

ARAŞTIRMA
MAKALESİTermal Deşarjların Deniz Ortamında 3 Boyutlu
Hidrotermal Modellemesi ve Çevresel Etkileri

Yazışma yazarı:
Olgay ŞEN,
senolg@itu.edu.tr

Referans:
Şen, O., Saçu, Ş., Deneri, E. Z.,
Erdik, T., Öztürk, İ., (2023), Termal
Deşarjların Deniz Ortamında 3
Boyutlu Hidrotermal Modellemesi
ve Çevresel Etkileri, Çevre, İklim ve
Sürdürülebilirlik, 24(1) 33–46.

Makale Gönderimi : 28 MART 2023
Online Kabul : 17 NİSAN 2023
Online Basım : 04 MAYIS 2023

Olgay ŞEN¹, Şehriban SAÇU², Elif Zeynep DENERİ³, Tarkan ERDİK⁴, İzzet ÖZTÜRK⁵

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.
ORCID: 0000-0003-2545-3746

²İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.
ORCID: 0000-0001-9404-8424

³İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.
ORCID: 0000-0001-7190-737X

⁴İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.
ORCID: 0000-0002-4003-5510

⁵İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.
ORCID: 0000-0002-8274-5326

Özet Deniz kıyısında veya körfezde kurulmuş Termik Santrallerde soğutma suyu genellikle açık devre sistemlerle veya tek geçişli deniz suyu ile sağlanmaktadır. Bu çalışmada, açık devre deniz suyu soğutmalı termik santrallerde açığa çıkan termal deşarjların deniz ortamına verilmesi ile ilgili mevzuat ile karışım bölgesi ve uzak alan seyrelme/taşınımı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, İzmit Körfezi Dilderesi (Dilovası) mevkiinde kurulu hipotetik bir Termik Santral termal deşarjının, Delft 3D Hidrodinamik ve Hidrotermal Modellemesi yapılarak termal deşarj bulutunun yakın ve uzak alandaki soğuması ile taşınımı araştırılmıştır. Hipotetik bir termal deşarjın yol açacağı sıcaklık artışının ve etki alanının belirlenmesi amacıyla, İzmit Körfezi'nin tamamını kapsayan geniş bir alan için yatayda eğrisel, düşeyde ise Z-model tipinde bir hesap ağında modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Model sonuçlarına göre, termik santralden verilen deşarj sonucu oluşan termal bulutun kış döneminde daha fazla yayılım gösterdiği görülmüştür. Termal deşarjın yapıldığı noktadan itibaren 75 m, 150 m ve 300 m uzaklıktaki oluşan sıcaklık artışı en fazla 75 m mesafede olmaktadır; burada kış döneminde yüzey sıcaklık artışı 2,5 °C'nin üzerine çıkarken yaz döneminde ise 1,0 °C'nin altında kalmaktadır. Bu değerler 6 m derinlikte sırasıyla 1,0 °C ve 0,5 °C'nin altına düşmektedir. Deşarjdan 150 m sonra ise, seyrelmenin artmasıyla kış ve yaz döneminde sıcaklık artışı sırasıyla yaklaşık 1,5 °C ve 0,5 °C değerlerine düşmektedir. Derinde ise (6 m) bu artış yüzeye oranla daha az olmaktadır. Deşarjın 300 m ilerisinde kışın sıcaklık artışı yaklaşık 0,5 °C değerine düşerken yaz döneminde ise yaklaşık 0,25 °C gibi oldukça düşük bir değere ulaşmaktadır. Yapılan çalışmada, santralden verilen termal deşarjın etkisinin yaklaşık 1 km sonra sönümlendiği ve Körfez genelinde kayda değer bir sıcaklık artışına yol açmadığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Termal deşarj, karışım bölgesi, hidrodinamik modelleme, hidrotermal modelleme

3D Hydrothermal Modeling and Environmental Effects of
Thermal Discharges in the Marine Environment

Abstract The cooling water of thermal power plants located on the coastal areas is generally supplied by open recirculating systems (once-through cooling systems). In this study, thermal pollution resulting from a once-through cooling system is discussed in terms of the related legislation, mixing point and, near and far field dispersion and transportation processes. In this context, dilution and advection of thermal discharge released from a hypothetical power plant established near Dilderesi (located at the Bay of İzmit) is investigated by using a 3-dimensional hydrodynamic model that includes transport of heat through diffusion and advection processes. A 3-dimensional hydrodynamic model covering the overall Bay of İzmit is set up using Delft 3D software. The domain is configured on an orthogonal curvilinear grid at horizontal and Z-grid at vertical direction. According to simulations, thermal plume influenced a larger area in winter than the summer period. The temperature increase occurring from the point of thermal discharge at a distance of 75 m, 150 m and 300 m occurs maximum at a distance of 75 m. The surface temperature increase at 75 m from the source point is found above 2.5 °C in winter and below 1.0 °C in summer. The increase at a 6 m of water column corresponds to 1.5 °C and 0.5 °C in winter and summer, respectively. At 150 m distance, the thermal plume was diluted and the surface temperature raised by 1.5 °C and 0.5 °C above ambient water in winter and summer. At 300 m distance, the influence of thermal discharge is decreased and surface temperature increased about 0.5 °C and 0.25 °C in winter and summer. The simulation results revealed that the impact of the thermal plume almost disappeared at 1000 m distance from the source point.

Keywords: Thermal discharge, mixing zone, hydrodynamic modeling, hydrothermal modeling

1. Giriş

Deniz kıyıları ve körfezlerde kurulu termik santraller genellikle açık devre veya tek geçişli deniz suyu ile soğutulurlar. Bu tip bir sistemle soğutulan tipik bir termik santralde, $\Delta T = +10$ °C'lik sıcaklık artışı olacak şekilde uygulanan açık devre soğutma sisteminde 1000 MW kurulu güç başına ~ 50 m³/s (180.000 m³/sa) soğutma suyuna ihtiyaç duyulur (Taylor, 2006). Buna mukabil dolaylı yöntemlerle (soğutma kuleleri vb. ile) soğutulan santrallerde, $\Delta T = +10$ °C'lik ısı alışverişi için 1000 MW kurulu güç başına, soğutma suyu dolaşım devresinden atılan (deşarj edilen) su miktarı ~ 5 m³/s civarındadır. Şekil 1'de, deniz suyu ile açık devre dolaylı soğutmalı tipik bir termik santralin soğutma ve kapalı devre kazan suyu sistemlerinin proses akım ve bileşenlerine ilişkin şema verilmektedir (Taylor, 2006).

Termik Santrallerin soğutma yöntemi seçiminde, çevresel etkilerden ziyade, bazı istisnalar hariç, genelde maliyet faktörü belirleyici olmaktadır (Tablo 1). Tablodan da görüldüğü üzere, açık devre soğutma sistemlerinin KW kurulu güç başına kurulum (yatırım) maliyeti 2~7 \$ olup, diğer yöntemlerin oldukça altındadır. Prensipte olarak, birim maliyetler tesis kapasitesi arttıkça düşmektedir (Sundaram ve Daugard, 1974).

Açık devre soğutma sistemlerinde, debiyi düşürmek için daha fazla sıcaklık artışına izin verilmesi yolunun seçilmesi; soğutma devresine alınan deniz suyunda organizmaların şiddetli termal şoka maruz kalmaları iledeşarj karışım bölgesinde sıcaklık artışına yol açmaları gibi olumsuzluklar söz konusu olabilir. Diğer bir seçenek soğutma suyu debisinin artırılarak daha düşük ΔT artışı ile eşdeğer soğutma yapılması da soğutma suyundaki deniz canlıların pompa ve kondenser sisteminde mekanik kayma kuvvetlerine maruz kalarak fiziki zarar görme ihtimalini artırabilmektedir. Soğutma kulesi yardımıyla kapalı devre soğutma uygulanan tesislerdeki soğutma suyu ihtiyacı aynı kurulu güçteki termik santrallerin açık devre soğutma suyu ihtiyacının %2-5'i olmasına mukabil, bu tesislerin kapalı devre soğutma sistemine alınan deniz suyundaki canlıların tamamen yok olmaları söz konusudur. Halbuki açık devre soğutma sistemlerindeki canlıların \sim %20-30'luk kısmı termal şok, klor ve fiziksel etkilerle hasar görme ihtimaliyle karşı karşıyadır (Turnpenny ve Taylor, 2000).

Açık devre deniz suyu ile soğutulan gaz veya sıvı yakıtlı santraller ile termik santraller dünyada olduğu gibi Türkiye'de de oldukça yaygındır. Bu çalışmada açık devre deniz suyu soğutmalı termik santrallerde açığa çıkan termaldeşarjların deniz ortamına verilmesi ile ilgili mevzuat ile karışım bölgesi ve uzak alan seyrelme/taşınımı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, İzmit Körfezi Dilderesi (Dilovası) mevkiinde kurulu hipotetik bir termik santral termaldeşarjının, Delft 3D Hidrodinamik ve Hidrotermal Modellemesi yapılarak termaldeşarj bulutunun yakın ve uzak alandaki soğuması ile taşınımı araştırılmıştır.

2. Termal Deşarjlarla İlgili Standartlar

2.1 Karışım bölgesi

Türkiye'de bir veya daha fazla boru hattındaki difüzör(ler) vasıtasıyla belirli bir derinlikten denizedeşarj tarzındaki Termal ve Tuzlu Konsantrasyon Deşarjları için karışım bölgesi Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Ek Tablo 2'de tanımlanmaktadır. Anılan yönetmelikte,deşarj noktasını merkez alan 75 m yarıçaplı daire içindeki su kütlesi karışım bölgesi olarak alınmaktadır. Termaldeşarj debisinin ≥ 5000 m³/gün olduğu tesisler için geçerli bu tanımın, açık bir kanal ile kıyından termaldeşarjlarda 150 m x 150 m'lik bir alana karşı geldiği

değerlendirilmektedir. Nükleer Santraller gibi, termal santrallerin 20~30 katı termaldeşarjı olan büyük tesislerde, karışım bölgesinin gerekli bilimsel çalışmalara dayalı olarak ayrıca belirlenmesi gerekmektedir (Stolzenbach ve Harleman, 1971; Stolzenbach ve Harleman, 1972; Bleninger ve Jirka, 2011; Öztürk, 2022).

Kıyından yapılacak termaldeşarjlar için karışım bölgesi, Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği'ne göre;deşarj noktasını merkez alan 500 m yarıçaplı bir daire içinde kalan $h=5$ m derinlikli su kütlesi olarak tanımlanmaktadır (YSKY, 2015). Dolayısıyla, kıyından yapılan (termal)deşarjlarda SKKY Ek Tablo 2'de belirtilen 150 m x 150 m'lik bölge ile Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği karışım bölgesi farklılık göstermektedir.

AB ülkelerinde, en genel haliyle bir boru hattı ucundaki tek bir noktadan veya difüzör üzerindeki çok sayıda delikten yapılan termaldeşarjlar için karışım bölgesi Şekil 2'deki gibi tanımlanmaktadır. Buna göre karışım bölgesi genişliği (L_{kar}) veya yarıçapı (r_{kar}),deşarj derinliğinin (H_{ort}) belli bir katına bağlı olarak L_{kar} (veya r_{kar}) = $N \cdot H_{ort}$ ifadesiyle verilmektedir. Buradaki N, hassas sularda 1, diğer yerlerde ise genellikle 2-3 alınmaktadır. Ancak karışım bölgesinin, önemli/büyük projeler özelinde, detaylı bilimsel çalışmalara dayalı olarak belirlenmesi önerilmektedir (Bleninger ve Jirka, 2011).

Dünya Bankası Uzmanlar Heyeti'nin, yeni yapılacak termik santralle ilgili rehberinde ise, hassas ekosistemlerin bulunmadığı yerlerde,deşarj noktasından itibaren 100 m'lik bölgenin (ilk yaklaşımla) karışım bölgesi olarak alınabileceği belirtilmektedir (World Bank Group, 1998).

2.2 Deşarj sıcaklığı ve karışım bölgesindeki sıcaklık artışı limitleri

Türkiye'de, SKKY Ek Tablo 2'ye göre, termaldeşarjlar için azami sıcaklık, Akdeniz Bölgesi'ndeki tesisler hariç, 35 °C'dir. Karışım bölgesi sonundaki ortalama sıcaklık artışı da yaz döneminde (Temmuz-Ağustos) $\Delta T \leq 1$ °C (Akdeniz için 3 °C), kış döneminde (Ocak-Şubat) $\Delta T \leq 2$ °C ile sınırlandırılmaktadır.

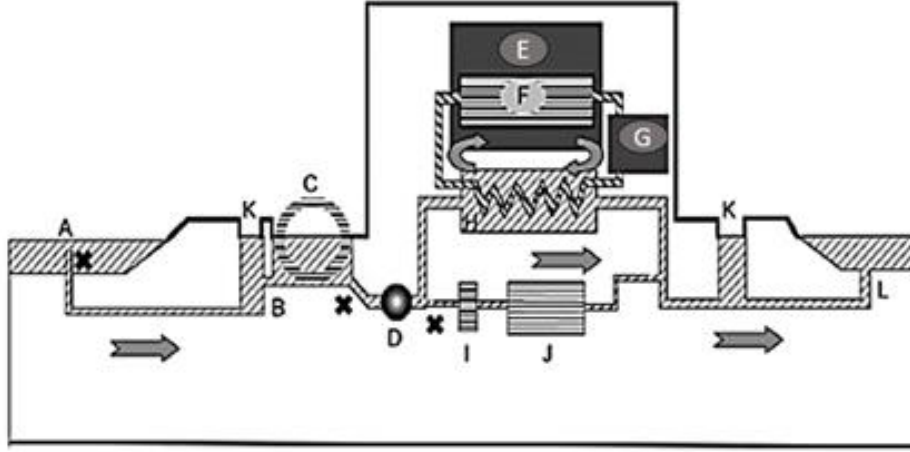
Ortalama sıcaklık için esas alınacak karışım bölgesi derinliği, termaldeşarj jetinin ortalama nüfuz derinliği (derin denizdeşarjları için) $h_{ort} \cong 0,20 \sim 0,25 x h_{deş}$ olarak tanımlanmaktadır.

Dünya Bankası Uzmanlar Heyeti'nin Yeni Kurulacak Termik Santrallere ilişkin rehber dokümanında ise, karışım bölgesi sonundaki ortalama sıcaklık artışının $\Delta T \leq 3$ °C olması önerilmektedir (World Bank Group, 1998; World Bank Group, 2007).

2.3 Deşarj akımı ve karışım bölgesindeki toplam bakiye klor limitleri

Tek geçişli deniz suyu ile soğutulan termik santrallerde, biyolojik büyümeyi engellemek üzere kullanılan klor seviyesinin;deşarj akımındaki toplam bakiye klor $\leq 0,2$ ppm olacak şekilde uygulanması önerilmektedir (World Bank Group, 1998).

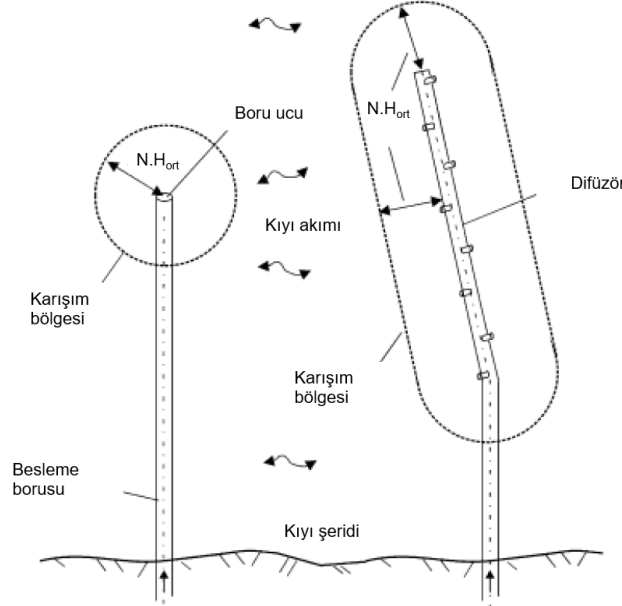
US EPA ise, karışım bölgesindeki azami ve sürekli toplam bakiye klor konsantrasyonlarının sırası ile 13 µg/L ve 7,5 µg/L değerlerini aşmamasını öngörmektedir (US EPA, 2006). Ancak çoğu durumda, termaldeşarj akımındaki toplam bakiye klor konsantrasyonunun (karışım bölgesindeki yüksek seyrelmelere güvenilerek) 0,4-0,5 mg/L seviyelerine kadar çıkabildiği bilinmektedir.



Şekil 1. Sahilde kurulu ve açık devre deniz suyuyla soğutulan tipik bir termik santral soğutma sisteminin bileşenleri. (A) Denizden su alma yapısı, (B) Kaba ızgaralar (40 mm aralıklı), (C) 10 mm gözenekli döner elek (4 paralel modül), (D) Ana soğutma suyu besleme pompası (4 adet), (E) Termik santral, (F) Buhar jeneratörleri, (G) Türbinler ve elektrik jeneratörleri, (H) Buhar yoğunlaştırıcıları (4 paralel modül), (I) 2 mm gözenekli basınçlı filtreler (4 modül), (J) Harici ve acil durum türbinleri ve elektrik jeneratörleri (16 modül), (K) Termal deşarj yüklenme odası, (L) Termal deşarj boru hattı, (X) Biyosit/klor enjeksiyon noktaları (Taylor, 2006).

Tablo 1. Soğutma yöntemlerinin birim maliyetleri (\$/kW) (Sundaram ve Daugard, 1974).

Soğutma yöntemleri	Maliyet/KW
Tek geçişli	2,0 \$-7,0 \$
Soğutma Lagünleri	4,0 \$-11,0 \$
Buharlaştırılmalı soğutma kuleleri	
Mekanik (Cebri) Çekişli	5,0 \$-13,0 \$
Doğal Çekişli	6,0 \$-16,0 \$
Buharlaştırılmasız Soğutma Kuleleri	
Mekanik (Cebri) Çekişli	18,0 \$-35,0 \$
Doğal Çekişli	20,0 \$-41,0 \$



Şekil 2. AB Ülkeleri için önerilen (termal) deşarj karışım bölgeleri (Bleninger ve Jirka, 2011).

3. Termal Deşarjların Çevresel Etkileri

3.1 Biyolojik büyümeyi kontrol amacıyla dezenfektan dozajlarının kontrolü

Soğutma suyu sistemlerinde biyolojik büyüme kontrolü amacıyla yaygın olarak kullanılan kimyasallar; oksitleyiciler (genellikle klor, ozon ve hidrojen peroksit) ve/veya oksitleyici olmayan (esas olarak aminler, aldehitler, izotiazolon) biyositlerdir. Genellikle biyosit aktivitesini arttırmak için sentetik dağıtıcılar (dispersan) veya enzimlerle takviye yapılır. Kullanım amaçları, dezenfeksiyonla mikrobiyal hücreleri öldürmek suretiyle biyolojik kirlilik sorununun çözüleceği görüşüne dayanmaktadır. Dezenfektanlara karşı biyo-tutunan

organizma hücrelerinin yüksek toleransı bulunmaktadır. Bu direnç, gen transferine, fenotipik (soyürel) adaptasyona ve mutasyonlara bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Biyotutunucu organizmaların yüksek direncinin bir sebebi de hücre dışı polimerik madde (EPS) matrislerinin anahtar rolü üstlendiği 3 boyutlu yapılarıdır. Bu karmaşık yapı; mikrobiyal hücrelerin, biyositlere maruz kalmadığı ölçüde, penetrasyonlarını sınırlayarak biyosit etkisini engelleyebilir. Bu nedenle, bu matrisin parçalanmasını optimize etmek, EPS matrisini bozarak ve mikrobiyal hücreleri biyosite maruz bırakarak dezenfeksiyon sürecini iyileştirmek için gereklidir. Genellikle dağıtıcı (dispersant) ve emülsiyonlaştırıcılar (emulsifier) soğutma suyu sistemlerinde biyositlerle birlikte

kullanılırlar ve hidrofilik ve hidrofobik olan fonksiyonel grupları sayesinde EPS matriksine nüfuz eder ve biyofilm yüzeyine ön şartlandırıcı etkisi sağlarlar. Sülfonatlar, sülfatlar ve kuaterner amonyum bileşikleri endüstriyel sistemlerde yaygın olarak kullanılan yüzey aktif maddeleri temsil eder (Di Pippo vd., 2018).

Yüksek biyo-parçalanabilirlikleri, düşük biyobirikim potansiyeli, toksik ve kanserojen olmayan özellikleri ile karakterize edilen, poliglizolitler başta olmak üzere 'yeşil' biyo-dağıtıcıların soğutma suyu sistemlerinde kullanılması daha uygundur. Benzer şekilde, proteazlar ve polisakkarit hidrolize edici enzimler gibi enzim bazı deterjanların kullanımı da önemli EPS matriks bileşenlerine karşı aktivitelerinden yararlanarak temizleme sürecini iyileştirebilir. Biyofilm matriks kompozisyonu, farklı abiyotik koşullara ve biyofilm topluluğu çeşitliliğine bağlı olarak değişebilir. Soğutma suyundaki biyofilmler karmaşık mikrobiyal topluluktur. Bu biyofilmlerin EPS matriksleri var olan popülasyonu yansıtır ve bu durum EPS bileşiminin günlük fotosentez dalgalanmalarıyla yakından ilişkili olduğu fototrofik biyofilmlerdeki ışımaya gibi çevresel faktörlerin yanıtı ile değişebilir (Di Pippo vd., 2018).

Klor uzun yıllar boyunca, nispeten ucuz, kolay temin edilebilir ve uygulaması kolay olduğu için endüstrilerde en yaygın kullanılan biyosittir. Ozon da soğutma suyunu sterilize etmek için kullanılır; ancak, onun da bazı kısıtları vardır. Ozon suda hızla ayrışır, saf suda yarılanma ömrü birkaç saattir, ancak soğutma amaçlı kullanılan sularda, mevcut herhangi bir organik maddenin oksidasyonu ile yarılanma ömrü dakikalara iner. Bozunma hızı ayrıca, artan pH değerlerinde daha yüksek olmak üzere, suyun pH'ına da bağlıdır. Ozon ayrıca, doğal organik maddelerle reaksiyona girerek, genellikle öncülerinden daha yüksek hızlı biyolojik olarak parçalanabilen düşük moleküler ağırlıklı oksidasyon yan ürünler üretir. Bunlar biyolojik büyümeyi (biyo-tutunmayı) destekler ve ozonun dezenfeksiyon etkinliğini daha da sınırlar (Di Pippo vd., 2018). Çeşitli su canlıları için tavsiye edilen klor dozajı ve temas süreleri Tablo 2'de verilmektedir (Çeçen, 1973; Öztürk, 2022).

Klorlanmış suyu deşarj etmeden önce zararlı etkileri gidermek için deklorize etmek bir başka alternatiftir. Ancak klor giderme ilave işletme maliyetine sebep olmaktadır. Bu yüzden araştırmacılar, daha etkili, ekonomik ve çevreye duyarlı sistemler üzerine çalışmalarını sürdürmektedir.

3.2 Dezenfektanların çevresel etkileri

İngiltere'de deniz suyu ile soğutmalı termik santral soğutma devrelerinde düşük dozlu klorlamada uygulanacak usul ve esaslar, Lewis (1984) tarafından merkezi elektrik üretim kurumu (CEGA) için hazırlanan rehberde göre belirlenmiştir. Bu rehberde termik santral soğutma devresindeki klor seviyesinin, bilinçli olarak, ortamdaki midyelerin ölümüne yol açmayan ancak üremelerini yavaşlatan belli bir eşik değerinin altında tutulması önerilmektedir (Şekil 3). Bu eşik sürekli olarak aşılmasının gereksiz dezenfektan israfına yol açacağı ve kondenser cidarlarından sökülüp uzaklaştırılacak yüksek miktardaki deniz kabuklusu deşarjı dolayısıyla ilk karışım bölgesinde gereksiz yere yüksek katı madde kirliliğinin söz konusu olabileceği uyarılarına işaret edilmektedir. Bu rehberdeki usul ve esaslara uyulduğu takdirde, klorun en kötü halde termal deşarj karışım bölgesinde kronik etkisinden ziyade akut etkilerinin söz konusu olabileceği belirtilmektedir. Ancak pratikte, termal deşarj karışım bölgesinde gerçekleşen seyrelmelerin etkisiyle dezenfektanın kronik etkilerinin hızlıca giderilebileceği bilinmektedir. (Davis ve Coughlan, 1992). Klor konsantrasyonu ile sıcaklık arasındaki artan sinerjik etkinin de seyrelme etkisiyle yüksek oranda oksitleyici kaybı dolayısıyla, soğutma devresindeki canlılardan ziyade karışım bölgesi ve yakın civarındaki diğer canlılar üzerinde daha anlamlı olabileceği belirtilmektedir.

Yeterli türbülans ve difüzyon/dispersiyona sahip (~4-5 kez seyrelme) termal deşarj karışım bölgelerinde yürütülen bentik ortam çalışmaları, dezenfeksiyon yan ürünleri içeren termal deşarjların, deşarj etki bölgesindeki deniz canlıları üzerinde tür sayısı, bolluk veya biyokütle dağılımları itibarı ile önemli/fark edilebilir düzeyde bütünlük etkilere yol açmadığını göstermektedir (Bamber, 1993, Elliott vd. 1998).

(i) Dezenfeksiyon yan ürünleri

Dezenfeksiyon yan ürünlerinin deniz canlılarındaki birikimini incelemek üzere Davis (1993) tarafından yapılan bir çalışmada, 0,1~0,2 mg/L bakiye klor içeren soğutma suyuna 22 hafta boyunca maruz bırakılan test organizmalarından (*Mytilus edulis*) alınan doku örneklerinde gaz kromatografisi ile yapılan analizlerde ölçülebilir düzeyde trihalometan (THM) tespit edilemediği belirtilmektedir.

Jenner vd. (1997) tarafından Avrupa'daki çok sayıda deniz suyu ile soğutmalı termik santral soğutma devresi giriş ve deşarjlarından alınan örneklerde ölçülen klorla dezenfeksiyon yan ürünü seviyeleri Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3 incelendiğinde aşağıdaki hususların öne çıktığı görülmektedir:

- Bütün deşarjlarda ölçüm limitleri üzerinde değerler alan baskın dezenfeksiyon yan ürünleri (DBP) bromoform ve dibromasetonitril (DBAN) olmuştur.
- Deşarjlardaki Bromoform ve DBAN seviyeleri sırası ile 1~43 µg/L (ort: 16 µg/L) ve 0,1-5,0 µg/L aralıklarında değişmektedir.
- Deşarjlardaki toplam ekstrakte edilebilir organohalojen seviyesi (EOX) de 1~13 µg Cl/L aralığında değişim göstermektedir.
- Göreli daha düşük bromoform konsantrasyonları, ham soğutma suyunun daha temiz (düşük organik kirlilikli) ve az bulanık (düşük alg/plankton seviyeli) olduğu tesislerde görülmektedir (Jenner vd., 1997).
- Termal deşarjlarda ölçülen klorlu dezenfeksiyon yan ürünlerinin, her bir yan ürüne ait akut zehirlilik limitlerinin ~1000 kat daha altında (~binde biri) kaldığı görülmektedir.

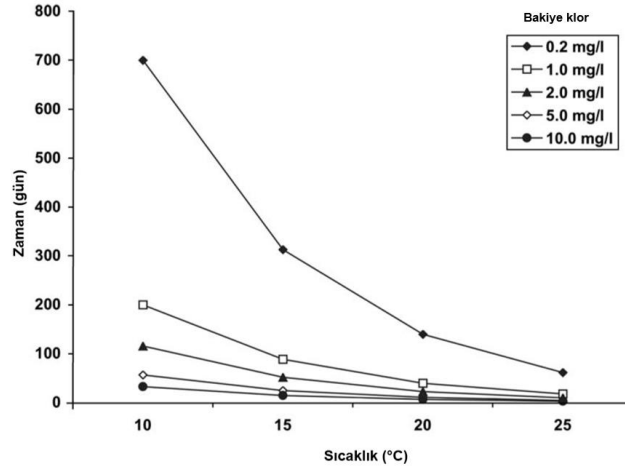
(ii) Soğutma Devresindeki Bütünlük Ekolojik Etkiler

Soğutma suyu ile sürüklenen canlıların maruz kaldıkları bütünlük etkileri laboratuvar şartlarında incelemek üzere bir maruziyet mimik birimi (entrainment mimic unit –EMU) tanımlanmıştır (Bamber ve Seaby, 2004). EMU'nun esası, bir termik santral kondenserinden geçen deniz suyuna hassas şekilde dezenfektan dozlanıp ısıtılmasıdır. Soğutma sularında bulunan çeşitli plankton sınıfı deniz canlıları laboratuvar ölçekli deney düzeneğinden geçirilerek tekil ve/veya bütünlük basınç değişimi, klor dozu, ısı ve mekanik kayma gerilmesi etkilerine maruz bırakılmaktadır. (Turnpenny ve Taylor, 2000).

Taylor (2006)'nın yaptığı çalışmaya göre, 10 dakika süreyle; $\Delta T = 11^\circ\text{C}$ sıcaklık artışı, 0,2 mg/L bakiye klor seviyesi ve -0,2 ~-2,4 atm basınç değişkenlerinin farklı kombinasyonları uygulandığı çeşitli deniz canlıları üzerindeki etkiler, türlere ve hayat evrelerine göre farklılık göstermektedir. Çalışmanın sonuçları, klorlu dezenfektan ve oluşan yan ürünlerin alıcı ortamda, karışım bölgesindeki akut zehirlilik veya daha yaygın ekotoksikolojik etkilerinin sınırlı düzeyde kalacağına işaret etmektedir. Buna mukabil, soğutma suyu devresinde sürüklenen deniz canlılarının; sıcaklık farkı/artışı (ΔT), basınç ve diğer stres unsurları dolayısıyla maruz kaldığı bütünlük etkilerin daha ağırlıklı olduğu görülmektedir. Aynı çalışmada, soğutma devresinden geçen larva ve planktonik organizmaların %30'lara varan oranlarda hasar görebileceği belirtilmektedir.

Tablo 2. Çeşitli su canlıları için klor dozu temas süresi ilişkileri (Çeçen, 1973; Öztürk, 2022).

Canlı Türü	Serbest Bakiye Klor Seviyeleri (mg/L)	Temas Süresi
Deniz Canlıları		
Bakteriler	0,5	5-7 dk
Demir ve Sülfür Bakterileri	1	60 dk
Algler	1	60 dk
Kabuksuz Deniz Organizmaları	1	60 dk / 8 saat
Kabuklu Organizmalar (siyah midye) <i>Mytilus edulis</i>	0,5-1,0 (Üreme Mevsiminde T > 8 °C)	Sürekli
	2-4 (Üreme Mevsimi Başında 7 gün süreyle)	Kesikli
	1,5 (Diğer Zamanlarda)	Sürekli



Şekil 3. Termik santral soğutma devresinde bakiye klor ve sıcaklığa bağlı olarak deniz midyelerinin (*Mytilus edulis*) tahmini ölüm süreleri (Lewis, 1984).

Tablo 3. Sahillerde kurulu termik santrallerin soğutma devresi giriş ve çıkışından alınan örneklerde ölçülen klorla dezenfeksiyon sonrası oluşan yan ürünler (Taylor, 2006).

	Konsantrasyon Aralığı (µg/L)	
	Giriş	Çıkış
Başlangıçta bakılan temel kirleticiler		
Kloroform	<0,1	<0,1-0,3
Bromoform	<0,1-1,0	1-43
Dibromoklorometan (DBCM)	<0,1	<0,1-2,2
Diklorobromometan (DCBM)	<0,1	<0,1-1,0
Monokloroasetik asit (MCAA)	<1	<1
Dikloroasetik asit (DCAA)	<1	<1
Trikloroasetik asit (TCAA)	<1	<1
Monobromoasetik asit (MBAA)	<1	<1-5
Dibromoasetik asit (DBAA)	<2	<2-10
Dibromasetonitril (DBAN)	<0,1	0,1-5,0
2, 4-Diklorofenol (2,4-DCP)	<0,4	<0,4
2, 4, 6-Triklorofenol (2,4,6-TCP)	<0,06	<0,06
2, 4-Dibromofenol (2,4-DBP)	<0,02	<0,02
2, 6-Dibromofenol (2,6-DBP)	<0,1	<0,1
2, 4, 6-Tribromofenol (2,4,6-TBP)	<0,05	<0,05-0,3
Asidik/bazik petrol eteri ile ekstrakte edilen toplam organohalojenler: EOX	0,3-2,4 µg Cl/L	1-13 µg Cl/L
Toplam asidik/bazik petrol eteri ile XAD reçinelerinin ekstraksiyonu yoluyla adsorbe edilen toplam organohalojenler: XADOX	1-20 µg Cl/L	3-15 µg Cl/L
Daha sonra eklenen kirleticiler		
Dibromoetan	0,1	0,7
1, 2, 3-Trikloropropan	0,2	15,8
2- Klorotoluen	0,1	2,2
4- Klorotoluen	0,1	1,3
1, 2- Dibromo-3-kloropropan	<0,1	1,2
1, 2, 3-Tribromobenzen	<0,1	1,1

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

4. Termal Deşarjarda Karışım Bölgesindeki Seyrelme Hesapları ve Termal Bulutun Uzak Alan Taşınım Modellemesi

Karışım bölgesinde seyrelme hesapları

Termal jet deşarjlarının deniz ortamında seyrelme ve soğumasında başlıca iki ardışık süreç etkili olmaktadır. Bunlardan ilki, yakın alan seyrelmesi (ilk seyrelme, birinci seyrelme (D_1)) olarak bilinen, deşarj karışım bölgesinde jet, momentum ve yoğunluk farkı etkisiyle gerçekleşen seyrelmedir. Karışım bölgesinde D_1 kez seyrelen termal jetin içinde 1 birim sıcak/ısınmış deşarj akımı ile D_1-1 birim deniz suyu (karışım bölgesindeki doğal ortamdan jet içine nüfuz eden su) bulunmaktadır. Karışım bölgesinde, bünyesine D_1-1 birim deniz suyu alıp seyrelerek soğuyan termal jet, bu bölgenin sonunda jet etkisinin kaybolması sonucu "termal bulut" halini alarak başlıca; rüzgâr, akıntı, türbülans, difüzyon ve dispersiyon süreçlerinin müşterek etkisiyle taşınarak genişler ve yüzeyden ısı kaybederek soğur. Bu süreç termal bulutun uzak alan seyrelmesi/soğuması veya ikinci seyrelme (D_2) olarak adlandırılır.

4.1 İlk seyrelme hesabı

(i) Boru hattı ucundaki difüzörden termal deşarj durumu
Termal jet deşarjı karışım bölgesinde, u_c hızlı akıntı yoluyla sağlanabilecek ortalama ilk seyrelme D_1 ; süreklilik denklemi esas alınarak,

$$Q_d x (D_1 - 1) = u_c x L_d x h^* \quad (1)$$

hesaplanabilir (Şekil 4a). Burada;

Q_d : deşarj debisi (m^3/s)
 D_1 : ilk seyrelme,
 u_c : difüzöre dik akıntı hızı (m/s)
 L_d : difüzör uzunluğu (m)
 h^* : termal deşarj bulutunun karışım bölgesi sonundaki kalınlığı (m)
 $olup$ difüzör ortasındaki derinliğin $1/4 \sim 1/5$ 'i ($\approx h^* \approx 0,20 \sim 0,25 h_{ort}$) alınır (Öztürk, 2022).

D_1 hesaplandıktan sonra, Q_d debisinin ($D_1 - 1$) Q_d kadar ısınmamış deniz suyu ile karışımı esası ile, sıcaklıklar üzerinde kütle dengesi ile ortalama sıcaklık artışı (ΔT) bulunur.

(ii) Açık kanal ile kıyından deşarj durumu
Literatürde, "sıcak suların açık kanalla (alıcı ortamlara) jet deşarjı" başlığı altında ele alınan bu husus, dünya genelinde termik santral termal deşarj sistemi tasarımında yaygın biçimde uygulanmaktadır (Şekil 4b) Konu hakkındaki teorik ve deneysel fiziksel modelleme çalışma sonuçları ile sistem tasarımına yönelik yöntem ve öneriler Stolzenbach ve Harleman (1971), (Stolzenbach ve Harleman (1973) ve Jirka ve Harleman (1975) tarafından kapsamlı olarak açıklanmıştır.

Açık kanal ile sahilden denize yapılan yüzeysel termal jet deşarjlarında, karışım bölgesi sonundaki kararlı bölge için hesaplanan teorik seyrelme (ilk seyrelme D_1) değerlerinin Densimetrik Froude sayısı F_{rd} ve kanal derinlik/yarı genişlik oranı (A) ile değişimi Şekil 5'te verilmektedir (Stolzenbach ve Harleman, 1973). Şekilden de görüldüğü üzere, karışım bölgesindeki (ilk) seyrelme öncelikle F_{rd} tarafından kontrol edilmekte olup A 'nın etkisi daha sınırlıdır. Açık kanaldan deşarj edilen termal jet akımları için densimetrik Froude sayısı F_{rd} ,

$$F_{rd} = u_0 / [\Delta\rho / \rho_a \cdot g \cdot h]^{0,5} \quad (2)$$

ifadesi ile de verilmektedir. Bu ifadede,

u_0 : B genişlikli açık kanaldan deşarj edilen termal jet akımının ortalama hızı (m/s),
 $\Delta\rho$: termal jet deşarj ortamı ile deniz suyu yoğunlukları arasındaki farkı (genellikle $0,002 \sim 0,003$ alınır),
 ρ_a : deşarjların yapıldığı deniz suyu yoğunluğunu (g/cm^3),
 g : yerçekimi ivmesini (cm/s^2) ve
 h : kanaldaki su derinliğini (m)

göstermektedir.

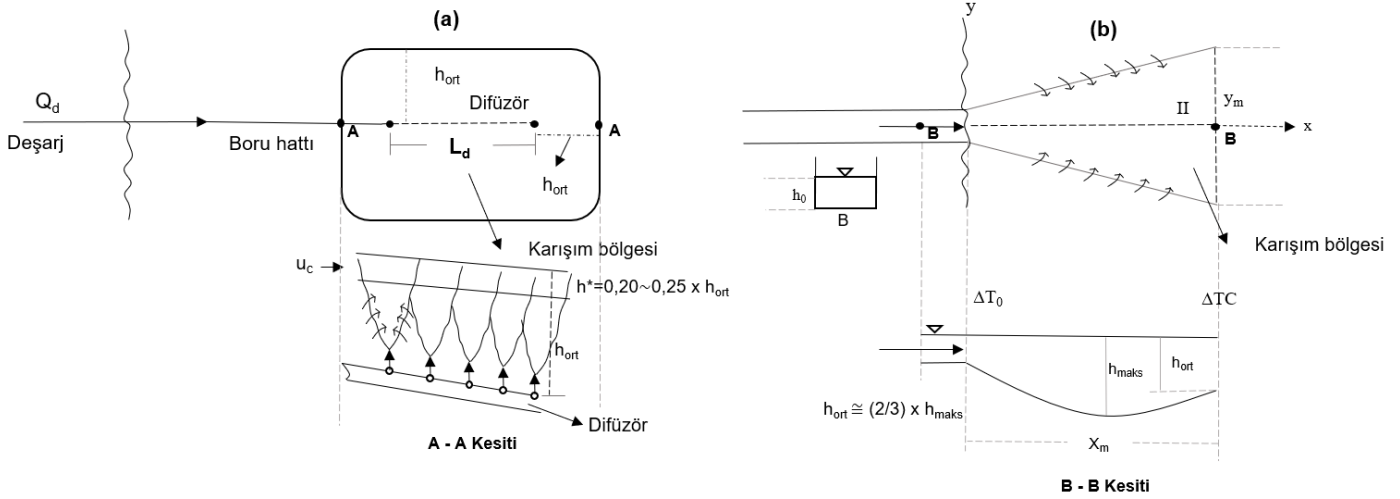
Yüzen termal jetlerde, jetin azami kalınlığı ya da dikey penetrasyon (nüfuz) derinliği de Denklem 3 ile verilmektedir (Stolzenbach & Harleman, 1973):

$$\frac{H_{maks}}{\sqrt{h_0 x b_0}} = 0,5 x F_{rd} \quad (3)$$

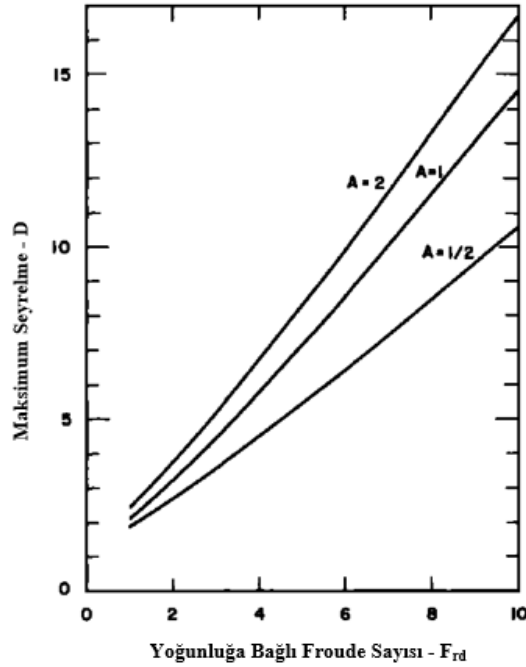
Derinliği h_0 ve yarı genişliği b_0 ($B/2$) olan bir dikdörtgen kanalla deniz ortamına yapılan termal yüzeysel jet deşarjları ile ilgili teorik analizler ve kritik deneysel parametreler olan $F_{rd} = 1 \sim 11$ ile $A = h_0/b_0 = 0,35 \sim 5,7$ aralığında yürütülen kapsamlı Fiziksel Model deneylerinden elde edilen sonuçlar; jet eksenini, $(x, z) = (x, 0)$, üzerindeki normalize sıcaklık artış oranı $\Delta T_c / \Delta T_0 = (T_c - T_a) / (T_0 - T_a)$ ile bu değerini yarıya düşüğü belli bir $x = x_1$ yatay mesafesinde y ve z yönlerindeki termal jet yarı genişlik ($b_{1/2}$) ve derinlik (kalınlık) ($h_{1/2}$) değerleri cinsinden $x / (b_0 \times h_0)^{0,5}$ boyutsuz parametresine bağlı olarak çeşitli grafiklerle verilmiştir (Stolzenbach ve Harleman, 1973). Anılan çalışmada, kıyından su yüzeyine termal jet deşarjlarında termal jetin davranışının belirlenmesi ile ilgili olarak yürütülen fiziksel modelleme çalışmalarında, densimetrik Froude Sayısı'na (F_{rd}) bağlı olarak karışım bölgesi sınırını belirleyen ($\Delta T_c / \Delta T_0$ oranının sabit olduğu/plato yaptığı) $x / (h_0 \cdot b_0)^{1/2}$ oranlarının değişimi de Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekildeki sütunlar yanında parantez içinde verilen sayılar $A = h_0/b_0$ oranlarını göstermektedir. Bu grafik yardımıyla belli bir F_{rd} ve (h_0/b_0) için karışım bölgesi sınırındaki $X_m / (h_0 \cdot b_0)^{0,5}$ oranlarından hareketle karışım bölgesi boyu/uzunluğu ($L \approx X_{karışım}$) hesaplanabilir. Böylece karışım bölgesi, kıyından yüzeye deşarj yapılan kanalın denize çıkış noktasından ($X = 0$) itibaren, $B=L=X_m$ boyutlu bir alan olarak belirlenebilir.

4.2 Uzak alan seyrelmesi/taşınımı

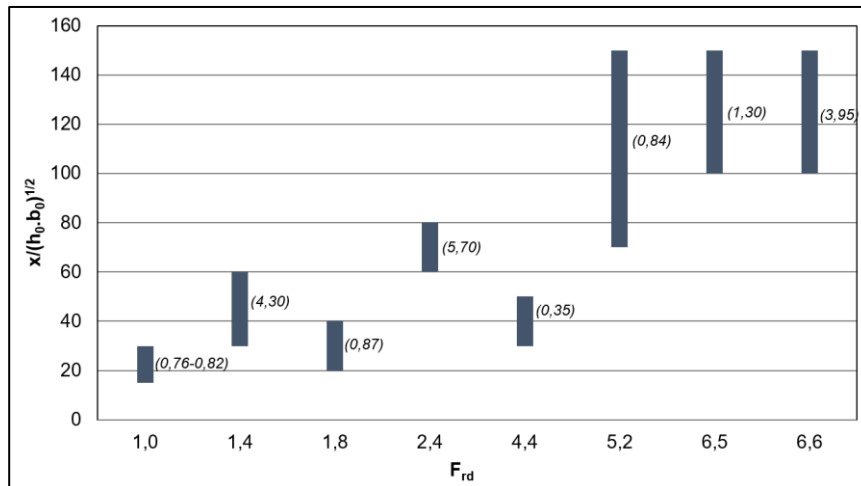
Bu bölümde, Kocaeli Dilovası bölgesinde kurulu olduğu varsayılan ~ 250 MW kurulu güçteki, hipotetik bir termik santralin (TS), açık devre soğutma suyu, termal deşarjının alıcı ortamda yol açacağı sıcaklık artışları ile termal deşarj bulutunun taşınım ve etki alanı Delft 3D Hidrodinamik (HD) ve Hidrotermal (HT) Modeli ile modelleneyecektir. Söz konusu hipotetik TS, Dilderesi'nin İzmit Körfezi'ne çıkış noktasının ~ 300 m yukarısında yer almakta olup, Körfez'in -18 m derinlikli kesiminden $Q = 10,5$ m^3/s debili soğutma suyu, Dilderesi üzerinden ortalama $+7$ °C ısınmış halde Körfeze deşarj edilmektedir (Şekil 7). Denizden alınan soğutma suyunun yaz (Temmuz-Ağustos) ve kış (Ocak-Şubat) dönemi ortalama sıcaklıkları sırası ile 15 °C ve 8 °C olup termal deşarj suyu sıcaklıkları da yaz ve kış dönemi ortalamaları itibarı ile $22,5$ °C ve 19 °C alınabilmektedir. Dilderesi'nin kış ve yaz dönemi ortalama akımları sırası ile $2,5$ m^3/s ve $0,5$ m^3/s 'dir. Bu verilerle, termal deşarj karışım bölgesi ve sonrasında (uzak alanda) sıcaklık artışı durumu ile ilgili hesap ve Delft 3D HD ve HT Modelleme sonuçları aşağıda özetlenmiştir



Şekil 4. Karışım bölgesi tanımları: (a) boru ucundaki difüzörden deşarj, (b) kıyıdan açık kanalla su yüzeyine deşarj.



Şekil 5. Termal deşarj karışım bölgesindeki ilk seyrelme hesap grafiği (Stolzenbach ve Harleman, 1973).



Şekil 6. Açık kanalla termal jet deşarjlarında densimetrik Froude Sayısı $x/\sqrt{(h_0 \cdot b_0)}$ oranı ilişkisi. (Parantez içindeki sayılar h_0/b_0 oranlarını göstermektedir.) (Stolzenbach ve Harleman, 1973'ten üretilmiştir.).

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

Termal deşarjlarda difüzör civarındaki karışım bölgesindeki ilk seyrelme (D_1) akıntı yoluyla gerçekleşen seyrelmeye eşit alınarak bulunabilir. Uzak alan seyrelmesi de ilk karışım bölgesi sınırından itibaren hâkim akıntı yönünde; akıntı, türbülans ve dispersiyon etkileri dikkate alınarak 2 boyutlu (su yüzey düzleminde taşınma mesafesine (x) bağlı olarak) iyi bir yaklaşımla hesaplanabilir. Bu bağlamda, Öztürk vd. (1995) ve Öztürk vd. (2000) Türkiye'nin Marmara Denizi sahillerinde yer alan 480 MW güçteki doğal gaz yakıtlı bir kombine çevrim santralının açık devre deniz suyu ile soğutma sistemi termal deşarjının deniz ortamındaki termal etkilerini, saha verileri ile kalibre edilmiş bir hidrotermal yazılımı ile modelleyerek; karışım bölgesinde ilgili çevre mevzuatında öngörülen sıcaklık artışı sınırlarının sağlandığını göstermişlerdir.

(i) Termal Deşarj Karışım Bölgesi'ndeki Seyrelme ve Sıcaklık Artışı Hesapları

Termal deşarjın yapıldığı mansap kesiminde, Dilderesi ortalama genişliği $B = 40$ m ve yatak pürüzlülüğü $n \approx 0,025$ alınarak yaz ve kış dönemleri için daha önce verilen yöntemle göre hesaplanan Densimetrik Froude Sayıları (F_{rd}), ilk seyrelme ve termal deşarjın maksimum nüfuz derinlikleri Tablo 4'teki gibidir:

Tablo 4. Termal deşarj karışım bölgesi için hesaplanan yaz ve kış dönem verileri.

Mevsim	F_{rd}	$h_0/(B/2)$	D_1	h_{maks}
Yaz	6,1	~0,02	~4	~9
Kış	6,0	~0,02	~4	~9

Bu tür dere veya açık kanal ile kıyıda yapılan yüzeysel termal jet deşarjlarında elde edilecek ilk seyrelmenin 4~6 aralığında kalacağı bilinmektedir (Bleninger ve Jirka, 2011).

Bu veriler dikkate alınarak SKKY Ek Tablo 2'de belirtilen 150 m x 150 m'lik karışım bölgesi sonundaki yaz ve kış dönemi ortalama sıcaklık artışları da termal deşarj karışım bölgesinde atmosfer ve deniz suyu ile ısı alışverişi ihmal edilerek, sırası ile $\Delta T \approx 2,1$ °C ~ 2,0 °C bulunur. Bu hesaplarda, kış dönemi için Dilderesi akımı ve deredeki soğuma dolayısıyla termal deşarj sıcaklığının 18 °C'ye düşeceği, su alma noktasındaki deniz suyu sıcaklığının da ~8 °C olacağı esas alınmıştır.

Bu verilerden hareketle, termal deşarjın bulut halini alacağı dere ağzından ~150 m çıktığı (karışım bölgesi sonu) ortalama sıcaklık artışlarının $\Delta T_{yaz} \leq 1$ °C ve $\Delta T_{kış} \leq 2$ °C olacağı söylenebilir. Uzak alanda akıntı, türbülans, difüzyon, dispersiyon ve yüzeyden soğuma süreçlerinin müşterek etkisi ile termal deşarj bulutunda oluşacak sıcaklık artışlarının da Delft 3D HD ve HT Modeli ile aşağıdaki gibi olacağı öngörülmektedir.

(ii) Delft 3D HD ve HT Modeli ile Termal Deşarj Bulutunun Taşınımı ve Soğumasının Belirlenmesi

Bu çalışmada, Delft3D modeli kullanılarak termal bulutun akıntı, türbülans, dispersiyon, rüzgâr hızı, atmosferle ısı alışverişi gibi etkenler altında yayılımı modellenmiştir. Delft3D yazılımı kıyı bölgelerinde hidrodinamik ve termal modelleme alanlarında oldukça yaygın olarak kullanılan açık kaynak kodlu bir yazılımdır (Sana, 2015; Durán-Colmenares et al., 2016; Morelissen et al., 2016; Råman Vinnå et al., 2017; Bermúdez et al., 2018; Laguna-Zarate et al., 2021). Delft 3D, yoğunluk ifadesindeki sıcaklık ve tuzluluk parametrelerini zaman, mekân ve derinlik ile değişen şekilde kullanma imkânı sağlamakta olup, yine zamanla değişen gelgit ve meteorolojik koşulları göz önüne alarak, hidrodinamik modelleme yöntemlerinin uygulaması mümkün olmaktadır. Model, sıkıştırılmaz serbest yüzeyli akımlar için 3-boyutlu Navier-Stokes denklemlerinden türetilen sığ su denklemlerini hidrostatik basınç kabulü altında çözmektedir (Deltares, 2014). Modelde kullanılan x- ve y- yönündeki momentum denklemleri:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial z} - f v = -\frac{1}{\rho_0} P_x + F_x + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + M_x \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial z} - f u = -\frac{1}{\rho_0} P_y + F_y + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + M_y \quad (5)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada,

u, v ve w: akıntı hız bileşenleri,
 ζ : su yüzeyi kotu,
d: su derinliği,

V_v : düşey türbülans viskozitesi,
f: Coriolis parametresi,

ρ_0 : ortalama yoğunluğu,

P_x ve P_y : yatay basınç bileşenleri,

M_x ve M_y : çökeltme ya da dış kaynaklara bağlı momentumu (harici momentum katkıları),

F_x ve F_y : Reynolds gerilmelerini temsil etmektedir.

Derinlik ortalamalı süreklilik denklemi ise Denklem 6'daki gibi ifade edilmektedir:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(d+\zeta)u}{\partial x} + \frac{\partial(d+\zeta)v}{\partial y} = (d+\zeta)Q \quad (6)$$

Burada,

U ve V: derinlik ortalamalı hız bileşenleri,

Q: suyun deşarj, tahliye, yağış veya buharlaşmadan dolayı birim alandaki katkısı ifade etmektedir.

Isı ve madde taşınımını ise Denklem 7 ile çözülmektedir.

$$\frac{\partial(d+\zeta)c}{\partial t} + \frac{\partial[(d+\zeta)uc]}{\partial x} + \frac{\partial[(d+\zeta)vc]}{\partial y} + \frac{\partial \omega c}{\partial z} = (d+\zeta) \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial c}{\partial y} \right) \right] + \frac{1}{(d+\zeta)} \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial c}{\partial z} \right) + Q \quad (7)$$

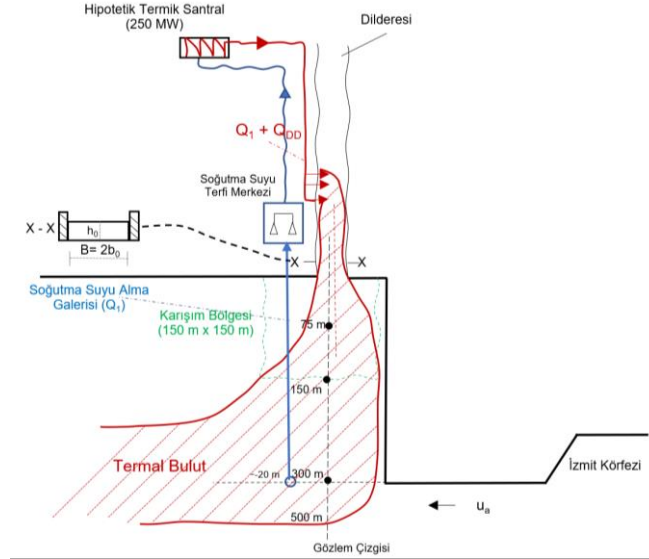
Burada,

c: madde konsantrasyonu,

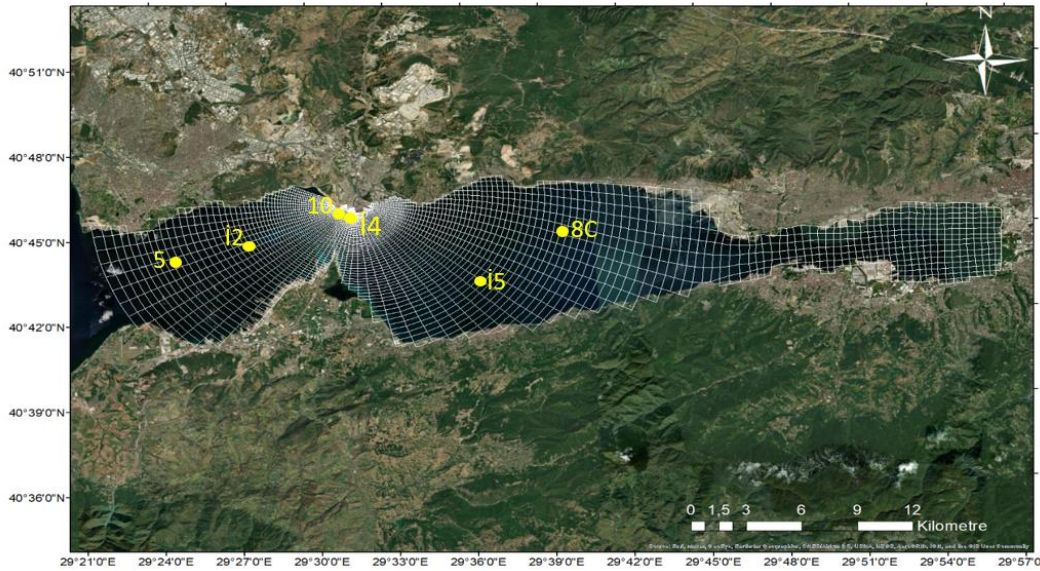
D_h ve D_v : yatay ve düşey difüzyon katsayılarını göstermektedir.

Hipotetik bir termal deşarjın yol açacağı sıcaklık artışının ve etki alanının belirlenmesi amacıyla, İzmit Körfezi'nin tamamını kapsayan geniş bir alan için yatayda eğrisel, düşeyde ise Z-model tipinde bir hesap ağı oluşturulmuştur (Şekil 8). Hesap ağının deşarj çıkışı yakınlarında sıklaştırılmasıyla, bu bölgede daha detaylı çözüm elde edilmesi mümkün kılınmıştır. Yatayda hesap ağı çözünürlüğü deşarj bölgesi yakınlarında 10 m civarında iken Körfez'in Marmara Denizi ile birleştiği kısımlarda 1 km değerine kadar düşmektedir. Düşeyde ise yüzeyde yaklaşık 2 m olan katman kalınlığı, en derin bölgede 48 m'ye ulaşmaktadır.

Modelleme alanında Körfez'in Marmara Denizi'ne açıldığı kısımda bir adet açık deniz sınırı bulunmaktadır. Bu sınır koşulunu tanımlamak için zamanla değişen su seviyesi, sıcaklık ve tuzluluk profillerine ihtiyaç duyulmaktadır. Model sınırında sürekli ölçülmüş veri bulunmadığından, çalışma alanına ait açık deniz sınır koşullarını elde edebilmek amacıyla Şen vd.'nin (2022) bölgesel modelinden faydalanılmıştır. Kullanılan bölgesel model Karadeniz, Marmara Denizi, Boğazlar ve Ege Denizi'nin kuzey bölümünü kapsamaktadır. Bölgesel model Marmara Denizi, İstanbul ve Çanakkale Boğazı'nda mevcut olan ölçümler kullanılarak kalibre edilmiş bir modeldir. Model hakkında detaylı bilgiler Öztürk (2021) ve Şen vd. (2022) çalışmalarında yer almaktadır. Bu model çıktıları 2008-2018 yıllarını kapsamaktadır. Bu çalışmadaki zaman periyoduna ait çıktıları da oluşturmak amacıyla, bölgesel model 1999-2000, 2005-2006 ve 2021-2022 yılları için de çalıştırılmıştır.



Şekil 7. Dilderesi ve hipotetik termik santral görünümü.



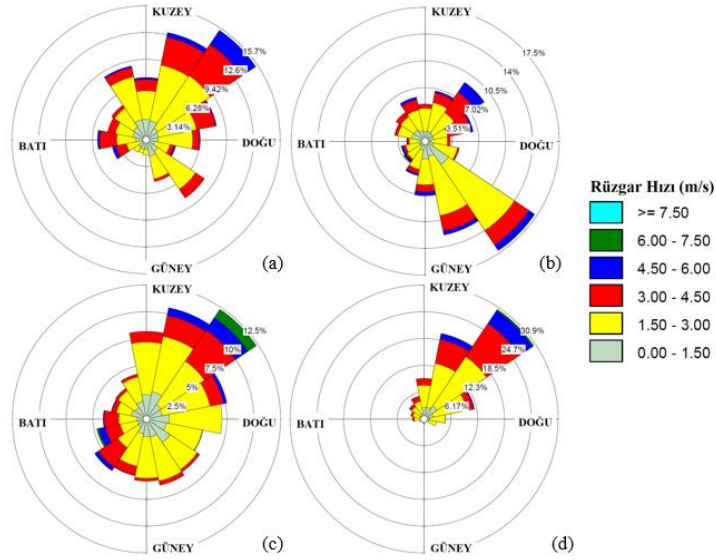
Şekil 8. Çalışma alanı ve hesap ağı gösterimi (Sarı noktalar kalibrasyon çalışmasında kullanılan ölçüm istasyonlarını göstermektedir).

Bu çalışmada meteorolojik girdi olarak ECMWF tarafından üretilen ERA5 saatlik reanaliz rüzgâr hızı ve yönü verileri kullanılmıştır. Modelleme alanına ait mevsimlik rüzgâr gülleri Şekil 9'da verilmiştir. Sonbahar, ilkbahar ve yaz dönemine ait rüzgâr gülleri incelendiğinde kuzeyli rüzgârların hâkim olduğu görülmektedir. Kış döneminde ise güneyli rüzgârların etkili olduğu görülmektedir. Ortalama rüzgâr hızı yoğun olarak 1,5 – 3,0 m/s ve 3,0 – 4,5 m/s arasında değerler almakta olup, kış döneminde rüzgâr hızlarında artış gözlenmektedir.

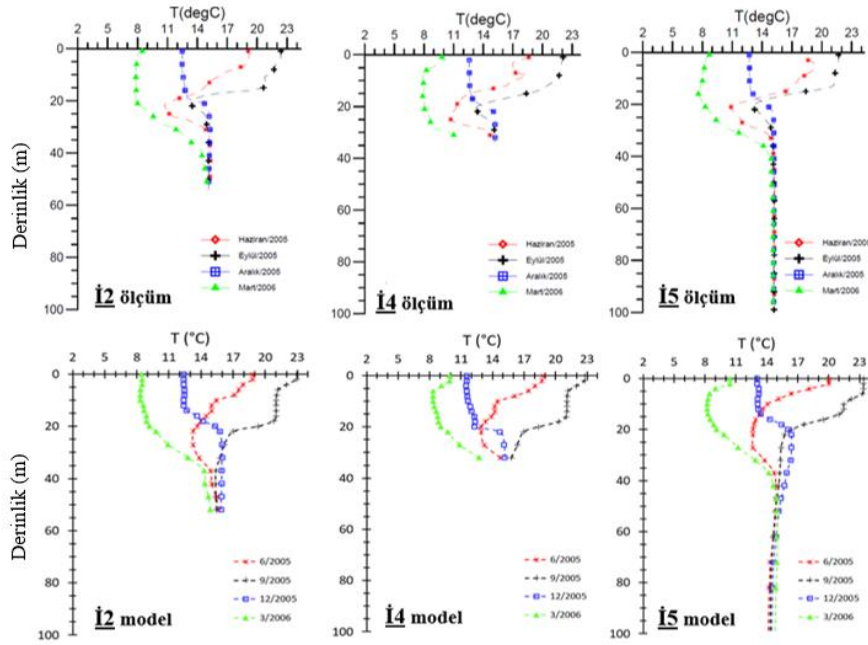
İzmit Körfezi için hazırlanan modelin doğruluğunu test etmek amacıyla T.C. Çevre Bakanlığı (2000), Ünlü ve Alpar (2004) ve Müftüoğlu (2008) kaynaklarında yer alan veriler kullanılmıştır. Bu çalışmalarda Şekil 8'de gösterilen 4 farklı istasyonda 1999-2000 ve 2005-2006 yıllarında yapılan sıcaklık profili ölçümlerinden faydalanılmıştır. Model sıcaklık tahminlerinin ölçümlerle karşılaştırması Şekil 10 ve Şekil 11'de verilmiştir. Model, ölçümlerle tutarlı sonuçlar vermektedir. Kış mevsiminde su yüzeyi sıcaklığı yaklaşık 7 °C değerine kadar düşerken, yaz mevsiminde yüzey sıcaklıkları 23 °C değerine kadar çıkabilmektedir. Derinde ise su sıcaklığı daha stabil olup, yaklaşık 15 °C olmaktadır. Hem gözlem hem

de model çıktılarında yaklaşık 10 m–30 m derinlikleri arasında kalınlığı değişken termoklin tabakası elde edilmiştir.

Körfez'deki genel sirkülasyon yapısı ise Ünlü ve Alpar (2004) çalışmasına göre körfezin güneyinde doğu yönünde olup, körfezin kuzeyinde ise batı yönündedir. Yüzeydeki akıntı hızları da 10 cm/s – 40 cm/s arasında değerler almaktadır (Şekil 12a). Müftüoğlu (2008) dış körfezde 0-15 cm/s arasında olan akıntı hızının Dil Burnu civarında artarak 20-30 cm/s gibi değerlere ulaşmakta olduğunu belirtmiştir. Model çıktıları incelendiğinde Eylül- Mayıs ayları arasındaki 9 aylık periyotta tahmin edilen genel sirkülasyon yapısının, Ünlü ve Alpar (2004) çalışmasıyla benzer olduğu görülmektedir (Şekil 12). Akıntı kuzey körfezde batı yönünde, güney körfezde ise doğu yönündedir. Dil Burnu'nun batısında siklonik sirkülasyon meydana gelirken doğusunda ise antisiklonik bir akıntı yapısı bulunmaktadır. Yaz döneminde ise (Haziran-Ağustos) yüzey sirkülasyonu körfez boyunca genel olarak batı (körfez dışına) yönündedir (Şekil 13). Elde edilen model sonuçlarına göre dış körfezde ortalama akıntı hızı 15 cm/s iken, Dil Burnu geçişinde 22 cm/s'dir.



Şekil 9. Modelleme alanı mevsimlik rüzgâr gülleri: a) sonbahar; b) kış; c) ilkbahar; d) yaz.



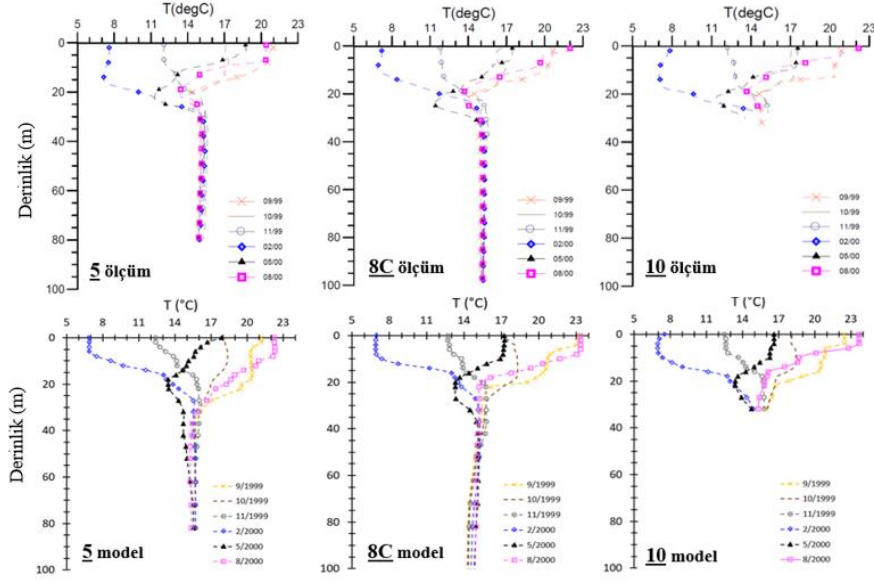
Şekil 10. 2005-2006 yılları arasında ölçüm (üst panel) ve model (alt panel) sıcaklık profilleri.

Termal Deşarj Senaryosu. Uzak alan sıcaklık modellerinde ilk olarak, su alma ve deşarj yapılmadığı durum için modelleme çalışması (S1 Senaryosu) gerçekleştirilmiştir. Bu senaryo, sıcak su deşarjı yapılan senaryolar için referans oluşturacaktır. Oluşturulan hidrodinamik model alt yapısı üzerine hipotetik bir termik santralin su alma ve deşarj bölgeleri tanımlanarak uzak alan sıcaklık yayılımı senaryosu oluşturulmuştur (S2 Senaryosu). Model üzerinde tanımlanan su alma ve deşarj noktalarının konumları Şekil 8'de verilmiştir. Bu senaryoda su alma noktasından çekilen su 7 °C ısıtılarak Dilderesi'nden Körfez'e bırakılmıştır. Deşarj debisi sabit 10,5 m³/s olarak alınmıştır. İki senaryo da kış mevsimini temsilen Şubat ve yaz mevsimini temsilen ağustos ayı için çalıştırılmıştır.

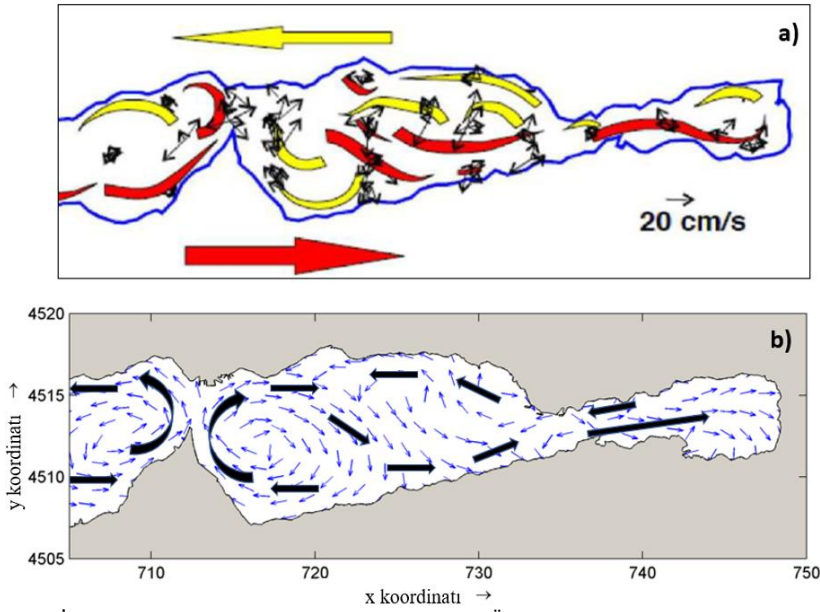
Kış ve yaz dönemi için su yüzeyinde elde edilen aylık ortalama sıcaklık farklarının (S2-S1) alansal değişimi Şekil 14'te sunulmuştur. Şekillerdeki kesikli çizgiler 0,5 °C ve 0,1 °C'lik sıcaklık artışlarının sınırlarını belirtmektedir. Simülasyon sonucuna göre, termal bulut kış döneminde daha fazla yayılım göstermiştir. Bu dönemde 1 °C'lik sıcaklık artış çizgisi liman çıkışına kadar ulaşmaktadır. Yaz döneminde ise etki alanı oldukça dar bir bölge ile sınırlıdır. Yaz dönemindeki 1 °C'lik ve

0,5 °C'lik sıcaklık artış çizgisi liman içerisinde kalmaktadır. Yaz döneminde su sıcaklığı derinlikle azalmaktadır ve su alma yapısı tarafından ortamdaki çekilen su (yaklaşık 18 m derinlikten) yüzeyle göre daha soğuk kalmaktadır. Çekilen suyun 7 °C ısıtılarak yüzeyle geri verilmesi halinde su yüzeyi ve termal deşarj arasında daha düşük sıcaklık farkı oluşmaktadır. Dolayısıyla yaz döneminde ortama verilen termal deşarj daha küçük bir alanı etkilemektedir. Şekil 15'te de benzer şekilde ilk 6 m derinlik için bu iki döneme ait aylık ortalama sıcaklık farkı verilmiştir. Her iki dönem için de termal deşarjın yüzeyle nazaran daha küçük bir alanı etkilediği ve sıcaklık artışının önemli ölçüde azaldığı görülmektedir.

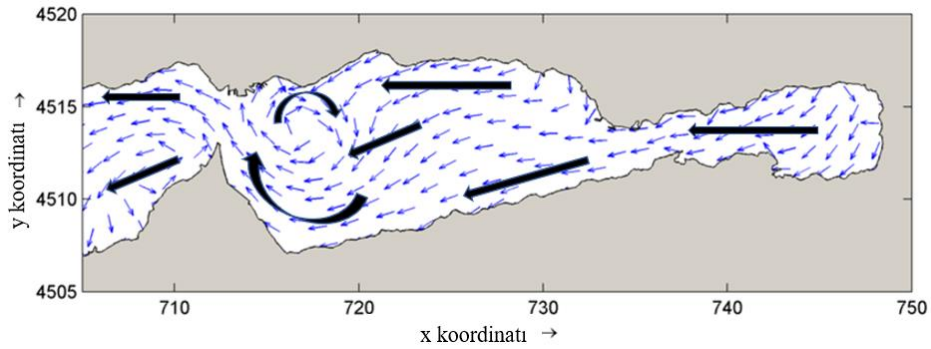
Termal deşarjın su sütunu boyunca yol açtığı etkiyi incelemek amacıyla kış ve yaz dönemi için sıcaklık artışının derinlikle değişimi (deşarj noktasından itibaren ilk 1000 m mesafe boyunca) Şekil 16'da gösterilmiştir. Termal deşarj, çıkış bölgesi yakınında yaklaşık 10 m derinliğe kadar nüfuz etmektedir. Kış döneminde yaz dönemine göre deşarj yakınlığında oldukça yüksek sıcaklık farkları oluşmaktadır. Kış döneminde termal deşarjın etkisi yaklaşık 1000 m mesafeden sonra oldukça azalmaktadır; yaz döneminde ise yaklaşık 500 m mesafeye kadar etkili olmaktadır.



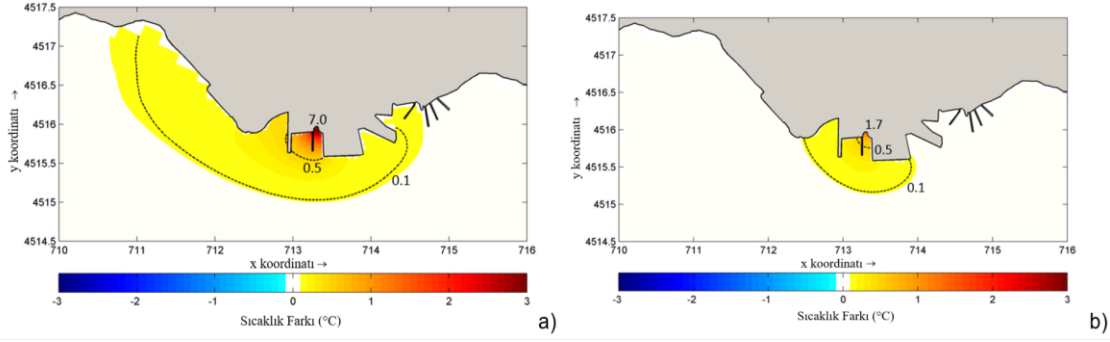
Şekil 11. 1999-2000 yılları arasında ölçüm (üst panel) ve model (alt panel) sıcaklık profilleri.



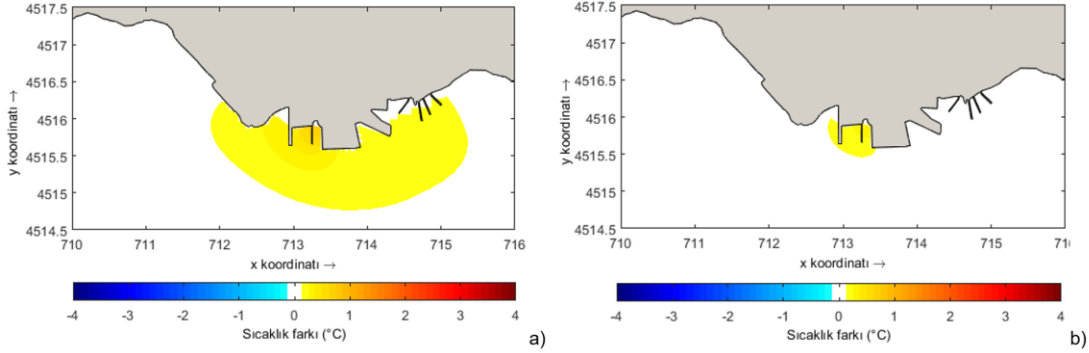
Şekil 12. İzmit Körfezi ortalama yüzey sirkülasyonu: a) Ünlü ve Alpar (2004); b) Model sonucu.



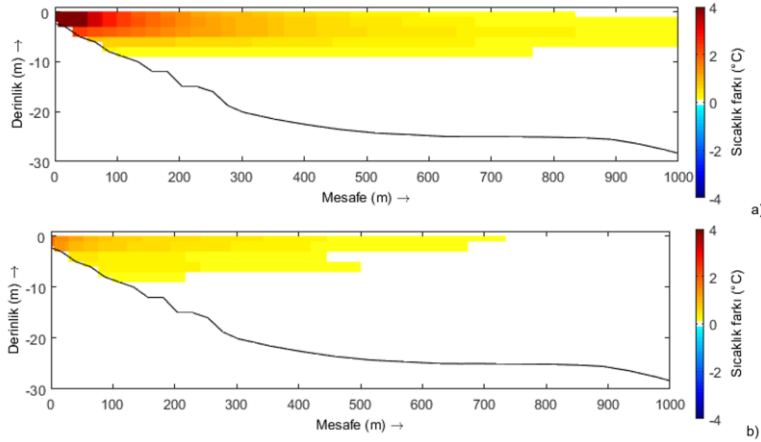
Şekil 13. Yaz döneminde İzmit Körfezi ortalama yüzey sirkülasyonu model sonuçları.



Şekil 14. Su yüzeyi aylık ortalama sıcaklık farkları (a) kış ve (b) yaz dönemi.



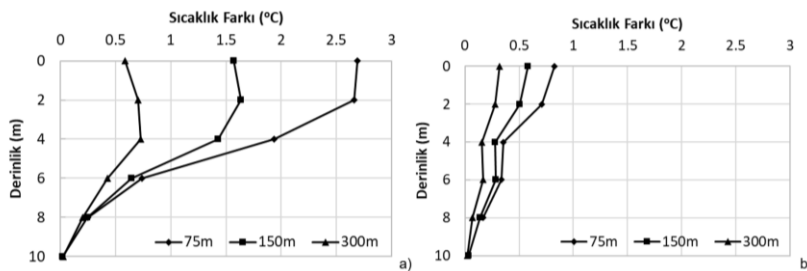
Şekil 15. 6 m derinlikte aylık ortalama sıcaklık farkları (a) kış ve (b) yaz dönemi.



Şekil 16. Aylık ortalama sıcaklık farkı profilleri (a) kış ve yaz (b) dönemi.

Termal deşarjın yapıldığı noktadan itibaren 75 m, 150 m ve 300 m uzaklıktaki üç mesafede (Şekil 7) oluşan sıcaklık artış profilleri Şekil 17'de verilmiştir. Sıcaklık artışı en fazla 75 m mesafede olmaktadır; burada kış döneminde yüzey sıcaklık artışı 2,5 °C'nin üzerine çıkarken yaz döneminde ise 1,0 °C'nin altında kalmaktadır. Bu değerler 6 m derinlikte ise sırasıyla 1,0 °C ve 0,5 °C'nin altına düşmektedir. Deşarjdan 150 m sonra ise, seyrelmenin artmasıyla kış ve yaz

döneminde sıcaklık artışı sırasıyla yaklaşık 1,5 °C ve 0,5 °C değerlerine düşmektedir. Derinde ise (6 m) bu seyrelme yüzeye oranla daha az olmaktadır. Deşarjın 300 m ilerisinde kışın sıcaklık artışı yaklaşık 0,5 °C değerine düşerken yaz döneminde ise yaklaşık 0,25 °C gibi oldukça düşük bir değere ulaşmaktadır.



Şekil 17. Karışım bölgesinde 75 m, 150 m ve 300 m mesafelerde kış (a) ve yaz (b) dönemi ortalama sıcaklık artış profilleri.

Açık devre veya tek geçişli soğutma, sahil bölgelerinde kurulu termik santrallerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Beher 1000 MW kurulu güç başına $\sim 50\text{m}^3/\text{s}$ soğutma suyuna ihtiyaç duyulan bu tür soğutma sistemlerinin çevresel etkileri başlıca iki ana başlıkta ele alınmaktadır: Soğutma devresi içinde ve deşarj karışım bölgesinde. Soğutma devresinde; denizden su alma yapısı girişinden başlayarak, terfi merkezi, kondenserler ve dahili boru hatlarında; $\Delta T \cong \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ 'lik sıcaklık artışı (termal şok), biyolojik büyüme kontrolü için yapılan sürekli ve şok klor uygulamaları ile pompalardan geçiş sırasındaki basınç, türbülans ve kayma gerilmelerine maruziyet dolayısıyla, soğutma suyundaki larva ve planktonlarda %30'lara varan oranlarda olumsuz çevresel etkiler yaşanabilmektedir. Termal deşarjın denizde karışım bölgesindeki çevresel etkiler ise genelde bu bölgedeki ortalama sıcaklık artışı $\Delta T \leq 3\text{ }^\circ\text{C}$ olacak şekilde seyrelme ve yüzeyden soğuma sağlanarak en aza indirilmeye çalışılmaktadır.

Her iki konu 1970'li yıllardan beri, kurulu (çalışır durumda) santrallerde yoğun şekilde araştırılmıştır; (Briand (1975), Davies ve Jensen (1975), Dunstall (1985), Choi v.d. (2012), Moss Landing Marine Laboratories (2006)). Faal durumdaki termik santrallerin soğutma devreleri ile termal deşarjların yapıldığı deniz ortamlarında gerçekleştirilen söz konusu çalışmalarda,

- Gözlenen ekolojik etkilerin, büyük ölçüde proje alanına özgü yerel özelliklere bağlı olarak önemli farklılıklar gösterebildiği, bu yüzden benzer etkilerin bütün durumlarda gözlenebileceği yönünde bir genelleme yapılamayacağı
- Sıcaklık farkının hızla azalıp sönümlenerek birkaç km sonra ortadan kalktığı/kalkacağı vurgulanmaktadır.

Bu çalışmalarda soğutma devresinde 4~6 $^\circ\text{C}$ 'nin üzerinde termal şoka maruz plankton popülasyonunda %30'lar düzeyinde hasar veya inhibisyon yaşanabileceği ancak bunun termal deşarjın yakın alanı (ilk karışım bölgesi) dışında hızla dengelenip restore edilerek uzak alandaki deniz ekosistemi üzerindeki etkilerin tolere edilebilir düzeylerde kaldığı belirtilmektedir. Santral soğutma devresinde gerçekleşen termal şokun soğutma suyundaki bakteri popülasyonunun çoğalma hızlarını artırıcı yönde etki yaptığı, 0,1 ppm düzeyini aşmayan serbest bakiye klor uygulamalarının da plankton ve deniz kabukluları popülasyonunca tolere edilebildiği ifade edilmektedir. Söz konusu etkilerin asgari düzeylerde tutulabilmesi için soğutma suyunun olabildiğince derinden ve düşük sıcaklıkta (soğuk) alınması ve soğutma devresindeki sıcaklık artışının (8~10 $^\circ\text{C}$ (maks)) ile sınırlandırılması önerilmektedir.

Termal deşarjın deniz ortamındaki çevresel etkilerinin izlenip denetlendiği karışım bölgesi genişliği genelde, deşarj noktasındaki derinliğe bağlı olarak tanımlanmaktadır. Ancak karışım bölgesinin özellikle çok büyük kapasiteli (nükleer santraller vb.) tesislerde, yere özgü olarak planlanacak kapsamlı bilimsel çalışmalarla belirlenmesi önerilmektedir. Kıyıda açık kanalla su yüzeyine yapılan termal deşarjlar için karışım bölgesinin, ilk yaklaşımda, deşarj noktasından itibaren ilk 100 m'lik alan olarak alınabileceği önerilmektedir (World Bank Group, 1998).

Türkiye'de Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği'nde karışım bölgesi, kıyıda deşarj noktasını merkez alan 500 m yarıçaplı su kütlesi olarak tanımlanmaktadır (YSKY, 2012). SKKY Ek Tablo 2'de ise, derin deniz deşarjı türündeki termal deşarjlarda karışım bölgesi, deşarj noktasını merkez alan 75 m yarıçaplı daireyle sınırlı alan olarak tarif edilmekte olup difüzör(ler) vasıtasıyla yapılan deşarjlarda karışım bölgesiyle

ilgili belirsizlik bulunmaktadır. Kıyıda yapılacak termal deşarjlar için karışım bölgesinin deşarj noktasını içine alan 150 m x 150 m'lik alan olarak alınması gerektiği (Nükleer Santraller gibi çok büyük debili deşarjlar hariç) değerlendirilmektedir (SKKY, 2004).

Termal Deşarjların karışım bölgesi dışında (uzak alan) taşınım ve soğuma süreçleri Delft 3D vb. Hidrodinamik ve hidrotermal modeller yardımı ile mevsimsel ve yıl boyu sıcaklık artışı dağılımları elde edilerek modellenebilmektedir. Özellikle hassas su kütlelerine yapılan termal deşarjların, yakın ve uzak alandaki çevresel etkilerinin deşarj öncesi ve sonrası ekolojik izleme programları ile sürekli olarak değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

6. Teşekkür ve Bilgi

Dilideresi mansabında yapılan alıcı ortam (deniz) izleme verilerini paylaşan Çolakoğlu Metalurji A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır. Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

7. Kaynaklar

- Bamber, R. N. & R. M. H. Seaby (2004). The effects of power station entrainment passage on three species of marine planktonic crustacean, *Acartia tonsa* (Copepoda), *Crangon crangon* (Decapoda) and *Homarus gammarus* (Decapoda). *Marine Environmental Research* 57, 281–294.
- Bamber, R.N., (1993). The ecology of Thorpeness in relation to Sizewell power stations. Report to Nuclear Electric by Fawley Aquatic Research Laboratories, Fawley, Southampton, UK, p. 16.
- Bermúdez, M., Cea, L., Puertas, J., Rodríguez, N., & Baztán, J. (2018). Numerical modeling of the impact of a pumped-storage hydroelectric power plant on the reservoirs' thermal stratification structure: a case study in NW Spain. *Environmental Modeling & Assessment*, 23, 71-85.
- Bleninger, T. & G. H. Jirka (2011). Mixing zone regulation for effluent discharges into EU waters, *Water Management*, 164, 387, 396.
- Briand, F. J. P. (1975). Effects of power-plant cooling system on marine phytoplankton. *Marine Biology* (33), 135-146.
- Choi, K-H., Y. O. Kim, J. B. Lee, S. Y. Wang, M. W. Lee, P. G. Lee, D. S. Ahn, J. S. Hong, H. Y. Soh (2012). Thermal impacts of a coal power plant on the plankton in an open coastal water environment. *Journal of Marine Science and Technology*, 20(2), 187-194.
- Çeçen, C., (1975). İçme Suyu Mühendisliği. İstanbul Sular İdaresi Yayımı.
- Davies, R., L. Jensen (1975). Zooplankton Entrainment at Tree Mid-Atlantic Power Plants. *Journal of Water Pollution* (47), 2130-2142.
- Davis, M.H. & J. Coughlan (1992). The Farl chlorine dissipation model: a working manual, Report to Nuclear Electric by Fawley Aquatic Research Ltd., Fawley, Southampton, UK, p. 32.
- Davis, M.H. (1993). Accumulation of halogenated compounds by mussels exposed to chlorination, Report to Nuclear Electric by Fawley Aquatic Research Laboratories, Fawley, Southampton, UK, p. 32.

- Di Pippo, F., Di Gregorio, L., Congestri, R., Tandoi V., and Rossetti, S. (2018). Biofilm growth and control in cooling water industrial systems, *FEMS Microbiology Ecology*, 94.
- Deltares. (2014). User Manual Delft3D-Flow.
- Dunstall, T. (1985). Effects on entrainment on phytoplankton primary production at four thermal electric generating stations on the laurentian great lakes. *Int. revue ges. hydrobiol* (70), 247-257.
- Durán-Colmenares, A., Barrios-Piña, H., & Ramírez-León, H. (2016). Numerical modeling of water thermal plumes emitted by thermal power plants. *Water*, 8(11), 482.
- Elliott, M., N. Cutts, J. Allen, N. Proctor (1998). Sizewell B offshore marine survey. Report to Nuclear Electric Ltd. by Institute of Estuarine and Coastal Studies, University of Hull, UK (i-v), pp. 1-144.
- Jenner, H.A., C. J. L. Taylor, M. van Donk, M. Khalanski (1997). Chlorination by-products in chlorinated cooling water of some European coastal power stations. *Marine Environmental Research* 43 (4), 279-293.
- Jirka, G. H. & D. R. F. Harleman (1975). Thermal Pollution Analysis. *Buoyant Jets in Confined Surroundings*, 71-85.
- Laguna-Zarate, L., Barrios-Piña, H., Ramírez-León, H., García-Díaz, R., & Becerril-Piña, R. (2021). Analysis of Thermal Plume Dispersion into the Sea by Remote Sensing and Numerical Modeling. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(12), 1437.
- Lewis, B.G. (1984). Effects of continuous chlorination on mussels and validation of preliminary model, Central Electricity Generating Board Internal Report, Leatherhead, UK, p. 43.
- Morelissen, R., Vlijm, R., Hwang, I., Doneker, R. L., & Ramachandran, A. S. (2016). Hydrodynamic modelling of large-scale cooling water outfalls with a dynamically coupled near-field-far-field modelling system. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 4(2), 138-151.
- Moss Landing Marine Laboratories. (2006). Ecological Effects of the Moss Landing Powerplant Thermal Discharge.
- Müftüoğlu, A. E. (2008). Marmara Denizi Haliç ve Körfezlerinin Hidrodinamik Yapısı. *Deniz Bilimleri ve İşletmeciliği Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi. Doktora Tezi.*
- Öztürk, İ. (2022). *Deniz Deşarjı Tesisleri Tasarımı, Atıksu, Termal ve Tuzlu Su Deşarjları*, İTÜ Yayınevi. ISBN: 978-975-6455-50-0
- Öztürk, İ., Sarıkaya, H.Z., Aydın, A.F., Demir, İ. (1995). A simplified model for thermal discharges, *Water Sci. Tech.* 32(2), pp. 183-191.
- Öztürk, İ., Sarıkaya, H.Z., Aydın, A.F., Yüksel, E., Ökten, Eser Ökten, H. (2000). Environmental impact assessment of thermal discharges in Turkey, *Marine Waste Water Discharges*, Genova, Italy.
- Råman Vinnå, L., Wüest, A., & Bouffard, D. (2017). Physical effects of thermal pollution in lakes. *Water Resources Research*, 53(5), 3968-3987.
- Sana, A. (2015). Hydrodynamic and thermal dispersion modelling of the effluent in a coastal channel. *Recent Progress in Desalination, Environmental and Marine Outfall Systems*, 269-283.
- Stolzenbach, K. D. & D. R. Harleman (1971). An Analytical and Experimental Investigation of Surface Discharges of Heated Water. *Water Pollution Control Research Series*, Environmental Protection Agency, EPA/810/R-71/115
- Stolzenbach, K. D. & D. R. Harleman (1973). Three-dimensional heated surface jets. *Water Resources Research*, 9(1), 129-137. doi 10.1029/wr009i001p00129.
- Su Kiriliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY) (2004). Çevre ve Orman Bakanlığı, TC. Resmi Gazete, Tarih: 31.12.2004, Sayı: 25687.
- Sundaram, T. R. & S. J. Daugard (1974). Some considerations of engineering aspects of power plant discharges, *Thermal pollution analysis : technical papers from the Thermal Pollution Analysis Conference.*
- Şen, O., Saçu, Ş., Erdik, T., Öztürk, İ., & Stanev, E. V. (2022). Assessing the potential impacts of the Canal Istanbul on the physical oceanography of the Turkish Straits System. *Continental Shelf Research*, 240, 104723.
- T.C. Çevre Bakanlığı (2000). 17 Ağustos 1999 Depremi Sonrası İzmit Körfezi'nde Ölçme ve İzleme Programı, İzmit Körfezi'nin Oşinografisi Sonuç Raporu, Deniz Bilimleri ve İşletmeciliği Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi
- Taylor, C. J. L. (2006). The effects of biological fouling control at coastal and estuarine power stations, *Marine Pollution Bulletin* 53, 30-48.
- Turnpenny, A. W. H. & C. J. L. Taylor (2000). An assessment of the effect of the Sizewell power stations on fish populations. *Hydroecologie Applique'e* 12 (1-2), 87-134.
- US EPA (US Environmental Protection Agency) (2006) National Recommended Water Quality Criteria: 2006. See <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey%4P1003R9X.txt>(accessed 18/02/2011).
- Ünlü, S., Alpar, B. (2004). Hydrocarbon balance of surface sediments in Izmit Bay (Marmara Sea) Turkey (İzmit Körfezi (Marmara Denizi) Yüzey sedimanlarının hidrokarbon dengesi), *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 73, s. 85-92.
- World Bank Group (1998). *The Environmental Assessment Process, Pollution Prevention and Abatement Handbook 1998 Toward Cleaner Production.*
- World Bank Group (2007). *Environmental, Health, and Safety General Guidelines*, International Finance Corporation.
- Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (YSKY) (2015). Tarım ve Orman Bakanlığı, Resmi Gazete Tarihi: 30.11.2012 Resmi Gazete Sayısı: 28