



## **Çok Katlı Binalarda Gri Suyun Yerinde Arıtılması ile Yeniden Kullanılmasının Fizibilitesi: İstanbul'da Bir Kentsel Dönüşüm Projesi Örneği**

### **The Feasibility of On-site Greywater Treatment for Non-Potable Reuse in Multi-Storey Buildings: A Case of Urban Transformation Project in Istanbul**

**Börte Köse-Mutlu** <sup>1,2\*</sup> 

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Yeditepe Üniversitesi, 34755, Ataşehir, İstanbul, TÜRKİYE

<sup>2</sup> Prof. Dr. Dincer Topacık Ulusal Membran Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 34467, Sarıyer, İstanbul, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author \*: [kosebo@itu.edu.tr](mailto:kosebo@itu.edu.tr)

Geliş Tarihi / Received: 30.03.2020

Kabul Tarihi / Accepted: 11.07.2020

*Atıf şekli/How to cite: KÖSE-MUTLU, B., Çok Katlı Binalarda Gri Suyun Yerinde Arıtılması ile Yeniden Kullanılmasının Fizibilitesi: İstanbul'da Bir Kentsel Dönüşüm Projesi Örneği, DEUFMD, 23(67), 81-91.*

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2021236707

#### **Öz**

Su kıtlığının en önemli konulardan biri olduğu günümüz dünyasında atıksuyun yeniden kullanılması sorunu çözmenin anahtarı olarak görülmektedir. En uygun yöntem ise nispeten düşük kirliliğe sahip olan gri suyu, kanalizasyon sistemine dahil olmadan toplayabilmektir. Mutfak ve banyolardan toplanan gri su, ortak bir arıtma tesisinde arıtıldıktan sonra sifonlarda kullanılmak üzere bireysel tuvaletlere sunulabilir. Bu çalışmada kullanılan bina modelinde aynı katta yer alan dairelerin toplanması dikey eksende birbirlerine yakın bir şekilde konumlandırılmıştır. Böylece atıksuların toplanması için gerekli altyapı borularının uzunluğu en az seviyede tutulabilmiştir. Arıtılmış suyun yeniden kullanılması, mevcut hatlara gri su hatlarının ilavesi ile mümkün olacaktır. Çalışmada, yüksek binalarda inşa edilecek ilave hatların ve kurulacak arıtma tesislerinin ilk yatırım ile işletme ve bakım maliyetleri hesaplanarak sunulmuştur. Arıtma teknolojisi seçenekleri olarak döner biyodisk, membran biyoreaktör ve nanofiltrasyon sistemleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Özellikle 160 ve daha fazla daireye sahip çok bloklu veya yüksek katlı binalarda gri suyun kullanımı fizibil bulunmakla beraber, en yüksek fayda-maliyet oranına sahip arıtma teknolojisinin nanofiltrasyon sistemi olduğu sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Gri Su; Arıtma; Yeniden Kullanım; Fizibilite; Membran Prosesler.

#### **Abstract**

In today's world, where water scarcity is one of the most important issues, the reuse of wastewater is seen as the key to solve the problem. The most proper solution is to collect greywater, which has relatively low pollution, separately before entering the sewer system. The greywater collected from kitchens and bathrooms can be served to the individual users and it can be used as flush water after being treated in a common treatment plant. In the model building studied in this paper, the toilets of the apartments on the same floor were located close to the vertical shift, so that the length of the pipes for additional infrastructure required for the collection of wastewater was minimal. The reuse of the

treated water was also possible when greywater lines were added to the existing lines. In the study, capital and operation and maintenance costs of these infrastructures and treatment plant to be constructed are presented. The treatment alternatives that had been comparatively evaluated were rotating biodisc, membrane bioreactor, and nanofiltration systems. To conclude, it was found feasible to use greywater especially in multi-block and/or high-rise buildings with 160 or more apartments, at the same time it is concluded that the treatment technology with the highest benefit-cost ratio is the nanofiltration system.

**Keywords:** Greywater; Treatment; Reuse; Feasibility; Membrane Processes.

### Terimler Dizini ve Kısaltmalar

CEPCI	Chemical engineering plant cost index (Kimya mühendisliği tesis maliyetleri endeksi)
EM <sub>AAT</sub>	Gri su arıtımı için ortaya çıkan enerji sarfiyatından oluşan maliyet
EM <sub>Pompa</sub>	gri suyun terfisi için gereken enerji sebebiyle ortaya çıkan maliyet
F:M	Fayfa/maliyet oranı
Güç <sub>MBR</sub>	MBR sistemindeki güç gereksinimi
İBM	İşletme ve bakım maliyeti
İBM <sub>Diğer</sub>	RBC sistemlerindeki ek maliyetleri kapsayan diğer maliyetler
İBM <sub>Kim</sub>	Kimyasal maliyetleri
İSKİ	İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
İYM	İlk yatırım maliyeti
İYM <sub>Boru</sub>	Borular için gereken İYM
İYM <sub>Klor</sub>	Dezenfeksiyon için gereken İYM
İYM <sub>MBR</sub>	MBR için gereken İYM
İYM <sub>NF-I-</sub>	Boru ve vana, enstrümantasyon
İYM <sub>NF-V</sub>	ve kontrol, tank ve çerçeve, diğer ve son olarak pompa için İYM
İYM <sub>Pompa</sub>	Pompalar için gereken İYM
İYM <sub>RBC</sub>	RBC için gereken İYM
İYM <sub>Tank</sub>	Tanklar için gereken İYM
İYM <sub>Toplam</sub>	Toplam İYM
KOİ	Kimyasal oksijen ihtiyacı
MBR	Membran biyoreaktör
NF	Nanofiltrasyon
RBC	Döner biyoreaktör
SF	Bir dairenin yıllık su faturası

SF <sub>az</sub>	Bir dairenin yıllık su faturasındaki azalma
SFT	Daire başına su faturasındaki tasarruf
SS <sub>AY</sub>	Aylık su sarfiyatı
SS <sub>kişi</sub>	Su sarfiyatı
ST <sub>Gri-ay</sub>	Gri suyun sifonlarda kullanılmasıyla gerçekleşen aylık su tasarrufu

### 1. Giriş

Eskiden su zengini olduğu düşünülen pek çok ülke için günümüzde su kıtlığı söz konusudur. Evsel, endüstriyel ve tarımsal kullanım amacıyla su teminine olan ihtiyacın her geçen gün artması mevcut küresel ısınmanın da etkisi ile ülkelerde su stresine neden olmaktadır. Su kıtlığı problemi için anahtar çözüm, sürdürülebilir su yönetiminin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesidir. Bu bağlamda, evsel atıksuyun karakterizasyonlarına bağlı olarak ayrık akımlar (örneğin; gri su, siyah su gibi) halinde toplanmasına dayanan prensip yenilikçi bir fikir olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle İstanbul gibi büyük şehirlerde artan su talebi ile bahsedilebilmesi adına ortaya konulan su yönetim stratejilerinde gri suyun yeniden kullanımı öne çıkan bir seçenektir. Gri su, küvet ve duşa kabinlerden, banyo lavabolarından, çamaşır yıkama ve kurutma ünitelerinden ve mutfak lavabolarından toplanan atıksuları içermektedir. Gri su, diğer ayrık akımlara görece daha büyük hacimlerde ortaya çıkar ve kirlilik seviyesi de daha düşüktür [1]. Gelişmiş ülkelerde kişi başı günlük 100-150 L mertebelerinde oluşan evsel atıksuyun hacimce %60-70'lik bir kısmı aslında gri sudan oluşur [2]. Başarılı bir şekilde toplanıp uygun teknolojilerle arıtılabilen gri sular, tuvaletlerde sifon suyu olarak kullanılabilir.

Gri su, yüksek kirlilik içermeyen bir atıksu olarak sınıflandırılrsa da Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) konsantrasyonu yüzlerce mg/L'ye ulaşabilmektedir. Ayrıca,  $10^4$ - $10^6$  CFU/ml fekal koliform da içermektedir. Dolayısı ile gri suyun arıtılmadan kullanılması durumunda önemli sağlık riskleri ortaya çıkabilir. Özellikle yaz aylarında patojen üremesinin önüne geçebilmek adına binalarda yüksek verimlerde arıtma yapabilen sistemlerin kurulmuş olması gerekmektedir [3,4]. Gri suyun yeniden kullanımı için fiziksel, kimyasal veya biyolojik proseslere dayalı arıtma teknolojileri kullanılmaktadır. Pek çok çeşidi olan biyolojik arıtma teknolojileri içerisinde Döner Biyoreaktör (*Rotating Bioreactor*, RBC) en etkili olan teknolojilerden biridir [5-7]. Friedler ve arkadaşlarının çalışmalarında altını çizdikleri üzere RBC kullanımı ile düşük enerji sarfiyatları ve düşük işletme maliyetleri elde edilebilmektedir [5]. Araştırmacılar bu çalışmalarında klorlama ile kombinlenmiş bir RBC kullanarak ilgili standartlarda belirtilen çıkış suyu değerlerine ulaşabilmişlerdir. Membran Biyoreaktör (*Membrane Bioreactor*, MBR) kullanımı da öne çıkan bir diğer fizibil seçenektir [8-11]. Gri su bünyesinde üreyi barındırmadığı için (üre içeren akım sarı su olarak isimlendirilmektedir) biyolojik arıtma proseslerinde azot, limitleyici element olarak davranabilir ve arıtma verimleri bu durumdan etkilenebilir [12]. Dolayısı ile, Nanofiltrasyon (NF) gibi membran teknolojileri de gri suyun arıtılarak tekrar kullanımında etkili bir çözüm seçeneği olabilir [13-15].

Gri suyun yeniden kullanımı çok katlı binaların İlk Yatırım Maliyetlerini (İYM) arttıracaktır. Gri suyun yeniden kullanımı için kurulacak bir sistem, gri suyun küvet, duş, çamaşır makinesi ve diğer ilgili ünitelerin çıkışından toplanması için gereken ayırık toplama hatlarının inşasını gerektirir. Buna ek olarak, toplanan gri suyun depolanması için tankların alınması gerekmektedir. Bu tanklar belli bir yer de işgal edecektir [16]. Bu makalede, İstanbul'da yer alan çok katlı binalarda gri suyun yeniden kullanımının ekonomik analizi yapılmıştır. Bu fizibilite analizinde, bireysel kullanımının faydaları da göz önüne alınarak bir yeniden kullanım projesinin binanın İYM ve İşletme ve Bakım Maliyetleri (İBM) üzerindeki artırıcı etkisi ortaya konulmuştur. Bu bağlamda, üç farklı arıtma teknolojisi (RBC, MBR ve NF) kullanıldığında elde edilen daire başına spesifik

maliyet ve ilave maliyetlerin binanın toplam maliyeti içerisindeki oranı da hesaplanmıştır. Ayrıca, her arıtma teknolojisi için İBM değerleri harcama kalemleri bazında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Bina ve altyapı sistemlerinin özellikleri

Bu çalışma, kat sayısı ondan fazla olan yüksek binalar için gerçekleştirilmiştir. Her kattaki daire sayısı 4, bir dairede yaşıyan aile büyüklüğü ise 3,4 kişi/daire olarak kabul edilmiştir [17]. Binada kat yüksekliği 3 m'dir. Dairelerdeki banyolar ve tuvaletler, binalardaki dikey şafta yakın şekilde konumlandırılmıştır. Bu çalışmada tasarlanan gri su sisteminin üç ana altyapı bileşeni bulunmaktadır: 1) Gri suyu toplama hatları, 2) arıtılmış atıksuyun depolama tankına aktarılması ve 3) arıtılmış gri suyun depolama tankından dairelere dağılması için kullanılan hatlar. Öncelikle, duşlardan ve lavabolardan toplanan sular yatay borular ile daire içerisinde ilerledikten sonra merkezi dikey kolektör vasıtası ile bodrum katına aktarılır. Bodrum katında kurulmuş olan bir paket arıtma sisteminde arıtılmasının ardından bodrum katında yer alan depolama tankına muhafaza edilir. Arıtılan gri su dairelere pompa vasıta ile geri gönderilir. Tasarlanan bu sistemde konvansiyonel altyapıya ek olarak iki yeni altyapı ögesi söz konusudur. Birincisi, yukarıda bahsi geçen daire içerisi yatay toplama hatlarıdır. İkincisi ise arıtılmış suyu daire içerisindeki sifon depolarına ileten yatay iletim hattıdır. Gri suyun yeniden kullanımı hedeflendiğinde bu iki yeni hat, tasarıma ve inşaa süreçlerine dahil edilmelidir. Arıtılmış su en üst kata terfi edildikten sonra diğer katlara cazibe ile aktarılacaktır. Gri suyun toplanması ve dağıtılması için gereken daire içi ve daire dışı boru uzunlukları sırası ile 5,0 ve 9,0 m'dir [18]. 9 m'lik daire dışı boru elemanları 3'er m olarak toplama, depolama tankına pompaj ve dağıtım amacı ile işletilecektir. Depolama tankı adedi iki olup biri toplanmış gri suyun depolanması diğeri ise arıtılmış gri suyun depolanması için kullanılacaktır. Her bir depolama tankının hacmi  $1 \text{ m}^3$ 'tür [18]. Tüm sistemin özetlendiği temsili bina görseli Şekil 1'de verilmektedir.

### 2.2. Gri su arıtma teknolojileri

Maliyet analizleri üç farklı arıtma teknolojisinin kullanılması durumu için gerçekleştirilmiştir: bir RBC sistemi, bir MBR sistemi ve bir NF sistemi.

Aritma sistemlerinin konfigürasyonu Şekil 2'de verilmektedir. Gri su arıtma sistemlerinin işletme koşulları ise Tablo 1'de sunulmuştur.

### 2.3. Maliyet analizi

#### 2.3.1 Maliyetler

Bu çalışmada gerçekleştirilen maliyet analizi hesaplamaları İYM ve İBM kalemlerinin tümünü içermektedir. Birim debi veya birim membran alanı tabanlı denklemler kullanılarak İYM hesaplanmıştır. Çeşitli sistem elemanlarının (örneğin; NF membranı) yatırım maliyetleri üretici ve sağlayıcılardan elde edilmiştir. İYM; altyapının inşaatı, arıtma sistemleri ve ek giderleri içerir.

İYM hesaplarında kullanılan denklemler aşağıda sunulmaktadır (Denklem 1-12). Altyapı maliyetleri, Denklem 1 ve gereken boru uzunluğu kullanılarak hesaplanmıştır. RBC ve MBR sistemlerinin İYM değerleri ise sırası ile Denklem 3 ve Denklem 4 yardımı ile hesaplanmıştır.

**Tablo 1.** Arıtma sistemlerinin işletme koşulları.

<i>Parametre</i>	<i>Birim</i>	<i>Değer</i>
Ak <sub>IMBR</sub>	L/m <sup>2</sup> /sa	32,0
MBR Tank boyutları (Yükseklik x En x Boy)	m	1,85x0,80x1,20
Ak <sub>INF</sub>	L/m <sup>2</sup> /sa	60,0
NF işletme basıncı	bar	12,0
İşçilik <sub>RBC</sub>	sa/hafta	7,0
İşçilik <sub>MBR</sub>	sa/hafta	2,0

Ek giderleri karşılayabilmek adına (gerekebilecek ufak cihazlar, vanalar, bağlantılar vb.) toplam maliyetim %15'i kadarı da İYM'ne eklenmiştir. Denklem 3 ve 4, bu ek giderleri barındırmamaktadır. Diğer yandan, Denklem 6-10 kullanıldığında NF sistemi için ek maliyetleri kapsamaktadır. Bir klorlama ünitesi için gereken İYM, tüm arıtma teknolojileri için aynı olduğu kabulü ile toplam İYM'nin hesabında kullanılmıştır. Klorlama için gereken İYM, değişen kapasite ile değişkenlik göstermemektedir. İYM değerleri Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI) kullanılarak güncellenmiştir. İYM değerlerinin yıllık değere indirgenmesinde kullanılan aylık

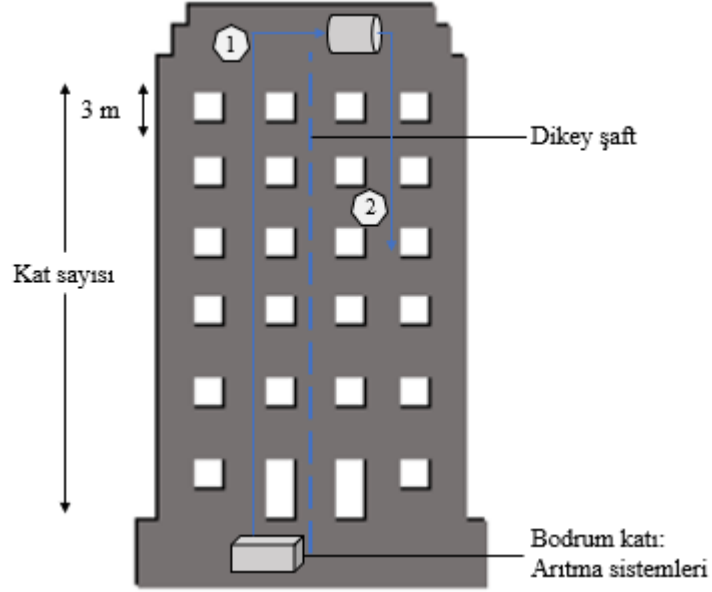
net faiz oranı 0.083 olup ve maliyet analizi süresi olarak 15 yıl tercih edilmiştir. Son olarak, arazi maliyeti 2163 \$/m<sup>2</sup> kabul edilmiştir. RBC ve MBR sistemleri için kullanılan denklemler Friedler ve Hadari'nin yayınından, NF sistemi için kullanılan denklemler ise yazarın daha önce yayınlanmış makalesinden alınmıştır [18,19]. İYM değerlerinin yıllık değerlere çekilmesinde kullanılan formüller ve katsayılar "Mühendislik Ekonomisi" kitabından elde edilmiştir [20].

İBM ise enerji, işçilik ve kimyasal maliyetlerini içermektedir. Birim elektrik ve işçilik maliyetleri sırası ile 0,76 \$/kW.sa ve 2,05 \$/sa şeklindedir. Giriş klor konsantrasyonu 3,0 mg/L iken çıkış klor konsantrasyonu 1,0 mg/L olarak işlemler yapılmıştır. Klorlama maliyeti için kimyasal ücretleri üreticilerden sağlanmıştır [21]. RBC sistemi için güç sarfiyatı ve enerji maliyeti literatürde yer alan Denklem 12 kullanılarak hesaplanmıştır [18].

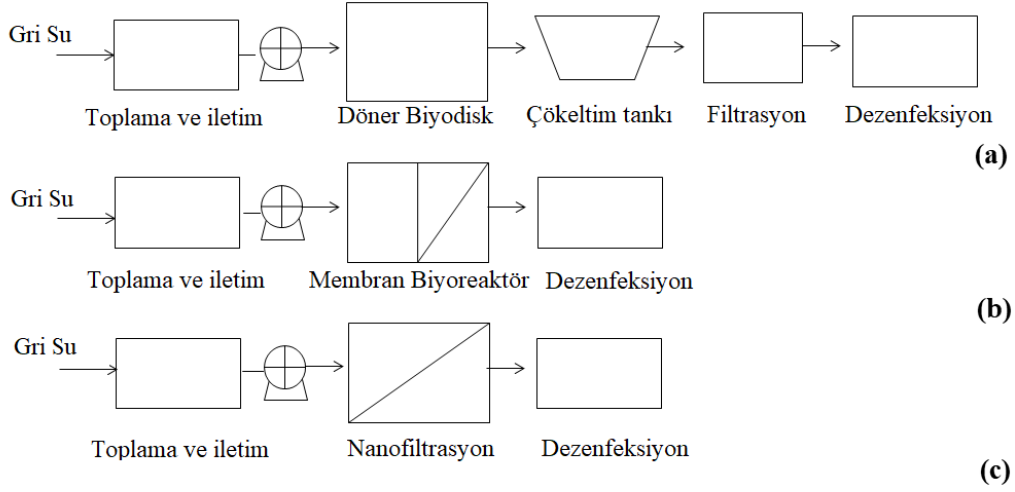
MBR sisteminde ortaya çıkan enerji sarfiyatı, Davies'in yayınladığı çalışmada yer alan birim maliyet (1,25 kW.sa/m<sup>3</sup> arıtılmış gri su) kullanılarak hesaplanmıştır [22]. MBR sistemleri genellikle önleyici bakımlara ihtiyaç duyarlar ve bu ek bir İBM oluşturur. Bu maliyet, 0,025 \$/m<sup>3</sup>/yıl olarak kabul edilmiştir. Diğer yandan NF için İBM hesaplamaları 0,12 \$/m<sup>3</sup> kabulü ile gerçekleştirilmiştir [23]. Son olarak, arıtılmış gri suyun iletimi için gerekli enerji ise Bölüm 2.1'de detayları verilen bina özellikleri baz alınarak hesaplanmıştır.

#### 2.3.2 Faydalar

Gri suyun yeniden kullanımı, bireysel kullanıcı için hem fayda hem de maliyet anlamına gelmektedir. Maliyet analizinde, daire başına birim fiyat ortaya konulur iken hem maliyetler hem de faydalar ayrıca hesaplanmıştır. Dairede ikamet eden her aile gri suyun sifon suyu olarak yeniden kullanımı sayesinde su sarfiyatını azaltacağından aylık su ve atıksu bedelleri faturaya daha düşük yansiyacaktır. Bir bina için toplam yıllık net tasarruf çeşitli bina modelleri için (kat sayılarının artırılması ile) hesaplanarak son spesifik maliyetler (İYM \$/daire) ve oransal maliyetler karşılaştırmalı sunulmuştur. Birim su ve atıksu hizmet bedelleri İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ)'nin 2019 yılı maliyetleri olan 0,96 \$/m<sup>3</sup>/ay ve 0,34 \$/m<sup>3</sup>/ay olarak hesaplamaya dahil edilmiştir [24].



**Şekil 1.** Fizibilite çalışmasında kullanılan bina modeli: (1) Arıtılmış gri suyun bodrum katından depoya iletilmesi ve (2) depodan dairelere aktarımı



**Şekil 2.** Gri su arıtma teknolojileri: (a) RBC, (b) MBR ve (c) NF

Denklem*	Öge/Baz/Birim	
$\dot{Y}M_{\text{Boru}}=6*L$	Boru/Uzunluk/\$/m	(1)
$\dot{Y}M_{\text{Tank}}=144*V^{0,484}$	Depolama tankı/Hacim/\$/m <sup>3</sup>	(2)
$\dot{Y}M_{\text{Pompa}}=594*Q^{0,0286}$	Pompa/Debi\$/m <sup>3</sup> /gün	(3)
$\dot{Y}M_{\text{RBC}}=18,853+17,945*\ln(Q)$	RBC/Debi/\$/m <sup>3</sup> /gün	(4)
$\dot{Y}M_{\text{MBR}}=3,590*Q^{0,6776}$	MBR/Debi/\$/m <sup>3</sup> /gün	(5)
$\dot{Y}M_{\text{NF-I}}=5926,13*A^{0,42}$	NFBoru&vana/Membran alanı/\$/m <sup>2</sup>	(6)
$\dot{Y}M_{\text{NF-II}}=1445,5*A^{0,66}$	NFEnstrümantasyon&kontrol/Membran alanı/\$/m <sup>2</sup>	(7)
$\dot{Y}M_{\text{NF-III}}=3047,21*A^{0,53}$	NFTank&çerçeve/Membran alanı/\$/m <sup>2</sup>	(8)
$\dot{Y}M_{\text{NF-IV}}=7865,02*A^{0,57}$	NFDiğer/Membran alanı/\$/m <sup>2</sup>	(9)
$\dot{Y}M_{\text{NF-V}}=389,12*(Q/24*(P * 100))^{0,39}$	NFPompa/Debi ve işletme basıncı/m <sup>3</sup> /gün, \$/bar	(10)
$\dot{Y}M_{\text{Klor}}=1.670$	Klorlaman/Ünite/\$/ünite	(11)
$\text{Güç}_{\text{MBR}}=42,2*e^{(0,1046*Q)}$	MBR/Debi/\$/m <sup>3</sup> /gün	(12)

\*L: uzunluk, V: hacim, Q: debi ve P: basınç ifade etmektedir.

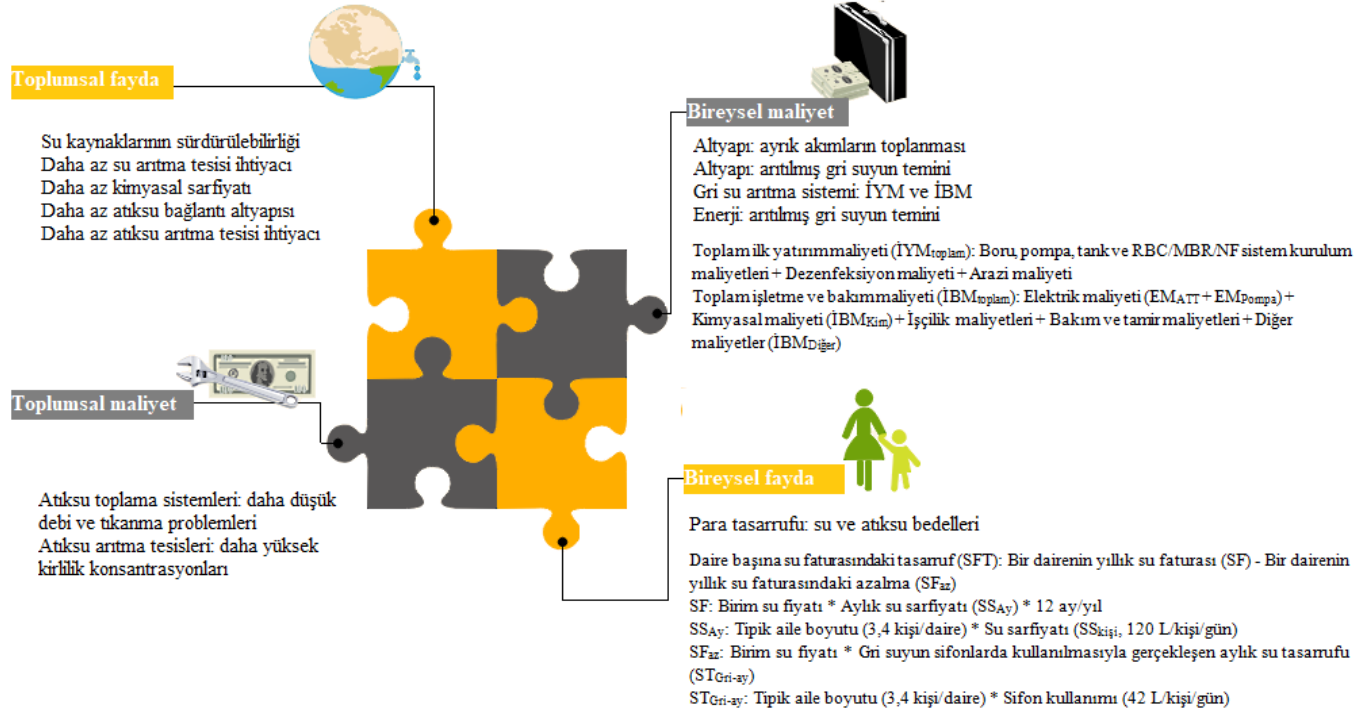
Birim daire fiyatları için ise kentsel dönüşüm sonrası Fikirtepe’de satışa sunulan dairelerin fiyatları kullanılmıştır [25]. Tüm fayda ve maliyetlerin şematik anlatımı Şekil 3’te gösterilmektedir.

### 3. Bulgular

Tüm arıtma sistemleri için spesifik maliyetler Şekil 4’te sunulmaktadır. RBC sistemi için İYM değerlerinin daire sayısının değişiminden etkilenme oranı MBR ve NF sistemleri ile karşılaştırıldığında daha yüksek seyretmiştir. Kısaca daire başına düşen İYM olarak tanımlanabilen spesifik maliyet, RBC sistemi tercih edildiğinde ancak 80 dairelik bir binada 1000 \$/daire’nin altına inebilmektedir. Bu daire sayısı, bu çalışmada kullanılan bina modeline göre 20 katlı bir binaya tekabül etmektedir. Öte yandan, MBR ve NF sistemleri tercih edildiğinde binanın yüksekliğinden bağımsız olarak spesifik maliyetler 1000 \$/daire’den daha düşüktür. Belli bir limit noktasına kadar RBC sisteminin İYM değerleri, kişi sayısı ve gri su debisinden bağımsız ilerlemiştir. Membran sistemleri ise debiye daha bağlı bir davranış sergilemiş ve küçük kapasiteler için daha uygun oldukları görülmüştür. Beklenildiği üzere, spesifik maliyetler artan daire sayısı ile azalmıştır. Bu sonuç ışığında, yüksek binaların gri suyun

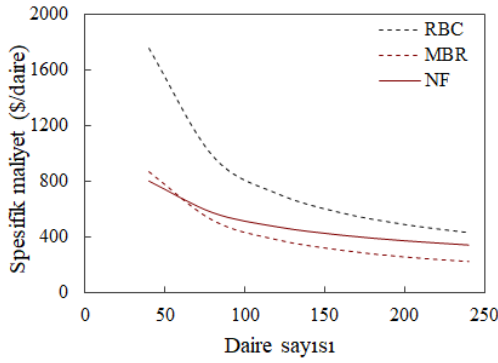
yeniden kullanımı adına daha müsait olduğu söylenebilir. İYM değerleri göz önüne alındığında en fizibil arıtma sistemi, MBR olmuştur. Bu sonuç, literatürde daha önce sunulan sonuçlar ile karşılaştırıldığında farklılık göstermiştir [18]. Gözlenen fark, membran teknolojisinin maliyetlerinin yıllar içerisinde azalması ile açıklanabilir.

Oransal ilk yatırım maliyetleri ise Şekil 5’te sunulmaktadır. Oransal maliyetler, arıtma sisteminin maliyetinin daire fiyatına oranlanması ile elde edilir ve yüzdesel bazda ifade edilir. Bu parametrenin sunulması İYM değerlerinin sağlıklı bir şekilde yorumlanabilmesi için gereklidir. Oransal maliyetler hesaplanırken İstanbul’da yer alan ve önemli bir kentsel dönüşüm projesi örneği olan Fikirtepe kentsel dönüşüm alanında inşa edilmiş binaların satış fiyatları kullanılmıştır. İlgili projedeki 1+1, 2+1 ve 3+1 dairelerin ortalama fiyat 155.000 \$ olarak belirlenmiştir [25]. Grafik incelendiğinde, artan daire sayısı ile oransal İYM’nin de azaldığı görülmektedir. Yüksek olmayan binalarda MBR ve NF sistemlerinin oransal İYM değerleri birbirlerine yakinken yüksek binalarda MBR sisteminin daha fizibil olduğu görülmüştür. RBC sisteminin İYM değerleri binanın ederi ile kıyaslandığında

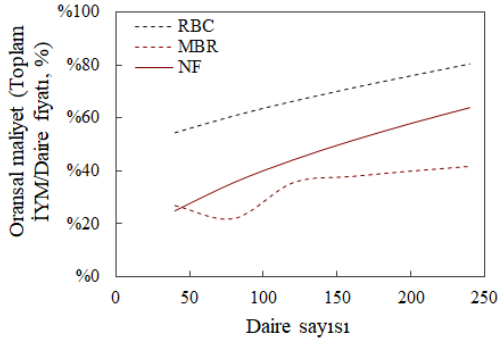


Şekil 3. Bireysel kullanıcı için fayda ve maliyetler ([18] numaralı kaynaktan yararlanarak şematize edilmiş ve matematiksel ilişkiler eklenerek revize edilmiştir).

yüksek kalmıştır. RBC sistemleri için oransal İYM tüm binalar için %0,5'ten yüksek iken, MBR sistemi tercih edildiğinde bu değer her durumda %0,4'ten düşük kalmaktadır. Özellikle bina 30-40 kattan daha fazla katlıysa MBR kullanımı maliyetlerinde önemli bir düşüş gözlenmiştir. Bu sonuç doğrultusunda, MBR sistemlerinin özellikle gökdelenler için uygun olacağı söylenebilir.



**Şekil 4.** Tüm arıtma ve yeniden kullanım maliyetlerini içeren spesifik İYM değerlerinin RBC, MBR ve NF sistemleri için değişimi



**Şekil 5.** Tüm arıtma ve yeniden kullanım maliyetlerini içeren oransal İYM değerlerinin RBC, MBR ve NF sistemleri için değişimi

İşletme ve bakım maliyetleri, tüm maliyet bileşenlerinin de ayrı ayrı gösterilmesi ile sunulmaktadır (Şekil 6). İBM içerisinde en yüksek orana sahip maliyet kalemi arıtılmış gri suyun bodrum katından en üst kattaki depoya terfisi için gereken enerji sebebiyle ortaya çıkan enerji maliyetidir. RBC sistemlerindeki ek maliyetleri kapsayan diğer (İBM<sub>Diğer</sub>) maliyetler kalemi, diğer sistemler ile karşılaştırıldığında

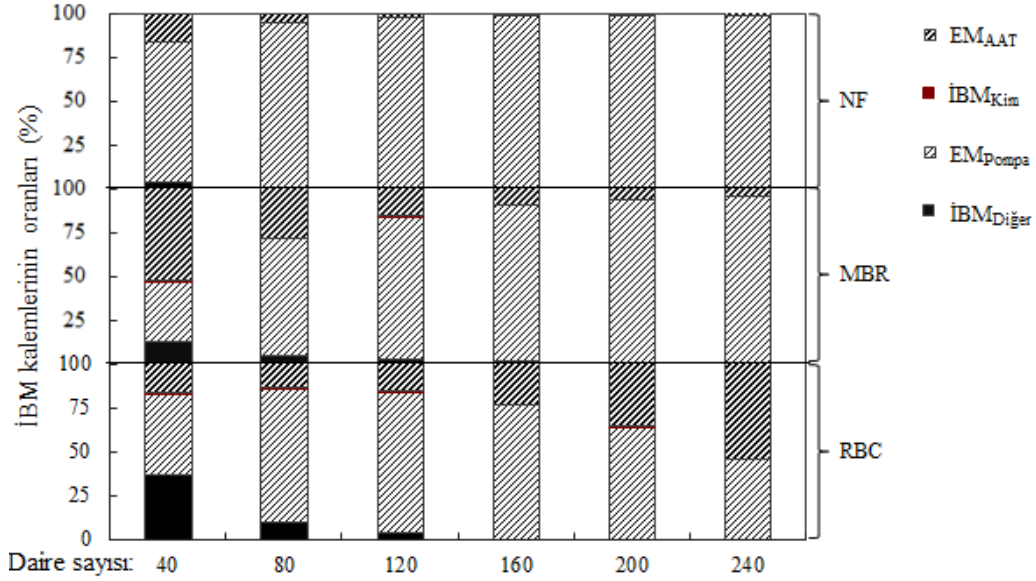
yüksek çıkmıştır. Kimyasal maliyetleri (İBM<sub>Kim</sub>) ise tüm arıtma sistemi seçenekleri için düşük seviyelerde seyretmiştir.

Gri su arıtımı için ortaya çıkan enerji sarfiyatından oluşan maliyet (EM<sub>AAT</sub>)'in toplam İBM içerisindeki oranı, arıtma sistem seçenekleri içerisinde RBC>MBR>NF şeklinde sıralanmaktadır. Arıtma için harcanan en yüksek enerji miktarı RBC sistemi kullanımındadır. RBC sistemi kullanımında İBM<sub>Diğer</sub> maliyet kalemi binanın kat sayısının artışı ile azalış göstermekteyken aynı sistemde EM<sub>AAT</sub> ise binanın kat sayısına bağlı olarak artmaktadır. Daha sağlıklı bir değerlendirme yapabilmek adına, EM<sub>AAT</sub>'ye ek olarak arıtılmış gri suyun terfisi için gereken enerji sebebiyle ortaya çıkan maliyet (EM<sub>Pompa</sub>) de ayrıca sunulmuştur. Özellikle NF sisteminde İBM<sub>Diğer</sub>, İBM<sub>Kim</sub> ve EM<sub>AAT</sub>'nin toplam İBM içerisindeki oranı EM<sub>Pompa</sub>'nın toplam İBM içerisindeki oranı ile kıyaslandığında düşük kalmaktadır.

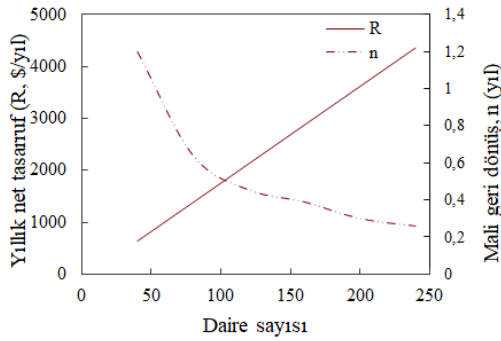
Bu durumda terfi için gereken enerjinin yüksek olması problemi için en uygun çözüm her on katta bir servis katı inşa edilmesidir. Paket arıtma sisteminin servis katlarına da kurulumu ilave maliyet anlamına da gelmektedir. Dolayısı ile her kattaki nüfus yoğunluğunun artırılması daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Bir binadaki daire sayısının en fazla, kat sayısının en az olduğu bina modelleri tasarlanmalıdır. Tüm bunlara ek olarak, yıllık net tasarruf ve mali geri dönüş bilgileri en fizibil arıtma sistem seçeneği olan NF için Şekil 7'de verilmektedir.

Fayda/maliyet (F:M) oranları irdelendiğinde ise 40 adet daire sayısına sahip bir bina modelinde RBC, MBR ve NF sistemleri için sırası ile 0,2, 0,2 ve 0,5 iken daire sayısının artışı ile beraber NF sistemine ait F:M oranlarında önemli bir artış gözlenirken RBC ve MBR sistemleri için aynı artış söz konusu olamadığı gözlenmiştir. Tüm yerleşim modelleri için NF sisteminin F:M oranı diğer sistemlerin F:M oranlarından daha yüksek seyretmiştir ve 160 dairelik bir yerleşimde NF sisteminin F:M oranı 1'den büyüktür. Bunlara ek olarak, yıllık net tasarruf artan daire sayısı ile artmakta iken mali geri dönüş ise yüksek binalarda daha kısa sürede gerçekleşmektedir. Dolayısı ile her ne kadar EM<sub>Pompa</sub> değerleri yüksek olsa da seçilecek olan sistem paket bir NF sistemi olmalıdır.





Şekil 6. Tüm arıtma sistemleri için oransal İBM değerleri



Şekil 7. Çok katlı binalarda NF sistemi kullanımı için yıllık net tasarruf ve mali geri dönüş değerleri

Son olarak, mühendislik projelerinde seçeneklerin değerlendirilmesi sırasında tüm (arıtma vb.) alternatiflere ek olarak hiçbir şey yapmama alternatifinin de düşünülmesi gerekmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ışığında özellikle RBC ve MBR sistemleri ile gri suyun arıtılması tercih edilmesi durumunda bireysel kullanıcı tarafından elde edilecek faydalar düşünüldüğünde hiçbir şeyin yapılmamasının daha fizibil olduğu söylenebilir. Bu sebeple, toplumsal faydanın da düşünüldüğü kapsamlı hesaplamalar da gerçekleştirilmelidir. Bu bağlamda yapılan öneriler Tartışma ve Sonuç kısmında detaylandırılmıştır.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, gri suyun yeniden kullanımının hedeflendiği çok katlı binalarda ortaya çıkacak ilave altyapı inşaatı kaynaklı ilk yatırım maliyetleri ve çeşitli arıtma teknolojilerinin kullanılmasının yaratacağı işletme ve bakım maliyetleri üzerine çalışılmıştır. Gerçekleştirilen detaylı hesaplamalar sonucunda her katta az sayıda daire bulunduran yüksek katlı konutlar yerine yatay mimari yaklaşımı ile inşa edilmiş az katlı fakat nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu konutların tercih edilmesinin bireysel kullanıcı açısından faydayı yüksek tutacağı söylenilebilir. Özellikle 160 ve daha fazla daire içeren binalarda fizibil olacağı söylenebilir. Bu tarz bir yaklaşımın İstanbul dışındaki illerde de yer alan dikey ve/veya yatay mimariye sahip yüksek nüfus yoğunluğuna sahip olacak yeni site inşaatlarında da uygulanabilirliği yüksektir.

En fizibil arıtma teknolojisi, NF sistemi olmuştur. En yüksek İBM kalemi, arıtılmış gri suyun üst katlara terfisi için gereken enerji sebebiyle ortaya çıkan maliyetlerdir. Dolayısı ile ara katlarda bir arıtma sistemi yerleşimi de düşünülmelidir. Bir diğer yenilikçi yaklaşım ise özel boru ağı tasarımı ve inşasıyla beraber daire içerisinde biyolojik kontaminasyon riski içermeyen atıksuların tuvaletlerin sifon haznelere doğrudan iletimi ile yeniden kullanılmalarıdır. Sonuç olarak, İstanbul'da evsel

atksuyun yeniden kullanımı adına spesifik bir tarifenin bulunmaması da bireysel kullanıcıların faydasının düşük seviyelerde kalmasına sebep olduğundan gri suyun yeniden kullanımı konusundaki motivasyon eksik kalmaktadır. Bu bağlamda, bireysel fayda/maliyet analizine ek

olarak araştırmacıların toplumsal faydanın da hesaplandığı özel bir çalışma gerçekleştirerek sonuçlarını paylaşması literatürün gelişmesi adına önerilebilir.

### Kaynakça

- [1] Jefferson, B., Palmer, A., Jeffrey, P., Stuetz, R. and Judd, S., 2004. Grey water characterisation and its impact on the selection and operation of technologies for urban reuse. *Water science and technology*, 50(2), pp.157-164.  
<https://doi.org/10.2166/wst.2004.0113>
- [2] Jamrah, A., Al-Omari, A., Al-Qasem, L. and Ghani, N.A., 2006. Assessment of availability and characteristics of greywater in Amman. *Water international*, 31(2), pp.210-220.  
<https://doi.org/10.1080/02508060.2006.9709671>
- [3] Ottoson, J. and Stenström, T.A., 2003. Faecal contamination of greywater and associated microbial risks. *Water research*, 37(3), pp.645-655.  
[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00352-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00352-4)
- [4] Winward, G.P., Avery, L.M., Frazer-Williams, R., Pidou, M., Jeffrey, P., Stephenson, T. and Jefferson, B., 2008. A study of the microbial quality of grey water and an evaluation of treatment technologies for reuse. *Ecological engineering*, 32(2), pp.187-197.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.11.001>
- [5] Friedler, E., Kovalio, R. and Galil, N.I., 2005. On-site greywater treatment and reuse in multi-storey buildings. *Water science and technology*, 51(10), pp.187-194.  
<https://doi.org/10.2166/wst.2005.0366>
- [6] Nolde, E., 2000. Greywater reuse systems for toilet flushing in multi-storey buildings—over ten years experience in Berlin. *Urban water*, 1(4), pp.275-284.  
[https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00023-6)
- [7] Pathan, A. A. (2015). Effect of flow rate and disc area increment on the efficiency of rotating biological contactor for treating greywater. *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, 34(2), 99-106.
- [8] Jabornig, S., 2014. Overview and feasibility of advanced grey water treatment systems for single households. *Urban Water Journal*, 11(5), pp.361-369.  
<https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.783086>
- [9] Fountoulakis, M.S., Markakis, N., Petousi, I. and Manios, T., 2016. Single house on-site grey water treatment using a submerged membrane bioreactor for toilet flushing. *Science of the total environment*, 551, pp.706-711.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.057>
- [10] Lesjean, B. and Gnirss, R., 2006. Grey water treatment with a membrane bioreactor operated at low SRT and low HRT. *Desalination*, 199(1-3), pp.432-434.  
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.03.204>
- [11] Atanasova, N., Dalmau, M., Comas, J., Poch, M., Rodriguez-Roda, I., & Buttiglieri, G. (2017). Optimized MBR for greywater reuse systems in hotel facilities. *Journal of environmental management*, 193, 503-511.
- [12] Pidou, M., Avery, L., Stephenson, T., Jeffrey, P., Parsons, S.A., Liu, S., Memon, F.A. and Jefferson, B., 2008. Chemical solutions for greywater recycling. *Chemosphere*, 71(1), pp.147-155.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.10.046>
- [13] Li, F., Wichmann, K. and Otterpohl, R., 2009. Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. *Science of the total environment*, 407(11), pp.3439-3449.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.02.004>
- [14] Humeau, P., Hourlier, F., Bulteau, G., Masse, A., Jaouen, P., Gerente, C., Faur, C. and Le Cloirec, P., 2011. Estimated costs of implementation of membrane processes for on-site greywater recycling. *Water Science and Technology*, 63(12), pp.2949-2956.  
<https://doi.org/10.2166/wst.2011.617>
- [15] Wu, B. (2019). Membrane-based technology in greywater reclamation: A review. *Science of the total environment*, 656, 184-200.
- [16] Maeda, M., Nakada, K., Kawamoto, K. and Ikeda, M., 1996. Area-wide use of reclaimed water in Tokyo, Japan. *Water Science and Technology*, 33(10-11), pp.51-57.  
[https://doi.org/10.1016/0273-1223\(96\)00406-4](https://doi.org/10.1016/0273-1223(96)00406-4)
- [17] Anadolu Ajansı, 2019.  
<https://www.aa.com.tr/tr/turkiye/turkiyede-hanehalkinin-yuzde-65i-cekirdek-aile/1473095>, (Erişim Tarihi: 14.09.2019).
- [18] Friedler, E. and Hadari, M., 2006. Economic feasibility of on-site greywater reuse in multi-storey buildings. *Desalination*, 190(1-3), pp.221-234.  
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.10.007>
- [19] Mutlu, B.K., Cantoni, B., Turolla, A., Antonelli, M., Hsu-Kim, H. and Wiesner, M.R., 2018. Application of nanofiltration for Rare Earth Elements recovery from coal fly ash leachate: Performance and cost evaluation. *Chemical Engineering Journal*, 349, pp.309-317.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.05.080>
- [20] Tolga, E., & Kahraman, C. (1994). Mühendislik ekonomisi. İTÜ.
- [21] Alibaba Inc, 2019.  
<https://www.alibaba.com/product-detail/840L-Liquid-Chlorine-Cylinder-with-Low-60705181153.html?spm=a2700.7724838.2017115.27.557143b3aL0BDL&s=p>, (Erişim Tarihi: 14.09.2019).
- [22] Davies, W.J., Le, M.S. and Heath, C.R., 1998. Intensified activated sludge process with submerged membrane microfiltration. *Water Science and Technology*, 38(4-5), pp.421-428.  
[https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(98\)00541-1](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(98)00541-1)

- [23] Pickering, K.D. and Wiesner, M.R., 1993. Cost model for low-pressure membrane filtration. *Journal of Environmental Engineering*, 119(5), pp.772-797. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1993\)119:5\(772\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1993)119:5(772))
- [24] İSKİ, 2019. <https://www.iski.istanbul/web/tr-TR/musteri-hizmetleri/su-birim-fiyatlari>, (Erişim Tarihi: 14.09.2019).
- [25] Emlak Sayfası, 2019. <https://www.emlaksayfasi.com.tr/bolge-raporlari/fikirtepe-konut-fiyatlari-metrekarede-10-bin-tl-yi-asti-h39009.html>, (Erişim Tarihi: 14.09.2019).