



Akkuyu Körfezi (Mersin) deniz suyunun fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkileyen süreçler

Processes affecting the physical and chemical properties of Akkuyu Bay sea water (Mersin - Turkey)

N.Nur ÖZYURT, C.Serdar BAYARI, Müfit Ş.DOĞDU, Alparslan ARIKAN

Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06532 Beytepe, ANKARA

ÖZ

Türkiye'de inşa edilmesi planlanan ilk nükleer santralda Akkuyu Körfezi'ndeki deniz suyunun soğutma suyu olarak kullanılması amaçlanmaktadır. Deniz suyunun soğutmada en yüksek verimle kullanılması için fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yer ve zaman içindeki değişimin bilinmesi gerekmektedir. Deniz suyunun sıcaklık, pH, özgül elektriksel iletkenlik, çözünmüş oksijen derişimi, tuzluluk ve redoks potansiyeli parametrelerinin, alan ve zaman içindeki değişimi çalışma alanında homojen olarak dağılan 14 istasyonda yapılan bir yıl süreli aylık ölçümlerle belirlenmiştir. Atmosferik ısı akısı ve yağış suyu kaynaklı tatlı su girişinin, bu parametrelerin değişimi üzerinde etkili ana faktörler olduğu belirlenmiştir. Brunt-Vaisala duraylılık frekansı hesaplamaları ile de desteklenen gözlemler; deniz suyuyla türbülanslı difüzyonun hakim süreç ve Eylül ile Mart ayları arasındaki dönemde düşey yönde homojen olduğunu göstermektedir. Bu dönemin dışında düşey duraylılık bozulmakta, yüzey ve derin deniz suyunun sıcaklık ve özgül elektriksel iletkenlikleri arasındaki fark artmaktadır. En yüksek duraylılık frekansına ve bunun bir sonucu olan düşey yöndeki homojenlikten sapmaya Haziran ayında ulaşılmaktadır. Uzun süreli ölçümlere dayalı bulgular uygun derin deniz deşarj derinliğinin -20 m ile -25 m dolayında olması gerektiğini göstermektedir. Soğutma suyu ile denize salınan ısının hızla homojenleşmesi açısından en uygun dönemin Ekim - Mayıs ayları olduğu belirlenmiştir. Deniz suyu sıcaklığının çevresel kalite ölçüt sınırları arasında tutulabilmesi için santral işletme veriminin yaz aylarında düşürülmesi gerekebilecektir.

Anahtar kelimeler: Akkuyu Körfezi, deniz suyu, nükleer santral, türbülanslı karışım.

ABSTRACT

Akkuyu Bay seawater is intended to be used as cooling water in the first nuclear power plant planned to be constructed in Turkey. Determination of the processes affecting the variation of the seawater's physical and chemical properties is essential for the optimum use of cooling water. Physical and chemical properties of the seawater comprising of temperature, pH, specific electrical conductivity, dissolved oxygen content, salinity and redox potential were measured monthly in evenly distributed stations for a period of one year to determine the spatial and temporal variations. Atmospheric heat flux and fresh water inputs by rainfall were found to be major factors that affect these properties. The observations justified by Brunt-Vaisala stability frequency calculations pointed out that the seawater becomes vertically homogenous between September and February during which turbulent diffusion is the dominant process. Out of this period, vertical stability is well established and the difference between surface and deep waters' temperature and specific electrical conductivity increases. Maximum stability frequency and resulting vertical inhomogeneity are attained in June. Observations based on the long period measurements show that the suitable depth for the deep water discharge is around -20 m and -25 m. Convenient period for the homogenisation of heat which is given to the sea water by the cooling water is between October-May. Efficiency of the power plant management should be reduced during the summer months, in order to keep sea water temperature between the limits of environmental quality criteria.

Key words: Akkuyu Bay, seawater, nuclear reactor, turbulent mixing.

GİRİŞ

Türkiye'de planlanan ilk nükleer santral yeri olarak Akkuyu Körfezi (Mersin) seçilmiştir. Benzeri diğer termal santrallarda olduğu gibi, nükleer santrallarda da, buhar üretiminde kullanılan kapalı devre akışkanın tekrar sıvılaştırılması için bol miktarda soğutma suyuna gereksinim duyulmaktadır. Santralda üretilen ısının büyüklüğüne bağlı olarak, büyük hacimlerde soğutma suyu gereklidir. Büyük hacimdeki su gereksinimi ise; ancak yüksek debili akarsular, büyük göller ve denizlerden sağlanabilmektedir. Deniz suyu, sınırsız hacimde soğutma suyu kaynağı olmasının yanısıra, santralda ısınmış soğutma suyunun uzaklaştırılması açısından da önemli avantajlara sahiptir. Akkuyu Nükleer Santrali'nde da soğutma suyu olarak deniz suyunun kullanılması amaçlanmıştır. Deniz suyunun fiziksel ve kimyasal özelliklerinde yer ve zaman içinde oluşan değişimlerin ve bu değişimlere etkiyen faktörlerin bilinmesi, soğutma suyunun en yüksek verimle kullanılması açısından büyük önem taşımaktadır. Deniz suyunun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yer ve zaman içindeki değişimi, su kütlesinin çevre ile olan ısı enerjisi alışverişi, yağış ve yüzey akış suyu ile ortama yeni su kütlesi girişi, buharlaşma ile su kütlesi kaybı ve farklı fiziksel ve kimyasal karakterdeki deniz sularının karışımı tarafından belirlenmektedir. Bu çalışmada; Akkuyu Körfezi deniz suyunun doğal koşullardaki fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yer ve zaman içindeki değişiminde etkili olan faktörlerin ve süreçlerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma, daha önce METU (1984a) tarafından gerçekleştirilmiş araştırma ile amaç ve kapsam açısından benzerlik göstermektedir.

Santral alanında önceki yıllarda yürütülen çalışmalarda bölgenin jeolojik, hidrolojik, hidrojeolojik, oşinografik özellikleri ve santralin çevresel etkileri araştırılmıştır (Deniz Araştırma Enstitüsü, 1977; TEK, 1983; Sabuncu ve Ersan, 1985; METU, 1984b). Söz konusu çalışmaların bir kısmında Akkuyu Körfezi deniz suyunun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yıl boyu değişimine de yer verilmiştir (METU, 1983 ve 1984a; Veldman vd., 1988). Bu çalışmada ise, anılan özelliklerin değişim aralığının belirlenmesi ve değişimlere etkiyen faktör ve süreçlerin yakın geçmişteki durumunun ortaya konulması amaçlanmıştır.

Akkuyu Körfezi, Taşucu İlçesi'nin 45 km batısında, Büyükeceli (İçel-Gülner) yerleşimine bağlı Akkuyu Mevkii'nde yer almaktadır (Şekil 1). Akkuyu Körfezi batı yönünde Akdeniz'e açık olup, çalışma alanı içinde kuzeyde Aksaz, kuzeydoğuda Akkuyu ve güneybatıda Çamalanı Körfezleri bulunmaktadır. Beşparmak Adası, körfezin açık denize çıkış kısmında (güneydoğu) ve kıyıdan yaklaşık 4 km açıkta yer alır.

Çalışma alanında; derinlik Akkuyu Körfezi'nden güneybatıya, Beşparmak Adası'nın kuzeybatı açıklarına doğru artmaktadır. Nükleer santralin inşa edileceği mendirek içi ve Çamalanı Körfezi sahilinde 5 m dolayında olan derinlik, açıklara (batıya) doğru 20-25 m'ye ulaşmaktadır. Çalışma alanında en derin yerler (50-70 m) Beşparmak Adası'nın batısı ve güneyinde bulunmaktadır.

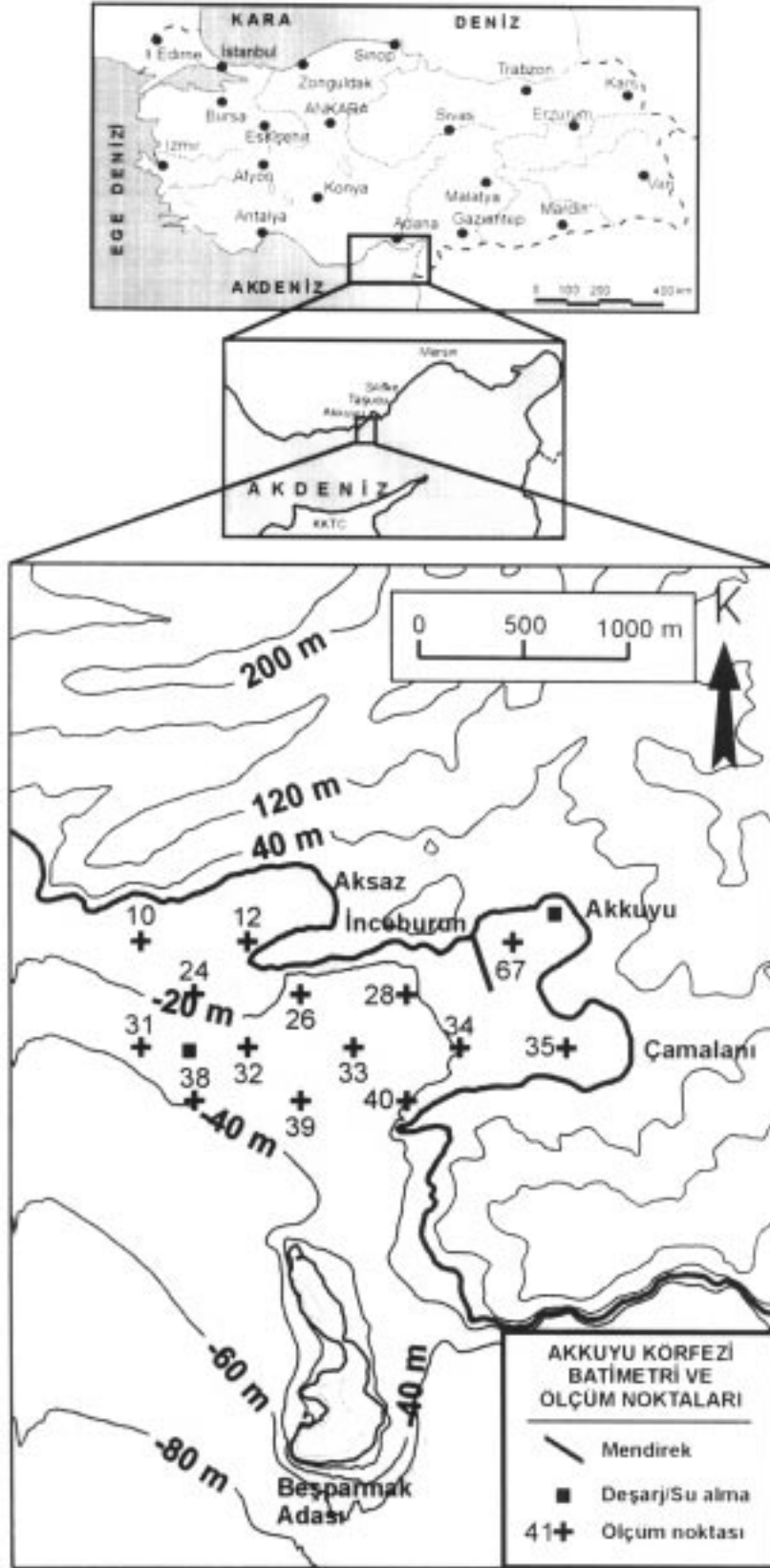
Çalışma, Haziran 1999 - Haziran 2000 döneminde her ay yerinde deniz suyunun fiziksel-kimyasal özelliklerinin ölçülmesi ve bu ölçümlerden hareketle yeni verilerin hesaplanması şeklinde yürütülmüştür. Elde edilen verilerin ve gözlemlerin değerlendirilmesi sonucunda Akkuyu Körfezi'nde deniz suyunun fiziksel ve kimyasal özelliklerine etkiyen süreçler belirlenmiştir.

YÖNTEM

Yerinde Gerçek Zamanlı Ölçümler

Araştırma kapsamında Haziran 1999 ve Haziran 2000 arasındaki dönemde 13 saha çalışması yapılmıştır. Ölçümler sakin deniz koşullarında gerçekleştirilebildiğinden, aylık ölçüm zamanları hava koşullarına bağlı olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, ölçümlerin her ayın aynı döneminde yapılmasına özen gösterilmiştir. Çalışma kapsamındaki ölçümler, körfezde homojen olarak dağıtılmış 14 noktada yapılmıştır (bknz. Şekil 1). Ölçüm noktalarının konumları, Garmin II Plus model GPS (Küresel Konumlama Sistemi) cihazı ile ± 50 m hassaslık ile belirlenmiştir.

Fiziksel ve kimyasal parametrelerin ölçümünde Hydrolab Data Sonde 3, çok parametrelili su kalitesi ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu cihazla; pH, sıcaklık, çözünmüş oksijen içeriği, özgül elektriksel iletkenlik, redoks potansiyeli, bulanıklık, derinlik, tuzluluk parametreleri, yerinde ve gerçek zamanlı olarak saptanmıştır. Yapılan ölçümlerin hassaslık ve hata oranları Çizelge 1'de ve-



Şekil 1. Akkuyu Körfezi yakın deniz ortamı yer bulduru ve batimetri haritası (Bayarı vd., 2000).
 Figure 1: Location and bathymetry map of the Akkuyu Bay near-shore area (Bayarı vd., 2000).

Çizelge 1: Yerinde ölçüm yöntemleri ve ölçümlerin hata düzeyleri.

Table 1: In-situ measurement techniques and precision of the measurements.

Parametre	Algılayıcı	Doğruluk	Hassaslık
Sıcaklık	Termistör	$\pm 0.15^{\circ}\text{C}$	0.01°C
Özgül elektriksel iletkenlik	6 elektrotlu hücre	ölçüm aralığının $\pm \%1$	1 ondalık
pH	Cam pH elektrodu	± 0.2 birim	0.01 birim
Çözünmüş oksijen	Polarografik	± 0.2 mg/l	0.01 mg/l
Redoks potansiyeli	Platin	± 20 mV	1 mVolt
Derinlik	Basınç Sondası	± 0.45 m	0.1 m
Tuzluluk	Hesaplamayla	± 0.2 ppt	0.1 ppt
Bulanıklık	İnfrared	ölçüm aralığının $\pm \%5$	0.1 NTU

rilmiştir. Arazideki kalibrasyon sırasında da belirtilen hassaslık değerleri elde edilmiştir. Belirlenen istasyonlarda 2 m aralıklarla en fazla 50 m derinliğe kadar ölçüm yapılmıştır.

Deniz Suyu Karışım Dinamiği

Deniz gibi atmosfere açık su kütlelerinin karışımı, esas olarak su kütesinin sıcaklık ve yoğunluk gibi özellikleri ile belirlenmektedir. Her iki parametrenin bu tip çalışmalarda yaygın olarak kullanılması, bu özelliklerin ölçümü ve/veya hesaplanmasının oldukça kolay olmasından kaynaklanmaktadır.

Karışım dinamiğinin belirlenmesinde belirleyici bir parametre olan su yoğunluğunun doğrudan ölçülmesi oldukça güç olmakla birlikte, yerinde ölçülen parametrelerden (sıcaklık, özgül elektriksel iletkenlik, hidrostatik basınç) itibaren hassas biçimde hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada, yoğunluk değerleri uluslararası çalışmalarda yaygın kabul gören sigmatee (σ_t) olarak verilmiştir. Sigmatee değerlerinin hesaplanmasında "Uluslararası Durum Eşitliği" (Fofonoff ve Millard, 1983) kullanılmış olup, ilgili bilgisayar kodu Bayarı vd. (2000) tarafından verilmiştir. Artan sigmatee değerleri deniz suyu yoğunluğunun arttığına işaret etmektedir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

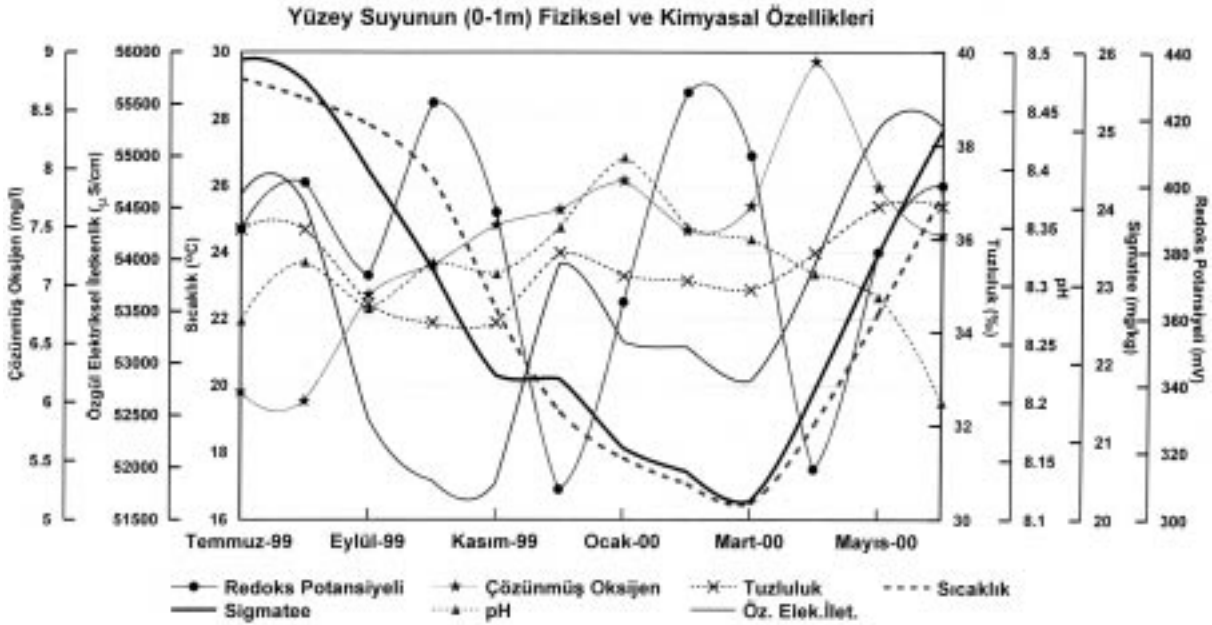
Saha çalışmaları sonucunda deniz suyunun sıcaklık, pH, çözünmüş oksijen derişimi, tuzluluk, redoks potansiyeli gibi fiziksel ve kimyasal özellikleri aylık ölçümler ve/veya hesaplama belirlenmiştir. Deniz suyu özelliklerinin zaman içinde değişimi tüm ölçüm noktalarında belirli bir ayda ve belirli bir derinlikte yapılan ölçümlerin ortalaması olarak verilmiştir (Şekil 2 ve 3). Bu çalış-

mada, 20 m'den daha derinde yer alan ölçüm noktalarının sayıca azlığı ve soğutma suyunun yaklaşık 20 m'den alınmasının planlanması gibi faktörler dikkate alınarak, daha derin noktalara ait verilere ve değerlendirmelere değinilmemiştir. Ölçülen ve hesaplanan parametrelerin yıl boyunca gösterdikleri değişimi belirten istatistiksel değerlendirmeler Çizelge 2'de sunulmuştur. Özelliklerin her birinde yer ve zaman içinde gözlenen değişimler ve bu değişimlerin oluşmasında etkili olan süreçler hakkındaki değerlendirmeler aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

Deniz Suyu Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Zamanla Değişimi

Sıcaklık

Çalışma süresince deniz suyu sıcaklığı 16.5°C ile 30°C arasında değişim göstermiş ve en düşük sıcaklık değeri Mart 2000 ayında, en yüksek sıcaklık değeri ise Temmuz-Ağustos 1999 aylarında ölçülmüştür. Ölçümler boyunca en düşük sıcaklık değerleri Beşparmak Adası açıklarında, derindeki ölçüm noktalarında gözlenmiştir. Tüm ölçüm döneminde en yüksek deniz suyu sıcaklıkları mendirek içinde ve körfezin sığ bölümlerinde belirlenmiştir. Bu durum, dolaşımın sınırlı ve denizin sığ olduğu bölümlerde atmosferik ısı girdisinden dolayı deniz suyu sıcaklığının daha çok artmasından kaynaklanmaktadır. Bu gözlem esas alınarak, bölgede deniz suyu sıcaklığı ile hava sıcaklığı arasındaki ilişki de incelenmiştir (Şekil 4). Deniz suyu sıcaklığı, çalışma alanı yakın çevresindeki Devlet Meteoroloji İşleri (DMİ) gözlem istasyonlarında (Silifke, Aydıncık, Erdemli, Anamur) gözlenen aylık uzun yıllar sıcaklık ortalamalarından 2°C ile 8°C daha yüksek değerlere sahiptir. Normal koşullarda deniz suyunun, başlıca ısı kaynağı olan atmosferik ısı ile



Şekil 2. Deniz yüzey suyunun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin zamanla değişimi.
 Figure 2. Temporal variation of physical and chemical properties of the sea surface water.

hızla dengeye gelmesi ve hava ile su sıcaklıklarının aynı olması beklenmektedir. Şekil 4'deki durum, su kütlelerine başka bir kaynaktan ısı enerjisi girişi olduğunu düşündürmektedir. Collins ve Banner (1979; METU, 1984a)'a göre, Akkuyu Körfezi İsrail açıklarından başlayarak önce kuzeye ve İskenderun Körfezi dolayından da batıya yönelen Doğu Akdeniz kaynaklı akıntılar ile beslenmektedir (Şekil 5). Dolayısıyla Akkuyu Körfezi dolayında deniz suyunun yerel atmosferik sıcaklıktan daha yüksek sıcaklığa sahip olmasının bu durumdan kaynaklandığı düşünülmektedir.

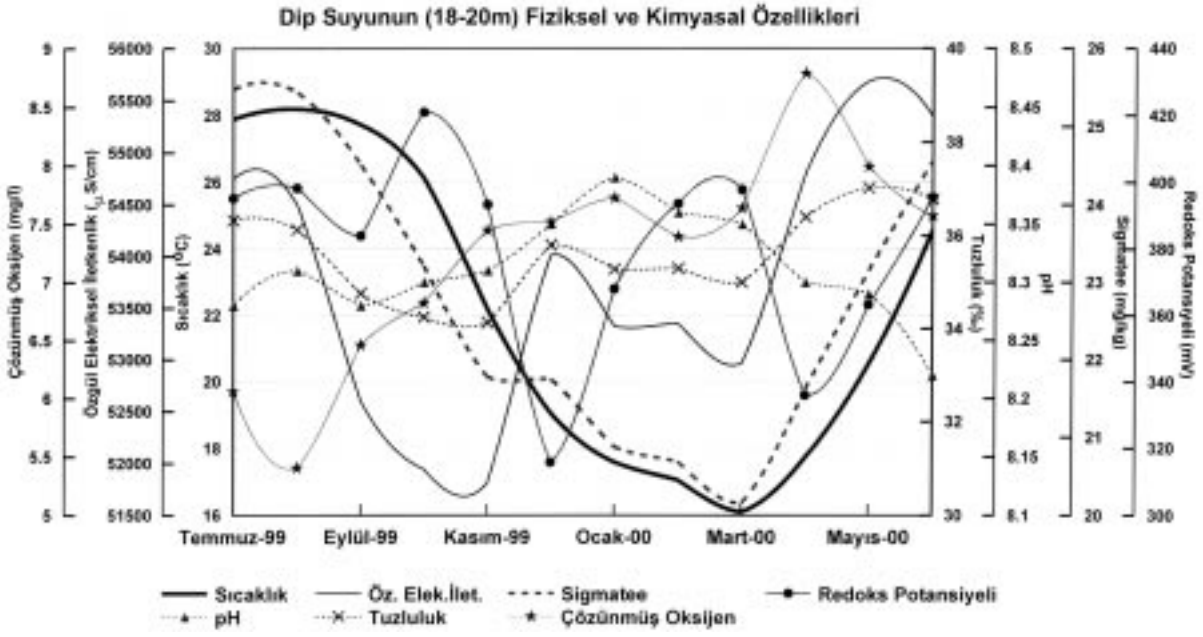
Özgül elektriksel iletkenlik

Çalışma süresince yapılan ölçümlerde deniz suyunun toplam iyon içeriğinin bir göstergesi olan

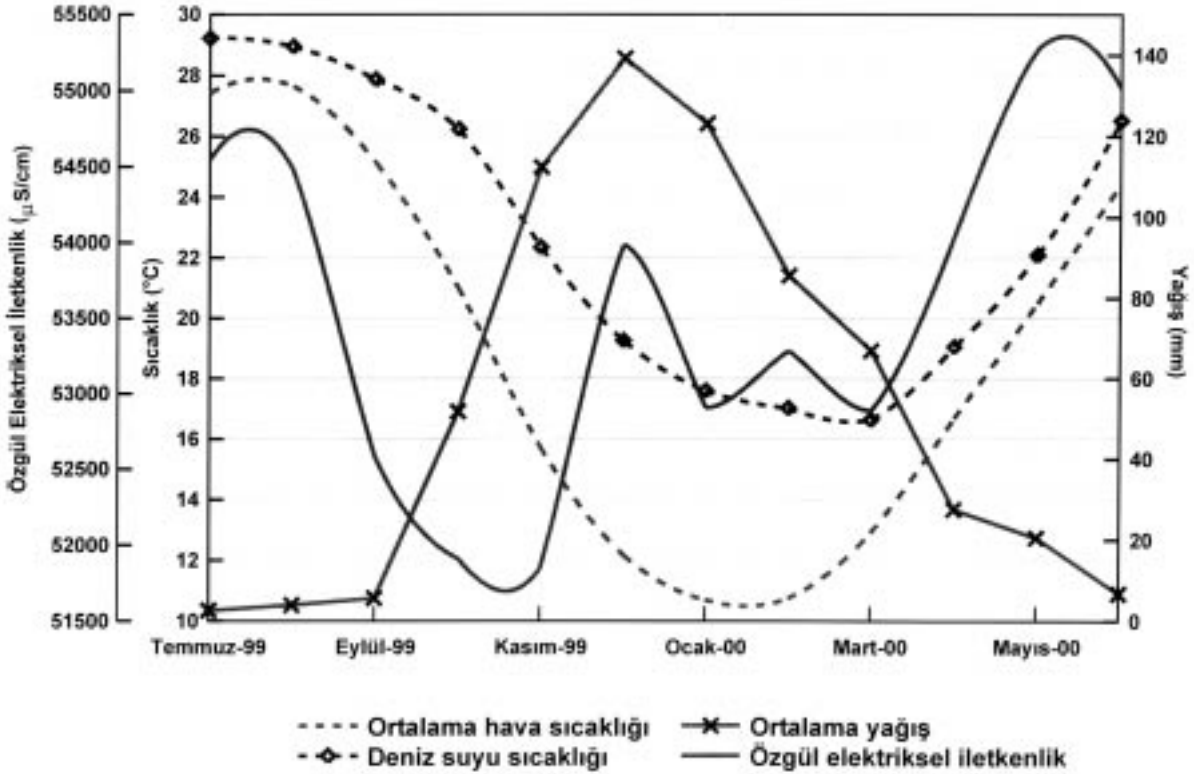
ölgül elektriksel iletkenliğin (25°C'de standartlaştırılmış elektriksel iletkenlik) 51750 ile 55500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında değişim gösterdiği belirlenmiştir. Araştırma süresi boyunca en düşük ölgül elektriksel iletkenlik değerleri Kasım 1999'da ölçülürken, en yüksek iletkenlik değerleri ise Mayıs 2000 döneminde belirlenmiştir. Yaz aylarında deniz suyunun ölgül elektriksel iletkenliği diğer aylara göre daha yüksektir. Ölgül elektriksel iletkenliğin azalması, deniz suyunun toplam çözülmüş madde içeriğinin de azalması anlamına gelmektedir. Açık su kütlelerinde çözülmüş madde içeriğinin azalmasında en etkili süreç, akarsu beslenimi ve özellikle yağış suyunun deniz suyunu seyreltmesidir. Öte yandan, ölgül elektriksel iletkenliğin artması da, deniz suyunun içsel karışımı vb. gibi süreçlerin yanısıra,

Çizelge 2: Çalışma alanında ölçülen ve hesaplanan verilere ait istatistiksel değerlendirmeler.
 Table 2: Statistical assessments of the measured and calculated data from the study area.

	En az	En çok	Ortalama	Standart sapma
Sıcaklık (°C)	16.5	30	22	4.41
Özgül elektriksel iletkenlik ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	51750	55500	53712	1216
Sigmatee (mg/kg)	20.7	27	22.82	1.8
Çözünmüş oksijen (mg/l)	5.5	9	7.3	0.86
pH	8.25	8.43	8.3	0.04
Redoks potansiyeli (mV)	270	470	379	29.0
Duraylılık frekansı (s^{-2})	0	$7.25 \cdot 10^{-4}$	$8.10 \cdot 10^{-5}$	$1.23 \cdot 10^{-4}$

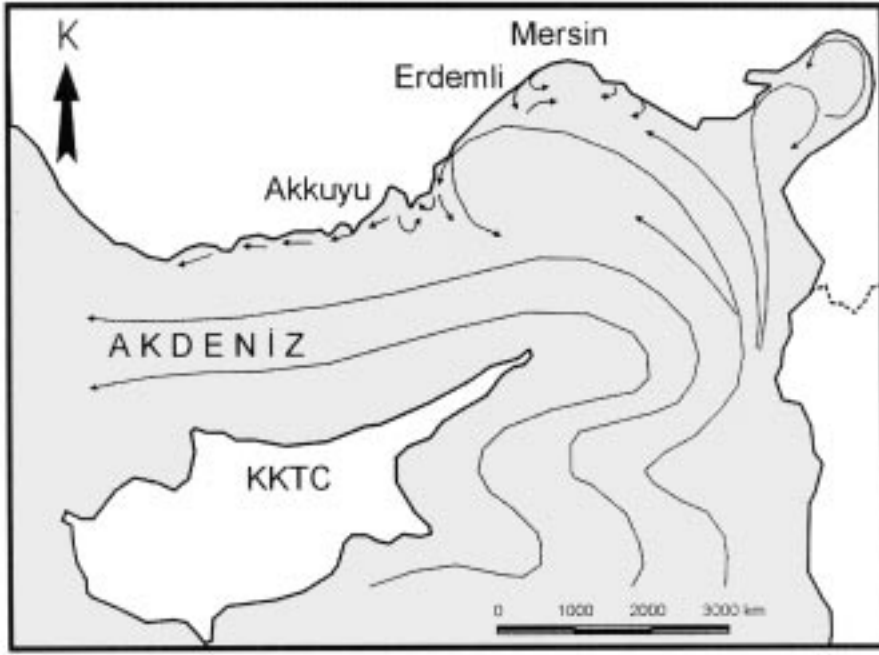


Şekil 3: Derin deniz suyunda fiziksel ve kimyasal özelliklerin zamana bağlı değişimi
 Figure 3: Temporal variation of physical and chemical properties of deep seawater.



Şekil 4: Yüzeysel deniz suyu sıcaklığının, özgül elektriksel iletkenliğinin, ortalama aylık hava sıcaklığının ve ortalama aylık yağışın yıl boyunca değişimi.

Figure 4: Year-round variation of seawater's surface temperature, specific electrical conductivity, mean air temperature and mean monthly precipitation.



Şekil 5: Doğu Akdeniz'deki akıntı yörüngeleri (Collins and Barber, 1979; METU, 1984a'dan).

Figure 5: Current trajectories in the Eastern Mediterranean (after Collins and Barber, 1979; from METU, 1984a).

esas olarak büyük oranda buharlaşmaya bağlı olarak gerçekleşmektedir. Çalışma alanı yakın çevresinde yer alan DMİ istasyonlarının (Erdemli, Silifke, Aydıncık, Taşucu) uzun yıllar aylık toplam yağış gözlemlerinin ortalamalarına göre özgül elektriksel iletkenlik yağış miktarındaki artışın başladığı sonbahar aylarında azalmaktadır. Buna karşın, özgül elektriksel iletkenlik yağıştaki azalma ile birlikte artış eğilimine girmektedir (bknz Şekil 4). Öte yandan, Aralık ve Mart ayları arasında özgül elektriksel iletkenlikte gözlenen artış bu parametrenin değerinin belirlenmesinde yağış girdisinin yanısıra, başka faktörlerin de etkili olduğuna işaret etmektedir. Aralık-Şubat döneminde özgül elektriksel iletkenlik değerinin beklenenden daha yüksek değerler almasının, söz konusu dönemde derin kökenli Akdeniz akıntılarının körfez içine girmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte, bu konuda kesin sonuçlara ulaşmayı sağlayacak geniş ölçekli veriler mevcut değildir.

Yoğunluk (sigmatee)

Çalışma alanına ait yoğunluk değerlerinin yıl boyunca gösterdikleri değişim, sıcaklık değişimine paraleldir. Bu durum, yoğunluk değerleri üzerinde özgül elektriksel iletkenliğin yanısıra, sıcaklığın da oldukça etkin bir faktör olduğunu göster-

mektedir. Akkuyu Körfezi'nde yapılan ölçümlerden hesaplanan sigmatee değerlerinin yaz aylarında yüksek, kış aylarında ise daha düşük olduğu gözlenmektedir (bknz. Şekil 2 ve 3). Tüm gözlem dönemi boyunca sigmatee değerleri 20.5 mg/kg ile 27 mg/kg arasında değişim göstermiştir.

Çözünmüş oksijen

Deniz suyunun sucul yaşam kalitesi açısından önemli bir parametre olan çözünmüş oksijenin çözünürlüğü; su sıcaklığı ve iyon içeriği ile ters, atmosferik kısmi basınç ile doğru orantılıdır. Çalışma alanında hem yüzey, hem de derin deniz suyunda çözünmüş oksijen içeriği 1-2 aylık bir gecikme ile su sıcaklığı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Buna bağlı olarak, hava sıcaklığının düşük olduğu kış aylarında çözünmüş oksijen içeriğinin daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Oksijenin sudaki çözünürlüğü sıcaklıkla ters orantılı olduğundan, bu gözlem beklenen bir durumdur. Su kütlesinin tamamen karıştığı durumlarda derinlik boyunca çözünmüş oksijen içeriği beklendiği gibi değişmemektedir. Çalışma alanında yapılan ölçümlerde belirlenen çözünmüş oksijen değerleri 5.5 ile 9 mg/l arasında değişmektedir. Açık su kütlelerinde oksijen tüketen canlıların bolluk ve metabolik aktivitelerinde

yıl boyu oluşan farklılıklardan dolayı, çözünmüş oksijen içeriğinin karışım mekanizmasının belirlenmesinde kullanımının yanıltıcı olacağı düşünülmüştür.

pH

Deniz suyu, tampon çözelti karakterinde olduğundan, pH değerine etkiyen faktörleri hızlı bir biçimde etkisizleştirme eğilimindedir. Atmosferle sürekli temas, karışım, sıcaklık, fotosentetik aktivite gibi etkenler sonucunda deniz suyunun pH değerleri ortalama 8.3 pH birimi dolayında olmaktadır. Bu değer, çevre koşullarına bağlı olarak, zaman içinde zayıf bir salınım gösterebilmektedir. Akkuyu Körfezi'nde yıl boyunca pH değerleri 8.25 ile 8.43 arasında değişmiştir. En düşük pH değerleri Haziran 2000'de 8.20-8.25 arasında gözlenmiştir. Ocak 2000 ve Şubat 2000 ayları ise, 8.35-8.40 arasındaki değerler ile en yüksek pH değerlerinin ölçüldüğü aylardır. Bu dönemler, aynı zamanda hava ve su sıcaklığı arasındaki farkın en az (Haziran 2°C) ve en fazla (Ocak 8°C) olduğu zamanlara karşılık gelmektedir. Dolayısıyla kış aylarında gözlenen daha yüksek pH değerlerinin, hava ve su sıcaklık farkına bağlı olarak, kış aylarında deniz suyuna daha az atmosferik CO₂ girdisi olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Redoks potansiyeli

Redoks potansiyeli bir sucul ortamın içerdiği kimyasal bileşen türleri açısından yükseltgeyici, ya da indirgeyici eğilimde olup olmadığının göstergesidir. Günümüz teknolojisi ile bu ölçümün hassas olarak yapılması mümkün olmayıp, ölçülen değerler ancak ortamın indirgen, ya da yükseltgen olup olmadığını göstermektedir. Çalışma alanında deniz suyu sürekli oksijen içermesi nedeniyle, beklendiği gibi yükseltgen (oksitleyici) karakterdedir. Çalışma dönemi boyunca gerçekleştirilen ölçümlerden redoks potansiyelinin +270 ile +470 mV arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu durum, deniz suyunun incelenen 50 m'ye kadar olan derinlik boyunca yükseltgen karakterini koruduğunu göstermektedir.

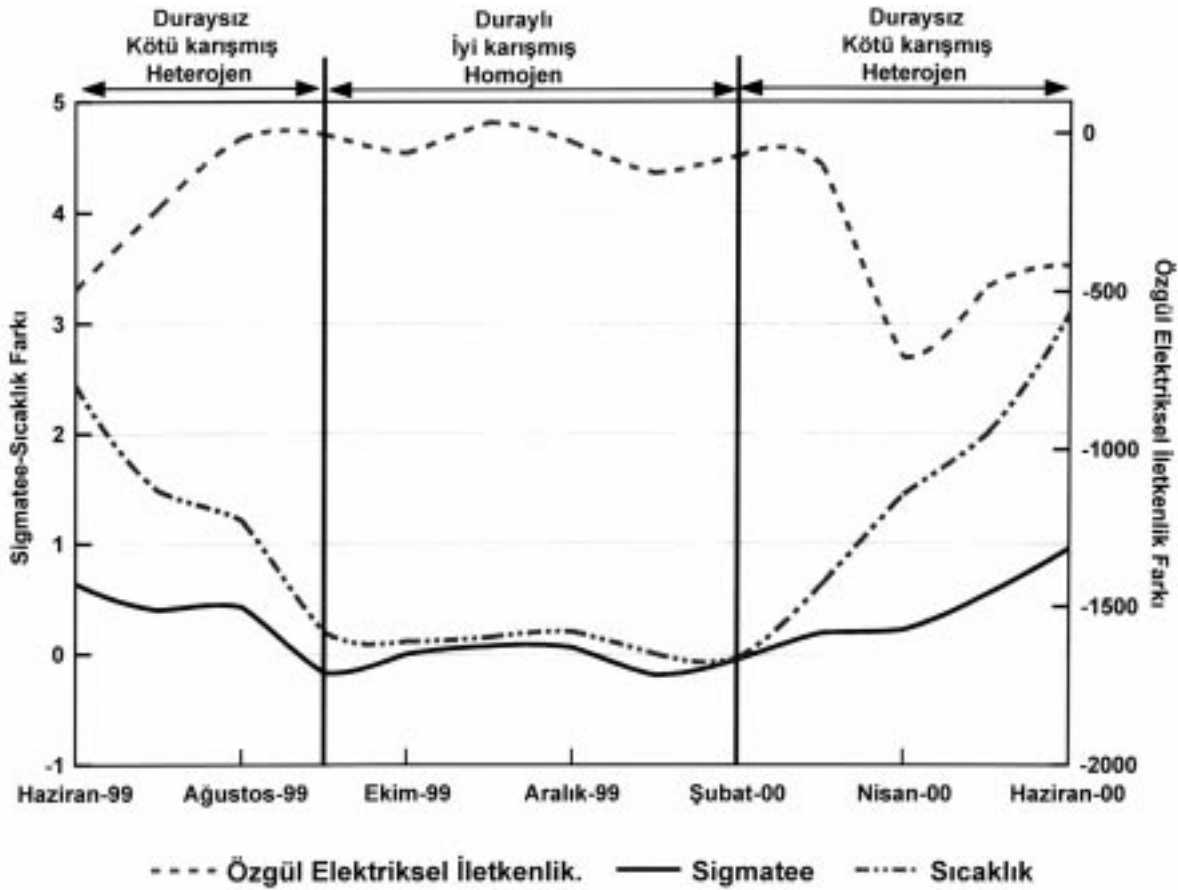
Deniz Suyu Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Derinlik Boyunca Değişimi

Akkuyu Körfezi'nde yapılan ölçümlerde deniz suyunun bazı fiziksel ve kimyasal (örneğin, pH,

çözülmüş oksijen, redoks potansiyeli) özelliklerinin yıllık değişim eğiliminin derinlikten bağımsız olduğu görülmektedir (bknz. Şekil 2 ve 3). Diğer bir deyişle, bu parametreler hem yüzey, hem de derin deniz suyunda zamanla aynı yönde değişim göstermektedirler. Ancak özellikle sıcaklık, yoğunluk ve özgül elektriksel iletkenlik parametrelerinin aynı ölçüm döneminde derinlikle değişimleri göz ardı edilemeyecek kadar büyüktür. Deniz suyunun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirli bir zamanda derinlikle nasıl ve ne kadar değiştiği, yüzeydeki özellik değerinin derindeki değere göre farkı kullanılarak incelenmiştir (Şekil 6). Söz konusu farkların hesaplanmasında yüzeyde yapılan ölçümler ile çalışma alanının büyük bir kesiminde en fazla derinlik olan 20 m'deki ölçümler kullanılmıştır.

Eylül-Mart tarihleri arasında, yüzeyden derine doğru deniz suyunda sıcaklık değişimi gözlenmemektedir. Yüzey suyu ve derin ölçüm noktası arasındaki en yüksek sıcaklık farkı 3-4°C ile Haziran 1999 ve Haziran 2000 ölçümlerinde belirlenmiştir (bknz. Şekil 6). Mart-Haziran döneminde artan yüzey ve derin su sıcaklık farkı Haziran-Eylül tarihleri arasında giderek azalmaktadır. Nisan, Mayıs ve Haziran aylarında derin deniz suyunun özgül elektriksel iletkenlik değerleri yüzey suyundan yaklaşık 500 µS/cm daha yüksektir. Diğer aylarda ise, yüzey ve derin deniz suyu özgül elektriksel iletkenlik farkı 100 µS/cm dolayındadır. Ancak, bu parametrenin ölçüm hassasiyeti göz önüne alındığında, Akkuyu Körfezi'nde deniz suyu özgül elektriksel iletkenliğinin sonbahar ve kış aylarında derinlik boyunca değişmediği anlaşılmaktadır. Deniz suyu yoğunluğunun derinlikle değişimi de sıcaklık ve elektriksel iletkenlik değişimine benzemektedir. Eylül-Şubat döneminde derinlik boyunca deniz suyu yoğunluğu değişmemekte, Mart-Haziran döneminde yüzey ile derin deniz suyu arasında artan yoğunluk farkı, Haziran-Eylül döneminde azalmaktadır. Derinlik boyunca yoğunluk farkının en yüksek olduğu Haziran ayında sigma-tee yüzeyde 25 mg/kg iken, derinlerde 23 mg/kg'a kadar düşmektedir.

Akkuyu Körfezi, incelenen tüm fiziksel ve kimyasal özellikleri açısından Eylül-Şubat döneminde derinlik boyunca homojen karakterdedir. Mart-Ağustos döneminde ise, yüzey ve derin deniz suyu arasında belirgin farklar oluşmaktadır. Eylül-Şubat döneminde tüm özellikler açısından



Şekil 6: Akkuyu Körfezi'nde deniz suyu homojenliğinin zamanla değişimi.
Figure 6: Temporal variation of Akkuyu Bay seawater's homogeneity.

yüzey ve derin değerleri arasında belirgin bir farkının oluşmaması, bu dönemde su kütesinin tamamen karıştığını göstermektedir. Yüzey ve derin deniz değerleri arasındaki farklılığın büyük olduğu diğer dönemlerde ise, su kütesinde tam karışımın sağlanamadığı anlaşılmaktadır.

Akkuyu Körfezi'nde yıl içinde gözlenen farklı karışım dönemlerinin varlığı; yüzey suyunun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin doğrudan çevresel faktörler (enerji-kütle alışverişi) ile denetlendiğini, derin deniz suyunda ise karışım süreçlerinin etkin olduğunu göstermektedir. Bu durumda körfezin derin bölümlerindeki deniz suyunun fiziksel ve kimyasal özellikleri, yüzey suyu ile karışım sonucunda oluşmaktadır.

Akkuyu Körfezi'ndeki Karışım Mekanizması

Açık su kütlelerinde karışım süreçleri

Açık su kütleleri tamamen hareketsiz olsalar bile, sistemde moleküler ve türbülanslı taşınım

ve/veya karışım gerçekleşebilmektedir. Eğer su kütesine ait herhangi bir özellik (sıcaklık, yoğunluk, kimyasal içerik vb.) homojen olarak yayılmamış ise, gradyan-akı yasası (Schwarzenbach vd.,1992) gereği ilgilenilen özellik için sistemde homojenite sağlanıncaya kadar taşınım ve/veya karışım gerçekleşmektedir. Bu tür taşınım difüzyif taşınım olarak adlandırılır. Difüzyif taşınım, moleküler ve türbülanslı taşınım olarak iki farklı şekilde gerçekleşmektedir. Moleküler difüzyon, kimyasal gradyan farklılığına bağlı olarak oluşmakta olup bu yolla karışım hızı çok yavaştır. Suda, moleküler difüzyon değerlerinin $0.3 - 0.07 \text{ cm}^2/\text{s}$ arasında değişmesi nedeniyle genellikle moleküler difüzyonla karışım etkin ve hızlı bir süreç olmamaktadır (Schwarzenbach vd., 1992; Chou vd.,1995). Türbülanslı karışım, moleküler difüzyondan çok daha etkili ve hızlı bir süreç olup, açık su kütlelerinde derinlik boyunca karışım, büyük oranda bu süreç tarafından kontrol edilmektedir. Atmosfere açık su kütlelerinde türbülans; dalga hareketi; düşey ya da yatay

akıntı makaslaması, düzensiz kıyı ya da deniz tabanındaki su hareketleri, yeri ve zamanı değişen gelgit akıntıları, akıntılarla oluşan hareketli mikro girdaplar gibi çok farklı süreçler sonucunda oluşabilir (Pickard ve Emery, 1990). Türbülansın şiddeti akıntıyı oluşturan kuvvetlerin şiddetine bağlıdır. Dolayısıyla türbülanslı difüzyon katsayıları zaman ve yere göre değişirler. Ölçek etkisi nedeniyle yatay yönde türbülanslı karışım (yaklaşık 10^2 - 10^8 cm²/s) düşey türbülanslı karışımdan çok daha etkilidir (Schwarzenbach vd.,1992). Denizler için ortalama düşey türbülanslı difüzyon değeri 0.1 - 10^4 cm²/s olarak verilmektedir (Schwarzenbach vd., 1995).

Türbülanslı difüzyon, su kütlesi içinde fiziksel ve kimyasal özellikler açısından farklı özellikler gösteren bölümler arasında gerçekleşir. Bu sürecin sistemin tümünde derinlik boyunca etkinliğinin nasıl değiştiği, Brunt-Vaisala duraylılık frekansının derinlik boyunca değişiminin belirlenmesi yoluyla saptanabilir (Schwarzenbach vd.,1992). Bu çalışmada Akkuyu Körfezi'ndeki deniz suyunun karışım dinamiğinin açıklanması için kullanılan yaklaşım ile ilgili kısa bir açıklama aşağıdaki bölümde verilmiştir.

Türbülanslı difüzyon yaklaşımı

Su kütlelerinde türbülanslı difüzyon sonucu karışım, gradyan-akı yasasının özel bir şekli olan Fick Yasasına göre gerçekleşir (Schwarzenbach vd., 1992);

$$F = E_z \frac{dC}{dz} \quad (1)$$

Bu eşitlikte; E_z , türbülanslı difüzyon katsayısı (L^2T^{-1}); dC/dz (ML^{-1}) ise düşey yöndeki derişim gradyanı ve F (MLT^{-1}) düşey yönde birim alandan oluşan kütle akısıdır. Düşey yönde kütle akısının yüksek olması, farklı su tabakalarının hızla karışmasına neden olur. Akının yüksekliği ise, hem düşey yöndeki gradyanın, hem de ortama ait türbülanslı difüzyon katsayısının büyüklüğüne bağlıdır. Bu durumda, düşey yöndeki gradyanın değişmediği koşullarda bile, etkin karışımı sağlayacak kütle akısı büyüklüğünün E_z tarafından belirleneceği anlaşılmaktadır. Diğer bir ifadeyle, E_z 'nin büyük olması durumunda düşey yönde daha fazla kütle akısı olacağından, tüm su kütlesi daha iyi karışacaktır. Bir akışkan ortamı için türbülanslı difüzyon katsayısının belirlen-

mesindeki güçlüklerden dolayı, genellikle ortamdaki düşey yönde derişim farklılığının ne denli büyük olduğunun bir göstergesi olan Brunt-Vaisala duraylılık frekansı ile E_z arasındaki aşağıdaki ilişkiden yararlanılır.

$$E_z = a(N^2)^{-q} \quad (2)$$

Burada; a , ortama kinetik enerji giriş seviyesini gösteren ve her ortam için farklı değer alan bir sabit (L^2T^{-1}); q , kinetik enerjiyi türbülansa çeviren karışım mekanizmasının genel özelliklerini ifade eden boyutsuz bir katsayı ve N^2 , Brunt-Vaisala duraylılık frekansıdır (T^{-2}) (Schwarzenbach vd.,1992). Eşitlik 2'deki q parametresi; akışkan kütlelerinin gel-git hareketleri ve basınç dalgaları gibi büyük ölçekli kuvvetler tarafından karışması durumunda 1, karışımın farklı akış hızlarındaki kütleler arasındaki kesme kuvvetlerine bağlı olarak oluşması halinde ise 0.5 dolayında değerler almaktadır. Brunt-Vaisala duraylılık frekansı düşey yöndeki yoğunluk tabakalanmasına bağlı bir değişken olup, tabakalanmanın güçlü olduğu durumlarda yüksek değerler almaktadır. Öte yandan, su yoğunluğu aynı zamanda sıcaklık ve tuzluluğa da bağlıdır. Bununla birlikte, Akkuyu Körfezi gibi nispeten sığ denizel ortamlarda düşey yönde tuzluluk değişiminin yoğunluk üzerindeki etkisi sınırlı düzeydedir ve denizsuyu yoğunluğu büyük oranda sıcaklık değişimi tarafından belirlenir. Bu durumda, duraylılık frekansının değeri yalnızca düşey sıcaklık gradyanı tarafından belirlenmektedir.

$$N^2 = -g\alpha \frac{dT}{dz} \quad (3)$$

Yukarıdaki eşitlikte; g , yerçekimi ivmesi (LT^{-2}); α , suyun termal genişleme katsayısı (K^{-1}) ve dT/dz , düşey sıcaklık gradyanı (KL^{-1})'dir. Bu çalışmada duraylılık frekansları 3 nolu Eşitlik ile hesaplanmıştır. Brunt-Vaisala frekansının artan değerleri farklı derinlikteki su tabakaları arasındaki tabakalanmanın güçlü olduğuna, ya da bu tabakalar arasında yeterli karışımın olmadığına işaret etmektedir. Difüzyon katsayısının yüksek değerleri, düşük duraylılık frekansına sahip, iyi karışmış, ya da zayıf tabakalanmalı su kütlelerini belirtmektedir. Düşük difüzyon katsayısı ve yüksek duraylılık frekansı değerlerine sahip su kütlelerinin kötü karışmış, diğer bir ifadeyle iyi tabakalanmalı olduğu anlaşılmaktadır.

Duraylılık frekansının hesaplanması

Yoğunluk (sıgmatee) ve buna etkiyen sıcaklık ve özgül elektriksel iletkenlik parametrelerinin yüzeyde ve derinde gözlenen değerleri arasındaki fark, düşey yönde türbülanslı karışımın çalışma alanında oldukça etkin bir süreç olduğunu göstermektedir. Bu olasılığın geçerliliğinin denetlenmesi amacıyla 34 ve 38 numaralı istasyonlar için Brunt-Vaisala duraylılık frekansı değerleri Haziran ve Aralık ayları için hesaplanmıştır (Şekil 7).

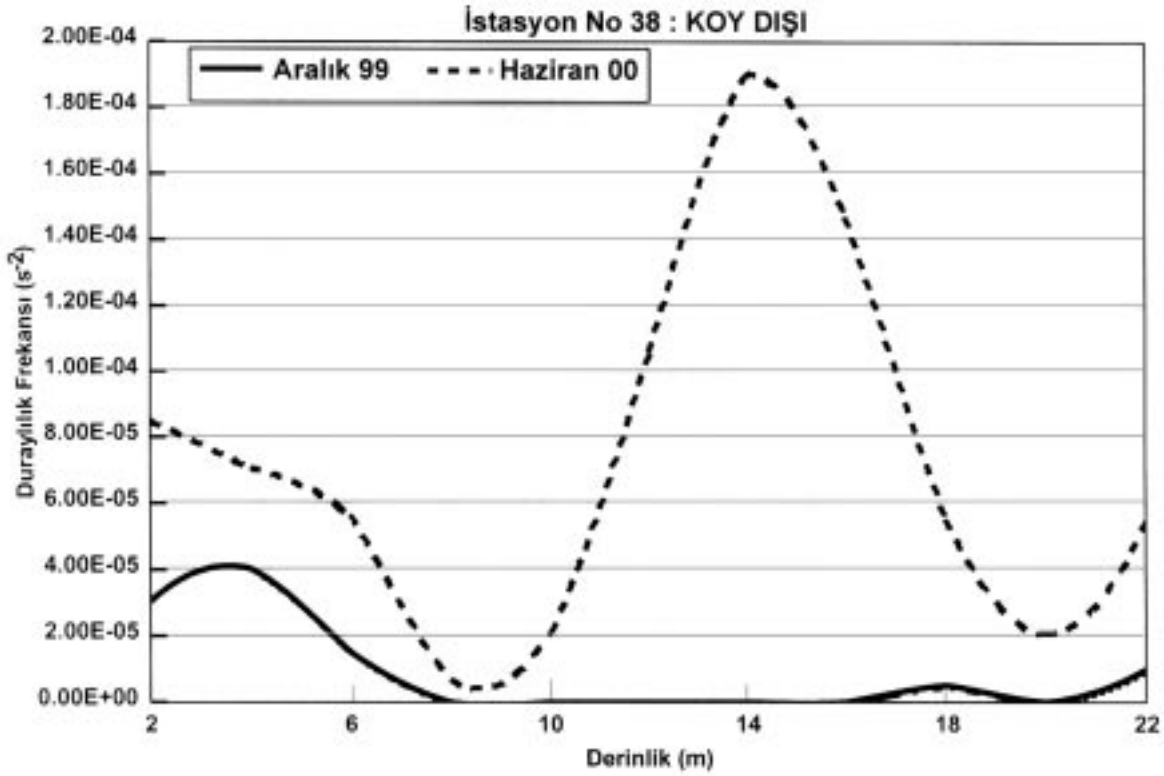
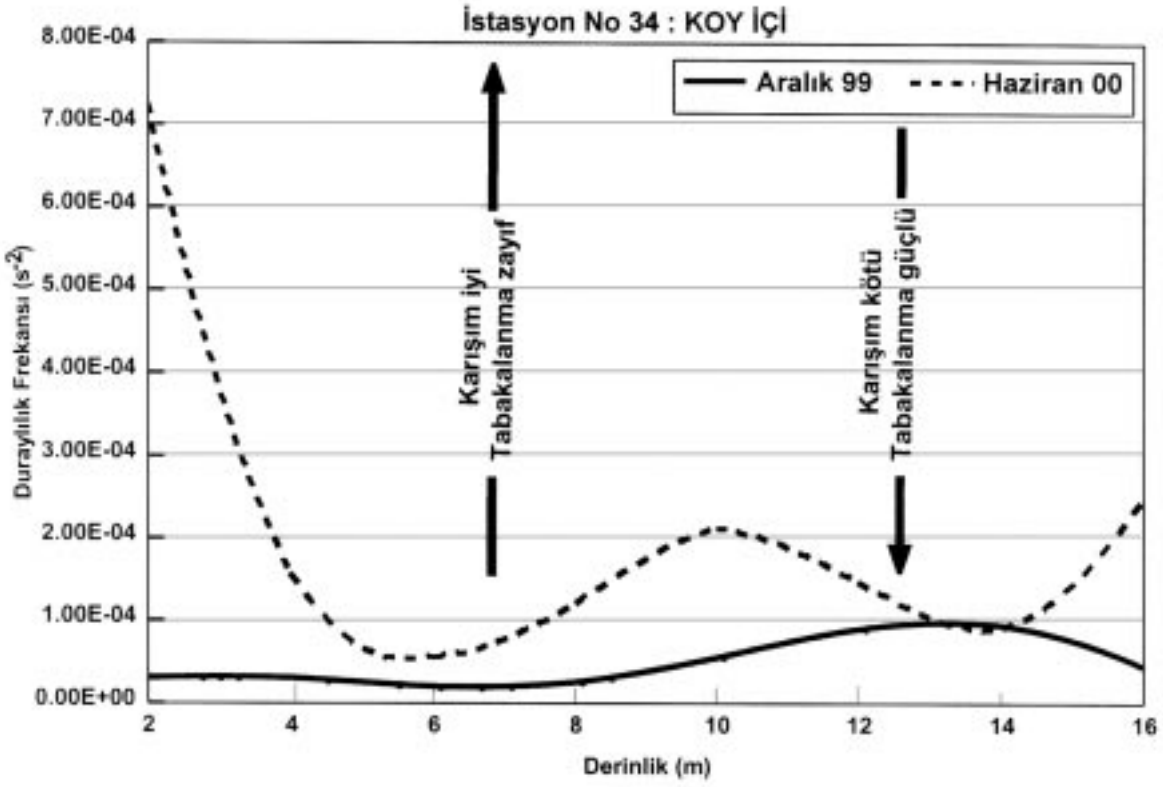
Çalışma döneminde en yüksek duraylılık frekansı değeri ($7.25 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-2}$) Haziran ayında 34 numaralı noktanın 2 m derinliğinde, en düşük duraylılık değeri ise 38 numaralı noktada 8-16 m derinlik aralığında sıfır olarak belirlenmiştir. Duraylılık frekansının düşük olduğu derinliklerde türbülanslı difüzyon katsayısının göreceli olarak yüksek değerler aldığı, ya da etkili bir karışımın gerçekleşmekte olduğu anlaşılmaktadır. Duraylılık frekansının sıfır olduğu derinliklerde ise, su kütlesinde hiç bir tabakalanma yoktur.

Aralık ayında 38 numaralı noktada ilk 6 m'den sonraki derinliklerde duraylılık oldukça düşük olup, tabakalanma yoktur ve su kütlesi tamamen karışmış durumdadır. Haziran ayında ise, su kütlesinin tamamında tam karışımın sağlanmadığı, kış aylarından daha yüksek duraylılık frekansı değerlerinden anlaşılmaktadır. Yüksek duraylılık frekansı değerleri, küçük düşey türbülanslı difüzyon katsayısı değerlerine, ya da etkin olmayan ve yetersiz karışıma işaret etmektedir. Körfezin iç kısmında yeralan 34 numaralı nokta, 38 numaralı noktadan daha sığ olmakla birlikte, her iki noktada da duraylılık frekansı değerlerinin derinlikle ve zamanla değişimi benzer şekilde gelişmiştir. Ancak, 34 numaralı noktanın daha sığ olması nedeniyle Aralık ayında özellikle dibe yakın kesimlerinde farklı özellikteki su seviyelerinin oluştuğu anlaşılmaktadır. Bu noktadaki duraylılık frekansı değerleri genellikle 38 numaralı noktadaki değerlerden daha yüksektir. Öte yandan, körfezin derin kesimlerinde türbülanslı difüzyonun daha etkin olmasından dolayı deniz suyunun daha homojen (daha iyi karışmış) olduğu anlaşılmaktadır.

Duraylılık frekansı değerlendirmelerine göre; Akkuyu Körfezi'nde deniz suyunun fiziksel ve kimyasal özellikler açısından kış aylarında ta-

mamen homojen ve düşey yönde karışım açısından daha duraylı olduğu gözlenmektedir. İlerleyen aylarda ise, sistem duraylılığını giderek kaybetmekte ve en düzensiz duruma Haziran ayında ulaşmaktadır. Karışımın etkili olduğu (tabakalanmasız) kış ve karışımın zayıf olduğu (tabakalanmalı) yaz aylarına ait duraylılık frekansı değerleri yüzey ve derin deniz suyuna ait fiziksel ve kimyasal parametre gözlemleri ile büyük uyum göstermektedir.

Bu çalışmaya benzer bir çalışma METU (1984a) tarafından 1979-1980 yıllarında yürütülmüştür. Anılan çalışmada, gözlemlerin yapıldığı alanın sınırları ve ölçüm noktalarının yerleri hakkında kesin ve ayrıntılı bilgilere yer verilmemişse de, Akkuyu Körfezi deniz suyunun, fiziksel kimyasal özelliklerinin uzun zaman dilimindeki değişimi hakkında fikir vermesi amacıyla her iki çalışmanın sonuçları aşağıda karşılaştırılmıştır. METU (1984a)'nın yaptığı çalışmada ölçümler, 7 noktada tüm derinlikler boyunca alınmıştır. Sıcaklık ölçümleri akıntı ölçüm cihazı kayıtlarından alınmış sürekli veriler olmakla birlikte, tuzluluk değerlerinin nasıl belirlendiği konusu açıklanmamıştır. Her iki çalışmada da elde edilen deniz suyu sıcaklıkları; birbirine yakın değerlere sahip olup, yıl boyunca gözlenen değişimleri de birbirine paraleldir. METU (1984a)'nın çalışmasında 1979 yılı için sıcaklık verilerinden belirlenen tam karışım döneminin Eylül-Nisan olmasına karşın, bu çalışmada 1999-2000 yılına ait gözlemler tam karışımın Eylül-Şubat döneminde gerçekleştiğini göstermektedir. Her iki çalışmada belirlenen tuzluluk değerleri arasında gözlenen 2-4 ppt dolayındaki farklılığın, olasılıkla ölçüm ve/veya hesaplama yaklaşımlarındaki farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Öte yandan METU tarafından en yüksek tuzluluk değerinin (39.16 ppt) Şubat 1979'da gözlenmiş olması, bu çalışmanın en yüksek tuzluluk değerinin Mayıs-Haziran aylarına ait olduğu şeklindeki gözlemleri ile çelişmektedir. Şubat ayında ölçülen yüksek tuzluluk değerinin nedeni olarak ileri sürülen aşırı buharlaşma hipotezi; buharlaşmanın gerçekleşmesini sağlayacak ısı girdisinin kış aylarında daha düşük olması nedeniyle pek gerçekçi gözükmemektedir. Bununla birlikte, o yıla ait özel meteorolojik koşullar, ya da orta ölçekli deniz akıntılarının deniz suyu tuzluluğunun artmasını sağlamış olması da bir olasılık olarak değerlendirilebilir. Bu çalışmada 1999-2000 yılına ait, en düşük tuzluluk değeri 34 ppt ile Ekim-Ka-



Şekil 7: Duraylılık frekansısı değerlerinin derinlik ile değişimi.
Figure 7: Depth-wise variation of stability frequency values.

sım aylarında, yüksek miktardaki sonbahar yağışlarından dolayı deniz suyunun seyrelmesine bağlı olarak gözlenmiştir. Buna karşın METU (1984a)'nın çalışmasında ise, 1979 yılı en düşük deniz suyu tuzluluğu Nisan ayında belirlenmiştir. Bu düşük değere gerekçe olarak kış sonrası yağışlar ve yüzeysel akışla körfeze tatlı su katkısının artışı gösterilmiş olup, bu yorum gerçekçi görünmemektedir. On altı yıl aralıkla tekrarlanan her iki çalışmanın sonuçlarından deniz suyu fiziksel kimyasal özelliklerinin zaman içinde çok büyük değişim göstermediği ancak, su kütlesinde karışımı etkileyen faktörlerin zaman içindeki ağırlıklarının değişmesi nedeni ile tam karışımın dönemlerinin yıllar arasında farklılık gösterebileceği anlaşılmaktadır.

SONUÇLAR

Akkuyu Körfezi'nde deniz suyunun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin, su kütlesinin çevresi ile yaptığı enerji ve kütle alışverişine bağlı olarak değiştiği anlaşılmaktadır. Körfezdeki deniz suyu sıcaklığı, atmosferik ısı girdisinin yaz aylarında artması sonucunda yükselmektedir. Sisteme yağış, ya da yağışa bağlı yüzey suyu girişinin yüksek olduğu dönemlerde ise, körfezdeki deniz suyu kimyasal olarak seyrelmektedir. Özellikle, deniz yüzey suyunda etkin olan çevresel etkilerin dışında su kütlesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri derinlik boyunca türbülanslı karışıma bağlı olarak değişmektedir. Akkuyu Körfezi'ndeki deniz suyunun fiziksel ve kimyasal özellikleri Eylül-Şubat döneminde derinlik boyunca homojen olup, Mart-Haziran döneminde ise, yüzey-derin deniz suyu arasındaki farklılık giderek artmakta ve Haziran-Ekim döneminde ise giderek azalmaktadır. Bu durum, deniz suyunun derinlik profili boyunca en duraysız (heterojen) olduğu zaman dilimine Haziran ayında ulaşıldığını göstermektedir. Bu durum, denize boşaltılan soğutma suyunun hızlı bir biçimde ısı homojenizasyonuna ulaşması için derin deniz deşarjının yaklaşık 20 m - 25 m derinlikler arasında yapılmasının uygun bir yaklaşım olacağını göstermektedir. Soğutma suyu ile denize salınan ısının en etkin biçimde yayılımı açısından en uygun dönem Ekim - Mayıs ayları arası olup, yaz aylarında deniz suyu sıcaklığının artmasına bağlı olarak söz konusu yayılım güçleşecektir. Bu durumda, deniz suyu sıcaklığının çevresel kalite ölçüt sınırları içinde kalabilmesi için santral işletme verimi yaz aylarında azaltılması gerekebilecektir.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma, Hacettepe Üniversitesi, Çevre Uygulama ve Araştırma Merkezi (ÇUVAM) tarafından Türkiye Elektrik Üretim AŞ (TEAŞ) için yürütülen "Akkuyu Nükleer Santrali Mevcut Durum Saptanması İşine Ait Yakın Deniz Ortamı Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi" adlı araştırma kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar; çalışmaya mali destek sağlayan TEAŞ'a, saha çalışmalarına özveri ile katılan ÇUVAM ve HÜ Hidrojeoloji Müh. Anabilim Dalı'ndan Beril Salman, Türkay Onacak, Zübeyde Hatipoğlu, Armağan Karabulut ve Füsün Öcal'a; lojistik sorunların aşılmasındaki katkılarından dolayı TEAŞ'dan Ali Aydemir ve Muzaffer Genç'e; saha çalışmaları sırasındaki yardımlarından dolayı TEAŞ Akkuyu Nükleer Santral Tesis Müdürlüğü çalışanlarına teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Bayarı, C.S., Özyurt, N.N., Doğdu, M.Ş. ve Arıkan, A., 2000. Akkuyu Nükleer Santrali mevcut durum saptanması işine ait yakın deniz ortamı fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi projesi sonuç raporu. Hacettepe Üniversitesi Çevre Uygulama ve Araştırma Merkezi, 270 s (yayımlanmamış).
- Deniz Araştırma Enstitüsü, 1977. Akkuyu Körfezi batimetrisi ve deniz tabanı sediment dağılımı (İçel), son rapor. Proje No: 77-07-00-02, 83 s (yayımlanmamış).
- Fofonoff, P., and Millard Jr. R. C., 1983. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. Unesco Technical Papers in Marine Sciences 44, 53 pp.
- Chou, L., Davison W., Eisenreich S.J., and Gat J.R., 1995. Physics and Chemistry of Lakes. Springer, A.Lerman, D.Imboden, and J.Gat (eds.), 332 pp.
- METU, 1983. The environmental study for Akkuyu power plant of Turkish Electrical Authority, Second Progress Report Project No: 81-04-10-00-01, 100 pp (yayımlanmamış).
- METU, 1984a. Akkuyu Nuclear Power Plant meso-scale oceanographic studies: Part II Results and Interpretation. Institute of Marine Sciences, Project No. 79.07.00.07/08, 118 pp. (yayımlanmamış).
- METU, 1984b. Model studies on cooling water intake-outlet alternatives of Akkuyu Nuclear Power Plants of Turkish Electricity Authority, Final Report. Civil Engineering Department Hydromechanics Laboratory, Project No: 84-04-03-02. 29 pp (yayımlanmamış).

- Pickard G.L., and Emery W.J.,1990. Descriptive Physical Oceanography: An Introduction. Pergamon Press, Oxford, 320 pp.
- Sabuncu, H., and Ersan,M., 1985. Sea water temperature and tide measurement. Turkish Electrical Authority, Report No:NSD-1-32, Archive No: 85/056, 8 pp (yayımlanmamış).
- Schwarzenbach R.P., Gschwend P.M., and Imboden D.M., 1992. Environmental Organic Chemistry. John Wiley and Sons, New York, 680 pp.
- Schwarzenbach R.P., Gschwend P.M., and Imboden D.M., 1995. Environmental Organic Chemistry, Illustrative Examples, Problems, and Case Studies. John Wiley and Sons, New York, 366 pp.
- TEK, 1983. Akkuyu Nuclear Power Plant, detailed site investigations Report, Part-I, TEK Nuclear Power Plants Division, NSD-I-29, 200 pp (yayımlanmamış).
- Veldman,J.J., Hurdle, D., and Van Doorn, J.T.M., 1988. Akkuyu Harbour wave penetration and wave run up, Report on investigation. Delft Hydraulics, 17 pp (yayımlanmamış).