

# YOĞUN DEŞARJ ÜZERİNE YAPILAN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) MODELLEME ÇALIŞMALARININ İNCELENMESİ

*Mahmut Cenk SAYIL* \*<sup>ID</sup>

*Tuğçe ANILAN* \*<sup>ID</sup>

Alınma: 03.08.2024; düzeltme: 01.11.2024; kabul: 12.11.2024

**Öz:** Desalinasyon işlemi sonucu ortaya çıkan yoğun suyun deniz deşarjı tesisleri yayıcı boruları aracılığıyla alıcı ortamlara kontrollü bir şekilde tahliye edilmeleri için uygun tasarımın yapılması önemlidir. Uygun tasarımın yapılması için yoğun jetlerin alıcı ortamlardaki biçimlerinin ve davranışlarının iyi analiz edilmesi gereklidir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) modelleri, özellikle son yıllarda yoğun deşarjların modellenmesi ve yoğun jetlerin davranışlarının belirlenmesi için giderek artan bir sıklıkla kullanılmaktadırlar. Bu çalışmada literatürde yoğun deşarjlar üzerine farklı HAD yazılımları ve türbülans modelleri kullanılarak yapılmış çalışmalar sistematik olarak incelenmiştir. Çalışmanın ana amacı, farklı deşarj koşulları altında değişen parametrelerin yoğun jetlerin geometrik karakteristikleri ve karışma ve seyrelme süreçleri üzerindeki etkilerinin incelenmesidir. Ek olarak farklı HAD yazılımları ve türbülans modellerinin performanslarının karşılaştırılması ve değerlendirilmesi de hedeflenmiştir. Sonuçlar değişen deşarj parametrelerinin jetlerin biçimleri ve davranışlarını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Farklı deşarj ve alıcı ortam koşulları altında farklı modellerin değişken performanslar göstermektedir. En uygun performansı veren modelin kullanımının optimum tasarımı yapabilmek adına önemli olduğu görülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Yoğun su deşarjı, HAD, Yoğun jet, Karışma ve seyrelme

## A Review of Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling Studies on Dense Discharges

**Abstract:** Appropriate design of marine outfalls is of utmost importance for the safe disposal of brine, which is the byproduct of the desalination process. A thorough analysis of brine jet behavior and mixing and dilution in ambient environments is required for the optimum design. For these analyses, Computational Fluid Dynamics (CFD) models have been increasingly used in recent years. In this paper, studies carried out on dense discharges using different CFD software and turbulence models are systematically reviewed. It was aimed to investigate the effects of differing discharge parameters on brine jet behavior and dilution and to evaluate and compare the performances of different CFD software and turbulence models. Results revealed that differing discharge parameters affect brine jet behavior and dilution significantly; different models performed differently under altering discharge and ambient water conditions, and the use of the most suitable model for optimum discharge is important.

**Keywords:** Dense discharge, CFD, Dense jet, Mixing and dilution

\* Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Kanuni Yerleşkesi 61080, TRABZON

İletişim Yazarı: Mahmut Cenk SAYIL (cenksayil@ktu.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Kontrolsüz nüfus artışı endüstriyel ve zirai gelişmeler, su kıtlığı konusunu küresel ısınma ve iklim değişikliğinin de etkileri ile birçok ülkede ciddi bir problem haline getirmiştir (Lykkebo Petersen ve diğ., 2019; Baum ve diğ., 2019). Bu durum son yıllarda farklı teknolojiler kullanan farklı tipteki desalinasyon tesislerinin kullanılmasını yaygınlaştırmıştır. Desalinasyon tesislerinde deniz suyundan kullanılabilir temiz su elde edilebilmektedir ve bu sürecin sonunda yan ürün olarak çok yoğun tuzlu bir atıksu ortaya çıkmaktadır (Bashitashaaer ve diğ., 2015; Baawain ve diğ., 2015; Abessi ve Roberts, 2018). Bu yoğun su, tüm süreç boyunca kullanılan veya oluşan ön arıtma biyositleri, koagülantlar, antiskalantlar, köpük önleyici maddeler ve ağır metaller gibi kimyasalları da yüksek oranda içerebilmektedir (Moshiri-Tabrizi ve diğ., 2023).

Desalinasyon işlemi sonucu ortaya atık olarak çıkan bu yoğun suyun bertarafı için kullanılan yöntemlerden birisi de deniz deşarj sistemleridir. Deniz deşarj sistemlerinde evsel, zirai, endüstriyel, termal ve yoğun tuzlu sular karadaki bir tesiste belirli bir ön arıtmadan geçirilmektedir. Ardından deniz tabanından geçirilen bir boru hattıyla kıyıda güvenli bir mesafede, hattın en sonundaki yayıcı boru yardımıyla alıcı deniz ortamına bırakılmaktadır. Buradaki doğal süreçlerin de etkisiyle atıksuların öngörülen miktarda seyrelmesi beklenir (Berkün, 2006; Öztürk, 2011). Bütün dünyada yaygın olarak tercih edilen denize deşarj sistemleri, sunduğu etkili ve ekonomik çözümler ile her türlü atıksu bertarafı için uygun bir yöntemdir (Nemlioğlu, 2006; Berkün, 2017).

Deniz deşarjı tesislerinin uygun şekilde tasarlanmaması durumunda alıcı ortama tahliye edilen yoğun sular alıcı ortamda ani yoğunluk, tuzluluk ve sıcaklık değişikliklerine sebep olabilirler. Bunlara ek olarak içeriklerinde barındırdıkları kirletici maddeler sebebiyle alıcı ortamdaki canlı yaşamını ve halk sağlığını ciddi şekilde tehdit edebilmektedirler. Alıcı ortama deşarj edilen yoğun suyun sebep olabileceği bu istenmeyen sonuçların önüne geçilebilmesi için, tuzluluk oranının ve kirletici parametrelerin konsantrasyonlarının iyi bir seyrelme verimi ile belirli miktarda düşürülmesi gerekmektedir (Anılan, 2023). İyi bir seyrelme verimi elde edebilmek ise ancak iyi bir yayıcı boru tasarımı ile mümkündür. Bundan ötürü, yayıcı boruların hidrolik tasarımı deniz deşarjı yapılarının en önemli konusudur (Nemlioğlu, 2003).

Seyrelme verimini etkileyen faktörlerin başında yayıcı borudaki çıkış uçlarının sayısı, tipi, yönleri, açıları, çıkış uçları arası mesafeler gibi geometrik özellikler; yayıcı boru iç hidrolik parametreleri, deşarj edilen atıksuyun ve alıcı ortam suyunun fiziksel ve kimyasal özellikleri, atıksuyun alıcı ortam içerisindeki davranışı bulunmaktadır (Altuncu, 2004; Yılmaz, 2015). Dolayısıyla yayıcı boru tasarımının doğru yapılması için atıksu jetlerinin alıcı ortamdaki davranışlarının, seyrelme ve karışmanın iyi analiz edilmesi gerekmektedir.

Yayıcıların iç hidroliği, yoğun su jetlerinin özellikleri, çoklu çıkış ucu bulunan yayıcılardan deşarj yapılması durumunda meydana gelen jet girişimi olayı, atıksu jetinin çıktığı maksimum yükseklik ve yoğun su deşarjlarının konsantrasyonu gibi konularda detaylı birçok deneysel çalışma yapılmıştır (Cipollina ve diğ., 2005; Abou-Elhaggag ve diğ., 2011). Ancak fiziksel modellemeler hem oldukça zaman alıcı hem de maliyetleri yüksek yöntemler olduklarından, bunların uygulanması her çalışma kapsamında her zaman uygun olmayabilmektedir.

Bu noktada, deneysel çalışmalara ve saha çalışmalarına kıyasla uygulanması daha kolay, zamandan tasarrufu mümkün kılan, maliyeti daha düşük olan sayısal modelleme yöntemlerinin benimsenmesi ve kısıtlamaları da göz önünde bulundurularak bu amaçlar doğrultusunda kullanılması önem taşımaktadır. Bundan ötürü, özellikle son zamanlarda yoğun suyun alıcı ortamdaki davranışını anlamak adına sayısal modelleme yöntemleri giderek artan bir sıklıkta kullanılmaya başlanmıştır (Oliver ve diğ., 2008; Firoozabadi ve diğ., 2009; Abou-Elhaggag ve diğ., 2011; Muller ve diğ., 2011; Kheirkhah Gildeh ve diğ., 2015; Akbari ve Ebrahimi, 2016; Robinson ve diğ., 2016; Yan ve Mohammadian, 2017; Ünsal Karakuş, 2018; Ardalani ve Vafaei, 2019; Castro-Faccetti ve diğ., 2019; Yan ve Mohammadian, 2019; Yan ve diğ., 2019; Mohammadian ve diğ., 2020; Kheirkhah Gildeh ve diğ., 2021; Saeidi Hosseini ve diğ., 2022;

Moshiri-Tabrizi ve diğ., 2023; Saeidi Hosseini, 2024; Sayıl, 2024). Deniz deşarjı ile ilgili süreçlerde sayısal modeller, deşarj edilen atıksu için, fiziksel ve kimyasal mekanizmaları temsil eden taşınım ve dönüşüm denklemlerini çözerek farklı alıcı ortam koşulları altında atıksuyun davranışlarını analiz etmeye çalışırlar. Yoğun su deşarjı durumunda esas kirlilik parametresinin tuz olması dönüşüm mekanizmasının çok belirgin olmamasına sebep olmaktadır. Ancak türbülansdaki dalgalanmalardan ileri gelen yayılım temel mekanizmayı oluşturur (Palomar ve Losada, 2011; Abessi, 2018). Dolayısıyla türbülans modellerinden faydalanan HAD modellerinin kullanımı daha doğru sonuçların elde edilmesinde etkilidir.

Bu çalışmada yoğun deşarj, yoğun jet karakteristikleri ve davranışı, sayısal modelleme yöntemleri ve HAD modelleri ile ilgili genel bilgiler verilmiş, ardından literatürde yoğun deşarj modellemesi için özellikle son yıllarda giderek artan bir sıklıkta kullanılan HAD modellemelerinin kullanıldığı çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmalar kapsamında farklı parametrelerin yoğun jet karakteristikleri ve seyrelme üzerindeki gözlemlenen etkileri açıklanmış, aynı zamanda farklı türbülans modellerinin belirli deşarj koşulları altında gösterdikleri performanslar üzerine yapılan kıyaslamalara da yer verilmiştir.

## 2. YOĞUN JET DAVRANIŞI ve MODELLEMESİ

### 2.1. Yoğun Jet Karakteristikleri

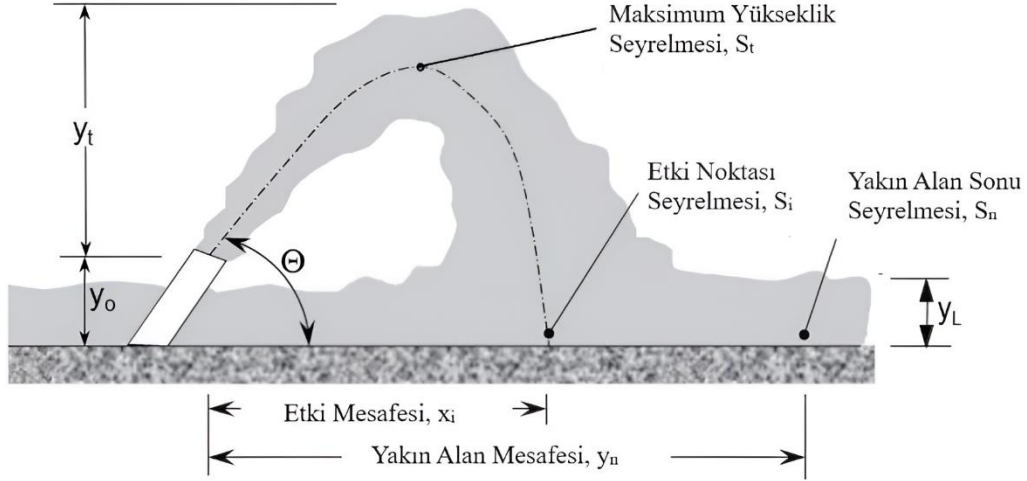
Bir yayıcı borudan alıcı deniz ortamına deşarj edilen atıksuyun hareketi, çıkış ucundan çıkarken sahip olduğu jet hızına ve atıksu ile alıcı ortam suyu arasındaki yoğunluk farkına bağlıdır. Atıksuyun yoğunluğunun alıcı ortam suyu yoğunluğundan az olması durumunda pozitif yüzücülük meydana gelirken, atıksu yoğunluğunun alıcı ortam suyu yoğunluğundan fazla olması durumunda negatif yüzücülük olur. Negatif yüzücülük durumu atıksuyun çökmesidir; yoğun su deşarjlarında atıksu çöker ve bu “yoğun deşarj” olarak adlandırılır. Deşarj işlemi yüksek bir hızla yapılmışsa bu “yoğun jet” olarak ifade edilir. Desalinasyon artığı yoğun tuzlu suların alıcı ortamda çökerek kalmaları, bunların sebep oldukları istenmeyen sonuçların önüne geçilmesini zorlaştırmaktadır. Eğer seyrelme yetersiz düzeyde kalırsa, yoğun suların içeriklerindeki kirlenici parametrelerin ve tuzluluklarının yasalarca belirtilen şartları sağlayamaması durumu söz konusu olabilmektedir.

Genel olarak, yoğunluğu alıcı ortam yoğunluğundan belirgin bir biçimde fazla olan yoğun suyun deşarj edildikten sonra doğrudan kendi üzerine çökme eğiliminde olmasından ötürü, deşarj işleminin yatayla belirli bir açı yapacak şekilde yüksek bir hız ile alıcı ortama verilmesi tercih edilmektedir. Burada amaç, yoğun suyun hemen tabana çökmesini bu açıyla yönlendirme ile engelleyerek jet iz düşümünün uzatılması ve daha iyi bir seyrelme veriminin elde edilmesidir (Darama, 2009).

Jet yükseldikçe, onu seyrelten alıcı ortam suyunu sürükler. Jetin yoğunluğunun alıcı ortam suyu yoğunluğundan fazla olması, belirli bir maksimum yükseltiye çıktıktan sonra tabana doğru çökmeye başlamasına neden olur ve sürüklenme, karışım ve seyrelme bu saçağın çöküşü esnasında da devam eder. Jet tabana ulaştıktan sonra akış, hareketine yatayda hareket eden ve sürüklenip seyrelmeye devam eden bir türbülanslı yoğunluk akıntısı olarak devam eder. Yayıcı borudan belirli bir mesafe uzaklıkta, bu türbülans kendisinden kaynaklı yoğunluk tabakalaşmasının etkisi altında çöker ve aktif karışım temelde sonlanır. Jetin yükselmesi, çöküşü ve türbülansın çöküşünün gerçekleştiği noktaya kadar olan yatay hareketini kapsayan bölge “yakın alan bölgesi” olarak tanımlanır. Yakın alanın ötesinde karışım esas olarak alıcı ortamdaki türbülanslardan kaynaklanır. Bu bölge “uzak alan bölgesi” olarak adlandırılır ve burada karışım yakın alana göre çok daha yavaştır (Roberts, 2018).

Yatayla  $\theta$  açısı yapacak şekilde deşarj edilen yoğun su jetlerinin bu ana özelliklerinin tanımlamaları Şekil 1’de görülmektedir. Jetin en üst noktasının bulunduğu maksimum yükseklik  $y_t$  ile gösterilmektedir. Jetin merkez çizgisinin deniz tabanı ile temas ettiği nokta “etki noktası” olarak adlandırılır, buradaki seyrelmeye “etki noktası seyrelmesi” denir ve bu değer  $S_i$  ile

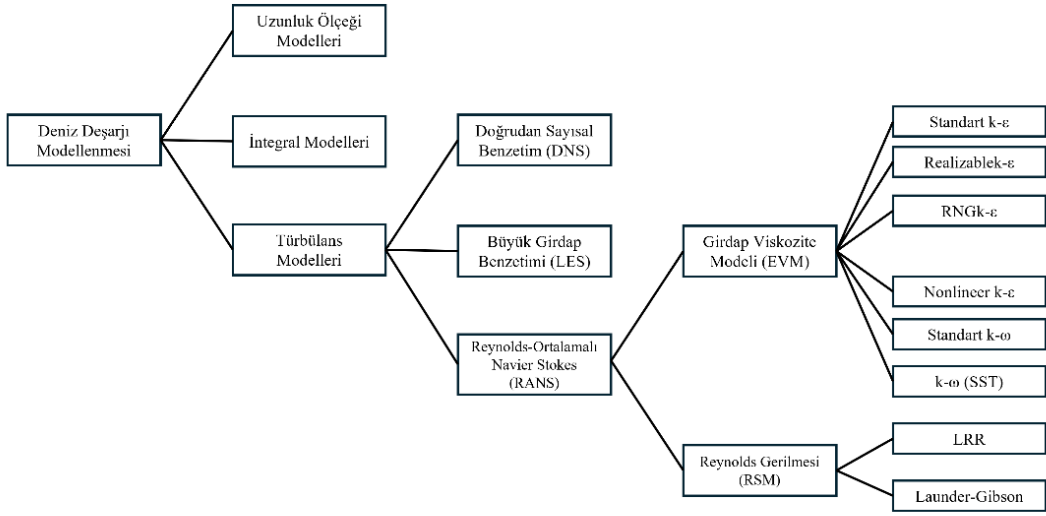
gösterilir. Çıkış ucuyla etki noktası arasındaki yatay mesafe  $x_i$ , türbülans çökmesinin gerçekleştiği nokta arasındaki yatay mesafe ise  $x_n$  ile gösterilir. Bu aynı zamanda yakın alanın uzunluğu olarak adlandırılır. Bu noktadaki seyrelme “yakın alan seyrelmesi” olarak adlandırılır ve  $S_n$  ile gösterilir (Roberts ve diğ., 1997).



**Şekil 1:**  
*Bir açılı yoğun jetin karakteristikleri (Roberts ve diğ., 1997)*

## 2.2. Yoğun Jet Davranışı Modellemesi

Literatürde üç ana tip sayısal modelleme yöntemine rastlanmaktadır. Bunlardan birisi, temelini boyut analizinin oluşturduğu, yarı ampirik uzunluk ölçeği modelleridir. Örnek olarak CORMIX yazılımı verilebilir. CORMIX, tek ve çoklu jetlerin modellenmesini mümkün kılmaktadır. Bir başka sayısal modelleme yöntemi de korunum denklemlerinin integrasyonuna dayanan integral modellerdir (Moshiri-Tabrizi ve diğ., 2023). İntegral modeller oldukça karmaşık türbülanslı karışım olaylarının analitik olarak basitleştirilmesi esasına dayanırlar. Dolayısıyla genelde deneylerden elde edilen katsayılarla birlikte, bir yarı ampirik sürüklenme kapatma yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu modeller kararlı durumdaki jet doğrultularını düzenleyici karışım bölgesine, ilk karışım bölgesinin sonuna veya en yakın sınırlara kadar tahmin ederler ve karışımın davranışıyla ilgili detaylar sunamazlar (Jirka, 2006; Abessi, 2018). Son olarak, HAD yazılımları son dönemde artan bir sıklıkta kullanılmaktadırlar (Lee ve Cheung, 1990; Frick, 2004; Jirka, 2004; Moshiri-Tabrizi ve diğ., 2023). Teknolojinin ve hesaplama yöntemlerinin gelişmesi ile deniz deşarjında da HAD yazılımlarının kullanımı yaygınlaşmıştır. HAD yazılımları, integral yöntemlere kıyasla daha az basitleştirme ve varsayım yaptığından daha başarılı sonuçlar verebilmektedirler (Baum ve Gibbes, 2020; Saeidi Hosseini ve diğ., 2022). Günümüzdeki gelişmiş hesaplama tekniklerine rağmen, yakın alan seyrelmesi için yapılan analizlerde, HAD simülasyonlarının çözümü için birkaç güne varan süreler söz konusu olabilmektedir. Bu, HAD modellemeleri durumunda, daha basit yaklaşımların kullanıldığı ve genelde dakikalar içerisinde sonuç veren diğer yöntemlere kıyasla çok daha fazla hesaplama maliyeti olduğu anlamına gelmektedir. Ancak bütün bunlara rağmen, uygun bir biçimde kalibre edilmiş ve doğrulanmış bir HAD modeli, araştırmacıları integral modellerin varsayımlarından ileri gelen kısıtlamalara bağlı kalmaktan kurtararak, jet dinamiklerinin yüksek çözünürlüklü ve üç boyutlu görsellerini sunabilmektedir (Robinson ve diğ., 2016). Şekil 2 deniz deşarjı modellemesi için kullanılan bazı modelleme yaklaşımlarını özetlemektedir.



**Şekil 2:**  
*Deniz deşarjı modellenmesi yaklaşımları (Saeidi Hosseini, 2024)*

### 3. HAD MODELLEMESİ ve KORUNUM DENKLEMLERİ

#### 3.1. HAD Modellemesi

HAD simülasyonları temelde kütle, momentum ve enerjinin korunumu ilkelerine dayanmaktadır. Bu korunum denklemleri, adımlar halinde çözülebilecek cebirsel denklemlere ayrıştırılır ve kendi içinde çözülür. HAD simülasyonları aracılığıyla akışkanların hızları, hacim oranları, basınçları, sıcaklıkları gibi en temel ve önemli parametreleri hakkında bilgi edinmek ve bunları optimum tasarımları yapmak amacıyla kullanmak mümkündür.

HAD modellerinin fiziksel modellere göre büyük avantajları vardır. Bunlar bilim insanları ve mühendislere, irdelenen problem üzerine fiziksel model kurmadan çalışma ve analiz yapma imkânı sağlarlar; zamandan ve paradan tasarruf etmeyi mümkün kılarlar.

HAD kapsamında sonlu hacimler, sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemleri gibi metotlar kullanılarak Navier-Stokes denklemleri olarak da bilinen akışkan akışının kısmi diferansiyel denklemleriyle birlikte türbülanslı dağılım ve kimyasal reaksiyonlar gibi süreçleri tanımlayan denklemler çözülür (ANSYS CFX-Solver Modeling Guide, 2013; Abessi, 2018). Bu metotlar kullanılarak kararlı ve kararsız akışları hem türbülanslı hem laminer akış koşulları altında çözümlenmeyi başaran gelişmiş yazılımlar üretilmiştir. Desalinasyon artığı yoğun tuzlu suyun deşarjında akış türbülanslıdır. Türbülanslı akışlar gibi karmaşık süreçlerin modellenmesinde türbülans modellerinden faydalanan HAD yazılımlarının kullanımı önemlidir (Abessi, 2018).

Türbülans modellemesinde genel üç ana yaklaşım kullanılır: Doğrudan Sayısal Benzetim (Direct Numerical Solution-DNS), Büyük Girdap Benzetimi (Large Eddy Simulation -LES) ve Reynolds-ortalamalı Navier-Stokes denklemleri (Reynolds-averaged Navier-Stokes Equations-RANS) (Şekil 2). Bu türbülans modellerinin avantaj, kısıtlama ve uygulama alanları Tablo 1'de özetlenmiştir.

**Tablo 1. Deniz deşarjı modellemesinde kullanılan farklı yaklaşımların karşılaştırılması (Saeidi Hosseini, 2024)**

| Türbülans Modeli | Avantajlar   | Kısıtlamalar   | Uygulamalar  |
|------------------|--|--|--|
| DNS              | Navier-Stokes denklemlerini tahmin yapmadan çözer. Bütün zamansal ve mekansal türbülans ölçeklerini çözer.                                     | Hesaplama maliyeti çok yüksek<br>Bütün mekansal ölçekleri yakalamak için çok detaylı ağ örgüsü gerekli                   | Basit akış ya da düşük Reynolds sayılı akış/Mühendislik problemlerine daha az uygulanabilirlik |
| RANS             | Hesaplama maliyeti en düşük olan ve uygulaması kolay   | Tüm akış alanında doğruluk sağlanamıyor  | En çok kararlı akımlar için uygun  |
| LES              | Büyük ölçekli girdapları doğrudan hesapladığı için yüksek doğruluk<br>Sadece küçük ölçekler modellendiği için DNS'e göre az hesaplama maliyeti | Yüksek hesaplama maliyeti<br>Küçük ölçekli türbülans<br>Karmaşık geometriler için teorisinin geliştirilmeye ihtiyacı var | Girdap ve sirkülasyonlu kararsız akımlar   |
| DES              | RANS ve LES modellerinin iyi yanlarını bir araya getirir   | RANS-LES arayüzünü birleştirmek zordur<br>Büyük hesaplama alanları için uygun değil                                      | Önemli derecede ayrılmış akımlar   |

Bütün türbülans uzunluk ölçeklerini çözmek için kullanılan birçok farklı tip RANS modelinin arasından, girdap viskozite  $k-\varepsilon$  modelleri en yaygın olarak kullanılanlardır. Bu modeller makul miktarda hesaplama maliyeti karşılığında oldukça doğru sonuçlar vermektedirler. Bu modellerde türbülansın yerel ortalama durumu türbülans kinetik enerjisi ( $k$ ) ve türbülans yayılım oranı ( $\varepsilon$ ) yardımı ile karakterize edilir (Versteeg ve Malalasekera, 2007; Roberts ve diğ., 2010). Günümüzde türbülans modellemesi ile deniz deşarjı tesislerinin optimum tasarımı konusunda en sık kullanılan yazılımların başında ise ANSYS Fluent, ANSYS-CFX, OpenFOAM ve Fluidity gelmektedir.

### 3.2. Korunum Denklemleri

ANSYS Fluent yardımıyla her türlü akışın korunum denklemleri çözülebilir, aynı zamanda farklı türden akışkanların karışımının simüle edilmesi gerektiği durumlarda tür denklemleri de dâhil edilerek çözümlene yapılabilir. Eğer akış türbülanslıysa, ilave taşınım denklemleri de çözülebilir. Hem sıkıştırılabilir hem de sıkıştırılamaz akışkanlar için, kütle korunumu, ya da süreklilik denklemi en genel haliyle aşağıdaki gibidir (ANSYS Fluent Theory Guide, 2011):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

Burada  $S_m$  dağılmış ikinci fazdan birinci sürekli faza eklenen kütle temsil etmektedir. Süreklilik denklemi olarak da bilinen kütle korunumu denklemi, bir kontrol hacmi içerisindeki kütle değişim oranının kontrol hacmine giren veya çıkan net kütle akış oranına eşit olduğunu ifade eder. Bir eylemsiz referans sisteminde momentumun korunumu (2) ile ifade edilir (ANSYS Fluent Theory Guide, 2011):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

Burada  $p$  statik basıncı,  $\bar{\tau}$  gerilme tensörünü,  $\vec{g}$  ve  $\vec{F}$  sırasıyla yerçekimsel cisim kuvvetlerini ve dış cisim kuvvetlerini temsil etmektedir. Navier-Stokes denklemi olarak da bilinen momentumun korunumu denklemi, bir akışkan elemanı içerisindeki momentum değişim oranının eleman üzerine etkiyen kuvvetlere eşit olduğunu ifade eder. Enerjinin korunumu denklemi ise (3) ile ifade edilir (ANSYS Fluent Theory Guide, 2011):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = -\nabla \cdot \left( \sum_j h_j J_j \right) + S_h \quad (3)$$

Enerjinin korunumu denklemi, bir akışkan elemanındaki toplam enerji değişim oranının elemana giren ve çıkan enerji akılarının toplamına eşit olduğunu belirtir (ANSYS Fluent Theory Guide, 2011).

### 3.3. HAD Modellerinin Doğrulanması, Kalibrasyonu ve Ağ Hassasiyeti Analizleri

Fiziksel modelleme yöntemlerine göre önemli avantajları bulunan sayısal modelleme yöntemlerinin belirgin bir dezavantajı da doğrulanmaya ihtiyaç duymalarıdır. Kurulan sayısal modelin gerçek fiziksel olayları yeteri kadar doğru bir biçimde temsil edebildiklerinden emin olunması gerekir. Buna ek olarak, modelin referans koşullar veya benzeri şartlar için yapılacak mühendislik tasarımlarında kullanılabilmesinin de ortaya konulması gerekmektedir. Bu sebeplerden ötürü sayısal modelleme çalışmaları yapılırken, modelin verdiği sonuçların deneysel veya saha çalışması verileri kullanılarak doğrulanması gerekir (Sayıl, 2024).

HAD kullanıcıları benzer şartlar için yapılmış deneyler sonucunda elde edilen veri setlerini kullanarak model katsayılarını kalibre etmek, iteratif çözümlerde yeteri kadar bir yakınsamanın sağlandığından ve oluşturulan ağ örgüsünün yeterli olduğu olduğundan emin olmak istemektedirler. Ancak genellikle yakınsamanın yeterliliği ile ilgili belirli bir niceliksel kriter bulunmamaktadır. Ek olarak, deney sonuçları da kendi içlerinde belirsizlikler barındırabilmektedirler (Bussoletti, 1994). Bütün bunlara rağmen, günümüzde bilgisayar bilimlerinde kaydedilen gelişmeler sayesinde sayıları ve hesaplama güçleri giderek artan başarılı HAD yazılımları sayesinde sonuçları olumsuz etkileyebilecek etkenlerin en aza indirgenmesi ve başarılı modellerin kurulması mümkün olmaktadır.

Bir HAD modelin kurulması aşamasında dikkat edilmesi gereken en temel hususlar ağ örgüsünün tipi ve çözünürlüğünün iyi belirlenmesi, uygun türbülans modelinin seçilmesi, sınır koşullarının doğru belirtilmesi ve iterasyon katsayılarının, ayırıklaştırma şemalarının ve iterasyon sayısının belirlenmesi şeklinde belirtilebilir (Hajdukiewicz ve diğ., 2013). Hajdukiewicz ve diğ. (2013) çalışmalarında HAD modellerinin kalibrasyonu ve doğrulanması için, süreç boyunca yapılması gereken en temel şeyleri kapsayan bir yöntem açıklamışlardır. Yöntem temelde yeteri kadar iyi bir yoğunluğa sahip bir ağ örgüsünün oluşturulması ve model kriterleri sağlamadığı sürece önemli parametrelerin kalibrasyonunun tekrar yapılarak güvenilir bir model oluşturulana kadar sürecin tekrar edilmesine dayanmaktadır.

Ağ örgüsünün kalitesi HAD modellerinin doğruluğunu çok büyük oranda etkileyebilen çok önemli bir faktördür. Bir ağ örgüsünün kalitesi kullanılan sonlu eleman sayısı, ağ örgüsünün sıklığı, kritik bölgelerde yeterli sıkılaştırmanın yapıp yapılmaması gibi etkenlere bağlıdır. Ağ örgüsü duyarlılık analizleriyle ağ örgüsünün yeterli kalitede olup olmadığı, model sonuçlarının ağ örgüsünün daha da iyileştirilmesi durumunda daha doğru hale gelip gelmeyecekleri gibi konular açıklığa kavuşturulmalıdır. Bu analiz temelde ağ örgüsündeki eleman sayısının artırılması ile birlikte elde edilen farklı model sonuçlarının doğruluklarının kıyaslanması ile yapılmaktadır. Belirli bir noktadan sonra model doğruluğunda kayda değer bir iyileşmenin gözlemlenmediği yerde, ağ örgüsü bağımsızlığının sağlanmış olduğu ifade edilir (Hajdukiewicz ve diğ., 2013).

## 4. YOĞUN JET KARAKTERİSTİKLERİ ve SEYRELMEYİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Literatürde yoğun jetlerin en önemli özelliklerinden birisi olan jet izdüşümünü doğrudan etkileyen geometrik özellikler olan maksimum saçak yüksekliği, etki mesafesi, yakın alan mesafesi ve dönüş noktası mesafesini etkileyen parametreler ve bunların etkileri üzerinde

durulmuş, hangi deşarj parametresinin hangi jet karakteristiğini nasıl etkilediğini hem deneysel hem de sayısal çalışmalar ile anlaşılmasına çalışılmıştır. Yoğun deşarjlarda deşarjdan ileri gelen türbülansla, yüksek jet hızının ve Froude sayısının etkisiyle birlikte atıksu belirli bir noktaya kadar yukarı doğru hareket etse de yoğunluğunun alıcı ortam yoğunluğundan fazla olması sebebiyle bu belirli noktadan sonra tabana doğru hareket etmeye başlar. Bu belirli noktadaki yükseklik maksimum saçak yüksekliği olarak ifade edilmektedir.

Değişen deşarj parametrelerinin üzerindeki etkileri incelenen önemli bir başka konu ise, deniz deşarjı işleminin esasını oluşturan seyrelme sürecidir. Atık su ve alıcı ortam suyunun karışması ve özellikle etki noktası, dönüş noktasında ve genel olarak yakın alan bölgesinde meydana gelen seyrelme de incelenen önemli bağımlı değişkenlerdir. Tablo 2 yoğun deşarj üzerine yapılan HAD modellemesi çalışmalarını, bu çalışmalarda kullanılan bağımsız değişkenleri ve bunların üzerindeki etkilerinin incelendiği bağımlı değişkenleri özetlemektedir. Tabloda  $F$ : Froude sayısı,  $Ri$ : Richardson sayısı,  $B$ : yüzücülük,  $Z_m$ : düşey deşarjlar için maksimum deşarj yüksekliği,  $X_r$ : dönüş noktası mesafesi,  $S_r$ : dönüş noktası seyrelmesi,  $Y_m$ : jet merkez çizgisinin en yüksek noktası,  $S_m$ : bu noktadaki seyrelmedir. Bu tabloda özetlenen çalışmalarda genel olarak üç boyutlu modelleme yapılırken, Moshiri-Tabrizi ve diğ. (2023) iki boyutlu modelleme yapmayı tercih etmişlerdir. Alıcı ortam koşulları genel olarak durgun tercih edilmişken, Akbari ve Ebrahimi (2016) ve Ünsal Karakuş (2018) dinamik, akıntılı alıcı ortam koşulu altında irdeleme yapmışlardır. Moshiri-Tabrizi ve diğ. (2023) çalışmasında ise hem durgun hem de dinamik alıcı ortamlarda yapılan yoğun deşarjlar incelenmiştir. Sınır koşulları atanırken deniz tabanı ve yan yüzeyler için genellikle duvar sınır koşulu tercih edilirken deşarj edilen atıksuyun alıcı ortama giriş yaptığı yüzeyler hız girişi, çıkış yaptığı yüzeyler ise dışarı akış olarak tanımlanmıştır. Deniz yüzeyleri için ise genelde basitleştirme, hesaplama maliyetini düşürme ve daha karmaşık süreçlerin daha verimli bir şekilde modellenebilmesini mümkün kılmak amacıyla simetri sınır koşulu tercih edilmiştir.

**Tablo 2. Yoğun Deşarj Üzerine Yapılan HAD Modellemesi Çalışmalarının Özeti**

| Çalışma                         | HAD Yazılımı              | Türbülans Modeli  | Bağımsız Değişkenler  | Bağımlı Değişkenler                                 | Çalışmanın amacı   |
|---------------------------------|---------------------------|---|---|---|--|
| (Vafeiadou ve diğ., 2005)       | ANSYS CFX                 | SST* $k-\omega$   | Açı   | $y_b, x_b$  | Deşarj açısının jet geometrisi üzerindeki etkisini araştırmak                      |
| (Oliver ve diğ., 2008)          | ANSYS CFX                 | Standart $k-\epsilon$   | Açı, $F$  | Jet izdüşümü, $y_r$                                 | $k-\epsilon$ model performansını değerlendirmek                                    |
| (Firoozabadi ve diğ., 2009)     | HAD KODU (SIMPLEC ŞEMASI) | -Lauder ve Sharma LRN $k-\epsilon$<br>-Standart $k-\epsilon$  | Debi, jet hızı, $Ri$  | Hız profilleri, yoğunluk tabakasının yüksekliği     | Önerilen modeli deney sonuçlarıyla kıyaslamak                                      |
| (Abou-Elhaggag ve diğ., 2011)   | ANSYS Fluent              |   | Yoğun su yoğunluğu, jet hızı                                    | $Z_m$   | Önerilen modeli deney sonuçlarıyla kıyaslamak                                      |
| (Kheirkah Gildeh ve diğ., 2015) | OpenFOAM                  | -RNG $k-\epsilon$<br>-Realizable $k-\epsilon$<br>-Lineer olmayan $k-\epsilon$<br>-LRR<br>-Lauder-Gibson | Açı, çıkış ucu çapı, jet hızı, $F$ , farklı türbülans modelleri | $y_b, X_r$ , jet izdüşümü, seyrelme, hız profilleri | Farklı modellerin performanslarını kıyaslamak                                      |
| (Akbari ve Ebrahimi, 2016)      | ANSYS Fluent              | $k-\epsilon$  | Alıcı ortam akıntısı, çıkış ucu sayısı                          | Jet izdüşümü, $y_r$                                 | Sığ sularda yapılan deşarjlardaki seyrelme verimini HAD modelleri ile tahmin etmek |
| (Robinson ve diğ., 2016)        | Fluidity                  | -Standart $k-\epsilon$<br>-Smagorinsky LES  | Farklı türbülans modelleri                                      | Seyrelme, $y_b, x_b, S_r$                           | HAD modellerinin yakın alan karışım tahminlerini değerlendirmek                    |
| (Yan ve Mohammadian, 2017)      | OpenFOAM                  | -Standart $k-\epsilon$<br>-Yüzücülük-düzenlemeli $k-\epsilon$   | $F$ , yanal sınırlama indeksi                                   | Seyrelme, konsantrasyon                             | Farklı $k-\epsilon$ modellerinin performanslarını kıyaslamak                       |



Tablo 2. (devamı)

|                                 |                             |  |   |   |  |
|---------------------------------|-----------------------------|--|---|---|--|
| (Zhang ve diğ., 2017)           | OpenFOAM                    | -LES<br>- $k-\varepsilon$  | Açı, $F$                                    | $y_b, X_r, S_r$   | LES yaklaşımının performansını değerlendirmek                                    |
| (Ünsal Karakuş, 2018)           | ANSYS Fluent                | RNG $k-\varepsilon$  | Alıcı ortam akıntısı                        | Karışım ve yayılma                                      | Alıcı ortam akıntılarının yoğunluk akıntıları üzerindeki etkilerini incelemek    |
| (Ardalan ve Vafaei, 2019)       | OpenFOAM                    | Realizable $k-\varepsilon$   | Jet hızı, $F$ , tuzluluk, sıcaklık, $B$     | $y_b, X_r, S_r, Y_m, S_m$                               | Modelin termal-tuzlu deşarjların modellenmesi için uygunluğunu değerlendirmek    |
| (Castro-Faccetti ve diğ., 2019) | ANSYS Fluent                | -Standart $k-\varepsilon$<br>-RNG $k-\varepsilon$<br>-Realizable $k-\varepsilon$<br>- $k-\omega$ SST | Açı, çıkış uçları arası mesafe              | Jet izdüşümü, hız, seyrelme, $y_b, X_r$ , jet girişi    | Model doğrulama ve doğrulanan modeli gerçek bir deşarj sistemi için uygulamak    |
| (Yan ve diğ., 2019)             | OpenFOAM                    | -Standart $k-\varepsilon$<br>-RNG $k-\varepsilon$  | Açı, çıkış ucu sayısı                       | Karışma, seyrelme, jet izdüşümü, jet girişi             | Farklı $k-\varepsilon$ modellerin sonuçlarını deney sonuçlarıyla kıyaslamak      |
| (Yan ve Mohammadian, 2019)      | OpenFOAM                    | -Standart $k-\varepsilon$<br>-RNG $k-\varepsilon$  | Çıkış uçları arası mesafe                   | Jet girişi, seyrelme, $y_b, x_b, S_i$                   | Farklı $k-\varepsilon$ model sonuçlarını deney sonuçlarıyla kıyaslamak           |
| (Castro-Faccetti, 2020)         | ANSYS Fluent                | -Standart $k-\varepsilon$<br>-RNG $k-\varepsilon$<br>-Realizable $k-\varepsilon$<br>- $k-\omega$ SST | Açı, $F$                                    | $y_b, X_r, S_m, S_r$                                    | Model doğrulama ve doğrulanan modeli gerçek bir deşarj sistemi için uygulamak    |
| (Yan ve diğ., 2020)             | OpenFOAM                    | -Standart $k-\varepsilon$<br>-RNG $k-\varepsilon$<br>-Standart $k-\omega$<br>- $k-\omega$ SST        | Çıkış uçları arası mesafe, $F$              | Konsantrasyon, jet girişi, jet yayılımı                 | Farklı modellerin performanslarını kıyaslamak                                    |
| (Danish ve Murali, 2021)        | ANSYS Fluent                | Realizable $k-\varepsilon$   | Çıkış ucu sayısı ve mesafesi                | Hız profilleri, seyrelme                                | HAD modeller ile optimum yayıcı tasarımı yapmak                                  |
| (Kheirkah Gildeh ve diğ., 2021) | OpenFOAM                    | - Realizable $k-\varepsilon$<br>- $k-\omega$ SST<br>- $v^2-f$<br>-LRR<br>-SSG                        | Açı, deşarj derinliği, $F$                  | $X_r$ , minimum yüzey seyrelmesi, akış rejimleri, $S_r$ | Farklı modellerin performanslarını kıyaslamak                                    |
| (Kheirkah Gildeh ve diğ., 2022) | OpenFOAM                    | -LRR<br>-RSM   | $F$ , deşarj derinliği                      | $Z_m$ , seyrelme  | Sayısal modellerin sığ sularda yapılan düşey deşarjlar için uygunluğu belirlemek |
| (Moshiri-Tabrizi ve diğ., 2023) | 2D HAD KODU (SIMPLE ŞEMASI) | -SST $k-\omega$  | $F$ , alıcı ortam akıntısı                  | $y_b, S_i$  | 2D HAD modellerinin performanslarını 3D modellerle kıyaslamak                    |
| (Amiri ve diğ., 2024)           | OpenFOAM                    | LES  | Çıkış ucu tipi                              | Jet izdüşümü, seyrelme, $y_b, S_r, S_i, X_r, X_i$       | Model sonuçlarını deneysel sonuçlarla kıyaslamak                                 |
| (Saeidi Hosseini, 2024)         | OpenFOAM                    | -LRR<br>-Standart $k-\varepsilon$<br>-RNG $k-\varepsilon$  | Çıkış ucu sayısı, çıkış uçları arası mesafe | Jet girişi, $y_b, x_i, S_i$                             | Reynolds Gerilmesi Modelinin çoklu yoğun jetler için uygunluğunu araştırmak      |

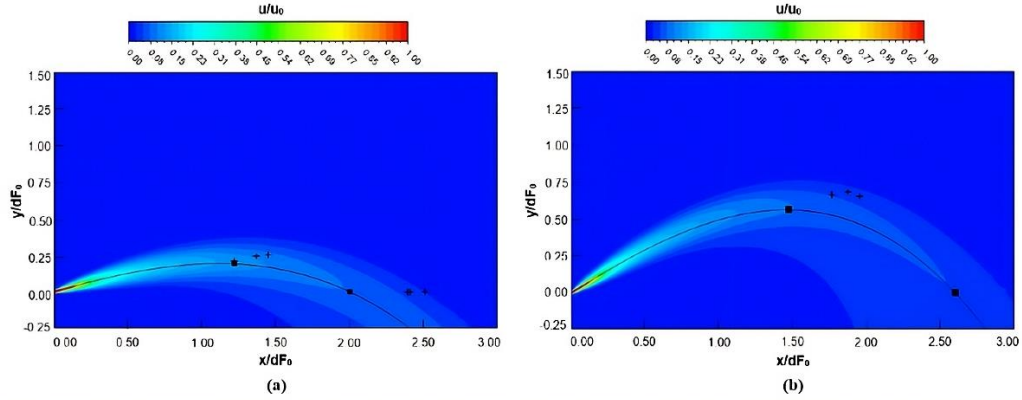
#### 4.1. Deşarj Açısının Etkileri

Yoğun deşarjlar genelde yatayda veya düşeyde yapılma yerine bir ara açıyla gerçekleştirilirler. Yoğun suyun yatayla daha dik bir açı yapacak şekilde tahliyesinin, akışkanın daha uzağa gidebilmesini ve daha iyi bir seyrelme verimi elde edilebilmesini mümkün kıldığı literatürde belirtilmiştir (Abessi ve Roberts, 2015; Abessi ve Roberts, 2016; Abessi ve Roberts,

2018; Amiri ve diğ., 2024). Yatayla  $\theta$  açısı yapan çıkış ucundan deşarj edilen yoğun su jeti, yüksek jet hızından ve başlangıç momentumundan ileri gelen etkiyle, maksimum çıkış yüksekliği ( $Z_m$ ) olarak adlandırılan bir denge noktasına kadar yükselir. Jetle alıcı ortam arasında önemli miktarda basınç farkı vardır. Bu basınç farkı ve türbülanslı hız kayması sebebiyle, yoğun su jeti alıcı ortam suyunu yutar ve bu da oldukça türbülanslı bir karışım bölgesi oluşmasına sebep olur. Bunun sonucunda yoğun su jeti alıcı ortamda daha iyi bir seyrelmeye uğrar, tuzluluk oranı ve kirletici parametre konsantrasyonu güvenli seviyelere iner (Abessi ve Roberts, 2017; Moshiri-Tabrizi ve diğ., 2023).

Literatürde optimum deşarj açısını belirlemek için yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Zeitoun ve diğ. (1972) deneysel çalışmalarında  $60^\circ$  deşarj açısının yoğun su deşarjları için en uzun jet iz düşümünü ve en iyi seyrelme verimini sağladığını saptamışlar; daha sonra bu yaklaşım belirli bir süre boyunca literatürde genel olarak kabul görmüştür. Ancak bu kabul tüm koşullar altında geçerli olmayabilmektedir. Sığ sularda yapılan yoğun deşarjlarda, seyrelme verimi için gerekli olan yüksek jet hızı, dik açılarla yapılan deşarjlarda deşarj edilen yoğun su jetinin su yüzeyiyle etkileşime girmesine sebep olabilmekte; bu da seyrelbilecek yoğun su miktarını azaltabilmekte ve akış dinamiklerini değiştirebilmektedir. Yoğun su jetinin su yüzeyiyle etkileşimi sonucu akış koşullarının değişmesi, karışım ve seyrelmenin de bundan etkilenmesi durumunda oluşan koşul “sığ su koşulu” olarak adlandırılmaktadır (Abessi ve Roberts, 2016). Jirka (2008) daha yakın zamanda elde edilen laboratuvar sonuçlarından faydalandığı ve CorJet integral model yöntemini kullandığı çalışmasında en uzun etki noktası mesafesinin  $30^\circ$ - $45^\circ$  aralığında elde edildiğini, maksimum saçak yüksekliği noktasındaki seyrelme değerleri açısından CorJet’in  $45^\circ$  deşarj açısını optimum olarak gösterdiğini ancak bu değer  $30^\circ$ - $60^\circ$  aralığında olabileceğinin ve taban eğimi arttıkça optimum açı değerlerinin düştüğünü gözlemlemiştir. Genel olarak kıyıya yakın yerlerde yapılan eğimli negatif yüzücü jet deşarjlarında  $30^\circ$ - $45^\circ$  deşarj açısı aralığının; maksimum saçak yüksekliğinde en yüksek seyrelmeyi sağlaması, etki noktasında yüksek seyrelme değerleri elde etmeyi mümkün kılması, etki mesafesini artırması ve deniz tarafında momentumu artırması ve önemli ölçüde daha düz jet yörüngeleri sağlaması sebeplerinden ötürü en uygun aralık olduğu sonucuna varmıştır. Abessi ve Roberts (2016) çalışmaları sonucunda derin sularda  $60^\circ$ ’nin etki noktası ve yakın alan seyrelmesi için iyi sonuçlar verdiğini, ancak su derinliği azaldıkça  $30^\circ$  deşarj açısının daha iyi seyrelme verimi sağladığını, jetin yüzeyle etkileşimini azaltması sebebiyle  $30^\circ$  deşarj açısının sığ sularda tercih edilebileceğini ifade etmişlerdir. Dolayısıyla deşarj koşullarının, özellikle alıcı ortamın sığ su kategorisine alınıp alınmayacağına iyi belirlenmesi ve buna uygun deşarj açısının seçilmesi seyrelme verimi açısından son derece önemlidir. Bu sebeplerden ötürü, deşarj açısı, yoğun deşarjların HAD modelleriyle incelendiği çalışmalarda etkileri farklı koşullar altında sıklıkla incelenen önemli bir parametredir.

Deşarj açısının  $y_t$  üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmalarda genellikle açının artmasının  $y_t$  değerini de artırdığı görülmüştür (Oliver ve diğ., 2008; Kheirkah Gildeh ve diğ., 2015; Zhang ve diğ., 2017; Castro-Faccetti ve diğ., 2019; Castro-Faccetti, 2020). Bu durum literatürdeki bazı diğer deneysel ve sayısal çalışmaların bulgularıyla uyum içerisindedir (Zeitoun ve diğ., 1972; Cipollina ve diğ., 2005; Jiang ve diğ., 2014; Crowe ve diğ., 2016). Şekil 3 Castro-Faccetti ve diğ. (2019) çalışmasında deşarj açısının  $y_t$  üzerindeki etkilerine dair bulgularını göstermektedir. Şekilde model sonuçları Lai ve Lee (2012), Oliver ve diğ. (2013) ve Crowe ve diğ. (2016) çalışmalarının deneysel sonuçları ile kıyaslanmıştır:



**Şekil 3:**

a) 15°, b) 30° deşarj açılarının maksimum saçak yüksekliği üzerindeki etkileri (Castro Faccetti ve diğ., 2019)

Deşarj açısının jetlerin dönüş noktası ile çıkış ucu arasındaki yatay mesafe  $X_r$  üzerindeki etkisinin incelendiği Castro-Faccetti ve diğ. (2019) ve Castro-Faccetti (2020) çalışmalarında bu ikisi arasında pozitif bir korelasyon görülürken, Kheirkah Gildeh ve diğ. (2015) artan deşarj açısının daha düşük bir  $X_r$  değerine yol açtığını gözlemlemişlerdir. Benzer şekilde Jiang ve diğ. (2014) ve Crowe ve diğ. (2016), yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda 45° deşarj açısı için 30° deşarj açısına göre daha düşük  $X_r$  değerleri gözlemlemişlerdir. Bunun bir sebebinin, sığ sularda belirli bir deşarj açısının sığ su koşulları altında serbest su yüzeyiyle etkileşime girebilmesinin olduğu düşünülmektedir.

Deşarj açısının artırılmasının seyrelmeyi olumlu etkilediği çalışmalar (Zhang ve diğ., 2017; Castro-Faccetti ve diğ., 2019; Castro-Faccetti, 2020) olduğu gibi, tersi bir etkinin gözlemlendiği çalışmalar (Oliver ve diğ., 2008; Kheirkah Gildeh ve diğ., 2015) da bulunmaktadır. Castro-Faccetti (2020) jet merkez çizgisi pik noktasındaki seyrelme  $S_m$  ile dönüş noktasındaki seyrelme  $S_r$  değerlerinin artan deşarj açısıyla birlikte arttığını gözlemlerken, Kheirkah Gildeh ve diğ. (2015) ise bu değerlerde azalış gözlemlemiştir. Özellikle sığ su koşullarında belirli bir değer üzerindeki deşarj açısı, görece daha düşük jet hızlarında bile, yoğun jetin su yüzeyiyle etkileşime girmesine yol açabilmektedir. Bu etkileşim, deşarj işleminin türbülansından dolayı yoğun jetin içerisine sürüklenerek onu seyrelten alıcı ortam suyunun miktarının azalmasına ve seyrelmenin olumsuz etkilenmesine yol açabilmektedir.

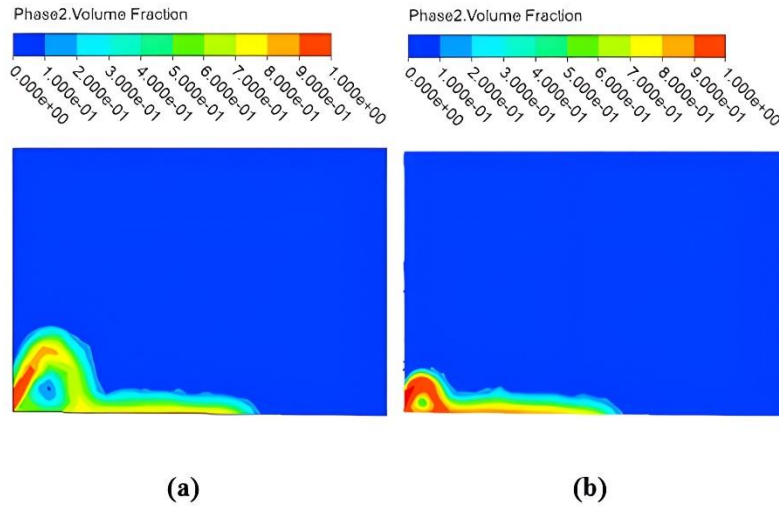
#### 4.2. Çıkış Ucu Sayısı ve Çıkış Uçları Arası Mesafenin Etkileri

Deşarj edilen yoğun suyun karışımını ve seyrelmesini ve jetin geometrisini etkileme potansiyeli bulunan bir başka durum ise, çıkış uçları arasındaki mesafenin jetlerin birbirleriyle olan etkileşimlerini etkilemesi sebebiyle, çoklu çıkış ucu bulunan yayıcıların tasarlanması ve yoğun su deşarjında kullanılmasıdır. Bu sebeple çoklu çıkış ucu bulunan yayıcıların kullanılması durumunda jet davranışı ve bu davranışın farklı sayısal modelleme yöntemleri kullanılarak uygun bir biçimde tahmin edilip edilemeyeceği literatürde üzerinde durulan bir başka konudur (Muller ve diğ., 2011; Castro-Faccetti ve diğ., 2019; Yan ve Mohammadian, 2019; Castro-Faccetti, 2020; Danish ve Murali, 2021; Saeidi Hosseini, 2024). Birden fazla jetin söz konusu olduğu deşarjlarda jetler bir noktada birleşmekte ve bir bütün halinde hareket etmeye başlamaktadır. Bu davranış karışım ve birleşme süreçlerini olumsuz etkileyebilmektedir. Jetlerin birleşmeden önce izledikleri yörüngenin uzunluğu seyrelmeyi etkileyen bir faktördür ve bu jetlerin ve yüzücülük kaynaklarının arasındaki mesafeye bağlıdır (Castro-Faccetti ve diğ., 2019). Dolayısıyla çıkış uçları arasındaki

mesafeler, karışım ve seyrelme süreçleri açısından son derece önemlidir ve bunların çeşitli tasarımlarda jet davranışını nasıl etkilediği, üzerinde durulması gereken bir konudur.

Yan ve Mohammadian (2019) çıkış uçları arası mesafe arttıkça maksimum saçak yüksekliğinin de arttığını gözlemlemiş; bunun çoklu jetlere alıcı ortam suyu girişinin daha az kısıtlandığı bir durum olarak tanımlanabilen Coanda etkisinin bir sonucu olduğu ve bu durumda seyrelme veriminin daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Benzer şekilde, Saeidi Hosseini (2024) de çıkış uçları arasındaki mesafenin artırılmasının  $y_t$  değerlerini, aynı zamanda etki noktası mesafesi ( $x_i$ ) ve seyrelmesi ( $S_i$ ) değerlerini de artırdığını saptamıştır. Yan ve Mohammadian (2019) çıkış uçları arası mesafenin artırılmasının jetlerin girişim düzeyini azalttığını belirlemişlerdir. Bunu destekler nitelikte, Castro-Faccetti ve diğ. (2019) çalışmalarında çıkış uçları arasındaki mesafenin artmasının jetlerin girişime başladıkları mesafeyi artırdığını gözlemlemişler; ancak Kaye ve Linden (2004) çalışmasında da belirtildiği gibi bunun saçakların yüzücülüklerinin birbirine eşit olması durumunda geçerli olduğunu, aksi takdirde girişim mesafesinin sadece çıkış uçları arası mesafeye değil aynı zamanda komşu saçakların yüzücülüklerinin oranlarına da bağlı olduğunu ifade etmişlerdir.

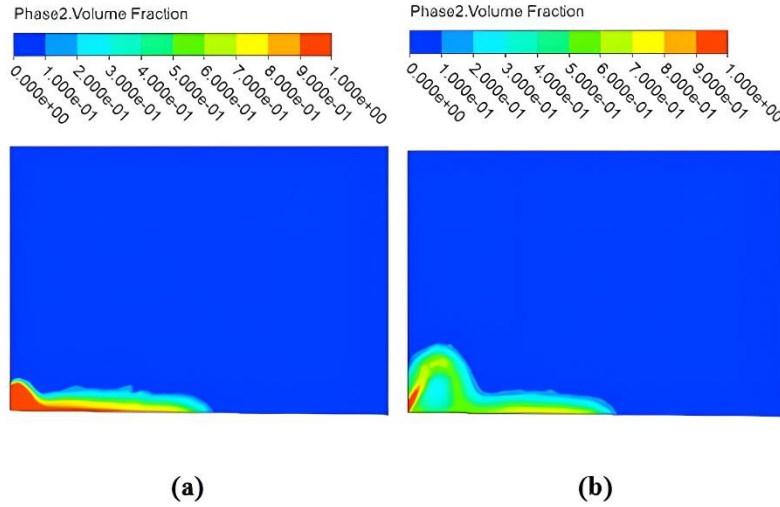
Çıkış ucu sayısının artırılmasının etkilerinin incelendiği çalışmalarda, genel olarak, çıkış ucu sayısının artırılmasının gerekli jet hızını ve maksimum saçak yüksekliğini düşürdüğü belirtilmektedir (Roberts, 2018). Saeidi Hosseini (2024) de çalışmasında çıkış ucu sayısı ile  $y_t$  değerleri arasında negatif bir korelasyon bulmuştur. Bunun önemli bir sebebi, çıkış ucu sayısının ve buna bağlı olarak jet sayısının artmasının jet girişiminin düzeyini artırması olabilir. Bunun sonucu olarak seyrelme olumsuz etkilenebilmektedir. Yine Saeidi Hosseini (2024) artan çıkış ucu sayısı ile birlikte etki noktası seyrelmesinin ( $S_i$ ) azaldığını gözlemlemiştir. Akbari ve Ebrahimi (2016) ise çıkış ucu sayısının artmasının dinamik alıcı ortamlara yapılan deşarjlarda alıcı ortam akıntılarının jetlere olan etkilerinin azalmasına yol açtığını ifade etmişlerdir. Bu durumun sebebi artan jet girişimi sebebi ile jetlerin tek başlarına değil, daha ziyade birlikte bir bütün olarak davranmaları olabilir. Sayıl (2024) da çalışmasında aynı koşullar altındaki deşarjda yayıcıda çıkış ucu sayısının birden ikiye çıkarılmasının maksimum saçak yüksekliğini ve seyrelmeyi düşürdüğünü gözlemlemiştir (Şekil 4):



**Şekil 4:**  
a) Bir, b) iki çıkış ucu olması durumunun maksimum saçak yüksekliği ve seyrelme üzerindeki etkisi (Sayıl, 2024)

### 4.3. Froude Sayısı ve Jet Hızının Etkileri

Batık jetlerin deşarjında hedef alıcı ortam suyunun türbülanslı difüzyon aracılığıyla jet merkezine doğru sürüklenmesi ve yoğun suyla karışması olduğundan, bu sürüklenmenin ve dolayısıyla seyrelmenin jetlerin daha yüksek türbülans yoğunluğuna sahip olması durumunda artması beklenmektedir (Ungate ve diğ., 1975). Literatürde Froude sayısının artmasıyla birlikte jetin türbülanslı rejime doğru geçiş yaptığı ve bunun da seyrelme verimini artırdığı belirtilmektedir. Kheirkah Gildeh ve diğ. (2015) ve Castro-Faccetti ve diğ. (2019) çalışmaları sonucunda Froude sayısı arttıkça jet izdüşümünün, yine Kheirkah Gildeh ve diğ. (2015) ve Zhang ve diğ. (2017) özel olarak dönüş noktası mesafesinin ( $X_r$ ), Zhang ve diğ. (2017) ve Moshiri-Tabrizi ve diğ. (2023) ise  $y_t$  mesafesinin arttığını gözlemlemiştir. Froude sayısının artmasının sebep olduğu jet izdüşümü üzerindeki bu etkiler muhtemel olarak daha fazla alıcı ortam suyunun jet içerisine sürüklenmesini ve seyrelmenin artmasını sağlamaktadır. Bunu destekler nitelikte Oliver ve diğ. (2008), Kheirkah Gildeh ve diğ. (2015), Zhang ve diğ. (2017), Castro-Faccetti ve diğ. (2019), Kheirkah Gildeh ve diğ. (2021) ve Moshiri-Tabrizi ve diğ. (2023) çalışmaları sonucunda Froude sayısının artmasının seyrelmeyi artırdığı görülmüştür. Bunlardan Moshiri-Tabrizi ve diğ. (2023) özel olarak etki noktası seyrelmesinin ( $S_i$ ), Zhang ve diğ. (2017) ve Kheirkah Gildeh ve diğ. (2021) ise dönüş noktasındaki seyrelme değerinin ( $S_r$ ) artan Froude sayısı ile birlikte arttığını ifade etmişlerdir. Sayıl (2024) Froude sayısının 5,67 kat artması durumunda seyrelmenin ve  $y_t$ ,  $x_i$  ve  $x_n$  değerlerinin önemli ölçüde arttığını gözlemlemiştir (Şekil 5):



**Şekil 4:**

a)  $F=1.46$ , b)  $F=8.28$  durumlarının jetlerin geometrisi ve seyrelme üzerindeki etkileri (Sayıl, 2024)

Ancak Kheirkah Gildeh ve diğ. (2021) artan Froude sayısının minimum yüzey seyrelmesini düşürdüğünü gözlemlemiştir. Bunun sebebinin ise jetin akışının tamamen batık olarak tanımladıkları bir rejimden merkez çizgisi temas rejimine geçmesi, bununla birlikte jetin su yüzeyine ulaşması olduğunu belirtmişlerdir.

Düşey yoğun deşarjların incelendiği Kheirkah Gildeh ve diğ. (2022) çalışmasında ise artan Froude sayısı ile birlikte maksimum deşarj yüksekliği ( $Z_m$ ) değerinin arttığı, ancak jetin yüzeye ulaşması durumunda Froude sayısının daha da artmasıyla birlikte  $Z_m$  değerinin beklenildiği gibi asimptotik bir sınıra yaklaştığını gözlemlemiştir.

Firoozabadi ve diğ. (2009) yoğunluk akıntılarını hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle inceledikleri çalışmaları sonucunda artan jet hızının dağılan yoğunluk akıntısı tabakasının kalınlığını artırdığını gözlemlemişler; bunun sebebinin artan giriş ağız hızıyla birlikte giriş ağızındaki Richardson sayısının azalması, fazlar arası yüzeyin daha kararsız olması ve ara yüzeyde daha fazla sürüklenme ve karışım olması olduğunu, Richardson sayısının bu sebeplerden ötürü yoğunluk akıntılarının yapılarını etkileyen önemli bir parametre olduğunu ifade etmişlerdir.

#### 4.4. Diğer Bazı Parametrelerin Etkileri

Dinamik alıcı ortam koşulları altında yapılan deşarjların incelendiği çalışmalarda alıcı ortam akıntılarının hızları ve yönlerinin jet geometrileri, karışım ve seyrelme süreçleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Akbari ve Ebrahimi (2016) akıntılarının yönünün deşarj ile aynı olması durumunda jet izdüşümünün yatayda arttığını ancak maksimum saçak yüksekliğinin azaldığını, akıntının ters yönden gelmesi durumunda ise tam tersi etkilerin gözlemlendiğini ifade etmişlerdir. Ünsal Karakuş (2018) yanal akıntı hızının artmasının yanal konveksiyonu artırdığını, yoğunluk akıntısının kalınlığını ise azalttığını gözlemlemiştir. Moshiri-Tabrizi ve diğ. (2023) ise akıntı hızının artmasının maksimum saçak yüksekliğini artırdığını saptamışlardır.

Abou-Elhaggag ve diğ. (2011), yoğun suyun yoğunluğunun artmasının beklenildiği üzere maksimum deşarj yüksekliği ( $Z_m$ ) değerinin azalmasına sebep olduğunu gözlemlemiştir.

Ardalan ve Vafaei (2019) yüzücülüğün artmasının jet merkez çizgisinin en üst noktasındaki seyrelmeyi ( $S_m$ ) ve maksimum saçak yüksekliğini azalttığını ifade etmişlerdir.

Kheirkah Gildeh ve diğ. (2022) deşarj derinliğinin azalmasının maksimum deşarj yüksekliğini jetin su yüzeyiyle temas ettiği ana kadar artırdığını, temasın ardından ise deşarj derinliğinin azalmasıyla birlikte maksimum deşarj yüksekliğinin de beklenildiği gibi azaldığını gözlemlemiştir.

Amiri ve diğ. (2024) standart çıkış uçları ile venturi nozul kullanılan çıkış uçları kullanılarak yapılan deşarjları incelemiş, venturi nozul kullanımının jet izdüşümü mesafesinde, maksimum saçak yüksekliğinde, karışım ve seyrelmede, etki noktası mesafesinde ve etki noktası seyrelmesinde düşüşe yol açtığını belirlemişlerdir. Venturi edüktörlerinin ön karışımı sağlamak için gerekli basınç farkını elde etmek adına çok jet hızlarına ihtiyaç duyduklarını ancak bu hızların kıyı sularında özellikle yüksek deşarj açıları tercih edildiğinde uygulanamayacağını ifade etmişlerdir. Bundan dolayı  $60^\circ$  yoğun deşarjlarda daha düşük jet hızlarıyla çalıştıklarını, daha düşük bir başlangıç momentumunun ise jet izdüşümü ve seyrelmenin sabit bir debi durumunda azaldığını belirtmişlerdir. Ancak bu durumun Froude sayısını artırarak telafi edilebileceğini eklemiştir.

#### 4.5. Kullanılan HAD Yazılımları ve Türbülans Modelleri

Literatürde yoğun deşarjların modellenmesi için farklı yazılımlar ve türbülans modelleri kullanılmaktadır. Her bir yazılım farklı yaklaşımlar kullanmakta, kullanıcılara farklı düzeyde hassasiyet ve farklı detay seviyelerinde seçenekler sunmaktadırlar. Türbülans modelleri farklı varsayımlar ve basitleştirmeler yapmakta, farklı denklemler kullanmaktadırlar. Bu sebeplerden ötürü, değişen deşarj ve alıcı ortam koşulları altında yazılımlar ve türbülans modelleri en temelde benzer mantıklarda çalışsalar da çok farklı sonuçlar verebilmektedirler. Bu noktada değişen deşarj ve alıcı ortam koşulları için farklı yazılımlar ve türbülans modellerinin kullanıldığı ve bunların verdikleri sonuçların deneysel çalışmaların sonuçlarıyla kıyaslanarak performans değerlendirmelerinin yapıldığı çalışmalar ve bu çalışmaların bize sağladığı bilgiler, ilgili şartlar altında en uygun analizlerin ve tasarımın yapılması konusunda oldukça önemlidir.

Firoozabadi ve diğ. (2009) çalışmalarında, uniform bir hız ve konsantrasyona sahip kararlı bir yoğunluk akıntısının dar bir savaktan daha az yoğun bir alıcı ortam suyunun bulunduğu geniş bir kanala verildiği bir durumu hem fiziksel hem de sayısal modelleme yöntemleriyle incelemiştir. Sayısal modelleme için bir düşük Reynolds sayısı  $k-\epsilon$  türbülans modeli (Lauder

ve Sharma, 1974) ve standart  $k-\varepsilon$  model, kullanmışlardır. Standart modelin Launder-Sharma modeline göre daha düşük bir maksimum hız hesapladığını, bunun modelin serbest kayma tabakasındaki türbülans kinetik enerjisi değerini olduğundan fazla tahmin etmesi ve bunun sürüklenme ve yükseklik değerlerini yükseltmesi sebebiyle olduğunu ifade etmişlerdir. Düşük Reynolds sayısı  $k-\varepsilon$  modelinin standart modele göre üç boyutlu yoğunluk akıntıları için daha kabul edilebilir sonuçlar ortaya koyduğunu belirtmişlerdir.

Muller ve diğ. (2011) çalışmalarında Melbourne desalinasyon tesislerinin tasarımında ANSYS Fluent yazılımını kullanmışlar, deneysel verilere göre kabul edilebilir sonuçlar veren yazılımın yakın alan karışımını gerçek değerlerden az tahmin ettiği ve yakın alanın ötesinde kaydedilen türbülanslı karışım değerlerini yansıtamadığı ifade etmiş; ancak yazılımın daha önceden karışmış yoğun tuzlu suyun yeniden sürüklenmesiyle oluşan tuzluluğu modelleyebilmesi ve saçaklar arasındaki etkileşimleri görselleştirebilmesi sebebiyle, bahsedilen kısıtlamaların da göz önünde bulundurularak çoklu saçakların dinamikleri ve hem durgun hem de akıntılarının etkisi altındaki alıcı ortamlarda gerçekleşen etkileşimlerin incelenmesi için kullanılmasının uygun olduğu belirtmişlerdir.

Kheirkah Gildeh ve diğ. (2015) çalışmalarında  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  açıyla yapılan yoğun su deşarjlarının karışım davranışlarını OpenFOAM yazılımını kullanarak sayısal modelleme yöntemiyle incelemiş, türbülans modeli olarak RNG, realizable ve lineer olmayan  $k-\varepsilon$ , LRR ve Launder-Gibson modellerini kullanmışlardır. Yoğun jetlerin maksimum yükseklikleri, merkez çizgisi pikinin konumu ve dönüş noktası gibi geometrik özelliklerini, aynı zamanda karışma ve seyrelme durumlarını da analiz etmişler ve sonuçları başka deneysel ve analitik araştırmaların sonuçlarıyla kıyaslamışlar; LRR ve realizable  $k-\varepsilon$  modellerinin incelenen durumlar için daha başarılı tahmin yaptıklarını gözlemlemişlerdir.

Robinson ve diğ. (2016) çalışmalarında yüzücü ve yoğun jetlerin davranışlarını Fluidity HAD yazılımını kullanarak incelemişler; yüzücü yoğun jetlerin yakınındaki davranışlarının simülasyonu için bir ön doğrulama yapmış ve yüzücü jetler için tatmin edici sonuçların alındığını ancak simülasyonun yoğun jet içerisine sürüklenmeyi gerçekte olduğundan az tahmin ettiğini ve dolayısıyla yakınındaki konsantrasyonu olduğundan daha fazla gösterdiğini gözlemlemişlerdir.

Castro-Faccetti ve diğ. (2019) çalışmalarında tek ve çoklu çıkış ucu bulunan yayıcı borulardan yapılan atıksu deşarjlarının yakın alan davranışları için, zamana bağlı RANS  $k-\varepsilon$  ve  $k-\omega$  SST türbülans modellerini kullanarak bir simülasyon gerçekleştirip bunu doğrulamış; doğruladıkları bu yöntemi Kolombiya'da bulunan Cartagena deşarj hattı için kullanmışlar, sonuç olarak RANS modellemesinin yüzücü jetlerin modellenmesi açısından kullanımının uygun olduğu sonucuna varmışlardır.

Castro-Faccetti (2020) çalışmasında, çoklu çıkış ucu bulunan deniz deşarjı yayıcı borularının yakın ve uzak alan seyrelme ve atıksu hareketini tahmin etme gücünü artırmak için, yakın alan HAD modellerinin uzak alan sirkülasyon modelleriyle nasıl birleştirilebileceğini değerlendirmeye çalışmıştır. Tek çıkış ucundan yapılan yoğun su deşarjının simülasyonu için Crowe ve diğ. (2016) çalışmasındaki deney düzeneğini baz almış; yüzen jetin izdüşümü, hızı ve seyrelmesi parametrelerini deneysel çalışmanın sonuçlarıyla kıyaslamıştır. RANS modellerinin, özellikle yüksek jet eğimi açılarındaki, açılı yoğun jetin iç kısımlarındaki geri çekme de dahil olmak üzere, tek çıkış uçlu yoğun su deşarjlarının dinamiklerini başarılı biçimde tahmin edebildiklerini ve bunun diğer sürüklenme modellerine kıyasla daha iyi bir jet hızı ve seyrelme tahminini mümkün kıldığını ifade etmiştir.

Kheirkah Gildeh ve diğ. (2021) çalışmalarında, Jiang ve diğ. (2014) çalışmasındaki deneysel sonuçları baz alarak,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$ 'lik açılarla sığ bir alıcı ortama deşarj edilen yoğun suyun davranışının incelenmesi için sayısal modelleme çalışması yürütmüşler; Realizable  $k-\varepsilon$  ve  $k-\omega$  SST,  $v^2-f$ , LRR ve SSG türbülans modelleri olmak üzere beş farklı RANS modeli kullanmışlardır. Baz alınan çalışmada tanımlanan tam batık, saçak temas ve merkez çizgisi çarpma rejimlerini sayısal olarak yeniden oluşturmuşlardır. Yüzey bağlanmasının çıkış ucundan itibaren dönüş noktası mesafesini artırdığını ve yüzey seyrelmesinin tam batık rejimden merkez çizgisi çarpma

rejimine geçişte azaldığını; test edilen modeller arasında LRR ve SSG modellerinin deşarj edilen atıksuyun kinematik ve seyrelme özelliklerini daha iyi tahmin ettiğini gözlemlemiştir.

## 5. SONUÇ

Bu çalışma desalinasyon işlemi sonucu ortaya atıksu olarak çıkan yoğun suyun alıcı deniz ve okyanus ortamlarına kontrollü ve çevreye zarar vermeyecek şekilde deşarj edilmesi için, yoğun jetlerin alıcı ortamdaki analizlerinin doğru yapılmasına dönük bir literatür derlemesi sunmaktadır. Özellikle son yıllarda bilgisayar teknolojilerinin oldukça gelişmesi sonucu sayısal modelleme yöntemlerinin, özellikle hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımlarının gelişmesi, yoğun jetlerin analizlerinde deneysel çalışmaların yerine sayısal modelleme yöntemlerinin giderek artan bir sıklıkla kullanılmasına yol açmıştır. Literatürde farklı HAD yazılımları ve türbülans modelleri kullanılarak yoğun deşarj modellemesi yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada geçmişte yoğun deşarj üzerine yapılmış bazı HAD modellemesi çalışmaları incelenmiştir. Bu çalışmadaki kapsamlı literatür araştırmasına dayalı olarak aşağıdaki sonuçların altı çizilebilir:

- Deşarj açısı, çıkış uçlarının sayısı, aralarındaki mesafeler ve çapları, jet hızları ve Froude sayısı, alıcı ortam akıntılarının yönleri ve hızları, Richardson sayısı, yoğun su yoğunluğu ve yüzücülük gibi bazı parametrelerin yoğun jetlerin önemli geometrik karakteristikleri olan maksimum saçak yüksekliği, etki mesafesi ve yakın alan mesafesi; aynı zamanda yakın alandaki karışma ve seyrelme süreçleri üzerinde önemli etkileri vardır.

- HAD modellemesi ve bunun için kullanılan türbülans modellerinin farklı deşarj ve alıcı ortam koşulları altında verdikleri sonuçlar deney sonuçları ile kıyaslandığında HAD modellemesinin yoğun jetlerin analizleri ve seyrelme konusunda oldukça güvenilir sonuçlar verebildiği; ancak her şart altında her modelin kullanımının uygun olmadığı, dolayısıyla uygun modelin kullanımının son derece önemli olduğu görülmektedir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar(lar), bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

## YAZAR KATKISI

Tuğçe ANILAN ve Mahmut Cenk SAYIL: Çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, Mahmut Cenk SAYIL: Veri toplama ve veri analizi, Mahmut Cenk SAYIL: Veri analizi ve yorumlama, Tuğçe ANILAN ve Mahmut Cenk SAYIL: Son Onay ve Tam Sorumluluk

## KAYNAKLAR

1. Abessi, O. ve Roberts, P.J. (2018) Rosette diffusers for dense effluents in flowing currents, *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(1), 06017024. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.000140
2. Abessi, O. ve Roberts, P.J. (2017) Multiport diffusers for dense discharge in flowing ambient water, *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(6), 04017003. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001279
3. Abessi, O. ve Roberts, P.J. (2016) Dense jet discharges in shallow water, *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(1), 04015033. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001057
4. Abessi, O. ve Roberts, P.J. (2015) Effect of nozzle orientation on dense jets in stagnant environments, *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(8), 06015009. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001032



5. Abessi, O. (2018) Brine disposal and management—planning, design, and implementation. G. Gude (Dü.) içinde, *Sustainable Desalination Handbook* (s. 259-303). Elsevier. doi:10.1016/b978-0-12-809240-8.00007-1
6. Abou-Elhaggag, M.E., El-Gamal, M.H. ve Farouk, M.I. (2011) Experimental and numerical investigation of desalination plant outfalls in limited disposal areas, *Journal of Environmental Protection*, 2(6), 828-839. doi:10.4236/jep.2011.26094
7. Akbari, H. ve Ebrahimi, M.H. (2016) Near field mixing of multi-diffuser dense jets in shallow water condition and ambient currents, *15th National Hydraulic Conference*, Iran. Qazvin.
8. Altuncu, F.F. (2004). Tasarım aşamasında uygun olmayan deşarj katsayısı kullanımının deniz deşarj tesisi yayıcı iç hidroliği üzerindeki etkileri, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
9. Amiri, N.S., Abessi, O. ve Roberts, P.J. (2024). Venturi nozzles for desalination brine discharges, *Desalination*, 573, 117193. doi: 10.1016/j.desal.2023.117193
10. Anılan, T. (2023). Deniz Deşarjı Hidroliği Lisansüstü Ders Notları, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
11. ANSYS CFX-Solver Modeling Guide. (2013). ANSYS, Inc.
12. ANSYS Fluent Theory Guide. (2011). ANSYS, Inc.
13. Ardalan, H. ve Vafaei, F. (2019) CFD and experimental study of 45° inclined thermal-saline reversible buoyant jets in stationary ambient, *Environmental Processes*, 6(1), 219-239. doi:/10.1007/s40710-019-00356-z
14. Baawain, M., Choudri, B.S., Ahmed, M. ve Purnama, A. (2015) *An Overview: Desalination, Environmental and Marine Outfall Systems. Recent Progress in Desalination, Environmental and Marine Outfall Systems*, 3–10. doi:10.1007/978-3-319-19123-2\_1
15. Bashitialshaaer, R., Persson, K.M. ve Larson, M. (2015) *New criteria for brine discharge outfalls from desalination plants. Intakes and Outfalls for Seawater Reverse-Osmosis Desalination Facilities: Innovations and Environmental Impacts* (s. 451-467). içinde Springer. doi:10.1007/978-3-319-13203-7\_19
16. Baum, M.J. ve Gibbes, B. (2020) Field-scale numerical modeling of a dense multiport diffuser outfall in crossflow, *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(1), 05019006. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001635
17. Baum, M.J., Albert, S., Grinham, A. ve Gibbes, B. (2019) Spatiotemporal influences of open-coastal forcing dynamics on a dense multiport diffuser outfall, *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(10), 05019004. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001622
18. Berkün, M. (2017) *Atıksu Mühendisliği: Toplama, Arıtma, Uzaklaştırma ve Denize Deşarj Yapıları*, Literatür Yayıncılık.
19. Berkün, M. (2006) *Atık Su Arıtma ve Deniz Deşarjı Yapıları*, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
20. Bussoletti, J. (1994) CFD calibration and validation-The challenges of correlating computational model results with test data, *25th Plasmadynamics and Lasers Conference*, 2542. doi:10.2514/6.1994-2542
21. Castro-Faccetti, C. (2020). Modelling dilution and transport processes from marine outfall discharges, *Doktora Tezi*. The University of Leeds, School of Civil Engineering, Leeds.
22. Castro-Faccetti, C., Borman, D., Sleigh, A., Khan, A. ve Eljaiek-Urzola, M. (2019) Three-Dimensional CFD Modelling of Mixing and Dispersion from Marine Outfall Discharges, *In*

*Proceedings of the 38th International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR) World Congress.* doi:10.3850/38WC092019-0467

23. Cipollina, A., Brucato, A., Grisafi, F. ve Nicosia, S. (2005) Bench-scale investigation of inclined dense jets, *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(11), 1017-1022. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:11(1017)
24. Crowe, A.T., Davidson, M.J. ve Nokes, R.I. (2016) Velocity measurements in inclined negatively buoyant jets, *Environmental Fluid Mechanics*, 16(3), 503-520. doi:10.1007/s10652-015-9435-y
25. Danish, D. ve Murali, K. (2021) Performance of the single round nozzle of the marine outfall system for buoyant fluid at stable water in the unstratified water depth. *Proceedings of the Fifth International Conference in Ocean Engineering (ICOE2019)* (s. 157-170). Springer Singapore. doi:10.1007/978-981-15-8506-7\_13
26. Darama, S. (2009). Yoğun atıksu deşarjının birinci seyrelmesinde görünür saçak modelinin uygulanması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
27. Firoozabadi, B., Afshin, H. ve Aram, E. (2009) Three-dimensional modeling of density current in a straight channel, *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(5), 393-402. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000026
28. Frick, W.E. (2004) Visual Plumes mixing zone modeling software, *Environmental Modelling & Software*, 19(7-8), 645-654. doi:10.1016/j.envsoft.2003.08.018
29. Hajdukiewicz, M., Geron, M. ve Keane, M.M. (2013) Formal calibration methodology for CFD models of naturally ventilated indoor environments. *Building and Environment*, 59, 290-302. doi:10.1016/j.buildenv.2012.08.027
30. Jiang, B., Law, A. W.-K. ve Lee, J. H.-W. (2014) Mixing of 30° and 45° inclined dense jets in shallow coastal waters, *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(3), 241-253. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000819
31. Jirka, G.H. (2008) Improved discharge configurations for brine effluents from desalination plants, *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), 116-120. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:1(116)
32. Jirka, G.H. (2006) Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows Part 2: Plane jet dynamics resulting from multiport diffuser jets, *Environmental Fluid Mechanics*, 6, 43-100. doi:10.1007/s10652-005-4656-0
33. Jirka, G.H. (2004) Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows. Part I: Single round jet, *Environmental Fluid Mechanics*, 4(1), 1-56. doi:10.1023/A:1025583110842
34. Kaye, N. ve Linden, P. (2004) Coalescing axisymmetric turbulent plumes, *Journal of Fluid Mechanics*, 502, 41-63. doi:10.1017/S0022112003007250
35. Kheirkhah Gildeh, H., Mohammadian, A. ve Nistor, I. (2022) Vertical dense effluent discharge modelling in shallow waters. *Water*, 14(15), 2312. doi:10.3390/w14152312
36. Kheirkhah Gildeh, H., Mohammadian, A. ve Nistor, I. (2021) Inclined dense effluent discharge modelling in shallow waters, *Environmental Fluid Mechanics*, 21, 955-987. doi:10.1007/s10652-021-09805-6
37. Kheirkhah Gildeh, H., Mohammadian, A., Nistor, I. ve Qiblawey, H. (2015) Numerical modeling of 30° and 45° inclined dense turbulent jets in stationary ambient, *Environmental Fluid Mechanics*, 15, 537-562. doi:10.1007/s10652-014-9372-1

38. Lai, C.C. ve Lee, J.H. (2012) Mixing of inclined dense jets in stationary ambient. *Journal of hydro-environment research*, 6(1), 9-28. doi: 10.1016/j.jher.2011.08.003
39. Lee, J.H. ve Cheung, V. (1990) Generalized Lagrangian model for buoyant jets in currents, *Journal of Environmental Engineering*, 116(6), 1085-1106. doi:10.1061/(ASCE)0733-9372(1990)116:6(1085)
40. Lykkebo Petersen, K., Heck, N., G. Reguero, B., Potts, D., Hovagimian, A. ve Paytan, A. (2019) Biological and physical effects of brine discharge from the Carlsbad Desalination plant and implications for future desalination plant constructions, *Water*, 11(2), 208. doi:10.3390/w11020208
41. Mohammadian, A., Kheirkhah Gildeh, H. ve Nistor, I. (2020) CFD modeling of effluent discharges: A review of past numerical studies, *Water*, 12(3), 856. doi:10.3390/w12030856
42. Moshiri-Tabrizi, I., Sarrafzadeh, M.-H. ve Sotudeh-Gharebagh, R. (2023) 2D-CFD Analysis of diffusers used to discharge brine into water bodies, *Journal of Chemical & Petroleum Engineering*, 57(2). doi:10.22059/jchpe.2023.321150.1347
43. Muller, J., Seil, G. ve Hubbert, G. (2011) Three modelling techniques used in Australia to model desalination plant brine dispersal in both the near-field and far-field, *International Symposium on Marine Outfall Systems*, 15-29.
44. Nemlioğlu, S. (2006) Yayıncılardan deşarj edilen yoğun atıksuların hidrodinamiğinin ve karışmasının deneysel olarak incelenmesi. TÜBİTAK Yurt Dışı Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı Proje Sonuç Raporu, Proje No: 647-1793.
45. Nemlioğlu, S. (2003). Soğuk deşarjda birinci seyrelmenin incelenmesi. *Doktora Tezi*, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
46. Oliver, C.J., Davidson, M. ve Nokes, R. (2013). Removing the boundary influence on negatively buoyant jets. *Environmental Fluid Mechanics*, 13, 625-648. doi: 10.1007/s10652-013-9278-3
47. Oliver, C., Davidson, M. ve Nokes, R. (2008) k-ε Predictions of the initial mixing of desalination discharges, *Environmental Fluid Mechanics*, 8, 617-625. doi:10.1007/s10652-008-9108-1
48. Öztürk, İ. (2011) *Deniz Deşarjı Tesisleri Tasarımı*, Su Vakfı Yayınları, İstanbul.
49. Palomar, P., ve Losada, I.J. (2011) Impacts of brine discharge on the marine environment. Modelling as a predictive tool, *Desalination, trends and technologies*. Intech. doi: 10.5772/14880
50. Pincince, A.B. ve List, E.J. (1973) Disposal of brine into an estuary, *Journal of Water Pollution Control Federation*, 45(11), 2335-2344. <http://www.jstor.org/stable/25038038>.
51. Roberts, P.J. (2018) Modeling brine disposal from the West Basin Ocean Water Desalination Project Final Report.
52. Roberts, P.J., Salas, H.J., Reiff, F.M., Libhaber, M., Labbe, A. ve Thomson, J.C. (2010) *Marine Wastewater Outfalls and Treatment Systems*, IWA Publishing, Londra.
53. Roberts, P.J., Ferrier, A. ve Daviero, G. (1997) Mixing in inclined dense jets, *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(8), 693-699. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:8(693)
54. Roberts, P.J. ve Toms, G. (1987) Inclined dense jets in flowing currents, *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(3), 323-340. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1987)113:3(323)

55. Robinson, D., Wood, M., Piggott, M. ve Gorman, G. (2016) CFD modelling of marine discharge mixing and dispersion, *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 4(2), 152-162. doi:10.1080/23249676.2015.1105157
56. Saeidi Hosseini, S.A. (2024). Numerical and experimental study of multiport diffusers with non-uniform port orientation, *Doktora Tezi*, University of Ottawa, Faculty of Engineering, Ottawa.
57. Saeidi Hosseini, S.A., Mohammadian, A., Roberts, P.J. ve Abessi, O. (2022). Numerical study on the effect of port orientation on multiple inclined dense jets, *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(5), 590. doi:10.3390/jmse10050590
58. Sayıl, M.C. (2024). Yoğun jet davranışının hesaplamalı akışkanlar dinamiği modelleri ile incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
59. Ungate, C.D., Harleman, D.R. ve Jirka, G.H. (1975) Stability and mixing of submerged turbulent jets at low Reynolds numbers, Energy Laboratory Report MIT-EL 75-014.
60. Ünsal Karakuş, E. (2018). Yoğun su deniz deşarjlarının yanıl akımlarla etkileşimlerinin sayısal modelleme ile incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
61. Vafeiadou, P., Papakonstantis, I. ve Christodoulou, G. (2005) Numerical simulation of inclined negatively buoyant jets, *The 9th international conference on environmental science and technology*, September, (s. 1-3).
62. Versteeg, H. ve Malalasekera, W. (2007) *An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method (2 b.)*, Pearson Education Limited, Harlow, Essex.
63. Yan, X., Ghodoosipour, B. ve Mohammadian, A. (2020) Three-dimensional numerical study of multiple vertical buoyant jets in stationary ambient water, *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(7), 04020049. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001768
64. Yan, X. ve Mohammadian, A. (2019) Numerical modeling of multiple inclined dense jets discharged from moderately spaced ports, *Water*, 11(10), 2077. doi:10.3390/w11102077
65. Yan, X., Mohammadian, A. ve Chen, X. (2019) Three-dimensional numerical simulations of buoyant jets discharged from a rosette-type multiport diffuser, *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(11). doi:10.3390/jmse7110409
66. Yan, X. ve Mohammadian, A. (2017) Numerical modeling of vertical buoyant jets subjected to lateral confinement, *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(7), 04017016. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001307
67. Yılmaz, S. (2015). Evsel atıksu derin deniz deşarjlarında ördek gaga çek valf kullanımının birinci seyrelme üzerindeki etkilerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
68. Zeitoun, M.A., Reid, R.O., McHilheny, W.F. ve Mitchell, T.M. (1972) Model studies of outfall systems for desalination plants, Part III: Numerical simulations and design considerations, Research and Development Progress Rep. 804, Office of Saline Water, U.S Washington, DC: Dept. of Interior, Washington, D.C.
69. Zhang, S., Law, A. W.-K. ve Jiang, M. (2017) Large eddy simulations of 45 and 60 inclined dense jets with bottom impact, *Journal of Hydro-Environment Research*, 15, 54-66. doi:10.1016/j.jher.2017.02.001