

Geliş Tarihi : 03/06/2026
Kabul Tarihi : 18/06/2026

Received Date : 03/06/2026
Accepted Date : 18/06/2026

SANAL SU TRANSFERİ VE SU AYAK İZİNİN ULUSLARARASI ÖLÇEKTE STRATEJİK ÖNEMİ

THE STRATEGIC IMPORTANCE OF VIRTUAL WATER TRANSFER AND WATER FOOTPRINT AT THE INTERNATIONAL SCALE

Hüsamettin NAS ^{1*} (ORCID: 0000-0002-5125-7901)

¹Siirt Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Bölümü

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Hüsamettin NAS

Öz

Yerküre dörtte üç oranında su ile çevrilidir. Ancak bu yüksek orana rağmen su, yeryüzünde homojen bir dağılım göstermemektedir. Dahası hidrolojik çevrimler, yenilenebilir bir kaynak olmasına rağmen suyun bulunduğu bölgeye her zaman aynı miktarda geri dönmediğini göstermektedir. Bu durum yaşanan olumsuz iklim değişimlerinin de etkisiyle canlıların yaşam sürdürdüğü şehirlerin, bölgelerin, ülkelerin hatta bir bütün olarak kıtaların kuraklık riski altında olduğunu göstermektedir. Ülkelerin gelişmişlik düzeyinden bağımsız olarak gözlemlendiğinde, dünyadaki mevcut tatlı suyun %80'inden fazlasının tarımsal aktiviteler tarafından kullanıldığı görülmektedir. Bu eksenle tatlı su arzı kısıtlı veya su kıtlığı riski taşıyan ve özellikle tarıma dayalı büyüme modellerine sahip ülkelerin yoğun tarımsal ürün ithalat ve ihracatına dayalı ekonomi politikalarını gözden geçirmesi gerekmektedir. Ulusal ölçekte ülkemiz ve uluslararası ölçekte dünya ülkelerinin sadece yüzey ve yeraltı suyunun doğrudan kullanım miktarına odaklı geleneksel su kullanım hesaplarından uzaklaşması gerekmektedir. Bunun yerine doğrudan ve dolaylı kullanım miktarını verebilen, daha akılcı ve bilimsel hesap metodolojisine sahip, ürünlerin üretim ve tedarik süreçlerinin tümünde gömülü olan suyun, su ayak izi (SA) ve bununla yakından ilişkili olan sanal su (gömülü su) (SS) kavramını doğru anlaması önem arz etmektedir. Su ayak izi ve sanal su metodolojinin doğru anlaşılması sayesinde suyun sadece doğrudan transferi değil, su kullanımı gerektiren ürün, üretim ve tedarik süreçleri boyunca dolaylı transferinin de gözlemlenebilmesi ve bu sayede zamansal ve mekânsal su yönetim politikalarının geliştirilebilmesi mümkün kılınacaktır. Çalışma kapsamında ulusal ve uluslararası arenada yoğun ithal ve ihraç olunan tarımsal ürünlerin sanal su muhteviyatları tablolar halinde kıyaslanmıştır. Bilimsel veriler irdelenerek suyun stratejik bir politika aracı olduğu gösterilmeye çalışılmıştır. Ayrıca çevre ve su ile ilgili gelecek durum projeksiyonları yapan bilim organizasyonlarının güncel raporları ışığında, suyun geleceği, gıda güvenliği, su kıtlığına çözüm, tarımsal sürdürülebilirlik, suyun jeopolitik stratejisi ve iklim değişimi ile ilgili parametreler mukayese edilip ulusal ve uluslararası etkileri tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sanal su transferi, Su ayak izi, Sürdürülebilirlik, Su stresi

Abstract

The Earth is covered by water at a ratio of approximately three-quarters. However, despite this high proportion, water is not distributed homogeneously across the globe. Furthermore, hydrological cycles demonstrate that although water is a renewable resource, it does not always return to the region where it is located in the same quantity. This situation, coupled with the adverse effects of climate change, indicates that cities, regions, countries, and even entire continents where living organisms sustain their existence are under the risk of drought. Regardless of countries' levels of development, it is observed that more than 80% of the world's available freshwater resources are consumed by agricultural activities. In this context, countries with limited freshwater supplies or facing the risk of water scarcity, particularly those whose economic growth models are heavily dependent on agriculture, need to reconsider their economic policies based on intensive imports and exports of agricultural products. At the national scale, Türkiye, and at the international scale, countries around the world, should move beyond conventional water-use calculations that focus solely on the direct use of surface and groundwater resources. Instead, it is crucial to properly understand the concepts of the water footprint (WF), which can account for both direct and indirect water consumption through a more rational and scientific calculation methodology, and virtual water (embedded water) (VW), which is closely associated with it and refers to the water embedded throughout the production and supply chains of products. A proper understanding of water footprint and virtual water methodologies will make it possible to observe not only the direct transfer of water but also its indirect transfer through products, production processes, and supply chains that require water use. Consequently, this will facilitate the

development of temporal and spatial water management policies. Within the scope of the study, the virtual water contents of agricultural products that are intensively imported and exported both nationally and internationally were compared through tabular analyses. By examining scientific data, the study attempts to demonstrate that water constitutes a strategic policy instrument. Furthermore, in light of the latest reports published by scientific organizations producing future projections regarding the environment and water resources, parameters related to the future of water, food security, solutions to water scarcity, agricultural sustainability, the geopolitical strategy of water, and climate change were compared, and their national and international implications were discussed.

Keywords: Virtual water transfer, Water footprint, Sustainability, Water stress

GİRİŞ

En temel biyolojik reaksiyonların tamamı su sayesinde gerçekleşir. Bu nedenle su yerküre üzerindeki canlı varlığının devamı için vazgeçilmez bir kaynaktır (Muratoglu, 2022). Suyun canlı ekosisteminin mikro düzeyde işleyişi gözlemlendiğinde makro düzeydeki hareketinin bir benzerini sergilemektedir. Bu hareket mikro düzeyde toprakta nem olarak bitki köklerine, köklerden sıvı olarak gövde vasıtasıyla yapraklara doğru bir yol izlemektedir. Suyun hareketi makro düzeyde gözlemlendiğinde ise atmosferde nem olarak yoğunlaşıp sıvı olarak havzalara, havzalardan toprak ve nehirler vasıtasıyla denizlere, yeraltı kaynaklarına veya okyanuslara doğru bir yol izlemektedir (Oki & Kanae, 2006). Hidrolojik çevrim denen bu döngüsel süreç, suyun doğada yekûn olarak kaybolmadığını ancak ayrıldığı yere daima aynı miktarda geri gelmediğini de göstermektedir. Burada suyun asla yok olmayan ancak sınırlı erişim evrelerine sahip bir kaynak olabileceği görülmektedir (Yang & Xia, 2021). Sınırlı erişim evreleri suyu, akılcı ve bilimsel yöntemlerle yönetmemizin temel gereğini oluşturmaktadır (Chapagain & Hoekstra, 2004).

Geleneksel su yönetim metodolojisi yağış-akış, buharlaşma, yüzey suyu - yeraltı suyu etkileşimleri ve havzalarda su arz - talebine odaklanmaktadır (Pathan ve ark., 2023). Ancak su ayak izi ve sanal su metodolojisinde bitki ve ürünlerin üretim proseslerinde kullanılan suyun da muhasebesi yapılabilmektedir. Bu sayede üretim ve tüketime dayalı su kullanımının da hesap edilebileceği görülmektedir (Hoekstra ve ark., 2009).

Artan nüfusun ve buna bağlı oluşan çevre kirliliğinin, temel besin maddelerine olan yoğun talebin, olumsuz iklim şartlarının da etkisiyle gelecek yılların en büyük problemleri arasında su kıtlığının olacağı bildirilmektedir (World Economic Forum [WEF], 2022). Bu projeksiyon tatlı su kaynaklarının ulusal ve uluslararası ölçekte dengeleri değiştirecek sosyo-ekonomik, jeopolitik önemde ve hatta sınırları aşan stratejik bir niteliğe sahip olduğunu göstermektedir (Liu ve ark., 2017). Su ayak izi ve sanal su transferi metodolojisinin doğru anlaşılması suyun stratejik potansiyelinin tespiti dolayısıyla suyun akılcı ve bilimsel metot ile yönetimini mümkün kılmaktadır. Ayrıca su yönetiminin doğru anlaşılması ulusal ve uluslararası ölçekte suya bağlı stratejik politika araçlarının geliştirilmesine de imkân sağlamaktadır.

Küresel ölçekte su dağılımına bakıldığında, yeryüzündeki mevcut miktarın %96,5'i okyanuslarda, %1'i nehirlerde, yüzey ve yeraltında tuzlu su formunda, %2,5'i ise nehirlerde, buzullarda, yüzey ve yeraltı suları olarak tatlı su formunda bir mevcudiyete sahiptir (Regan, 2012). Bu görece düşük orana sahip ve tüm ekosistem için hayati değerdeki yaşam kaynağının korunması ve bilimsel disiplin ile yönetilmesi gerekliliği önem arz etmektedir.

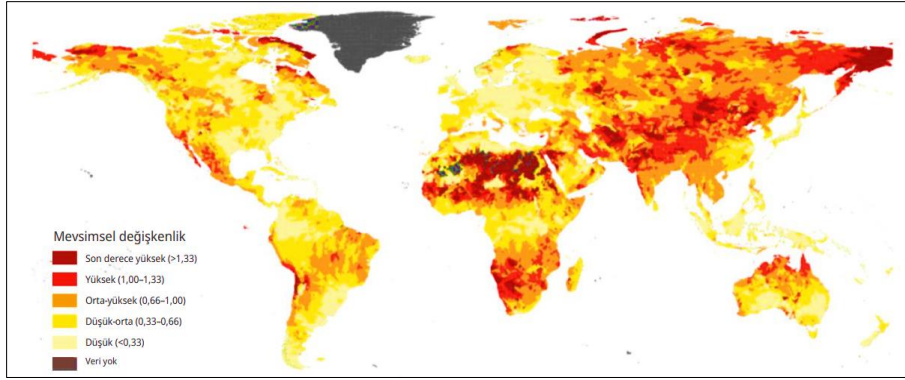
Bu çalışma kapsamında ürün ve üretim süreçlerindeki su ayak izi kavramı açıklanmış tarımsal üretim ve tüketimden kaynaklı sanal su transferinin ulusal ve uluslararası ölçekteki stratejik önemi ele alınmıştır. Türkiye’de ve dünyada tatlı su arzının durum projeksiyonları verilmiş, su ayak metodolojisi ve sanal su hesap adımları değerlendirilip, tarımsal üretimde su yoğun başlıca ürün gruplarının ulusal ve uluslararası ithalat ve ihracatının sanal su içeriği mukayese edilmiştir. Tüm sektörler içerisinde en fazla su tüketiminin olduğu sektör tarım sektörü olduğu için tarım sektörü dışındaki sektör gruplarına yer verilmemiştir.

2. Su stresi kavramı, Türkiye’de ve Dünyada tatlı suyun arz durumu

Küresel ölçekte su dağılımına bakıldığında, yeryüzündeki mevcut miktarın %96,5'i okyanuslarda ve denizlerde, %1'i nehirlerde, yüzey ve yeraltında tuzlu su formunda, %2,5'i ise yine nehirlerde, buzullarda, yüzey ve yeraltı suları

olarak tatlı su formunda bir mevcudiyete sahiptir (Regan, 2012). Bu görece düşük orana sahip ve tüm ekosistem için hayati değerdeki yaşam kaynağının korunması ve bilimsel disiplin ile yönetilmesi gerekliliği önem arz etmektedir.

İnsanlık tarihine bakıldığında ister göçebe ister yerleşik olsun tüm topluluklar özellikle tatlı su kaynaklarının etrafında kentleşmiş ve yaşam sürmüştür (Hatt & Reiss, 2002). Bu insanlığın hatta canlıların su ile olan ayrılmaz ilişkisinin bir resmi niteliğindedir. Bu ilişkinin en önemli nedeni hayatta kalma yetisinin beslenme ile olan bağı ve bu hususta tarım ve hayvancılık faaliyetinin idame edilmesi gerekliliğidir. Tarımsal faaliyetlerin ve günlük yaşamın suya olan ihtiyacı aynı zamanda canlı mevcudiyetinin varlık gösterebilmesinin de bir kriteridir (Yavuz, 2005). Bir bölgeden suyun dönemsel olarak çekilmesi, stres yaşaması veya tamamen yok olması, yerleşik toplulukların göç etmesine hatta medeniyetlerin yok olmasına neden olabilmektedir (Bilen, 1995). Tatlı suyun küresel arz durumu tarihin her lahzasında değişkenlik göstermektedir. Şekil 1’te mevsimsel değişkenlik durumuna göre küresel ölçekte su mevcudiyetinin bir projeksiyonu yer almaktadır.



Şekil 1. Suyun küresel ölçekte mevsimsel değişkenliği (World Resources Institute [WRI], 2020)

Şekilde 1’de mevsimsel değişkenlik ülkemiz için incelendiğinde orta-yüksek kuşakta bir risk düzeyine sahip olduğu görülmektedir (Zabarenko, 2015). Bu değişkenlik özellikle küresel ısınma, iklim üzerindeki olumsuz beşerî etkiler, kirlenen çevre, su rezervlerinin kontrolsüz kullanımı yüzünden kısa zamansal periyotlara dönmektedir. Ayrıca bu etkiler alt ve orta kuşağın yüksek değişkenli risk bölgesine geçmesine neden olmaktadır (Kaplukan, 2013). Suyun bulunduğu yere aynı miktar ve zamanda gelmediğinin somut bir göstergesi olan bu veriler ülkemiz için uzun dönemsel kuraklıkların ve buna bağlı olarak su stresi yaşamının muhtemel olacağını göstermektedir (Kaplukan, 2013). Bir kez daha suyun akılcı ve bilimsel yönetiminin ülkemiz gibi ekonomik bütünsel mevcudiyetinin büyük kısmını suya borçlu ülkeler için elzem olduğu görülmektedir.

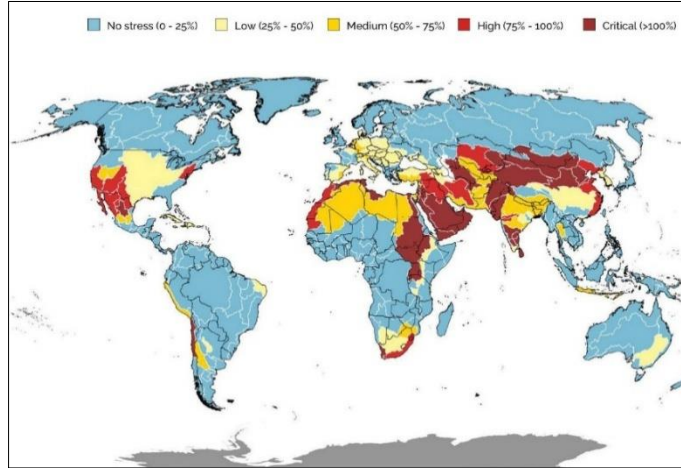
2.1. Su stresinin bir göstergesi olarak Falkenmark indeksi

Malin Falkenmark, 1989 yılında ülkelerin toplam su kaynağı miktarını toplam nüfusa bölerek bir ilişki kurmuştur. Ülke nüfusunun su kaynakları üzerindeki baskısını gösteren ve “Falkenmark İndeksi” olarak tarif edilen bir kuraklık indeksi hazırlamıştır. Aşağıda Tablo 1’de verilen skalaya göre ülkelerin kuraklık durumları belirlenebilmektedir (Falkenmark ve ark., 2009).

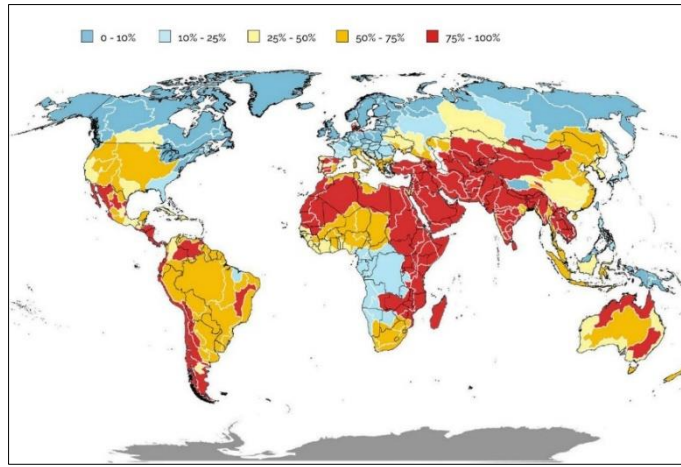
Tablo 1. Falkenmark kuraklık indeksi

Kişi Başı Kullanılabilir Tatlı Su (m ³ /yıl)	Gösterge
>10.000	Su zengini
2.500 – 10.000	Yeterli su
1.700 – 2.500	Kırılgan / savunmasız
1.000 – 1.700	Su stresi / azlığı
1.000 – 500	Su kıtlığı
< 500	Mutlak kuraklık

2024 yılı itibariyle Türkiye'nin kişi başına düşen yıllık kullanılabilir tatlı su miktarının 1.519 m³ olduğu, 2030 yılında bu miktarın 1.200 m³, 2040 yılında 1.116 m³, 2050 yılında ise 1.069 m³ olacağı belirtilmektedir(WWF Türkiye, 2014). Bu durum Tablo 1 ile değerlendirildiğinde 2024 yılı itibariyle Türkiye'nin su stresi çeken bir ülke olduğu, 2050 yılına gelindiğinde ise su kıtlığı çekecek bir ülke olacağı görülmektedir. Ayrıca Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (Food and Agriculture Organization [FAO]) ve UN-Water'ın 2021 yılı raporuna göre; Şekil 2 ve 3'teki haritalar, tüm sektörlerin ve tarım sektörünün artan yüzdelere yaşadığı su stresinin mevcut durumunu açık bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 2. Havza özelinde tüm sektörlerin su stresi durumu (büyük yüzde yüksek stres) (FAO & UN-Water, 2021)

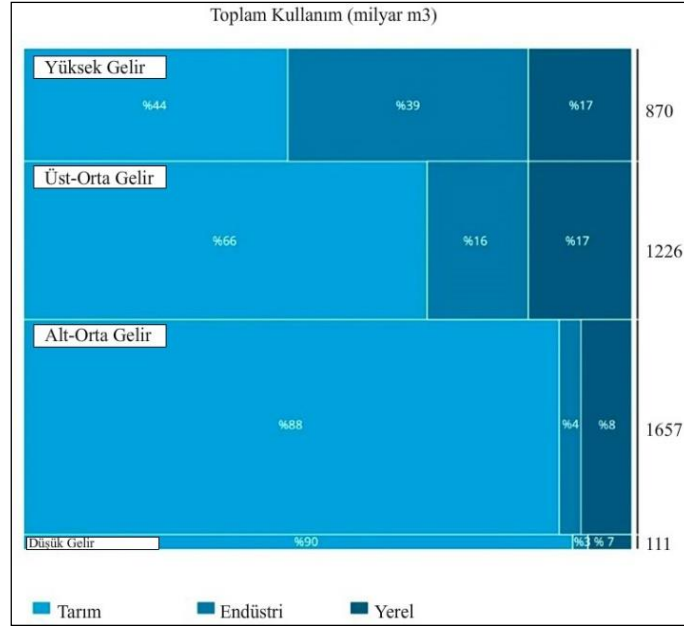


Şekil 3. Havza özelinde tarım sektörünün su stresi durumu (büyük yüzde yüksek stres) (FAO & UN-Water, 2021)

3. Türkiye ve Dünya'da suyun gelir grubu ve sektöre göre kullanım dağılımı

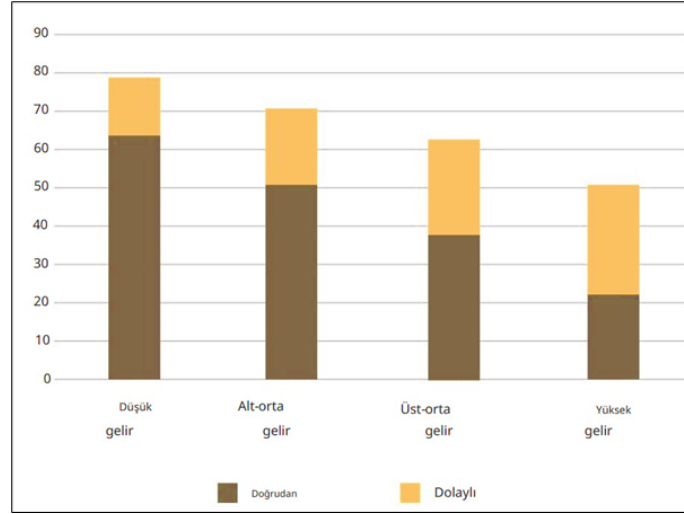
Küresel ölçekte tatlı su mevcudiyetinin kabaca %70'i tarımsal aktivitelerin devamlılığında, %18'i kadarı sanayi endüstrisinde, %12'si kadarı da evsel amaçla ve şehir yaşamı tarafından kullanılmaktadır (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization [UNESCO], 2024).

Şekil 4'te mevcut grafik incelendiğinde yüksek, üst-orta, alt-orta ve düşük gelir gruplarının oluşturduğu ülkelerin sektör bazında su kullanımının tüm gelir grupları için en yüksek payının tarım sektöründe olduğu görülmektedir. Dünya Bankası'nın 2019-2020 gelir düzeyine göre ülke sınıflandırması dataları incelendiğinde Türkiye'nin üst-orta gelir grubuna dahil olduğu görülmektedir (World Bank [WB], 2020). Bu projeksiyon Türkiye'nin tarım ve endüstri sektörlerinde yaklaşık %82 oranında yoğun tatlı su kullanımına dayalı bir büyüme sergilediğini göstermektedir. Verilen bu rakamlar ile ülke ekonomilerinin kalkınma düzeyleri arasındaki fonksiyonu da tanımlamaktadır.



Şekil 4. Gelir grubu ve sektöre göre toplam tatlı su kullanımı (uyarlanmıştır) (UNESCO, 2024)

Şekil 5’teki grafikte gelir düzeyine göre ülkelerin işgücünün ve suya bağımlılığının doğrudan ve dolaylı bir tablosu sunulmuştur.



Şekil 5. Ülke işgücünün gelir düzeyine göre suya olan bağımlılığın doğrudan ve dolaylı durumu (UNESCO, 2024)

Türkiye’nin üst-orta gelir düzeyinde bir ülke olması onun işgücü fonksiyonunun %60 civarında suya doğrudan veya dolaylı olarak bağımlı olduğunu göstermektedir(Connor & Chaves Pacheco, 2024). Bu durum ihracat temelli ürün çıktısının ülke su kaynakları üzerinde bir stres kaynağı oluşturduğunu göstermektedir. Gömülü su veya sanal su metodolojisinin doğru anlaşılması bu stresi yönetmede akılcı denklemlerin oluşmasına ve sürdürülebilir politika araçlarının geliştirilmesine yardımcı olacaktır.

4. MATERYAL ve METOD

4.1. Su ayak izi metodolojisi ve sanal su kavramı

Su ayak izi kavramı tatlı suyun, ürünlerin üretim ve tedarik zinciri evreleri boyunca kullanılan toplam miktarını temsil etmektedir(Muratoglu, 2022). Kavram ilk olarak 1993 yılında J. A. Allen tarafından sanal su kavramı ile ilişkili

olarak ve ürünlerin içerisinde gömülü su hacmi şeklinde tarif edilmiştir. Üretim zincirindeki herhangi bir ürünün üretilmesi için kullanılan toplam su hacminin, ürünün birim ağırlığına oranı bu tarifi bir özet niteliğindedir.

Kavramın tarifinde su yönetim metodolojisinin geleneksel yaklaşımının dışına çıkılmaktadır. Su ayak izi metodu sayesinde çeşitli ölçeklerde zamansal ve mekânsal su kaynaklarının kullanım düzeylerinin ayrıştırılması imkanı sağlanmaktadır (Makate ve ark., 2018). Bilhassa yoğun su kullanımına bağlı tarımsal üretim proseslerindeki suya bağlı karmaşık biyolojik işleyişin anlaşılması ve ayrıştırılabilmesi bu metodoloji sayesinde su yönetim anlayışı için büyük bir potansiyel oluşturmaktadır.

Su ayak izi metodolojisi dünya ölçeğinde suya endeksli politikaların oluşmasının, ulusal ve bölgesel ölçekte su kıtlığı riskinin ölçümlenebilmesinin ve tatlı suya bağlı üretim kollarının sevk ve idaresinin devamlılığı için bir araç niteliği taşımaktadır. Bu metodoloji aynı zamanda üretici ve tüketici için doğrudan veya dolaylı olarak su kullanımının bir indikatörü görevi de görmektedir (Vanham & Bidoglio, 2013).

Kavramı önemli kılan diğer bir husus da orta ve uzun vadede su stresi çekecek olan ülkelerin bu sayede bir su yönetim politikası oluşturmaya kılavuzluk etmesi olmasıdır. Nitekim Dünya Doğal Kaynaklar Enstitüsü'nün (WRI, 2020) su riski raporuna göre 2040 yılı projeksiyonunda otuz üç ülkenin çok yüksek seviyede su stresi çekeceği bildirilmektedir. Raporun devamında bu ülkelerin Orta Doğu ve Akdeniz Havzasında yer alan, aralarında yirmi yedinci sıra ile Türkiye'nin de bulunduğu görülmektedir (WRI, 2020). Orta ve uzun vadeli su yönetim politikalarının akılcı bir yöntemle oluşturulabilmesi için su ayak izi metodunun teorik ve uygulamalı alt disiplinlerinden istifa edilebileceği görülmektedir (Hoekstra, 2017).

Tarımın su tüketimine açık ara en fazla neden olan beşeri faaliyet olduğu bilindiği için özellikle tarımsal üretimin sürdürülebilirliğinin kavraması için su ayak izi metodolojisinin mavi, yeşil ve gri su ayak izi şeklinde üç önemli boyutunun oluşturulduğu görülmektedir (Mekonnen & Gerbens-Leenes, 2020).

Tarımsal veya endüstriyel bir ürünün üretimi için üretim prosesi boyunca kullanılan suya sanal su denmektedir (Hoekstra, 2003). Bu kavram su ayak izi kavramı ile yakından ilişkili olduğundan, kavramın tanımı da J.A. Allen tarafından özellikle Ortadoğu ülkelerinin su kıtlığı probleminin çözümü noktasında yapılan çalışmalar neticesinde ortaya çıkmıştır.

Çalışmalar su kıtlığı yaşayan ülkelerin ihrac ettikleri veya ithal edecekleri ürünler ile su mevcudiyetlerinin korunması veya iyileştirilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu proses ile ürünlerde mevcut gömülü suyun (sanal suyun) bir ticari emtia türü gibi transferi ile ithal edilen veya ihrac edilen ürünlerle ilişkili olarak, alınıp verilen suyun akılcı yönetimi ile su kaynakları üzerindeki stresin azaltılması amaçlanmaktadır (Mekonnen & Hoekstra, 2010). Bu sayede su fakiri ülkeler su yoğun ürün ithalatı ile su zengini ülkeler ise su yoğun ürün ihracatı ile mevcut su potansiyellerini en iyi şekilde değerlendirecektir.

Burada Cnat; alıcı su kütledeki doğal kirletici konsantrasyonu, Cmax; proses neticesinde alıcı su kütleinde oluşan maksimum kirletici konsantrasyonudur. L; kirletici yükünün hacmi olarak tarif edilmektedir.

4.1.1. Mavi su ayak izi (WFP_{blue})

Mavi su ayak izi her an ulaşılabilir durumda olan ve tüketim amaçlı kullanılabilen, buharlaşarak kaybolan, bir ürüne gömülen veya doğrudan kullanılabilen su olarak tarif edilmektedir (Hoekstra ve ark., 2009). Burada tüketim amaçlı kullanımda bu suyun geri gelmeyeceği, dolayısıyla yeniden erişimin mümkün olmayacağı buna binaen buharlaşma ile aynı olduğu düşünülmektedir (Hoekstra ve ark., 2009).

1'nolu denklem ile mavi su ayak izinin nasıl hesaplanması gerektiği belirtilmektedir.

$$WFP_{blue} = \text{Mavi su buharlaşması} + \text{Mavi su girişi} + \text{Akış döngüsü kayıpları} \quad (1)$$

4.1.2. Yeşil su ayak izi (WFP_{green})

Yeşil su toprakta akmayan ancak toprak tarafından tutulan yağmur suyu olarak tarif edilir. Ayrıca bu suyun bitkiler tarafından insani bir müdahale olmadan kullanılabilen su olduğu da belirtilmektedir (Chapagain & Hoekstra, 2011).

2'nolu denklem ile mavi su ayak izinin nasıl hesaplanması gerektiği belirtilmektedir.

$$WFP_{green} = \text{Yeşil su buharlaşması} + \text{Yeşil su girişi} + \text{Akış döngüsü kayıpları} \quad (2)$$

Yeşil su ayak izi kavramı tarımsal üretim ile yakından ilgilidir çünkü bu su mevcudiyetini bitkiler doğrudan kullanabilme kapasitesine sahiptir (Veetil & Mishra, 2016).

4.1.3. Gri su ayak izi (WFP_{gray})

Gri su ayak izi kavramı prosesler neticesinde oluşan belirli çözünürlükteki kirleticilerin neden olduğu kirli suyu seyreltmek için kullanılan su miktarıdır (Mubako, 2018). Bir üretim prosesinin gri su ayak izi bu proseslerin ürün çıktıları neticesinde oluşan tatlı su kirliliğinin bir indikatörüdür (Hoekstra, 2017). Gri su ayak izi denklem 3'de tanımlanan şekilde hesaplanmaktadır.

$$WFP_{gray} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} (\text{hacim/zaman}) \quad (3)$$

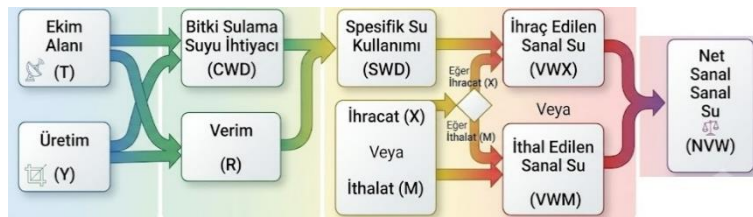
Bir ülkenin, ürün veya üretimin toplam su ayak izi mavi, yeşil ve gri bileşenlerinin toplamına eşittir (Hoekstra ve ark., 2009).

$$WFP_{total} = WFP_{blue} + WFP_{green} + WFP_{gray} \quad (4)$$

Burada WFP_{total} , toplam su ayak izi; WFP_{blue} , toplam mavi su ayak izi; WFP_{green} , toplam yeşil su ayak izi; WFP_{gray} , toplam gri su ayak izidir.

4.2. Sanal su hesap prosesi

Şekil 6'daki diyagramda gösterildiği üzere tarım ürünleri için sanal su hesap prosesi birkaç aşamadan oluşmaktadır.



Şekil 6. Sanal su hesap prosesi diyagramı (yeniden düzenlenmiştir.)(Anaç ve ark., 2011)

İlk olarak ekim alanı (T; ha), üretim (Y; ton) ve ortalama verim (R; ton/ha) olmak üzere ortalama verim bulunur.

$$R = Y / T \quad (5)$$

Her bitkinin sulama suyu ihtiyacının (Crop Water Requirement CWR; m3/ ha), ortalama verime (R; ton / ha) bölünmesi ile her bitkinin spesifik su kullanımı (Specific Water Demand SWD; m3/ ton) elde edilir.

$$SWD = CWR / R \quad (6)$$

Bulunan spesifik su kullanım değeri, ihracat (X ton) ve ithalat (M ton) ile çarpıldığında ihraç / ithal edilen sanal su değerleri bulunmaktadır.

İhraç Edilen Sanal Su Miktarı (m³)

$$VW. X = X.SWD \quad (7)$$

İthal Edilen Sanal Su Miktarı (m³)

$$VW. M = M.SWD \quad (8)$$

Son olarak net sanal su dengesi ihraç edilen sanal su miktarından ithal edilen sanal su miktarının çıkarılması ile elde edilmektedir.

$$N. VW = VW. X - VW. M \quad (9)$$

Tablo 2. Seçilmiş bazı ürünlerin ortalama sanal su içeriği (uyarlanmıştır) (Chapagain & Hoekstra, 2011).

Ürünler	Sanal Su İçerikleri (litre)	Ürünler	Sanal Su İçerikleri (litre)
1 bardak süt (200 ml)	200	1 sayfa A4 kağıdı (80 gr/m ²)	10
1 fincan kahve (125 ml)	140	1 yumurta (40 gr)	135
1 fincan çay (250 ml)	35	1 hamburger (150 gr)	2400
1 dilim ekmek (30 gr)	40	1 çift hakiki deri ayakkabı	8000
1 patates (100 gr)	25	1 mikroçip (2 gr)	10
1 elma (100 gr)	70	1 pamuklu tişört (500 gr)	4100

Tablo 2’de seçilmiş başlıca birkaç ürünün üretim süreçleri boyunca içerdikleri sanal su muhteviyatını göstermektedir.

5. BULGULAR

5.1. Küresel stratejik politika aracı olarak sanal su ticareti ve sanal suyun küresel dolaşım ağı

Herhangi bir ürün üretmek için suya ihtiyaç vardır. Bir ulus olarak küresel ekonomide varlık gösterebilmek için üretim yapmak gerekmektedir. Dolayısıyla üretim ile ilgili bu ilişki ağı ulaşılabilir suya (mavi su)sahip olmayı da gerektirir (Chapagain & Hoekstra, 2011). Suyu stratejik bir politika aracı yapan en büyük özelliği kıt bir kaynak olmasıdır (Adamo ve ark., 2020).Suyun küresel ölçekteki dolaşım ağı iktisadi hareketin de bir göstergesidir.

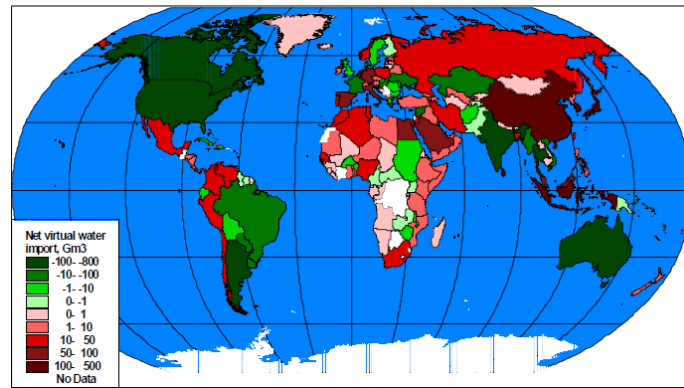
Tablo 3. Dünya Gıda ve Tarım Örgütü (WWC)-FAO çalışmasına göre uluslararası küresel sanal su ticaretinin değerlendirilmesi (uyarlanmıştır)(Hoekstra, 2003)

İthalatçı ülkeler açısından küresel sanal su ticareti-2002	Sanal su hacmi (Gm3/yıl)	Yüzde olarak
Tarımsal ürün ticareti açısından	795	%60
Hayvansal ürün ticareti açısından	180	%13
Deniz ürünleri ticareti açısından	192	%14
Toplam	1.167	

Tablo 4. (IHE) araştırmasına göre uluslararası küresel sanal su ticaretinin (1995-1999 dönemi) değerlendirilmesi. (uyarlanmıştır)(Hoekstra, 2003).

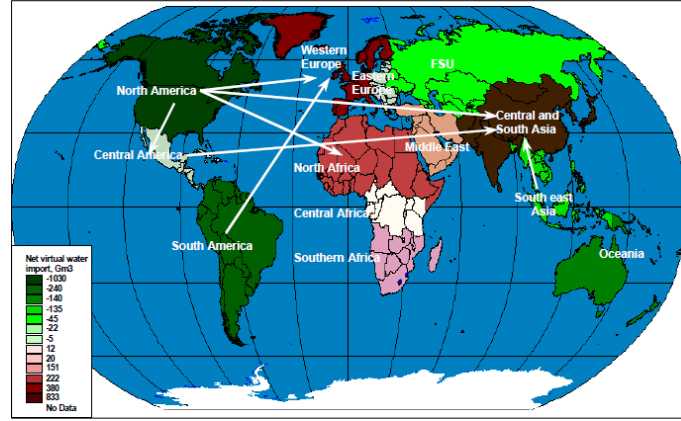
İhracatçı ülkeler açısından küresel sanal su ticareti	Sanal su hacmi (Gm3/yıl)	Yüzde olarak
Tarımsal ürün ticareti açısından	695	%67
Hayvansal ürün ticareti açısından	245	%23
Endüstriyel üretim ticareti açısından	100	%10
Toplam	1.040	

Tablo 3 ve Tablo 4'te küresel ölçekte ithalatçı ve ihracatçı durumdaki ülkelerin başlıca seçilmiş ticaret alanları açısından sanal su hacmi hareketi değerleri verilmiştir. Küresel ölçekte net sanal su ithalatçısı durumda olan ülkeler Japonya, Sri Lanka ve İtalya iken, ihracatçı durumunda olan ülkeler ABD, Kanada, Avustralya, Arjantin ve Tayland'dır.



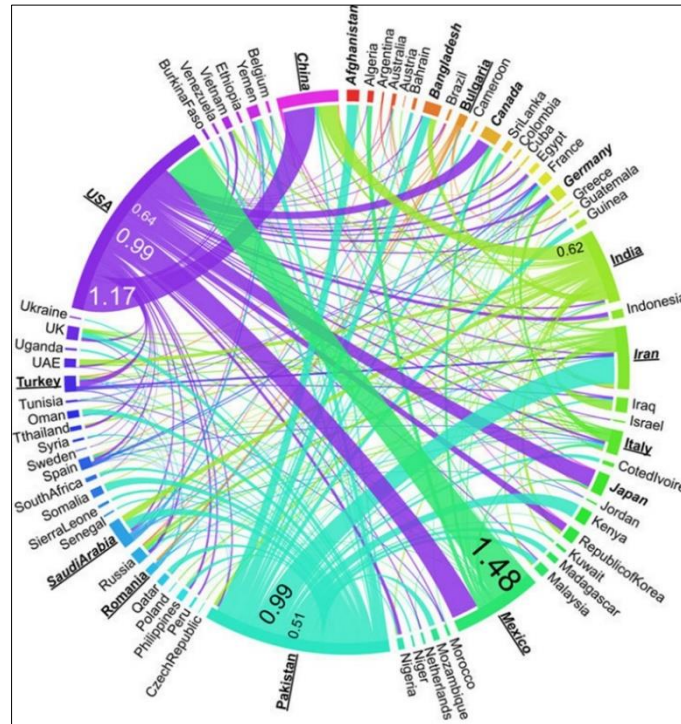
Şekil 7. 1995-1999 yılları arasındaki ulusal sanal su ticaret dengeleri. (Yeşil renkli ülkelerin net sanal su ihracatı, kırmızı renkli ülkelerin net sanal su ithalatı var.)(Hoekstra, 2003)

Şekil 7'de A. Hoekstra'ya göre 1995-1999 yılları arasında başlıca tarımsal ürünler ile ilgili ortalama 695 Gm3/yıl bir su kullanımının olduğu belirtilmektedir. Ayrıca beşeri sulamanın dışında yağmur sulama için yağmur suyu kullanımının da hesaba katılması ile ortalama 5400 Gm3/yıl bir seviyede su kullanımının olduğu belirtilmiştir (Rockström & Gordon, 2001). Kıta düzeyinde 13 bölgede sanal su ağının hareketi gözlemlendiğinde ise Şekil 8'de ok işaretleri ile tarif edilmektedir.



Şekil 8. 1995-1999 döneminde on üç dünya bölgesinin sanal su ticaret dengeleri. Yeşil renkli bölgeler net sanal su ihracatına; kırmızı renkli bölgeler net sanal su ithalatına sahiptir. Oklar bölgeler arasındaki en büyük net sanal su akışlarını gösterir ($>100 \text{ Gm}^3$)(Hoekstra, 2003)

Şekil 8 incelendiğinde ölçek bazında göze çarpan önemli net sanal su ithalatı yapan bölgelerin Orta ve güney Asya, Avrupa'nın batısı ve Kuzey Afrika ve Orta Doğu olduğu görülmektedir. Benzer şekilde sanal suyun net ihracat hareketine bakıldığında ise Kuzey Amerika, Güney Amerika ve Güneydoğu Asya olduğu görülmektedir.



Şekil 9. 2010 yılının küresel sanal su ve yeraltı su tüketimi hareketi. Altı çizili ve kalın yazılı ülkeler yüksek su hareketini temsil eder. (Sayısal değerler $\text{Km}^3/\text{yıl}$)(Dalin ve ark., 2019)

Şekil 9 incelendiğinde Türkiye'nin 2010 yılında İran başta olmak üzere ABD, Fransa, Mısır ve Irak gibi ülkeler ile ithalat ve ihracattan kaynaklı gömülü su yani sanal suyun yeraltı kaynaklarından sağlanan kısmının transfer hareketi görülmektedir (Dalin ve ark., 2019).

Burada göze çarpan kısım ürün yetiştirme ve üretim sürecinde kullanılan suların sadece yüzey veya yağmur sularından değil bilinçsiz kullanım neticesinde yeraltı sularının da bu süreçte dahil olabileceğidir. Bu durum zor zamanlar için bir yedek kaynak durumundaki yeraltı sularının tüketildiğinin bir göstergesidir.

Küresel sanal su hareketi sadece ürün üretimi ile değil ayrıca ürünlerin takası ile de bir hareket ağı oluşturmaktadır. 1990'lı yıllardan 2016 yılına gelindiğinde küresel pazarlarda değiş tokuş edilen ürün miktarının tarımsal ürün üretiminden neredeyse üç kat daha hızlı arttığı gözlemlenmiştir (Vallino ve ark., 2021).

5.2. Türkiye'nin İthalat ve İhracat temelli su ayak izi oranları

Tablo 5. Türkiye’de ithalat ve ihracat değerleri ve sanal su hareketi(uyarlanmıştır)(İzmir Kalkınma Ajansı [İKA], 2024)

Ürün Türü	Toplam ihraç değeri	İhracatın su ayak izi	Toplam İthal değeri	İthalatın su ayak izi
İşlenmemiş tarım ürünleri	%6	%19	%3	%60
Tekstil ürünleri	%20	%42	%6	%14
İşlenmiş tarım ürünleri	%4	%34	%4	%18
Mineral, Cam-Metal ürünleri	%33	%5	%49	%8
Makine, Motorlu taşıt, Elektronik vb.	%30		%35	
Diğer ürünler	%7		%3	
Toplam	%100	%100	%100	%100

WWF’nin 2014 yılı Türkiye’nin Su Ayak İzi Raporunda ithalatın ve ihracatın sanal su hareketi neredeyse başa baş durumda (WWF Türkiye, 2014). Bu durumda ithalat ve ihracat hareketinde ürün paterninin değiştirilmesi ile sanal su girdisi yüksek ürünlerin ithali sayesinde ülkenin su ayak izi dengisi değiştirilebilir ve bu sayede sanal su ihracı azaltılabilir.

6. SONUÇ

Sanal su transferi küresel ticaret hareketi ile yakından ilişkilidir. Gömülü su olarak da tarif edilen bu meta özellikle kısıtlı su kaynaklarına sahip ülkelerin ulusal ve uluslararası ticaretinde etkin rol oynamaktadır. Dört başlık altına kategorize edersek sanal su transferi;

6.1. Tatlı su kaynaklarının korunması ve yönetimi açısından:

Su kaynakları bakımından stres çeken veya su kıtlığı ile karşı karşıya kalan ülkelerin ihracatta su yoğun ürünleri azaltıp, ithalatta su yoğun ürünlerin girdisini artırarak kaynak kullanımında bilimsel bir yaklaşım sergilemesi akılcı olacaktır. Sanal su transferinde temel strateji esasında kaynak kullanımı ve planlaması üzerine düşünülmüş olması açısından bu idea bir stratejik yönetim disiplini özelliğindedir. Sunulan projeksiyonlar incelendiğinde özellikle tarım ve buna bağlı gıda endüstrisinin gelecekte varlık gösterebilmesinin, ülkelerin sahip olduğu kullanılabilir su kaynaklarının potansiyeline bağlı olduğu görülmektedir. Su tasarrufu için geleneksel yöntemlerin yerine bu metodoloji sayesinde eşyanın görünmeyen kısmında da varlık gösteren suyun muhafazası sağlanmış olacaktır. Ayrıca bu kaynak yönetim disiplini ile ulusal bir rekabet enstrümanının varlığı anlaşılmış ve bu enstrüman korunmuş olacaktır.

6.2. İktisadi etkiler ve reel piyasa politikası açısından:

Neredeyse her ürün su ile üretilir ancak su ile pek fazla ürün satın almak mümkün değildir. Ekonomide “Elmas-Su Paradoksu” denen bir fikir hakimdir. Ancak ifade edildiği üzere bunun tersi de doğrudur. Doğada bolca bulunmasından dolayı su kolayca harcanabilen bir kaynaktır ancak yüksek değer karşılığı olan bir meta yine su sayesinde işlenebilmekte veya üretilebilmektedir. Dolayısıyla suyun değeri göz önüne alınacak olursa toplam faydadan ziyade nihai yani marjinal fayda üzerinden değerlendirmek gerekmektedir. Öte yandan karşılaştırmalı üstünlükler teorisine göre ulaşılabilir su sayesinde fırsat maliyeti yüksek ürünlerin üretim paterni kurgulanabilmektedir. Temel mantık bir ülkede kısıtlı kaynak su ise sanal su muhteviyatı yüksek ürünlerin ithal edilip sanal su muhteviyatı düşük ürünlerin ihraç edilmesi

fırsat maliyeti açısından etkili olacaktır. Bu sayede serbest piyasa ekonomisi hâkim mevcut pazarda rekabet gücü artmış olacaktır. Ayrıca özellikle 2018 yılından beri yaşanan “ekonomik savaşların” temel dinamiğini sanal suyun oluşturduğunu ifade etmek gerekir.

6.3. Ekosistemin korunması ve çevresel sürdürülebilirlik açısından:

Suyun yenilenebilir ancak her zaman istenen yerde, zamanda ve formda var olamayacağı bilinmektedir. İnsanın neden olduğu doğa tahribatı, su kaynaklarının fütursuzca kullanılması ve kirletilmesi çevresel sürdürülebilirliği tehlikeye atmaktadır. Ekosistemdeki en küçük bir kırılmalık çıkı etkisi gibi bir etki ile tüm sistemin sekteye uğramasına neden olabilmektedir. Su gibi hayati öneme sahip bir bileşenin akılcı yöntemler ile yönetilmesi bu manada oldukça önemlidir. Sanal su transferi metodolojisinin doğru anlaşılması su ayak izi bileşenlerinin yönetimi mümkün hale gelecektir. Bu sayede yeşil su ve mavi su gibi kaynakların sürdürülebilirliği etkin hale gelebilecektir.

6.4. Diplomatik politika aracı olarak ve uluslararası ilişkiler açısından:

Suyun etkin yönetimi ile uluslararası ticaretin yönetimi birbiri ile sıkı sıkıya bağlıdır. Bir analogi ile tarif etmek gerekirse aracımızın deposunda bulunan yakıtın varlığı gidebileceğimiz mesafenin ölçütü durumundadır. Yeterli miktarda doğal kaynağa sahip olmayan ulusların uluslararası arenada politika oluşturucu konumda ve söz hakkına sahip olması beklenmemektedir. Bu durum o ulusu sadece tüketici konumunda tutacaktır. Katma değeri yüksek ürün üretemeyen ülkeler yeterli döviz girdisine sahip olamamakta ve beraberinde kırılmal bir ekonomik model ile yaşam sürmektedirler. Günümüz dünyasında uluslararası ilişkilerin en büyük belirleyici unsuru iktisadi zenginlik olduğu bunun da doğal kaynak zenginliği ile ilişkili olduğunu belirtmek faydalı olacaktır. Bir ülke için tüm doğal kaynaklar gibi suyun da bir emtia olarak değerlendirilip önemle ele alınması, işlenmesi ve en nihayetinde akılcı yönetilmesi diplomatik alandaki varlık sahasının harekât sınırlarını belirleyecektir.

KAYNAKÇA

- Adamo, N., Al-Ansari, N., & Sissakian, V. K. (2020). Global climate change impacts on Tigris-Euphrates Rivers basins. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 10(1), 49–98.
- Anaç, S., Özçakal, E., & Mengü, G. P. (2011). Sanal su kavramı ve su yönetiminde önemi [The concept of virtual water and its importance in water management]. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 48(2), 159–164.
- Bilen, Ö. (2012). Özden Bilen kişisel internet sitesi: Hidropolitik ve su kaynakları arşivi. <https://www.ozdenbilen.com/anaSayfa.aspx>
- Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2004). *Water footprints of nations* (Value of Water Research Report Series No. 16). UNESCO-IHE. <https://research.utwente.nl/en/publications/water-footprints-of-nations>
- Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2011). The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecological Economics*, 70(4), 749–758.
- Connor, R., & Chaves Pacheco, A. (2024). *Global employment trends and the water dependency of jobs: Technical paper*. UNESCO Digital Library. <https://unesco.org/ark:/48223/pf0000388410>
- Dalin, C., Taniguchi, M., & Green, T. (2019). Unsustainable groundwater use for global food production and related international trade. *Global Sustainability*, 2, Article e12. <https://doi.org/10.1017/sus.2019.7>
- Falkenmark, M., Rockström, J., & Karlberg, L. (2009). Present and future water requirements for feeding humanity. *Food Security*, 1(1), 59–69. <https://doi.org/10.1007/s12571-008-0003-x>

Food and Agriculture Organization of the United Nations, & UN-Water. (2021). *Progress on level of water stress: Global status and acceleration needs for SDG indicator 6.4.2*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/bc8810ae-2a13-4cfe-b019-339158c7e608/content/src/html/chapter-1-3.html>

Hatt, P. K., & Reiss, A. J. (2002). Kentsel yerleşimlerin tarihi [The history of urban settlements]. B. Duru & A. Alkan (Der. & Çev.), *20. Yüzyıl kenti* içinde (s. 27–36). İmge Kitabevi.

Hoekstra, A. Y. (Ed.). (2003). *Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade*. IHE Delft.

Hoekstra, A. Y. (2017). Water footprint assessment: Evolvment of a new research field. *Water Resources Management*, 31(10), 3061–3081. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1618-5>

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A., Martinez-Aldaya, M., & Mekonnen, M. (2009). *Water footprint manual: State of the art 2009*. Water Footprint Network. <https://research.utwente.nl/files/5146564/Hoekstra09WaterFootprintManual.pdf>

İzmir Kalkınma Ajansı. (2024). *Sanal su ticareti ve Türkiye'nin durumu*. Kalkınma Güncesi. <https://kalkinmaguncesi.izka.org.tr/index.php/2021/08/24/sanal-su-ticareti-ve-turkiyenin-durumu/>

Kapluhan, E. (2013). Türkiye'de kuraklık ve kuraklığın tarıma etkisi [Drought in Türkiye and the effect of drought on agriculture]. *Marmara Coğrafya Dergisi*, (27), 487–510.

Liu, J., Yang, H., Gosling, S. N., Kummu, M., Flörke, M., Pfister, S., Hanasaki, N., Wada, Y., Zhang, X., Zheng, C., Alcamo, J., & Oki, T. (2017). Water scarcity assessments in the past, present, and future. *Earth's Future*, 5(6), 545–559. <https://doi.org/10.1002/2016EF000518>

Makate, C., Wang, R., & Tatsvarei, S. (2018). Water footprint concept and methodology for warranting sustainability in human-induced water use and governance. *Sustainable Water Resources Management*, 4(1), 91–103. <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0143-2>

Mekonnen, M. M., & Gerbens-Leenes, W. (2020). The water footprint of global food production. *Water*, 12(10), Article 2696. <https://doi.org/10.3390/w12102696>

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2010). A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(7), 1259–1276. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1259-2010>

Mubako, S. T. (2018). Blue, green, and grey water quantification approaches: A bibliometric and literature review. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 165(1), 4–19. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2018.03289.x>

Muratoglu, A. (2022). Water footprint: Concept and methodology. *Water*, 14(2), Article 231. <https://doi.org/10.3390/w14020231>

Oki, T., & Kanae, S. (2006). Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 313(5790), 1068–1072. <https://doi.org/10.1126/science.1128845>

Pathan, A. I., Patel, D., Samal, D. R., Prieto, C., & Eslamian, S. (2023). River bathymetry acquisition techniques and its utility for river hydrodynamic modeling. In S. Eslamian & F. Eslamian (Eds.), *Handbook of hydroinformatics* (pp. 339–351). Elsevier.

Regan, P. J. (2012, April). *Call to stewardship* [Paper presentation]. 32nd Annual USSD Conference: Innovative Dam and Levee Design and Construction for Sustainable Water Management, New Orleans, LA, United States.

Rockström, J., & Gordon, L. (2001). Assessment of green water flows to sustain major biomes of the world: Implications for future ecohydrological landscape management. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26(11-12), 843–851. [https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(01\)00096-X](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(01)00096-X)

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2024). *The United Nations world water development report 2024: Water for prosperity and peace*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388948>

Vallino, E., Ridolfi, L., & Laio, F. (2021). Trade of economically and physically scarce virtual water in the global food network. *Scientific Reports*, 11(1), Article 22806. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01514-w>

Vanham, D., & Bidoglio, G. (2013). A review on the indicator water footprint for the EU28. *Ecological Indicators*, 26, 61–75. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.10.021>

Veettil, A. V., & Mishra, A. K. (2016). Water security assessment using blue and green water footprint concepts. *Journal of Hydrology*, 542, 589–602. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.032>

World Bank. (2020, July 1). *New country classifications by income level: 2019–2020*. World Bank Blogs. <https://blogs.worldbank.org/en/opendata/new-country-classifications-income-level-2019-2020>

World Economic Forum. (2022). *Global risks report 2022* (17th ed.). <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2022/>

World Resources Institute. (2020). *Understanding risk and investing in solutions for water security*. <https://www.wri.org/freshwater>

WWF Türkiye. (2014). *Türkiye’de su kaynaklarının güncel durumu*. <https://www.wwf.org.tr/kesfet/tatli-su/turkiyede-su-kaynaklarinin-guncel-durumu/>

Yang, D., & Xia, J. (2021). Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review. *Geography and Sustainability*, 2(2), 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.003>

Yavuz, F. (2005). *Türkiye’de tarım*. Tarım ve Köyişleri Bakanlığı Yayınları.

Zabarenko, D. (2015, January 12). *6 stories to watch in 2015: Global climate deal, sustainable development goals, rising water risks and more*. World Resources Institute. <https://www.wri.org/insights/6-stories-watch-2015-global-climate-deal-sustainable-development-goals-rising-water-risks>