

Suyun Gariplikleri

H₂O... Doğadaki en temel elementlerden olan hidrojen (H) ve oksijenden (O) meydana gelen bir molekül. Bu yönüyle basit gibi görünse de garip özellikleriyle su halen çözüme ulaşmamış, önemli bilimsel konu başlıklarından biri. Hayatın olmazsa olmazı, insanlığın en önemli doğal kaynağı olan bu renksiz, tatsız, kokusuz sıvı beklenmedik fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip. Suyun gizemli özellikleri Dünya'da yaşama olanak sağlarken bilim insanları da suyu su yapan nedenleri araştırmaya, su moleküllerinin nasıl bir arada bulunduğunu ve su molekülleri arasındaki hidrojen bağlarını anlamaya çalışıyor.

Sudaki Sır Perdesi

Yıl 1963. Erasto Mpemba adında Tanzanyalı bir ilköğretim öğrencisi okul projesi için dondurma yapmaya çalışıyor. Küçük dondurma kâselerine kaynamış sütü boşaltıyor. Genelde kaynamış sütü soğuduktan sonra buzdolabına koyarız. Ancak Mpemba aceleden kaynar sütle dolu kâseleri de buzluğa atıyor. Bir süre bekleyen Mpemba şaşırtıcı bir olgu ile karşılaşır: Kaynar sütün soğumuş olandan daha çabuk donduğunu fark ediyor. Küçük öğrenci şahit olduk-

larını sınıfta öğretmeni ve arkadaşlarıyla paylaşıyor. Ancak öğretmeni, ısı yasalarına aykırı bu duruma pek ihtimal vermediğinden olsa gerek Mpemba'yı pek ciddiye almıyor. İşin peşini bırakmayan öğrenci gözlemini bir gün okullarına fizik semineri vermek üzere gelen Denis Osborne'a da anlatıyor. Amatör mutfak deneyini laboratuvara taşıyan Osborne'un sonuçları altı yıl sonra Mpemba'nın da isminin yer aldığı bir makalede açıklanıyor.

Literatüre Mpemba etkisi olarak giren bu olguya ait ilk gözlem Aristo'ya ait (MÖ 350). Sonrasında Francis Bacon ve Descartes de sıcak suyun soğuk sudan daha çabuk donduğunu kaydetmişler. Aslında bu kayıtlardaki ifadeler çok da doğru değil. Çünkü bu olgu her sıcaklıkta ve durumda gözlenmiyor. Belli başlangıç koşulları gerekiyor. Çünkü suyun koyulduğu kabın şeklinden, soğuk sıcak su arasındaki sıcaklık farkına kadar birçok etken donma süresini etkiliyor. Mpemba etkisi iki sudan biri 35 santigrat derece (°C) diğeri 5°C iken daha belirgin gözlenebiliyor. Mpemba etkisi kaynamış sıcak suyun buharlaşarak kütle kaybetmesi, sıcak suyun içinde soğuğa oranla daha az çözülmüş gaz olması gibi nedenlerle açıklanmaya çalışılmış, ama hiçbirisi Mpemba etkisinin tek ve yeterli açıklaması olarak görülüyor.

Suyun henüz tam açıklamasını bulamamış tek olağan dışı davranışı bu değil. Suyun ısı kapasitesi beklenenin çok üstünde bir değere sahip. Bir gram suyun sıcaklığını 1 °C yükseltmek için gerekli ısı miktarı olarak tanımlanan ısı kapasitesinin yüksek olması, suyun sıcaklık değişimine direndiğinin bir göstergesi. Bu aynı zamanda suyun fazla miktarda enerji depolayabildiği anlamına geliyor. Bir kilo suyu belli bir sıcaklığa yükseltmek için suya verilmesi gereken ısı enerjisi miktarı, aynı miktarda altını aynı dereceye ısıtmak için gereken ısıdan 30 kat daha fazla. Bir diğer deyişle su, aynı miktardaki ve sıcaklıktaki altından 30 kat daha fazla ısı enerjisi depolayabiliyor. Bu özellik suyun ısı kalkanı ve ısı deposu olarak kullanılmasına olanak sağlıyor. Her şeyden önemlisi suyun bu özelliği sayesinde insanların ve büyük oranda su içeren canlı organizmaların vücut sıcaklıklarında büyük değişimler olmuyor. Suyun ısı kapasitesinin yüksek olmasının yanı sıra ısıyı diğer sıvılardan daha iyi iletmesi vücudumuzda ısının eşit dağılmasına yardımcı oluyor.



Ekosistemler de devamlılıklarını suyun yüksek ısı kapasitesine borçlu. Sadece suyun değil su buharının da sıcaklığını değiştirmek zor. Buzun ve su buharının ısı kapasitesi suyunun yarısı kadar. Yine de havada ani bir sıcaklık değişimi meydana getirmek için su buharına yüksek miktarda ısı enerjisi aktarılması gerekiyor. Bu da pek mümkün olmadığından iklim değişimleri yavaş ve sorunsuz bir şekilde gerçekleşiyor.

Şekillerindeki simetriye hayran olduğumuz kar kristalleri yağmur damlalarının donması ile değil su buharının birden donup katılmasıyla ortaya çıkıyor. Yağmur aşağılara inerken katılıp su lu yağmur dediğimiz şekilde yağabilse de bu durumda simetrik kristal yapı oluşmuyor. Doğadaki kar ve buz altıgen simetriye sahip su kristallerinden meydana geliyor. Kristal yapıyı 60° döndürdüğümüzde aynı şekli elde ediyoruz.

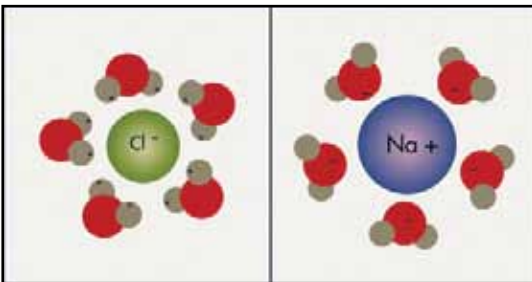
Suyun yüksek ısı kapasitesi okyanuslardaki sıcaklık değişimlerini eksi 1-2 santigrat dereceyle +35 santigrat derece arasında sınırlıyor. Buna karşın karadaki sıcaklık farkı çok daha yüksek. Sibiryada sıcaklık -70°C'yi bulurken ekvator yakınlarında yaşayanlar zaman zaman +58°C'yi görebiliyor. Dünyamızda hiç su olmasaydı karalardaki sıcaklık değişimi -200°C'den +200°C'ye kadar çok daha geniş bir aralıkta gerçekleşecekti.

Suyun ısı kapasitesi bir yönüyle daha diğer sıvılardan ayrılıyor. Diğer sıvılarda ısı kapasitesi sıcaklıkla birlikte sürekli artarken su ısıtıldığında ısı kapasitesi düşüyor; 35°C'de en düşük değerini alıyor, ısıtmaya devam edildiğinde tekrar artıyor. Benzer bir davranış suyun yoğunluğunun sıcaklıkla değişiminde de kendini gösteriyor. Katılar ısındıkça genişler ve yoğunlukları düşer. Ancak buz için durum böyle değil. 0°C'deki buz ısıtıldığında yoğunluğunun arttığını ve +4°C'ye ulaşıldığında en yüksek değere ulaştığını görüyoruz. Suyun bu özelliği, buzun daha az yoğun olduğu için su üzerinde yüzmesini sağlıyor. İşte bu durum gezegenimizdeki suların derinlerden yüzeye doğru donmasını ve tüm sualtı yaşamının yok olmasını engelliyor. Buzul çağında bile göl, deniz ve okyanus sularında yaşamın devamlılığına olanak veriyor. Suyun donarken genişlemesi toprak oluşumunda da rol alıyor. Kayaların içerisinde donan su genişleyerek kayanın parçalanmasını ve küçük parçalara ayrılmasını sağlıyor.

Suyun yüksek ısı kapasitesi bütün bir gölün donmasını önemli ölçüde geciktiren bir diğer etken. Okyanus sularının donmamasında tuzlu olmasının da katkısı var. Nasıl bir etkisi olduğunu küçük bir deneyle görebiliriz. İçinde kırık buz parçalarının olduğu bir buzdolabı poşetine biraz da tuz katıp poşeti kapatalım. Poşeti yoğuralım ve tuz buza iyice karışıp da buzun erimesini sağladıktan sonra, tuzlu suyun sıcaklığını termometreyle ölçelim. Tüm buz erimiş olsa da termometrenin suyun donma sıcaklığı olan 0°C'den daha düşük bir değer gösterdiğini görürüz. Bunun nedeni tuz moleküllerinin buzdaki su molekülleri arasındaki bağları koparak buzun erimesine yol açması. Suda sadece tuz değil şekerler, asitler, alkol ve proteinler de çözünüyor. Hatta bunlar gibi hidrofilik (suyu-seven) maddelerin dışında hidrofobik (sudan korkan) bazı yağlar da suda bir miktar çözünebiliyor. Suyun iyi bir çözücü olmasında çift kutuplu (*dipole*) olması önemli rol oynuyor. H₂O molekülünün H atomlarının olduğu tarafta pozitif yük yoğunluğu varken, O atomunun olduğu tarafta negatif yük yoğunluğu var. Bu durum, bir yandan su



molekülleri arasındaki bağların elektrostatik çekim etkisiyle kuvvetini arttırırken diğer yandan da suyun içine katılan artı eksi kutuplu bir maddenin su moleküllerini etraflarına çekip hidrofilik bir karakter sergilemesine neden oluyor. Örneğin suya atılan sodyumklorürün (NaCl) pozitif yüklü kısımları (Na^+) suyun oksijeniyle, negatif yüklü kısımları (Cl^-) suyun hidrojeniyle bağ kuruyor. Sonuçta NaCl suyun içinde çözünmüş oluyor. Suyun çift kutuplu yapısı su molekülleriyle hücre zarı arasındaki kuvveti de (adezyon kuvveti) güçlendiriyor. Bu kuvvet sayesinde su ağaçların odun borularındaki hücre zarlarına tutunarak yapraklara kadar ve insanların en küçük kılcal damarlarından hücrelerine kadar ulaşabiliyor.



Su benzeri çözücülere kıyasla çok yüksek erime ve kaynama sıcaklığına sahip. Suyun erime sıcaklığı kendine benzeyen moleküllere, örneğin H_2S (hidrojen sülfür), H_2Se (hidrojen selenür) moleküllerine kıyasla 100°C daha yüksekken, kaynama sıcaklığında bu fark 200 dereceye çıkıyor. Su-

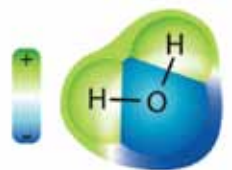
yun sıvı halden gaz hale geçerkenki hacim değişimi de olağanüstü fazla. İşte bütün bunların sonucunda su doğada her üç halde de (katı, sıvı ve gaz) bulunabilen eşsiz bir madde olma özelliğine kavuşuyor.

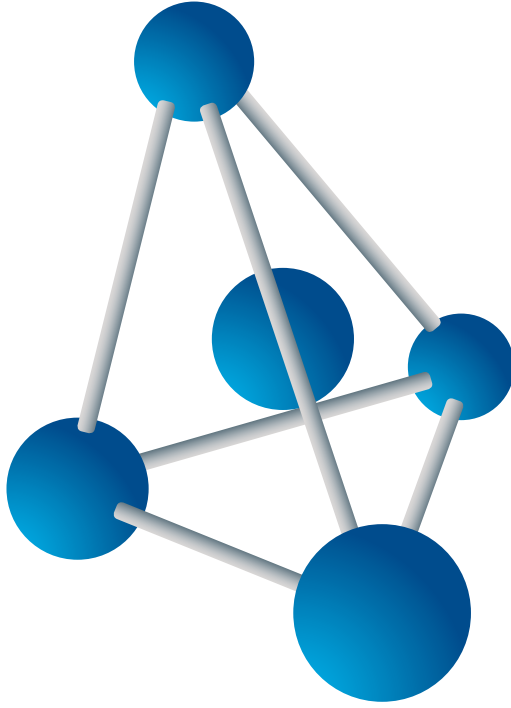
Suyun esrarengiz davranışları sıcaklık değişimiyle sınırlı değil. Su, basınç değişiminin bir sıvıda meydana getirmesi beklenen davranışları da sergilemiyor. Örneğin bir sıvının basınç altında daha zor yayılmasını bekleriz. Ancak su basınç arttıkça daha kolay yayılıyor. Su tahmin edilenden çok daha yüksek ağırlılığa (vizkoziteye) sahip. Bal ya da yağ kadar olmasa da benzer yapıdaki diğer moleküllere kıyasla vizkozitesi yüksek. Üstüne üstlük 33°C 'nin altında, suya uygulanan basınç arttıkça, diğer sıvıların aksine, vizkozitesi azalıyor.

Hidrojen Bağları:

Suyu oluşturan hidrojen ve oksijen elementlerinin yapısı ve oluşturdukları su molekülünün kimyası hayli iyi bilinse de, bir yığın su molekülünün bir arada nasıl durduğu yeni yeni aydınlığa kavuşuyor. Bilim insanları suyun, ancak bir kısmından bahsedebildiğimiz, tüm aykırı davranışlarının su moleküllerinin ortaklaşa davranışından kaynaklandığını düşünüyor.

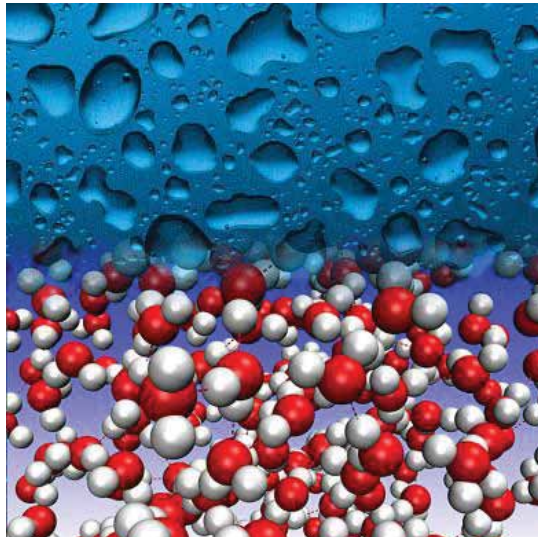
Su molekülündeki iki hafif hidrojen atomu ve kütlesi hidrojene göre 16 kat daha fazla olan bir oksijen atomu arasında elektron paylaşımı söz ko-





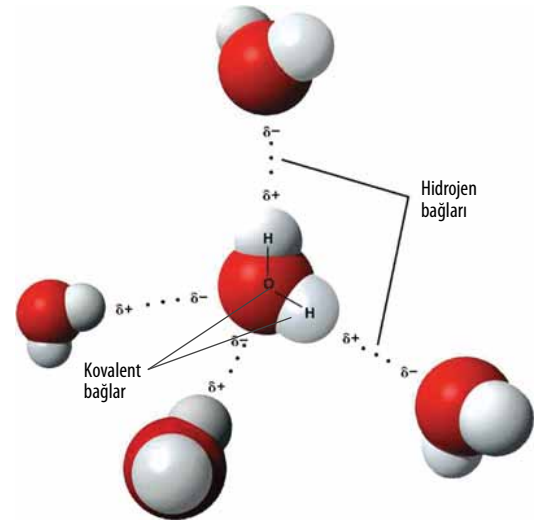
nusu. Atomlar elektron paylaşarak yörüngelerindeki elektron sayısını tamamlarken aralarında oluşan kovalent bağ sayesinde birbirlerine kenetleniyor. Bir tek su molekülü değil de bir kap suda ise her bir su molekülünü diğer su moleküllerine bağlayan hidrojen bağları da var. Hidrojen bağı kovalent bağa kıyasla 10 kat zayıf olsa da güçlü bir bağ olarak tanımlanıyor ve suyun garip özellikleri bu bağın gücüne ve geometrisine bağlıyor.

H_2O 'daki oksijen, etrafında bulunan iki H_2O molekülüne bağlanırken, iki hidrojenden her biri birer H_2O 'ya bağlanıyor. Sonuçta her bir su molekülü dört hidrojen bağıyla çevresindeki dört su molekülüne bağlanmış oluyor. Bu moleküllerin beraberce oluşturduğu geometrik yapı, köşelerine ve tam or-



tasına birer su molekülünün yerleştiği bir dörtyüzlü (tetrahedral). Ancak bir kap su arka arkaya düzgün bir şekilde sıralanmış, simetrik dörtyüzlü yapılar silsilesi olarak düşünülmemeli. Hidrojen bağlarının kovalent bağlarla hizalandığı simetrik tetrahedral yapılar, sudakine oranla buzda daha fazla. Genellikle şekillerde buz içindeki hidrojen bağları molekül içi bağlarla aynı doğrultuda gösterilir, aslında bu bağlar sürekli olarak sağa sola ufak hareketler yapar. Ancak bu hareketlerin zaman içindeki ortalaması şekillerde gösterildiği gibidir. Bu arada hizalanmanın gerçekleştiği anlarda hidrojen bağının kuvvetinin arttığını da belirtelim.

Buzu eritmek, suyu kaynatmak için enerji vererek hidrojen bağlarını koparmak gerekiyor ve suyun ısı kapasitesinin yüksek olması bu bağları kırmamanın zorluğuna bağlıyor. Örneğin H_2S (hidrojen sülfür) molekülleri arasındaki hidrojen bağları, H_2O arasındaki hidrojen bağlarına göre -sülfür oksijenden daha kütleli olsa da- çok daha zayıf. Haliliye suyun hidrojen bağlarını koparmak için çok daha fazla ısı verilmesi gerekiyor. Bağlar kırılana kadar soğurulan ısı, hidrojen bağlarının potansiyel enerjisini yükseltmek için kullanılıyor ve sonuçta suyun ısı kapasitesi artıyor.



Kuantum Etkileri

Sudaki hidrojen bağlarını kuvvetlendiren bir diğer etken de "sıfır nokta enerjisi". Kuantum fiziğine göre bir sistem en düşük enerji seviyesinde olsa bile enerjisi sıfırlanmıyor ve sıfır nokta enerjisi denen düşük bir enerjiye sahip oluyor. Sıfır nokta enerjisi kuantum fiziğinin temelinde yer alan Heisenberg belirsizlik ilkesiyle yakından ilintili. Zira bir sistemin enerjisinin tam olarak tespit edilme-

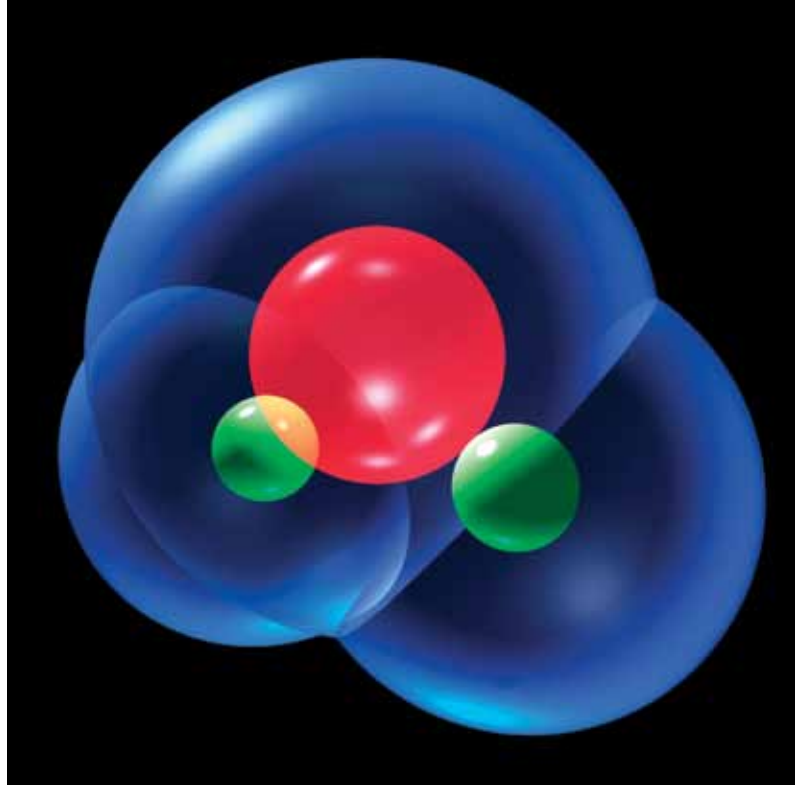
sinin imkânsızlığı olarak tanımlanan Heisenberg belirsizlik ilkesine göre vakumda sürekli bir enerji dalgalanması var. Bu da enerjiyi tam olarak belirleyemememize, yani enerjide belirsizliğe yol açıyor. Belirsizlik ilkesi tabii ki moleküller arası ortamda da geçerli. Su molekülleri arasındaki alan enerjisinin dalgalanmasının hidrojen bağlarına etkisi oluyor. Enerjideki ufak değişimler hidrojen bağlarının uzunluğunun değişmesine, bu da bağların kuvvetinin değişmesine yol açıyor. Atomaltı ölçekteki böylesi küçük bir değişimin hayatımıza şaşırtıcı derecede büyük bir etkisi var. Zira bu etki olmasaydı, su hayat kaynağımız olamayacaktı. Cambridge Üniversitesi'nden Felix Frank sıfır nokta enerjisinin önemini şöyle özetliyor: "Bir su molekülü alın ve sudaki hidrojen atomunu, hidrojenin ağır izotopu olan döteryum ile değiştirin. Sonuçta yapısı aynı ancak zehirli bir sıvı elde edersiniz. Aralarındaki tek fark sıfır nokta enerjisindedir." Hidrojenin atom çekirdeği bir protondan meydana gelirken döteryum çekirdeği bir proton ve bir nötrondan oluşuyor. Bu durumun sıfır nokta enerjisinde doğurduğu fark ise bu iki molekülün vizkozitesini, erime ve kaynama sıcaklıklarını tamamen farklı kılıyor.

Kabul edilen görüşe göre su esnemez tetrahedral bir yapıya sahip değil. Hidrojen bağları arasındaki alanda gerçekleşen enerji dalgalanmaları suyun statik değil, çok daha dinamik bir yapı kazanmasına katkı sağlıyor. Hidrojen bağlarının uzunluğu gibi yönü de sıcaklık, basınç ve sıfır nokta enerjisindeki dalgalanmaların etkisiyle değişebiliyor. Birçok sıvıdaki kimyasal bağlar, sıcaklığın ve basıncın değişmemesi durumunda yıllarca aynı kalabilirken suda durum çok farklı. Su molekülleri arasındaki bağlar saniyenin trilyonda birinde kırılıp tekrar oluşuyor. Buzda ise bu süre bir saate kadar uzayabiliyor.

Yeni Modeller Işığında Sır Perdesi Aralanıyor

Stanford, Stockholm ve Tokyo üniversitelerinden üç araştırma ekibi (Anders Nilsson'ın ekibi, Lars G. M. Pettersson'ın ekibi, Shik Shin'in ekibi) 2010 yılında ortak bir makale yayımlıyor. Makalede araştırmacıların su moleküllerindeki elektron bulutlarından saçılan X ışınına inceleyerek ulaştığı sonuçlar yer alıyor. Deneyde öncelikle su X ışını bombardımanına maruz bırakılıyor. Işığı soğuran elektronlar enerji seviyelerini değiştiriyor ve eski seviyelerine dönerken belli dalga boylarında ışık saçıyor-

lar. Saçılan ışık miktarının dalga boyuna göre değişim gösteren saçılma tayfından, hangi dalga boyundaki ışınların daha çok soğurulduğu ve saçıldığı görülebiliyor. Bu da su moleküllerinin yapısı, aralarındaki hidrojen bağları ve bu bağların kuvveti hakkında bilgi içeriyor.



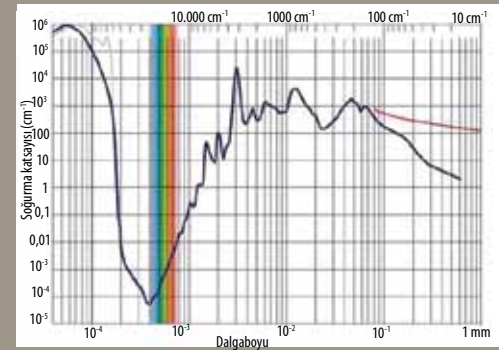
Bu çalışma kullanılan yöntem bakımından yeni olmasa da araştırmacıların saçılma tayfı üzerine yaptıkları yorum hayli farklı. Saçılma tayfında ilk dikkat çeken, biri küçük dalga boyunda diğeri daha büyük dalga boyunda iki tepe oluyor. Araştırmacılar, saçılma tayfındaki büyük dalga boyundaki tepenin tetrahedral yapıdaki molekül topluluğundan, küçük dalga boyundaki tepenin ise düzensiz yapıya sahip su molekül topluluğundan geldiğini düşünüyor. Saçılan ışının dalga boyunun küçük olmasını hidrojen bağının zayıf olmasına bağlayan araştırmacılar bu kadar zayıf bir hidrojen bağının, su moleküllerinin daha düzensiz dağıldığı bir yapıya işaret ettiğinde ısrar ediyorlar. Daha yalın bir ifade ile, bir miktar suyun tek çeşit bir sıvı olmadığını, içinde iki farklı motif içerdiğini iddia ediyorlar. İddiaya göre su moleküllerinin bir kısmı tetrahedral yapılanma gösterirken bu yapıların aralarına serpiştirilmiş bir grup su molekülü de düzensiz bir yapı sergiliyor. Aslında bu iddia yeni değil, yıllar önce X ışınının kâşifi Wilhelm Röntgen de su moleküllerinin iki farklı şekilde gruplandığını ileri sürmüştü. Ancak sadece her bir su mole-

külünün dört komşu moleküle bağlandığı tetrahedral yapıyı içeren bilgisayar simülasyonlarının suyun çoğu özelliğiyle uyumlu sonuçlar vermesiyle tek tip, tetrahedral motifli su modelinden yana oylar çoğalmış. X ışını saçılma tayfında görülen iki tepeli yapının suyun yoğunluğundaki dalgalanmalardan kaynaklandığını savunan ve çalışmayı yapan ekibin yorumlarına katılmayan bilim insanları da var. İki motif içeren su modeli geleneksel su modeliyle bir noktada daha çıkışıyor. Geleneksel su modeline göre hidrojen bağlarının en fazla %10'u bozulmuş kabul edilirken yeni modele göre bu oran çok daha yüksek. Çünkü söz konusu deneyi yapan araştırmacılar saçılma tayfındaki tepelerin yüksekliğinin hangi tip (tetrahedral ve düzensiz tipler) motiften daha çok bulunduğunu gösterdiğini söylüyor. Düzensiz yapıdaki H_2O moleküllerindeki elektronlardan geldiği iddia edilen dalga boyu tepesi hayli yüksek. Bu yeni su modeli, geleneksel modelle arasındaki tutarsızlıklara rağmen suyun garip özelliklerine mantıklı açıklamalar getiriyor.

Örneğin buzun yoğunluğunun sudan daha düşük olması ve sıcaklık arttıkça tetrahedral yapıların azalması, moleküllerin birbirine daha yakın konumlanabildiği düzensiz yapıların oranının artması ile açıklanıyor. Yine suyun ısı kapasitesinin çok yüksek olması “alınan ısı hidrojen bağlarını koparmak yerine düzenli motiften düzensiz motife geçişe harcanıyor” açıklamasıyla aydınlığa kavuşuyor. Genelde sıvılardan sıcaklıkları arttıkça sıkıştırılabilirliklerinin artmasını bekleriz. Ancak suyun sıcaklığı $46^\circ C$ 'ye yükselince daha zor sıkıştırıldığı gözleniyor. Bu da yine iki motifli modelle, sıcaklık arttıkça düzensiz motiflerin artmasıyla açıklanabilir. Basıncın artması da düzensiz motiflerin artmasıyla sonuçlanıyor. Basınç arttıkça H_2O moleküllerinin daha rahat hareket edebildiği düzensiz yapılar arttığı için, suyun yayılabilirliğinin artması da artık çok şaşırtıcı gelmiyor. Ayrıca X ışını saçılma teknikleriyle yapılan deneyler yüksek basınçta su moleküllerinin birbirinden uzaklaştığını gösteriyor.



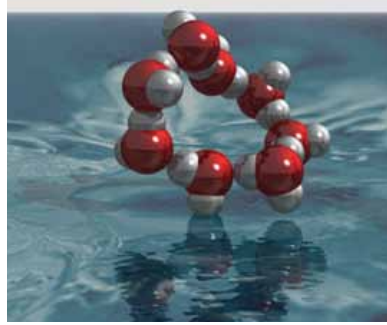
Su neden renksiz sorusunun cevabı su moleküllerinin soğurma tayfında gizli. Soğurma tayfına baktığımızda suyun görünür bölgedeki elektromanyetik dalgaları soğurmadığını, bir diğer deyişle suyun 400-700 nanometre dalga boyundaki ışığı soğurmayıp tamamen geçirdiğini görüyoruz. Altta grafik değişik elektromanyetik dalga boyları için suyun soğurma katsayısını gösteriyor. Grafikteki derin çukur bölge, soğurma katsayısının çok düşük olduğu mordan kırmızıya kadar uzanan görünür ışık bölgesine denk geliyor. Şimdi bir de morötesi olarak tanımlanan daha düşük dalga boyundaki bölgeye dikkat edelim. Yani grafikteki renkli tayfin sol tarafına. Bu dalga boylarında suyun soğurma katsayısı çok yüksek. İşte bu özelliği sayesinde atmosferdeki su buharı Güneş'ten gelen zararlı morötesi ışınları soğuruyor.



İki motifli su modelinden esinlenerek çalışmalarını yönlendiren araştırmacılar da var. Francesco Roe, Sean Garrett-Roe ve Peter Hamm bilgisayar benzetimiyle su moleküllerinin nasıl kümelendiğini anlamaya çalışan ve bunun için iki motifli su modelini kullanan araştırmacılar. Son makaleleri birkaç ay önce *Journal of Physical Chemistry* dergisinde yayımlanan ekipten fizikokimyacı Peter Hamm suyun çift yapılı olduğunun git-tikçe daha çok netlik kazandığını söylüyor. Biyolog ve kimyacılar arasındaki genel kanı suyu anlamadan moleküler seviyede biyolojinin anlaşılama-yacağı. Zira su fotosentezden protein katlanması-na, DNAdan enzimlerin işleyişine kadar her yerde kendini gösteriyor.

Suyu ilginç kılan ve onu bu kadar eşsiz yapan nedenler hâlâ tam olarak bilinmiyor. Son on yıl-da bu konuda yapılan araştırmalar artsa da sayıları suyun hayatımızdaki önemiyle karşılaştırılınca ye-tersiz kalıyor. İşin diğer ilginç yanı bu araştırmalar suyun kendisi kadar beklenmedik sonuçlar veriyor.

Suyu anlamak için bilim insanlarının tahminlerin ve varsayımların ötesine geçmesi gerekiyor. Kendi-ne araştırma konusu arayanlara duyurulur. Su hâlâ keşfedilmemiş bir okyanus.



Kaynaklar

Rhhttp://www.lsbu.ac.uk/water/
http://www.newscientist.com/article/dn18473-the-many-mysteries-of-water.html
Emrumiye Arlı, Prof Dr. Yüksel Ufuktepe, Suyun hidrojen bağı ve özellikleri, Ç.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2008 http://fbcu.edu.tr/makale_ayrinti.aspx?makale_id=307

Robson, D., ve Marshall, M., "Many Mysteries of Water", *NewScientist*, Şubat 2010.
Tokushima, T., Harada, Y., Horikawa, Y., Takahashi, O., Senba, Y., Ohashi, H., Pettersson, L.G.M., Nilsson, A., Shin, S., "High resolution X-ray emission spectroscopy of water and its assignment based on two structural motifs", *Chemical Physics Letters*, Cilt 460, Sayı 4-6, s. 387-400, 2008.

