında Evsel Atıksu Arıtma Tesislerinde Fosfor Geri Kazanımı Uygulamalarına Genel Bir Bakış

Yazışma yazarı:  
Ali İzzet CENGİZ  
cengizal@itu.edu.tr

Referans:  
Cengiz, A.İ., Güven, H., Erşahin, M.E., Özgün, H., Öztürk, İ. (2022) Döngüsel Ekonomi Kapsamında Evsel Atıksu Arıtma Tesislerinde Fosfor Geri Kazanımı Uygulamalarına Genel Bir Bakış, Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik, 23 (2) 117-132,

Makale Gönderimi : 21.03.2022  
Online Kabul : 25.05.2022  
Online Basım : 30.11.2022

Ali İzzet CENGİZ<sup>1</sup>, Hüseyin GÜVEN<sup>2</sup>, Mustafa Evren ERŞAHİN<sup>3</sup>, Hale ÖZGÜN<sup>4</sup>, İzzet ÖZTÜRK<sup>5</sup>

<sup>1</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0002-4715-9567

<sup>2</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0001-6754-0106

<sup>3</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. MEM-TEK Prof. Dr. Dincer Topacık Ulusal Membran Teknolojileri UYG-AR Merkezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye ORCID: 0000-0003-1607-0524.

<sup>4</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. MEM-TEK Prof. Dr. Dincer Topacık Ulusal Membran Teknolojileri UYG-AR Merkezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye ORCID: 0000-0001-8784-8351.

<sup>5</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0002-8274-5326.

## Özet

Güncel projeksiyon çalışmaları, insanlığın temel ihtiyacı olan ve büyük oranda tarım sektörü için gübre üretiminde kullanılan fosforun ait doğal kaynakların önümüzdeki birkaç yüzyıl içerisinde tükenebileceğini göstermektedir. Pek çok ülke fosfor ihtiyacını ithal yol ile karşılamaktadır ve tarımsal üretiminin devamlılığı için dışa bağımlıdır. Dolayısıyla ülkeler özellikle son yıllarda kendilerini bekleyen fosfor krizinin önlenmesine yönelik çeşitli adımlar atmaktadır. Günümüzde, döngüsel ekonomi, kaynak geri kazanımı odaklı atıksu arıtma tesisi (AAT) gibi konseptler, doğal kaynakların sürdürülebilir yönetiminin bir zaruret haline gelmesiyle önem kazanmıştır. Atıksular önemli miktarda fosfor ihtiva etmektedir. Bu yüzden AAT'lerde fosfor geri kazanımı sağlanarak doğal fosfor rezervlerinin sürdürülebilir yönetimine katkı sunulabilir. AAT'lerde geri kazanılan fosforlu nihai ürün, içerdiği toksik madde ve ağır metaller çevre ve insan sağlığı açısından risk teşkil etmediği müddetçe, tarım sektöründe gübre olarak değerlendirilebilir. Böylece birçok ülkenin ulusal hedefinde yer alan yeşil tarıma geçiş sürecine de katkı sunulmuş olur. AAT'lerde çamur, çamur külü, yan akımlar, arıtma çıkış suyu ve kaynağında ayrı toplanması durumunda idrar, yüksek fosfor geri kazanımı potansiyeli nedeniyle literatürde birçok farklı laboratuvar, pilot veya tam ölçekli çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. Bu çalışmada belirtilen akımlarda fosfor geri kazanımına dair yapılan araştırmalar incelenerek derlenmiş ve kapsamlı bir değerlendirme yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Atıksu arıtma tesisi, döngüsel ekonomi, fosfor, geri kazanım, gübre.

## An Overview of Phosphorus Recovery Applications in Municipal Wastewater Treatment Plants in the Scope of Circular Economy

## Abstract

Future projections show that natural resources of phosphorus, that is a basic need for humanity and is largely used in the production of fertilizers for the agricultural sector, may be depleted in the next few centuries. Many countries meet their phosphorus needs through imports and are dependent on external sources for the continuity of their agricultural production. Therefore, especially in the recent years, countries are taking various steps to prevent the phosphorus crisis that awaits them. Nowadays, concepts such as circular economy, resource recovery-oriented wastewater treatment plant (WWTP) have gained importance since sustainable management of natural resources has become an obligatory issue. Wastewaters contain significant amounts of phosphorus. Therefore, phosphorus recovery in WWTPs can contribute to the sustainable management of natural phosphorus reserves. As long as the toxic substances and heavy metals contained in the phosphorus-rich final product recovered in WWTPs do not pose a risk to the environment and human health, it is possible to use it as a fertilizer in the agricultural sector. Thus, this will contribute to the transition to green agriculture, which is also included in the national target of many countries. Sludge, sludge ash, side streams, treatment effluent of WWTPs and source separated human urine have been evaluated within the scope of many different laboratory, pilot or full-scale studies in the literature. In this study, studies on phosphorus recovery at the specified sources were reviewed and a detailed evaluation was performed.

**Keywords:** Wastewater treatment plant, circular economy, phosphorus, recovery, fertilizer.

## 1.Giriş

Kaynak kazanımı odaklı atıksu arıtımı, yüksek kalitede arıtılmış çıkış suyu eldesini, enerji ve besi maddesi gibi katma değere sahip çeşitli atıksu bileşenlerinin geri kazanımını hedefleyen yenilikçi teknolojilerle sürdürülebilir politikaları esas alan bir konsepttir (Chrispim vd., 2019). Bu konseptte göre konvansiyonel atıksu arıtma tesislerinin (AAT) kaynak ve enerji geri kazanım merkezleri haline gelerek döngüsel ekonomiye doğrudan katkı sağlamaları amaçlanmaktadır. Dolayısıyla 21.yüzyılda AAT'ler yalnızca deşarj standartlarını sağlayan proseslerin tasarlanıp işletildiği mühendislik yapıları değil aynı zamanda kaynak geri kazanımı potansiyelinin göz önünde bulundurulmuş yenilikçi mühendislik yöntemlerinin uygulandığı biyofabrikasyon tesisleridir (Pott R. vd., 2018).

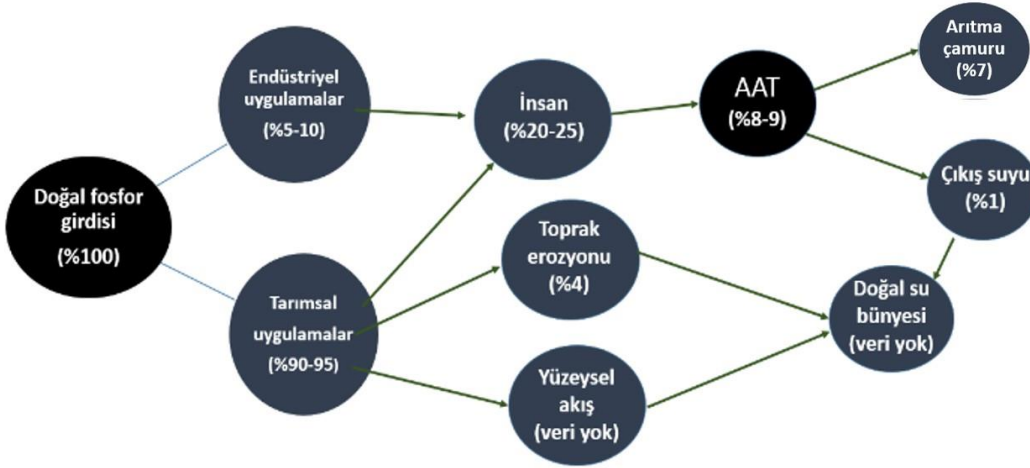
Döngüsel ekonomi, doğal kaynak kullanımı ile ürün eldesini ve bu ürünün kullanımı sonucu nihai olarak bertaraf edilmek üzere atık oluşturulmasını esas alan doğrusal ekonomi modeline alternatif olarak geliştirilmiş, 21. yüzyılda önemi her geçen gün artan popüler bir yaklaşımdır (Pacurariu vd., 2021). Döngüsel ekonomi modeline göre faydalı ve değerli ürünler üretmek için geri kazanım, yeniden kullanım gibi stratejilere odaklanılır (Leong vd., 2021). Son yıllarda doğal kaynaklarının yetersiz olması sebebiyle özellikle Avrupa ülkelerinde, AAT'ler atıksuyu arıtarak yüksek kalitede çıkış suyu eldesi sağlarken aynı zamanda kaynak geri kazanımı, enerji üretimi gibi konseptler ile döngüsel ekonominin önemli bir parçası konumuna gelmeye başlamıştır (Neczaj ve Grosser, 2018).

Fosfor; rezervleri yeryüzünde homojen dağılım göstermeyen, tarımsal üretimin ve gıda arzının sürdürülebilmesinde kritik role sahip olan sınırlı bir kaynaktır (Soares vd., 2017). Günümüzde fosfor ihtiyacı birincil olarak fosfat kayası madenlerinden sağlanmaktadır. Elde edilen fosfor genellikle (toplam arzın %90'a kadarı) sülfürik asit, azot ve potasyum ile birlikte tarım sektöründe kullanılmak üzere gübre üretiminde kullanılmaktadır (Cordell vd., 2009). Fosfor, bitkilerin büyümesi için gerekli ve ikamesi olmayan bir maddedir. Dolayısıyla tarımsal üretimin devamlılığı için gerekli bir "besi maddesi" olarak tanımlanmaktadır (Agronomist, 1998). Thurston (2015) fosfor kaynaklarının yeryüzündeki homojen olmayan dağılımı, mevcut rezervlerin sınırlı oluşu ve dünya çapındaki fosfor talebinin fazlalığına dikkat çekerek fosforu "tükenmekte olan besi maddesi" olarak nitelendirmiş ve her geçen yıl stratejik önemini artacağını vurgulamıştır. Yeryüzündeki fosfor rezervlerinin %85'i Fas, ABD, Ürdün, Çin ve Güney Afrika'da bulunmaktadır (Smit vd., 2009). Gerek yeryüzündeki fosfor rezervlerinin belirli ülkelerde toplanması gerekse fosfora olan talebin gün geçtikçe artması neticesinde fosforun önümüzdeki yıllarda parasal karşılığının da artması beklenmektedir (Tchobanoglous vd., 2014). Önümüzdeki yıllarda yerli kaynakları fosfor ihtiyacını karşılamakta yetersiz kalan ve tarımsal üretimin devamlılığını sağlamak zorunda olan her ülke fosfor ithalatına devasa bütçeler ayırmak durumunda kalacaktır. Bu durumun gıda fiyatlarına yansımaları kaçınılmaz olduğu için fosfor rezervlerinin yetersizliği doğrudan küresel gıda güvenliğini tehdit etmektedir. Literatürde fosfat kayası kaynaklarının yeryüzündeki azalması ve yakın gelecekte tükenmesi üzerine yapılan bazı projeksiyon çalışmaları rezervlerin ömrü için 50 ila 370 yıl arasında değişen zaman öngörüsünde bulunmuştur (Atienza vd., 2014; Cooper vd., 2011). Atıksular fosfor açısından zengin kaynaklar olarak değerlendirilmektedir. Küresel fosfor bütçesi ele alındığında

Şekil 1'deki yüzdesel dağılım elde edilmektedir. Buna göre doğal kaynaklardan elde edilip endüstriyel ve tarımsal uygulamalarda değerlendirilen fosforun %8-9 civarındaki kısmı AAT'lere ulaşmaktadır. Dolayısıyla fosforun sınırlı ve kritik bir kaynak oluşu ile kaynak kazanımına odaklanan AAT'ler birlikte değerlendirildiğinde "AAT'lerde fosfor geri kazanımı" konsepti ortaya çıkmaktadır. Literatürde AAT'lerde fosfor geri kazanımına yönelik pek çok farklı çalışma yer almaktadır. AAT'lerde fosfor geri kazanımını amaçlayan araştırmalardaki ana motivasyon kaynakları; fosforun sınırlı bir kaynak olması, fosfor giderimi sağlayan proseslerin AAT'lerde yüksek bir maliyet kalemi oluşturması, arıtılmış atıksuyun alıcı ortam deşarj standartları bakımından fosfor limitlerini sağlaması gerekliliği, fosfor içeren AAT yan akımlarında çökelti (strüvit gibi) oluşumunun tesiste bulunan borular ve pompalar için iç kireçlenme riski doğurması ve bunun büyük bir bakım onarım maliyetine yol açması şeklinde sıralanabilir (Bashar vd., 2018). Ayrıca evsel nitelikli atıksuların fosfor giderimi ya da geri kazanımı olmaksızın alıcı ortamlara deşarj edilmesi su kalitesinin olumsuz yönde etkilenmesi, ötrofikasyon gibi çevresel sorunlara sebep olmaktadır. Son olarak "yeşil pazarlama" stratejilerinin tüketici üzerindeki olumlu algısı özel sektör için önemli bir motivasyondur (De Boer vd., 2018). AAT'lerde geri kazanılan fosfor ile üretilen gübre kullanımı ile "yeşil tarıma" geçiş ve kimyasal gübre ithalatının azaltılmasına katkı sunulabilir. Yapılan hesaplamalara göre teorik olarak Orta Avrupa'da tarımsal faaliyetlerde yıllık kullanılan gübrede bulunan fosforun %40 ila 50'si evsel atıksularda bulunan fosfor yüküne denktir (Zoboli vd., 2016). Bu sebeple son yıllarda evsel atıksuda bulunan fosforun geri kazanımı için AAT'lerin çeşitli noktalarında yapılan deneysel çalışmalar ile teknik ve ekonomik uygulanabilirliği ispatlanan yöntemler tam ölçekli olarak hayata geçirilmektedir (Egle vd., 2016).

Şekil 1'de doğal kaynaklardan sağlanan fosfor girdisinin %7 civarındaki kısmının AAT çamuruna geçtiği görülmektedir. AAT çamurunun doğrudan araziye uygulanarak toprak şartlandırıcısı veya gübre şeklinde değerlendirilmesi en ekonomik bertaraf yöntemidir (Metcalf ve Eddy, 2003). Bu yöntem aynı zamanda kimyasal gübre ihtiyacını da ciddi olarak azaltma potansiyeline sahiptir (Ribarova vd., 2017). Fakat AAT çamurunun ihtiva ettiği toksik maddeler ve ağır metaller doğrudan arazi uygulamaları, özellikle de uygulandıkları arazide yetiştirilen tarımsal ürünlerin bu maddeleri bünyelerine alabilir özellikte olmaları durumunda, çevre ve insan sağlığı açısından ciddi mânâda risklidir (Singh ve Agrawal, 2008). Ağır metal, organik mikroirletici ve patojen mikroorganizma içeriğine bağlı çevre ve halk sağlığı riskleri öne sürülerek, bazı ülkeler arıtma çamurlarının doğrudan araziye uygulanmasını sınırlayıcı adımlar atmaktadırlar (Ott ve Rechberger, 2012). Çimento fabrikaları ve atık yakma tesislerinde birlikte yakma gibi mevcut çamur bertaraf seçenekleri ise, arıtma çamuru bünyesindeki fosforun geri getirilemez şekilde fosfor döngüsünden çıkmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla AAT çamurundaki ve bu çamurun yakılmasıyla elde edilen çamur külündeki fosforun ağır metaller ve toksik maddeler göz önünde bulundurulmuş geri kazanılması gerekmektedir.

Literatürde fosfor geri kazanımı potansiyeli bakımından AAT'lerde fosfor geri kazanımının yapılabileceği noktalar



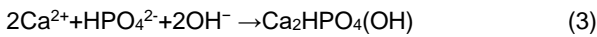
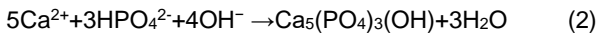
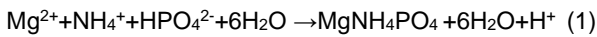
Şekil 1: Örnek fosfor bütçesi (Ribarova vd., 2017).

Şekil 2'de gösterildiği gibi AAT yan akımları (2), AAT çıkış suyu (3), AAT çamuru (4), çamurun yakılması neticesinde elde edilen çamur külü (5) olarak tespit edilmiştir. Ayrıca ayrıklı toplanılan idrar (1) fosfor içeriği bakımından yüksek bir potansiyele sahiptir. Bu çalışmada, belirtilen akımlardan fosfor geri kazanımına dair yapılan çalışmalar derlenmiş, literatürün eleştirel bir özeti sunulmuş ve detaylı bir değerlendirme yapılmıştır.

## 2. Akım Bazında Fosfor Geri Kazanımı

### 2.1 Ayrıklı toplanan idrardan fosfor geri kazanımı

Beler-Baykal vd. (2011), evsel atıksuda bulunan fosforun %50'sinin insan idrarından kaynaklandığını belirtmiştir. İdrarı evsel atıksudan ayırmanın bir yolu olmadığı için kaynağında ayrıklı toplama idrardan fosfor geri kazanımı için tek yoldur. Bu amaç doğrultusunda geliştirilmiş özel NoMix tipi tuvaletler insan idrarını etkin bir şekilde kaynağında toplayabilmektedir (Gundlach vd., 2021). Kaynağında ayrıklı toplanmış idrara uygun miktarda magnezyum ( $Mg^{2+}$ ) ya da kalsiyum ( $Ca^{2+}$ ) eklenmesi vasıtasıyla fosfor çöktürmesi gerçekleştirilebilir (Wei vd., 2018).  $Mg^{2+}$  eklenmesiyle fosfor, magnezyum-amonyum-fosfat (Strüvit) formunda Denklem 1'deki reaksiyon,  $Ca^{2+}$  eklenmesiyle ise kalsiyum fosfat (CaP) olarak Denklem 2 ve Denklem 3'teki reaksiyonlar neticesinde çöktürülerek geri kazanılabilir (Maurer ve Gujer, 1999):



İdrar, içeriğinde düşük konsantrasyonlarda ağır metal bulunması ve çökelen nihai ürünün patojen içermemesi açısından fosfor geri kazanımı için son derece uygun bir kaynaktır (Kirchmann ve Pettersson, 1994; Gell vd., 2011). Fakat ayrıklı sistem vasıtasıyla idrar toplama, gerek mevcut yapılarıdaki altyapısal engeller gerekse bekletme süresi kaynaklı yüksek depolama hacimlerinin ihtiyacı nedeniyle kentsel bölgelerde uygulanabilirliği düşük olan bir yöntemdir. Dolayısıyla idrardan fosfor geri kazanımı daha çok siteler gibi küçük yerleşim merkezlerinde, stadyum, alışveriş merkezi, havalimanı, hastane gibi günlük insan hareketliliğinin yüksek olduğu yerlerde uygulanma potansiyeli olan bir yöntemdir (Irwin ve Forrester, 2019);

Simha vd., 2020).

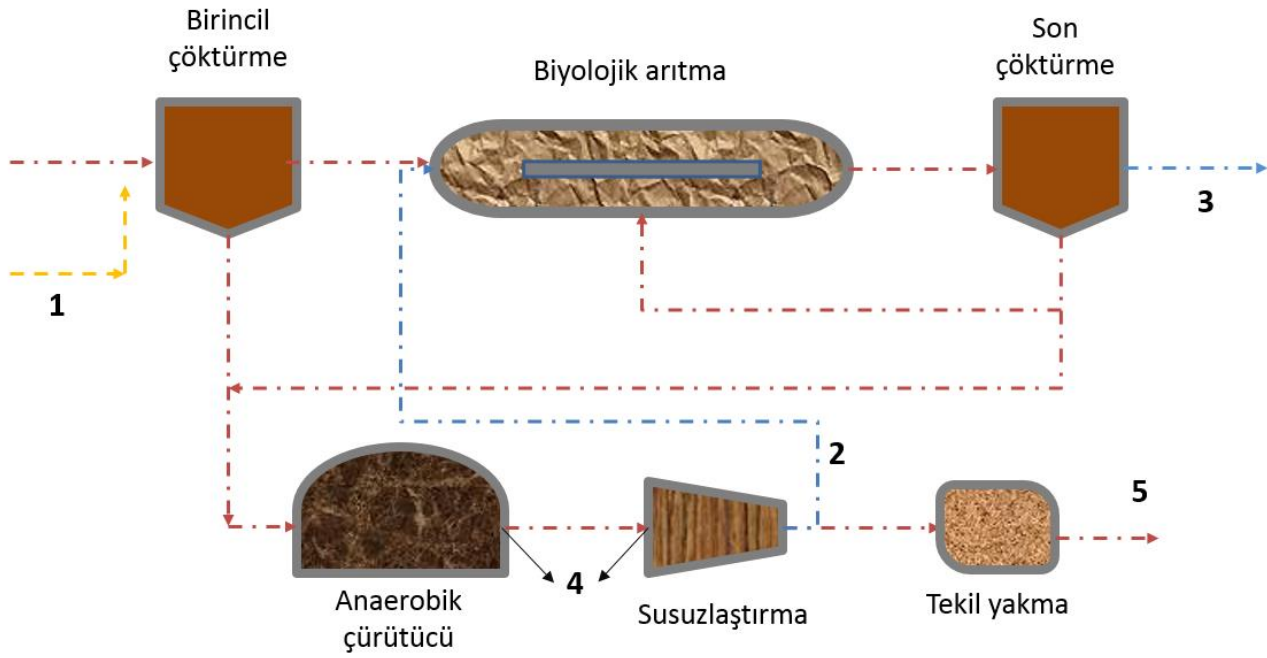
### 2.2 Arıtma çıkış suyundan fosfor geri kazanımı

AAT çıkış suyu fosfor potansiyeli açısından göz önünde bulundurulması gereken akımlardan biridir. Ayrıca fosfor muhtevası yüksek çıkış sularının alıcı ortama deşarj edilmesi durumunda ötrofikasyon, deniz salyası (müsilaj) gibi çevresel sorunlar meydana gelebilmektedir (Öztürk ve Şeker 2021).

Fosfor, AAT çıkış suyundan çöktürme, adsorpsiyon gibi prosesler vasıtasıyla geri kazanılabilir (Egle vd., 2016). Adsorpsiyon mekanizmasıyla fosfor geri kazanımı hem daha basit bir proses olması itibarıyla hem de yüksek verimi nedeniyle çöktürme veya biyolojik yöntemlerle fosfor geri kazanımına göre önemli ölçüde ilgi çekmiştir (Ohura vd., 2011). Bununla birlikte Egle vd. (2016) iyon deşitirici gibi prosesler için gerekli kimyasal ve reçine ihtiyacı kaynaklı maliyetlerin de göz önünde bulundurulması gerektiğine dikkat çekmiştir. Bu gibi maliyetlerin fosfor geri kazanımının ekonomik uygulanabilirliğini düşürebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Literatürde pek çok farklı adsorban kullanılarak AAT çıkış suyundan fosforun geri kazanımı üzerine çalışmalar yürütülmüştür. Xia vd. (2020) arıtma çamurunu adsorban olarak kullanarak iyon deşitiricide karşılaşılan reçine ve kimyasal maliyetine bir çözüm sunmuştur. Demir içeren arıtma çamurunun 0,5 M sodyum hidroksit (NaOH) ile 30 dakika alkali arıtmaya tabi tutulması neticesinde adsorpsiyon kapasitesi artırılmıştır. Elde edilen çamurun adsorban olarak değerlendirilmesi vasıtasıyla arıtma çıkış suyundan yüksek verimde fosfor adsorbe edilmiştir. Sonrasında pirolizde yakılan çamurdan biyoçar elde edilerek fosfor geri kazanımı sağlanmıştır. Elde edilen biyoçarın ağır metal konsantrasyonları Uluslararası Biyoçar Girişimi Raporu'nda (IBI, 2015) sunulan sınır değerlerden düşük olduğu için tarımsal uygulamalarda kullanılmasında herhangi bir engel olmadığı tespit edilmiştir. Gerek atığın faydalı bir amaç uğruna kullanılması gerekse kaynak geri kazanımı uygulanması açısından bu çalışma döngüsel ekonomi uygulamalarına çok iyi bir örnek olarak sunulabilir. Kalaitzidou vd. (2016) arıtma çıkış suyunda demir bazlı adsorban ile fosfor geri kazanımına odaklanan pilot ölçekli çalışmada 200 L/sa debi ile çalışmıştır. Rejenerasyon çözeltisine uygun miktarda  $Ca^{2+}$  eklenmesi ile ağırlıkça %51 fosfat içeren amorf katı çöktürülmüş ve gübre olarak

kullanımının uygunluğu ortaya konulmuştur.



Şekil 2: Evsel AAT'lerde fosfor geri kazanımı yapılabilecek çeşitli noktalar (Desmidt vd., 2015 ve Egle vd., 2015'den uyarlanmıştır).

Midorikawa vd. (2008) 0,1-2,1 mg P/L konsantrasyona sahip arıtma çıkış suyundan fosfor geri kazanımı için adsorban teşkili ile %97'ye varan giderim sağlamıştır. Adsorbe edilen fosfor, NaOH çözeltisi ile desorbe edilmiştir. Sonrasında çözeltiye eklenen kalsiyum hidroksit (Ca(OH)<sub>2</sub>) vasıtasıyla fosforun CaP olarak çöktürülmesi sağlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda çökeltinin %16 civarında fosfor içerdiği ve yapısında bulunan tehlikeli maddelerin çevre ve insan sağlığı açısından risk teşkil etmeyecek kadar düşük seviyede olduğu tespit edilmiştir. Çökeltinin fosfat kaybı ile benzer fosfor içeriği dolayısıyla fosfor bazlı gübre olarak kullanımının uygun olabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Arıtma çıkış suyundan fosfor geri kazanımında adsorpsiyonu baz alan diğer bazı çalışmalarda adsorban olarak manyetit mineral mikropartikülleri (Xiao vd., 2017), demir oksit partikülleri (Kang vd., 2003), asit madeni drenaj çamuru (Wei vd., 2008) gibi farklı maddeler değerlendirilmiştir.

Johir vd. (2011) yüksek yüklemeli membran biyoreaktör (MBR) sistemine entegre iyon değiştirici ile MBR çıkış suyundan besi maddesi geri kazanımı üzerine çalışmıştır. Sonuçlara göre çıkış suyundaki fosfor %95 oranında geri kazanılmıştır. Buna göre entegre sistem ile yüksek besi maddesi giderimi ve geri kazanımı sağlanmıştır. Diğer yandan membran tıkanması ve iyon değiştirici kaynaklı maliyet de sistemin ekonomik uygulanabilirliği değerlendirilirken göz önünde bulundurulmalıdır. Laboratuvar ortamına nazaran çok daha yüksek debilerle çalıştırılacak tam ölçekli tesislerde ne gibi sonuçlar ortaya çıkabileceği analiz edilmelidir. Bu çalışmadan çıkarılabilecek bir diğer sonuç ise MBR ile arıtma yapan tesislerin çıkış suyunda fosfor geri kazanımı uygulayabilmek için sistem düşük hidrolik bekletme süresinde çalıştırılarak yalnızca organik karbon giderimine odaklanması gerekliliğidir.

Nir vd. (2018) ise fosfatın tutulma verimi ve asit dayanımı yüksek olan membran kullanılarak seyreltik arıtma çıkış suyundan fosfor geri kazanımını incelemiştir. Nanofiltrasyon (NF) konsantrisine asit ilavesi ile uygun pH'ın ayarlanması neticesinde CaP çöktürülmesi mümkündür. Çalışmada

ayrıca NF kimyasal yıkanması sırasında nitrik asit (HNO<sub>3</sub>) kullanılarak kalsiyum-fosfor-azot içeren çözelti eldesi sağlanmış ve doğrudan gübre olarak kullanılabilmesine değinilmiştir. Sonuç itibarıyla arıtma çıkış suyunda fosfor geri kazanımı için NF membran kullanımı yenilikçi ve döngüsel ekonomi konseptine uygun bir teknoloji olarak sunulmuştur. Liberty vd. (2001) iyon değiştirici ve strüvit çöktürmesini entegre ederek fosfor geri kazanımını incelemiş ve tarımsal uygulamalarda kullanılabilir patojen içermeyen bir çöktürme elde etmiştir.

Liu vd. (2017) elektrodializ yöntemi ile konsantrasyonunda yüksek fosfor konsantrasyonu neticesinde fosfor geri kazanımının sağlanabileceğini ortaya koymuştur. Çalışmaya göre uygulanan voltaj arttığında geri kazanım potansiyelinin arttığı sonucuna varılmıştır.

Özellikle ileri biyolojik fosfor giderimi yapan AAT'lere ait çıkış suyu düşük konsantrasyonlarda fosfor içermektedir. Dolayısıyla arıtma çıkış suyundan fosfor geri kazanımı söz konusu olacağına arıtma tesisinde fosfor giderimi için özel herhangi bir proses uygulanmıyor olması beklenir. Diğer yandan iyon değiştirici gibi proseslerin yüksek işletme maliyeti gibi dezavantajları da vardır. Fosfor geri kazanımına odaklanılan çıkış sularında bulunan diğer bileşenlerin de adsorbe edilebileceğine dikkat edilmelidir. Arıtma çıkış suyunda fosfor geri kazanımının tam ölçekli bir uygulaması mevcut değildir (Egle vd., 2016).

### 2.3 Yan akımlardan fosfor geri kazanımı

Biyolojik fosfor giderimi uygulanan AAT'lerde giriş atıksuyundaki düşük organik madde dolayısıyla fosfor gideriminde sorunlar açığa çıkabilmektedir. Bu sebeple deşarj standartlarını sağlamada problemler meydana gelebilmektedir. Bu problemleri önlemek için bazı AAT'lerde harici karbon kaynağı kullanılarak ek maliyet kalemi oluşmasına sebep olunmaktadır. AAT'de oluşan fosfor açısından zengin yan akımların tesis girişine yönlendirilmesi halinde ana akımdaki fosfor yükünde artış yaşanmaktadır.

AAT yan akımlarından fosfor geri kazanımı sağlanmasıyla tesisin ana akımının fosfor yükü azalacağı için; ana akımdaki organik madde göstergesi kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) fosfor oranı (C/P) yükseltilecek biyolojik fosfor giderimi açısından muhtemel sorunlar önlenirken fosfor geri kazanımı sağlanarak kaynak geri kazanımı odaklı AAT konseptine katkı sunulmuş olur (Xiao-Jun vd., 2021).

AAT giriş atıksuyu ve çıkış suyunda düşük konsantrasyonlar ve yüksek debiler nedeniyle fosfor geri kazanımı düşük uygulanabilirliğe sahiptir. Buna karşın anaerobik çürütücü (AÇ) üst fazı gibi fosfor açısından zengin AAT akımlarında fosfor kazanım uygulamaları teknik ve ekonomik açıdan daha caziptir (Salehi vd., 2018). Bu sebeple AAT'lerde tam ölçekli fosfor geri kazanımı uygulamaları hem fosfor konsantrasyonunun yüksek olması (>60 mg/L) hem de katı madde içeriğinin düşük olması nedeniyle genellikle AÇ ve çamur üst fazı gibi yan akımlardan yapılmaktadır. Düşük katı içeriği çöktürme işlemi sonrası elde edilen kristal formdaki maddenin (strüvit, CAP) ayrıştırılarak toplanmasını kolaylaştırmaktadır (Soares vd., 2017). AÇ üst fazı çok düşük konsantrasyonda ağır metal içerdiği için çöktürülen strüviti (Denklem 1) gübre olarak kullanılmasından kaynaklı tarım topraklarına ağır metal aktarımının çok düşük olması beklenmektedir (Egle vd., 2016). Diğer yandan AÇ üst fazında bulunan yüksek konsantrasyonlardaki fosfor, borularda ve pompalarda istenmeyen iç kireçlenmelere neden olabilecek potansiyele sahiptir. Bu gibi durumlarda ekipmanlar zarar görebileceği için bakım/onarım maliyetlerinde artış riski bulunmaktadır (Heinzmann ve Engel, 2003). Dolayısıyla AÇ üst fazında bulunan fosforun giderilmesi bu riskin önüne geçilmesi için de önem arz etmektedir.

Ma vd. (2020) laboratuvar ölçekli ardışık kesikli reaktör (AKR) ile biyolojik fosfor giderimi uygulamış ve üst fazda fosfor geri kazanımı potansiyelini araştırmıştır. Çalışmada fosfor giderimi %91 bulunurken üst fazda bulunan fosfor %70,3 civarında geri kazanılmıştır. Çalışmada üst fazdan fosfor geri kazanımı için farklı parametrelerin etkisi denendiğinde optimum  $Mg^{2+}$  kaynağı  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ , sıcaklık 25 °C; karıştırma hızı 150 rpm olarak tayin edilmiştir. Nihai ürün olarak strüvit elde edilmiş ve taramalı elektron mikroskopu (SEM-EDS) ile yapılan karakterizasyon çalışmalarına göre geri kazanılan ürünün safsızlık içeren magnezyum-amonyum-fosfat olduğu ortaya konulmuştur. Çalışmada elde edilen önemli sonuçlardan biri de üst fazın AKR'den çekilmesinin AKR fosfor giderimi ve çamur çökeltme özellikleri üzerinde herhangi bir olumsuz etkisi olmamasıdır. Reaktör performansı olumsuz yönde etkilenmediği için bu yöntemin teknik olarak uygulanabilir olduğu da ortaya konulmuştur. Xiao-Jun vd. (2021) yine AKR reaktöründe üst fazı farklı oranlarda (1/4, 1/3, 1/2) çekerek fosfor geri kazanımını incelemiştir. Bununla birlikte farklı çözülmüş oksijen (ÇO) konsantrasyonlarının fosfor salımına etkisini gözlemiştir. Daha düşük ÇO konsantrasyonları fosfor salımını ve netice olarak fosfor geri kazanım potansiyelini düşürmektedir. Çalışmada yüksek ÇO konsantrasyonlarında reaktörden daha yüksek üst faz çekilerek fosfor geri kazanımı potansiyelinin artırılabilirliğinin altı çizilmiştir. Vanotti vd. (2017) gaz-geçirgen membranlar vasıtasıyla iki aşamalı bir mekanizmayla AÇ üst fazından fosfor geri kazanımı sağlamıştır. Üst faz 730 mg N/L, 140 mg P/L ve 2900 mg/L alkalinite içermektedir. Buna göre ilk aşamada amonyum ve alkalinite giderimi sağlanmış ikinci aşamada ise magnezyum klorür ( $MgCl_2$ ) ile fosfor geri kazanımı sağlanmıştır. Çöktürülen katı maddenin fosfor içeriği bakımından çok zengin (%42-44  $P_2O_5$ ) denebilecek durumda olduğu tespit edilmiştir. Fakat ilk aşamanın es geçilmesi durumunda elde

edilen nihai ürünün fosfor içeriği daha düşük olmaktadır. Dolayısıyla amonyum ve alkalinite gideriminin yüksek kalitede fosforlu son ürün oluşumu için yüksek öneme sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak iki aşamalı gaz-geçirgen membran kullanılarak elde edilen nihai ürün fosfor bazlı kimyasal gübreye alternatif olabilecek oranda fosfor içermektedir.

Yan akımlardan fosfor geri kazanımı amacıyla pek çok patentli ticari proses geliştirmiş olup bazıları da tam ölçekli uygulanmaktadır. Tam ölçekli uygulanan proseslerden biri olan ve 14 tam ölçekli AAT'de işletmeye alınan Pearl® prosesine göre prensip olarak akışkan yataklı reaktöre çözünebilir Mg tuzları eklendikten ve geri kazanım yapılacak sulu faz girişi yapıldıktan sonra strüvit kristalleşmesi başlar. Hedeflenen strüvit miktarına ulaşıldıktan sonra reaktördeki strüvit toplanır (Schaum, 2018). Bu süreci baz alan bir çalışmada; Britton vd. (2005), ileri biyolojik fosfor giderimi yapılan bir AAT'de AÇ üst fazını depoladıktan sonra akışkan yataklı reaktörde strüvit kristalleştirilmesi yöntemiyle fosfor geri kazanımı gerçekleştirmiştir (Denklem 1). Sonuçlara göre AÇ üst fazından %90'a kadar fosfor geri kazanımı sağlanmıştır. Elde edilen kristallerin yüksek saflıkta (ağırlıkça >% 99) olduğu tespit edilmiştir. Münch ve Barr (2001) tarafından strüvit çöktürmesini esas alan pilot ölçekli çalışmada anaerobik olarak çürütülmüş çamurun susuzlaştırılması sonucu oluşan sulu fazdan fosfor geri kazanımı incelenmiştir. Toplam fosfor (TP) değeri 78 mg/L; ortofosfat ( $PO_4-P$ ) değeri 61 mg/L olan sulu fazdan %94  $PO_4-P$  giderimi sağlanmıştır. Bu yöntemle elde edilen strüvitin kadmiyum (Cd), kurşun (Pb) ve civa (Hg) içerdiği tespit edilmiş fakat gübre olarak kullanımının önüne geçmeyecek seviyede olduğu belirtilmiştir. Çalışmada 42 L/sa sulu faz besleme debisi için günde 320 gram civarında strüvit elde edilebilmiştir. Elde edilen strüvitin fosfor içeriği %9,1'dir ve bu değer teorik olarak hesaplanarak tahmin edilen değerle uyumludur.

Phostrip® çamur üst fazından fosfor geri kazanımını hedefleyen ticari olarak geliştirilmiş patentli bir prosesdir (Perera vd., 2019). Tam ölçekli uygulanan diğer başlıca yan akımlardan fosfor geri kazanım teknolojileri ANPHOS®, DHV Crystallactor®, AirPrex®, Multifarm Harvest®, pilot ölçekli uygulamalara sahip olan teknolojiler ise P-RoC®, PRISA® şeklinde sıralanabilir. Bu teknolojiler yalnızca kristalleştirme ya da çöktürme/kristalleştirme proseslerini esas almaktadır ve nihai ürün olarak CaP ya da strüvit sunmaktadır (Amann vd., 2018; Chrispim vd., 2019). Bu teknolojilerde proses işletme parametreleri pH,  $Mg^{2+}$  dozu, çöken maddenin bekletme süresi; tasarım parametreleri ise reaktör geometrisi, reaktör boyutları, giriş ve çıkış debisi, kimyasal dozlama debisi şeklinde sıralanabilir (Mavinic vd., 2007). Genel olarak çöktürme/kristalleştirme proseslerinin meydana geldiği reaktör ince kum ya da önceden elde edilmiş strüvit ile aşılaraq ilk kristalleştirme adımı kolaylaştırılır (Egle vd., 2015).

AÇ üst fazı, çamur susuzlaştırmada oluşan sulu faz gibi AAT'de oluşan yan akımlardan fosfor geri kazanımı tam ölçekli uygulamalara sahiptir. Bu amaca hizmet eden ticari olarak geliştirilmiş birçok teknoloji mevcuttur. Uygun teknoloji; ekonomik, teknik ve çevresel uygulanabilirliğe göre geri kazanım yapılacak AAT'ye özgü seçilmelidir.

## 2.4 Arıtma tesisi çamurundan fosfor geri kazanımı

Biyolojik fosfor giderimi sağlayan proseslerin bulunduğu AAT'lerde giriş atıksuyundaki fosforun %90'a kadar kısmı

arıtma çamuruna geçmektedir. Fakat aynı zamanda giriş atıksuyundaki ağır metallerin %50-80'i AAT çamuruna aktarılmaktadır. Dolayısıyla AAT çamurunun herhangi bir arıtma olmaksızın tarımsal uygulamalarda kullanılması durumunda ağır metaller tarımsal arazilere geçmesi olacaktır (Egle vd., 2016). Özetle arıtma çamurunun tarım arazilerinde doğrudan gübre olarak kullanılması insan sağlığı için potansiyel risk oluşturan bir uygulamadır. Bu sebeple bazı ülkeler bu uygulamayı sınırlandırmış ya da doğrudan yasaklamıştır (Hollanda, İsviçre gibi). AAT çamurundan fosfor geri kazanımında anaerobik arıtma, termal hidroliz, oksidasyon, yaş kimyasal işleme gibi çeşitli prosesler sıklıkla kullanılmaktadır (Egle vd., 2015). AAT çamurundan fosfor geri kazanımı için iki farklı yöntem vardır. Birinci yöntem uygun kimyasalların eklenmesiyle uygun koşullar altında doğrudan strüvit gibi geri kazanım nihai ürünlerini elde etmektir. İkinci yöntem ise çamurun içerdiği fosforun ekstraksiyonu ile oluşan fosfor bakımından zengin akımlardan geri kazanımdır (Yu vd., 2021). Cao vd. (2019) çamurdan yüksek saflıkta (%93,7) vivianite formunda fosfor geri kazanmıştır. Çalışmada anaerobik fermantasyon prosesi ile fosforun salımı sağlanarak reaktör üst fazında fosfor geri kazanımı gerçekleştirilmiştir. Çalışmada en fazla fosfor salımı için farklı koşullar denenerek karşılaştırılmıştır. Buna göre en yüksek fosfor salımı asidik fermantasyon (pH: 3) şartlarında demir(III) klorür ( $FeCl_3$ ) dozlaması ile gerçekleşmektedir. Bu şartlar altında çamurda bulunan TP'nin %85,69 oranında salımı sağlanabilmiştir. Farklı bir çalışmada ise alkali fermantasyon ile polialüminyum klorür (PACl) dozlanarak çöktürülmüş birincil çamurda bulunan fosforun salımının sağlanması amaçlanmıştır. Atıksuya eklenen 100 mg/L PACl ile atıksuda bulunan fosforun %90'ı çamura aktarılabilmektedir. Alkali fermantasyon ile (pH: 11) çamurda bulunan fosforun %36,49 oranında salımı sağlanmıştır. Reaktör üst fazında mevcut fosforun strüvit çöktürmesi ile %85 oranında geri kazanımı sağlanmıştır. Sonuç olarak kimyasal ilavesi ile atıksuda bulunan fosforun önemli bir kısmı çamura aktarılmış sonrasında alkali fermantasyon vasıtasıyla fosforun salımı sağlanmış ve üst fazda bulunan bu fosfor strüvit formunda çöktürülmüştür. Netice itibarıyla atıksudaki fosforun %28'e yakın kısmı geri kazanılmıştır (Chen vd., 2019).

Blöcher vd. (2012), NF membranı ile fosforu ağır metallerden ayırmayı amaçladığı çalışmada ileri biyolojik AAT'lerde ve alüminyum (Al) tuzları kullanılarak çöktürme uygulanan tesislerde oluşan çamurlardan ağır metal içermeyen fosforlu nihai ürün geri kazanımının mümkün olduğunu göstermiştir. NF ile fosfor geri kazanımı sağlanacak çamurda bulunan ağır metallerin son ürüne aktarımını azaltma üzerine yapılan bir diğer çalışmada Schütte vd. (2015) çürütülmüş çamuru seyrelterek NF membranından geçirmiştir. Bu çalışmada çürütülmüş çamurdaki fosforun salımı için  $H_2SO_4$  kullanılmıştır. Seyreltme işlemi her 100 mL çamur için 33 mL deiyonize su kullanılarak yapılmıştır. Her 100 mL çamur için 1,2 mL  $H_2SO_4$  kullanılarak asidik işleme sağlanmıştır. Sonrasında NF membranı kullanılmış ve bu sayede %95 üzerinde ağır metal NF sayesinde tutulurken fosfor tutulma verimi yalnızca %30 seviyesindedir. Dolayısıyla NF süzütüsünde bulunan yüksek konsantrasyonlu fosforun geri kazanımı sağlanabilmektedir.

AAT çamurundan fosfor geri kazanımı için farklı kimyasal/termal mekanizmaları esas alan pek çok ticarileşmiş patentli proses mevcuttur. Giffhorn prosesi, Stuttgart prosesi gibi yaş kimyasal yöntemlerle; termal hidroliz/arıtma gibi termal yöntemlerle; PHOXNAN yaklaşımı gibi yaş oksidasyon yöntemiyle; MERPHEC® gibi metalurjik yöntemlerle fosfor geri kazanımı uygulanmaktadır. Bu

yöntemler üç ana mekanizmayı esas olarak gerçekleştirilmektedir (Egle vd., 2015):

- I. Fosforun çözünmesi.
- II. Girişim yapan iyonların giderimi.
- III. Geri kazanım ve nihai ürün eldesi.

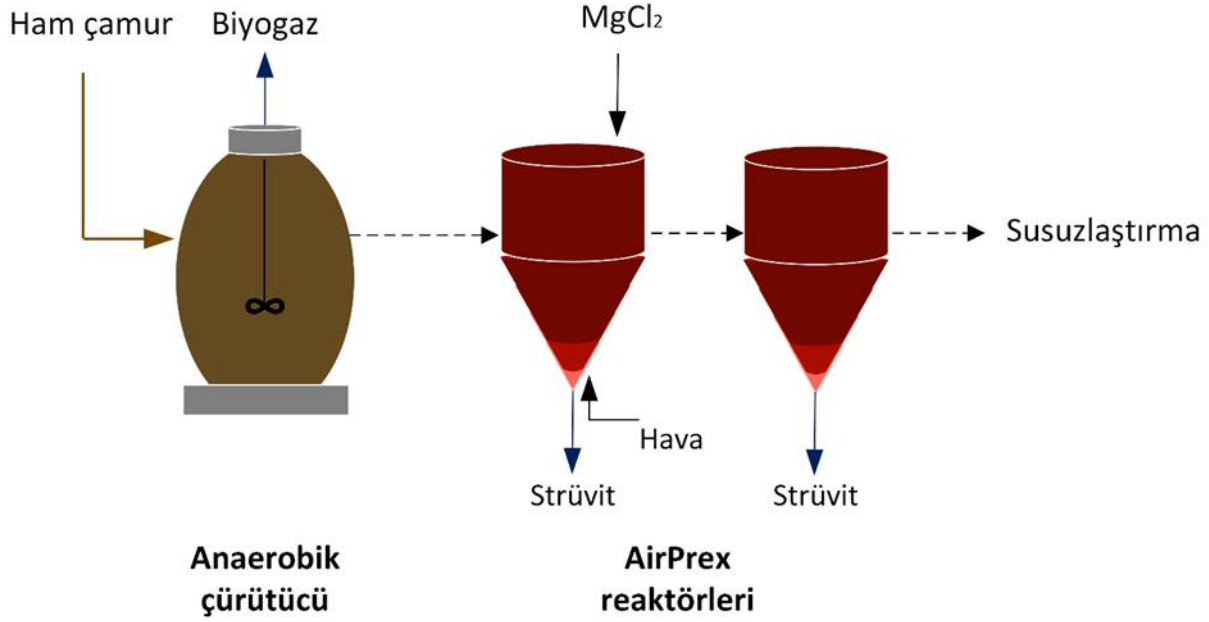
Bahsi geçen yöntemlerle çamurdan fosfor geri kazanımı nihai ürün olarak  $CaP$ , strüvit ve fosfor açısından zengin cüruf eldesiyle gerçekleşir. Gutierrez vd. (2020), farklı yöntemleri fosfor geri kazanımı açısından değerlendirmiş ve karşılaştırmıştır. Konvansiyonel AAT, ileri biyolojik fosfor giderimi yapan AAT ve kimyasalla fosfor çöktürmesi yapılan AAT'nin farklı noktalarından çamur numuneleri alınmıştır. Buna göre fosfor geri kazanım yöntemleri AirPrex®, Stuttgart prosesi, KREPRO prosesi; AAT'den çamur numunesi alınan noktalar da birincil çökeltme çamuru, ikincil çökeltme çamuru, yoğunlaştırılmış çamur ve anaerobik çürütülmüş çamur olarak seçilmiştir. Çalışma neticesinde en yüksek fosfor geri kazanımının her yöntemde de ileri biyolojik fosfor giderimi yapan tesisten alınan anaerobik çürütülmüş çamurdan yapıldığı tespit edilmiştir. Yöntemler karşılaştırıldığında ise fosfor geri kazanımı verimleri açısından sıralama KREPRO prosesi, Stuttgart prosesi ve AirPrex® şeklinde tespit edilmiştir.

AirPrex® teknolojisi ile çürütülmüş çamurdan strüvit çöktürmesi neticesinde fosfor geri kazanımı uygulanabilmektedir (Desmidt vd., 2015). AirPrex® teknolojisine ait fosfor geri kazanımında uygulanan prosese ait akım şeması Şekil 3'te verilmiştir. Uygulaması görece basit olan bu teknoloji, yüksek fosfor geri kazanım verimi elde edebilmek için biyolojik fosfor giderimi yapılan AAT'lerde önerilmektedir. AAT'de yer alan AÇ'de elde edilen çürütülmüş çamur AirPrex® reaktörlerine beslenerek havalandırılmaktadır. Orta kısımdan havalandırılan reaktöre  $MgCl_2$  ilavesi ile strüvit oluşumu ve çöktürülmesi sağlanmaktadır. Reaktördeki ortalama pH değerinin 7,8 – 8,5 aralığında olması gerekirken bekleme süresi 10 saat civarında olmalıdır (Ortwein 2018). Dozlanan  $MgCl_2$  beslenen çamurun  $PO_4^{3-}$  konsantrasyonu ile orantılı olacak şekilde belirlenir. Stitt vd. (2017) pilot ölçekli AirPrex® reaktörüne beslenen 1 metreküp çürütülmüş çamura karşı 1,8 litre %30'luk  $MgCl_2$  sıvı çözelti dozlamıştır. Reaktörlerin özel tasarımı sayesinde ince strüvit kristalleri reaktörde kalarak büyümeye devam ederken iri ve ağır strüvit daneleri reaktörün konik kısmına çökerek kolayca toplanabilmektedir. Waßmannsdorf AAT'de (Berlin, Almanya) yer alan AirPrex® reaktörü yaklaşık 17 metre uzunluğunda, 10 metre çapında ve 500 m<sup>3</sup> hacindedir. Reaktörün hidrolik bekleme süresi 8 saat olarak verilmiştir. Reaktöre 400 L/sa  $MgCl_2$  dozlanmaktadır. (Nieminen, 2010). AirPrex® teknolojisinin kimyasal ihtiyacı kaynaklı işletme maliyeti düşüktür. İşletme ve tasarım olarak diğer proseslerle karşılaştırınca AirPrex® uygulanabilirliği yüksek bir teknolojidir. Önemli bir avantaj olarak AirPrex® prosesi sayesinde çamurun su tutma kapasitesi azaldığı için çamur susuzlaştırma maliyetleri de önemli derecede azalmaktadır. 1 milyon nüfus eşdeğeri olan Amsterdam West AAT'de AirPrex® teknolojisi uygulanmaktadır. Anaerobik çürütülmüş çamura havalandırma sırasında  $MgCl_2$  eklenmesi ile günde 1.000 ton strüvit elde edilmektedir. Bu tam ölçekli fosfor geri kazanım prosesi ile yılda 400.000 Euro kazanç sağlanmaktadır (van der Hoek vd., 2017).

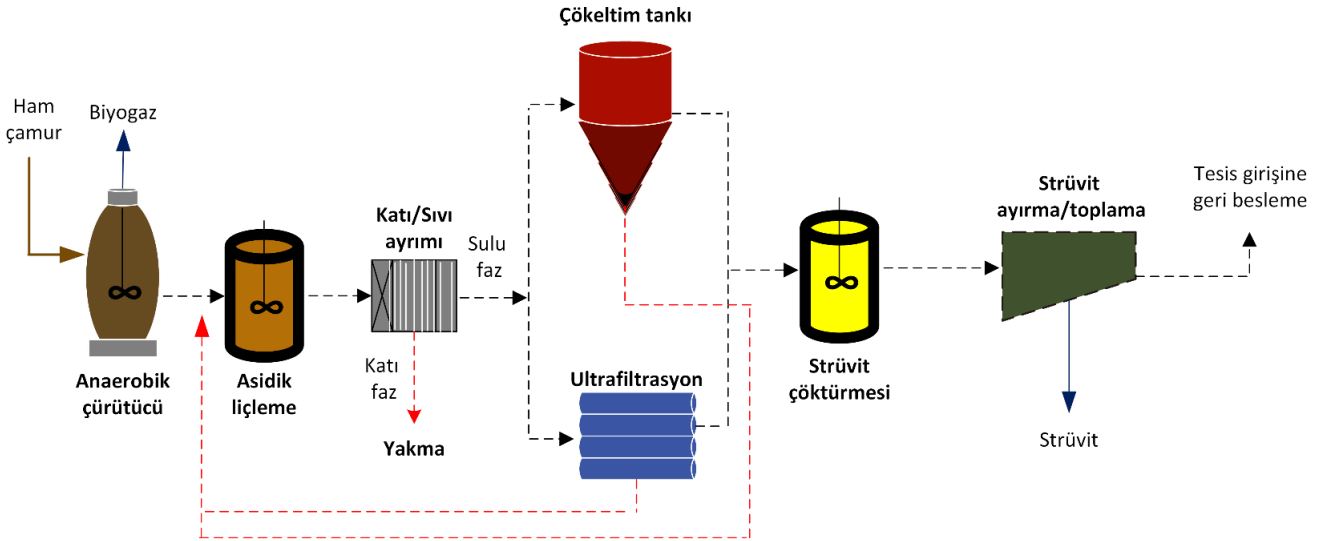
Yaş kimyasal yöntemlerle çürütülmüş çamurdan fosfor geri kazanımı sağlanan Stuttgart prosesine ait akım şeması Şekil

4'te verilmiştir. Stuttgart prosesi fosfor geri kazanımı yapılan AAT'lerde mevcut proseslerde herhangi bir tasarımsal değişikliğe ihtiyaç duyulmadan AAT'lere kolayca entegre

edilebilmektedir. Proses sırasıyla asidik liçleme ve strüvit çöktürmesi adımlarını esas almaktadır.



Şekil 3: AirPrex prosesi akım şeması (Desmidt vd., 2015'den uyarlanmıştır).



Şekil 4: Stuttgart prosesi akım şeması (Naji vd., 2016'dan uyarlanmıştır).

Asidik liçleme ile fosfor salımı gerçekleşikten sonra filtre pres, santrifüj gibi mekanik separatörler ile fosfor bakımından zengin sulu fazın ayrılması sağlanır. Elde edilen sulu faz yine de küçük partiküller içermektedir. Dolayısıyla küçük partiküllerin giderimi için ultrafiltrasyon ya da çökeltim prosesleri uygulanabilmektedir. Ultrafiltrasyon, çökeltim göre daha yüksek kalitede son ürün eldesi sağlamaktadır (Meyer vd., 2015). Strüvit çöktürmesi sağlanan reaktörde, metal iyonları sitrik asitle girdiği kompleksleşme reaksiyonları neticesinde strüvite aktarılmamış olur. Bu sayede elde edilen yüksek fosforlu nihai ürün ağır metal bakımından risk teşkil etmeyecek düzeyde tutulabilir.

Ribarova vd. (2017), AAT'den aldığı çamur ve üst faz numunelerinde fosfor konsantrasyonunu incelemiş ve yoğunlaştırılmış çamur, anaerobik çürütülmüş çamur, susuzlaştırma ve yoğunlaştırma üst fazlarını karşılaştırmıştır. Buna göre yoğunlaştırılmış çamur ve anaerobik çürütülmüş çamurun en yüksek fosfor

konsantrasyonuna sahip olduğu tespit etmiştir. AAT fosfor yükü her bir akımın debisi göz önünde bulundurularak hesaplandığında en yüksek fosfor geri kazanımının anaerobik çürütülmüş çamurdan yapılabileceği tespit edilmiştir. Anaerobik çürütülmüş çamurdan strüvit çöktürmesi yöntemi ile giriş atıksuyundaki fosforun %5'inin geri kazanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır (Saerens vd., 2021).

Tam ölçekli fosfor geri kazanım uygulaması olan Leuven AAT'de (Belçika) NuReSys® teknolojisi vasıtasıyla anaerobik çürütülmüş çamura MgCl<sub>2</sub> ilavesi ile son ürün olarak strüvit elde edilmektedir. Bu uygulama neticesinde tesise gelen fosfor yükünün %15'inin geri kazanımı sağlanmaktadır (Chrispim vd., 2019).

Fosfor geri kazanımının yapılabileceği farklı özellikteki AAT çamurları; ham çamur, çürütülmüş çamur, yoğunlaştırılmış çamur ve susuzlaştırılmış çamur olarak sıralanabilir. Bu

amaç doğrultusunda gerek ticari olarak geliştirilmiş ve uygulanmış gerekse AR-GE aşamasında çeşitli kimyasal ve termal yöntemler bulunmaktadır. Özellikle ileri biyolojik fosfor giderimi yapan AAT'lerde çamurdan yüksek miktarda fosfor kazanımı elde etmek mümkündür. Fakat bu yöntemlerin AAT'de arıtılması gereken yeni atık akımlar (ağır metal içeriği yüksek) oluşturma gibi olumsuz yan etkileri olabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır.

## 2.5 Çamur yakma tesisi külünden fosfor geri kazanımı

Termal bir proses olan yakma sayesinde önemli bir hacim azalması, organik kirleticilerin yok edilmesi, patojen giderimi gibi olumlu sonuçlar elde edilir (Jupp vd., 2021). Yakma sonrası ortaya çıkan kalıntı %9-13 arasında fosfor içerdiği için değerli bir son üründür (Moreno ve Espada, 2020). AAT çamurunun yakılmasıyla oluşan kül ile AAT giriş fosforunun %60 ila 90 civarındaki kısmı çamur külü üzerinden geri kazanılabilir (Egle vd., 2016). Fakat birçok metal uçucu olmayan formdadır dolayısıyla yakma ile hacimsel azalma sonrasında elde edilen külde ağır metaller daha konsantrasyon hâle gelir. Yüksek ağır metal konsantrasyonu nedeniyle çamur külünün tarımsal uygulamalarda doğrudan kullanımı uygun değildir. Ayrıca çamur külünün ihtiva ettiği fosfor suda çözünabilir özellikte değildir (Egle vd., 2015). Bu gibi nedenlerle çamurda olduğu gibi çamur külünde de yaş kimyasal ve termokimyasal proseslerle arıtma uygulanması gerekmektedir (Jupp vd., 2021). Bu prosesler biyoliçleme, yaş kimyasal özütleme, yaş kimyasal liçleme, termokimyasal, termoelektirik, termoindirgeme şeklinde sıralanabilir (Egle vd., 2015). Yaş kimyasal ekstraksiyon asidik ve bazik yöntemler vasıtasıyla fosfor geri kazanımını esas almaktadır. Nihai hedef ekstraksiyon ardından uygulanacak kimyasal çöktürme ile strüvit veya CaP formunda fosfor geri kazanımını sağlamaktır (Liu vd., 2021). Termokimyasal yöntemlerde de yüksek sıcaklıkta çamur külü ve dozlanan kimyasalın reaksiyona girmesiyle ağır metal giderimi hedeflenir (Jupp vd., 2021).

Çamur külünden fosfor ekstraksiyonu prosesinde çoğunlukla  $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$ , hidroklorik asit (HCl), ortofosforik asit ( $H_3PO_4$ ) gibi asitler kullanılmaktadır. Fosfor ekstraksiyonunda ekonomik fizibilite açısından  $H_2SO_4$  en uygun asit olarak kabul edilir. Bununla birlikte  $H_2SO_4$  kullanılarak yapılan ekstraksiyon daha az kompleksleşme reaksiyonunun meydana gelmesinden ötürü düşük miktarlarda ağır metal ekstraksiyonu ile neticelenir (Ciešlik ve Konieczka, 2017).

Çamur külünden fosfor geri kazanımı amacıyla ticari olarak geliştirilmiş patentli yaş kimyasal yöntemlere RecoPhos®, EcoPhos®, PASCH®, LEACHPHOS®, termokimyasal yöntemlere ise AshDec® örnek verilebilir (Egle vd., 2016).

EcoPhos® prosesinde öncelikle HCl veya  $H_3PO_4$  ilavesi ile fosforun ekstraksiyonu sağlanırken daha sonrasında da çöktürme işlemi ile fosfor geri kazanımı sağlanır. AshDec® prosesinde ise çamur külü  $MgCl_2$  ve  $CaCl_2$  dozlaması yapılarak 20-30 dakika boyunca 1000 °C sıcaklığa maruz bırakılır. Bu sıcaklıkta Cd, Pb, bakır (Cu) ve çinko (Zn), tuzlarla etkileşime girerek gaz forma geçer ve buharlaşır. Dozlanan klorlu birleşik, çamur külünün ağır metal konsantrasyonuna bağlıdır. Termokimyasal arıtma sonrasında arıtılan çamur külü diğer besi maddeleri ( $NH_4NO_3$ ,  $K_2SO_4$ , KCl) ile özel mikserler aracılığıyla karıştırılarak topaklaştırılır ve pelet formuna getirilir (Desmidt vd., 2015). SESAL-phos prosesi ise fosfor geri kazanımının yanı sıra Al geri kazanımını da hedefleyen ardışık reaktörler

ve separasyon adımlarının yer aldığı bir prosestir (Şekil 5). Laboratuvar ölçekli geliştirilen bu proseste ilk olarak çamur külündeki fosforun HCl (0.4 mol/L) eklenerek salımı sağlanmaktadır. İkinci adımda ise asidik çözelti ve ağır metaller santrifüj vasıtasıyla ayrılmaktadır. Üçüncü adımda alüminyum fosfatın çözünmesi için NaOH eklenmektedir. Son olarak  $CaCl_2$  eklenerek geri kazanım ürününün çöktürülmesi sağlanmaktadır. Çöken CaP'in son adımda separasyonu sağlanmaktadır. Çözünmüş Al ise presipitan olarak değerlendirilebilmektedir (Petzet vd. 2011). SESAL-phos prosesi hem fosfor hem de Al geri kazanımı açısından oldukça dikkat çekici bir proses olsa da tasarım esaslı değerlendirildiğinde gerek yüksek ekipman gereksinimi gerek de yüksek kimyasal ihtiyacı gibi öne çıkmaktadır.

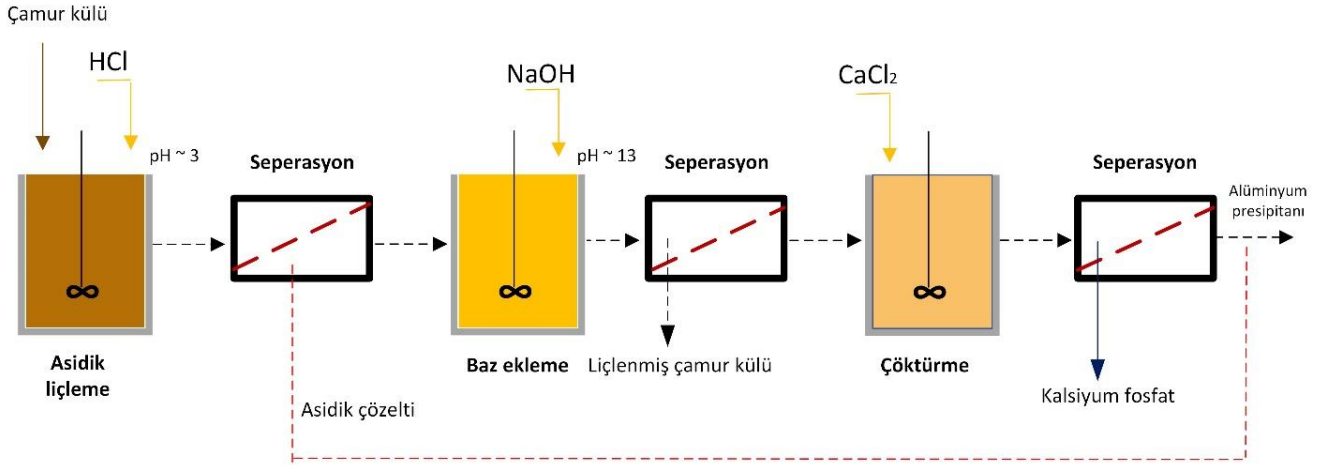
Sonuç itibarıyla çamur külünden fosfor geri kazanımında üç genel yaklaşım bulunmaktadır (Egle vd., 2015).

- I. Ağır metal giderimi olmaksızın yüksek fosfor geri kazanımı (giriş fosfor yükünün %85'ine kadarı geri kazanılabilir).
- II. Termokimyasal yöntemlerle kısmi ağır metal giderimi sağlayarak yüksek fosfor geri kazanımı (giriş fosfor yükünün %85'ine kadarı geri kazanılabilir).
- III. Yaş kimyasal yöntemlerle yüksek verimde ağır metal giderimi fakat daha düşük fosfor geri kazanımı (giriş fosfor yükünün %70'e kadarı geri kazanılabilir).

Ma ve Rosen (2021), çamur külünün arazi uygulamaları üzerine geniş bir çalışma yapmış ve önemli sonuçlara ulaşmıştır. Buna göre AAT'de uygulanan arıtma yöntemleri, AAT'ye gelen endüstriyel atıksu karakteristiği gibi unsurların çamur külünün fosfor içeriği ve iz kirletici konsantrasyonları gibi kimyasal bileşimi üzerine yüksek etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla doğrudan arazi uygulamaları söz konusu olduğunda arıtılmış veya arıtılmamış durumda olması fark etmeksizin çamur külü kaynaklı ağır metal kontaminasyonu izlenmelidir. Çalışmada literatüre göre çamur külü kaynaklı araziye geçen ağır metal yükünün görece düşük olmasına rağmen risk değerlendirme çalışmalarının uygulanması gerekliliği vurgulanmıştır.

Semerci vd. (2021) çamur külünden fosfor geri kazanımı için biyoliçleme yöntemini uygulamıştır. Bu amaç doğrultusunda ileri biyolojik bir AAT'den alınan kurutulmuş çamur numunesi kül fırını ile 850 °C'de yakılarak çamur külü elde edilmiştir. Nihai ürün olarak  $H_3PO_4$  eldesi sağlanan çalışmada %24,6 fosfor geri kazanımı sağlanmıştır. Çalışmada biyoliçleme yöntemiyle fosfor geri kazanımının gelecek vaat eden bir yöntem olduğuna ve prosesi etkileyen parametrelerin optimizasyonu neticesinde daha yüksek fosfor geri kazanımı sağlanabileceğine vurgu yapılmıştır. Xu vd. (2012) 0,5 mol/L HCl ile çamur külünden fosfor ekstraksiyonu sağlamak üzere çalışmalar yürütmüştür. Sonuç olarak %95'ten daha fazla fosfor ekstraksiyonu sağlanmıştır. Daha sonrasında strüvit formunda fosfor geri kazanımının en yüksek olacağı farklı pH ve Mg:N:P molar oranlarının etkisi incelenerek optimum koşullar tespit edilmiştir. Buna göre pH 10 ve Mg:N:P molar oranı 1,05:0,98:1 olduğunda %97,2'ye kadar fosfor geri kazanımı sağlanabilmiştir. Ayrıca çalışmada ulaşılan önemli sonuçlardan biri de strüvit oluşumunu etkileyen parametreler etki faktörleri esas alınarak sıralandığında pH, N:P, Mg:P gibi bir sıralamaya ulaşılmış olmasıdır. Petzet vd. (2012) asidik ve alkali liçleme yöntemlerinin optimize edilmiş bir kombinasyonu ile çamur külünden fosfor geri kazanımını incelemiştir. Sonuç olarak





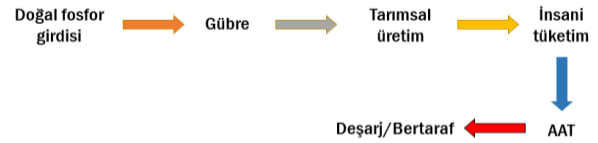
Şekil 5: SESAL-phos prosesi akım şeması (Petzet vd. 2011'den uyarlanmıştır).

Al tuzlarının kimyasal fosfor çöktürmesi için kullanıldığı AAT'lerde oluşan çamur külünden asidik ve alkali işleme yöntemlerinin kombinasyonu ile %78'e kadar fosfor geri kazanımı yapılabileceği tespit edilmiştir. Donatello vd. (2010) çamur külünden  $H_2SO_4$  vasıtasıyla  $H_3PO_4$  üretimini incelemiş ve %72 ila %91 aralığında değişen fosfor geri kazanım yüzdelerini sağlamıştır. Çalışma neticesinde elde edilen optimize edilmiş geri kazanım yöntemine göre %85'lik 195 kg  $H_3PO_4$  üretebilmek için 1 ton çamur külü, 368 kg %98'lik  $H_2SO_4$ , 426 kg %36'lık HCl ve 987 kg su gerektiği tespit edilmiştir. Luyckx ve Van Caneghem (2021) yakma sıcaklığının kül minerolojisi üzerindeki etkisini incelemiştir. Çamur külünden fosfor ekstraksiyon veriminin 850 °C'de maksimum (> %86) olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte ağır metal ekstraksiyonunun daha yüksek yakma sıcaklıklarında düştüğü tespit edilmiştir. En düşük ağır metal ekstraksiyonunun 1000°C'de (< 21%) olduğu sonucuna varılmıştır. Fakat yüksek sıcaklıklarda fosfor ekstraksiyon verimi düştüğü için 800-850 °C aralığındaki yakma sıcaklığı yüksek oranda fosfor geri kazanılabilirliği için önerilmiştir. Çamur külünden fosfor geri kazanımında hangi yaklaşımın izleneceği mevcut AAT prosesleri, potansiyel geri kazanım olanağı, nihai ürünün kalitesi, çevresel etkiler, teknik uygunluk ve ekonomik uygulanabilirlik gibi konular göz önünde bulundurularak seçilmelidir (Egle vd., 2016).

### 3. Değerlendirme ve Öneriler

Yeryüzündeki fosfor arzının neredeyse %90'a yakın kısmı fosfor bazlı gübre olarak değerlendirilerek tarım sektörünün ihtiyacını karşılamada kullanılmaktadır (Schroder vd., 2010). Fosforun sınırlı ve tükenmekte olan bir kaynak olması araştırmacıları fosfor geri kazanımı uygulamalarına yöneltmiştir. Konvansiyonel AAT'lerdeki fosfor giderme stratejisi lineer ekonomi modelini esas almaktadır (Şekil 6). Bu anlayış Birleşmiş Milletler tarafından belirlenen sürdürülebilir kalkınma amaçlarıyla çelişmektedir. Dolayısıyla günümüzde, konvansiyonel AAT konsepti yerini enerji ve madde geri kazanımını esas alan döngüsel ekonomi modeline bırakmaktadır. AAT'lerin biyorafinerilere dönüşümü ile alıcı ortam deşarj standartlarının sağlanmasının ötesinde değerli kaynakların geri kazanımı sağlanarak ortaya çıkan "Atıksu Biyorafinerileri" döngüsel ekonomi konseptine doğrudan hizmet etmektedir (Verster vd., 2014). AAT'lerdeki fosfor stratejisi döngüsel ekonomiyi

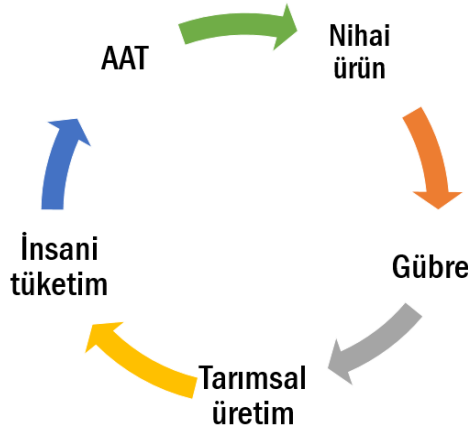
göre güncellendiğinde (Şekil 7) AAT'de geri kazanılan fosfor ile üretilen gübre tarım sektöründe kimyasal gübreyle ikame olarak kullanılabilir. Böylece doğal fosfor kaynaklarının sürdürülebilir yönetimine katkı sunularak doğal kaynakları fosfor talebini karşılamaya yeterli olmayan ülkelerin dışa bağımlılığının azaltılmasına katkı sunulabilir.



Şekil 6: Lineer ekonomi modelini esas alan AAT fosfor giderim stratejisi.

Tablo 1'de AAT için akım bazında, farklı yöntemlerle fosfor geri kazanım uygulamalarına dair bazı çalışmalar verilmiştir. AAT'deki akımlar değerlendirildiğinde AAT çıkış suyundan fosfor geri kazanımı teknik olarak mümkün olsa da ekonomik açıdan uygulanabilir görünmemektedir. Ayrıca toplanan idrardan fosfor geri kazanımı ise toplama ve depolama konusundaki altyapı zorlukları nedeniyle yalnızca küçük ölçekli (bölgesel) uygulamalarda mümkün olabilmektedir.

Pearl® prosesinin geliştirici firması Ostara'ya göre strüvite çöktürmesi ile fosfor geri kazanım sisteminin genel olarak geri ödeme süresi 3-10 yıl arasında değişmektedir (Bergmans, 2011). Bu kapsamda Chrispim vd. (2019) fosfor geri kazanımına ilaveten; diğer değerli maddelerin geri kazanımı, enerji geri kazanımı ya da yeniden kullanıma uygun kalitede bir arıtılmış su sağlama gibi yöntemlerle fosfor geri kazanımına yönelik proseslerin ekonomik olarak uygulanabilir hale getirilebileceğini önermektedir. Bu sebeple AAT'lerdeki geri kazanım uygulamaları bütüncül olarak ele alınmalı ve birlikte değerlendirilmelidir. Ayrıca geri kazanım uygulamalarından elde edilen fosfor bazlı gübrenin kimyasal gübre ile rekabet edebilmesi için devlet hibe ve teşvikleri sağlanması gerekmektedir.



Şekil 7: Döngüsel ekonomi modelini esas alan AAT fosfor stratejisi.

Literatürdeki çalışmalara göre en yüksek fosfor geri kazanım potansiyeline sahip AAT akımları sırasıyla çamur yakma tesisi külü ve çamurdur. Bunun yanısıra yan akımlar da hem fosfor geri kazanım potansiyeli açısından hem de iç kireçlenmenin önüne geçerek bakım/onarım maliyetlerinin düşürülebilmesi açısından geri kazanıma elverişlidir. Bununla birlikte ileri biyolojik arıtım yapılmayan bir AAT'de fosfor geri kazanımı gerçekleştirilecekse çıkış atıksuyundan geri kazanım da göz önünde bulundurulabilir. Çamur ve çamur külünden fosfor geri kazanım potansiyeli yüksek olmasına rağmen kimyasal ve enerji ihtiyacı kaynaklı fosfor geri kazanım maliyetinin artma ihtimali dikkate alınmalıdır. İleri biyolojik arıtma uygulanan tesislerde fosforun büyük kısmının çamura geçmesinden dolayı çıkış suyundaki fosforun seyreltik olması beklenmektedir. Bu şartlar altında çıkış suyundan geri kazanım potansiyeli cazip değildir. Fakat geri kazanım uygulamaları değerlendirilirken tek kriter fosfor geri kazanım verimi değildir. Fosfor geri kazanımının sağlanacağı kaynak ve bu doğrultuda kullanılacak yöntem elde edilen nihai ürünün çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri olan maddeleri (ağır metal, organik mikrokirletici) içerip içermemesi, kimyasal ve enerji ihtiyacından kaynaklı işletme maliyeti, ekonomik ve teknik uygulanabilirlik gibi hususlar göz önünde bulundurularak seçilmeli ve yapılacak yatırımın geri ödeme süresi dikkate alınmalıdır. Ayrıca seçilecek geri kazanım yönteminin AAT fosfor kütle dengesi açısından ne gibi sonuçlar doğuracağı, uygulama neticesinde ilave bir yan akım oluşup oluşmayacağı düşünülmesi gereken önemli hususlar arasındadır. Tam ölçekli uygulamalara geçilmeden önce laboratuvar ve pilot ölçekli deneysel çalışmalar ile elde edilecek nihai ürünün tarım sektöründe gübre olarak kullanım potansiyeli araştırılmalıdır. Ayrıca deneysel çalışmalar, Yaşam Döngüsü Analizi (YDA) ve Fizibilite Analizi gibi çalışmalarla desteklenerek uygulanacak fosfor geri kazanım yönteminin çevresel ve ekonomik etkileri de incelenmelidir.

Avrupa'da 2020 yılında 990 ila 1250 ton arasında fosforun strüvite olarak geri kazanılacağı öngörülmüştür. Pearl®, Phosphogreen® gibi teknolojilerle elde edilen strüvite tonu başına 350-1000 Euro gibi geniş bir aralıkta piyasada fiyatlanmaktadır (Muys et al., 2021). Münch ve Barr (2001), 21.yüzyıl başında yaptıkları piyasa araştırmasında Avusturya'da strüvite tonu başına 198-300 \$ aralığında satılabileceğini vurgulamıştır. Bu durum piyasada geri kazanılan fosfora olan talebin arttığını ve bunun strüvite fiyatlarına yansıtıldığını göstermektedir. Avrupa Birliği, 2019 yılında revize edilen Gübre Regülasyonu'nda biyoçar,

strüvite, kül bazlı nihai geri kazanım ürünleri için belirgin bir market talebi olduğunu belirtmiştir (EC, 2019). Bu kapsamda Dünya Bankası (2022) verilerine göre 2010-2021 arasında kimyasal gübrede bulunan fosforun birim maliyeti analiz edildiğinde DAP (Di-ammonium Phosphate) gübresi için  $1,99 \pm 0,39$  \$ kg P<sup>-1</sup>; TSP (triple superphosphate fertilizer) gübresi için  $1,82 \pm 0,38$  \$ kg P<sup>-1</sup>; fosfat kayası için  $0,85 \pm 0,19$  \$ kg P<sup>-1</sup> bulunmuştur. Tablo 2'ye göre geleneksel yöntemlerle elde edilen kimyasal gübrenin ihtiva ettiği fosforun tüketici için birim maliyetinin AAT'den geri kazanılan fosforun üretici için birim maliyetinden pek çok akım için daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum AAT'de geri kazanılan fosfor içeren nihai ürünlerin geleneksel kimyevi gübre ile güncel piyasa şartlarında rekabet edebilme olasılığını fazlasıyla düşürmektedir. Fakat yine Dünya Bankası (2022) verileri incelendiğinde 2020-2021 yılları arasında fosfor bazlı kimyasal gübrede bulunan fosforun birim fiyatındaki artış dikkat çekmektedir. Birim Birim fiyatlar, DAP gübresi için 2020 yılında  $1,56$  \$ kg P<sup>-1</sup> iken 2021 yılında  $2,95$  \$ kg P<sup>-1</sup>; TSP gübresi için 2020 yılında  $1,32$  \$ kg P<sup>-1</sup> iken 2021 yılında  $2,64$  \$ kg P<sup>-1</sup>; fosfat kayası için 2020 yılında  $0,58$  \$ kg P<sup>-1</sup> iken 2021 yılında  $0,93$  \$ kg P<sup>-1</sup> olmuştur. Bu fiyat artışlarının en önemli nedeni kimyasal gübreye olan talebin yıldan yıla artarken kaynakların ise azalmasıdır. Dolayısıyla gelecek yıllarda birim fosfor fiyatlarındaki artışın sürmesi beklenmektedir. Ayrıca 2008 yılında fosfor birim fiyatlarının %800 gibi bir çok artış yaşadığı göz önünde bulundurulduğunda geleneksel yöntemlerle elde edilen fosfor için fiyat istikrarsızlığı riskinin ne boyutta olduğu da anlaşılabilir (De Boer vd., 2019). Bununla birlikte çeşitli akımlardan farklı teknolojilerle geri kazanılan fosforun birim maliyeti için ilk yatırım maliyeti ve çeşitli işletme maliyetleri; doğrudan (zengin fosfor içeren nihai ürünün piyasada satılması) ve dolaylı (fosfor arıtma maliyetinin düşmesi, bertaraf edilecek çamur hacminin azalması vs.) gelirler birlikte değerlendirilerek analiz edildiğinde fosfor geri kazanım teknolojileri vasıtasıyla kâr elde edilebileceği görülmektedir. Nättorp et al. (2017), çamurdan çöktürme ve külden işleme yöntemleriyle fosfor geri kazanım yöntemleriyle kâr elde edilebileceğini belirtmiştir. Münch ve Barr (2001), Avusturya'da bulunan Oxley Creek AAT'de strüvite çöktürmesi ile en iyi senaryoda yılda 149.000 AUD (Avusturya doları) kâr, en kötü senaryoda ise -13.000 AUD zarar ile karşılaşılabileceğini öngörmüştür. Egle vd. (2016), farklı akımlardan ticari olarak geliştirilmiş patentli çeşitli teknolojiler ile fosfor geri kazanımlarının birim maliyetlerini incelemiştir. Buna göre yan akımlardan  $2,2$  \$ kg P<sup>-1</sup> ile AirPrex®, çamurdan  $1,21$  \$ kg P<sup>-1</sup> ile Aquareci®, çamur külünden  $1,65$  \$ kg P<sup>-1</sup> ile EcoPhos® teknolojileri kullanılarak fosfor geri kazanımından en yüksek kârın elde edilebileceğini belirtmiştir (Tablo 2). İncelenen veriler baz alınarak önümüzdeki yıllarda Yeşil Mutabakat, Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri gibi eylem planları çerçevesinde devletler tarafından yapılacak düzenlemeler ve/veya sağlanacak hibe ve teşvikler ile fosfor geri kazanım teknolojilerinin ekonomik uygulanabilirliğinin daha da artması öngörülmektedir.

Tablo 1: AAT'lerde farklı yöntemlerle fosfor geri kazanımı uygulamalarına dair literatürde yer alan bazı çalışmalar.

| Akım                  | Yöntem/Teknoloji                             | Ölçek       | Fosfor geri kazanım verimi (%) | Nihai ürün                                    | Referans                |
|-----------------------|--|-------------|--------------------------------|---|-------------------------|
| Yan akımlar           | Kristalizasyon                               | Pilot       | 90                             | Strüvit                                       | (Mavinic et al., 2007)  |
|                       | Çöktürme                                     | Laboratuvar | 90,6                           | Strüvit                                       | (Xavier et al., 2014)   |
|                       | Akışkan yataklı reaktör                      | Laboratuvar | 70,7                           | Strüvit                                       | (Ghosh et al., 2020)    |
|                       | Ozonlama ve Kristalizasyon                   | Laboratuvar | 86,4                           | CaP   | (Vasenko et al., 2020)  |
| İkincil arıtma çıkışı | İyon değişimi                                | Pilot       | verilmemiş                     | Strüvit; CaP                                  | (Amann et al., 2018)    |
|                       | Adsorpsiyon                                  | Laboratuvar | >80                            | Biyoçar                                       | (Xia et al., 2020)      |
|                       | Nanofiltrasyon membranı                      | Laboratuvar | >90                            | CaP   | (Nir et al., 2018)      |
|                       | Adsorpsiyon                                  | Laboratuvar | verilmemiş                     | CaP   | (Xiao et al., 2017)     |
| Çamur                 | İleri osmoz-Membran distilasyonu             | Laboratuvar | verilmemiş                     | Strüvit                                       | (Xie et al., 2014)      |
|                       | Kristalizasyon                               | Tam ölçek   | 34                             | Strüvit                                       | (Saerens et al., 2021)  |
|                       | Yaş kimyasal ekstraksiyon / çöktürme         | Tam ölçek   | 35-60                          | Strüvit; CaP                                  | (Chripim et al., 2019)  |
|                       | Yaş kimyasal ekstraksiyon / çöktürme         | Pilot       | 50-80                          | Biyoçar                                       | (Jupp et al., 2021)     |
| Çamur külü            | Termokimyasal arıtma                         | Tam ölçek   | >90                            | Yüksek fosforlu pelet                         | (Desmidt et al., 2015)  |
|                       | Asidik ve Alkali yaş kimyasal ekstraksiyon   | Laboratuvar | 94 ; 60                        | Yüksek fosforlu sıvı faz                      | (Semerci, et al., 2021) |
|                       | Asidik yaş kimyasal ekstraksiyon             | Pilot       | 85                             | Mineral gübre, H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> | (Chripim et al., 2019)  |
|                       | Asidik yaş kimyasal ekstraksiyon ve çöktürme | Laboratuvar | 75-94                          | Strüvit                                       | (Xu et al., 2012)       |

Tablo 2: AAT'de farklı akımlardan geri kazanılan fosfor ve geleneksel yöntemlerle üretilen kimyasal gübrenin ihtiva ettiği fosforun birim maliyetinin karşılaştırması.

| Kaynak                                | Tür           | Birim maliyet (\$ kg P <sup>-1</sup> ) | Referans               |
|---------------------------------------|---------------|--|------------------------|
| Geleneksel kimyasal gübre             | Fosfat kayası | 0,85 ± 0,19                            | (Dünya Bankası, 2022)  |
|                                       | DAP gübresi   | 1,99 ± 0,39                            |                        |
|                                       | TSP gübre     | 1,82 ± 0,38                            |                        |
| AAT'de farklı akımlardan geri kazanım | Yan akımlar   | -0,5 - 0,37                            | (Shu et al., 2006)     |
|                                       |               | 3,52 - 4,03                            | (Nättorp et al., 2017) |
|                                       |               | -2,2 - 31,57                           | (Egle vd., 2016)       |
|                                       | Çamur         | -4,19 - 11,05                          | (Nättorp et al., 2017) |
|                                       |               | -1,21 - 9,35                           | (Egle vd., 2016)       |
|                                       |               | -1,33 - 5,1                            | (Nättorp et al., 2017) |
|                                       |               | -1,65 - 1,76                           | (Egle vd., 2016)       |

\* Birim maliyetler çalışmalarda ulaşılan en düşük ve en yüksek değerler verilerek aralık olarak ifade edilmiştir. Eksi (-) birim maliyet, elde edilen nihai üründen toplam gelir ve giderlerin analizi sonucunda kâr eldesini belirtmektedir.

Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır. Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### 4. Kaynaklar

Agronomist, G. (1998). Phosphorus availability in the 21st century Management of a non- renewable resource. CI, 1–13.

Amann, A., Zoboli, O., Krampe, J., Rechberger, H., Zessner, M., & Egle, L. (2018). Environmental impacts of phosphorus recovery from municipal wastewater. Resources, Conservation and Recycling, 130(December 2017), 127–139.

Atienza-Martinez, M., Gea, G., Arauzo, J., Kersten, S., Koostra, M. (2014): Phosphorus recovery from sewage sludge ash. In: Biomass and Bioenergy 65 (42-50)

Bashar, R., Gungor, K., Karthikeyan, K. G., & Barak, P. (2018). Cost effectiveness of phosphorus removal processes in municipal wastewater treatment. Chemosphere, 197, 280–290.

Beler-Baykal, B., Allar, A. D., & Bayram, S. (2011). Nitrogen recovery from source-separated human urine using clinoptilolite and preliminary results of its use as fertilizer. Water Science and Technology, 63(4), 811–817. doi:10.2166/wst.2011.324

Bergmans B. (2011). Struvite Recovery from Digested Sludge. Thesis Master of Science in Civil Engineering. Delft University, Delft, Netherlands.

Blöcher, C., Niewersch, C., & Melin, T. (2012). Phosphorus recovery from sewage sludge with a hybrid process of low pressure wet oxidation and nanofiltration. Water Research, 46(6), 2009–2019. https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.01.022

Britton, A., Koch, F. A., Mavinic, D. S., Adnan, A., Oldham, W. K., & Udala, B. (2005). Pilot-scale struvite recovery from anaerobic digester supernatant at an enhanced biological phosphorus removal wastewater treatment

plant. Journal of Environmental Engineering and Science, 4(4), 265–277. https://doi.org/10.1139/s04-059

Cao, J., Wu, Y., Zhao, J., Jin, S., Aleem, M., Zhang, Q., & Fang, F. (2019). Bioresource Technology Phosphorus recovery as vivianite from waste activated sludge via optimizing iron source and pH value during anaerobic fermentation. Bioresource Technology, 293(August), 122088. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122088

Chen, Y., Lin, H., Yan, W., Huang, J., Wang, G., & Shen, N. (2019). Bioresource Technology Alkaline fermentation promotes organics and phosphorus recovery from polyaluminum chloride-enhanced primary sedimentation sludge. Bioresource Technology, 294(September), 122160. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122160

Chrispim, M. C., Scholz, M., & Nolasco, M. A. (2019). Phosphorus recovery from municipal wastewater treatment: Critical review of challenges and opportunities for developing countries. Journal of Environmental Management, 248(July), 109268. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109268

Cieślak, B., & Konieczka, P. (2017). A review of phosphorus recovery methods at various steps of wastewater treatment and sewage sludge management. The concept of “no solid waste generation” and analytical methods. Journal of Cleaner Production, 142, 1728–1740. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.116

Cordell, D., Drangert, J. O., & White, S. (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. Global Environmental Change, 19(2), 292–305. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009

Cooper, J., Lombardi, R., Boardman, D., & Carliell-marquet, C. (2011). Resources, Conservation and Recycling The future distribution and production of global phosphate rock reserves. “Resources, Conservation & Recycling,” 57(January), 78–86. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.09.009

De Boer, M. A., Romeo-Hall, A. G., Rooimans, T. M., &

- Slootweg, J. C. (2018). An assessment of the drivers and barriers for the deployment of urban phosphorus recovery technologies: A case study of the Netherlands. *Sustainability (Switzerland)*, 10(6), 1–19. <https://doi.org/10.3390/su10061790>
- De Boer, M.A.; Wolzak, L.; Slootweg, J.C. (2019). Phosphorus: Reserves, Production, and Applications. In *Phosphorus Recovery and Recycling*; Springer: Singapore, 2019; pp. 75–100; ISBN 9789811080319.
- Desmidt, E., Ghyselbrecht, K., Zhang, Y., Pinoy, L., Van Der Bruggen, B., Verstraete, W., Rabaey, K., & Meesschaert, B. (2015). Global phosphorus scarcity and full-scale P-recovery techniques: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(4), 336–384. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.866531>
- Donatello, S., Tong, D., & Cheeseman, C. R. (2010). Production of technical grade phosphoric acid from incinerator sewage sludge ash (ISSA). *Waste Management*, 30(8–9), 1634–1642. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.009>
- EC. (2019). Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending regulations (EC) no 1069/2009 and (EC) no 1107/2009 and repealing regulation (EC) no 2003/2003 (text with EEA relevance). European Parliament. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32019R1009>
- Egle, L., Rechberger, H., Krampe, J., & Zessner, M. (2016). Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies. *Science of the Total Environment*, 571, 522–542. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.019>
- Egle, Lukas, Rechberger, H., & Zessner, M. (2015). Overview and description of technologies for recovering phosphorus from municipal wastewater. *Resources, Conservation and Recycling*, 105, 325–346. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.016>
- Gell, K., Ruijter, F. J. d., Kuntke, P., Graaff, M. de, & Smit, A. L. (2011). Safety and Effectiveness of Struvite from Black Water and Urine as a Phosphorus Fertilizer. *Journal of Agricultural Science*, 3(3), 67–80. <https://doi.org/10.5539/jas.v3n3p67>
- Ghosh, S., Lobanov, S., & Lo, V. K. (2020). Chemical Engineering and Processing - Process Intensification Investigation of the impact of hydrodynamic parameters for phosphorus recovery from synthetic anaerobic digester supernatant in a fluidized bed reactor. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 157(June), 108155. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108155>
- Gundlach, J., Bryla, M., Larsen, T. A., Kristoferitsch, L., Gründl, H., & Holzner, M. (2021). Novel NoMix toilet concept for efficient separation of urine and feces and its design optimization using computational fluid mechanics. *Journal of Building Engineering*, 33(March 2020), 101500. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101500>
- Gutierrez, F., Kinney, K. A., & Katz, L. E. (2020). Phosphorus speciation in municipal wastewater solids and implications for phosphorus recovery. *Environmental Engineering Science*, 37(5), 316–327. <https://doi.org/10.1089/ees.2019.0360>
- Heinzmann, B., Engel, G. (2003). Phosphorus Recycling in Treatment Plants with Biological Phosphorus Removal. Seminar German Federal Environment Ministry/RWTH Aachen. “Recovery of phosphorus in land management and from water and wastes”, 6–7 February 2003, Berlin.
- International Biochar Initiative (IBI). (2015). Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar that Is Used in Soil (version number 2.1)
- Irwin, J., & Forrester, L. (2019). Urine collection practices in a small rural hospital: Evaluation of alignment with antimicrobial stewardship guidelines. *Canadian Journal of Infection Control*, 34(1), 35–40. <https://doi.org/10.36584/cjic.2019.005>
- Johir, M. A. H., George, J., Vigneswaran, S., Kandasamy, J., & Grasmick, A. (2011). Removal and recovery of nutrients by ion exchange from high rate membrane bio-reactor (MBR) effluent. *Desalination*, 275(1–3), 197–202. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.02.054>
- Jupp, A. R., Beijer, S., Narain, G. C., Schipper, W., & Slootweg, J. C. (2021). Phosphorus recovery and recycling-closing the loop. *Chemical Society Reviews*, 50(1), 87–101. <https://doi.org/10.1039/d0cs01150a>
- Kalaitzidou, K., Mitrakas, M., Raptopoulou, C., Tolkou, A., Palasantza, P. A., & Zouboulis, A. (2016). Pilot-Scale Phosphate Recovery from Secondary Wastewater Effluents. *Environmental Processes*, 3, 5–22. <https://doi.org/10.1007/s40710-016-0139-1>
- Kang, S. K., Choo, K. H., & Lim, K. H. (2003). Use of iron oxide particles as adsorbans to enhance phosphorus removal from secondary wastewater effluent. *Separation Science and Technology*, 38(15), 3853–3874. <https://doi.org/10.1081/SS-120024236>
- Kirchmann, H., & Pettersson, S. (1994). Human urine - Chemical composition and fertilizer use efficiency. *Fertilizer Research*, 40(2), 149–154. <https://doi.org/10.1007/BF00750100>
- Leong, H. Y., Chang, C. K., Khoo, K. S., Chew, K. W., Chia, S. R., Lim, J. W., Chang, J. S., & Show, P. L. (2021). Waste biorefinery towards a sustainable circular bioeconomy: a solution to global issues. *Biotechnology for Biofuels*, 14(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01939-5>
- Liberti, L., Petruzzelli, D., & De Florio, L. (2001). Rem nut ion exchange plus struvite precipitation process. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 22(11), 1313–1324. <https://doi.org/10.1080/09593330409355443>
- Liu, H., Hu, G., Basar, I. A., Li, J., Lyczko, N., Nzihou, A., & Eskicioglu, C. (2021). Phosphorus recovery from municipal sludge-derived ash and hydrochar through wet-chemical technology: A review towards

- sustainable waste management. *Chemical Engineering Journal*, 417(January), 129300. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129300>
- Liu, R., Wang, Y., Wu, G., Luo, J., & Wang, S. (2017). Development of a selective electrodialysis for nutrient recovery and desalination during secondary effluent treatment. *Chemical Engineering Journal*, 322, 224–233. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.03.149>
- Luyckx, L., & Van Caneghem, J. (2021). Recovery of phosphorus from sewage sludge ash: Influence of incineration temperature on ash mineralogy and related phosphorus and heavy metal extraction. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6), 106471. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106471>
- Ma, J., Yang, R., Yu, X., Zhao, Y., Sang, Q., Wang, F., & Chen, Y. (2020). Investigation of anaerobic side-stream phosphorus recovery and its effect on the performance of mainstream EBPR subjected to low-consumption. *Water Science and Technology*. doi:10.2166/wst.2020.014
- Ma, P., & Rosen, C. (2021). Land application of sewage sludge incinerator ash for phosphorus recovery: A review. *Chemosphere*, 274, 129609. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129609>
- Maurer, M., & Gujer, W. (1999). Kinetics of biologically induced phosphorus precipitation in wastewater treatment. *Water Research*. 33(2), 484–493.
- Mavinic, D. S., Koch, F. A., Huang, H., & Lo, K. V. (2007). Phosphorus recovery from anaerobic digester supernatants using a pilot-scale struvite crystallization process. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 6(5), 561–571. <https://doi.org/10.1139/S07-007>
- Metcalf, I., Eddy, H., (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. McGraw- Hill, New York.
- Meyer, C., Preyl, V., Steinmetz, H., Maier, W., Mohn, R.-E., Schönberger H., Piersson, T. (2018): The Stuttgart Process. In: Schaum, Chr. (editor) *Phosphorus: Polluter and Resource of the Future: Removal and Recovery from Wastewater*, IWA Publishing, ISBN13: 9781780408354, eISBN: 9781780408361.
- Midorikawa, I., Aoki, H., Omori, A., Shimizu, T., Kawaguchi, Y., Kassai, K., & Murakami, T. (2008). Recovery of high purity phosphorus from municipal wastewater secondary effluent by a high-speed adsorban. 1601–1608. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.537>
- Moreno, J., & Espada, J. J. (2020). treatment systems for sludge. In *Wastewater Treatment Residues as Resources for Biorefinery Products and Energy*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816204-0.00010-2>
- Muys, M., Phukan, R., Brader, G., Samad, A., Moretti, M., Haiden, B., Pluchon, S., Roest, K., Vlaeminck, S. E., & Spiller, M. (2021). A systematic comparison of commercially produced struvite: Quantities, qualities and soil-maize phosphorus availability. *Science of the Total Environment*, 756, 143726. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143726>
- Münch, E.V., Barr, K., 2001. Controlled struvite crystallisation for removing phosphorus from anaerobic digester sidestreams. *Water Res.* 35 (1), 151e159.
- Naji F., Drenkova-Tuhtan A., Rapf M., Meyer C., Steinmetz H., Kranert M. (2016). Phosphorus recovery from wastewater, sewage sludge and sewage sludge ash. *Indo-German Conference on Sustainability*. DOI: 10.13140/RG.2.1.3427.8166.
- Nättorp, A., Remmen, K., & Remy, C. (2017). Cost assessment of different routes for phosphorus recovery from wastewater using data from pilot and production plants. *Water Science and Technology*, 76(2), 413–424. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.212>
- Neczaj, E., & Grosser, A. (2018). Circular Economy in Wastewater Treatment Plant – Challenges and Barriers†. <https://doi.org/10.3390/proceedings2110614>
- Nieminen, J. (2010). Phosphorus recovery and recycling from municipal wastewater sludge. A Master of Science thesis Submitted for inspection in Espoo.
- Nir, O., Sengpiel, R., & Wessling, M. (2018). Closing the cycle: Phosphorus removal and recovery from diluted effluents using acid resistive membranes. *Chemical Engineering Journal*, 346(March), 640–648. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.03.181>
- Ohura, S., Harada, H., Biswas, B. K., Kondo, M., Ishikawa, S., Kawakita, H., Ohto, K., & Inoue, K. (2011). Phosphorus recovery from secondary effluent and side-stream liquid in a sewage treatment plant using zirconium-loaded saponified orange waste. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 13(4), 293–297. <https://doi.org/10.1007/s10163-011-0029-6>
- Ortwein, B. (2018). AirPrex® sludge optimization and struvite recovery from digested sludge in Phosphorus: Polluter and Resource of the Future. *IWA Publishing*. Chapter17. [https://doi.org/10.2166/9781780408361\\_343](https://doi.org/10.2166/9781780408361_343).
- Ott, C., & Rechberger, H. (2012). The European phosphorus balance. *Resources, Conservation and Recycling*, 60, 159–172. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.12.007>
- Öztürk İ., Şeker., M. (2021). Marmara Denizi'nin Ekolojisi: Deniz salyası oluşumu etkileşimleri ve çözüm önerileri, Türkiye Bilimler Akademisi. ISBN: 978-605-2249-73-4
- Pacurariu, R. L., Vatca, S. D., Lakatos, E. S., Bacali, L., & Vlad, M. (2021). A critical review of eu key indicators for the transition to the circular economy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(16). <https://doi.org/10.3390/ijerph18168840>
- Perera, M. K., Englehardt, J. D., & Dvorak, A. C. (2019). Technologies for Recovering Nutrients from Wastewater: A Critical Review. *Environmental Engineering Science*, 36(5), 511–529. <https://doi.org/10.1089/ees.2018.0436>
- Petzet, S., Peplinski, B., Bodkhe, S. Y., & Cornel, P. (2011). Recovery of phosphorus and aluminium from sewage

- sludge ash by a new wet chemical elution process (SESAL-Phos-recovery process). *Water Science and Technology*, 64(3), 693–699. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.682>
- Petzet, S., Peplinski, B., & Cornel, P. (2012). On wet chemical phosphorus recovery from sewage sludge ash by acidic or alkaline leaching and an optimized combination of both. *Water Research*, 46(12), 3769–3780. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.03.068>
- Pott, R., Johnstone-robertson, M., & Verster, B. (2018). *Wastewater Biorefineries: Integrating Water Treatment and Value Recovery*. Wastewater Biorefineries: Integrating Water Treatment and Value Recovery. November 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-63612-2>
- Ribarova, I., Dimitrova, S., Lambeva, R., Wintgens, T., Stemann, J., & Remmen, K. (2017). Phosphorus recovery potential in Sofia WWTP in view of the national sludge management strategy. *Resources, Conservation and Recycling*, 116, 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.10.003>
- Saerens, B., Geerts, S., & Weemaes, M. (2021). Phosphorus recovery as struvite from digested sludge – experience from the full scale. *Journal of Environmental Management*, 280(February 2020), 111743. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111743>
- Salehi, S., Yu, K., Heitz, A., & Ginige, M. P. (2018). Revisiting the Phostrip process to recover phosphorus from municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 343(December 2017), 390–398. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.02.074>
- Semerci, N., Ahadi S., Coşgun S. (2021). Comparison of dried sludge and sludge ash for phosphorus recovery with acidic and alkaline leaching. 359–370. <https://doi.org/10.1111/wej.12633>
- Schaum, C. (2018). Phosphorus: Polluter and Resource of the Future - Removal and Recovery from Wastewater. *Water Intelligence Online*, 17, 9781780408361. <https://doi.org/10.2166/9781780408361>
- Schroder, J. J., Cordell, D., Smit, A. L., & Rosemarin, A. (October 2010). Sustainable use of phosphorous. *Plant Research International*, Retrieved from [http://ec.europa.eu/environment/natres/pdf/sustainable\\_use\\_phosphorus.pdf](http://ec.europa.eu/environment/natres/pdf/sustainable_use_phosphorus.pdf)
- Schütte, T., Niewersch, C., Wintgens, T., & Yüce, S. (2015). Phosphorus recovery from sewage sludge by nanofiltration in diafiltration mode. *Journal of Membrane Science*, 480, 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.01.013>
- Shu, L., Schneider, P., Jegatheesan, V., & Johnson, J. (2006). An economic evaluation of phosphorus recovery as struvite from digester supernatant. *Bioresource Technology*, 97(17), 2211–2216. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.005>
- Smit, A.L., Bindraban, P.S., Schröder, J.J., Conjin, J.G., Meer, H.G. (2009). Phosphorus in agriculture: global resources, trends and developments. *Plant Research International B.V., Wageningen Report 282*.
- Simha, P., Karlsson, C., Viskari, E. L., Malila, R., & Vinnerås, B. (2020). Field Testing a Pilot-Scale System for Alkaline Dehydration of Source-Separated Human Urine: A Case Study in Finland. *Frontiers in Environmental Science*, 8(September), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.570637>
- Singh, R. P., & Agrawal, M. (2008). Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. 28, 347–358. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.12.010>
- Soares, A., Czajkowska, J., Colprim, J., Gali, A., Johansson, S., Masic, A., Marchi, A., McLeod, A., Nenov, V., Rusalleda, M., & Siwec, T. (2017). Nutrients recovery from wastewater streams. *Innovative Wastewater Treatment & Resource Recovery Technologies: Impacts on Energy, Economy and Environment*, 369–398. [https://doi.org/10.2166/9781780407876\\_0369](https://doi.org/10.2166/9781780407876_0369)
- Stitt B., Goss T., Moncholi M., Abu-Orf M., Diaz I. (2017) Enhanced Dewatering with Struvite Recovery: Pilot Testing of AirPrex® Technology at Miami's South District WWTP. *Proceedings of the Water Environment Federation · January 2017*, 139-154.
- Tchobanoglous, G., Burton, F.L., Stensel, H.D., Tsuchihashi, R., Burton, F. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*, 5th Edition, Metcalf & Eddy Inc., McGraw-Hill, New York, 2014.
- Thurston, A. (2015). The disappearing nutrient. *Nature*, 523(4), 310.
- van der Hoek, J. P., Struiker, A., & de Danschutter, J. E. M. (2017). Amsterdam as a sustainable European metropolis: integration of water, energy and material flows. *Urban Water Journal*, 14(1), 61–68. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2015.1076858>
- Vanotti M.B., Dube P.J., Szogi A.A., Garcia-Gonzalez M.C. (2017). Recovery of ammonia and production of high-grade phosphates from side stream digester effluents using gas permeable membranes, in *Lecture notes in civil engineering*, Springer. ISSN 2366-2565.
- Vasenko, L., Bonnemain-fernandes, A., Malwade, C., & Qu, H. (2020). Environmental Science Water Research & Technology via a two-step process of ozonation and. 817–828. <https://doi.org/10.1039/c9ew00994a>
- Verster, B., Minnaar, S., & Cohen, B. (2014). Introducing the Wastewater Biorefinery Concept: A scoping study of poly-glutamic acid production from a Bacillus-rich mixed culture using municipal wastewater. In *Water Research Commission (Issue April)*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3120.9688>
- Wei, X., Viadero, R. C., & Bhojappa, S. (2008). Phosphorus removal by acid mine drainage sludge from secondary effluents of municipal wastewater treatment plants. *Water Research*, 42(13), 3275–3284. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.04.005>
- Wei, S. P., van Rossum, F., van de Pol, G. J., & Winkler, M. K. H. (2018). Recovery of phosphorus and nitrogen from human urine by struvite precipitation, air stripping and acid scrubbing: A pilot study. *Chemosphere*, 212, 1030–1037.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.08.154>

World Bank. (2022). World Bank commodity markets data. <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/5d903e84db1d1b83e0ec8f744e555700350012021/related/CMO-Historical-Data-Annual.xlsx>.

Xavier LD, Cammarota MC, Yokoyama L, Volschan I (2014) Study of the recovery of phosphorus from struvite precipitation in supernatant line from anaerobic digesters of sludge. *Water Sci Technol Water Supply* 14:751–757. <https://doi.org/10.2166/ws.2014.033>

Xia, W. J., Xu, L. Z. J., Yu, L. Q., Zhang, Q., Zhao, Y. H., Xiong, J. R., Zhu, X. Y., Fan, N. S., Huang, B. C., & Jin, R. C. (2020). Conversion of municipal wastewater-derived waste to an adsorbent for phosphorus recovery from secondary effluent. *Science of the Total Environment*, 705, 135959. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135959>

Xiao-jun, Y., Wen-qing, T., Ying, D., Yu-qj, C., Ya-e, W., Zhi-long, W., & Li, J. (2021). Journal of Water Process Engineering Nutrient removal and phosphorus recovery performance of an anaerobic side-stream extraction based enhanced biological phosphorus removal subjected to low dissolved oxygen. *Journal of Water Process Engineering*, 42(December 2020), 101861. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101861>

Xiao, X., Liu, S., Zhang, X., & Zheng, S. (2017). Phosphorus removal and recovery from secondary effluent in sewage treatment plant by magnetite mineral microparticles. *Powder Technology*, 306, 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.10.066>

Xie, M., Nghiem, L. D., Price, W. E., & Elimelech, M. (2014). Toward Resource Recovery from Wastewater: Extraction of Phosphorus from Digested Sludge Using a Hybrid Forward Osmosis – Membrane Distillation Process.

Xu, H., He, P., Gu, W., Wang, G., & Shao, L. (2012). Recovery of phosphorus as struvite from sewage sludge ash. *Journal of Environmental Sciences*, 24(8), 1533–1538. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(11\)60969-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(11)60969-8)

Yu, B., Luo, J., Xie, H., Yang, H., Chen, S., Liu, J., Zhang, R., & Li, Y. (2021). Species , fractions , and characterization of phosphorus in sewage sludge : A critical review from the perspective of recovery. *Science of the Total Environment*, 786, 147437. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147437>

Zoboli, O., Zessner, M., & Rechberger, H. (2016). Science of the Total Environment Supporting phosphorus management in Austria: Potential , priorities and limitations. *Science of the Total Environment*, 565, 313-323