

## OZON TEMAS TANKLARININ HİDROLİK VE KARIŞIM VERİMLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

*Mehmet Anıl KIZILASLAN* \*<sup>ID</sup>  
*Ender DEMİREL* \*\*<sup>ID</sup>

Alınma:03.02.2023; düzeltme:23.05.2023; kabul: 09.08.2023

**Öz:** İçme sularının dezenfeksiyon maliyetleri kentleşme, nüfus artışı ve yüksek enerji kullanımı nedeniyle her geçen gün artmaktadır. Ozon ile içme sularının dezenfeksiyonu ön dezenfeksiyon yöntemi olarak ülkemizde bazı içme suyu arıtma tesislerinde kullanılmakta olup Dünya’da giderek yaygınlaşmaktadır. Ülkemizde de yakın zamanda ozonla dezenfeksiyon sürecinin yaygınlaşacağı beklenmektedir. Bu çalışmada, bir içme suyu arıtma tesisinde bulunan ozon temas tankının hidrolik ve karışım verimleri sayısal benzetimler ile değerlendirilmiştir. OpenFOAM açık kaynak kodlu yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen sayısal benzetimler ile öncelikle akım yapısı detaylı olarak incelenmiştir. Daha sonra, Üç Yarıkli Perde (ÜYP) ve Gözenekli Perde (GP) tasarımları tank içerisinde uygulanarak akım yapısındaki değişimler elde edilmiştir. Çalışmanın son bölümünde bozunmasız izleyici sayısal benzetimleri ile tankın hidrolik ve karışım verimleri Klasik Perde (KP), ÜYP ve GP tasarımları için ayrı ayrı değerlendirilerek tankın verim artışı değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Ozon temas tankı, İçme suyu arıtma, Hidrolik ve karışım verimleri

### Improvement of Hydraulic and Mixing Efficiency of Ozone Contact Tanks

**Abstract:** Disinfection costs of drinking water are increasing day by day due to urbanization, population growth and high energy use. Ozone is used as a pre-disinfection method for the disinfection of drinking water in some drinking water treatment plants in Turkey and becoming increasingly common in the world. It is expected that the disinfection process with ozone will become widespread in the near future. In this study, the hydraulic and mixing efficiencies of the ozone contact tank in a drinking water treatment facility were evaluated by means of numerical simulations. The flow structure was first examined in detail based on the numerical simulation results from OpenFOAM open-source software. Then, Slot Baffle (SBD) and Porous Baffle (PBD) designs were implemented to the tank for the enhancement of hydraulic and mixing efficiencies. Eventually, the hydraulic and mixing efficiencies were assessed based on the tracer simulations for Conventional Baffle (CBD), SBD and PBD designs.

**Keywords:** Ozone contact tank, Drinking water treatment, Hydraulic and mixing efficiencies

\* Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Çanakkale Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Terzioğlu Yerleşkesi 17020, Çanakkale

\*\* Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Batı Meşelik 26480 Odunpazarı Eskişehir  
İletişim Yazarı: Mehmet Anıl Kızılaslan (makizilaslan@comu.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Ozon, içme suyu dezenfeksiyonunda sıklıkla kullanılan, üretimi esnasında gereken yüksek enerji ihtiyacı sebebiyle maliyeti yüksek bir dezenfektandır. İçme suyu arıtma tesislerinin önemli bir su yapısı olan temas tankları, dezenfektan ile ham suyun temas ederek dezenfeksiyon işleminin gerçekleştirildiği bölümdür. Çok odalı olarak inşa edilen temas tankları, içerisinde bulunan perdeler sebebiyle katı – akışkan etkileşiminin yüksek olduğu bir su yapısıdır. Temas tankları, içerisinde odalarda “piston akışı” olduğu varsayımı yapılarak tasarlanmaktadır. Bu akış tipinde temas tankının odaları boyunca sürekli akışın olduğu ve viskoz etkiler ihmal edilerek uniform ve sabit hızlı bir akışın olduğu varsayılmaktadır. Bu varsayım, sürtünme ve türbülans etkilerinin göz önüne alınmadan yapıldığından tasarlanan temas tanklarının verimleri oldukça düşüktür. Tank içerisinde jet akışı sebebiyle meydana gelen akışkan - akışkan etkileşimi ve geçirimsiz perdelerden kaynaklanan katı - akışkan etkileşimi ile tank içerisinde yüksek türbülanslı akış gözlemlenmekte, bu da piston akışından oldukça uzak bir akım yapısı olarak tanımlanmaktadır. Bu durum göz önüne alındığında, tank içerisinde ham su ile dezenfektanın temas süresini arttırmak için, tank içerisinde bulunan geçirimsiz perde tasarımlarının değiştirilmesi ve yeni tasarımlar ile temas tanklarının hidrolik ve karışım verimlerinde artış görülmesi, böylelikle daha az dezenfektan ile istenilen dezenfeksiyonun gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Tank tasarımında değişiklikler ile tankın hidrolik ve karışım verimlerini arttırmaya yönelik çalışmalar literatüre son yıllarda kazandırılmıştır. Aral ve Demirel (2017) Üç Yarıkli (ÜYP) özgün temas tankı perde tasarımı ile tankın hidrolik ve karışım verimlerini arttırmıştır. Gözenekli, delikli ve üç yarıkli perde tasarımları kullanılarak temas tanklarının hidrolik ve karışım verimlerini arttırmaya yönelik çalışmalar yapılmaktadır (Kızılaslan ve diğ., 2018; Kızılaslan ve diğ., 2019; Kızılaslan ve diğ., 2020; Nasırlayev ve Demirel, 2022). Tank içerisine yatay gözenekli perde yerleştirilmesi (Yang ve diğ., 2017), giriş yapısının değiştirilmesi (Angeloudis ve diğ., 2015; Angeloudis ve diğ., 2016; Teixeira ve Siqueira, 2008; Rauen ve diğ., 2012) de temas tanklarının hidrolik ve karışım verimlerini arttırmaya yönelik yöntemler olarak belirtilmektedir. Buna ek olarak tankın dezenfeksiyon verimi artırılmak istendiğinde bu uygulamalara ek olarak ozon difüzörlerinin birden fazla odada olması da sıklıkla karşılaşılan bir uygulamadır. Literatürde farklı alanlarda gözenekli ortam modellerinin sayısal benzetiminde Darcy – Forchheimer ilişkisi sıklıkla kullanılmaktadır (Kızılaslan ve diğ., 2018; Domaingo ve diğ., 2016; Khan ve diğ., 2020; Alzahrani ve diğ., 2021, Farooq ve diğ., 2020; Xiong ve diğ., 2022).

Bu çalışmada Batı İran Hamerdan şehrinde bulunan ve şehrin içme suyu ihtiyacının yaklaşık olarak yarısını sağlayan içme suyu arıtma tesisinde bulunan temas tankının akım ve bozunmasız izleyici sayısal benzetimleri OpenFOAM açık kaynak kodlu yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Düşey ve geçirimsiz perdeli olarak tasarlanan temas tankının mevcut akım yapısı incelendikten sonra, bozunmasız izleyici sayısal benzetimleri ile hidrolik ve karışım verimleri hesaplanmıştır. Hidrolik ve karışım verimi açısından farklı indekslere göre “zayıf” ve “ortalama” sınıflarda bulunan temas tankı ideal bir karışım gerçekleştirmekten oldukça uzak bulunmuştur. ÜYP ve GP tasarımları tank içerisinde bulunan perdelerle uygulanarak; sayısal benzetimler ile bu iki tasarımın tank içerisinde meydana gelen akım yapısı ile hidrolik ve karışım verimleri üzerine etkisi incelenmiştir. KP tasarımı kullanılması halinde oluşan jet akışı yüksek momentumu ile akışı hızlandırmaktadır. ÜYP tasarımı ise jet akışının momentumunu düşürerek yüksek karışımli bir akım meydana getirmektedir. Tankın odaları arasında akım geçişine imkan veren GP tasarımının ise piston akışına yakın bir akım yapısı oluşturmaktadır. Bu durumun beklenen bir sonucu olarak ÜYP ve GP tasarımları kullanılması halinde tank her bir hidrolik ve karışım indeksinde sınıf atlayarak; mevcut durumundan daha yüksek hidrolik ve karışım verimine sahip bir tank haline gelmiştir. Çalışma, perde tasarımlarının değiştirilmesiyle hidrolik ve karışım verimlerinde yaşanan artışı, bu artışların doğal sonucu olarak dezenfeksiyon veriminin de artacağını ve daha az enerji ile sistemin çalıştırılabileceğini kanıtlamaktadır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, gerçek boyutlarda bir ozon temas tankı içerisinde meydana gelen üç boyutlu, sıkıştırılamaz, türbülanslı akış ve momentum çözümleri Reynolds Ortalama Navier-Stokes (RONS) simülasyonları ile gerçekleştirilmiştir. Akıma ait korunum denklemleri;

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) + S_i \quad (2)$$

şeklindedir. Denklem 2’de verilen Navier-Stokes denklemi içerisindeki Reynolds ortalama hızı  $U_i$ , konum  $x_i$ , kaynak terimi  $S_i$ , zaman  $t$ , Reynolds ortalama basıncı  $p$ , sıvının yoğunluğu  $\rho$  ve kinematik viskozite  $\nu$  ile gösterilmiştir. Burada  $S_i$  kaynak terimi, gözenekli ortamdan geçen oluşmuş basınç düşüşünü göstermekte olup bu çalışmada Darcy-Forchheimer yaklaşımı kullanılarak modellenmiştir (Stefano, 2014).

Denklem 2’de verilen momentum denklemi, taşınım-yayınım denklemine skaler bir  $\varphi$  büyüklüğü için tekrardan düzenlendiğinde;

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + U_i \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( D \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right) + S \quad (3)$$

halini almaktadır. Bu denklem içerisinde  $D$  difüzyon katsayısı,  $S$  ise kaynak terimidir.

Launder ve Spalding (1974) tarafından geliştirilen türbülans modeli, Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği (HAD) problemlerinin çözümünde çok geniş uygulama alanına sahip, geliştirilmiş bir modeldir. RONS teorisinde hız, basınç ve skaler büyüklükler türbülans ve ortalama bileşenleri bir arada içeren halde tanımlanır.

$$U_i = \overline{U}_i + u_i' \quad (4)$$

$$p = \overline{p} + p' \quad (5)$$

$$\varphi = \overline{\varphi} + \varphi' \quad (6)$$

Türbülanslı akışlarda anlık gerilmeler diğer türbülans özellikleri gibi ortalama gerilme bileşeni ve çalkantı gerilme bileşenine ayrılır. RONS denklemlerinde oluşan türbülans gerilmelerine Reynolds gerilmeleri denir. Reynolds gerilme tensörü olarak tanımlanan  $\overline{u_i u_j}$  terimi Boussinesq yaklaşımına göre;

$$\overline{u_i u_j} = \nu_t \left( \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (7)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem 7’de verilen  $\delta_{ij}$  Kronecker delta,  $k$  türbülans kinetik enerjisi,  $\nu_t$  ise eddy viskozite sabitidir. Burada,  $k$  değişkenin tanımlanması üç yönde çalkantılı hız bileşeninin birim kütle başına kinetik enerjisidir. Eddy viskozitesi, RONS türbülans modelinde, akım alanı ve mevcut türbülans durumuna göre değişmekte olup aşağıdaki denklemden hesaplanabilir:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k}{\varepsilon^2} \quad (8)$$

Denklem 8’de verildiği gibi belirlenir. Denklem 8’deki  $C_\mu$ , türbülans model sabiti olarak tanımlanır ve HAD sayısal benzetimlerinde genellikle 0.09 olarak çözücüye eklenir. Bu denklemde  $\varepsilon$  terimi türbülans enerjisi sönmlenme oranıdır. Sayısal modeli içinde  $k$  ve  $\varepsilon$ ’a ait başlangıç koşulları aşağıdaki denklemlerden hesaplanır:

$$k = \frac{3}{2}(UI)^2 \quad (9)$$

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \quad (10)$$

Burada  $l$  türbülans yoğunluğu ve  $l$  türbülans karışım uzunluğu şeklinde tanımlanır.

## 2.1. Gözenekli Ortam Modeli

Denklem 1 ve 2’de verilen momentum ve taşınım-yayılm denklemlerinin içerisindeki kaynak terimi  $S$  ile perdelerin gözenekli yapısı içerisinde akım, izleyici ya da dezenfektan geçişinin sayısal benzetimine olanak sağlanmaktadır.

Gözenekli ortam içerisinde ilerleyen akımda düşen basınç Darcy - Forchheimer ilişkisi ile tanımlanmıştır. Viskoz etkiler ve atalet etkilerini içeren bu ilişki (Stefano, 2014) şu şekildedir:

$$S_i = -\left( \nu D + \frac{1}{2} |\bar{u}_{ij}| F \right) \bar{u}_i \quad (11)$$

$$D = \frac{150(1-\phi)^2}{d_{50}^2 \phi^3} \quad (12)$$

$$F = \frac{1.75(1-\phi)}{d_{50}\phi^3} \quad (13)$$

$D$  ve  $F$  ile ifade edilen kaynak terimleri sırasıyla Darcy ve Forchheimer katsayıları olarak tanımlanmaktadır. Gözenekli ortam içerisinde kullanılan malzemeye ait porozite  $\phi$  ile medyan çapı ise  $d_{50}$  terimiyle Denklem 12 ve 13 içerisinde yer almaktadır. Üç parçalı olarak tasarlanan gözenekli perde tasarımı için farklı porozitelerde, aynı medyan çapında malzemelere ait  $D$  ve  $F$  katsayıları Tablo 1’de verilmiştir.

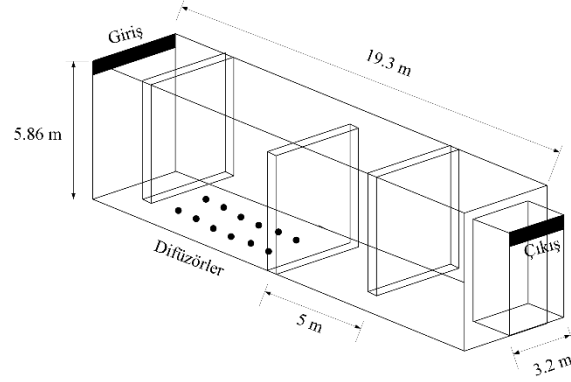
**Tablo 1. Gözenekli perde tasarımı bilgileri**

Zemin porozitesi	$d_{50}$ (m)	$D(m^{-2})$	$F(m^{-1})$
0.37	0.0125	7.52e6	1.74e3
0.41	0.0125	4.85e6	1.2e3
0.45	0.0125	3.19e6	8.45e2

## 2.2. Ozon Temas Tankı

Batı İran’ın Hamerdan şehrinin içme suyu ihtiyacının yaklaşık olarak yarısını sağlayan içme suyu arıtma tesisinde bulunan ozon temas tankının uzunluğu 19.3 m, genişliği 3.2 m ve derinliği 5.86 m olup yaz aylarında günde 68,000 m<sup>3</sup> suyu dezenfekte etmektedir (Niazi ve diğ., 2017). Düşey perdeli olarak tasarlanan temas tankının ikinci odasında tabana yerleştirilmiş çapları 15 cm

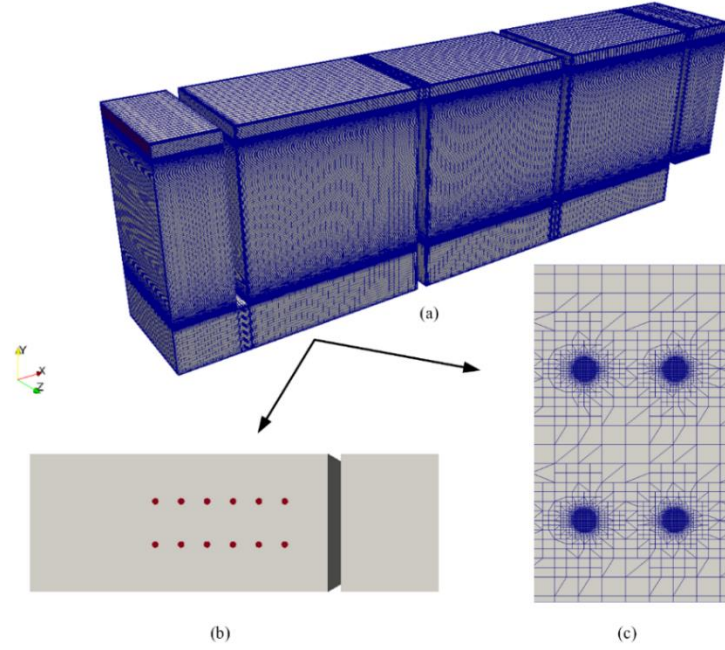
olan 12 adet ozon difüzörü bulunmaktadır (Şekil 1). Akım ve bozunmasız izleyici sayısal benzetimleri bu temas tankı üzerinde gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 1:**  
*Ozon temas tankı şematik gösterimi*

Akım ve bozunmasız izleyici analizlerinin gerçekleştirildiği 237,675 adet hücreye sahip hesaplama ağında hız ve türbülans büyüklüklerinin ani değiştiği bölgelerde sıklaştırılma yapılarak bu bölgede çözüm hassasiyeti sağlanmıştır. OpenFOAM içinde bulunan snappyHexMesh uygulaması kullanılarak tabanda bulunan difüzörler hesaplama ağına eklenmiştir (Şekil 2c). Sisteme ozon girişi tankın ikinci odasının tabanında bulunan difüzörler ile sağlanmakta ve tank içerisindeki dezenfeksiyon işlemi dezenfektan ile ham suyun karışımı ile gerçekleşmektedir. Ham su, tank girişinden sisteme girmekte ve beşinci odadan tankı terk etmektedir.

Şekil 2'de görülen hesaplama ağı araştırma ekibinin temas tankları üzerine yapmış olduğu geçmiş çalışmalarda hesaplama ağından bağımsız çözümün elde edildiği ızgara yapısı ile aynı sıklıkta bir hesaplama ağı kullanılarak geliştirilmiştir (Kizilaslan ve diğ., 2018, 2019, 2020; Nasrylayev ve diğ., 2020).



**Şekil 2:**  
Ozon temas tankına ait hesaplama ağı ve difüzörler

Yaz ayları içme suyu ihtiyacının en fazla olduğu dönemler olduğundan; en olumsuz koşullarda dezenfekte edilen ham su debisi üzerinden sayısal benzetimler gerçekleştirilmiş ve bu benzetimlerde türbülans modeli  $k-\varepsilon$  türbülans modeli olarak seçilmiştir. Zamanla değişmeyen akım koşullarının olduğu zaman adımına kadar akım analizi yapılmış ve sonuçlar son zaman adımındaki sonuçlar kullanılarak değerlendirilmiştir. Ozon temas tankının yaz aylarında dezenfekte ettiği  $0.694 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi sistem içerisinde ilerlerken; difüzörlerinden  $0.00156 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi ozon sisteme verilmektedir. Sayısal modeldeki değişkenlere ait sınır koşulları Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2. Sayısal benzetimlerde kullanılan sınır koşulları**

Değişken	Konum	Sınır koşulu
U, k, nut, $\varepsilon$	<i>giriş</i>	<i>sabit</i>
	<i>çıkış</i>	<i>giriş – çıkış eş değer</i>
	<i>serbest yüzey</i>	<i>simetri yüzeyi</i>
	<i>difüzör</i>	<i>sabit</i>
P	<i>giriş</i>	<i>sıfır gradyan</i>
	<i>çıkış</i>	<i>sabit</i>
	<i>serbest yüzey</i>	<i>simetri yüzeyi</i>
	<i>duvarlar</i>	<i>sıfır gradyan</i>
	<i>difüzör</i>	<i>sıfır gradyan</i>
U	<i>giriş</i>	<i>sabit</i>
K	<i>çıkış</i>	<i>kqR (duvar)</i>
nut	<i>serbest yüzey</i>	<i>nutk (duvar)</i>
$\varepsilon$	<i>duvarlar</i>	<i>epsilon (duvar)</i>

Tablo 2’de sıfır gradyan olarak tanımlanan sınır koşulu ilgili büyüklüğün gradyanın sıfır olduğu yani gerçek değerinin sabit olduğu anlamına gelir. Genellikle basınç için geçerli olan bu sınır koşulu belirtilen bölgede basıncın sabit olduğunu varsayar. Yaz aylarında dezenfekte edilen ham su debisine, giriş alanı ve difüzör alanları kullanılarak hesaplanan başlangıç değerlerine ait bilgiler Tablo 3’te verilmiştir. Bu değerler “sabit” sınır koşulu ile ilgili konumlarda değişkenlere atanmıştır.

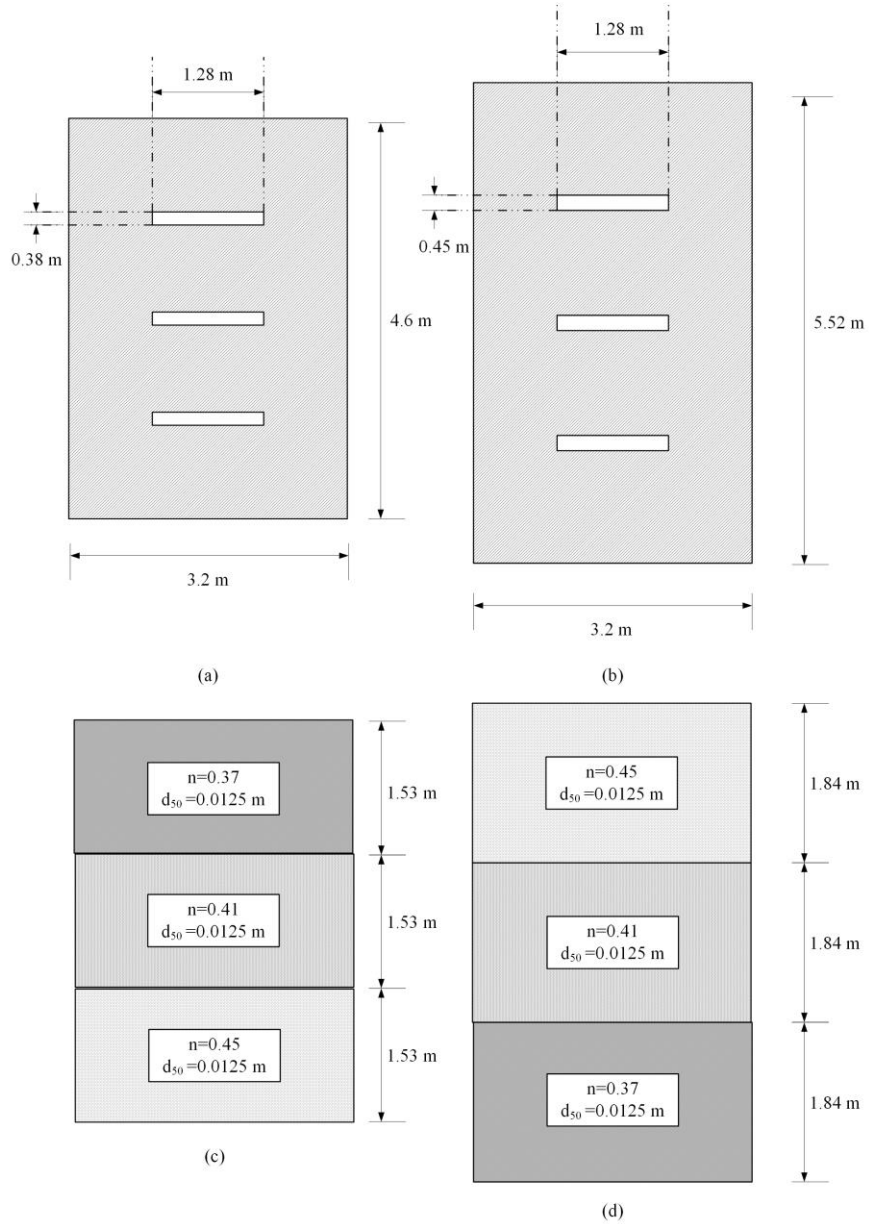
**Tablo 3. Başlangıç değerleri**

Konum	Debi (m <sup>3</sup> /s)	k (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	ε (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
Giriş	0.694	5.36e-6	0.00000143
Difüzör	0.00156	2.02e-3	1.5e-3

### 3. BULGULAR

#### 3.1. Akım Sonuçları

Tank içerisinde KP, ÜYP ve üç parçalı GP tasarımlarının bulunması halinde akım yapısı RONS benzetimleri ile zamanla değişmeyen akım koşullarına ulaşana kadar çözülmüştür. Oluşan zamanla değişmeyen akım yapıları değerlendirilerek perde tasarımlarının akım yapısı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Temas tankı içerisinde ÜYP tasarımı kullanılması durumunda, iki farklı uzunlukta perde bulunmasından dolayı yarı kalınlıkları farklılıklar göstermektedir. Tank içerisindeki birinci ve üçüncü perdeler ile ikinci ve dördüncü perdelerde farklı yarı kalınlıkları kullanılmıştır. Buna ek olarak tankın dördüncü perdesinin çıkış bölümünde kısılmasından dolayı iki yarıklı bir perde kullanılarak karışım veriminin artırılması amaçlanmıştır. Ozon temas tankı içerisinde kullanılan ÜYP tasarımına ait boyutlar Şekil 3’te verilmiştir.



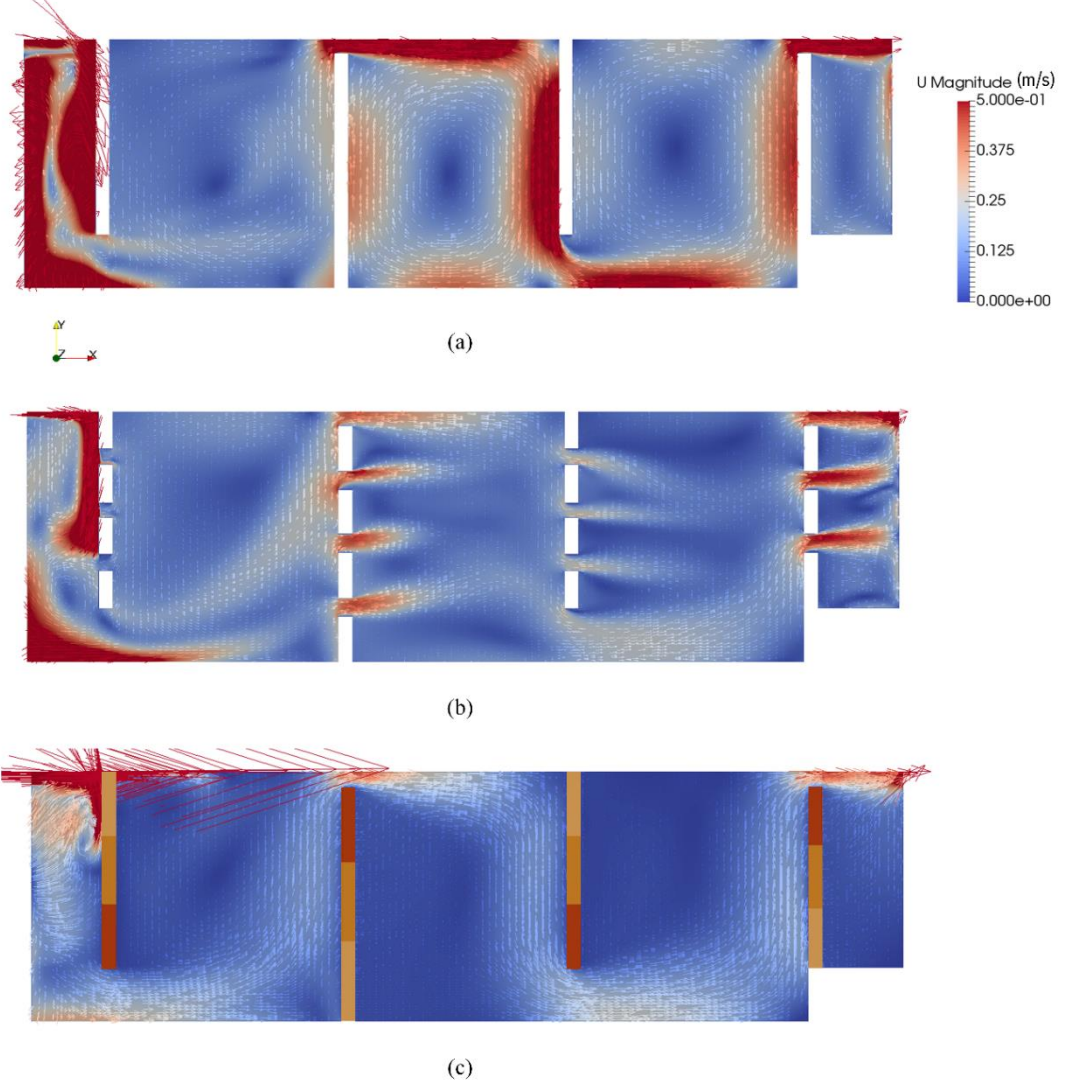
**Şekil 3:**

(a) kısa perde ÜYP, (b) uzun perde ÜYP, (c) kısa perde GP ve (d) uzun perde GP tasarımları

Üç farklı perde tasarımı kullanılması halinde akım 200. saniyede zamanla değişmeyen koşullara ulaştığında, tank genişliğinin ortasında bulunan kesit üzerindeki hız vektörleri Şekil 4'te gösterilmiştir. Tank içerisinde klasik perde tasarımının kullanılması halinde tank girişinden yüksek momentumla ilk odaya giren su, geçirimsiz perdeye çarparak bu odada karmaşık bir akım yapısı oluşturmaktadır. Şekil 4a'da görüldüğü üzere oda çıkışında ıslak alanın küçülmesi ile akış hızı yüksek bir jet akışına dönüşmektedir. Bu jet akışı tankın dış duvarından ve perdenin tabana yakın bölümünden ikinci odaya girerek odanın çıkışında bulunan duvarda birleşmektedir. Oda içerisinde durağan haldeki ham su iki parçaya ayrılarak jet akışını takip ederek harekete geçmekte ve odanın büyük bir bölümde çevrinti bölgesi oluşturmaktadır. İkinci oda çıkış bölümünün en kesit alanının ilk oda çıkış en kesit alanına göre daha küçük olmasından dolayı hız büyüklükleri daha da artmakta ve üçüncü odaya momentumu artmış bir jet ile ilerlemektedir. Bu durumun doğal sonucu olarak üçüncü odada etkisi daha artmış bir çevrinti bölgesi meydana gelmektedir.



Tankın dördüncü odada da dış duvar ve çıkış perdesi boyunca jet akışı oluşmakta ve su tankı son odadan iletim hattına göndermektedir.



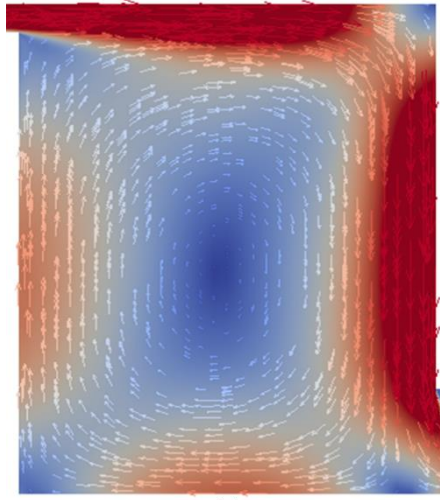
**Şekil 4:**

*Farklı perde tasarımlarının tank içerisindeki akım yapısına etkisi; (a) KP tasarım, (b) ÜYP tasarım, (c) GP tasarımı*

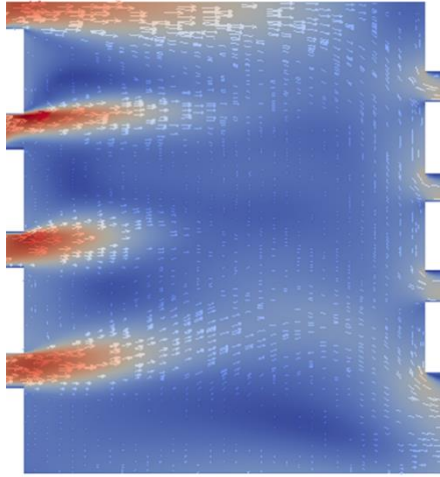
ÜYP tasarımının temas tankı perdelerine uygulanmasıyla, Şekil 4b’de verildiği üzere tank içerisindeki ıslak alan artmakta ve meydana gelen jet akışının momentumu düşmektedir. ÜYP tasarımı ile birlikte tankın birinci odasında oluşan jetin enerjisi sönmülerek tankın ikinci odasına ham su geçişi olmaktadır. Tankın ikinci odasından başlayarak KP tasarımı kullanılması halinde meydana gelen çevrintili akış ÜYP tasarımı sayesinde tank içerisinde artık görülmemektedir. Tankın tüm odalarında yüksek karışımına sahip aktif bölgeler oluşmakta; ÜYP tasarımının açıklıkları içerisinden geçen akım ile jet akışı oluşmadan tank içerisinde akımın ilerlemesini sağlamaktadır.

Akım yönünde artan geçirimsizliği olan, üç parçalı GP tasarımının tank içerisinde oluşturduğu akım yapısı piston akışına oldukça benzer karakterdedir. Bu akım yapısı US EPA tarafından

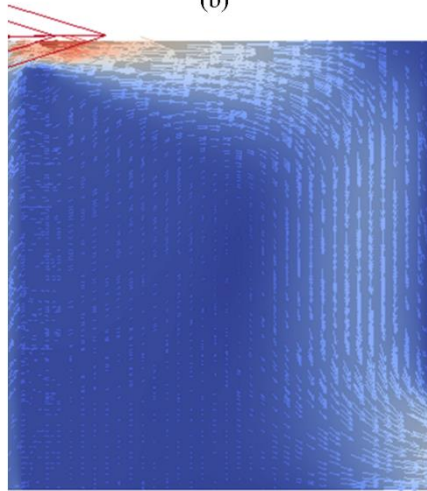
önerilmekte ve temas tanklarının boyutlandırılmasında kullanılan akım yapısı olarak karşımıza çıkmaktadır. Perdenin her bir bölgesinin geçirimsizliği sırasıyla; tankın üstduvara yakın bölgelerinde %37, tankın orta bölgelerinde %41, tank odasının çıkışına yakın bölgelerinde ise %45 olarak tasarlanmıştır. Tankın birinci odasından ikinci odasına geçirimli bir akış meydana getiren üç parçalı GP tasarımı, akıma ait momentumun en yüksek olduğu bölgelerde en düşük geçirimli yüzey oluşturulacak şekilde sayısal benzetimlerde kullanılmıştır. En küçükgeçirimsizliğinin tank üst duvarına en yakın kısımda kullanılmasının sebebi suyun tank içerisinde temas süresini artırarak hidrolik verimi artırmaktır. Tankta akım geçişi olması, jetin momentumunu azaltmakta, ikinci odaya suyun daha düşük hızlar ile ilerlemesini sağlamaktadır. İkinci odadan başlayarak akım yapısı giderek piston akışına yaklaşmakta ve momentumu azalmış bir jet akışı ile tank içerisinde ilerlemektedir. Tankın içerisinde hiçbir çevrinti bölgesi meydana gelmediği Şekil 4c’de açıkça görülmektedir. Perde içerisinden akım geçişini sağlayan GP tasarımı, tankın tüm odalarında çevrinti bölgesi ve ölü bölge olmayan ve jet akışı meydana getirmeyen bir akım yapısı meydana getirmektedir. Tüm perde tasarımlarının meydana getirdiği akım yapısının ve oluşan hız vektörlerinin belirgin görülebilmesi adına tankın orta odasındaki akım yapısı detaylı olarak Şekil 5’te verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

**Şekil 5:**

*Farklı perde tasarımlarının tankın orta odasına meydana getirdiği akım alanı; (a) KP tasarım, (b) ÜYP tasarımı, (c) GP tasarımı*

### 3.2. Bozunmasız İzleyici Sonuçları

Temas tanklarına ait hidrolik ve karışım verimleri bozunmasız izleyici deneyleri ve sayısal benzetimleri ile gerçekleştirilmektedir. Tankın Teorik Kalma Süresinin (TKS) %5'inden az sürede tank girişinden enjekte edilen izleyicinin tankın çıkışındaki konsantrasyon değerine göre Kalma Süresi Dağılımı (KSD) ve kümülatif KSD eğrileri elde edilir. KSD eğrisi okunan izleyici konsantrasyonun boyutsuzlaştırılması ile elde edilir.  $E(\theta) = C / (C_{enjekte} T_{enjeksiyon} / TKS)$  şeklinde ifade edilen  $E$  değeri  $\theta$  boyutsuz zamanına göre çizdirilir. İzleyicinin konsantrasyon miktarı  $E$  eğrisinden belirlenerek; boyutsuz kümülatif olarak değerlerinin zamana göre değişimi ile  $F$  eğrisi elde edilir.

Hidrolik ve karışım verimleri açısından temas tanklarının değerlendirilmesi literatürde sıklıkla kullanılan indeks değerleri ile gerçekleştirilmektedir. Bu indeks değerlerinden ilki  $\theta_{10}$  olarak U.S. EPA (2003) tarafından belirlenen "perde faktörü" parametresi Olup girişten enjekte edilen bozunmasız izleyici konsantrasyonun %10'unun tank çıkışında gözlenmesi için geçen boyutsuz zamanı ifade etmektedir. Temas tanklarının sınıflandırılması tankın perde faktörü değerine göre yapılmaktadır. Temas tanklarına ait bu sınıflandırma Tablo 4'te verildiği gibidir.

**Tablo 4. Perde faktörüne göre temas tanklarının sınıflandırılması**

Tank Sınıfı	$\theta_{10}$
Perdesiz	0.1
Zayıf	0.3
Ortalama	0.5
Yüksek	0.7
Mükemmel (Piston Akışı)	1.0

Perde faktörü değeri 1'e yaklaştıkça temas tankı içerisinde piston akışına yakın bir akım yapısı oluştuğu varsayımı yapılır ve bu durum tankın hidrolik veriminin artacağını işaret etmektedir.

Temas tanklarının hidrolik verimlerinin değerlendirilmesi için kullanılan bir diğer boyutsuz büyüklük Morrill indeksi ( $M_o$ ) olarak tanımlanmaktadır.

İzleyici konsantrasyonun %90'ının tank çıkışında gözlendiği boyutsuz zaman  $\theta_{90}$  değerinin benzer şekilde izleyici konsantrasyonun %10'unun tank çıkışında gözlendiği  $\theta_{10}$  değerine oranı ile bu indeks değeri hesaplanmış olur. Tanka ait  $M_o$  indeksinin 2 olması yüksek hidrolik verimini işaret etmektedir.

$$M_o = \frac{\theta_{90}}{\theta_{10}} \quad (14)$$

Morrill indeks değerine göre temas tanklarının sınıflandırılması Tablo 5'te verildiği gibidir.

**Tablo 5. Mo indeksine göre temas tankı sınıflandırması**

Tank Sınıfı	Mo
Perdesiz	0.1
Zayıf	0.3
Ortalama	0.5
İyi	0.7
Mükemmel (Piston akışı)	1.0

Temas tanklarının karışım verimleri ise dispersiyon indeksi ( $\bar{\sigma}$ ) olarak tanımlanan istatistiksel bir büyüklük ile belirlenir. Denklem 15'te verildiği üzere;

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_{\theta}^2}{\theta_m^2} \quad (15)$$

şeklindedir. Dispersiyon indeksi KSD eğrisinin varyansının ( $\sigma_{\theta}^2$ ), KSD eğrisinin ağırlık merkezinin bulunduğu noktanın karşılığı olan boyutsuz zamanın ( $\theta_m$ ) karesine oranı ile hesaplanır. 0'a yakın dispersiyon indeksi tankın yüksek karışıma sahip olduğunu gösterir.

Aral-Demirel indeksi (AD) ise temas tanklarının hidrolik ve karışım verimlerini bir arada değerlendirilen ve tank içerisinde yapılan tasarım değişikliklerinin etkisini hassasiyetle gösteren bir indekstir.

$$AD = \frac{(\theta_{90} - 1)}{(1 - \theta_{10})} \quad (16)$$

AD indeksinin değer aralıklarına bağlı olarak temas tanklarının sınıflandırmasına olanak sağlamaktadır. Tablo 5'te bu sınıflandırma aralıkları verilmiştir.

**Tablo 5. AD indeksine göre temas tankı sınıflandırması**

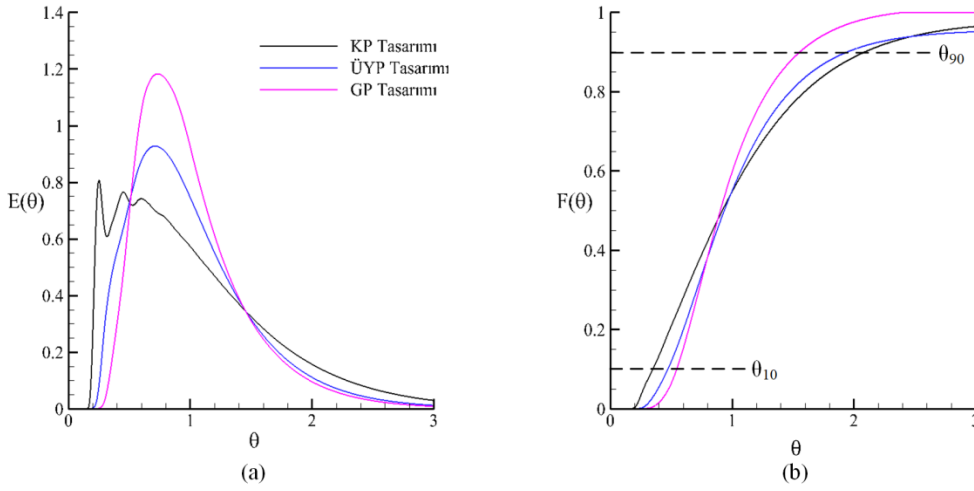
Tank Sınıfı	AD
Zayıf	0.0-0.2
Yetersiz	0.2-0.5
Ortalama	0.5-1.75
İyi	1.75-3.5
Mükemmel	3.5 ve üzeri

Geliştirilen perde tasarımlarının ozon temas tankı içerisinde uygulanmasıyla tankın hidrolik ve karışım verimlerinin değerlendirilmesi bozunmasız izleyici sayısal benzetimleri ile gerçekleştirilmiştir. Tank tasarımlarına ilişkin büyüklükler Tablo 6'da verilmiştir.

**Tablo 6. Tank tasarımlarına ilişkin büyüklükler**

Tasarım	Debi (m <sup>3</sup> /s)	TKS (s)	Enjeksiyon Süresi (s)
KP	0.694	483	24
ÜYP	0.694	495	24
GP	0.694	509	24

Enjeksiyon süresi temas tankının TKS'nin %5'inden daha az zamanda girişten enjekte edilen bozunmasız izleyici konsantrasyonun tank çıkışındaki konsantrasyonu hesaplatılarak bir dosyaya yazdırılmış, bu değerler kullanılarak KSD ve kümülatif KSD eğrileri oluşturulmuştur. Bu eğriler Şekil 6'da görülmektedir.

**Şekil 6:**

. Farklı perde tasarımlarına ait (a) KSD ve (b) kümülatif KSD eğrileri

KP tasarımı bulunan tanka ait KSD eğrisinde üç pik değer görülmektedir. İlk pik, tank içerisinde etkili olan jet akışının sonucudur. Girişten verilen bozunmasız izleyici tank içerisindeki jet akışını takip ederek tank çıkışına ulaşmakta ve izleyici konsantrasyonun büyük bir bölümü bu bölgede görülmektedir. Bu pik değerinin tankın TKS'nin %20'sinde görülmesi ise izleyici ile ham suyun US EPA tarafından önerilene göre çok daha az süre temas içerisinde olduğunun bir kanıtıdır. KSD eğrisinde görülen ikinci ve üçüncü pik değerleri ise temas tankı içerisinde bulunan ölü bölgelerde hapsolan bozunmasız izleyicinin belirli bir zaman sonra jet akışına katılarak ve tank çıkışında gözlemlendiğini işaret etmektedir.

Jet akışının ÜYP tasarımı ile momentumunun düşmesi ile karışım verimi yükselmiş bir akım oluşmaktadır. Bu durum KSD eğrisinden anlaşılmaktadır. KP tasarımının kullanılması halinde görülen üç pik yerini tek pik değerine bırakmaktadır. Böylece tank içerisinde bozunmasız izleyici ile ham suyun etkileşim süresinin arttığı görülmektedir. Oluşan tek pikin  $\approx 1$  TKS sürede görülmesi dezenfektan ile ham suyun etkileşimiyle tankın artan hidrolik ve karışım verimlerinin dezenfeksiyon veriminde de olumlu etki göstereceğini kanıtlar niteliktedir.

Üç parçalı GP tasarımı ozon temas tankında ÜYP tasarımı gibi yaklaşık 1 TKS zamanında tek pik değeri meydana getirmiştir. Bu pikin eğiminin daha dik olması tank içerisindeki akım yapısının piston akışına yaklaştığını kanıtlamaktadır. Tank girişinden enjekte edilen bozunmasız izleyici odalar içerisinde kütle akışıyla ilerleyerek çıkışa ulaşmaktadır. Jet akışının

momentumunun yüksek olduğu yerlerde düşük; momentumun azaldığı bölgelerde ise artan poroziteye sahip bu perde tasarımının kullanılmasında ile yaşanan hidrolik ve karışım verimi artışının beklenen bir sonucu olarak tank içerisinde ozon ve ham suyun karışım veriminde de artış beklenmektedir.

Farklı perde tasarımları uygulanması ile birlikte elde edilen kümülatif KSD eğrilerinden hesaplanan indeks değerleri Tablo 7’de verilmiştir.

**Tablo 7. Ozon temas tankına ait hidrolik ve karışım verimi indeks değerleri**

Tasarım	$\theta_{10}$	$M_o$	$\sigma$	AD
KP	0.35	5.97	0.335	1.61
ÜYP	0.47	4.12	0.241	1.74
İyileşme (%)	35	31	28	9
GP	0.55	2.85	0.191	1.20
İyileşme (%)	56	52	43	-23

#### 4. SONUÇLAR

KP tasarımının ozon temas tankı içerisinde uygulanması sonucunda hesaplanan verim indekslerine göre:

-Temas tankı “perde faktörü” açısından zayıf sınıfta bulunan bir temas tankıdır.

- $M_o=5.97$  değeri temas tankının karışım veriminin oldukça düşük olduğunu göstermektedir.

-Dispersiyon indeksi 0.335 değeri ile tankın ideal bir karışımdan oldukça uzak bir karışım verimine sahip olduğunu işaret etmektedir.

-AD indeksi ise hesaplanan 1.61 değeri ile temas tankını ortalama olarak sınıflandırmaktadır.

ÜYP tasarımının uygulanmasıyla tankın “perde faktörü”,  $M_o$ , dispersiyon ve AD indekslerine göre tankın veriminde iyileşme olduğunu göstermektedir.

-ÜYP tasarımı, tankı “perde faktörü” açısından yetersizden ortalama sınıfına yükseltmiştir.

- $M_o=4.11$  değeri KP tasarımının aynı indeks değerine göre %31 düşerek; karışım veriminin artmasını sağlamıştır.

-Dispersiyon indeksi değeri ise ÜYP tasarımının uygulanması halinde 0’a yaklaşarak tank içerisinde karışımın yükselmesini sağlamıştır.

-AD indeksi değeri ise %8.54 artış ile hem hidrolik hem de karışım verimi artışı sağlandığı kanıtlanmaktadır. Bu indeks değeri GP tasarımda verim artışı göstermemiştir. İndeks ıslak alan hacmini artırarak tank odaları içerisinde yüksek karışımla verimi artırmaya yönelik bir anlayışa sahiptir. GP tasarımı ise US EPA tarafından önerilen “piston akışı” prensibine bağlı bir verim artışı elde etmek üzerine geliştirilmiş bir tasarımdır. Bu nedenle GP tasarımı ile AD indeksinde verim artışı yaşanmaması beklenen bir sonuçtur.

-Bu sonuçlara ek olarak, farklı yarı genişlikleri, yarı sayıları ve yarı konumları değiştirilerek yapılabilecek çalışmalar sayesinde ÜYP tasarımının daha yüksek verim elde edilmek için optimizasyonu mümkündür.

GP tasarımının tank içerisinde uygulanması halinde ise;

-Tankın “perde faktörü” 0.545 olarak hesaplanmış ve tank ortalama sınıfına yükselmiştir.

-*Mo* indeksi 2.85 değerini alarak %52 karışım verim artışı sağlamıştır.

-0.191 olarak hesaplanan dispersiyon indeksi değeri ise GP tasarımı ile birlikte sahip yüksek karışımlı bir tank meydana geldiğini göstermektedir.

-Uygulanan üç tasarım arasından 1.2 *AD* indeks değeri ile GP tasarımı, indeksin yüksek karışım ve hidrolik verime sahip olması için gerekli akım yapısından farklı bir akım yapısı meydana getirdiğinden en düşük değeri almıştır.

Literatürde mevcut temas tankı verim artışı çalışmaları incelendiğinde tankın giriş konfigürasyonu, oda sayısı ve genişliği ile oda içerisine yapılan eklemeler ile verim artışı sağlanmaya çalışıldığı görülmektedir. Mevcut çalışma, tank içerisinde kolaylıkla uygulanabilecek ÜYP tasarımı ya da yeni inşa edilecek temas tanklarına uygulanabilecek GP tasarımı ile farklı bir bakış açısı ile temas tanklarının verimlerini artırmayı amaçlamaktadır.

## **ÇIKAR ÇATIŞMASI**

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar. Bu çalışma Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında sunulan doktora tezinin bir bölümünü içermektedir.

## **YAZAR KATKISI**

Yazarlardan Mehmet Anıl KIZILASLAN çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesinde, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin yönetilmesinde, veri toplanmasında, veri analizi ve yorumlamada, makale taslağının oluşturulmasında katkı sağlamıştır.

Yazarlardan Ender DEMİREL çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesinde, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin yönetilmesinde, veri analizi ve yorumlamada, makale taslağının oluşturulmasında ve fikinsel içeriğin eleştirel incelenmesinde katkı sağlamıştır.

## **KAYNAKLAR**

1. Angeloudis, A., Stoesser, T., Falconer, R.A. ve Kim, D. (2015) Flow, transport and disinfection performance in small- and full-scale contact tanks, *Journal of Hydro-Environment Research*, 9(1), 15–27. doi:10.1016/j.jher.2014.07.001
2. Angeloudis, A., Stoesser, T., Gualtieri, C. ve Falconer, R.A. (2016) Contact tank design impact on process performance, *Environmental Modeling & Assessment*, 21(5), 563–576. doi: 10.1007/s10666-016-9502-x
3. Alzahrani, A., Ullah, M.Z., Alshomrani, A.S. ve Gul, T. (2021) Hybrid nanofluid flow in a Darcy-Forchheimer permeable medium over a flat plate due to solar radiation, *Case Studies in Thermal Engineering*, 26. doi: 10.1016/j.csite.2021.100955



4. Aral, M. M. ve Demirel, E. (2017) Novel slot-baffle design to improve mixing efficiency and reduce cost of disinfection in drinking water treatment, *Journal of Environmental Engineering*, 143(9), 1–5. 2017. doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001266
5. Domaingo, A., Langmayr, D., Somogyi, B. ve Almbauer, R. (2016) A semi-implicit treatment of porous media in steady-state CFD, *Transport in Porous Media*, 112(2), 451–466. doi: 10.1007/s11242-016-0657-3
6. Farooq, U., Ahsan, M.I., Khan, M.I, Isa, S.S.P.M. ve Lu, D.C. (2020) Modeling and non-similar analysis for Darcy-Forchheimer-Brinkman model of Casson fluid in a porous media, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 119, 104955. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104955
7. Khan, M.I., Alzahrani, F. ve Hobiny, A. (2020) Simulation and modeling of second order velocity slip flow of micropolar ferrofluid with Darcy–Forchheimer porous medium, *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 7335-7340. doi: 10.1016/j.jmrt.2020.04.079
8. Kizilaslan, M. A., Demirel, E. ve Aral, M. M. (2018) Effect of porous baffles on the energy performance of contact tanks in water treatment, *Water*, 10(8), 1084. 2018. doi: doi.org/10.3390/w10081084
9. Kizilaslan, M. A., Demirel, E. ve Aral, M. M. (2019) Efficiency enhancement of chlorine contact tanks in water treatment plants: a full-scale application, *Processes*, 7(9), 551. 2019. doi: doi.org/10.3390/pr7090551
10. Kizilaslan, M. A., Nasyrlyayev, N., Kurumus, A. T., Savas, H., E. Demirel ve Aral, M. M. (2020) Experimental and numerical evaluation of a porous baffle design for contact tanks, *Journal of Environmental Engineering*, 146(7). doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001747
11. Launder, B.E. ve Spalding, D.B. (1974) The numerical computation of turbulent flows, *Comput.Methods in Appl.Mech.Eng*, 3(2), 269-289. doi: 10.1016/0045-7825(74)90029-2
12. Nasyrlyayev, N., Kizilaslan, M.A., Kurumus, A.T., Demirel, E. ve M. M. Aral (2020) A perforated baffle design to improve mixing in contact tanks, *Water*, 12(4), 1022. doi: 10.3390/w12041022
13. Nasyrlyayev, N. ve Demirel, E. (2022) Design optimization of the porous baffle in a disinfection contact tank for high efficiency, *Urban Water Journal*, 19(7). doi: 10.1080/1573062X.2022.2086884
14. Niazi S., Kalbasi, M. ve Bahramian A. (2017) Hydraulic and disinfection efficiency of an ozonation contactor for a municipal water treatment plant using computational fluid dynamics, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 95(11), 2063–2072. doi: doi.org/10.1002/cjce.22839
15. Rauen, W. B., Angeloudis, A. ve Falconer, R. A. (2012) Appraisal of chlorine contact tank modelling practices, *Water Research*, 46(18), 5834–5847. doi: 10.1016/j.watres.2012.08.013
16. Stefano, G. M. D. (2014) Modeling thermal energy storage systems with OpenFOAM, Doktora tezi, Politecnico di Milano, Italy.
17. Teixeira, E.C. ve Siqueira, R. D. N. (2008) Performance assessment of hydraulic efficiency indexes, *Journal of Environmental Engineering*, 134(10), 851–859. doi: doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2008)134:10(851)
18. US EPA, (2003). Disinfection profiling and benchmarking guidance manual. Appendix A Rep. No. EPA 816-R-03-004 EPA, United States Environmental Protection Agency.

19. Xiong, F., Jiang, Y., Zhu, C., Teng, L., Cheng, H. ve Wang, Y. (2022). A coupled darcy-forchheimer flow model in fractured porous media, *Applied Sciences*, 13(1), 344. doi: 10.3390/app13010344
20. Yang, J., Li, J., Zhu, J., Dong, Z., Luo, F., Wang, Y., Liu, H., Jiang, C. ve Yuan, H. (2017) A novel design for an ozone contact reactor and its performance on hydrodynamics, disinfection, bromate formation and oxidation, *Chemical Engineering Journal*, 328, 207–214. doi: 10.1016/j.cej.2017.06.165