

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Kanal Tipi Mikroalg Havuzlarının Hidrolik Karakterinin Sayısal Olarak İncelenmesi

Mehmet Sadık Akca*

Yazışma yazarı:

Mehmet Sadık AKCA,
akcameh@itu.edu.tr*İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.
ORCID:0000-0002-2119-5279

Referans: Akca, M. S. (2024). Kanal tipi mikroalg havuzlarının hidrolik karakterinin sayısal olarak incelenmesi, *İTÜ Çevre İklim ve Sürdürülebilirlik*, 24 (2), 75-86.

Makale Gönderimi : 21 EYLÜL 2024
Online Kabul : 4 ARALIK 2024
Online Basım : 13 ARALIK 2024

Özet Mikroalg biyokütlesi üretimi ve algal atıksu arıtımı için kullanılan en yaygın reaktör sistemi olan kanal tipi havuzların biyokütle üretim verimleri bir dizi faktör sebebiyle kapalı sistemlere oranla daha düşüktür. Fotosentetik hücrelerin güneş ışığına maruz kalmaları ve büyüme için gerekli diğer besi elementleriyle temas etmelerini sağlayan karışım, alg havuzlarının verimini kısıtlayan faktörler arasında öne çıkmaktadır. Kanal tipi havuzlarda oluşan ölü bölgeler havuzdaki yük kayıplarını artırdığı gibi havuzun biyokütle üretimi için faydalı hacminin düşmesine, pH ve sıcaklık gradyanlarıyla birlikte havuz içinde anoksik ortamlar oluşmasına sebep olmaktadır. Bu çalışma kapsamında kanal tipi alg havuzlarına yarım daire şeklinde akış düzenleyiciler eklenmesi ve alg kültürünün etrafında sirküle ettiği orta perdenin kalınlığının artırılmasının hidrolik güç tüketimine ve ölü bölge oluşumuna etkisi, farklı uzunluk/genişlik oranları için sayısal olarak incelenmiştir. Kanaldaki akışın çözülmesi için Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklem takımı hesaplamalı akışkan dinamiği yazılımı kullanarak çözülmüş, sayısal model sonuçlarının literatürle uyumlu olduğu görülmüştür. Buna göre havuzların temel tasarım parametrelerinden biri olan uzunluk/genişlik oranının 5'ten 20'ye çıkarılması yük kayıplarını ve ölü bölgeleri yaklaşık olarak %50 oranında azaltmış, havuzların dirsek kısmına eklenen akış düzenleyicilerin yük kayıplarını %84'e kadar indirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca bu yolla havuz içerisindeki ölü bölgeler %2'ye kadar düşürülebilmektedir. Orta perdeyi genişleterek akışı kanal çeperlerine yönlendirme yoluyla hidrolik güç tüketimi ve ölü bölge oluşumu %90 civarında azaltılabilirken, bu durumun aynı zamanda havuz hacminin düşmesini beraberinde getirdiğine dikkat çekilmiştir. Son olarak optimum tasarım kriterlerini belirlemek için reaktör geometrisinin havuzların gerçek ölçekteki biyolojik performansına etkisinin bilinmesi gerektiği belirtilirken, hesaplamalı akışkan dinamiği modellemesinin kanal tipi alg havuzlarının hidrolik davranışını anlamakta etkili bir yöntem olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: mikroalg, kanal tipi alg havuzu, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, hidrolik tasarım

Numerical Analysis of The Hydraulic Behavior in Raceway Ponds

Abstract The raceway ponds which is the most common reactor system used for microalgae biomass production and algal wastewater treatment, raceway ponds have lower biomass production yields than closed systems due to a number of factors. The exposure of photosynthetic cells to sunlight and the mixture that provides them to contact with other nutrients required for growth are prominent factors limiting the yield of algal ponds. Dead zones formed in raceway ponds increase the head losses in the pond, decrease the active volume of the pond for biomass production, and cause anoxic environments together with pH and temperature gradients. In this study, the effects of adding semicircular flow deflectors to algal ponds and increasing the thickness of the central divider around which the algal culture circulates, on hydraulic power consumption and dead zone formation were investigated numerically for different length/width ratios. Reynolds averaged Navier-Stokes equation set was solved using computational fluid dynamics software to solve the flow in the channel, and it was observed that the numerical model results were compatible with the literature. Accordingly, increasing the length/width ratio, which is one of the basic design parameters of the ponds, from 5 to 20 reduced the head losses and dead zones by approximately 50%, and it was observed that the flow deflectors added to the bend section of the ponds reduced the head losses by up to 84%. In addition, dead zones within the pond can be reduced by up to 2% in this way. While hydraulic power consumption and dead zone formation can be reduced by approximately 90% by widening the central divider and directing the flow to the channel walls, it was noted that this situation also brought about a decrease in the pond volume. Finally, it was stated that the effect of the reactor geometry on the biological performance of the pools in real scale should be known in order to determine the optimum design criteria, and it was understood that computational fluid dynamics modeling is an effective method for understanding the hydraulic behavior of raceway ponds.

Keywords: microalgae, raceway ponds, computational fluid dynamics, hydraulic design

1. Giriş

Küresel iklim değişikliğiyle ilgili endişeler karbon-nötr teknolojilerin, atıksu arıtımı, kaynak geri kazanımı ve genel olarak biyoteknoloji alanlarında daha yaygın olarak uygulanmasını zorunlu hale getirmiştir. Bu bakımdan mikroalgler -ya da mikroyosunlar- atmosferik CO₂'i bağlama özellikleri, büyüme hızı ve değerli ürün sentezleme yetenekleriyle geleceğimizi şekillendirecek olan biyo-ekonominin önemli bir bileşeni olarak görülmektedir. Mikroalg temelli ürünler, biyoyakıt -biyodizel, biyoetanol, biyogaz-, gıda ve yem, ilaç ve kozmetik sanayilerinde hammadde olarak kullanılmaktadır. Ayrıca mikroalgler besi maddesi giderim kapasiteleriyle konvansiyonel atıksu arıtım sistemlerine güçlü bir alternatif teşkil etmektedir.

Mikroalg biyokütlesi üretim teknolojileri ana hatlarıyla açık havuzlar ve kapalı fotobiyoreaktörler olarak iki sınıfta ele alınabilir. Kapalı fotobiyoreaktörler, hidrodinamik rejimleri itibarıyla biyokütle üretim verimi olarak açık sistemlere göre daha avantajlıdır. Ayrıca kapalı olmaları sebebiyle istilacı türler ya da iklimsel olaylar (yağış, vb.) kaynaklı kültür çökmeleri bu tür sistemlerde daha az beklenir. Açık sistemler ise önemli ölçüde düşük ilk yatırım ve işletme maliyetleriyle öne çıkmakta olup, dünya genelindeki ticari ölçekteki mikroalg tesislerinin %90'ından fazlasında tercih edilmektedir (Ghasemi, vd., 2012; Mendoza, vd., 2013). Bu reaktör sistemi uzun dikdörtgen bir havuzun ortasının bir perdeyle ayrılarak hücre kültürünün bu perde etrafında döndürülmesiyle teşkil olunur. Havuzun dirsekleri yarım daire formunda olup mikroalg kültürünün tahriki genelde bir pedal yardımıyla gerçekleştirilir (Şekil 1). Bu tür sistemlerde derinlik, ışık geçirgenliğini sağlamak adına 30 – 40 cm ile sınırlandırılmış olup, akış hızı 0.2-0.5 m/s arasında değişir (Mendoza, vd., 2013). Maliyet açısından önemli bir avantaja sahip bu tür sistemlerde biyokütle üretim verimi kapalı sistemlere göre oldukça düşüktür. Açık sistemlerde biyokütle konsantrasyonu 0.3-0.5 g/L arasında değişirken, bu değer kapalı sistemlerde 3 g/L'nin üzerine çıkabilmektedir (Lundquist, vd., 2010; Norsker, vd., 2011; Borowitzka ve Moheimani, 2013).

Açık sistemlerde biyokütle üretim kapasitesinin düşük olmasına etki eden faktörlerin arasında fotosentetik hücrelerin güneş ışığına maruz kalma süresine doğrudan etki eden karışımın yetersiz olması öne çıkmaktadır. Alg havuzlarının tasarımında akış rejiminin ihmal edilmesi, biyokütle üretim performansın ve arıtma verimliliğinin düşmesine, enerji tüketiminin artmasına yol açabilir. Sonuç olarak, bu tür havuzlarda biyokütlenin çökebileceği ve ışık maruziyetinin azalabileceği, uygun biyokütle hasadının engellenebileceği ölü bölgelerin oluşma riski vardır. Bu nedenle, alg havuzlarındaki biyolojik sürecin verimliliğini artırmak için hidrodinamik davranışın optimize edilmesi çok önemlidir (Ortiz, vd., 2022). Mikroalg havuzlarında akış hızının 0.1 m/s altına düştüğü bölgeler ölü bölge kabul edilmektedir (Hadiyanto, vd., 2013). Bu bölgelerde biyokütle havuz dibine çökmekte, hatta zaman zaman anoksik şartlar oluşmakta ve havuzun mikroalg üretimi açısından faydalı hacminde ciddi düşüşler meydana gelmektedir. Akış hızının artırılması yoluyla karışımın iyileştirilmesi ve ölü bölgelerin azaltılması mümkün olsa da bu durumun aynı zamanda tesisin enerji ihtiyacını artırmasından dolayı istenmemektedir. Bununla beraber, açık mikroalg havuzlarının tasarımı, karışımın iyileştirilmesi ve işletme maliyetlerinin düşürülmesi bakımından kritik öneme sahiptir. İyi bir tasarım, mikroalg kültürünü askıda tutmalı ve reaktör boyunca oluşabilecek ölü

bölgeleri minimuma indirmelidir (Sompech, vd., 2012). Mikroalg havuzlarının tasarımında ve ölçek büyütmesinde kullanılan temel geometrik parametre uzunluk/genişlik (U/G) oranıdır (Hadiyanto vd., 2013). Literatürde alg havuzlarının hidrolik tasarımıyla ilgili yapılan çalışmalar U/G oranının artmasının enerji tüketimi ve ölü bölge oluşumu bakımından faydalı olduğunu ortaya koymuştur (Sompech vd., 2012; Liffman, vd., 2013; Hadiyanto vd., 2013; Ghasemi ve Mendoza, 2013). Bununla beraber belirlenecek U/G oranı tesisin kurulacağı araziyle de ilgilidir. U/G oranının azaltılması dışında alg havuzlarının temel tasarımında basit değişiklikler yaparak ölü bölgelerin ve enerji tüketiminin önemli ölçüde azaltılabileceği bilinmektedir (Sompech vd., 2012; Liffman, vd., 2013; Hadiyanto vd., 2013). Bunlardan en yaygın olanlar arasında havuzların dirsek bölgelerine yarım daire şeklinde akım düzenleyiciler yerleştirmek, orta bölmeyi genişletmek, ya da dirsek sonrası ölü bölge oluşumu gözlenen bölgeleri fiziksel yapılarla doldurmak sayılabilir. Bununla birlikte kanal tipi alg havuzlarının tam ölçekli uygulaması hala birkaç örnekle sınırlıdır ve tasarım prosedürleri standartlaştırılmamıştır (Ortiz, vd., 2022).

Bu çalışmada alg havuzlarındaki akışın, çeşitli tasarım değişiklikleri ve eklemelerle, farklı U/G oranları için sistematik bir sayısal değerlendirilmesinin yapılması amaçlanmıştır. Hesaplama kapasitesindeki sürekli gelişmelerle desteklenen sayısal teknikler, biyoteknoloji alanında giderek daha fazla uygulanmaktadır. Matematiksel modelleme, özellikle endüstriyel ölçekte mikroalg kültür sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonuna yardımcı olmak ve bunu doğrulamak için bir araç olarak kullanılabilir (Ortiz, vd., 2022). Literatürde alg havuzlarının akış karakteristiğiyle ilgili çalışmalarda tek bir U/G oranı referans alınıyor olup, arazi özelliklerinden kaynaklanan farklı U/G oranları için yapılan tasarımların ölü bölge ve yük kaybı açısından sistematik bir kıyaslaması bulunmamaktadır. Buna karşın, akış düzenleyici gibi basit tasarım değişikliklerinin havuzların hidrolik karakterine olan etkisi, U/G oranı ve tesis büyüklüğü gibi temel parametrelerle değişmekte, bu durum mevcut çalışmaların karar vericiler ve mühendisler tarafından kullanılabilirliğini kısıtlamaktadır. Bu bakımdan mevcut çalışmanın tasarım mühendisleri için yol gösterici olacağı düşünülmektedir. Model tesis olarak 1 hektar alanı kaplayan bir alg havuzu seçilmiş, akışı çözmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kodu kullanılmıştır. Sayısal sonuç, literatürle karşılaştırılmış, farklı U/G oranlarının ve bu oranlardaki tasarım değişikliklerinin ölü bölge oluşumu ve basınç kaybına olan etkisi ortaya konulmuştur.

2. Yöntem

2.1 Model mikroalg tesisi

Borowitzka (1999) tekil havuz alanının 1 hektara kadar çıkabileceğini belirtmiştir ve bu ölçekte, 1 hektar alana sahip tesislerde mikroalg biyokütlesi üretimi gerçekleştirilmektedir (Craggs, vd., 2012; Sutherland, vd., 2020). En güncel olarak Yeni Zelanda'daki Cambridge atıksu arıtma tesisinde bulunan alg havuzunun boyutu artırılarak alanı 1 hektara çıkarılmıştır (Sutherland, vd., 2020). Bu aynı zamanda bu tür sistemlerle ilgili rastlanan en büyük havuzlardandır. Hem güncel uygulamasının olması hem de boyutundan dolayı, bu çalışmada model olarak 1 hektar alana sahip bir alg havuzu kullanılacaktır.

Tablo 1. Sayısal çalışmada kullanılan model mikroalg tesisinin boyutları.

U/G oranı	Uzunluk (m)	Genişlik (m)
5	210	42
10	300	30
20	440	22

Yukarıda bahsedildiği gibi tekil havuzların U/G oranı arazi kullanım durumuna göre değişkenlik gösterebilir. Buna göre U/G oranı 5, 10, 20 olan tesislerin boyutu aşağıdaki gibi olacaktır (Tablo 1).

Yukarıda da bahsedildiği gibi alg havuzlarının geleneksel tasarımına bazı müdahaleler yaparak havuzlardaki karışımın iyileştirilmesi ve güç tüketiminin azaltılması sık uygulanan bir pratiktir. Buna göre çalışma dahilinde i) Havuz dirsek

bölgelerine 1, 2 ve 3 adet yarım daire şeklinde akış düzenleyicisi eklenmiş ve ii) Kanalin orta perdesi toplam havuz genişliğinin %30, %45 ve %60'ını kapsayacak şekilde genişletilerek havuzdaki akış modellenmiş, bu müdahalelerin karışıma ve güç tüketimine etkisi incelenmiştir (Şekil 1). Böylece aşağıdaki özelliklere ait havuzların akış alanı hesaplanmıştır (Tablo 2). Böylece toplam 21 adet model tesisin akış analizi yapılmıştır.

Tablo 2. Sayısal çalışmada kullanılan model mikroalg tesislerinin özellikleri.

Model No	U/G oranı	Akış düzenleyici sayısı	Orta perde genişliği (m)/Toplam kanal genişliği(m)
1	5	0	0
2	5	1	0
3	5	2	0
4	5	3	0
5	5	0	0,3
6	5	0	0,45
7	5	0	0,6
8	10	0	0
9	10	1	0
10	10	2	0
11	10	3	0
12	10	0	0,3
13	10	0	0,45
14	10	0	0,6
15	20	0	0
16	20	1	0
17	20	2	0
18	20	3	0
19	20	0	0,3
20	20	0	0,45
21	20	0	0,6

2.2 Sayısal model

Havuzdaki akış ANSYS Fluent 21 ticari yazılımı kullanılarak RANSE (Reynolds ortalamalı Navier-Stokes) denklem takımının çözülmesiyle hesaplanmıştır. Havuzun türbülans karakteristiğini incelemek için standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Bu model, türbülans ve akışkanlar dinamiği için en yaygın kullanılan ve doğrulanmış modeldir. Model, oldukça düşük hesaplama eforu ve yüksek sayısal kararlılığı nedeniyle endüstriyel uygulamalar için tercih edilmektedir. Bu modelin sayısal formülasyonu, akışın türbülans özelliklerini temsil eden iki taşıma denklemi içerir. İlk taşıma denklemi, türbülanstaki enerjii belirleyen türbülans kinetik enerjisi (Denklem (1)) k ile ilgilidir ve ikinci denklem, türbülansın ölçeğini belirleyen türbülans yitimi (Denklem (2)) ε ile ilgilidir.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u k) - \nabla \cdot \left(\left(\eta + \rho C_u \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \nabla k \right) = \frac{1}{2} \rho C_u \frac{k^2}{\varepsilon} (\nabla u + \nabla u^t)^2 - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \varepsilon) - \nabla \cdot \left(\left(\eta + \rho C_u \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) = \frac{1}{2} \rho C_{\varepsilon 1} k \frac{k^2}{\varepsilon} (\nabla u + \nabla u^t)^2 - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

Denklem 1 ve 2 çözülerek, model havuzun hız dağılımı değerleri ve giriş ve çıkış arasındaki basınç kaybı bulunmuştur. Yukarıda da belirtildiği gibi akış hızının 0.1 m/s'nin altında kaldığı alanlar ölü bölge olarak kabul edilmiştir. Giriş hızı 0.3 m/s olarak alınmıştır.

Literatürde en uygun türbülans modeliyle ilgili farklı yaklaşımlar bulunmakta olup, doğru türbülans modelinin seçimi sonuçların güvenilirliği açısından önemli bir husustur (Prussi, vd., 2014). Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS) ve büyük girdap simülasyonu (LES) yöntemlerinin hibridizasyonu, ayrılmış türbülanslı akış simülasyonlarıyla etkin bir şekilde başa çıkmanın en umut verici yolu olarak görülmektedir (Heinz, 2020). Ancak bu model yüksek hesaplama kapasitesi ve eforu gerektirmektedir.

Yüzey pürüzlülüğü türbülans yapılarını ve hız profillerini önemli ölçüde etkiler ve bu durum türbülans modellerine özellikle duvar ve sınır tabakası ayrılması noktalarında bir kısıt olarak yansır. Pürüzlülük etkilerinin hassas bir şekilde modellenmesi, çeşitli mühendislik uygulamalarında güvenilir sayısal simülasyon sonuçları için önemlidir. Bu konuda bilinen türbülans modellerini güncelleyerek sonuçların güvenilirliğini artırmayı hedefleyen yaklaşımlar mevcuttur (Chen ve Patel, 1988. Patel ve Yoon, 1995; Durbin, vd., 2001; Ma ve Chen, 2024). Çalışmada kullanılan standart k-ε türbülans modelinin geniş bir uygulama alanı bulursa da (Zhang, vd., 2015; Chen, vd., 2016; Ranganathan, vd., 2017; Cheng, vd., 2018; Kusmayadi, vd., 2020a Kusmayadi, vd., 2020b) HAD modellemesinde kullanılan başka modeller de mevcuttur. Bunlar arasında özellikle k-ω modeli dönüş ve girdap alanlarını hesaplamadaki isabetiyle uygulama alanı bulmuştur (Xu, vd., 2015). Standart k-ε modeli ise yüksek Reynolds sayısında bile türbülanslı akış için kararlı ve geçerli sonuçlar verip, ayrıca duvar fonksiyonunun uygulanması nedeniyle karmaşık geometriler için makul çözümler sunmaktadır (Ali, vd., 2014).

Modelde kullanılan tesisin boyutları Tablo 1'de verilmiştir.

Buna göre, değişen hesaplama alanı boyutları için problem içi eleman sayıları değişmektedir. Havuzdaki akış, 2 boyutlu olarak hesaplanmıştır. İki boyutlu modellerin çeşitli kısıtların olmakla beraber, düşük hesaplama eforu sebebiyle alg havuzlarındaki akışın incelenmesinde kullanılmaktadır (Hadiyanto, vd., 2013).

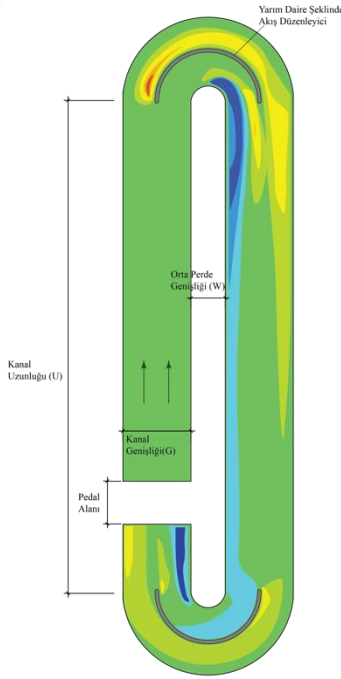
Problem, 4.5 GHz işlemci hızına sahip 4 çekirdekli bilgisayarda çözülmüştür. Her bir analizin çözümü, yaklaşık 15-20 dakika sürmüş olup bu değer eleman sayısına bağlı olarak değişmektedir.

2.3. Hidrolik güç hesabı

Pedalin enerji tüketimini temsil eden güç, pedaldan sonraki ve önceki noktalar arasındaki basınç farkının bir fonksiyonu olarak tanımlanmış olup, basınç farkı HAD modelinin çıktısı olarak, $k-\epsilon$ türbülans modelinin çözülmesinin bir sonucu olarak elde edilmiştir. Buna göre hidrolik güç tüketimi aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır (Hadiyanto, vd., 2013);

$$Güç = \Delta P \cdot Q \quad (3)$$

Burada ΔP pedaldan önceki ve sonraki noktalar arasındaki basınç farkını, Q ise debiyi temsil etmektedir.



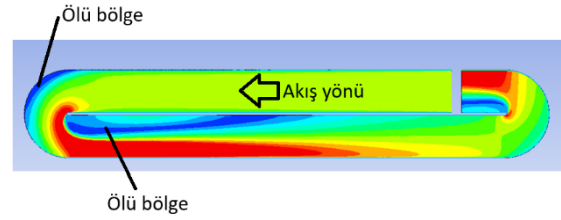
Şekil 1. Bir kanal tipi alg havuzunun temsili çizimi.

Çalışma kapsamında, en yüksek hidrolik güç tüketimine sahip tasarımın (Tablo 2, Model No 1) güç tüketimi 1 olarak alınmış, karşılaştırma amacıyla diğer senaryolarda hesaplanan güç değerleri buna göre normalize edilmiştir. Buna göre hidrolik güç tüketimi Model No 1'in yarısı olan bir tesisin güç tüketimi 0,5 olarak alınacaktır. İki boyutlu analiz sonuçlarının bu şekilde verilmesi daha uygun bulunmuştur.

3. Sonuçlar ve tartışma

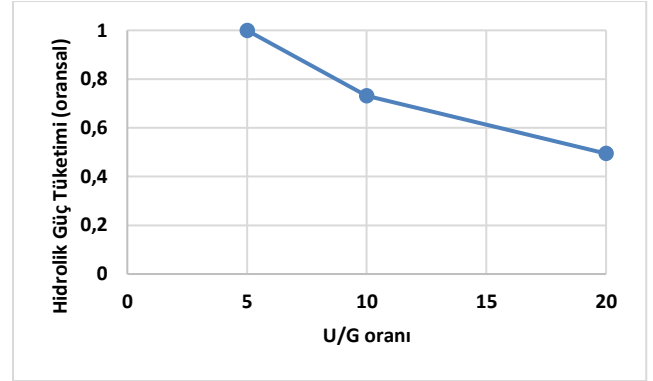
3.1 Farklı U/G oranlarının akışa ve güç tüketimine etkisi

Çalışma kapsamında yerleşim alanı 1 ha olan bir havuzun akış profili farklı U/G oranları için modellenmiştir. Buna göre U/G oranı arttıkça kanal uzunluğu artıp, kanal genişliği azalacaktır. Daha uzun bir kanal, suyun düz bölümler boyunca hareket ettirilmesiyle daha fazla enerji tüketilmesi anlamına gelir ve kanal uzunluğu arttıkça enerji tasarrufu göreceli olarak azalır. Buna karşın U/G oranı arttıkça hidrolik güç tüketiminin azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi daha uzun kanalların gerektirdiği ilave güç tüketiminin, kanal genişliğinin düşürülmesiyle telafi edilmiş olmasıdır.



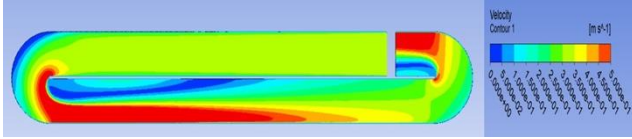
Şekil 2. U/G=5 için ölü bölgelerin ve akış yönünün gösterimi

Şekil 2'de U/G=5 için ölü bölgeler ve akış yönü gösterilmiştir. Buradaki mavi alan akış hızının 0.1 m/s'nin altında olduğu ölü bölgeleri göstermektedir. U/G oranı 5, 10 ve 20 olan havuzlarda beklenen hidrolik güç tüketiminin karşılaştırılması Şekil 3'te verilmiştir. Buna göre 1 ha alanı kaplayan bir havuz için U/G=5'e göre güç tüketimi U/G=10 için %27 ve U/G=20 için %51 oranında azalmıştır.



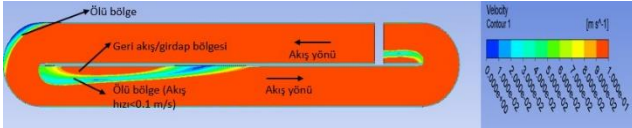
Şekil 3. Farklı U/G oranlarının hidrolik güç tüketimine etkisi.

Alg havuzlarında hidrolik güç tüketiminin önemli bir kısmı dirsek bölgelerinde meydana gelir. Bu bölgede akışkan, 180° döner. Buradan geçen akışın temel özelliği, akışkan üzerinde etkili olan santrifüj kuvvetinden kaynaklanan radyal bir basınç gradyanının varlığıdır (Sawanth, vd., 2019). Bu olgu nedeniyle, merkezdeki akışkan dış tarafa doğru hareket eder ve duvar boyunca iç tarafa doğru geri dönerek girdap oluşturur. Bu, basınç kayıplarında büyük bir artışa neden olan çift sarmal bir akış alanı yaratır ve böylece dirsekteki akış alanı bozulur. Bir dirsekte yaşanan bu basınç kayıpları, akış yönündeki bir değişiklikten kaynaklanan sürtünme ve momentum değişimlerinden kaynaklanır. Bu bölgede girdap ve ölü bölge oluşumu (Şekil 3, 4 ve 5) hücrelerin periyodik olarak güneş ışığı alma oranını düşürmekte ve havuzun faydalı hacminin düşmesine, aynı zamanda havuz içerisinde istenmeyen anoksik ortamlar oluşmasına sebep olmaktadır.



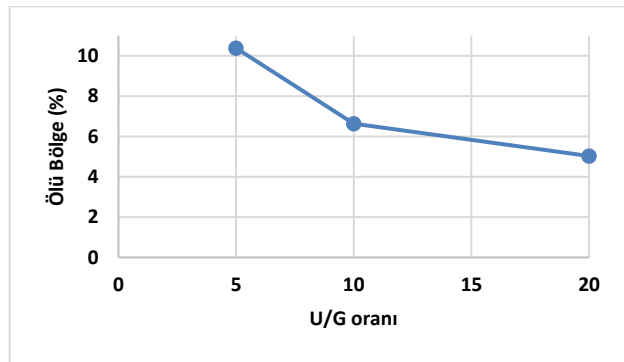
Şekil 4. U/G=5 için akış alanı.

Farklı U/G oranlarındaki akış hızı dağılımı ve ölü bölge oluşumu Şekil 4'te gösterilmiştir. Hızın eşit olmayan dağılımının düşük U/G oranlarında daha belirgin olduğu ve U/G oranını artırarak daha homojen bir hız dağılımının elde edilebileceği bilinmektedir (Sawanth, vd., 2019; Lima, vd., 2020). Bu sebeple dar ve uzun kanalların daha tercih edilebilir olduğu belirtilmiştir (Lima, vd., 2020). Buna karşın düşük U/G oranlarında düşük ve yüksek hız bölgeleri (Şekil 4) kanal boyunca daha belirgin bir şekilde devam etmekte ve kanal genişliği boyunca gözlemlenen hız değişimleri daha belirgin olmaktadır. Bu kanallarda, akışkanın dirsek, öncesi ve sonrası boyunca hareket etmesiyle birlikte merkezi duvarın uyguladığı sürüklenme kuvveti, hız büyüklüklerinin y bileşeninin (merkezi duvara dik) daha büyük olması nedeniyle daha önemlidir; bu da düşük akış hızlarına sahip bölgelerle hemen hemen aynı bölgeye (Şekil 4 ve 5) denk gelen daha büyük bir akış ayrımı bölgesiyle sonuçlanır (Lima, vd., 2020).



Şekil 5. U/G=5 için ölü bölgeler.

Sayısal modelin çıktısı olarak U/G oranı azaldıkça dirseklerde ve dirsek sonrası oluşan ölü bölgelerin arttığı görülmektedir. Bu bölümde akış hızı 0.1 m/s'nin altına düşmektedir ve ölü bölge oluşmaktadır. Akış düzenleyici içermeyen geleneksel tasarımda U/G oranı 5, 10 ve 20 olan havuzlar için ölü bölge oranları sırasıyla %10.38, 6.64 ve 5.03 olarak bulunmuştur (Şekil 6). Lima, vd., (2020) kanal tipi alg havuzları üzerine yaptıkları sayısal çalışmada, mevcut çalışmayla uyumlu olarak ölü bölgelerin dirsek sonrası orta bölme yakınlarında oluştuğunu ve havuz uzunluğu arttıkça bu bölgelerin kapladığı alanın toplam havuz alanına oranının düştüğünü belirtmişlerdir.



Şekil 6. Farklı U/G oranlarının ölü bölge oluşumuna etkisi.

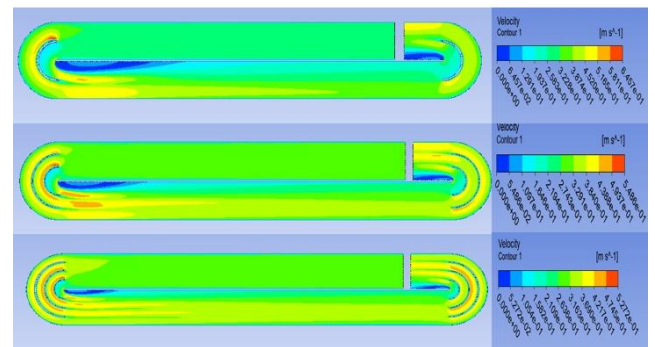
Ölü bölge oluşumu akış hızıyla doğrudan bağlantılıdır ve hızın artırılmasıyla azalması beklenmektedir. Sompech vd., (2012) pedal devrinin dakikada 55'e çıkarılmasıyla ölü bölgelerin tamamen giderilebileceğini belirtmişse de bu durum gerçek ölçekteki tesis işletme pratikleriyle uyuşmamakta, türbülansın artırılarak akışı iyileştirmenin enerji maliyetlerinde ciddi bir artışı beraberinde getirdiği bilinmektedir (Borowitzka ve Moheimani, 2013). Lima, vd.'nin (2020) bildirdiğine göre kanal uzunluğu arttıkça birim akışkan hacmi için güç sarfiyatı azalmaktadır. Ancak

bu çalışmada farklı uzunluklara sahip havuzların toplam hacimleriyle ilgili kıyaslama eksiktir. Ortiz, vd., (2022)'nin yaptığı HAD modelleme çalışmasında, mevcut çalışmayla uyumlu olarak dirsek sonrası akışın açık bir şekilde farklı akış hızlarına sahip iki alana bölündüğü görülmüş, orta bölme kenarında akış hızı 0.1 m/s'nin altına düşmüşken duvar kenarında 0.4 m/s'ye ulaştığı belirtilmiştir. Mevcut çalışmada dirsek sonrası duvar kenarı bölgesinde akış hızları 0.5 m/s'nin üstüne çıkmıştır. Bunun sebebi Ortiz, vd., (2022)'nin çalışmasında giriş hız değeri 0.15 m/s olarak alınırken mevcut çalışmada 0.3 m/s olarak belirlenmiştir.

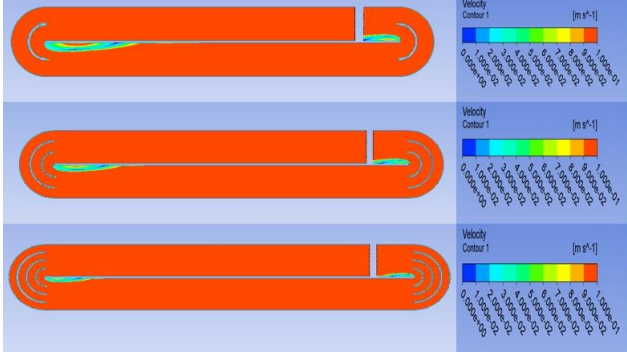
Kanal tipi alg havuzlarındaki hidrolik davranışın deneysel incelemesiyle ilgili literatürde kısıtlı da olsa çeşitli bilgiler vardır. Prussi, vd., (2014) yaptıkları HAD çalışmasını, havuzun belirli yerlerinde hız ölçümü yaparak doğrulamışlardır. Buna göre, kendi çalışmalarında ve mevcut çalışmada gözlemlenen dirsek sonrası akım ayrılma ve farklı hız bölgeleri deneysel olarak da belirgin olarak doğrulanmıştır. Buna göre U/G oranı 5 olan bir havuzda dirsek sonrasında orta duvar yakınlarında karmaşık girdap akışı gözlemlenmiş olup, kanal genişliği boyunca akış hızı orta duvara doğru gittikçe düşerek nihayet orta duvar yakınlarında ölü bölge oluşumu gözlemlenmiştir. Geri akım ve ölü bölge alanları mevcut çalışmayla uyumlu olsa da, akım ayrılma bölgesi sonrası ulaşılan maksimum hızlarda ufak farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin farklı giriş hızları olduğu düşünülmektedir. Bunun yanında söz edilen çalışmada dirsek sonrası kanal boyunca akışın daha homojen bir hal aldığı da doğrulanmıştır.

3.2 Akış düzenleyicilerin akışa ve güç tüketimine etkisi

Daha önce de belirtildiği gibi, alg havuzlarında enerji kaybının çoğu dirsek bölgelerinde meydana gelir. Akış yönündeki keskin değişimler önemli bir basınç düşüşüne yol açar. Dirsek tasarımı sınır tabakası ayrılmasını azaltmak için değiştirilirse basınç düşüşü indirilebilir. Alg havuzu tasarımında en yaygın değişiklik, dirsek bölgelerine yarım daire şeklinde akış düzenleyiciler yerleştirilmesidir. Akış düzenleyiciler, alg havuzlarında birden fazla yere yerleştirilebilen basit, küçük ve pasif cihazlardır. Bu cihazlar, akış enerjisini ek torka dönüştürmek üzere tasarlanmıştır. Akış düzenleyiciler çalışmak için herhangi bir harici güce ihtiyaç duymazlar. Akış düzenleyicilerin varlığı nedeniyle hücrelerin çökmesi ve büyük girdapların oluşması ortadan kaldırılabilir ve bu da alg havuzlarında ölü bölgelerin azalmasıyla sonuçlanır (Şekil 7,8,9,12).

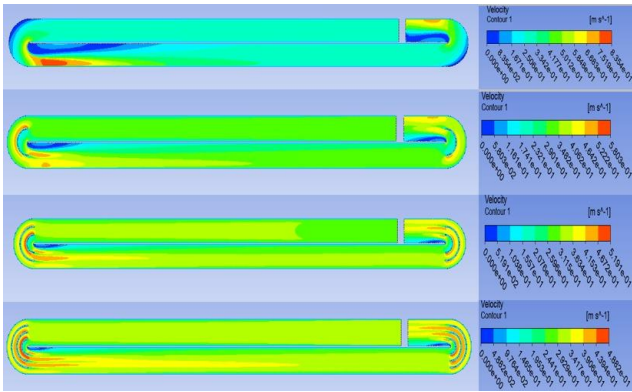


Şekil 7. U/G=5 için 1,2 ve 3 akış düzenleyici eklenmiş havuzun akış alanı.



Şekil 8. U/G=5 için 1,2 ve 3 akış düzenleyici eklenmiş havuzun ölü bölgeleri.

Sayısal model çıktısı olarak, akış düzenleyicilerin, sürtünmeye bağlı enerji kaybının artmasına sebep olmasına karşın, toplam güç tüketimini önemli derecede düşürdüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 9. U/G=10 için 0,1,2 ve 3 akış düzenleyici eklenmiş havuzun akış alanı.

Bunun nedeni, fiziksel birer yapı olan bu akış düzenleyicilerin nedeniyle oluşan sürtünme kayıplarının, ölü bölgelerin küçültülmesi veya tamamen ortadan kaldırılması sonucu azalan enerji kaybıyla fazlasıyla telafi edilmiş olmasıdır. Akışkanın ölü bir bölgedeki dolaşımı sürekli olarak enerji tüketimiyle sonuçlanmaktadır (Sompech vd., 2012).



Şekil 10. U/G=5 için akış düzenleyicilerin hidrolik güç tüketimine etkisi.

U/G=5 için akış düzenleyicilerin hidrolik güç tüketimine etkisi Şekil 10'da verilmiştir. Buna göre bir adet akış düzenleyicinin havuzlardaki hidrolik güç tüketimini önemli ölçüde azaltacağı görülmüştür. U/G=5 için 1, 2 ve 3 adet akış düzenleyicinin, hidrolik güç tüketimini, hiç akış düzenleyicinin olmadığı senaryoya göre sırasıyla %66, 77 ve 81 oranlarında azaltması beklenmektedir.



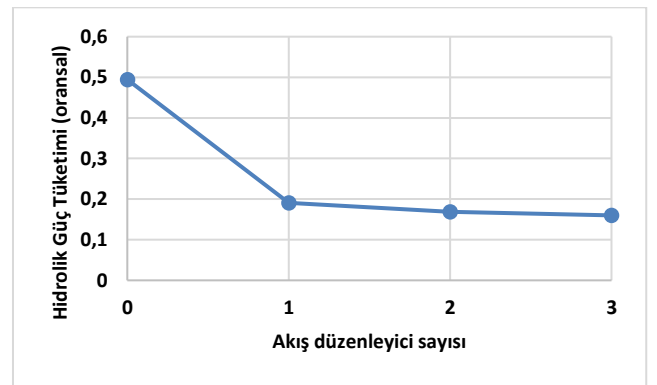
Şekil 11. U/G=10 için akış düzenleyicilerin hidrolik güç tüketimine etkisi.

U/G=10 için akış düzenleyicilerin hidrolik güç tüketimine olan oransal etkisi Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 12. U/G=10 için 0,1,2 ve 3 akış düzenleyici eklenmiş havuzun ölü bölgeleri.

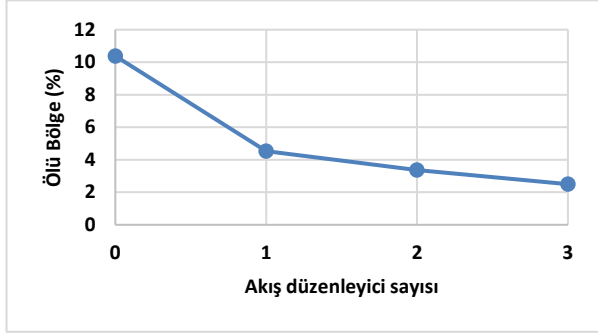
Hiç akış düzenleyicinin olmadığı senaryoda, U/G oranı 10'a yükseltildiğinde, hidrolik güç tüketimi daha önce de belirtildiği gibi yaklaşık %25 oranında azalmaktadır. U/G=10 için 1, 2 ve 3 adet akış düzenleyicinin, hidrolik güç tüketimini, U/G=5'te hiç akış düzenleyicinin olmadığı senaryoya göre sırasıyla %77, 82 ve 83 oranlarında azaltması beklenmektedir. Bu değerlerin U/G=10'da hiç akış düzenleyicinin olmadığı senaryoya göre sırasıyla %69, 76 ve 77 olması beklenmektedir.



Şekil 13. U/G=20 için akış düzenleyicilerin hidrolik güç tüketimine etkisi.

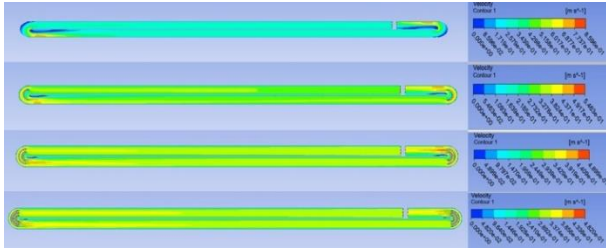
U/G=20 için akış düzenleyicilerin hidrolik güç tüketimine olan oransal etkisi Şekil 13'te verilmiştir. Hiç akış düzenleyicinin olmadığı senaryoda, U/G oranı 20'ye yükseltildiğinde, hidrolik güç tüketimi yaklaşık %50 oranında azalmaktadır. U/G=20 için 1, 2 ve 3 adet akış düzenleyicinin, hidrolik güç tüketimini, U/G=5'te hiç akış düzenleyicinin olmadığı senaryoya göre sırasıyla %81,83 ve 84 oranlarında azaltması beklenmektedir. Bu değerlerin U/G=20 için hiç akış düzenleyicinin olmadığı senaryoya göre sırasıyla %61, 66 ve 67 olması beklenmektedir. Görüldüğü gibi U/G oranı

ve akış düzenleyici sayısı ile hidrolik güç tüketimi arasında ters orantı vardır, ancak akış düzenleyiciler yoluyla güç tüketiminde sağlanan iyileşme, U/G oranının artmasıyla oransal olarak azalmaktadır.

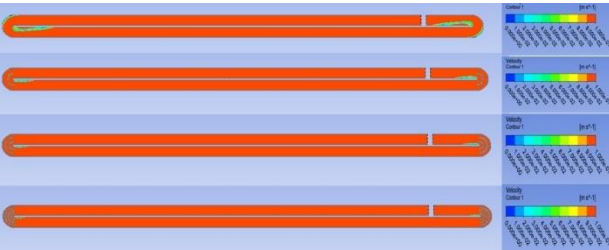


Şekil 14. U/G=5 için akış düzenleyicilerin ölü bölge oluşumuna etkisi.

U/G oranında olduğu gibi, akış düzenleyicilerin sayısı artırıldıkça ölü bölge oranı azalmaktadır (Şekil 15, 16). Bu, ilk olarak Mangelson ve Watters (1972) tarafından atık stabilizasyon havuzlarının veriminin artırılması için tavsiye edilmiştir. U/G=5, 10 ve 20 için 1, 2 ve 3 adet akış düzenleyici için ölü bölge oluşum oranları Şekil 14, 17 ve 18'de gösterilmiştir.



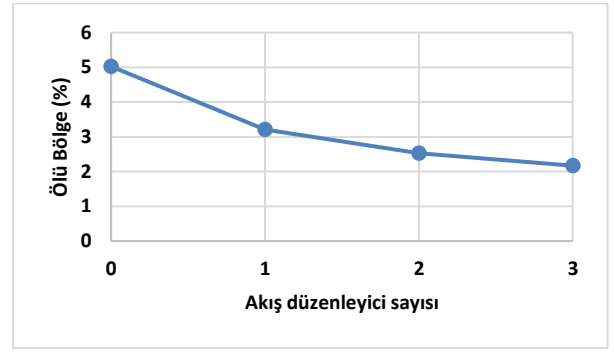
Şekil 15. U/G=20 için 0, 1, 2 ve 3 akış düzenleyici eklenmiş havuzun akış alanı.



Şekil 16. U/G=20 için 0, 1, 2 ve 3 akış düzenleyici eklenmiş havuzun ölü bölgeleri.



Şekil 17. U/G=10 için akış düzenleyicilerin ölü bölge oluşumuna etkisi.

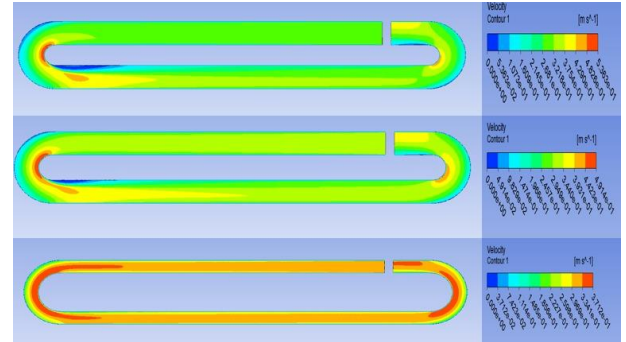


Şekil 18. U/G=20 için akış düzenleyicilerin ölü bölge oluşumuna etkisi.

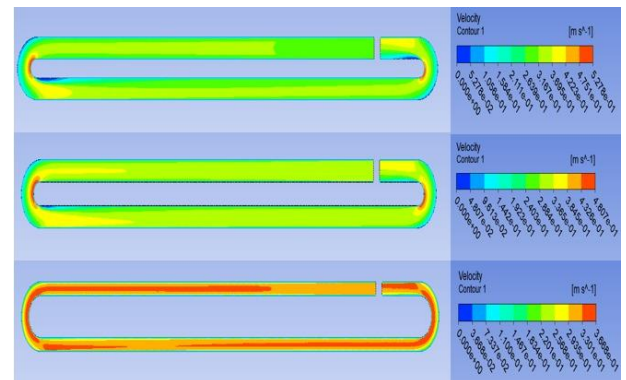
Buna göre U/G=5 için ölü bölge oranları 0, 1, 2 ve 3 akış düzenleyici için sırasıyla %10.38, 4.52, 3.36 ve 2.50 olarak bulunmuştur. U/G=10 ve 20 için ise 0, 1, 2 ve 3 adet akış düzenleyici için %6.64, 3.33, 2.61, 2.40 ve %5.50, 3.21, 2.53 ve 2.17 olarak bulunmuştur. Ortiz, vd., (2022) 1 ve 2 adet akış düzenleyicinin akış alanına olan etkisini sayısal olarak inceledikleri çalışmada akış düzenleyici sayısı arttıkça dirsek sonrası ölü bölgelerin önemli ölçüde azaldığını ancak tam olarak giderilemediğini belirtmişlerdir. Benzer durum mevcut çalışmada da gözlemlenmiş olup (Şekil 7) dirsek sonrası orta bölme kenarında akış hızının 0.1 m/s'den düşük olduğu girdap bölgesinin alanı, akış düzenleyicilerin sayısı ile paralel olarak azalmıştır.

3.3 Orta perdenin genişletilmesinin akışa ve güç tüketimine etkisi

Kanaldaki orta perdenin genişliğinin artırılmasıyla (Şekil 1), akış doğrudan 180° dolaştırılmaz ve önceki havuz tasarımına kıyasla kanalda daha düzgün bir hız alanı oluşur.

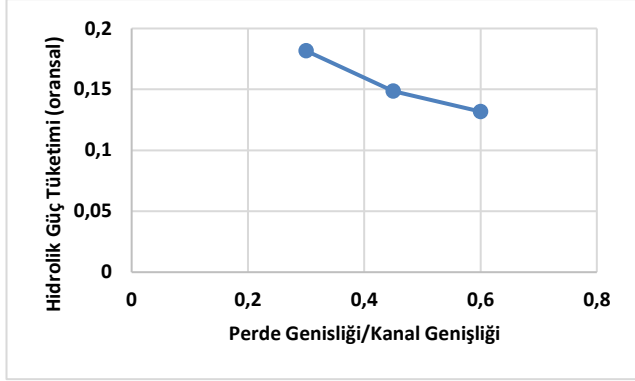


Şekil 19. U/G=5 için orta perde kalınlığının havuz genişliğinin %30,45 ve 60'ına kadar yükseltildiği durumdaki akış alanı.



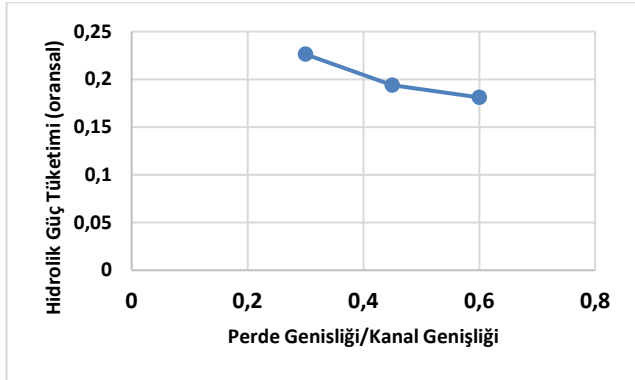
Şekil 20. U/G=10 için orta perde kalınlığının havuz genişliğinin %30,45 ve 60'ına kadar yükseltildiği durumdaki akış alanı.

Hidrolik özellikler iyileştirildiğinden güç tüketimi orijinal tasarımdan daha düşüktür (Şekil 21). Ayrıca akış eşit olarak dağıtılır ve kanaldaki ölü bölgeler neredeyse sıfıra indirilebilir (Şekil 19,20,24). Bu durum, sabit derinlik için orta duvarın genişliğinin artmasının ölü bölgelerin hacmini azalttığını belirten Mangelson ve Watters (1972) ve Hadiyanto, vd., (2013)'nin belirttikleriyle örtüşmektedir.

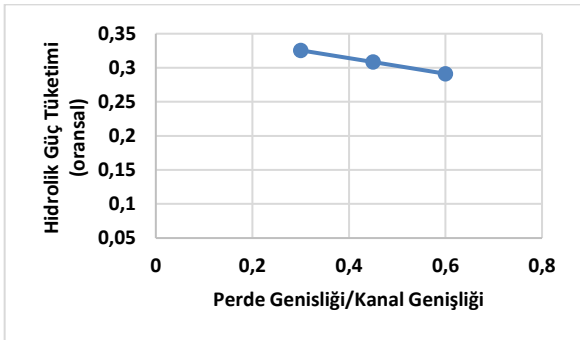


Şekil 21. U/G=5 için orta perde kalınlığının havuz genişliğinin %30,45 ve 60'ına kadar yükseltilmesinin hidrolik güç tüketimine etkisi.

Şekil 21'de U/G=5'te, perde kalınlığının kanal genişliğinin %30,45 ve 60'ını kapladığı durumlardaki hidrolik güç tüketiminin U/G=5'te perde kalınlığının ihmal edilebilir (<1m) olduğu duruma oranlanarak verilmiştir. Buna göre perde kalınlığını, kanal genişliğinin en az %30'unu kaplayacak şekilde artırmak hidrolik güç tüketimini %80'in üzerinde azaltmaktadır.



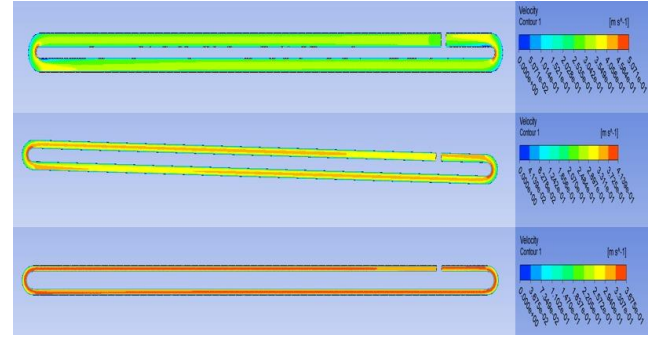
Şekil 22. U/G=10 için orta perde kalınlığının havuz genişliğinin %30,45 ve 60'ına kadar yükseltilmesinin hidrolik güç tüketimine etkisi.



Şekil 23. U/G=20 için orta perde kalınlığının havuz genişliğinin %30,45 ve 60'ına kadar yükseltilmesinin hidrolik güç tüketimine etkisi.

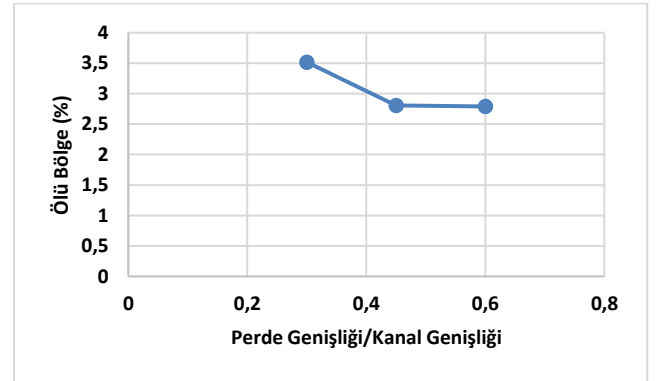
Şekil 22 ve 23'te U/G=10 ve 20 için orta perde genişliğinin artırılmasının hidrolik güç tüketimi üzerine etkisi gösterilmiştir. Buradaki en dikkat çekici sonuç, U/G oranının artmasıyla, güç tüketimindeki tasarrufun artmamasıdır. Akışı havuz çeperlerine yönlendirmek güç tüketimi üzerinde ciddi

bir tasarruf sağlamakta, ancak bu durumda U/G oranının artırılması, kanal uzunluğunun da artması kaynaklı olarak güç tüketiminin de artmasına sebep olmaktadır.

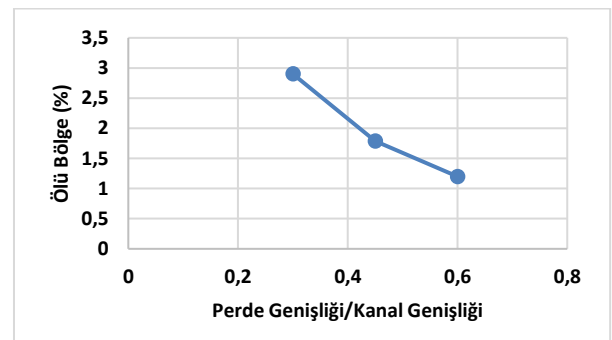


Şekil 24. U/G=20 için orta perde kalınlığının havuz genişliğinin %30,45 ve 60'ına kadar yükseltildiği durumdaki akış alanı.

Akışın orta perdeyi genişletmek yöntemiyle kanal çeperlerine yöneltilmesi ölü bölgelerin azaltılması anlamında da ciddi iyileştirmeleri beraberinde getirmektedir. Ortiz, vd., (2022)'nin bildirdiğine göre orta bölmenin genişletilmesiyle, mevcut çalışmada olduğu gibi kanal genişliği boyunca akış hızı homojen hale gelmektedir. Şekil 25'te görüldüğü gibi U/G=5 için orta perde kalınlığının, kanal genişliğinin %30,45 ve 60'ına çıkarılmasıyla havuz içi ölü bölge oranları %3,52, 2,81 ve 2,79 olmaktadır. Bunun akış düzenleyiciler yoluyla sağlanandan baha büyük bir iyileşme olduğu göze çarpmaktadır. Orta perde kalınlığının ihmal edilebilir (<1m) olduğu durumda bu değer, yukarıda belirtildiği gibi %10,38'dir.

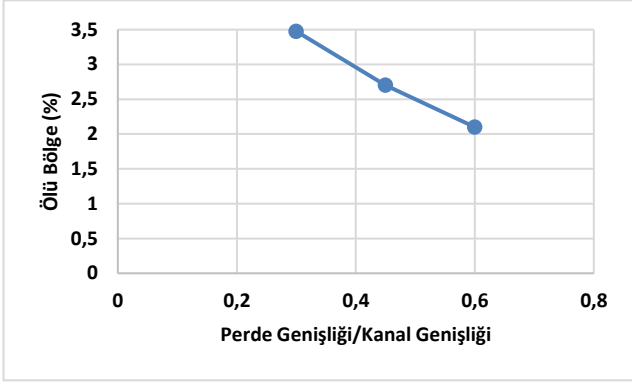


Şekil 25. U/G=5 için orta perde kalınlığının havuz genişliğinin %30,45 ve 60'ına kadar yükseltilmesinin ölü bölge oluşumuna etkisi.



Şekil 26. U/G=10 için orta perde kalınlığının havuz genişliğinin %30,45 ve 60'ına kadar yükseltilmesinin ölü bölge oluşumuna etkisi.

U/G=10 ve 20 için de orta perdenin kalınlaştırılmasının ölü bölgeleri %3,5 ila 1 arasına kadar indirebildiği görülmüştür (Şekil 26 ve 27). Ancak unutulmamalıdır ki bu durum havuz hacminin düşmesini de beraberinde getirecektir.



Şekil 27. U/G=20 için orta perde kalınlığının havuz genişliğinin %30,45 ve 60'ına kadar yükseltilmesinin ölü bölge oluşumuna etkisi.

Alg havuzlarında karışımın iyileştirilerek biyokütle üretim hızının artırılması konusunda yapılan çalışmalarda bu tür havuzların performansının belli ölçüde artırdığı belirtilmiştir (Zhang, vd., 2015; Cheng, vd., 2015; Chen, vd., 2016; Cheng, vd., 2018; Akca, vd., 2023). Bu çalışmalar daha ziyade dikey karışımın artırılmasına yönelmiş olsa da akım düzenleyicilerin hücrelerin maruz kaldığı ışığa olan etkisi konusunda çeşitli bilgiler mevcuttur. Chen, vd., (2016) yaptıkları çalışmada çeşitli sayılardaki akış düzenleyicinin hücrelerin maruz kaldığı ışık miktarını %33,8 ila %54,8 arasında artırdığını belirtmişlerdir. Bu noktada kritik olan husus çalışmanın yapıldığı havuzun geometrik özellikleridir. Chen, vd.'nin çalışmasında 2 m uzunluğunda ve 0,7 m genişliğinde olup U/G oranı 2,85 olan pilot ölçekli bir havuz kullanılmıştır. Böyle bir havuzda hücreler, ışık yönünde karışımı sağlayan pedaldan çok daha sık geçerler. Oysa ki gerçek ölçekli havuzlarda U/G oranları çok daha büyük olup, pedal kaynaklı karışımın etkisi çok daha azdır. Dolayısıyla pedalin havuzun hidrodinamik şartlarına olan etkisinin çok daha fazla olduğu pilot ve laboratuvar ölçeğinde yapılan çalışmalarda elde edilen biyolojik sonuçlar, gerçek ölçekteki şartları yansıtmaktan uzaktırlar. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar üzerinden gerçek ölçekli alg tesislerinde çeşitli reaktör tasarımları için beklenen biyolojik verim artışının değerlendirilmesinin hatalı olacağı düşünülmektedir.

Çalışmada önerilen tasarım değişikliklerinden orta bölmenin genişliğinin artırılmasının pratikte uygulanması zordur. Bu yaklaşım kullanılan havuz hacmini azaltacağı gibi halihazırda işletilen tesislerin bu şekilde yeniden düzenlenmesini maliyetli olabilir. Buna karşın, paslanmaz çelik veya alüminyumdan imal edilmiş yarım daire şeklindeki akış düzenleyiciler görece daha az maliyet gerektirdikleri gibi kurulmuş olan tesislere sonradan ilave edilmeleri kolaydır. Burada önemli olan husus kullanılan malzemenin paslanma, korozyon vb. sebeplerden dolayı yıpranması ve daha da önemlisi havuzdaki canlı hayatına zarar vermesi noktasındadır. Kullanılacak malzemenin alg büyümesi için kullanılacak besiyeriyle hiçbir şekilde reaksiyona girmemesi gerekmektedir.

3.4 Güçlü yönler ve sınırlamalar

Kanal tipi mikroalg havuzlarının hidrolik karakterini anlamak için HAD modellemesi güvenilir bir yöntem olarak öne çıkmakta olup, bu konuda yapılmış pek çok çalışma mevcuttur. Bunların yanında HAD kodu kullanarak yapılan çalışmaların çeşitli sınırlamaları mevcuttur.

Çalışma kapsamındaki en büyük sınırlama olarak pedal hareketinin yüksek hesaplama eforu gerektirmesi sebebiyle modellenememiş olması gösterilebilir. Pedalla karışma,

akışın kanal genişliğinden ziyade, derinlik boyunca homojen olmamasına, akış hızının derinlikle birlikte azalmasına sebep olmaktadır (Akca, vd., 2024). İki boyutlu modelleme çalışmalarında bu durum ihmal edilmektedir. Literatürde pedal hareketinin modellenmesine odaklanmış çalışmalar bulunsada da alg havuzlarının geneline inceleyen çalışmalarda mevcut makalede kullanılan yöntem daha yaygın olarak görülmektedir. Aynı şekilde iki boyutlu modellerde dirseklerde meydana gelen dikey karışım, serbest su yüzey ve rüzgar kaynaklı dalga etkisi görülememektedir. Bununla birlikte mevcut modelleme yöntemi sayısal güvenilirliği dolayısıyla alg havuzlarının hidrolik davranışını anlamakta sıklıkla kullanılmaktadır.

4. Sonuç

Kanal tipi mikroalg havuzlarının ölü bölge ve hidrolik güç tüketimlerini analiz etmeyi amaçlayan mevcut çalışma kapsamında dirsek bölgelerine yarım dairesel akış düzenleyiciler koyulması ve kanalı ikiye bölen, alg kültürünün etrafında sirküle ettiği orta perdenin genişliğinin artırılması değerlendirilmiştir. Akışı modellemek için HAD kodu kullanılmıştır. Akış düzenleyici içermeyen geleneksel tasarımda U/G oranı 5, 10 ve 20 olan havuzlar için ölü bölge oranları sırasıyla %10,38, 6,64 ve 5,03 olarak bulunmuşken, bu değerin akış düzenleyiciler yoluyla yaklaşık %2'ye kadar düşürülebileceği bulunmuştur. Hidrolik güç tüketimi ise yaklaşık %80 ila 90 oranında azaltılabilmektedir. Tek bir akış düzenleyici, havuzların hidrolik karakterine ciddi anlamda etki ederken ikinci ve üçüncü akış düzenleyicilerin etkisi görece daha önemsizdir. Kanalı ikiye bölen orta perdenin genişliğinin artırılmasıyla ise ölü bölgeler neredeyse tamamıyla giderilebileceği gibi, hidrolik güç tüketiminin yaklaşık %80'in üstünde azaltılabileceği gözlemlenmiştir. Ancak bu durum, havuz hacminin düşmesini de beraberinde getirmektedir.

Tesis tasarımında nihai optimum kararı verebilmek için farklı tasarımlardaki yük kayıpları ve ölü bölge oranlarıyla birlikte, bütün bunların alg büyümesine olan etkisinin de bilinmesi gerekmektedir. U/G oranının artırılmasıyla havuzların hidrolik şartlarında iyileşme sağlanabileceği biliniyorsa da, daha büyük U/G oranı, -aynı tesis alanı için- kanal uzunluğunun artırılması, bu da alg hücrelerinin, karışımı sağlayan pedaldan daha uzun aralıklarla geçmesi anlamına gelmektedir. Pedal, alg havuzlarında, fotosentetik hücreler için hayati öneme sahip ışık yönünde karışımın -dikey karışım- sağlandığı tek yerdir ve U/G oranının artırılması yük kayıplarını ve ölü bölgeleri azaltsa da, tesislerin biyolojik performansına olumsuz anlamda etki edebilir.

Sonuç olarak, optimum tesis tasarımının belirlenmesi için daha fazla veriye, özellikle de gerçek ölçekte biyolojik sonuçlara ihtiyaç olsa da, HAD modellemesinin kanal tipi alg havuzlarının hidrolik şartlarının iyileştirilmesi için strateji geliştirilmesi noktasında önemli bir araç olduğu düşünülmektedir. Gelecek çalışmalarda iyileştirilmiş hidrolik şartların havuzların biyolojik performansına etkisi, büyük ölçek için belirlenmelidir.

5. Kısaltmalar

- ρ : Akışkanın yoğunluğu (kg/m^3)
- C_{e1} : Türbülans yitimi sabiti (1) (birimsiz)
- C_{e2} : Türbülans yitimi sabiti (2) (birimsiz)
- C_u : Türbülans model sabiti (birimsiz)
- u : Akışkanın hız vektörü (m/s)

k: Türbülans kinetik enerjisi (m^2/s^2)
 ϵ : Türbülans enerji yitimi (m^2/s^2)
 η : Dinamik viskozite (Pa.s)
 ∇ : Gradyan operatörü
t: zaman (s)

Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır.

6. Kaynaklar

- Akca, M. S., Ceylan-Perver, G., Duranay, A., Kinaci, O. K., & Inanc, B. (2023). Application of Vortex Induced Vibration Systems to Improve Vertical Mixing and Create Light/Dark Cycles for Enhanced Algal Biomass Productivity in Raceway Ponds. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(2), 245.
- Akca, M. S., Kinaci, O. K., & Inanc, B. (2024). Improving light availability and creating high-frequency light–dark cycles in raceway ponds through vortex-induced vibrations for microalgae cultivation: a fluid dynamic study. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 47(11), 1863-1874.
- Ali, H., Cheema, T. A., Yoon, H. S., Do, Y., & Park, C. W. (2015). Numerical prediction of algae cell mixing feature in raceway ponds using particle tracing methods. *Biotechnology and bioengineering*, 112(2), 297-307.
- Borowitzka, M. A. (1999). Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *Journal of biotechnology*, 70(1-3), 313-321.
- Borowitzka, M. A., & Moheimani, N. R. (Eds.). (2013). *Algae for biofuels and energy* (Vol. 5, pp. 133-152). Dordrecht: Springer.
- Chen, H., & Patel, V. C. (1988). Near-wall turbulence models for complex flows including separation. *AIAA journal*, 26(6), 641-648.
- Chen, Z., Zhang, X., Jiang, Z., Chen, X., He, H., & Zhang, X. (2016). Light/dark cycle of microalgae cells in raceway ponds: Effects of paddlewheel rotational speeds and baffles installation. *Bioresource technology*, 219, 387-391.
- Cheng, J., Yang, Z., Ye, Q., Zhou, J., & Cen, K. (2015). Enhanced flashing light effect with up-down chute baffles to improve microalgal growth in a raceway pond. *Bioresource technology*, 190, 29-35.
- Cheng, J., Guo, W., Cai, C., Ye, Q., & Zhou, J. (2018). Alternatively permuted conic baffles generate vortex flow field to improve microalgal productivity in a raceway pond. *Bioresource technology*, 249, 212-218.
- Craggs, R., Sutherland, D., & Campbell, H. (2012). Hectare-scale demonstration of high rate algal ponds for enhanced wastewater treatment and biofuel production. *Journal of Applied Phycology*, 24, 329-337.
- Durbin, P. A., Medic, G., Seo, J. M., Eaton, J. K., & Song, S. (2001). Rough wall modification of two-layer $k-\epsilon$.
- Ghasemi, Y., Rasoul-Amini, S., Naseri, A. T., Montazeri-Najafabady, N., Mobasher, M. A., & Dabbagh, F. (2012). Microalgae biofuel potentials. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 48, 126-144.
- Hadiyanto, H., Elmore, S., Van Gerven, T., & Stankiewicz, A. (2013). Hydrodynamic evaluations in high rate algae pond (HRAP) design. *Chemical Engineering Journal*, 217, 231-239.
- Heinz, S. (2020). A review of hybrid RANS-LES methods for turbulent flows: Concepts and applications. *Progress in Aerospace Sciences*, 114, 100597.
- Kusmayadi, A., Suyono, E. A., Nagarajan, D., Chang, J. S., & Yen, H. W. (2020a). Application of computational fluid dynamics (CFD) on the raceway design for the cultivation of microalgae: a review. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 47(4-5), 373-382.
- Kusmayadi, A., Philippidis, G. P., & Yen, H. W. (2020b). Application of computational fluid dynamics to raceways combining paddlewheel and CO₂ spargers to enhance microalgae growth. *Journal of bioscience and bioengineering*, 129(1), 93-98.
- Liffman, K., Paterson, D. A., Liovic, P., & Bandopadhyay, P. (2013). Comparing the energy efficiency of different high rate algal raceway pond designs using computational fluid dynamics. *Chemical Engineering Research and Design*, 91(2), 221-226.
- Lima, A., Marinho, B., & Morais, T. (2021). Hydrodynamic analysis of flow in raceway ponds for algae cultivation under versatile conditions. *Aquaculture International*, 29, 19-35.
- Lundquist, T. J., Woertz, I. C., Quinn, N. W. T., & Benemann, J. R. (2010). A realistic technology and engineering assessment of algae biofuel production. *Energy Biosciences Institute*, 1.
- Ma, H., & Chen, H. C. (2024). Enhancing the two-layer k-epsilon turbulence model through rough wall modification. *Physics of Fluids*, 36(10).
- Mangelson K.A., G.Z. Watters, The treatment efficiency of waste stabilization ponds, *Journal of the Sanitary Engineering Division, American Society Civil Engineering* 98 (1972) 407–425.
- Mendoza, J. L., Granados, M. R., De Godos, I., Ación, F. G., Molina, E., Banks, C., & Heaven, S. (2013). Fluid-dynamic characterization of real-scale raceway reactors for microalgae production. *Biomass and Bioenergy*, 54, 267-275.
- Norsker, N. H., Barbosa, M. J., Vermuë, M. H., & Wijffels, R. H. (2011). Microalgal production—a close look at the economics. *Biotechnology advances*, 29(1), 24-27.
- Ortiz, A., Díez-Montero, R., García, J., Khalil, N., & Uggetti, E. (2022). Advanced biokinetic and hydrodynamic modelling to support and optimize the design of full-scale high rate algal ponds. *Computational and structural biotechnology journal*, 20, 386-398.
- Patel, V. C., & Yoon, J. Y. (1995). Application of turbulence models to separated flow over rough surfaces.
- Prussi, M., Buffi, M., Casini, D., Chiaramonti, D., Martelli, F., Carnevale, M., ... & Rodolfi, L. (2014). Experimental and

numerical investigations of mixing in raceway ponds for algae cultivation. *Biomass and bioenergy*, 67, 390-400.

Ranganathan, P., Amal, J. C., Savithri, S., & Haridas, A. (2017). Experimental and modelling of *Arthrospira platensis* cultivation in open raceway ponds. *Bioresource technology*, 242, 197-205.

Sawant, S. S., Gosavi, S. N., Khadamkar, H. P., Mathpati, C. S., Pandit, R., & Lali, A. M. (2019). Energy efficient design of high depth raceway pond using computational fluid dynamics. *Renewable Energy*, 133, 528-537.

Sompech, K., Chisti, Y., & Srinophakun, T. (2012). Design of raceway ponds for producing microalgae. *Biofuels*, 3(4), 387-397.

Sutherland, D. L., Park, J., Heubeck, S., Ralph, P. J., & Craggs, R. J. (2020). Size matters—Microalgae production and nutrient removal in wastewater treatment high rate algal ponds of three different sizes. *Algal Research*, 45, 101734.

Xu, B., Li, P., Waller, P., & Huesemann, M. (2015). Evaluation of flow mixing in an ARID-HV algal raceway using statistics of temporal and spatial distribution of fluid particles. *Algal Research*, 9, 27-39.

Zhang, Q., Xue, S., Yan, C., Wu, X., Wen, S., & Cong, W. (2015). Installation of flow deflectors and wing baffles to reduce dead zone and enhance flashing light effect in an open raceway pond. *Bioresource technology*, 198, 150-156.

