



## TAM ÖLÇEK İKİ AŞAMALI KISMİ NİTRİTASYON-ANAMMOX ÜNİTESİ İÇİN MALİYET BELİRLEME ÇALIŞMASI

İpek ÇELEN ERDEM<sup>\*1</sup>, Özgür DOĞAN<sup>1</sup>, Ece SAĞIR KURT<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü, Marmara Araştırma Merkezi TÜBİTAK, 41470 Kocaeli/Türkiye

<sup>2</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 34220 İstanbul/Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
Kısmi nitritasyon/ anammox, Azot giderimi, Tam ölçek uygulaması, Maliyet belirleme.	Anaerobik çürütücü bulunan arıtma tesislerinden çamur susuzlaştırma sonucu çıkan atıksuların tesis başına geri devredilmesi tesisin azot yükünü %15-20 arttırmaktadır. Bu atıksuyun ayrı olarak enerji verimli arıtılması aktif çamur sistemine gelecek azot yükünü önemli oranda azaltabilecektir. Günümüzde, Kısmi Nitritasyon (KN)/Anammox (A) prosesinin uygulanması, nitrifikasyon-denitrifikasyon gibi konvansiyonel biyolojik arıtma yöntemlerine göre maliyet ve sürdürülebilirlik nedenleri ile daha çok tercih edilmektedir. İSKİ Ambarlı İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi'ne (İBAAT) ait çamur çürütücü çıkışından, pilot ölçekli iki aşamalı KN/A prosesi kullanılarak başarı ile azotun giderimi sağlanmıştır. Bu tesisten alınan sonuçlar kullanılarak gerçek ölçekli tesis tasarım çalışması ve maliyet belirleme çalışmaları yapılmıştır. Anammox prosesi ile işletilen tam ölçekli bir tesisin işletme maliyeti 3,77 TL/m <sup>3</sup> /gün, ilk yatırım maliyeti ise 2181 TL/m <sup>3</sup> /gün olarak hesaplanmıştır. İşletme maliyetinin düşük seviyelerde olmasını sağlayan en önemli parametreler Anammox reaktörü için yeterli olan 30 °C sıcaklık ve oksijen ihtiyacının kısmi olmasıdır. Isıtma ihtiyacından kaynaklanan ısının anaerobik çürütme tanklarından çıkan biyogazın kullanılması ile işletme giderlerinin %80' i azaltılacağı ön görülmektedir.

## COST DETERMINATION STUDY FOR THE FULL SCALE TWO STAGE PARTIAL NITRITATION-ANAMMOX UNIT

Keywords	Abstract
Partial nitrification/ anammox, Nitrogen removal, Full scale application, Cost estimation.	In wastewater treatment plants with anaerobic sludge digestion, 15-20% of the nitrogen load is recirculated to the main stream with the digester effluent from dewatering. The treatment of the digester effluent separately may significantly reduce the nitrogen load of the activated sludge system. Nowadays, Partial Nitritation (PN)/Anammox (A) process is more preferred comparing to the conventional biological applications such as nitrification-denitrification processes due to the sustainability and costs. The sludge digester effluent taken from a full-scale municipal WWTP, in Istanbul, Turkey is successfully deammonified using a pilot-scale two-stage PN/A process. In this study, based on its results, facility design and cost analysis of a full scale plant are demonstrated. The operation cost of a full scale PN/A process is 3.77 TL/m <sup>3</sup> /day and the construction cost is calculated as 2181 TL/m <sup>3</sup> . The most important parameter that provides this cost are the temperature holding the Anammox reactor at 30 ° C and lower oxygen demand. However, it is estimated that 80% of the operation cost will be reduced if the heat is provided by the biogas from the anaerobic digesters.

### Alıntı / Cite

Çelen Erdem, İ., Doğan, Ö., Sağır, E., (2019). Tam Ölçek İki Aşamalı Kısmi Nitritasyon-Anammox Ünitesi İçin Maliyet Belirleme Çalışması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 7(3), 671-679.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

İ. Çelen Erdem, 0000-0003-4499-5014

Ö. Doğan, 0000-0002-7415-5369

E. Sağır, 0000-0001-5440-7584

### Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date 11.01.2019

Revizyon Tarihi / Revision Date 16.04.2019

Kabul Tarihi / Accepted Date 03.05.2019

Yayın Tarihi / Published Date 15.09.2019

\* İlgili yazar / Corresponding author: ipek.erdem@tubitak.gov.tr, +90-262-677-3443

## 1. Giriş

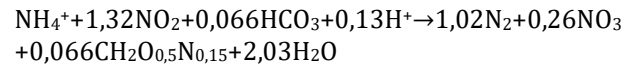
Evsel ve endüstriyel atıksularının arıtımında giderilmesi gereken en önemli parametrelerden biri olan amonyumun giderimi yaygın olarak nitrifikasyon ve denitrifikasyon prosesleri ile gerçekleştirilmektedir. Evsel atıksu arıtma tesisleri biyolojik proseslerinde oluşan çamur sıklıkla anaerobik çamur çürütme proseslerinde çürütülür. Bu proseste çamurun karbon muhtevası büyük ölçüde metan ve karbondioksit dönüştürülürken, hücre içindeki azot bileşenleri amonyum olarak ortama salınır. Çürütme işlemi sonunda çamurun susuzlaştırılması sırasında oluşan süzöntü suyu (sentrat/filtrat) oldukça yüksek konsantrasyonda amonyum içerir (yaklaşık 2 kg N/m<sup>3</sup>) (Strous vd., 1997). Atıksu arıtma tesislerinde oluşan bu yan akım genellikle, arıtma tesisi ana akımına geri döndürülür ve bu da sistemin giriş azot yükünün yaklaşık %15-20 oranında artmasına neden olur (Lackner vd., 2014). Çamur çürütücü çıkış sularının ayrıca toplanıp arıtılmasının günümüzde daha verimli bir alternatif arıtım olduğu bildirilmektedir. Bu uygulama farklı patentler altında günümüzde Avrupa ve Amerika'da pek çok arıtma tesisinde uygulama alanı bulmuştur. Yüksek amonyak azotu ve düşük organik madde içeren atıksuların arıtımında konvansiyonel biyolojik arıtma prosesleri yerine, amonyumun anaerobik koşullar altında doğrudan azot gazına indirgendiği yeni bir biyolojik proses olarak Anaerobik Amonyum Oksidasyon (Anammox) prosesi tanımlanmıştır (van de Graaf et al., 1996). Anammox bakterileri amonyum ve nitriti anoksik koşullarda oksitleyebilir. Oksijenin sınırlı olduğu ekosistemlerde, aerobik Amonyum Oksitleyen Bakteriler (AOB) amonyağı nitrite oksitlerler. Oluşturulan nitrit, Anammox bakterileri tarafından amonyakla birlikte kullanılır. Bunun sonunda ana ürün olarak azot gazı ve az miktarda nitrat oluşur (Kartal vd., 2013). Bu proses sayesinde konsantre atıksulardan amonyumun gideriminde, havalandırma (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N'un, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N'a yükseltgenmesi) için kullanılacak enerjinin %57 oranında azaltılması nedeniyle düşük maliyet fırsatı sağlanacaktır (Kosari vd., 2014). Üstelik bu proses için organik karbon kaynağı ilavesine ihtiyaç duyulmaması, yüksek giderim oranlarının elde edilmesi ve yüksek proses kararlılığı göstermesi diğer olumlu yönleridir (Çelen-Erdem vd., 2018; Van Hulle vd., 2010).

Anammox bakterilerinin havasız şartlar altında amonyağı oksitlediği 1988/1995 yılları arasında, Delft üniversitesinde yapılan araştırmalar sırasında Mulder ve Kuenen isimli Hollandalı bir grup bilim insanı tarafından keşfedilmiştir (Mulder vd., 1995). Anammox, aynı zamanda Hollanda Delft Teknik Üniversitesi tarafından geliştirilen ve ticari marka olarak tescillenmiş biyolojik azot giderimi prosesinin adıdır. Son yıllarda atıksu arıtımında azot giderimi için Anammox prosesinin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bunun en büyük sebebi klasik biyolojik azot giderimi proseslerine göre işletme

maliyetinin belirgin şekilde düşük olmasıdır (Abma vd., 2007).

Anammox bakterileri, amonyumu (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) anoksik şartlar altında nitriti (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) elektron alıcı ve karbondioksiti (CO<sub>2</sub>) karbon kaynağı olarak kullanarak azot gazına (N<sub>2</sub>) dönüştürür. En belirgin özellikleri ve atıksu arıtımında çok yaygın olarak kullanılmamalarının sebebi düşük çoğalma hızlarıdır (Nifrik van vd., 2007). Maksimum spesifik çoğalma hızları yaklaşık 0.065 gün<sup>-1</sup> ve ikilenme süreleri 11 gün civarındadır (Strous vd., 1999). Bu sebeple, Anammox bakterilerini saf kültür olarak elde etmek çok zordur. Düşük büyüme hızı nedeni ile zenginleştirme sürecinde reaktör sistemlerinde Anammox bakterilerini kaybetmemek için biyokütle tutulabilmesi çok önemlidir. Anammox bakterilerinin karışım aşından zenginleştirilebilmesi için optimum şartlara ihtiyaç vardır. Literatürde bu konuda çeşitli sürelerden bahsedilmiştir, ancak genel olarak 200 ila 300 günlük bir süreç gereklidir (Ni et al., 2010).

Anammox prosesi, iki ayrı organizmanın görev aldığı iki ayrı adımdan oluşur. İlk adımda hava verilerek ototrofik bakteriler yardımı ile, amonyağın nitrite dönüşümü sağlanır. İkinci adım anoksik ortamda olup, Anammox bakterileri yardımı ile nitrit ve amonyağın elementel azota dönüşümünü içerir (Strous et al., 1999).



Bu durumda yaklaşık 1 g NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N tüketmek için 1,32 g NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N'e ihtiyaç vardır. İşlem sonucunda 0,26 g NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, 2,04 g N<sub>2</sub>-N ve ancak 0,01 g biyokütle (yeni bakteri) oluşur.

Bu çalışmanın temel amacı, Anammox prosesli azot giderim ünitesi tam ölçek boyutlandırması ve maliyet belirleme çalışmalarını sunmaktır. Çalışmanın en önemli özgünlüğü, tüm hesaplamalar, laboratuvar ölçekli çalışmalar (Çelen-Erdem vd., 2018) ve İSKİ Ambarlı AAT'de kurulmuş olan Türkiye'nin ilk yan akımlı iki aşamalı Anammox pilot tesisinden alınan verilere göre yapılmıştır. Bu çalışma, atıksu arıtma tesislerinde azot arıtımı için kullanılacak tam ölçekli iki aşamalı Anammox prosesinin tasarımını yapmak isteyen mühendisler için faydalı olmasının dışında maliyet belirleme konusuna da ışık tutacaktır.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Tesisin Özellikleri

Günlük arıtma kapasitesi 400.000 m<sup>3</sup> olan Ambarlı İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi (İBAAT), Türkiye'nin en büyük tesislerinden biridir ve yaklaşık 1,6 milyon İstanbullu'ya hizmet etmektedir. Tesise evsel ve endüstriyel kaynaklı atıksular gelmektedir. Anammox prosesinin uygulanması düşünülen atıksu

anaerobik çamur çürütme ünitesinden kaynaklanmaktadır. Ön çöktürmeden gelen yoğunlaştırılmış primer çamur ile son çöktürmeden gelen yoğunlaştırılmış fazla çamur, anaerobik çürütücüde stabilizasyonu sağlandıktan sonra susuzlaştırılmak üzere pompalar vasıtasıyla % 25-30 katı madde oranına çıkacak şekilde susuzlaştırmak üzere santrifüj ünitesine gönderilir. Santrifüj ünitesinden gelen 2.000 m<sup>3</sup>/gün debisinde sentrat suyu mevcut arıtma tesisine hidrolik yük olarak yaklaşık %0,5, azot yükü olarak ise yaklaşık % 6 oranında artış oluşturmaktadır.

### 2.1.1. Atıksu Kaynağı ve Karakterizasyonu

Tesisin biyolojik proseslerinde oluşan ön çöktürme ve son çöktürme çamurları anaerobik çamur çürütme proseslerinde çürütülür. Çamur, çürütücülerde anaerobik ve mezofilik şartlarda (35-37 °C'de), asetojen ve metanojen bakterilerinin faaliyetleri sonucunda stabilize edilir. Bu süreçte açığa çıkan biyogaz ön filtrasyonu yapılarak, tank içerisindeki çamurun karıştırılmasında kullanılır. Bu proseste çamurun karbon muhtevası büyük ölçüde metan ve karbondioksit dönüşürülürken, hücre içindeki azot bileşenleri NH<sub>4</sub><sup>+</sup> olarak ortama salınır. Anaerobik çamur çürütme işleminden sonra çamur, çürütülmüş çamur depo tankına gönderilir. %4-6'lık katı madde oranına sahip olan çürütülmüş çamur, içindeki su muhtevasının azaltılması için pompalar vasıtasıyla santrifüj tipindeki susuzlaştırma ekipmanlarına gönderilir. Sistemdeki çamur burada %25-30 katı madde içeren çamur keki haline getirilerek, susuzlaştırılmış çamur depolama tankına gönderilir.

Çürütücü çıkış suyu karakterizasyonunun belirlenmesi için 156 adet farklı numune kullanılarak elde edilen sonuçlar Tablo 1.'de verilmiştir.

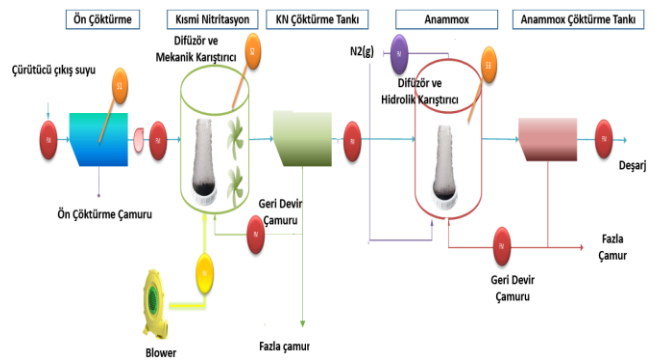
**Tablo 1.** İSKİ Ambarlı İBAAT çürütücü çıkış suyu karakterizasyonu

PARAMETERS	DEĞER
Çözünmüş KOİ, mg/L	374,47±180
BOD5, mg/L	218±124
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N, mg/L	574±124,57
PO <sub>4</sub> , mg/L	233,18±138,88
Askıda Katı Madde, mg/L	605±86
Uçucu Aksıda Katı Madde, mg/L	343±47,3
pH	7,57±0,19
İletkenlik, µs/cm	5634,28±1686,91
Alkalinite, mg/L	2129,82±567,89
Çökebilir Katı Madde, mL/L	31,20±62,96
Uçucu Yağ Asidi, mg/L	192,79±92,39

## 2.2. Tam Ölçek Boyutlandırılması

Ambarlı İBAAT çamur çürütücü çıkış sularındaki amonyum azotunun anaerobik amonyum oksidasyonu ile giderimi için 2017 yılında kurulan ve halen işletilmekte olan 2 m<sup>3</sup>/gün kapasiteli, Pilot Tesis işletmeye alınmıştır. Kararlı hale geçmesi ile alınan 3 aylık veriler ve literatür bilgileri ışığında tam ölçekli bir sistemin temel mühendislik tasarımı yapılmıştır.

Tam ölçekli sistem pilot sistemde olduğu gibi üç aşamalı olarak tasarlanmıştır. Birinci aşama, susuzlaştırma ünitelerinden gelen çamur çürütücü çıkış suyunu dengelemek ve bu suda bulunan partikülleri çöktürülmesi ile askıda katı madde (AKM) ve opsiyonel olarak kimyasal fosfor giderimi, ikinci aşama Kısmi Nitritasyon, üçüncü ve son aşama ise Anaerobik Amonyum Oksidasyonu için kullanılmıştır. Kısmi Nitritasyon ve Anaerobik Amonyum Oksidasyonu işlemlerinin gerçekleştirildiği tanklarının peşine birer çöktürme tankı yerleştirilmiştir. Sistemin şematik çizimi Şekil 1.'de verilmiştir.



**Şekil 1.** Proses akış şeması

Boyutlandırmaya esas teşkil eden çürütme ünitesi çıkışına ait atıksu karakteri ve istenen çıkış suyu kalitesine ait değerler Tablo 2.'de verilmektedir.

**Tablo 2.** Çürütme ünitesi santrifüj çıkışı atıksu karakteri

PARAMETERS	DEĞER
Debi, m <sup>3</sup> /gün	2000
Sıcaklık, °C	30
Giriş AKM, mg/L	500
Giriş BOD5, mg/L	240
Çıkış BOD5, mg/	230
Giriş NO <sub>3</sub> , mg/L	0
Çıkış NO <sub>3</sub> , mg/L	2
Giriş TKN, mg/L	600
Çıkış TKN, mg/L	6
Çıkış NH <sub>4</sub> -N, mg/L	2

### 2.3. Pilot Ölçekli Sistemden Elde edilen Veriler ile Yapılan Tasarım

Proje tasarım debisi olarak çamur susuzlaştırma santrifüjlerinden gelen 2000 m<sup>3</sup>/gün (İSKİ) debi kullanılmıştır. Gelen atıksu önce Kısmi Nitritasyon ünitesinde ön işleme tabi tutulmuş, bu prosesin çıkış suyu Anammox ünitesine verilmiştir. İki kademeli olarak giriş amonyumun oksidasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu iki üniteye ait işletme şartları ve tasarım hesapları ilgili başlıklar altında verilmiştir.

#### 2.3.1. Kısmi Nitritasyon Ünitesi

Yan Akım Pilot Tesis Kısmi Nitritasyon ünitesi ortam sıcaklığında (25-30°C) kısmi havalandırma ile ÇO konsantrasyonu ve pH değeri sırasıyla 0,8 mg/L ve 7 olacak şekilde işletilmiştir. Reaktör tam karışimli ve sürekli beslemelidir, hidrolik bekleme süresi ve çamur yaşı değerleri sırası ile 1,03 ve 0,96 gün'dür. Bu koşullar altında reaktörde bulunan bakteri konsantrasyonlarına ait ortalama AKM ve UAKM değerleri 2400 mg/L ve 1800 mg/L'dir. Çamur çürütücü çıkış suyunda yeterli alkalinite bulunmaktadır (Tablo 1), bu sebeple hesaplarda alkalinite ihtiyacı hesaplanmamıştır.

Tam ölçekli proses hesaplarında yukarıda bahsedilen işletme parametreleri ve USEPA, 2010 tarafından belirlenmiş olan AOB'lere ait kinetik parametreler kullanılmıştır (Tablo 3). Bunların dışında Kısmi Nitritasyon prosesi için gerekli hava ihtiyacı, reaktör tipi ve boyutu, atıksuya ait ÇO doygunluk konsantrasyonu, reaktörde kullanılan havalandırma yapısının oksijen transfer verimi, işletme sıcaklığı, işletme basıncı gibi birçok parametre de dikkate alınmıştır.

**Tablo 3.** AOB'lere ait biyokinetik parametreler (USEPA, 2010)

PARAMETRE	DEĞER (35 °C'de)
Maksimum spesifik büyüme hızı, gUAKM/gUAKM.gün	1,8
Dönüşüm katsayısı, gUAKM/gNoksitlenen	0,15
NH <sub>4</sub> -N yarım hız katsayısı, mg/L	0,70
O <sub>2</sub> yarım hız katsayısı, mg/L	0,5
İçsel ayrışma hızı, gUAKM/gUAKM.gün	0,23
Kritik çamur yaşı, gün	0,64
Çamur Yaşı, gün	0,96

#### 2.3.2. Anammox Ünitesi

Anammox bakterileri mezofilik şartlar altında faaliyet göstermesi sebebiyle Yan Akım Pilot Tesis Anammox ünitesi 30 °C'lik sıcaklıklar şartlarında ve 7,8±0,1 pH değerinde işletilmiştir. Reaktörde bulunan çamur yoğunluğuna ait AKM ve UAKM değerleri sırası ile 714

mg/L ve 488 mg/L olması sebebiyle hidrolik bekleme süresi 4 gün olarak belirlenmiştir.

Tam ölçekli proses hesaplarında yukarı belirtilen işletme parametreleri ve Tablo 4.'de verilmiş olan AOB'lere ait kinetik parametreler kullanılmıştır.

**Tablo 4.** Anammox bakterilerine ait biyokinetik parametreler (Metcalf & Eddy, 2003)

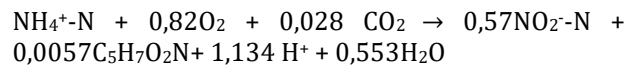
PARAMETERS	DEĞER (30 °C'de)
Maksimum spesifik büyüme hızı, gUAKM/gUAKM.gün	0,08
Dönüşüm katsayısı, gUAKM/gNoksitlenen	0,11
NH <sub>4</sub> -N yarım hız katsayısı, mg/L	0,07
NO <sub>2</sub> -N yarım hız katsayısı, mg/L	0,05
İçsel ayrışma hızı, gUAKM/gUAKM.gün	0,003
Kritik çamur yaşı, gün	12,99
Çamur Yaşı, gün	19,48

### 3. Sonuç ve Tartışma

#### 3.1. Ünite Tasarımları

##### 3.1.1. Kısmi Nitritasyon Ünitesi

Anammox prosesinde amonyum nitrit ile eş zamanlı olarak tüketilir, bu sebeple Anammox prosesinin gerçekleşebilmesi için Kısmi Nitritasyon gibi ön aşamaya ihtiyaç duyulmaktadır. Kısmi Nitritasyon prosesi kısmi havalandırma ile NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N'un yaklaşık yarısının NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N'ye oksitlendiği, ürün olarak NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N'in oluşmadığı procestir (Jenicek et al., 2004). Bu proste amonyumun aerobik oksidasyonunu sağlayan AOB faaliyet gösterirken, nitrit oksidasyonunu sağlayan NOB bakterileri etkisiz hale getirilerek NO<sub>3</sub>-N oluşumu engellenir (Bao et al., 2017). Anammox prosesi için gerekli olan nitrit kısmi nitritasyon ile sağlandıktan sonra anoksik/anaerobik koşullar altında amonyumun anaerobik oksidasyonunu gerçekleştirir. Anammox prosesine gerekli besinin kısmi nitritasyon yolu ile sağlanması sırasında NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N'unun %57'si NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N'e oksitlenirken, %43 oranındaki NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N çıkış atıksuyunda kalması gerekmektedir (Magri et al., 2013). Böylece bu prosten çıkan atıksu Anammox bakterileri için uygun stokiyometri de besin (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N ve NO<sub>2</sub>-N) içermektedir. Kısmi Nitritasyonun stokiyometrik ifadesi aşağıdaki gibidir;



Kısmi Nitritasyon prosesinin stokiyometrik denklemi dikkate alındığında NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N tüketmek için 1,88 g O<sub>2</sub> kullanıldığı, 0,05 g yeni hücre oluşturulduğu, CaCO<sub>3</sub> olarak 3,99 g alkalinite giderildiği ve 0,02 g inorganik karbonun yeni hücrelerin oluşturulmasında kullanıldığı görülmektedir.

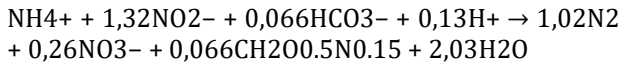
Materyal ve yöntemde verilen işletme şartlarına bağlı olarak tam ölçekli Kısmi Nitritasyon ünitesi tasarım sonuçları Tablo 5.'de verilmiştir. Kısmi nitritasyon ünitesi tasarımında ön çöktürme çıkışındaki debi olan 1903 m<sup>3</sup>/gün değerindeki debiye göre hesaplama yapılmış ve buna göre 1960 m<sup>3</sup> reaktör hacmi ve 2447 kg O<sub>2</sub>/gün oksijen ihtiyacı olduğu hesaplanmıştır.

**Tablo 5.** Kısmi nitritasyon tasarım sonuçları

PARAMETERS	DEĞER
Debi, m <sup>3</sup> /gün	1903,00
Hesaplanan Toplam Hacim, m <sup>3</sup>	1960,09
Tank Adedi, adet	4
Birim Tank Hacmi, adet	500
Tank uzunluğu, m	20
Tank Genişliği, m	5
Tank Yüksekliği, m	5
Giriş NH <sub>4</sub> -N konsantrasyonu, mg/L	630,00
Çıkış NH <sub>4</sub> -N konsantrasyonu, mg/L	235,00
Nitrifiye olan NH <sub>4</sub> -N, kg/gün	751,69
Kritik çamur yaşı, gün	0,64
Çamur Yaşı, gün	0,96
Kısmi nitritasyon prosesinden kaynaklanan fazla çamur, kg/gün	92,44
Gerekli gerçek oksijen ihtiyacı, kg O <sub>2</sub> /gün	2447,02

### 3.1.2. Anammox Ünitesi

Anammox ünitesinde Kısmi Nitritasyon ünitesinden gelen NH<sub>4</sub>-N ve NO<sub>2</sub>-N içeren atıksu anoksik/anaerobik işletme şartları altında azot gazına oksitlenir. Strous vd. (1998) tarafından tanımlanan Anammox reaksiyonu stokiometrisi şöyle kabul edilmiştir.



Materyal ve yöntemde verilen işletme şartlarına bağlı olarak tam ölçekli Anammox ünitesi tasarım sonuçları Tablo 6.'da verilmiştir. Anammox ünitesi tasarımında Kısmi Nitritasyon çöktürme tankı çıkışındaki debi olan 1789,8 m<sup>3</sup>/gün değerindeki debiye göre hesaplama yapılmış ve buna göre 7159 m<sup>3</sup> toplam reaktör hacmine ihtiyaç duyulduğu hesaplanmıştır.

**Tablo 6.** Anammox ünitesi tasarım sonuçları

PARAMETERS	DEĞER
Debi, m <sup>3</sup> /gün	1789,8
Reaktör Hacmi, m <sup>3</sup>	7159
Tank Adedi, adet	6
Reaktör uzunluğu, m	29,5
Reaktör genişliği, m	7,4
Reaktör yüksekliği, m	5,5
Giriş NH <sub>4</sub> -N konsantrasyonu, mg/L	235
Çıkış NH <sub>4</sub> -N konsantrasyonu, mg/L	23
Giderilen NH <sub>4</sub> -N, kg/gün	379,4
Anammox prosesinden kaynaklanan fazla çamur, kg/gün	39,4

### 3.2. Tam Ölçek Maliyet Belirleme Çalışması

Ambarlı İBAAT'si çamur çürütücü çıkış sularındaki amonyum azotunun anaerobik amonyum oksidasyonu ile giderimi için tam ölçekli bir sistemin boyutlandırılmasına binaen tesiste ihtiyaç duyulan elektrik işleri, mekanik işler ve inşaat işleri dikkate alınarak ilk yatırım ve işletme maliyeti belirleme çalışması yapılmıştır.

#### 3.2.1. İlk Yatırım Maliyet

##### 3.2.1.1. Elektrik İşleri Maliyet Belirleme Çalışması

Tam ölçekli Anammox prosesli azot giderim tesisinin elektrik işleri için gerekli olan ünite ve ekipmanlar; enerji dağıtım sistemi, otomasyon sistemi, kablolama, aydınlatma ve topraklama işleri, aydınlatma zayıf akım tesisatı ve montaj işleri olarak belirlenmiş ve birim maliyet ve metraj üzerinden hesaplanmıştır. Elektrik işlerine ait toplam maliyet Tablo 7.'de verilmektedir.

**Tablo 7.** Elektrik işleri maliyet belirleme çizelgesi

Elektrik İşleri İçin Gerekli Ünite ve Ekipmanları	Birim	Metraj	Birim Fiyat (TL)	Toplam Fiyat (TL)
<b>ENERJİ DAĞITIM SİSTEMİ</b>				
50 KVA Jeneratör Temin ve Montajı	Adet	1	23.060,00	23.060
0.4 KV A.G. Dağıtım, Kompanzasyon, MCC ve Kumanda Panoları Temin ve Montajı	Takım	1	23.520,00	23.520
<b>OTOMASYON SİSTEMİ</b>				
Tip-6 SCADA Odası Ekipmanları, PLC Panoları ve Lokal Kumanda Panelleri Temin ve Montajı (Yazılım ve Lisans Dâhil)	Takım	1	24.700,00	24.700
Proses kontrol ünitesi (sensörler ve kontrolü kumanda edecek yazılım)	Takım	1	100.000,00	100.000
Istıtcı Ünite	Adet	1	70.000,00	70.000
<b>KABLOLAMA İŞLERİ</b>				
Kablolama İşleri	Takım	1	45.000,00	45.000
Kablo Taşıma İşleri (Kablo Tavası, Kablo Muhafaza Borusu vs.)	Metre	1	7.460,00	7.460
<b>AYDINLATMA İŞLERİ</b>				
90/10 Tek Konsol Aydınlatma Direği Temin ve Montajı	Adet	4	1.754,67	7.018,68
40W En Az 3600 Lümen (90lm/W) Led Ofis Armatürü Temin ve Montajı	Adet	2	199,64	399,28
20W En Az 1800 Lümen (90lm/W) Led Downlight Armatür Temin ve Montajı	Adet	4	103,96	415,84
<b>AYDINLATMA TESİSATI</b>				
Aydınlatma TesiSATI Komple Temin ve Montajı	Takım	1	4.665,00	4.665
<b>ZAYIF AKIM TESİSATI</b>				
Akıllı Adresli Yangın Alarm Sistemi Temin ve Montajı	Adet	1	1.805,00	1.805
<b>TOPRAKLAMA VE YILDIRIMDAN KORUMA İŞLERİ</b>				
Yıldırımdan Koruma ve Topraklama TesiSATI Temin ve Montajı	Takım	1	8.518,70	8.518,70
<b>TESİSTEKİ KAPAKLARIN AKTUATÖRLERİNİN TEMİN VE MONTAJI</b>				
10-120 Nm Tork Aralığında On/Off Kumandalı Aktuatör Temin ve Montajı	Adet	22	7.828,00	172.216
<b>ELEKTRİK İŞLERİ TOPLAMI</b>				<b>488.778,50</b>

Çalışmanın yapıldığı dönemde USD: 3.50 TL'dir

### 3.2.3.1. Mekanik İşleri Maliyet Belirleme Çalışması

Tam ölçekli Anammox prosesli azot giderim tesisinin mekanik işleri için gerekli olan ünite ve ekipmanlar;

terfi pompaları, difüzörler, bloverlar, çamur pompaları, sıyrıcı ve köprüler, savak ve perdeler, vinçler, borulama işleri, sıhhi tesisat işleri olarak belirlenmiş ve birim maliyet ve miktar üzerinden maliyet hesaplanmıştır. Mekanik işlere ait toplam maliyet Tablo 8.'de verilmektedir.

**Tablo 8.** Mekanik işler maliyet belirleme çizelgesi

Mekanik İşler için Gerekli Ünite ve Ekipmanlar	Birim	Miktar	Birim Fiyat, TL	Toplam Fiyat, TL	Açıklamalar
<b>TERFİ MERKEZİ</b>					
Terfi Pompaları	Adet	3	20.791,65	62.374,95	40 m <sup>3</sup> /h kapasiteli 2 asıl 1 yedek
<b>KISMI NİTRİTASYON ÜNİTESİ</b>					
Difüzörler	Adet	200	70,00	14.000,00	9 inch 200 adet difüzör
Bloverler	Adet	3	40.000,00	120.000,00	400 m <sup>3</sup> /h kapasiteli 2 asıl 1 yedek
<b>GERİ DEVİR VE FAZLA ÇAMUR POMPA ÜNİTESİ</b>					
Fazla Çamur Pompaları	Adet	6	5.671,56	34.029,36	3+3 adet 0-15 m <sup>3</sup> /h kapasite aralığında
Geri Devir Çamur Pompaları	Adet	4	5.671,56	22.686,24	2+2 adet 0-15 m <sup>3</sup> /h kapasite aralığında
<b>VİNÇLER</b>					
Pergel Vinçler (500 kg kaldırma kapasitesi)	Adet	4	9.816,01	39.264,04	Ekipmanlar için kaldırma tertibatı
<b>KAPAKLAR</b>					
Motor Kumandalı Sürgülü Kapaklar	kg	5.500	50,00	275.000,00	22 adet sürgülü kapak
<b>BORULAMA VE BORU ÖZEL PARÇALARI</b>					
Borulama ve Boru Özel Parçaları (Çek valf, Demontaj Parçası, Vana vb. Ekipmanlar)	Takım	1	38.842,06	38.842,06	
Serpantin imalatı ve montajı	Metre	720	300,00	216.000,00	
<b>ÇEŞİTLİ MEKANİK İŞLER</b>					
Bina Sıhhi Tesisat	Takım	1	3.390,66	3.390,66	
Yangın Söndürücü (6 Kg)	Adet	1	110,00	110,00	
<b>MEKANİK İŞLER TOPLAMI</b>				<b>825.697,31</b>	

Çalışmanın yapıldığı dönemde USD: 3.50 TL'dir

### 3.2.3.2. İnşaat İşleri Maliyet Belirleme Çalışması

Tam ölçekli Anammox prosesli azot giderim tesisinin inşaat işleri için gerekli olan ünite ve ekipmanlar; kazı işleri, grobeton, beton, kalıp, demir, kaplama, yalıtım,

sıva, boya kapı ve doğrama işleri olarak belirlenmiş ve birim maliyet ve miktar üzerinden maliyet hesaplanmıştır. İnşaat işlerine ait toplam maliyet Tablo 9.'da verilmektedir.

**Tablo 9.** İnşaat işleri maliyet belirleme çizelgesi

Elektrik İşleri İçin Gerekli Ünite ve Ekipmanları	Birim	Metraj	Birim Fiyat (TL)	Toplam Fiyat (TL)
Kazı Yapılması ve Nakli	Metreküp	10.150,00	48,39	491.158,50
Grobeton	Metreküp	223,00	160,15	35.713,45
Beton	Metreküp	3.851,00	196,40	756.336,40
Kalıp	Metrekare	11.103,00	39,63	440.011,89
Kalıp İskelesi	Metreküp	21.206,00	7,05	149.502,30
Demir	Ton	385,00	2.503,25	963.751,25
Galvanizli Çelik İşleri	Kilogram	11.620,00	7,39	85.871,80
Terrazo karo ile döşeme kaplaması yapılması	Metrekare	300,00	80,95	24.285,00
50 mm poliüretan yalıtımlı (üstü 0.50 mm kalınlıkta boyalı galvanizli sac ve altı 0,40 mm kalınlıkta boyalı galvanizli sac) cephe paneli ile cephe kaplaması yapılması	Metrekare	640,00	76,84	49.177,60
Tavanlara Dahili Sıva Yapılması	Metrekare	300,00	26,04	7.812,00
Su bazlı mat boya yapılması (iki kat)	Metrekare	300,00	20,60	6.180,00
500 kg çimento dozlu şap yapılması	Metrekare	300,00	19,01	5.703,00
3 mm kalınlıkta elastomer esaslı (20 soğukta bükülmeli) cam tülü taşıyıcılı ve 3,3 mm kalınlıkta elastomer esaslı (20 soğukta bükülmeli) polyester keçe taşıyıcılı bir yüzü mineral kaplı polimer bitümlü örtüler ile iki kat su yalıtımı yapılması	Metrekare	300,00	33,13	9.939,00
Stor Kapı	Metrekare	25,00	400,00	10.000,00
Alüminyum Doğrama	Kilogram	300,00	24,54	7.362,00
Cam Takılması	Metrekare	30,00	147,23	4.416,90
Ø 100 mm çapında PVC Yağmur İniş Borusu	Metre	64,00	14,54	930,56
<b>İNŞAAT İŞLERİ TOPLAMI</b>				<b>3.048.151,65</b>

### 3.3. İşletme Maliyeti

Yıllık işletme maliyeti hesaplanırken enerji sarfiyatı ve elektrik işleri ve mekanik işlerden kaynaklı bakım onarım ihtiyacı dikkate alınmıştır. Elektrik ile çalışan tüm cihaz ve ekipmanların çalışma süresine göre yıllık elektrik tüketimi hesaplanmış ve birim elektrik fiyatı üzerinden toplam yıllık enerji maliyeti hesaplanmıştır (1 kWh= 0.25 TL). Toplam Enerji maliyeti Tablo 10.'da verilmektedir. Yıllık bakım onarım bedeli ise 10 yıllık amortisman süresi varsayımı ile elektrik işleri ve mekanik işlerin toplam yatırım bedelinin % 10 olacak şekilde hesaplanmış ve 213.300 TL olarak belirlenmiştir.

**Tablo 10.** Yıllık toplam enerji maliyeti

Enerji Sarfiyatı olan Ünite ve Ekipmanlar	Birim	Miktar	Kapasitesi, kW	Çalışma Süresi saat/gün	Enerji Sarfiyatı, kWh/gün	Enerji Maliyeti, TL/yıl
Terfi Pompaları	Adet	2	5	20	200	18.250
Blowerler	Adet	2	7	24	336	30.660
Fazla Çamur Pompaları	Adet	3	2	6	36	3.285
Geri Devir Çamur Pompaları	Adet	2	5	24	240	21.900
Pergel Vinçler (500 kg kaldırma kapasitesi)	Adet	4	1	2	8	730
Isıtıcı	Adet	1	780	24	18720	1.708.200
<b>TOPLAM ENERJİ SARFIYATI</b>					<b>25108</b>	<b>2.264.825</b>

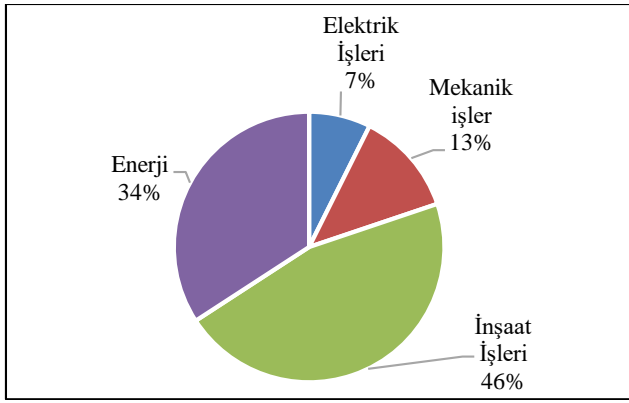
Yukarıda özellikleri verilmiş olan atıksuyun projede önerilen Anammox prosesli azot giderim ünitesinde arıtılması sonucunda oluşacak olan ve yukarıda detaylı hesaplamaların gösterildiği maliyetler Tablo 11.'de özetlenmiştir.

**Tablo 11.** Maliyet tablosu

Maliyetler	Anammox Prosesli Azot Giderim Ünitesi, TL
İlk Yatırım Maliyeti	4.362.626
Elektrik İşleri	488.778,50
Mekanik işler	825.697
İnşaat İşleri	3.048.151,65
Yıllık İşletme Maliyeti	2.264.825
Enerji	2.264.825
Toplam Maliyet	6.627.451

## 4. Genel Değerlendirme

2000 m<sup>3</sup>/gün kapasiteli iki aşamalı kısmi nitritasyon-Anammox ünitesine ait yıllık işletme gideri 2.264.825 TL, ilk yatırım maliyeti ise 4.362.626 TL olarak belirlenmiştir. Bu tesisin işletme maliyeti 3,77 TL/m<sup>3</sup>/gün olarak belirlenmiş olup, ilk yatırım maliyeti ise 2181 TL/m<sup>3</sup>/gün olarak hesaplanmıştır. İşletme giderinin büyük bir kısmı (%80) atıksuyu 30°C sıcaklıkta tutmak için gerekli olan ısıtma ihtiyacından kaynaklanmaktadır. Isıtma ihtiyacından kaynaklanan ısının anaerobik çürütme tanklarından çıkan biyogazın yakılması ile sağlanması durumunda işletme giderlerinin %80' i azaltılabilir. İlk yatırım maliyeti ve yıllık işletme gideri dağılımı Şekil 2'de verilmektedir.



**Şekil 2.** İlk yatırım maliyeti ve yıllık işletme gideri dağılımı

Dünyada yenilikçi yaklaşım olarak uygulanmakta olan Anammox prosesi ile azot giderim ünitesinin hayata geçirilmesi ile ortalama % 95 amonyum giderimi sağlanabilmektedir.

### Teşekkür

Projeye destek sağlayan İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) yönetimi ve teknik ekibine teşekkür ederiz.

### Conflict of Interest / Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No conflict of interest was declared by the authors.

### Kaynaklar

Abma, W.R., Schultz, C.E., Mulder, J., van der Star W.R.L., Strous, M., Tokumoti, T. ve van Loosdrecht, M.C.M., 2007. Full-scale Granular Sludge Anammox Process, *Water Sci Technol.*, 55(8-9):27-33.

Bao, P., Wang, S., Ma, B., Zhang, Q., Peng, Y., 2017. Achieving partial nitrification by inhibiting the activity of Nitrospira-like bacteria under high-DO conditions in an intermittent aeration reactor, *Journal of Environmental Sciences*, 56:71-78.

Çelen-Erdem, İ., Kurt, E.S., Bozçelik, B., Çallı, B., 2018. Upflow packed bed anammox reactor used in two-stage deammonification of sludge digester effluent, *Water Sci Technol.*, 78 (9) 1843-1851.

Jenicek, P., Svehla, P., Zabranska, J. ve Dohanyos, M., 2004. Factors Affecting Nitrogen Removal by Nitritation/Denitritation, *Water Science & Technology*, 49(5-6): 73-79.

Kartal, B., de Almeida N. M., Maalcke .W J., Op den Camp H. J.M., Jetten M. S.M., Keltjens J. T., 2013. How to make a living from anaerobic ammonium

oxidation, *FEMS Microbiology Rev.*, 37(3): 428-461.

Kosari, S.F., Rezaia, B. Lo, K.V., Mavinic, D.S., 2014. Operational strategy for nitrogen removal from centrate in a two-stage partial nitrification-Anammox process. *Env Techn.*, 35(9): 1110-1120.

Lackner, S., Gilbert, E.M., Vlaeminck, S.E., Joss, A., Horn, H., van Loosdrecht, MCM., 2014. Full-scale partial nitritation/anammox experiences – An application survey. *Wat Res.* 55 292-303.

Magri, A., Beline, F., Dabert, P., 2013. Feasibility and interest of the anammox process as treatment alternative for anaerobic digester supernatants in manure processing – An overview, *Journal of Environmental Management*, 131:170-184.

Metcalf & Eddy, 2003. *Water Reuse: Issues, Technologies and Applications*, 4th Edition, McGraw-Hill Publisher, New York.

Mulder, A., van de Graaf, A.A., Robertson, L. ve Kuenen, J., 1995. "Anaerobic Ammonium Oxidation Discovered in a Denitrifying Fluidized Bed Reactor", *FEMS Microbiology Ecology*, 16(3):177-183.

Ni, B.J., Hu, B.L., Fang, F., Xie, W.M., Kartal, B., Liu, X.W., Sheng, G.P., Jetten, M., Zheng, P., Yu, H.Q., 2010. Microbial and Physicochemical Characteristics of Compact Anaerobic AmmoniumOxidizing Granules in an upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor. *Applied and Environmental Microbiology.* 76(8), 2652-2656.

Niftrik van L.A., Fuerst, J.A., Sinninghe Damsté J.S., Kuenen J.G., Jetten M.S.M., Strous M., 2004. The Anammoxosome: an Intracytoplasmic Compartment in ANAMMOX Bacteria, *FEMS Microbiology Letters*, 233, 7-13.

Strous, M., van Gerve, E., Zheng, P., Gijs Kuenen, J. ve Jetten, M.S.M., 1997. Ammonium Removal From Concentrated Waste Streams with the Anaerobic Ammonium Oxidation (Anammox) Process in Different Reactor Configurations, *Water Research*, 97:1955-1962.

Strous, M., Kuenen, J.G., Jetten, M.S.M., 1999. Key Physiology of Anaerobic Ammonium Oxidation, *Applied and Environmental Microbiology*, 65(7), 3248- 3250.

Strous, M., Heijnen J.J., Kuenen J.G., Jetten MSM. 1998. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 50(5):589-596.

van de Graaf, A.A., de Bruijn, P., Robertson, L.A., Jetten, M.S.M., Kuenen, J.G., 1996. Autotrophic growth of



anaerobic ammonium-oxidizing micro-organisms in a fluidized bed reactor, *Microbiology (UK)*, 142, 2187–2196.

Van Hulle, S.W.H. , Vandeweyer, H.J.P., Meesschaer, B.D., Vanrolleghem, P.A., Dejans, P., Dumoulin, A., 2010. Engineering aspects and practical application of autotrophic nitrogen removal from nitrogen rich streams. *Chemical Eng Journal.*, 162 1-20.