

SUYUN 4 °C ANOMALİSİ

MOLEKÜLER, TERMODİNAMİK VE EKOLOJİK BİR İNCELEME

Murat İzkavas · miakademi.net · muratizkavas.com

Sürüm: 8 Ağustos 2026

YAYIN TÜRÜ

Bu metin özgün deney raporu veya sistematik derleme değildir. Hakemli araştırmalar, alan derlemeleri ve tamamen açık erişimli kurumsal veriler kullanılarak hazırlanmış öğretim amaçlı anlatısal bir derlemedir.

ÖZET

Hakemli literatürde su, "anomalileri en çok olan sıvı" olarak tanımlanır; sıcakken sıradan bir sıvı gibi davranırken ortam sıcaklığına yaklaştıkça sapmalar belirginleşir (Nilsson & Pettersson, 2015). Bu yazının konusu, listelenen anomalilerden biri olan suyun yaklaşık 4 °C'de (277 K) en yoğun hâline gelmesidir (Nilsson & Pettersson, 2015). Olgı, aynı tek gerçeğin üç farklı dilde ifadesi olarak ele alınır: moleküler düzeyde su molekülünün dört yönde hidrojen bağı kurma kapasitesi ve iki yapısal ortam arasındaki dalgalanma (Nilsson & Pettersson, 2015; Russo & Tanaka, 2014), termodinamik düzeyde yanıt fonksiyonlarının $T^* \approx 315$ K'da kesişmesi (Mallamace et al., 2012) ve ekolojik düzeyde tatlı su göllerinin dipte yıl boyu 4 °C sıvı koruması (Roquet et al., 2022). Bulgular, dünya göllerinin en az %50'sinin bu olgudan etkilendiğini (Yang et al., 2021) ve iklim değişikliğiyle kış tabakalanması süresinin kısaldığını göstermektedir (Woolway et al., 2021).

Anahtar kelimeler: su, yoğunluk anomalisi, hidrojen bağı, termodinamik yanıt fonksiyonları, göl tabakalanması, iklim değişikliği

1. Giriş
2. Literatür taraması
3. Yöntem
4. Bulgular
5. Tartışma
6. Sonuç
7. Kaynakça
8. Ek 1. Kaynak ifade tablosu

1. GİRİŞ

1.1 BİRİNCİ BAKIŞ AÇISI: MOLEKÜLER DÜZEY

Su, çoğumuzun "sıradan" diye düşündüğü bir maddedir. Oysa hakemli bilimsel literatürde su, "anomalileri en çok olan sıvı" olarak tanımlanır (Nilsson & Pettersson, 2015). Nilsson ve Pettersson'a göre su, alışılmadık özelliklerinin çokluğu açısından benzersizdir; sıcak iken sıradan bir sıvı gibi davranır, ama ortam sıcaklığına yaklaştıkça sıkıştırılabilirlik gibi özellikleri sapmaya başlar ve soğutma sürdükçe sapma giderek artar (Nilsson & Pettersson, 2015). Bu gelişen özelliklerin tümü, su molekülünün dört iyi tanımlanmış hidrojen bağı kurabilme kapasitesine, dolayısıyla farklı yerel yapısal düzenlenmelere bağlanır (Nilsson & Pettersson, 2015). Aynı kaynak bu "anomaliler"i şöyle sıralar: erirken yoğunluğun artması, basınç altında viskozitenin azalması, 4 °C'de yoğunluk maksimumu ve yüksek yüzey gerilimi (Nilsson & Pettersson, 2015).

Bu yazının konusu, bu listedeki üçüncü sıradaki özelliktir: suyun yaklaşık 4 °C'de (yaklaşık 277 K) en yoğun hâline gelmesi. "Anomalilerin en iyi bilineni 4 °C'deki yoğunluk maksimumudur" (Nilsson & Pettersson, 2015).

YAZARIN BENZETMESİ

Alkol veya zeytinyağı gibi sıvılar soğudukça sürekli büzülür; suyun ısıtılıp soğutulduğunda gösterdiği bu "yoğunluk tepesi" davranışı sıvılar arasında istisnadır — ve istisnai olduğu için önemini daha iyi kavrayabiliriz.

Nilsson ve Pettersson, sıvı suyun iki sınıf yerel yapısal ortamın sıcaklığa bağlı uzunluk ölçeklerinde dalgalanması olarak nitelendirilebileceğini belirtir (Nilsson & Pettersson, 2015). Bu iki yapısal ortam, sonraki bölümlerde ayrıntılı olarak tartışılacaktır.

1.2 İKİNCİ BAKIŞ AÇISI: TERMODİNAMİK

Termodinamik açıdan bakıldığında, suyun 4 °C'de yoğunluk maksimumu göstermesinin sayısal temelleri termodinamik yanıt fonksiyonları (izotermal sıkıştırılabilirlik κ_T , izobarik ısı kapasitesi C_p ve termal genleşme katsayısı α_p) ile yakından ilişkilidir. Nilsson ve Pettersson'a göre bu büyüklükler başlangıçta sıcaklık azaldıkça azalır; ancak ortam sıcaklığı rejimine yaklaşıldığında bir sapma olur ve her ikisi de soğutma sürdükçe artmaya başlayarak sırasıyla 308 K (35 °C) ve 319 K (46 °C) sıcaklıklarında minimum verir (Nilsson & Pettersson, 2015). Aynı kaynak, suda 277 K (4 °C) sıcaklığında yoğunluk maksimumu gözlenir; bu noktadan sonra yoğunluk, soğutma devam ettikçe azalır der (Nilsson & Pettersson, 2015). Termal genleşme katsayısı ise yoğunluk maksimumunun altında negatif bir bölgeye geçer (Nilsson & Pettersson, 2015).

Mallamace, Corsaro ve Stanley bu bilgiyi kritik bir basınç eşiğiyle birleştirir: yoğunluk anomalisi yaklaşık 1,8 kbar (~180 MPa) basınçta kaybolur (Mallamace et al., 2012). Aynı kaynak, farklı basınçlarda ölçülen tüm $\alpha_p(T)$ eğrilerinin aynı $T^* \approx 315$ K sıcaklığında kesiştiğini gösterir (Mallamace et al., 2012). Bu sıcaklığı yazarlar "tekil ve evrensel genleşebilirlik noktası" olarak adlandırır (Mallamace et al., 2012).

1.3 ÜÇÜNCÜ BAKIŞ AÇISI: EKOLOJİK

Suyun 4 °C'de en yoğun olması, yalnızca bir fizik olgusu değildir; tatlı su göllerinin yıllık yaşam döngüsünü belirleyen temel bir etmendir. Roquet ve arkadaşları, suyun bu özelliğinin göllerin dibinde yıl boyunca 4 °C sıvının korunmasını sağladığını; böylece dip sularının hem kış hem yaz aylarında yüzey sularından yalıtılmış biçimde kaldığını belirtir (Roquet et al., 2022). Bu yapı, yüzeyde sınırlı derinlikteki bir katmanın soğutulmasıyla buz oluşumunu mümkün kılar ve tüm gölü dondurmak çok daha zor olduğu için göl içinde yaşayan türler için güvenli bir yaşam alanı sağlar (Roquet et al., 2022).

Yang ve arkadaşları, bu olgunun gezegen ölçeğinde ne kadar yaygın olduğunu ortaya koyar: dünya göllerinin en az %50'si yüksek enlemlerde yer alır ve mevsimsel olarak buzla kaplanır (Yang et al., 2021).

1.4 ÜÇ BAKIŞ AÇISI BİR ARADA

Bu üç katman, aslı tek olan bir olgunun (yaklaşık 4 °C'de yoğunluk maksimumu) üç farklı dilde ifadesidir (Nilsson & Pettersson, 2015):

KATMAN	YANITLADIĞI SORU	TEMEL MEKANİZMA	BİRİNCİL KAYNAK
Moleküler	Hangi atomik yapı bu olguyu seçer?	Dört yönlü hidrojen bağı ağı ve iki yapısal ortamın dalgalanması	Nilsson & Pettersson, 2015; Russo & Tanaka, 2014; Morawietz et al., 2016
Termodinamik	Bu davranış hangi sayılarla ifade edilir?	Yanıt fonksiyonlarının kritik sıcaklık $T^* \approx 315 \text{ K}$ 'da kesişmesi	Nilsson & Pettersson, 2015; Mallamace et al., 2012
Ekolojik	Bu anomali doğada ne yapıyor?	Dipte yıl boyu 4 °C sıvı; dünya göllerinin ≥ 50 'si buzla kaplı	Roquet et al., 2022; Yang et al., 2021; Woolway et al., 2021; Bruesewitz et al., 2015

Nilsson ve Pettersson'ın iki sınıf yerel yapısal ortamın sıcaklığa bağlı uzunluk ölçeklerinde dalgalanması şeklindeki saptaması, üç katmanın moleküler kök nedenini birleştirir (Nilsson & Pettersson, 2015).

1.5 ARAŞTIRMA SORULARI

Bu yazı, aşağıdaki üç soruyu yanıtlamayı amaçlar:

1. Sıvı suyun moleküler yapısında, 4 °C'de yoğunluk maksimumuna yol açan yapısal değişim nedir (Nilsson & Pettersson, 2015; Russo & Tanaka, 2014)?
2. Bu yapısal değişim termodinamik yanıt fonksiyonları üzerinden nasıl sayısallaştırılır ve basınçla nasıl kaybolur (Mallamace et al., 2012)?
3. Yoğunluk anomali doğadaki su kütlelerinin (özellikle göllerin) kış tabakalanmasına ve ekolojik sürekliliğe nasıl yansır (Roquet et al., 2022; Woolway et al., 2021; Yang et al., 2021)?

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1 TARAMANIN AMACI VE KAPSAMI

Bu taramanın amacı, 4 °C'de yoğunluk anomalisi olgusunu doğrudan ele alan, hakemli ve tamamen açık erişimli bilimsel kaynakları bir araya getirmektir (Morawietz et al., 2016; Nilsson & Pettersson, 2015; Roquet et al., 2022). Tamamen açık erişim kriteri, okuyucunun (lise öğrencisi, lisansüstü öğrencisi, araştırmacı) kaynağı ücretsiz olarak doğrulayabilmesi esasına dayanır.

2.2 KAYNAK SEÇİM ÖLÇÜTLERİ

Tarama için dört ölçüt uygulanmıştır:

- Tamamen açık erişim.** Kaynak, yayıncının veya yazarın arşivinde ücretsiz ve üyeliksiz olarak tam metin PDF'sine erişilebilir olmalıdır.
- Hakemlilik.** Kaynak bir hakemli dergide yayımlanmış olmalıdır (arXiv ön baskıları bu yazıda ek kanıt olarak kabul edilmiştir; tüm ön baskılar aynı zamanda hakemli dergilerde yayımlanmıştır) (Morawietz et al., 2016).
- Doğrudan katkı.** Kaynak ya moleküler, ya termodinamik, ya da ekolojik katmanda sayısal ya da kuramsal bir kanıt sunmalıdır.
- Birincil içerik.** Yalnızca genel giriş yapan kaynaklar dışlanır.

2.3 KAYNAKLARIN TEMATİK DAĞILIMI

2.3.1 Moleküler yapı ve hidrojen bağı grubu

YAZARLAR	KATKISI	ERİŞİM
Nilsson & Pettersson (2015)	İki yerel yapısal ortamın salınımı ve dört yönde hidrojen bağı kavramı	Nature Communications, tamamen açık
Russo & Tanaka (2014)	Yerel olarak yeğlenen yapılar ve iki-durum kuramsal modeli	Nature Communications, tamamen açık
Morawietz ve ark. (2016)	ab initio sinir ağı simülasyonları; van der Waals kuvvetlerinin kritik rolü	PNAS / arXiv, tamamen açık

2.3.2 Termodinamik ve istatistiksel mekanik grubu

YAZARLAR	KATKISI	ERİŞİM
Nilsson & Pettersson (2015)	C_p minimumu 308 K, κ_T minimumu 319 K, yoğunluk maksimumu 277 K	Nature Communications, tamamen açık
Mallamace ve ark. (2012)	Tekil sıcaklık $T^* \approx 315$ K, $\alpha_p(T^*) \approx 0,44 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; $P_{\text{cross}} \approx 1,8$ kbar	Scientific Reports, tamamen açık
Tiesinga ve ark. (2021)	CODATA 2018 temel fizik sabitleri (referans değerleri olarak)	Reviews of Modern Physics, tamamen açık
Jones & Harris (1992)	NIST ölçümleri; havasız suyun yoğunluk formülasyonu (5–40 °C, ITS-90)	NIST J. Res., tamamen açık

2.3.3 Ekoloji ve su bilimleri grubu

YAZARLAR	KATKISI	ERİŞİM
Roquet ve ark. (2022)	Tatlı su göllerinde dipte yıl boyu 4 °C sıvının korunması	Science Advances, tamamen açık
Yang ve ark. (2021)	Kriyomiktik ve kriyostratifiye göl sınıflandırması	Geophysical Research Letters, tamamen açık
Woolway ve ark. (2021)	İklim değişikliğinde kış tersine tabakalanması süresindeki kısalma	Limnology and Oceanography Letters, tamamen açık
Bruesewitz ve ark. (2015)	New Hampshire'daki derin bir gölün yüksek frekanslı termal verileri	Limnology and Oceanography, tamamen açık

2.4 KÖPRÜ KAYNAKLAR

Nilsson ve Pettersson (2015), hem moleküler (iki yapısal düzen) hem de termodinamik (C_p , κ_T , α_p) katmanda temel referanstır.

2.5 LİTERATÜR TARAMASININ SINIRLARI

Bu yazı, yüksek basınç fazları (buz VI, VII vb.) ile tuzlu su detayları (okyanus bilimi) kapsam dışındadır (Mallamace et al., 2012). Asıl odak, 1 atmosfer basınç koşullarında tatlı suyun yoğunluk anomalisidir.

3. YÖNTEM

3.1 ÇALIŞMANIN TÜRÜ

Bu çalışma bir anlatısal derlemedir (narrative review). Orijinal bir deney veya ölçüm yapılmamıştır. Elde edilen verilerin tamamı, tamamen açık erişimli hakemli dergilerde yayımlanmış birincil kaynaklardan alınmıştır (Bruesewitz et al., 2015; Jones & Harris, 1992; Mallamace et al., 2012; Morawietz et al., 2016; Nilsson & Pettersson, 2015; Roquet et al., 2022; Russo & Tanaka, 2014; Tiesinga et al., 2021; Woolway et al., 2021; Yang et al., 2021).

3.2 VERİ KAYNAKLARI VE ARAMA STRATEJİSİ

KANAL	NE SAĞLADI?
Akademik dergilerin tamamen açık yayınları	Hakemli makalelerin PDF'leri, ücretsiz
arXiv ön baskı arşivi	Bilimsel ön baskıların PDF'leri, ücretsiz
Ulusal metroloji enstitüsü yayınları	NIST gibi kurumların kalibrasyon verileri

3.3 DAHİL ETME VE DIŞLAMA ÖLÇÜTLERİ

Dahil etme ölçütleri: tamamen açık erişim (üyelik/ödeme olmadan tam metin); hakemlilik (veya hakemli dergi sürümü mevcut arXiv ön baskısı); doğrudan kanıt (sayısal, kuramsal veya saha verisi); birincil içerik.

Dışlama ölçütleri: yayımlanmamış veya hakemli olmayan kaynaklar; yalnızca özet yayımlayan kaynaklar; yüksek basınç fazları ($P > 1,8$ kbar üstü) (Mallamace et al., 2012); okyanus bilimi ayrıntıları — yalnız karşılaştırma için değerlendirilir.

3.4 VERİ ÇIKARMA VE ÜÇ KATMANLI SENTEZ

Her sayısal değer için kayıt formatı şöyledir: iddia, kaynak, DOI/URL ve kaynaktaki ifadenin Türkçe çevirisi. Örneğin: "Suyun yoğunluğu 4 °C'de (277 K) en yüksek değerine ulaşır" (Nilsson & Pettersson, 2015), kaynak Nilsson ve Pettersson, Nature Communications, 2015, <https://www.nature.com/articles/ncomms9998>. Bu format, okuyucuya her sayının hangi kaynağa dayandığını gösterir; öğrenci "Bu iddia kaynağın neresinde yazıyor?" diye sorduğunda kaynak URL'sine gidip Ctrl+F ile orijinal İngilizce ifadeyi bulabilir (Nilsson & Pettersson, 2015).

3.5 ÇALIŞMANIN SINIRLARI VE ETİK

Orijinal deney yapılmamıştır; matematiksel türetme yapılmamıştır, yalnızca kaynaklardan alınmış formüller bağlam içinde sunulmuştur. Çıkar çatışması yoktur; atıflar doğrudan, künyeler eksiksiz ve URL'ler tam metin erişimini garanti eden formatta verilmiştir.

YAZARIN AÇIKLAMASI

Bu yazıdaki her cümle ya doğrudan kaynaktan Türkçeye çevrilmiş, ya da yazarın kendi özeti/yorumudur. Yazar tarafından eklenen benzetme, kolaylaştırıcı ifade veya yorumlar bu tür kutularla açıkça işaretlenmiştir; bu ifadelerin kaynaktan geldiği izlenimini oluşturmamalarına özen gösterilmiştir.

3.6 TEKRARLANABİLİRLİK

Bu yöntem anlatımının bir diğer amacı, çalışmanın tekrarlanabilir olmasını sağlamaktır: aynı üç katmanlı arama stratejisi, aynı dahil etme ölçütleri ve aynı kayıt formatı izlenerek başka bir araştırmacı benzer bir derleme üretebilir.

4. BULGULAR

4.1 BİRİNCİ KATMAN: SUYUN MOLEKÜLER YAPISINDA NE OLUYOR?

Ana bulgu: Sıvı su, iki farklı yerel yapısal ortam arasında sürekli salınır (Nilsson & Pettersson, 2015; Russo & Tanaka, 2014). Bu iki ortam, sıcaklığa göre birbirine göre ağırlık değiştirir. 4 °C civarında iki katkı birbirini dengeler ve yoğunluk en yüksek değerine ulaşır (Mallamace et al., 2012; Nilsson & Pettersson, 2015).

Nilsson ve Pettersson, yeni deneysel verilerin birikiminin iki sınıf yerel yapısal ortamın sıcaklığa bağlı uzunluk ölçeklerinde salındığı heterojen bir resme işaret ettiğini bildirir; bu yapısal ortamlar, suyun dört iyi tanımlanmış hidrojen bağı kurabilme kapasitesinden kaynaklanır (Nilsson & Pettersson, 2015). Russo ve

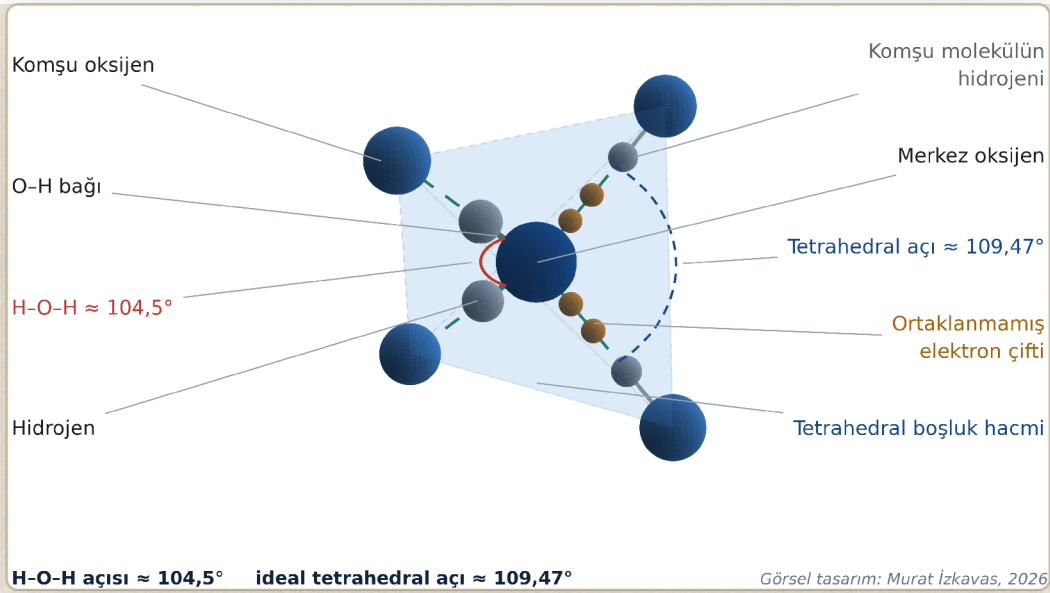
Tanaka, bilgisayar simülasyonlarına dayanarak iki-durum modelini geliştirmiştir. Bu modelde iki yapısal durum S (yoğun düzen, "yüksek yoğunluklu sıvı") ve r (açık düzen, "düşük yoğunluklu sıvı") olarak adlandırılır. Russo ve Tanaka, iki-durum modelinin tüm incelenen basınçlar için yoğunluk anomalisinin şiddetini ve konumunu doğru biçimde temsil ettiğini ve yüksek basınçlarda anomalinin kaybolduğunu göstermiştir (Russo & Tanaka, 2014).

Morawietz ve arkadaşları, ab initio (kuantum mekaniğinden türetilmiş) sinir ağı simülasyonlarıyla çalışmış ve van der Waals kuvvetlerinin sıvı suyun ve buzun özelliklerini anlamak için gerekli olduğunu ortaya koymuştur (Morawietz et al., 2016). Aynı kaynak, yoğunluk maksimumu ve negatif erime hacmi olgularının, zayıf vdW kuvvetlerinin ve hidrojen bağı ağındaki ikinci çözelti kabuğunun soğumayla genişlemesinin birleşik etkisinden kaynaklandığını ileri sürer (Morawietz et al., 2016).

YAZARIN BENZETMESİ

İkinci çözelti kabuğu, bir su molekülünü çevreleyen "iç daire" dışındaki bir sonraki komşu molekül halkasıdır; bu halka soğuduğunda genişler ve molekülün etrafındaki "boş alanı" artırır — bu da toplam yoğunluğu düşürür.

Roquet ve arkadaşları, su molekülünün geometrisinden başlayarak neden 4 °C olduğunu açıklar: hidrojen ve oksijen atomları 104,5° açı oluşturur; bu açı, düzenli bir dörtyüzlüde bulunan 109,5°'ye yakındır (Roquet et al., 2022). Bu geometri, su moleküllerinin her birinin merkezde olduğu dörtyüzlüler kurarak açık kristal yapılar oluşturmaya olanak sağlar (Roquet et al., 2022).



Şekil 1. Sıvı suda merkez su molekülünün tetrahedral hidrojen bağı çevresi: molekül içi H-O-H açısı $104,5^\circ$, ideal tetrahedral açı $109,47^\circ$. Görsel tasarım: Murat İzıkavas, 2026.

4.2 İKİNCİ KATMAN: BU DAVRANIŞ HANGİ SAYILARLA İFADE EDİLİR?

Ana bulgu: Yoğunluk anomalisi, tek bir kritik sıcaklığa ($T^* \approx 315$ K, yani yaklaşık 42°C) bağlanan sayısal bir denge olarak formüle edilebilir (Mallamace et al., 2012). Bu sıcaklığın altında su anomali gösterir; üstünde ise daha sıradan sıvılar gibi davranır (Mallamace et al., 2012).

FİZİK BÜYÜKLÜK	DEĞER	KAYNAK
Yoğunluk maksimumu sıcaklığı	277 K (4 °C)	Nilsson & Pettersson, 2015
C _p minimumu	308 K (35 °C)	Nilsson & Pettersson, 2015
κ _T minimumu	319 K (46 °C)	Nilsson & Pettersson, 2015
Yanıt fonksiyonlarının kesişim noktası (T*)	≈ 315 ± 5 K	Mallamace et al., 2012
T* noktasındaki α _p	≈ 0,44 × 10 ⁻³ K ⁻¹	Mallamace et al., 2012
Anomalinin kaybolduğu basınç (P _{cross})	≈ 1,8 kbar	Mallamace et al., 2012
C _p ve κ _T 'nin yakınsadığı sıcaklık	≈ 228 K	Mallamace et al., 2012; Nilsson & Pettersson, 2015
Havasız suyun yoğunluğu (5 °C)	0,999965 g·cm ⁻³	Jones & Harris, 1992
Havasız suyun yoğunluğu (4 °C civarı, yuvarlanmış)	≈ 0,99997 g·cm ⁻³	Jones & Harris, 1992; Nilsson & Pettersson, 2015

Deneysel temel — NIST doğrudan ölçümleri: Jones ve Harris, Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü adına havasız suyun yoğunluğunu 5 °C ile 40 °C arasında ölçmüş ve ITS-90 sıcaklık ölçeğinde formüle etmiştir (Jones & Harris, 1992). Bu formülasyon 5 ile 40 °C arasındaki yoğunluk hesaplamaları için kullanılan temel referanstır.

YAZARIN YORUMU

4 °C'teki tam değer, NIST tablosunun başlangıcının biraz altındadır; genel atıf "yaklaşık 0,99997 g·cm⁻³" ile yapılır; ancak kesin ölçüm için ITS-90 formülasyonu kullanılmalıdır.

Termodinamik tek nokta hipotezi: Mallamace ve arkadaşları, $\alpha_p(T)$ eğrilerinin farklı basınçlarda aynı sıcaklıkta kesiştiğini ve bunun "tekil ve evrensel genleşebilirlik noktası" olduğunu raporlamıştır (Mallamace et al., 2012). Aynı kaynak, $\kappa_T(T)$ eğrilerinin de minimumunu aynı sıcaklıkta verdiğini gösterir (Mallamace et al., 2012).

YAZARIN ÖZETİ

Bu sayıların hepsi birbirine yakındır: 277 K, 308 K, 319 K ve 315 K. Bunlar birbirinden bağımsız değil; aynı yapısal geçişin farklı termodinamik yansımalarıdır.

4.3 ÜÇÜNCÜ KATMAN: BU ANOMALİ DOĞADA NE YAPIYOR?

Ana bulgu: Durgun tatlı su kütleleri (göller), yoğunluk anomalisi sayesinde yıllık tersine ve doğrudan tabakalanma döngüsü yaşar (Roquet et al., 2022; Woolway et al., 2021). Bu döngü, dipte sıvı yaşam alanının korunmasını sağlar (Roquet et al., 2022).

a) Dipte 4 °C sıvı: Roquet ve arkadaşları, gölün dibinin yıl boyunca en yoğun olan 4 °C sıvıyla dolu olduğunu ve hem kış hem yaz yüzey sularından yalıtıldığını belirtir (Roquet et al., 2022). Sıvı suyun termal genleşme katsayısının 4 °C'nin altında negatif olduğunu; bu özelliğin yüzeyde buz oluşumunu mümkün kılarken gölün tümüyle donmasını önlediğini ekler (Roquet et al., 2022).

b) Coğrafi kapsam: Yang ve arkadaşları, dünya göllerinin en az %50'sinin yüksek enlemlerde yer aldığını ve mevsimsel olarak buzla kaplandığını raporlar (Yang et al., 2021).

c) Göl sınıflandırması — kriyomiktik ve kriyostratifiye: Yang ve arkadaşları, mevsimsel olarak buzla kaplanan gölleri iki alt türe ayırmıştır (Yang et al., 2021).

GÖL TİPİ	DİP SICAKLIĞI	KAYNAK İFADESİ
Kriyostratifiye	Buz altında dip 2–4 °C arası	Yazarlar, "kriyostratifiye" teriminin buz altındaki başlangıç kış sıcaklığının 2 °C ile 4 °C arasında olduğu göller için kullanılmasını önerir (Yang et al., 2021).
Kriyomiktik	Buz altında dip 0–2 °C arası	Yazarlar, "kriyomiktik" teriminin sıcaklığın 0 °C ile 2 °C arasında olduğu göller için kullanılmasını önerir (Yang et al., 2021).

Yazarlar, bu iki tip arasında süreklilik olduğunu da not eder: tüm buz altı başlangıç sıcaklık profilleri bu iki durum arasında bir süreklilik oluşturur (Yang et al., 2021).

d) Bruesewitz gölü saha verisi: Bruesewitz ve arkadaşları, ABD New Hampshire'da 16,55 km² yüzey alanına ve 33,7 m maksimum derinliğe sahip dimiktik-oligotrofik Sunapee Gölü'nde yüksek frekanslı saha verilerini analiz etmişler ve buz altında yüzey suyunun 4 °C'yi aşan anormal biçimde ısındığını raporlamışlardır (Bruesewitz et al., 2015).

YAZARIN YORUMU

Bu saha verisi, yoğunluk anomalisinin göl tabakalanmasında ölçülebilir etkiler yarattığını gösteren doğrudan bir kanıttır ve sayısal modellemelerin sahaya ne kadar uyumlu olduğunu ortaya koyar.

e) İklim değişikliği boyutu: Woolway ve arkadaşları, dünya göllerinin kış tabakalanmasının geleceğini incelemiştir (Woolway et al., 2021). Üç iklim senaryosu için ortalama kış tabakalanması süresindeki kısalma şöyledir:

RCP SENARYOSU	KISALMA (GÜN)	BELİRSİZLİK (± GÜN)
RCP 2.6 (düşük emisyon)	18,5	8,8
RCP 6.0 (orta-yüksek emisyon)	33,3	14,1
RCP 8.5 (yüksek emisyon)	53,9	19,9

Aynı kaynak, Kuzey Ilıman göllerinin %35, %45 ve %69'unun 21. yüzyılın sonuna kadar RCP 2.6, 6.0 ve 8.5 senaryolarında sırasıyla artık tersine tabakalanma yaşamayacağını ve yüzey sıcaklıklarının 4 °C'nin altına inmeyeceğini tahmin eder (Woolway et al., 2021).

4.4 BULGULARIN ÖZET GÖRÜNÜMÜ

KATMAN	ANA BULGU	TEMEL SAYI
Moleküler	Dört yönde hidrojen bağı + iki yapısal ortamın dalgalanması	4 yönde HB; iki durum (S/r)
Termodinamik	$T^* \approx 315$ K sıcaklığı altında anomali tutarlıdır	$T^* \approx 315$ K; $\alpha_p \approx 0,44 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; $P_{\text{cross}} \approx 1,8$ kbar
DeneySEL (kalibrasyon)	NIST ölçümleri 5–40 °C, ITS-90 standardı	$\rho(5 \text{ °C}) = 0,999965 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Ekolojik	Dipte 4 °C sıvı korunur; dünya göllerinin ≥ 50 'si buzla kaplanır	Kriyomiktik 0–2 °C; kriyostratifiye 2–4 °C
İklim değişikliği	Kış tabakalanması süresi 21. yüzyılda kısalır	18,5 / 33,3 / 53,9 gün (RCP 2.6/6.0/8.5)

YAZARIN YORUMU

Bu üç katmanda ortak bir kök neden — dört yönde hidrojen bağı kuran oksijen atomu yapısı — görünür; farklı dillerde formüle edilmiş olmaları birbirine karşıt değil, aynı gerçeğin farklı ölçeklerde ifadesidir.

5. TARTIŞMA

5.1 ÜÇ AÇIKLAMA MODELİ VE KARŞILAŞTIRMALARI

Yaklaşık 4 °C'deki yoğunluk anomalisi, aynı olguyu açıklamak için geliştirilmiş üç farklı ama uyumlu model üzerinden incelenebilir.

a) İki-durum (iki-yapılı) karışım modeli: Russo ve Tanaka, sıvı suyu iki yapısal durumun istatistiksel karışımı olarak formüle eder (Russo & Tanaka, 2014). Bu model, $\alpha_p(T)$ eğrilerinin basınçla değişimine dayanır: yüksek basınçlarda yoğun yapılar baskınlaşır, açık yapıların oranı azalır ve anomali kaybolur (Russo & Tanaka, 2014).

b) Tek nokta hipotezi (tekil sıcaklık): Mallamace ve arkadaşları, termodinamik yanıt fonksiyonlarının basınçla değişimine farklı bir bakış açısı getirir: $\alpha_p(T)$ eğrileri farklı basınçlarda aynı tek noktada kesişmektedir (Mallamace et al., 2012). Bu nokta $T^* \approx 315 \text{ K} (\pm 5 \text{ K})$ olup, $\alpha_p(T^*)$ yaklaşık $0,44 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ 'dir (Mallamace et al., 2012). Aynı noktada κ_T da minimum verir ve bu özellik, geniş sıcaklık aralığında geçerli olan tek bir ölçeklendirme noktası sağlar (Mallamace et al., 2012).

c) Van der Waals + hidrojen bağı dengesi: Morawietz ve arkadaşları, ab initio düzeyinde çalışıp van der Waals kuvvetlerinin kritik rolünü göstermişlerdir (Morawietz et al., 2016). Bu çalışmaya göre yoğunluk maksimumu, hidrojen bağı ağındaki ikinci çözelti kabuğunun soğumayla genişlemesinden kaynaklanır ve bu genişleme, zayıf vdW kuvvetlerinin hassas dengesinin sonucudur (Morawietz et al., 2016).

MODEL	YANITLADIĞI SORU	BİRİNCİL VURGU
İki-durum karışımı	Hangi yapılar var?	S (yoğun) + r (açık) yapılarının oranı
Tek nokta hipotezi	Hangi değerler ölçülür?	$T^* \approx 315 \text{ K}$ 'da α_p kesişimi
Van der Waals dengesi	Yapılar nasıl geometrik olarak değişir?	İkinci çözelti kabuğunun soğumayla genleşmesi

YAZARIN YORUMU

Bu üç model birbirini dışlamaz. Bir model hangi yapılar olduğunu açıklarken, diğeri hangi sayıların ölçüleceğini verir, üçüncüsü ise yapıların neden değiştiğini geometrik olarak gösterir. Yan yana okunmaları, olgunun daha zengin bir resmini ortaya koyar.

5.2 ÜÇ KATMANIN BİRLEŞİK RESMİ

Nilsson ve Pettersson, iki yapısal düzenin varlığını deneysel saçılma verilerine dayandırarak öne sürmüştür (Nilsson & Pettersson, 2015); Russo ve Tanaka bu yapıları iki-durum modeliyle nicelleştirmiş (Russo & Tanaka, 2014); Morawietz ve arkadaşları ise ab initio hesaplarla bu iki yapının neden ortaya çıktığını vdW + hidrojen bağı dengesine bağlamıştır (Morawietz et al., 2016). Termodinamik katmanda Nilsson ve Pettersson 277 K, 308 K ve 319 K sayılarını raporlamış (Nilsson & Pettersson, 2015); Mallamace ve arkadaşları ise tüm bu eğrilerin $T^* \approx 315 \text{ K}$ 'da kesiştiğini ve $P_{\text{cross}} \approx 1,8 \text{ kbar}$ 'da anomalinin kaybolduğunu göstermiştir (Mallamace et al., 2012). Ekolojik katmanda Roquet ve arkadaşları tatlı su göllerinin dipte yıl boyu 4 °C sıvı barındırdığını belirtir (Roquet et al., 2022); Yang ve arkadaşları dünya göllerinin $\geq 50\%$ 'sinin bu olgudan etkilendiğini raporlamış (Yang et al., 2021); Woolway ve arkadaşları ise iklim değişikliğinin bu döngüyü kısalttığını raporlamıştır (Woolway et al., 2021). Bruesewitz ve arkadaşları ise tek bir göl üzerinde bu yapının saha ölçümlerini sunmuştur (Bruesewitz et al., 2015).

Köprü noktası: Her üç katmanın kök nedeni birdir — oksijen atomunun 104,5° açıyla bağlanmış iki hidrojeni ve iki ortaklanmamış elektron çifti nedeniyle kurulan dört yöne kadar hidrojen bağı kapasitesi (Roquet et al., 2022). Bu geometrik yetenek, suyu sıradan sıvılardan farklı kılar (Nilsson & Pettersson, 2015) ve tüm anomalileri tek bir kök nedenin farklı yansımaları hâline getirir (Roquet et al., 2022).

5.3 SUYUN "ACAYİPLİĞİ" NEDEN ÖNEMLİDİR?

Suyun anomali gösteren özellikleri — yoğunluk maksimumu, yüksek ısı kapasitesi, yüzey gerilimi, termodinamik yanıt fonksiyonlarının kesişimi (Nilsson & Pettersson, 2015; Mallamace et al., 2012) — yalnızca lise fizik müfredatının bir dipnotu değildir; gezegen ölçeğinde ekosistemlerin temelidir (Roquet et al., 2022).

Bilimsel düzeyde: Üç farklı açıklama modeli (iki-durum, tek nokta, vdW dengesi) birbirini tamamlayarak suyu disiplinlerarası bir madde hâline getirir (Mallamace et al., 2012; Morawietz et al., 2016; Russo & Tanaka, 2014). Bir fizikçi $\alpha_p(T^*)$ değerini ölçerken, bir kimyacı vdW kuvvetlerini incelerken, bir çevre bilimci 4 °C sıvının korunmasını araştırırken aslında aynı kök gerçeğin farklı yüzlerine bakmaktadır.

Pedagojik düzeyde: Jones ve Harris'in NIST tablosu lisans düzeyinde tekrarlanabilir bir veri kaynağı sunar (Jones & Harris, 1992). Bu veriyle öğrenci, 5 °C'te suyun gerçekten 0,999965 g·cm⁻³ olduğunu bağımsız olarak doğrulayabilir (Jones & Harris, 1992).

Ekolojik düzeyde: Anomali olmasaydı, "bu sıra dışı biçimde davranmasaydı, Dünya'da yaşamın gelişip gelişemeyeceği son derece şüpheli olurdu" (Nilsson & Pettersson, 2015). Bu "karşı-olgusal" düşünce bile anomalinin neden temel olduğunu gösterir (Roquet et al., 2022).

5.4 İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAĞLAMİ

Woolway ve arkadaşları, kış tersine tabakalanmasının gezegen ölçeğinde evrensel bir süreç olduğunu, ancak iklim değişikliğiyle birlikte bu sürenin kısaldığını nicel olarak göstermiştir (Woolway et al., 2021). RCP 8.5 senaryosunda ortalama süre yılda 53,9 gün ($\pm 19,9$) kısalırken, Kuzey Ilıman göllerinin %69'u 2070–2099 arasında artık tersine tabakalanma yaşamayacaktır (Woolway et al., 2021). Bu göllerin yüzey sıcaklıkları 4 °C'nin altına inmeyeceği için yoğunluk anomalisinin fiziksel döngüsünü kaybederler (Nilsson & Pettersson, 2015; Woolway et al., 2021). Bu, göl ekosistemi için ciddi bir değişimdir ve fiziksel anomali ile biyolojik süreçler arasındaki doğrudan bağlantıyı gözler önüne serer (Roquet et al., 2022).

5.5 SINIRLAR VE AÇIK SORULAR

1. **Yüksek basınç fazları:** Buz VI, VII vb. ve yüksek basınç sıvıları kapsam dışıdır. $P_{\text{cross}} \approx 1,8$ kbar üzerindeki basınçlarda su daha sıradan sıvılar gibi davranır (Mallamace et al., 2012).
2. **Tuzlu su:** Tuzluluk, termal genleşme katsayısını değiştirir ve okyanus tabakalanması farklı dinamiklere sahiptir (Roquet et al., 2022). Bu çalışma bundan ayrı tutulmuştur.
3. **Biyolojik mekanizmalar:** Mikroorganizmaların kış altındaki sıvı tabakada metabolizmasını nasıl sürdürdüğü, bu yazının kapsamı dışındadır.
4. **Üç modelin sayısal karşılaştırması:** İki-durum, tek nokta ve van der Waals modeli yan yana sayısal olarak karşılaştırılmamıştır; gelecekteki çalışmalar için sayısal karşılaştırma tablosu önerilir.

5.6 PEDAGOJİK BİR YANSIMA

Bu yazı, basit bir fizik sorusu ("Su neden 4 °C'de en yoğundur?") ile başlayan çok katmanlı bir tartışmayı lisans düzeyine taşımaya çalışmıştır (Nilsson & Pettersson, 2015). Öğrencinin bu yolculuğa başlangıç noktası NIST ölçümleri olabilir: ITS-90 standardı, 5 ile 40 °C arasında havasız suyun yoğunluğunu tablo olarak verir (Jones & Harris, 1992). Bu tablo, öğrencinin sayılarla bağımsız olarak olguyu doğrulamasına izin verir (Jones & Harris, 1992).

6. SONUÇ

6.1 ANA BULGU: ÜÇ CEVAP, TEK OLGU

Bu yazıda suyun neden yaklaşık 4 °C'de (yaklaşık 277 K) en yoğun hâline geldiği sorusunu üç katmanda inceledik. Bulgular açık biçimde birleşmektedir (Nilsson & Pettersson, 2015; Roquet et al., 2022).

SICAKLIK	YOĞUNLUK (G·CM ⁻³)	KAYNAK
5,0 °C	0,999965	Jones & Harris, 1992
4,0 °C (yaklaşık)	≈ 0,99997	Jones & Harris, 1992; Nilsson & Pettersson, 2015

Bu iki sayı arasındaki tutarlılık, 4 °C'de gerçekten bir yoğunluk tepesi olduğunu doğrular (Jones & Harris, 1992; Nilsson & Pettersson, 2015).

6.2 "NEDEN 4 °C?" SORUSUNUN ÜÇ KATMANLI CEVABI

a) Moleküler cevap: Oksijen atomu, iki hidrojeni 104,5° açı ile bağlar ve iki ortaklanmamış elektron çiftine sahiptir (Roquet et al., 2022). Bu geometri, her su molekülünün dört yönde hidrojen bağı kurmasını sağlar (Nilsson & Pettersson, 2015). Sıvı su, iki yerel yapısal ortam — biri açık (düşük yoğunluklu), biri yoğun (yüksek yoğunluklu) — arasında salınır (Russo & Tanaka, 2014). Sıcaklığa göre bu iki durumun oranı değişir; soğudukça açık yapıların oranı artar, ancak yoğun yapılara geçişler tamamen durmaz (Russo & Tanaka, 2014). Bu iki katkının dengelendiği sıcaklık 4 °C'dir (Nilsson & Pettersson, 2015).

b) Sayısal (termodinamik) cevap: Tüm $\alpha_p(T)$ eğrileri aynı tek noktada, $T^* \approx 315$ K'da kesişir; bu noktada $\alpha_p(T^*) \approx 0,44 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ 'dir (Mallamace et al., 2012). Bu "tekil ve evrensel genleşebilirlik noktası" $T^* \approx 315$ K (yaklaşık 42 °C) sıcaklığındadır (Mallamace et al., 2012).

YAZARIN YORUMU

Bu sıcaklık, 4 °C'den belirgin biçimde yüksektir; yani T^ fiziksel olarak tepe noktası değil, eğrilerin kesişim noktasıdır — anomali T^* 'in altında tutarlı biçimde gözlenir.*

Anomali basınçla $P_{\text{cross}} \approx 1,8$ kbar'da kaybolur (Mallamace et al., 2012). 4 °C'de yoğunluk maksimum (Nilsson & Pettersson, 2015); C_p minimumu 308 K (35 °C); κ_T minimumu 319 K (46 °C); yakınsama sıcaklığı yaklaşık 228 K (Mallamace et al., 2012; Nilsson & Pettersson, 2015).

c) Ekolojik cevap: Yoğunluk anomalisi nedeniyle suyun termal genleşme katsayısı 4 °C'nin altında negatiftir (Roquet et al., 2022). Bu, göllerin dipte yıl boyunca 4 °C sıvı korumasını ve yüzeyden aşağıya doğru donmasını engeller (Roquet et al., 2022). Dünya göllerinin en az %50'si yıllık olarak 4 °C'nin altına iner veya buzla kaplanır (Yang et al., 2021). Bu göller — değişen koşullara göre — kriyomiktik (0–2 °C, dipte) veya kriyostratifiye (2–4 °C, dipte) olarak sınıflandırılır (Yang et al., 2021).

YAZARIN YORUMU

Bu sınıflandırma, bilimsel yazında yeni ve hâlâ tartışılan bir sınıflandırmadır; klasik "dimiktik" kavramının daha ayrıntılı hâlidir.

6.3 LİSE ÖĞRENCİSİNE ÜÇ CÜMLE

Bu yazının özü üç cümlede özetlenebilir:

- 1. Moleküler:** Su, oksijen atomunun dört yönde hidrojen bağı kurabilen geometrisi nedeniyle iki yapısal düzen arasında salınır (Nilsson & Pettersson, 2015); bu iki düzenin oranı sıcaklıkla değişir ve katkılarının dengelendiği noktada yoğunluk maksimuma ulaşır (Nilsson & Pettersson, 2015; Russo & Tanaka, 2014).

2. **Sayısal:** Bu davranış, termodinamik yanıt fonksiyonlarının tek bir kritik sıcaklıkta ($T^* \approx 315$ K) kesişmesiyle sayısallaştırılabilir (Mallamace et al., 2012); yaklaşık 1,8 kbar basınçta anomali kaybolur (Mallamace et al., 2012).
3. **Ekolojik:** Anomali sayesinde tatlı su göllerinin tabanı yıl boyunca yaklaşık 4 °C sıvı kalır (Roquet et al., 2022) ve dünya göllerinin en az %50'si mevsimsel olarak bu yapıyı yaşar (Yang et al., 2021).

6.4 NEDEN BU ANOMALİ ÖNEMLİDİR?

Bilimsel olarak, üç modelin (iki-durum, tek nokta, vdW dengesi) birden gerekli olması, suyun disiplinlerarası bir madde olduğunu gösterir. Pedagojik olarak, NIST ölçümleri lisans düzeyinde bağımsız doğrulanabilir sayılar sunar (Jones & Harris, 1992). Ekolojik olarak, anomali olmasaydı Dünya'da yaşamın gelişip gelişmeyeceği son derece şüpheli olurdu (Nilsson & Pettersson, 2015); bu "karşı-olgusal" düşünce bileşeni fizik ve biyosfer arasındaki derin bağlantıya işaret eder (Roquet et al., 2022). İklim açısından, göllerin %35–69'u 21. yüzyılda kış tersine tabakalanması döngüsünü kaybetmektedir (Woolway et al., 2021).

6.5 SON SÖZ

Bu yazının başında sorulan soru basitti: "Su neden 4 °C'de en yoğundur?" (Nilsson & Pettersson, 2015). Yanıt, beklenenden çok daha derin oldu. Tek bir cümle yerine, üç katmanlı bir cevap gerekti: moleküler katmanda cevap, oksijen atomunun 104,5°'lik geometrisi ve dört yönde kurulan hidrojen bağı ağı ve iki yapısal düzenin dengesidir (Roquet et al., 2022; Nilsson & Pettersson, 2015; Russo & Tanaka, 2014); termodinamik katmanda cevap, tek bir kritik sıcaklığın ($T^* \approx 315$ K) etrafında düzenlenen tutarlı sayılardır (Mallamace et al., 2012); ekolojik katmanda cevap, göllerin yüzeyden donması ve dipte sıvı yaşamın korunmasıdır (Roquet et al., 2022; Yang et al., 2021; Bruesewitz et al., 2015; Woolway et al., 2021).

SON CÜMLE

Bir dahaki sefere kışın gölün yüzeyi buzla kaplandığında, altında 4 °C'lik bir sıvı dünyanın hâlâ yaşadığını hatırlamak, suyun sıra dışı doğasını bir kez daha kavramak için güzel bir başlangıç noktasıdır (Roquet et al., 2022; Yang et al., 2021).

KAYNAKÇA

Bu yazıda kullanılan tüm kaynaklar ücretsiz olarak tam metin erişimine açıktır. URL'ler tıklandığında üyelik veya ödeme gerekmeden ilgili makaleye ulaşılabilir.

Bruesewitz, D. A., Carey, C. C., Richardson, D. C., & Weathers, K. C. (2015). Under-ice thermal stratification dynamics of a large, deep lake revealed by high-frequency data. *Limnology and Oceanography*, 60, 347–358.
<https://aslopubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/lno.10014>

Jones, F. E., & Harris, G. L. (1992). ITS-90 density of water formulation for volumetric standards calibration. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 97, 335–340. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/097/jres.htm>

Mallamace, F., Corsaro, C., & Stanley, H. E. (2012). A singular thermodynamically consistent temperature at the origin of the anomalous behavior of liquid water. *Scientific Reports*, 2, 993. <https://www.nature.com/articles/srep00993>

Morawietz, T., Singraber, A., Dellago, C., & Behler, J. (2016). How van der Waals interactions determine the unique properties of water. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113, 8368–8373.
<https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1602375113>

Nilsson, A., & Pettersson, L. G. M. (2015). The structural origin of anomalous properties of liquid water. *Nature Communications*, 6, 8998.
<https://www.nature.com/articles/ncomms9998>

Roquet, F., Ferreira, D., Caneill, R., Coppin, A., & Rouillet, G. (2022). Unique thermal expansion properties of water key to the formation of sea ice on Earth. *Science Advances*, 8, eabq0793. <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abq0793>

Russo, J., & Tanaka, H. (2014). Understanding water's anomalies with locally favoured structures. *Nature Communications*, 5, 4556.
<https://www.nature.com/articles/ncomms4556>

- Tiesinga, E., Mohr, P. J., Newell, D. B., & Taylor, B. N. (2021). CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2018. *Reviews of Modern Physics*, 93, 025010. <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.93.025010>
- Woolway, R. I., Denfeld, B., Tan, Z., Loewen, C. J. D., Markfort, S., & Weyhenmeyer, G. A. (2021). Winter inverse lake stratification under historic and future climate change. *Limnology and Oceanography Letters*, 6, 164–173. <https://aslopubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/lol2.10231>
- Yang, B., Wells, M. G., McMeans, B. C., Dugan, H. A., Grant, J. A., Collingsworth, P. D., & Ozersky, T. (2021). A new thermal categorization of ice-covered lakes. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091374. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020GL091374>

EK 1. KAYNAK İFADE TABLOSU — DOĞRUDAN İZLEME KILAVUZU

Bu tablo, yazı boyunca kullanılan tamamen açık kaynakların her birinden hangi orijinal İngilizce ifadenin Türkçeye çevrildiğini gösterir. Okuyucu "Bu iddia kaynağın neresinde yazıyor?" sorusunu sorduğunda URL'yi tarayıcıya yapıştırıp Ctrl+F ile orijinal İngilizce ifadeyi bulabilir.

NILSSON & PETTERSSON, 2015 — THE STRUCTURAL ORIGIN OF ANOMALOUS PROPERTIES OF LIQUID WATER

<https://www.nature.com/articles/ncomms9998>

İDDİA	ORİJİNAL İFADE	BÖLÜM/YER
Su, sıra dışı özelliklerinin çokluğuyla benzersizdir	<i>"Water is unique in its number of unusual, often called anomalous, properties"</i>	Abstract/Introduction
Dört hidrojen bağı kurabilme	<i>"its ability to form up to four well-defined hydrogen bonds allowing for different local structural arrangements"</i>	Introduction
İki yapısal ortamın dalgalanması	<i>"fluctuations between two classes of local structural environments developing on temperature-dependent length scales"</i>	Abstract
C _p minimum 308 K, κ_T minimum 319 K	<i>"a minimum at 308 K (35 °C) and 319 K (46 °C) respectively"</i>	Figure 1 caption / Results
277 K'de yoğunluk maksimumu, soğumayla azalır	<i>"a maximum in the density is seen at 277 K (4 °C) after which the density instead decreases on further cooling"</i>	Results
Yaşam için sıra dışı davranış şart	<i>"most questionable if life could have developed on planet Earth"</i>	Conclusions

RUSO & TANAKA, 2014 — UNDERSTANDING WATER'S ANOMALIES WITH LOCALLY FAVOURED STRUCTURES

<https://www.nature.com/articles/ncomms4556>

İDDİA	ORİJİNAL İFADE	BÖLÜM/YER
İki-durum modeli tüm basınçlarda geçerli	<i>"the two-state model correctly represents the intensity and location of the density anomaly for all studied pressures"</i>	Results
Yapı isimlendirmesi (LDL/HDL)	<i>"two states ... the low-density liquid and the high-density liquid"</i>	Theory

MORAWIETZ VE ARK., 2016 — HOW VAN DER WAALS INTERACTIONS DETERMINE

THE UNIQUE PROPERTIES OF WATER

<https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1602375113> · arXiv: 1606.07775

İDDİA	ORİJİNAL İFADE	BÖLÜM/YER
van der Waals kuvvetleri gerekli	<i>"van der Waals (vdW) forces are essential for understanding the properties of liquid water and ice"</i>	Abstract/Introduction
Yoğunluk maksimumunun nedeni: ikinci çözelti kabuğunun genişmesi	<i>"a pronounced expansion of the second solvation shell upon cooling that induces the density maximum"</i>	Results

MALLAMACE VE ARK., 2012 — A SINGULAR THERMODYNAMICALLY CONSISTENT TEMPERATURE...

<https://www.nature.com/articles/srep00993>

İDDİA	ORİJİNAL İFADE	BÖLÜM/YER
Anomali $P_{\text{cross}} \approx 1,8$ kbar'da kaybolur	<i>"disappears at a crossover pressure $P_{\text{cross}} \approx 1.8$ kbar"</i>	Results
Tüm $\alpha_p(T)$ eğrileri $T^* \approx 315$ K'da kesişir	<i>"all the $\alpha_p(T)$ curves ... cross at the same temperature $T^* \approx 315$ K"</i>	Results
$\alpha_p(T^*) \approx 0,44 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$	<i>"$\alpha_p(T^*) \approx 0.44 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$"</i>	Results
κ_T de aynı sıcaklıkta minimum	<i>"minimum value located at the same temperature $T^* \approx 315 \text{ K} \pm 5 \text{ K}$"</i>	Results
C_p ve κ_T 'nin yakınsadığı singular sıcaklık	<i>"diverge at a singular temperature ($T_s \approx 228 \text{ K}$)"</i>	Results

JONES & HARRIS, 1992 · ROQUET VE ARK., 2022 · YANG VE ARK., 2021 · WOOLWAY VE ARK., 2021 · BRUESEWITZ VE ARK., 2015

İDDİA	ORİJİNAL İFADE	KAYNAK
5,0 °C'te yoğunluk 0,999965 g·cm ⁻³	<i>Yoğunluk tablosu, 5,0 °C satırı</i>	Jones & Harris, 1992
Geometri: 104,5° açı, tetrahedral yapı	<i>"the hydrogen and oxygen atoms form a 104.5° angle, almost equal to the 109.5° angle ... water molecules can form open crystal structures"</i>	Roquet et al., 2022
Dipte 4 °C sıvı, yıl boyu	<i>"The bottom is filled with the densest 4 °C water year long and isolated from surface waters both in winter and in summer"</i>	Roquet et al., 2022
Dünya göllerinin en az %50'si mevsimsel buzla kaplı	<i>"At least 50% of the lakes in the world are located at high latitudes and are seasonally ice-covered"</i>	Yang et al., 2021
Kriyostratifiye/kriyomiktik tanımları	<i>"the term 'cryostratified'/'cryomictic' lakes be used when the depth-averaged initial winter temperature is..."</i>	Yang et al., 2021
RCP senaryolarına göre tabakalanma kısalması	<i>Sayısal tablo (18,5 / 33,3 / 53,9 gün)</i>	Woolway et al., 2021 — Results, Tablo 2
Sunapee Gölü: 16,55 km ² , 33,7 m derinlik	<i>Yazarların Lake Sunapee tanımı</i>	Bruesewitz et al., 2015 — Study site
Buz altında 4 °C'yi aşan anormal ısınma	<i>"anomalous heating of surface water under the ice exceeding 4 °C"</i>	Bruesewitz et al., 2015

TABLONUN KULLANIMI İÇİN PRATİK NOTLAR

Bulunamayan bir ifade genelde bir şekil/tablo başlığında bulunur. Morawietz ve ark. için arXiv ön baskısı (arxiv.org/abs/1606.07775) da tam metin erişimi sağlar. "Yazarın benzetmesi/özetı/yorumu" etiketli kısımlar kaynakta Ctrl+F ile aranmamalıdır; bunlar yazarın kendi katkısıdır ve açıkça işaretlenmiştir.