



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



SÜT ÜRÜNLERİ ENDÜSTRİSİNİN SU AYAK İZİNİN BELİRLENMESİ

Qand Agha Doulat ZAI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Qand Agha Doluat ZAI tarafından hazırlanan “Süt Ürünleri Endüstrisinin Su Ayak İzinin Belirlenmesi” adlı tez çalışması 12/02/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof.Dr. Şükrü DURSUN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Danışman

Doç.Dr. Sezen KÜÇÜKÇONGAR
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Dr.Öğr.Üyesi Fatma Didem TUNÇEZ
(KTO Karatay Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Qand Agha Doulat ZAI

12/01/2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

SÜT ÜRÜNLERİ ENDÜSTRİSİNİN SU AYAK İZİNİN BELİRLENMESİ

Qand Agha Doulat ZAI

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç.Dr. Sezen KÜÇÜKÇONGAR

2024, 55 Sayfa

**Jüri
Doç.Dr. Sezen KÜÇÜKÇONGAR
Prof.Dr. Şükrü DURSUN
Dr.Öğr.Üyesi Fatma Didem TUNÇEZ**

Bu tez çalışmasında Su Ayak İzi Ağı (WFN) tarafından geliştirilen yöntem kullanılarak, üç farklı süt ürününün (beyaz peynir, kaşar peyniri ve yoğurt) yeşil, mavi ve gri su ayak izinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Süt üretiminin gerçekleştirildiği çiftlik, süt toplama ve iletiminin yapıldığı tesis ve süt ürünleri üretiminin yapıldığı tesis boyunca doğrudan ve dolaylı su ayak izleri belirlenmiştir. Toplam su ayak izleri kaşar peyniri için 12879 m³/ton, beyaz peynir için 8371 m³/ton ve yoğurt için 1674 m³/ton olarak belirlenmiştir. Süt ürünlerinin üretiminde toplam su ayak izinin yaklaşık %97.5'i süt üretiminin sağlandığı çiftlikte oluşan su ayak izidir, bunun da önemli bir kısmı yem bitkilerinin üretimiyle ilişkilidir. Bu nedenle su ayak izinin azaltılmasında yem bileşenlerinin üretimiyle ilgili bölgesel bazda düzenlemelerin yapılması ve daha az su tüketimini sağlayacak teknolojilerin araştırılması önem arz etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Gri su ayak izi, Mavi su ayak izi, Su tüketimi, Süt ürünleri, Yeşil su ayak izi.

ABSTRACT

MS THESIS

Determination of Water Footprint of Dairy Products Industry

Qand Agha Doulat ZAI

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Environmental Engineering**

Advisor: Assoc.Prof.Dr. Sezen KÜÇÜKÇONGAR

2024, 55 Pages

**Jury
Assoc.Prof.Dr. Sezen KÜÇÜKÇONGAR
Prof.Dr. Şükrü DURSUN
Asst.Prof.Dr. Fatma Didem TUNÇEZ**

In this thesis, it was aimed to determine the green, blue, and gray water footprints of three different dairy products (white cheese, kashar cheese and yoghurt) by using the method developed by the Water Footprint Network (WFN). Direct and indirect water footprints were determined throughout the dairy production farm, milk collection and transmission facility, and dairy facility. Total water footprints were determined as 12879 m³/ton for kashar cheese, 8371 m³/ton for white cheese, and 1674 m³/ton for yoghurt. Approximately 97.5% of the total water footprint of dairy products occurs on the dairy farm, and a significant part of this is related to the production of feed crops. Therefore, in reducing the water footprint, it is important to ensure regional regulations regarding the production of feed ingredients and to research technologies that will enable less water consumption.

Keywords: Gray water footprint, Blue water footprint, Water consumption, Dairy products, Green water footprint.

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın her aşamasında, danışman hocam Doç. Dr. Sezen KÜÇÜKÇONGAR'ın değerli rehberliği ve destekleri tezimin temelini oluşturdu. Sezen Hocamın bilgi birikimi, metodolojik yaklaşımı ve motive edici tutumu, tez sürecimde benim için önemli bir öğrenme deneyimi sundu. Ayrıca, tez konusundaki uzmanlığı ve sağladığı detaylı geri bildirimler, tezimin kalitesini artırdı. Kendisine, tez sürecindeki değerli katkıları için içten teşekkürlerimi sunarım.

Ailemin süreç boyunca sağladığı moral, destek ve anlayış da benim için büyük bir motivasyon kaynağı oldu. Onların sevgisi ve teşvikleri, tez çalışmamı sürdürme konusundaki kararlılığımı daha da güçlendirdi. Aileme içten teşekkürlerimi sunarım, bu destek benim için çok değerlidir. Aynı zamanda, Selçuk Üniversitesi'nde görev yapan Dr.Öğr.Üyesi Zehra GÖK'e tezimde ihtiyaç duyduğum verilerin sağlanmasındaki katkılarından dolayı teşekkür ederim. Pamukkale Üniversitesi Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora çalışmalarını sürdüren Mohammad Nazir MALEKZADA'nın katkılarından dolayı teşekkür eder ve kendisine sağlıklı yaşam dilerim. Bu süreç, benim için unutulmaz bir öğrenme ve bilim deneyimi oldu.

Qand Agha Doulat ZAI
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Suyun Önemi ve Su Kıtlığı	1
1.2. İklim Değişikliğinin Su Kaynakları Üzerindeki Etkisi	2
1.3. Türkiye'nin Su Kaynakları ve Su Kullanımı	3
1.4. Tezin Amacı ve Önemi	3
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	7
2.1. Su Ayak İzi	7
2.1.1. Su Ayak İzi Kavramı ve Önemi	7
2.1.2. Su Ayak İzi Bileşenleri	8
2.1.3. Doğrudan ve Dolaylı Su Ayak İzi	9
2.1.4. Su Ayak İzi Hesaplaması	10
2.2. Türkiye'de Süt ve Süt Ürünleri Üretimi	16
2.3. Literatür Araştırması	18
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	31
3.1. Çalışma Alanı	31
3.2. Su Ayak İzi Hesaplama Yöntemi	34
3.2.1. Canlı hayvan su ayak izi	35
3.2.2. Yem İle İlgili Su Ayak İzi	36
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	38
4.1. Süt Üretiminin Gerçekleştirildiği Çiftlikte Su Ayak İzi Hesaplanması	38
4.2. Sütün Toplanması ve İletilmesinin Gerçekleştirildiği İşletmede Su Ayak İzi Hesaplanması	41
4.3. Süt Ürünlerinin Üretimine Gerçekleştirildiği Tesiste Su Ayak İzinin Hesaplanması	43
4.4. Süt Ürünlerinin Toplam Su Ayak İzi Değerleri	45
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	49
5.1 Sonuçlar	49
5.2 Öneriler	49

KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.



KISALTMALAR

Kısaltmalar

CF	: Karbon Ayak İzi
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Örgütü
LCA	: Yaşam Döngüsü Analizi
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
WF	: Su Ayak İzi
WFN	: Su Ayak İzi Ağı



1. GİRİŞ

1.1. Suyun Önemi ve Su Kıtlığı

Su, hayatın devamı için kritik bir kaynaktır, zira tüm canlılar yaşamlarını sürdürebilmek adına suya ihtiyaç duyarlar. Su, canlıların yaşam döngüsü içinde kilit bir rol oynamaktadır ve bu nedenle suyun varlığı hayati bir öneme sahiptir. Dünya'nın yüzeyinin yaklaşık %71'i su ile kaplı olduğu için, bu mavi renkli ve su zengini özelliği nedeniyle "Mavi Gezegen" olarak adlandırılmaktadır. Ancak, kullanılabilir tatlı su miktarı oldukça sınırlıdır. Genel olarak, suyun %99'u tuzludur ve bu oranın büyük bir kısmı okyanuslarda bulunur (%97). Buzullarda donmuş halde bulunan su ise toplam su miktarının %2'sini oluşturur. Geri kalan suyun büyük bir kısmı (%1), tatlı su göllerinde, havada su buharı olarak, toprak nemine, nehirlerde ve biyolojik sistemlerde bulunur; çok küçük bir kısmı ise yer altı sularında bulunmaktadır (FAO, 2020). Ancak, maalesef dünya genelindeki tatlı suyun sadece %0.3'ü insanlar tarafından kullanılabilir. İnsanlar tarafından tüketilen su çoğunlukla nehirlerde bulunmaktadır. Tatlı suyun büyük bir kısmı, yeraltında ve akiferlerde toprak nemine bağlı olarak bulunmaktadır. Ayrıca, su yenilenebilir bir döngü içerisinde olmasına rağmen, birçok ülke su kıtlığı sorunu ile karşı karşıyadır. Bu durum, su kıtlığı sadece kentsel yaşamı değil, aynı zamanda tarımsal faaliyetleri de olumsuz etkilemektedir.

Nüfus artışı, kentleşme, ticaretin küreselleşmesi, makroekonomik süreçler ve değişen tüketim kalıpları, küresel ölçekte su talebinin önemli ölçüde artmasına neden olmaktadır (UNESCO, 2015). Birleşmiş Milletler'e göre, 1980'lerden bu yana küresel su tüketimi her yıl %1 artış göstermektedir. Bu eğilimin 2050 yılına kadar benzer bir hızla devam etmesi ve özellikle endüstriyel ve evsel tüketim sektörlerinden kaynaklanan artan talep nedeniyle mevcut su kullanımında %20 ila %30'luk bir artışa yol açması beklenmektedir (UN-Water, 2019). Birleşmiş Milletler'e göre, dünya nüfusunun 2020'de yaklaşık 7.8 milyar olduğu, bu rakamın ise 2050'de 9.7 milyara çıkmasının beklendiği bilinmektedir. Nüfusun artmaya devam etmesiyle birlikte, kişi başına düşen kullanılabilir tatlı su kaynakları azalmaktadır. Nüfus artışının, su kaynakları üzerinde tarım ve diğer kullanımlar dahil olmak üzere endüstriyel ve evsel sektörlerde daha fazla baskı oluşturması öngörülmektedir (FAO, 2021).

Dünya nüfusunun yaklaşık altıda biri, ekonomik büyümeyi, gıda güvenliğini, beslenmeyi ve geçim kaynaklarını ciddi şekilde tehdit eden yüksek su stresi veya sıkça

görülen şiddetli kuraklık yaşanan bölgelerde yaşamaktadır (FAO, 2021). Bu, dünya nüfusunun yaklaşık %9-10'unu oluşturan 733 milyondan fazla insanı kapsamaktadır (UNWater, 2021). Her yıl 4 milyardan fazla insan, ciddi su sıkıntısı çekmekte ve 2 milyardan fazla insan ise ciddi su kıtlığına maruz kalan ülkelerde yaşamaktadır. Su talebinin artması ve iklim değişikliğinin etkilerinin yoğunlaşması ile birlikte, su stresi seviyelerinin artması beklenmektedir (Chang, 2019).

Dünya genelinde kullanılan suyun %72'si tarım sektörü tarafından, %16'sı belediyeler tarafından evler ve hizmetler için ve %12'si sanayi sektörü tarafından tüketilmektedir. Bu oranlar coğrafi bölgelere göre değişiklik gösterse de, sulu tarım küresel ölçekte en fazla su talep eden sektör olarak öne çıkmaktadır (UN-Water, 2021).

1.2. İklim Değişikliğinin Su Kaynakları Üzerindeki Etkisi

Dünya iklimi ile su döngüsü arasındaki ilişki son derece yakın ve karmaşıktır. İklim değişikliği, su döngüsünün bozulmasına ve su kalitesinin değişmesine yol açmaktadır. Bu değişiklikler, dünya genelindeki su kaynaklarının miktarını, kalitesini, konumunu ve zamanlamasını etkileyerek, birçok bölgede su kaynakları yönetimini zorlaştırmaktadır (UN-Water, 2020).

İklim değişikliği nedeniyle tatlı su kaynaklarının yağış ve akış yoluyla dağılımı ve bulunabilirliği düzensiz hale gelir. Farklı bölgeler her yıl farklı miktarlarda su alabilir, bu da kurak ve nemli iklimler arasında veya ıslak ve kurak mevsimler arasında önemli farklılıklara neden olabilir. Ancak, bileşik yıllık ortalamalar, ülkeler arasında kişi başına düşen su miktarında belirgin farklılıklar ortaya koymaktadır (UNESCO, 2015).

İklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkilerine göz attığımızda, yağış eksikliğinin toprak nemini, nehir akışını ve yeraltı suyu beslenmesini azaltacağını görüyoruz. Bu durum, taşkınların artmasına neden olarak temel altyapı ve hizmetlere zarar vererek su mevcudiyeti, sanitasyon ve insanların geçim kaynaklarını olumsuz etkileyecektir. İklim değişikliği nedeniyle, 2050 yılına kadar tahminen 570 şehirde yaşayan 685 milyon insanın tatlı su mevcudiyetinde %10'luk bir ek azalma beklenmektedir (UN-Water, 2020).

1.3. Türkiye'nin Su Kaynakları ve Su Kullanımı

Türkiye, ılıman ve yarı kurak bir iklimle karakterize edilir. Türkiye'nin üç tarafının sularla çevrili olmasına rağmen, su zengini bir ülke olarak düşünülmemelidir. Türkiye'nin toplam yüzölçümü yaklaşık 783,562 kilometrekareye sahiptir. Ülkede yıllık ortalama yağış miktarı 574 mm civarında olup, yılda tahmini 450 milyar metreküp tatlı su bulunmaktadır. Yüzey sularının çeşitli amaçlar için kullanılabilir miktarı yılda ortalama yaklaşık 94 milyar metreküptür. Bu miktarın yanı sıra, belirlenen yeraltı suyuyla birlikte Türkiye'nin toplam kullanılabilir yeraltı ve yerüstü su potansiyeli yılda ortalama 112 milyar metreküptür, ancak bunun sadece yaklaşık 57 milyar metreküpü tüketilmektedir. Türkiye'nin su tüketiminin büyük bir kısmı, %77'siyle tarım sektörü tarafından gerçekleştirilmektedir. Geri kalan %23'lük kısım ise endüstriyel su ve evsel içme suyu olarak tüketilmektedir (Mohsin, 2022).

Türkiye'de, kentleşme, hızlı nüfus artışı ve iklim değişikliği gibi faktörlerden dolayı su kaynaklarına yönelik baskılar sürekli olarak artmaktadır. Kişi başına düşen yıllık kullanılabilir su miktarı azalmıştır; 2000 yılında 1652 m³ iken, 2009'da 1544 m³ ve 2020'de 1346 m³ olarak gerçekleşmiştir (Mohsin, 2022). Bu rakamlar, genellikle su stresini belirlemede kullanılan Falkenmark Endeksi'ne göre, Türkiye'nin su stresi yaşayan ülkeler arasında yer aldığını göstermektedir (Falkenmark ve Widstrand, 1992). Türkiye İstatistik Kurumu'na (TÜİK) göre, 2030 yılında Türkiye'nin nüfusunun 100 milyona ulaşması beklenmektedir. Bu durumda, kişi başına düşen yıllık su miktarının 1.120 m³ olması öngörülmektedir (WWF, 2014). Bu faktörler, Türkiye'nin su kaynaklarının gelecekteki sürdürülebilirliği üzerindeki endişeleri artırmaktadır.

1.4. Tezin Amacı ve Önemi

Sanayi ve endüstriyel faaliyetler hayatımızın sürdürülmesinde önemli yer tutmaktadır. Türkiye'de, su fakiri olma durumuna düşmemek için atılması gereken en önemli adımlarından bir tanesi, endüstri ve sanayi tesislerinde sürdürebilir su kullanım stratejileri geliştirmektir. Bu durumda, su ayak izi kavramı ortaya çıkar. Bir üretim tesisinde su ayak izi, üretim sürecinin tüm aşamalarında kullanılan toplam su miktarını ifade etmektedir.

Su ayak izi, suyun ekonomideki rolünün anlaşılmasını sağlayan yeni bir kavramdır ve ekonomik kalkınma süreçlerinde bir araç olarak kullanılır. Bir ülkenin

ekonomik faaliyetleri için su ayak izini takip etmesi ve planlamacıların, karar vericilerin ve yatırımcıların tahsis, ticaret, rekabet avantajı ve ekosistem korumasına ilişkin kararlarının alınmasında kilit bir role sahip olması önümüzdeki yıllarda daha da önemli hale gelecektir. Su ayak izi değerlendirmesi proses, ürün, tüketici veya topluluk, coğrafi olarak belirlenmiş bir alan, ulusal tüketim veya işletme bazında farklı ölçeklerde uygulanabilmektedir.

Bir ürünün, yani bir metanın, bir malın veya hizmetin su ayak izi, bu ürünü üretmek için tüketilen/kirlenen toplam tatlı su hacmidir ve üretim zincirinin çeşitli adımlarında toplanır ve ürünün tatlı suya ne kadar baskı uyguladığını gösterir. Basit bir üretim sisteminde, ürünü üretmek için atılan proses adımlarının su ayak izlerinin toplamına eşittir. Bir ürünün su ayak izini ölçmek için üç su hacminin bilinmesi gerekir, yani su ayak izinin üç bağımsız bileşeni vardır: mavi, yeşil ve gri su ayak izi. Mavi su ayak izi, ürünün üretilmesi için tüketilen (buharlaştırma veya ürüne katılma yoluyla) yüzey ve yeraltı suyunu (nehirlerden, göllerden ve akifelerden alınan su) ifade eder. Aynı zamanda, bir havzadaki yüzey veya yeraltı sularından çekilen ve başka bir havzaya veya denize dönen suyu da içerir. Yeşil su ayak izi ise üretim sürecinde tüketilen toprak nemi olarak toprakta depolanan yağmur suyunun hacmini ifade etmektedir. Gri su ayak izi, su kirliliğinin (su kirliliği ayak izi) bir göstergesidir ve özellikle bir ürünün tam tedarik zinciri üzerinden üretimi ile ilişkilendirilebilecek tatlı su kirliliğinin bir göstergesidir.

Ülkemizde su ayak izi sektörleri göre değerlendirildiğinde %89 ile en büyük payı tarım oluşturmaktadır. Tarımın su ayak izinin ise %92'si bitkisel üretimden, %8'i otlatmadan kaynaklanır. Bitkisel üretimin su ayak izine bakıldığında, en büyük payın %38 ile tahıllara ait olduğu görülmektedir. Tahılları, %31 ile yem bitkileri izler. Endüstriyel meyveler %13, yağ bitkileri %5, sebzeler ve baklagiller %2'sini oluşturur. Tarımsal faaliyetler dışında su ayak izi, evsel su kullanımı için %7 ve endüstriyel üretim için %4'lük dilimi kapsamaktadır. Türkiye'de üretimin su ayak izi yaklaşık 139.6 milyar m³/yıl'dır. Türkiye'de üretime dayalı su ayak izinin %64'ü yeşil su ayak izidir; mavi su ayak izi %19 ve gri su ayak izi %17'dir. Tarımın su ayak izi değerlendirilirken mavi ve yeşil su ayak izleri ön plandadır. Evsel ve endüstriyel su ayak izlerinde ise gri su ayak izine odaklanılarak durum değişmektedir. Gri su ayak izleri Türkiye'de evsel ve endüstriyel su ayak izlerinde sırasıyla %87 ve %92 gibi büyük oranlara sahiptir. Aynı zamanda Türkiye'de tüketimin su ayak izi yaklaşık 140.2 milyar m³/yıl'dır. Tüketimden

kaynaklanan su ayak izinin %66'sı yeşil su ayak izidir; mavi su ayak izi %17, gri su ayak izi ise %17'dir (Pegram ve diğ., 2014).

Tarım ve turizm sektörlerinin dışında günümüzde endüstriyel faaliyetlerde proses seçiminde de su ayak izi kavramı yaygınlaşmaya başlamıştır. Alternatifler içerisinde özellikle daha düşük su ayak izine sahip yöntemlerin seçimi, endüstriyel faaliyetlerde daha da önem arz etmektedir. Sanayi sektörünün diğer önemli su tüketim kaynağı olmasına rağmen, endüstriyel ürünlerin su ayak izi ile ilgili sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Endüstriyel sektörlerin su ayak izi hesaplama nedenleri; bireysel organizasyonlarda su tasarrufu ve yeniden kullanım fırsatlarının tanımlanabilmesi, daha temiz üretim sağlamak, hızlı ekonomik gelişme ve nüfus artışına eşlik eden aşırı su tüketiminden kaynaklanan talep karşılamak, kişi başına düşen su kullanımının azaldığını ve düşmeye devam edeceğini gösteren dengesiz su kullanımının karşısında durmaktır (Chen ve diğ., 2020).

Ülke su kaynaklarının kirletilmesinin önlenmesi, kişi başına ve birim üretim başına su kullanımının azaltılması, aynı zamanda faydalı maksatlar için kullanılabilir su miktarının artırılması büyük önem arz etmektedir. Su yönetiminin önemli unsurlarından birisi su verimliliği, su verimliliğinin önemli alt bileşenlerinden birisi de su tasarrufudur. Su ayak izi kavramı bu açıdan daha da önemli olmaktadır. Son yıllarda, ekolojik ve çevresel sürdürülebilirlik değerlendirmeleri küresel olarak büyük önem kazanmaktadır. Küresel su kıtlığı olgusu, hükümetler, politika yapıcılar, su kullanıcıları ve su yöneticilerinin yanı sıra çevre ve sürdürülebilirlik konularıyla ilgilenen özel ve sivil toplum kuruluşları ve meslek kuruluşları için önemli bir problem haline gelmiştir. Dünyadaki tatlı su kaynaklarının büyük bir kısmının gıda üretiminde kullanılması, tarımsal faaliyetlerdeki ve gıda endüstrisindeki su ayak izinin takibini daha da önemli hale getirmektedir. Ülkemizde tarımsal faaliyetlerdeki su ayak izinin takibi ile ilgili çalışmalar yapılmış olmasına rağmen, endüstriyel faaliyetler bazında sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu amaçla bu tez çalışmasında ülkemizde önemli gıda sektörlerinden birisi olan süt ürünleri endüstrisinin su ayak izinin hesaplanması ve iyileştirme stratejilerinin yorumlanması suretiyle bu alandaki çalışmalara katkı sağlanacağı öngörülmektedir.

Bu tez çalışmasında, farklı süt ürünlerinin (beyaz peynir, kaşar peyniri ve yoğurt) yeşil, mavi ve gri su ayak izi değerlerinin belirlenmesi, literatür çalışmaları ile kıyaslanması ve yorumlanması hedeflenmiştir. Su ayak izi hesaplamasında Su Ayak İzi Ağı (WFN) tarafından geliştirilen yöntem kullanılmıştır. Süt üretiminin

gerçekleştirildiği çiftlik, süt toplama ve iletimin sağlandığı tesis ve süt ürünleri üretim tesisinin toplam mavi, yeşil ve gri su ayak izinin hesaplanması ve adım adım her bir aşamanın ürün bazında toplam su ayak izine katkısının belirlenmesi hedeflenmiştir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Su Ayak İzi

Tatlı suyun yeterli miktarda ve uygun kalitede bulunması, hem insan toplulukları hem de doğal ekosistemler için kritik bir koşuldur. Dünya genelinde aşırı tatlı su tüketimi ve insan faaliyetlerinden kaynaklanan kirlilik, tatlı suyun mevcudiyeti üzerinde olduğu kadar gıda güvenliği, çevresel kalite, ekonomik kalkınma, sosyal yaşam ve refah üzerinde de büyük baskılara neden olabilir. Suyu olan talebin artması, su bulunabilirliğinin azalması ve su kalitesinin düşmesi, gelecekte tatlı su kıtlığı sorunlarını daha da derinleştirebilir. Küresel ölçekte su kalitesinin bozulması büyük bir endişe kaynağıdır. Su tasarrufu yönetimi genellikle farklı su kullanıcıları arasında yeterli koordinasyon ve işbirliği eksikliği nedeniyle zorluklar yaşamaktadır (Tzanakakis ve diğ., 2020).

2.1.1. Su Ayak İzi Kavramı ve Önemi

Su ayak izi kavramı, küresel su sorunlarına daha etkili bir yaklaşım sağlamak ve su tüketimini daha doğru bir şekilde ölçmek amacıyla 2002 yılında Hoekstra tarafından ortaya çıkarılmış ve daha sonra 2008 yılında Hoekstra ve Chapagain tarafından geliştirilmiştir. Bu kavram, mal ve hizmetlerin tüketimi ile su kaynaklarının kullanımı arasındaki bağlantıyı incelemek için bir analiz çerçevesi sunar ve ekolojik ayak izine benzer.

Su ayak izi, tatlı suyun sadece tüketici veya üretici tarafından doğrudan kullanımını değil, aynı zamanda tatlı suyun dolaylı kullanımını da gösterir. Bu kavram, tatlı suyun kapsamlı bir göstergesi olarak kabul edilebilir ve su tüketiminin bir ölçüsüdür. Su ayak izi, sürdürülemez su kullanımını önlemek amacıyla 2008 yılında kurulan Su Ayak İzi Ağı platformu aracılığıyla şirketlerin, kuruluşların ve bireylerin işbirliği yaptığı bir girişimi destekler.

Su ayak izi, geleneksel su kaynakları endeksinden farklı özelliklere sahiptir ve bölgelerde veya havzalarda su kaynaklarının gerçek tüketimini daha doğru bir şekilde belirleyebilir. Bu kavram, yüzey ve yeraltı sularını değil, aynı zamanda toprak suyunu (yeşil su) ve su kirliliğini (gri su) de içerir. Bu sayede su kaynaklarının kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanır.

Su ayak izi, tüketicilerin bölgesel su kaynaklarının güvenliğini sağlamak için iç ve dış su kaynaklarına olan bağımlılıklarını yansıtabilir. Ayrıca, üretimden tüketime kadar tüm tedarik zincirinde kullanılan suyu ölçerek su tüketimini anlama konusunda önemli bir araçtır. Su ayak izi, tatlı su kullanımını hem üreticiler hem de tüketiciler açısından dolaylı ve doğrudan olarak değerlendiren bir tahsis göstergesidir. Her bir ürün birimi başına düşen su miktarını ifade eden su ayak izi, "m³/ton" biriminde ölçülür ve aynı zamanda ürünün tüm üretim adımlarının su ayak izlerinin toplamını içerir. Bu değer aynı zamanda "sanal su içeriği" olarak da bilinir.

Bir birey veya toplumun tüketilen ürünlerin toplam su ayak izi, o bireyin veya toplumun genel su ayak izini temsil eder. Benzer şekilde, bir şirketin su ayak izi, üretilen tüm ürünlerin toplam su ayak izleridir. Su ayak izini belirli bir alanda (il, devlet, bölge, nehir havzası) hesaplamak amacıyla, o alanın sınırları içinde gerçekleştirilen tüm işlemlerin toplam su ayak izi hesaplanır (Egan, 2011). Bu sebepten dolayı, su ayak izi, su tüketiminin ve kirliliğin hacimsel bir ölçüsü olarak tanımlanmakta ve üreticinin veya tüketicinin tatlı su sistemleriyle ilişkisi konusunda geniş bir bakış açısı sunmaktadır. Bu kavram, sürdürülebilir su yönetimi için kritik bir gösterge olarak kabul edilir, aynı zamanda tatlı su kaynaklarının etkili bir şekilde kullanılmasını anlamak, su tasarrufu stratejileri geliştirmek ve su kaynaklarına yönelik baskıyı azaltmak adına önemlidir. Su ayak izi analizi, su kullanımının çeşitli yönlerini değerlendirerek, su yönetiminde bilinçli kararlar alınmasına katkıda bulunur.

Su ayak izi hesaplamaları, suyun farklı amaçlar için nasıl kullanıldığına dair doğru ve zamanla ilgili bilgiler sunabilir. Su ayak izini analiz etmek, hangi sektörlerin veya ürünlerin su kaynakları üzerinde daha fazla baskı oluşturduğunu belirlemek açısından önemli bir araçtır. Farklı bölgelerde, havzalarda veya ülkelerde belirli bir su hacminin etkisini değerlendirmek için su ayak izlerine su stresi faktörleri de dahil edilmelidir (Ridoutt ve Pfister, 2010).

2.1.2. Su Ayak İzi Bileşenleri

Su ayak izi, tüketici, üretim veya bir ürünün su kullanımını üç ana bileşen içerir.

1- Yeşil Su Ayak İzi: Bu bileşen, ormancılık ve bahçecilik faaliyetlerinde kullanılan su miktarını temsil eder. Yüzey akışına katkıda bulunmayan ve yeraltı sularını beslemeyen, yağışla gelen suyun toprak ve bitki örtüsü tarafından tutulan miktarıdır.

2- Mavi Su Ayak İzi: Yüzey veya yeraltı su kaynaklarından alınan suyun buharlaşması, ürün üretimi veya alındığı yere geri dönmemesi nedeniyle oluşan tüketimi ifade eder. Sanayi, sulama tarımı ve evsel su kullanımı gibi alanlarda mavi su ayak izi bulunabilir. Bu bileşen ayrıca yağmur suyunun toplandığı sistemlerle depolanması durumunda da geçerlidir.

3- Gri Su Ayak İzi: Bu bileşen, belirli su kalitesi standartlarını karşılamak için kullanılan su içindeki kirleticilerin konsantrasyonunu düşürmek amacıyla gerekli olan tatlı su miktarını temsil eder.

Bu üç bileşen, su kullanımının farklı yönlerini ve etkilerini ölçerek daha kapsamlı bir su ayak izi analizi sağlar.

Her ülkenin veya sektörün toplam su ayak izi, mavi, yeşil ve gri bileşenlerin toplamından oluşmaktadır. Başka bir deyişle, su kullanımının toplam etkisini değerlendirmek için bu üç bileşenin kombinasyonu hesaplanır.

2.1.3. Doğrudan ve Dolaylı Su Ayak İzi

Doğrudan su ayak izi, bireylerin veya üreticilerin tatlı su tüketimi ve kirliliğiyle ilişkili olan su kullanımını ifade eder. Dolaylı su ayak izi ise tüketilen veya üretilen ürünlerin "arkasındaki" tatlı su tüketimi ve kirliliğini temsil eder. Bu, tüketicinin kullandığı ürünlerin veya üreticinin kullandığı tüm (su dışındaki) girdilerin su ayak izlerinin toplamını kapsar. Dolaylı su ayak izi, üretim veya tüketim aşamasından sonra tüketilen ve kirlenen tatlı su miktarını ifade eder.

Bir bireyin su ayak izinin büyük bir kısmı, genellikle evde kullandıkları sudan ziyade satın aldıkları ürünlerden kaynaklanır. Örneğin, bir şirketin tedarik zincirinin su ayak izi, genellikle şirketin kendi faaliyetlerinin su ayak izinden daha büyük olabilir. Tedarik zincirini iyileştirmeye yönelik yatırımlar, genellikle operasyonel su kullanımını iyileştirmeye yönelik yatırımlardan daha uygun maliyetli olabilir. Ancak tedarik zincirini göz ardı etmek, operasyonel su kullanımını geliştirmeye yönelik potansiyel yatırımları kaçırma riski taşır.

Bir tüketicinin doğrudan ve dolaylı su ayak izlerinin toplamı, o tüketicinin genel su ayak izini oluşturur. Örneğin, et tüketimi söz konusu olduğunda, etin hazırlanması ve pişirilmesi sürecinde kullanılan veya kirlenen su miktarı doğrudan su ayak izini oluştururken, etin üretim aşamasında kullanılan su miktarı dolaylı su ayak izine katkıda

bulunur. Bu durumda, perakendecinin dolaylı su ayak izi, restoranın, hayvan çiftliğinin ve mahsul çiftliğinin doğrudan su ayak izine bağlıdır (Hoekstra ve diğ., 2009).

2.1.4. Su Ayak İzi Hesaplaması

Su ayak izi hesaplaması, çeşitli kapsamlarda gerçekleştirilebilir. En küçük birimden başlayarak, bir ürünün, bir işletmenin, bir sektörün, bir tüketici grubunun veya belirli bir coğrafi bölgenin su ayak izi hesaplaması yapılabilir. Tedarik zinciri boyunca bir mal veya hizmet üretmek için gereken tatlı su miktarının ölçülmesi, hammadde işlemeden doğrudan işlemlere ve ürünün tüketici kullanımına kadar tüm proses suyunu kapsar. Üretici ve tüketici açısından bakıldığında, su ayak izi hem doğrudan hem de dolaylı su kullanımlarının bir göstergesidir (Ercin ve diğ., 2011). Tam bir su ayak izi değerlendirmesi dört farklı aşamadan oluşur: Hedeflerin ve kapsamın belirlenmesi, su ayak izi muhasebesi, su ayak izi sürdürülebilirlik değerlendirmesi ve su ayak izi karşılık formülasyonu.

Su kullanımının sürdürülebilirliğini değerlendirmek için farklı yaklaşımlar vardır. Bir ürünün su ayak izinin belirlenmesi için son literatürde iki ana yaklaşım bildirilmiştir. İlk yaklaşım, hacimsel bir konsepti izleyerek Water Footprint Network Organization/Su Ayak İzi Ağı (WFN) tarafından geliştirilmiştir (Hoekstra ve diğ., 2011). Bir ürünün yaşam döngüsündeki suyla ilgili sıcak noktaların tanımlanmasına odaklanır. “Hacimsel” su ayak izine dayanan başka bir yaklaşım yeşil, mavi ve gri su kullanımını ölçer ve haritalandırır, sürdürülebilirliği değerlendirir ve müdahale stratejilerini formüle eder. İkincisi, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) topluluğu tarafından tanıtılmış ve çevresel göstergelerin (ör. ötrofikasyon, ekotoksosite, insan toksisitesi ve su kıtlığı) değerlendirilmesine odaklanmaktadır. LCA ilkelerine (Bai ve diğ., 2018) dayalı bir su ayak izi, bir ürün veya hizmetin tüm yaşam döngüsü boyunca çeşitli çevresel etkilerini değerlendirir (Ansorge ve diğ., 2020). LCA tabanlı su ayak izi, ürünün çevresel etkilerinin en aza indirilmesine yönelik farklı alternatiflerin değerlendirilmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, en yaygın kabul gören LCA yöntemleri, su bazlı etkileri ve su kullanımını göz ardı eder (Vasilaki ve diğ., 2016).

WFN sürdürülebilirlik değerlendirmesinin ana fikri, su ayak izi muhasebesinin sonuçlarını mevcut tatlı su kaynaklarının miktarı ile karşılaştırmak ve ardından su kaynaklarının sürdürülebilirliğini değerlendirmektir. Bununla birlikte, bu konuyu

derinlemesine incelendiğinde, sorulabilecek birçok farklı türde soru olduğu ve birçok karmaşıklığın söz konusu olduğu görülebilir. Örneğin sürdürülebilirliğin farklı boyutları (çevresel, sosyal, ekonomik vb.), etkileri farklı düzeylerde formüle edilebilir (birincil, ikincil etkiler) ve su ayak izinin farklı renkleri (yeşil, mavi, gri) vardır. Birçok bilim adamı bu konuya giderek daha fazla ilgi göstermiştir. WFN tarafından yayınlanan kılavuz, mavi, yeşil ve gri su ayak izi için değerlendirme yöntemlerini ve adımlarını açıklamaktadır (Hoekstra ve diğ., 2011).

Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) tarafından Ağustos 2014'te yayınlanan uluslararası standart ISO 14046 değerlendirme yöntemi (Bai ve diğ., 2018), LCA görüşüne dayalı olarak ürün, süreç veya kuruluşun su ayak izi değerlendirmesi için ilkeleri, gereklilikleri ve yönergeleri şart koşar. Yöntem ilk olarak su ayak izi listesi sonuçlarına dayalı olarak iki ana etki kategorisine ayrılır: su kıtlığı (su miktarındaki değişikliğin neden olduğu) ve su bozulması (su kalitesindeki değişikliğin neden olduğu); daha sonra kantitatif değerlendirme göstergeleri elde etmek için liste maddeleri karakterize edilir. ISO 14046, su ayak izi değerlendirmesi için yalnızca genel süreci ve gereklilikleri şart koşar ve her sınıf su ayak izi için belirli bir karakterizasyon hesaplama yöntemi vermez. Su kıtlığı ayak izini değerlendirmek için şu anda mevcut olan modeller ve yöntemler arasında kullanıcı yoksunluğu potansiyeli, su kıtlığı göstergesi ve su stresi göstergesi yer alır. Hangi model ve yöntem olursa olsun, tatlı su tüketimini net bir şekilde hesaplanır. Bu değer, su dengesi diyagramından hesaplanan tatlı su tüketimi olabileceği gibi sahada ölçülen tatlı su alımı da olabilir. Bununla birlikte, tatlı su tüketimi, gerçek hesaplama sürecinde daha fazla belirsizliğe sahiptir ve bunların çoğu yaklaşık değerlerdir. Bu nedenle araştırmacılar, su ayak izi değerlendirmesi için WFN değerlendirme yöntemini kullanmayı tercih etmektedir. Genel olarak, WFN'ye dayalı su ayak izi, su kaynaklarının kullanımının "miktarına" odaklanırken, ISO 14046'ya dayalı su ayak izi, su kaynakları kullanımının "etkisine" daha fazla dikkat eder. İki değerlendirme yöntemi vurgu ve sonuç ifade biçiminde farklılık gösterse de, WFN değerlendirme yöntemi yalnızca doğrudan suya boşaltılan kirleticileri dikkate alırken, havaya veya toprağa boşaltılarak su kalitesini etkileyen kirleticileri, dolayısıyla karşılık gelen gri suyu dikkate almadığından ayak izi, ISO'daki su bozulması ayak izinin bir kısmına eşdeğerdir. Bu nedenle, ikisi arasında hala bir ilişki mevcuttur (Chen ve diğ., 2020).

LCA yaklaşımını benimseyenler, bir ürünün su ayak izini hesaplamada yalnızca m³/birim bilgisinin yeterli olmadığını savunmaktadır. LCA, bu bilgiye ek olarak

tüketimin yerel etkileriyle de ilgilenerek, bir ürünün su kaynaklarına olan etkisini toplum refahına ve ekosisteme göre değerlendirir. Bu perspektifi destekleyen çalışmalardan biri, su stresi yaşayan bir ülkede üretilen bir ürünün, aynı ürünün su bolluğu içindeki bir ülkede üretilse bile, tükettiği su kaynağının etkisinin farklı olabileceğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, su ayak izi hesaplamalarında su stresi faktörünün dikkate alınması gerektiği savunulmuş ve yeşil su ayak izinin bazen göz ardı edilebileceği, çünkü etkisinin olmadığı görüşü öne sürülmüştür (Huang ve diğ., 2014). Bu düşünce tarzı, Su Ayak İzi Topluluğu liderliğindeki Hoekstra ve diğer uzmanlar tarafından desteklenmiştir. Global bir kaynak olan suyun dağılımının ve hangi ürünün ne kadarını bu kaynaktan kullandığının bilinmesinin önemli olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, yeşil suyun göz ardı edilemeyeceği belirtilmiştir, çünkü bir ürün tarafından tüketilen yeşil su başka bir ürün için kullanılamaz. Bu nedenle, bir ürünün gerçek su ayak izini belirlemek için yeşil su ayak izinin önemli bir faktör olduğu tekrar vurgulanmıştır (Hoekstra ve diğ., 2009).

2.1.4.1. Bir Ürünün Su Ayak İzinin Hesaplanması

Bir üretim süreci aşaması için su ayak izinin bulunması, hesaplanan üç su ayak izinin toplanması yoluyla gerçekleştirilir. Su ayak izinin hesaplanmak istenmesi durumunda, bu bir grup üreticinin/sektörün su ayak izi olabilir, bir grup tüketicinin (toplum, bölge veya belediyenin) su ayak izi olabilir veya belirli bir coğrafi bölgenin su ayak izi olabilir. Her durumda temel, bir sürecin su ayak izinin hesaplanmasıdır. Bir ürünün su ayak izi, o ürünün üretilirken tüketilen ve kirletilen suyun toplamından oluşur. Bir ürünün su ayak izini hesaplamak için, o ürünün üretimi sırasındaki tüm süreçlerin su ayak izi toplanır. Bu noktada, ürün ağacının doğru ve detaylı bir şekilde oluşturulması, bir ürünün su ayak izinin doğru hesaplanabilmesi için önemlidir. Endüstriyel ürünlerde su ayak izinin ifade edilmesinde çeşitli yöntemler tercih edilebilir. Örneğin, m^3/adet , $m^3/\text{para birimi}$ veya gıda ürünleri için m^3/kcal gibi. Tarım ürünlerinde ise tarım ürününün cinsine ve büyüklüğüne göre m^3/ton veya m^3/adet şeklinde gösterilebilir. İkame ürünler için aynı gösterim şeklinin tercih edilmesi, tüketicinin nihai kararı üzerinde etki gösterip, karşılaştırmasına imkan verebilir.

Üretilen bir ürünün su ayak izi hesaplamasında, ürünün üretiminde kullanılan parçaların su ayak izinin bilinmesi de önemli bir etmendir. Üretimde kullanılan parçaların farklı ülkelerde üretilmiş veya işlem görmüş olması durumunda, su ayak izi

ve bileşenleri (mavi, yeşil ve gri) farklılık gösterecektir. Bir ürünün su ayak izinin hesaplanmasında iki yöntem uygulanabilir: zincirleme toplama yaklaşımı (chain-summation approach) veya adım adım biriktirme yaklaşımı (stepwise accumulative approach).

Zincirleme Toplama Yaklaşımı (Chain-Summation Approach):

Bu yöntem, en basit su ayak izi hesaplama yöntemidir ve sadece tek bir ürün üreten üretim sistemlerinde kullanılabilir. Bu yöntemde, endirekt suyun dağıtılması gibi bir sorun olmadığı için sistemdeki tüm su miktarı tek bir ürüne yüklenir ve bu ürünün su ayak izi hesaplanabilir. Bu durumu ifade eden basit bir formül şu şekildedir (Eşitlik 2.1):

$$WF_{prod}[p] = \frac{\sum_{s=1}^k WF_{proc}[s]}{P[p]} \quad [\text{volume/mass}] \quad (2.1)$$

Bu formülde, bir ürünün su ayak izinin ($WF_{prod}[s]$) hesaplanması için her bir sürecin su ayak izinin toplamının ($\sum WF_{proc}[s]$) üretilen ürün sayısına ($P[p]$) bölünmesiyle bulunduğu ifade edilmiştir. Ancak günümüzde genellikle tek tip ürün üreten tesislerin nadir olduğu düşünüldüğünde, daha karmaşık sistemlerde ve çeşitli ürünlerin üretildiği durumlarda kullanılabilecek daha özel bir yönteme ihtiyaç duyulabilir. Bu nedenle, bu bağlamda kademeli biriktirme yaklaşımını (stepwise accumulative approach) incelemek faydalı olacaktır.

Kademeli Biriktirme Yaklaşımı (Stepwise Accumulative Approach):

Kademeli biriktirme yaklaşımı, birden fazla ürün çıktısı olan üretim sistemleri için önerilen bir yöntemdir. Bu tip sistemlerde, girdilerin su ayak izlerinin çıktılara nasıl dağıtılması gerektiği sorunu ortaya çıkmaktadır. Bu işlem, çıktıların maddi değerine oranlayarak veya çıktıların ağırlıkları oranında dağıtım yapılarak gerçekleştirilebilir, ancak genellikle ikincisi çok tercih edilmez. Ayrıca, girdilerin çıktılara dönüştürülmesi sırasında kullanılan suyun da su ayak izine eklenmesi gerektiği unutulmamalıdır. Bu yöntemle önerilen işlem, su ayak izinin girdilere eklendikten sonra girdilerin su ayak

izinin çıktılarına dağıtılmasıdır (Hoekstra ve diğ., 2011). Bir ürünün su ayak izi, Eşitlik 2.2 kullanılarak hesaplanabilir:

$$WF_{prod}[p] = \left(WF_{proc}[p] + \sum_{i=1}^y \frac{WF_{prod}[i]}{f_p[p,i]} \right) \times f_v[p] \quad [\text{volume/mass}] \quad (2.2)$$

Bu formülde, $WF_{prod}[p]$, ürün p 'nin; $WF_{prod}[i]$, girdi i 'nin; ve $WF_{proc}[p]$, girdileri çıktıya çeviren sürecin su ayak izini hacim/kütle cinsinden göstermektedir. Formülde iki önemli parametre bulunmaktadır: $f_p[p,i]$ ve $f_v[p]$. İlk parametre, ürün kesirini (fraksiyonu) temsil ederken, ikinci parametre değer kesirini (fraksiyonu) ifade etmektedir. Ürün kesiri hesaplamasında kullanılan 2.3 numaralı eşitlikte, i girdisinin bir süreç sonucu p ürününe dönüşümü için her bir girdinin miktarı ($w[i]$) çıktı ürünün miktarına oranlanarak ($w[p]$) kütle elde edilir. 2.2 numaralı formülde ise paydada bulunan bu kısım, istenen birim olan kütle değerini temsil etmektedir.

$$f_p[p,i] = \frac{w[p]}{w[i]} \quad (2.3)$$

Değer kesiri, birim/para ögesi cinsinden hesaplanır. Bu hesaplama için çıktı ürünün piyasa değeri (pd), aynı girdiden elde edilen tüm çıktıların piyasa değerinin toplamına oranlanarak elde edilir:

$$f_v[p] = \frac{pd[p] * w[p]}{\sum_{p=1}^z (pd[p] * w[p])} \quad (2.4)$$

Her ürün için her zaman bir piyasa değeri bulunmayabilir. Bu durumda maliyet değeri, bir alternatif olarak kullanılabilir. 2.4 numaralı formülün payda kısmında aynı girdiden elde edilen tüm çıktıların piyasa değerlerinin toplamı yer almaktadır. Tek bir girdiden, tek bir çıktı elde edilmesi durumunda bu kısımda yapılacak hesaplama kolaylaşacaktır. Formül 2.2'nin ilgili kısmı, çıktı ürününü oluşturacak tüm girdi ürünleri için tekrarlanır ve toplanır. Son olarak, 2.2 numaralı formüldeki değerlerin yerine yerleştirilip hesaplamaya dahil edilerek adım adım biriktirme yaklaşımıyla su ayak izi

hesaplanmış olur. Günümüz üretim koşullarında zincirleme toplama yaklaşımının kullanım alanı çok sınırlıdır. Adım adım biriktirme yöntemi, zincirleme toplama yaklaşımının ürün çeşitliliği açısından eksiklerini giderdiğini iddia etse de, hem süreçte hem de girdi su ayak izlerinin çıktılara yüklenmesi konusunda önerdiği yöntemle zayıf kalmaktadır. Bu zayıflığı güçlendirmek için bu tezde önerilen yönteme üçüncü bölümde yer verilecektir.

2.1.4.2. Bitkisel Üretimin Su Ayak İzi

Bitkisel üretim, tüm bitkisel üretim faaliyetlerinin toplamını ifade eder. Bu sektör, küresel ölçekte su tüketimine en bağımlı sektörlerden biri olarak kabul edilir. Bu alanda su tasarrufunu teşvik eden sulama yöntemlerinin benimsenmesi, sulama alanlarının genişletilmesine yönelik politikaların uygulanması ve birim alandan elde edilen verimliliğe odaklanılması önemlidir (UN-Water, 2020). Bitkisel üretimde su talebi, ürün türleri, yetiştirme alanları ve sulama sistemleri gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Bitkisel su ayak izi, tarımsal ürünlerin bitki su tüketimine, yani buharlaşma değerine dayanır. Her bitki için su ihtiyacı, CROPWAT programıyla hesaplanır ve Hoekstra'nın geliştirdiği Su Ayak İzi Ağı yöntemi kullanılarak her bitkinin mavi ve yeşil su ayak izleri analiz edilir. Bu, tarımsal üretimde su kullanımının detaylı bir değerlendirmesini sağlar.

Bitkinin su kullanımı, hem bitkinin su ihtiyacına hem de mevcut toprak suyuna bağlıdır. Toprak suyu, yağmur suyu veya sulama suyu ile yenilenebilir. Bir bitkinin su ihtiyacı, ekimden hasata kadar olan süreçte ölçülen ve ideal yetiştirme koşulları altında gerçekleşen evapotranspirasyon için gerekli olan toplam sudur. Bu, açıkça bitkinin türüne ve iklim koşullarına bağlıdır. Eğer yağmur suyu yeterliyse veya kıtlık durumunda sulama ile destekleniyorsa, bitkinin fiili su kullanımı, bitkinin su ihtiyacına eşittir. Yeşil su ayak izi, bir bitkinin su ihtiyacının yağışla karşılanan kısmını gösterirken, mavi su ayak izi, bir bitkinin su ihtiyacının sulama yoluyla karşılanan kısmını ifade eder. Gri su ayak izi ise tarladan yeraltı suyuna veya yüzey suyuna sızan kirleticilerin (gübreler ve pestisitler) su kütleindeki izin verilen maksimum ve doğal kirletici konsantrasyonu arasındaki farka bölünmesiyle hesaplanır (Hoekstra, 2015).

Su kaynaklarının korunması ve etkin kullanımı için su yönetimi politikalarında su ayak izi önemli bir konudur. Özellikle tarım sektöründe üretilen ürünlerin mavi ve

yeşil su ayak izleri analiz edilerek, su kaynaklarını tehdit eden ürünler belirlenebilir. Bu, sürdürülebilir su kullanımı için stratejiler geliştirmek adına önemli bir adımdır.

2.1.4.3. Hayvansal Üretimin Su Ayak İzi

Hayvansal üretimin tarım sektöründeki su kaynakları üzerinde önemli bir etkisi vardır. Bireylerin kişisel su ayak izi, et, süt ve işlenmiş gıda tüketim miktarıyla doğru orantılıdır; bu nedenle, ne kadar çok hayvansal ürün tüketilirse, o kadar fazla su kullanılır ve su ayak izi de o kadar büyük olur (Sütirmak, 2020). Dolayısıyla, belirli bir hayvansal ürünün su ayak izinin nasıl hesaplandığını anlamak önemlidir.

Bir hayvanın ömrü boyunca olan su ayak izi, hayvanın tükettiği yem miktarının, içtiği suyun ve temizlik için kullandığı suyun toplamını içerir. Bu, hayvanın yaşamının farklı evrelerindeki diyeti ve kesim anındaki yaşı gibi faktörleri içerir. Hayvansal ürünlerin su ayak izinin büyük bir kısmını (%98), hayvanın beslenmesinin su ayak izi oluşturur. İçme suyu, servis suyu ve yem karışım suyu sırasıyla %1.1, %0.8 ve %0.03'ü temsil eder (Hoekstra, 2012). Hayvansal ürünlerin tüketimi, toplam su ayak izinin %27'sini oluşturur (Hoekstra, 2012). Küresel hayvancılık üretiminin su ayak izi 2.422 milyar m³/yıl'dır ve bu miktarın %87'si yeşil, %6'sı mavi ve %7'si gri su ayak izidir (Mekonnen ve Hoekstra, 2012).

2.1.4.4. Sanayi Su Ayak İzi

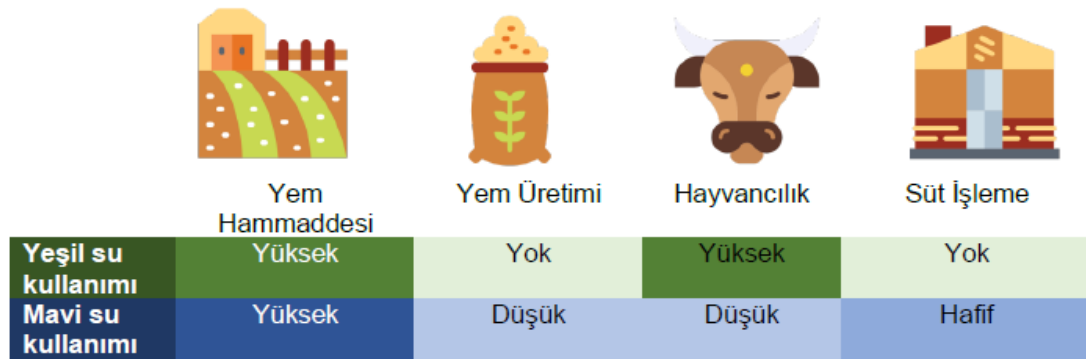
Sanayi su ayak izi, endüstriyel faaliyetlerde tüketilen su miktarını ifade eder. Küresel olarak, toplam su tüketiminin yaklaşık %19'u endüstriyel amaçlar için kullanılmaktadır. Bir işletmenin su ayak izi, işletme içinde doğrudan veya dolaylı olarak kullanılan ve kirlenen tatlı su miktarını içerir. Özellikle endüstriyel faaliyetlerin yoğun olduğu bölgelerde, gri su kavramı büyük önem taşır. Endüstriyel su ayak izi, mavi ve gri su ayak izi bileşenlerini içerir, böylece endüstriyel su kullanımının ve etkilerinin daha detaylı bir değerlendirmesi sağlanır.

2.2. Türkiye’de Süt ve Süt Ürünleri Üretimi

Süt sektörü ülke ekonomisinde ve halk sağlığının korunmasında katkısı olan en önemli sektörlerden birisidir. Bireylerin bilinçli beslenme alışkanlıkları edinmesi,

hayvansal protein tüketimiyle ilgili farkındalığın artması, ülkemizde de yıl bazında süt ve süt ürünlerinin üretiminin artmasına katkı sağlamıştır. Türkiye’de çiğ süt üretimi 2015 yılında 18,654,682 ton iken, 2021 yılında 23,200,306 tona yükselmiştir. 2021 yılında önceki yıllara kıyasla peynir, ayran, süttozu, tereyağı süt ürünlerinin üretimi de artış göstermiştir. Türkiye bunu yanı sıra 110’dan fazla ülkeye süt ve süt ürünleri ihraç etmektedir, dünya peynir üretiminde ise 4. sıradadır (Ulusal Süt Konseyi, 2021). Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) 2023 yılı 10 aylık süt ve süt ürünleri raporuna göre, ayran, inek peyniri, inek sütü, krema ve yoğurt üretiminde önceki yılın verilerine göre artış olmuştur.

Süt değer zincirinde büyük miktarda suya ihtiyaç duyan dört adım vardır: (i) yem ham maddesi üretimi, (ii) yem üretimi, (iii) hayvancılık ve (iv) süt işleme (Şekil 2.1). Süt ürünlerinin dağıtımında, perakende satışında, tüketiminde ve bertarafında su kullanımı, üretim aşamalarının diğer bölümlerindeki (toplam su kullanımının %0.1’inden daha azdır) tüketimlere kıyasla önemsiz olduğu için yazılmamıştır (Ercin, 2020).



Şekil 2.1. Süt tedarik zinciri üretim aşamalarında nispi ve doğrudan yeşil ve mavi su kullanımı. Yeşil su kullanımı, toprak nemi (yeşil su ayak izi) yoluyla yağış kullanımı anlamına gelir; mavi su ise yeraltı ve yüzey sularından (mavi su ayak izi) elde edilir/ kaynak (Ercin, 2020).

Süt tedarik zinciri boyunca en büyük su kullanımı çiftlik, yem yetiştiriciliği ve sığır yetiştirme düzeyindedir çünkü yem bitkisi üretimi ve otlatma alanları önemli miktarda suya ihtiyaç duymaktadır. Bu süreçler aynı zamanda tarım alanlarına uygulanan gübre ve böcek ilaçları nedeniyle önemli bir su kirleticisidir. Türkiye’de tarımsal üretim (yem bitkileri yetiştiriciliği) iki tür su kaynağı kullanır: yağış (tarım arazisinde depolanan toprak nemi) ve sulama (sulama sistemleri tarafından sağlanan su).

Bu su kaynaklarının kullanımı, yem bitkilerinin sırasıyla yeşil ve mavi su ayak izi olarak da bilinir (Ercin, 2020).

2.3. Literatür Araştırması

Tarım ve turizm sektörlerinin dışında günümüzde endüstriyel faaliyetlerde proses seçiminde de su ayak izi kavramı yaygınlaşmaya başlamıştır. Alternatifler içerisinde özellikle daha düşük su ayak izine sahip yöntemlerin seçimi, endüstriyel faaliyetlerde daha da önem arz etmektedir. Endüstriyel sektörlerin su ayak izi hesaplama nedenleri; bireysel organizasyonlarda su tasarrufu ve yeniden kullanım fırsatlarının tanımlanabilmesi, daha temiz üretim sağlamak, hızlı ekonomik gelişme ve nüfus artışına eşlik eden aşırı su tüketiminden kaynaklanan talep karşılamak, kişi başına düşen su kullanımının azaldığını ve düşmeye devam edeceğini gösteren dengesiz su kullanımının karşısında durmaktır (Chen ve diğ., 2020).

2012 yılında Hoekstra ve Mekonnen tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, bireysel su ayak izi yüksek uzamsal doğrulukla haritalanmış ve tarımsal ile endüstriyel varlıklara dayalı olarak varsayımsal uluslararası su akışları tahmin edilmiştir. Bu çalışma, küresel yağışın beşte birine %92 katkıda bulunan tarımsal üretimin yanı sıra, tarım ve endüstri ürünleri ticaretiyle ilgili uluslararası sanal su akışlarının toplam hacminin 2320 Gm³/yıl olduğunu ortaya koymuştur. Ortalama küresel tüketicinin yılda 1385 m³ su ayak izine sahip olduğu belirlenmiştir. Amerika Birleşik Devletleri'nde bireysel ortalama su ayak izi 2842 m³/yıl iken, Çin ve Hindistan'da bireylerin sırasıyla 1071 ve 1089 m³/yıl ortalama su ayak izine sahip oldukları tespit edilmiştir. Tahıl ürünleri tüketiminin tüketicinin su ayak izine en büyük katkıyı sağladığı, bunu et (%22) ve süt ürünleri (%7) takip ettiği belirlenmiştir. Çalışma, birçok ülkenin yabancı su kaynaklarına yüksek oranda bağımlı olduğunu ve birçok ülkenin başka bölgelerdeki su tüketimi ve kirliliğinin küresel ölçekte önemli etkileri olduğunu göstererek su tüketimi ve kirliliğinin küresel boyutunu vurgulamaktadır (Hoekstra ve Mekonnen, 2012).

Zhao ve diğ., (2015) tarafından gerçekleştirilen bir çalışma, Çin'de Leshan kentinde su ayak izini 1992-2012 yıllarında değerlendiren örnek bir vaka çalışması sunmuştur. 2012 yılında toplam su ayak izi 2001 yılına göre %43.13 oranında artmıştır. Bitkisel üretim ve hayvansal ürünler, toplam su ayak izinin yaklaşık %41.53'ünü ve %27.44'ünü oluşturan başlıca su tüketimi sektörleri olarak tanımlanmaktadır. Su ayak izi değerlendirmesinin kentsel su yönetiminin iyileştirilmesi konusunda fikir vermesi

beklenmektedir. Örneğin bitkisel üretim ve hayvansal ürünler çalışmada en çok su tüketilen sektörler olarak belirlenmiştir. Bu nedenle, ilgili su ayak izini azaltmak amacıyla, mahsullerin su verimliliğini artırmak ve su dağıtım kaybını en aza indirmek için su tasarruflu sulama tavsiye edilir. Ancak bu çalışmada bazı sınırlamalar bulunmaktadır. İlk olarak, belirlenmiş bir sektördeki farklı kaynaklardan gelen spesifik su ihtiyacı, örneğin suyun kaynağı dikkate alınmamıştır. İkincisi, mavi ve yeşil su arasındaki su dengesi gibi su ayak izi muhasebesinin iç yapısı bu çalışmada göz ardı edilmiştir. Sürdürülebilir su yönetimini teşvik etmek amacıyla iç yapıyı incelemek ve muhasebe için daha kesin bir sistem sınırı oluşturmak amacıyla daha sonraki çalışmalar değerlendirmenin iyileştirilmesine odaklanacaktır.

Şahin (2018) tarafından gerçekleştirilen bir çalışma, tarım sektöründeki su tüketiminin değerlendirilmesi aracılığıyla sürdürülebilir su yönetimi çalışmalarında su ayak izi kavramının nasıl kullanılabileceğini ele almaktadır. Türkiye ve Antalya ölçeğinde 10 farklı bitkisel ürünün sulama suyu ihtiyacı karşılaştırılmış ve Antalya'da 6 bitkinin sulamasının dünya ortalamasının üzerinde olduğu belirlenmiştir.

Muratoğlu'nun (2019) çalışmasında, 2008-2019 yılları için Diyarbakır'da tarım, hayvancılık, endüstriyel üretim ve evsel kullanım kaynaklı mavi ve yeşil su ayak izleri incelenmiştir. Ortalama su ayak izi yıllık 3.43 milyar m³ olarak tahmin edilmiş, su kaynaklarının %86'sının tarımsal faaliyetlerde kullanıldığı ve mevcut tatlı suyun %49'unun yüzey ve yeraltı sularından sağlandığı belirlenmiştir. Kurak dönemde bu oranın %62 seviyesine yükseldiği belirlenmiştir.

Ewaide ve diğ. (2019) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, Irak'ta 2016-2017 yılları için farklı bölgelerde buğday üretiminin su ayak izi tahmin edilmiştir. Araştırma, 15 il için su ayak izindeki farklılıklara odaklanmış ve bu farklılıkların iklim ve üretim değerlerindeki çeşitlilikten kaynaklandığını belirlemiştir. Yüksek su yaka izine sahip illerde buğdayın yerine daha az su gerektiren ve ekonomik olarak daha avantajlı olan diğer ürünlerle değiştirilmesi önerilmiştir. Üretim planlaması ilçe'deki su mevcudiyetine dayanmalıdır ve mahsulün su ihtiyacını, mavi suya bağımlılığı ve Irak'ta yetiştirilen mahsuller için suyun ekonomik değerini anlamak, sürdürülebilir tarımın planlanması için temeldir. Su tahsisinde verimlilik, üretimin mekânsal ve geçici olarak planlanmasıyla artırılabilir. Bir mahsulün ekonomik değeri, uygun mahsul seçimi yoluyla kârın optimize edilmesine ve su tahsisinin optimize edilmesine yardımcı olabileceğinden, böyle bir planlama için yararlı bir gösterge sağlar. Ekonomik faaliyetin, insanların dahil olduğu yerel su kaynakları üzerindeki etkisini ilişkilendirerek

tüketici davranışlarında ve modellerinde değişiklik yaratmak, bunun çevre üzerinde yarattığı baskının azaltılmasına yardımcı olabilir. Bir ürünün WF'sini bilmek, tüketim kalıplarında değişiklik yapılmasına yardımcı olur ve su tasarrufu davranışını benimsemeye yardımcı olur. İklim değişikliğine ilişkin tartışma ve eylemin tüm yapısı 'karbon ayak izi' ölçüsü üzerine inşa edilmiştir. Bu, küresel iklim yönetimi ihtiyacının anlaşılmasına yol açmış ve Kyoto Protokolü kapsamındaki amaç küresel kurumlara dönüşmüştür. WF kavramının bu tür davranış değişikliklerini tetikleme potansiyeli de bulunmaktadır.

Batan (2021) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, kurak ve yağışlı yılların su ayak izine etkisini belirlemek amacıyla Şanlıurfa ilinde 2009-2019 yılları için tarım, hayvancılık su ayak izi, endüstriyel ve evsel su ayak izinin mavi ve yeşil su ayak izinin analiz edilmesi, birim ton fiyatlarının ilde üretilen ürünlerin sanal su içerikleri ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Şanlıurfa ilinin 2009-2019 yılları için ortalama toplam su ayak izi hesaplanmıştır. 8.01 Gm³tür. Tarımsal üretim toplam su ayak izinin %91'ini oluşturduğu, araştırma alanında tarımsal üretimde en çok su tüketen ürünlerin pamuk, buğday, fıstık, arpa, mısır ve mercimek olduğu tespit edilmiştir. Özellikle pamuk, buğday ve fıstık üretimine yönelik su tüketimi, toplam tarımsal su ayak izinin %62'sine karşılık gelmektedir. Hayvancılığın toplam miktar içindeki su ayak izi oranı %7, evsel ve endüstriyel tüketimin su ayak izi oranı ise %2 olarak bulunmuştur. Mevcut tatlı suyun mavi su kaynaklarından karşılanma oranının %64 olduğu tespit edilmiştir. Kurak mevsimde bu oranın %66'ya kadar ulaştığı gözlemlenmiştir. Kuraklığın etkisini görebilmek amacıyla kurak ve yağışlı sezonlara yönelik tarımsal üretim analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre kurak mevsimdeki tarımsal su ayak izi yağışlı mevsim ve ortalamadan daha yüksek bulunmuştur. Aynı şekilde kurak mevsimdeki tarımsal mavi su ayak izi yağışlı mevsim ve ortalamadan daha yüksek bulunmuştur.

Alqahtani ve diğ., (2021) tarafından gerçekleştirilen bir çalışma, Suudi Arabistan'da bireylerin su ayak izinin unsurlarını ve toplam su ayak izini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Çalışmanın bulgularına göre, bireylerin ortalama toplam su ayak izi yaklaşık olarak 2329 m³/kişi/yıl olarak belirlenmiştir. Bu su ayak yaklaşık %80'ini gıda, yaklaşık %20'sini ise evsel ve endüstriyel kullanım su ayak izi oluşturmuştur. Varyans analizi sonuçları, aile geliri ve aile büyüklüğünün birey su ayak izini etkilediğini, cinsiyete göre kişi başına ortalama endüstriyel su ayak izi arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamsız olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, ülkedeki topluluk

üyelerinin su kullanımındaki kalıp ve davranışlarını yönlendirebilecek politikalar ve programların önemini vurgulamaktadır.

Zhuo ve diğ., (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışma, 1996-2005 döneminde Çin'deki Sarı Irmak havzasında yetiştirilen mısır, soya fasulyesi, pirinç ve buğdayın yeşil ve mavi su ayak izine odaklanmıştır. Mahsul su ayak izinin kısmi değişikliklerine duyarlılığını analiz etmek için her bir ekin türü için ayrı yöntemler uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, hassasiyetlerin ve belirsizliklerin farklı ekin türleri arasında değişiklik gösterdiğini ortaya koymuştur. Genel olarak, mahsullerin su ayak izinin en çok referans buharlaşma ve mahsul katsayısına duyarlı olduğu belirlenmiştir.

Dourte ve diğ., (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ABD'deki tarımsal üretimin mevsimsel su ayak izini tahmin etmek amacıyla dinamik bir web kaynağı oluşturulmuştur. Bu araç, mekan, zaman, toprak ve yönetimdeki değişimlere tepki veren bir sistem özelinde su ayak izi hesaplamak için kullanılabilecek bir yöntem sunmaktadır. Var olan bir mahsul büyüme modelinde yapılan değişikliklerle elde edilen bu model, su kaynakları üzerindeki etkilerin doğrudan değerlendirilebileceği bir araç sunmaktadır. Ayrıca, bölgesel su kullanımını ve mevcut kaynaklara dayalı yerel bir su stresi endeksi oluşturmayı mümkün kılar.

Dünya nüfusunun artması nedeniyle gıda talebinde beklenen artış ve özellikle gelişmekte olan ülkelerde diyetlerin daha fazla hayvansal kaynaklı ürün alımına doğru geçişi, gıda üretiminin çevresel etkisinin olası artışı konusunda endişe oluşturmaktadır. Bu tehditler arasında biyolojik çeşitlilik kaybı ve ekosistem hizmetlerinin yenilenme kapasitesinin bozulması çok önemli bir rol oynamaktadır. Gıda üretiminden başlayarak gıda tüketimine ve bertarafına kadar uzanan süreçler bütünü olarak kabul edilen sürdürülebilir gıda sistemlerinin, gelecekteki gıda talebini (hem nitelik hem de nicelik olarak) karşılamak için tanımlanması, doğal kaynakların sınırlı mevcudiyeti ve mevcut gıda sistemlerinin doğal kaynaklara yönelik tehditleri nedeniyle kısıtlamalar altındadır. Bu hedefe ulaşmak için çevre sağlığına saygı duyarak insan sağlığını iyileştirebilecek diyetlerin tanımını destekleyen metodolojik çerçeveler ve modelleme araçları geliştirmesi önemlidir (Gibin ve diğ., 2022).

Gıda üretiminin tatlı sular üzerindeki baskısını değerlendirmek, çevresel zararı azaltmaya yönelik herhangi bir girişimde hayati önem taşır ve bunu yapmanın köklü bir yöntemi, üretimle ilgili su ayak izini hesaplamaktır. Bir su ayak izi, belirli bir kütle veya hacimdeki ürünü veya bir ürünü üretmek için kullanılan tatlı su hacmini belirler. Doğrudan ve dolaylı olarak tedarik zinciri genelinde hizmet vererek, ürünler arasında

tatlı su etkisinin göreceli olarak karşılaştırılmasına olanak tanır. Tüketim su ayak izi, yağmur suyu (yeşil su ayak izi) ve yeraltı suyu veya yüzey suyu (mavi su ayak izi) tüketimini ifade eder. Parçalayıcı su ayak izi, gri su ayak izidir ve bir ürünün üretimi sonucunda üretilen kirleticileri, alıcı suyun kalitesinin belirli su kalitesi standartlarının üzerinde kaldığı ölçüde seyreltmek için gereken su hacmidir. Yoğun gıda üretiminden su kütlelerine yayılan kirleticiler, özellikle azot, insan ve ekosistem sağlığını korumak için büyük hacimlerde suyun yeterince seyreltilmesini gerektirir. Küresel olarak, azotun gri su ayak izinin dörtte üçü, çoğunlukla tarım olmak üzere yaygın kaynaklardan ortaya çıkmaktadır. Yeni Zelanda'nın Canterbury Bölgesi, son otuz yılda hızlı ve önemli bir arazi kullanımı yoğunlaşmasına maruz kalmıştır ve bu da çevreye sızan nitrat azotunda önemli bir artışa neden olmuştur. Bu bölgede, Joy ve diğ., (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, süt üretim birimi başına farklı alıcı su nitrat standartlarını karşılamak için kaynak bölgesinden sızan azotu seyreltmek için gereken su miktarı olan sütün nitrat gri su ayak izini belirlenmiştir. Analizler, uygulanan su standartlarına bağlı olarak Canterbury için nitrat gri su ayak izinin bir litre süt başına 433 ila 11,110 litre su arasında değiştiğini ortaya koymuştur. Bu ayak izi, küresel süt üretimi için birçok hesaplamalardan daha yüksektir ve ayak izlerinin, analizlerde yer alan girdilere ve alıcı suya uygulanan su kalitesi standartlarına çok bağlı olduğunu ortaya koymaktadır

Gıda üretimi, toplam insan kaynaklı su ayak izinin %70'ini oluşturur, bu nedenle daha sürdürülebilir diyetler, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılmasına katkıda bulunabilir. Yapılan bir çalışmada temsili bir diyet anketine dayalı olarak Macaristan örneğinde, diyet su ayak izi azaltılmış, kültürel olarak kabul edilebilir ve daha sağlıklı diyetler oluşturmak için doğrusal programlamaya dayalı aşamalı bir optimizasyon tasarlanmıştır. Optimizasyon, ılımlı bir diyet değişikliğiyle (~%32) önemli bir toplam diyet su ayak izi azalmasıyla (kadınlar: %18; erkekler: %28) sonuçlanmıştır. Süt ve süt ürünleri (gözlemlenen: ~%31,5, optimize edilen: ~%20,5) ve et ve et ürünleri (gözlemlenen: ~%28,0, optimize edilen: %28,9) diyet su ayak izine en çok katkıda bulunanlar olmuştur. Daha sağlıklı bir diyetin su ayak izi faydaları ve dolayısıyla bu iki yön arasında bir sinerji sağlayabileceği görülmüştür (Tompá ve diğ., 2022).

Kentsel diyetler, daha yüksek yaşam standartları ile orantılı olarak, kırsal diyetlere göre daha yüksek su ayak izi sunar. Farklı gıda tüketim modları ve sosyo-ekonomik ve coğrafi özellikler nedeniyle su ayak izlerinde önemli değişkenlikler olabilmektedir. Tunus'ta yapılan bir çalışmada gıda tüketim su ayak izi, WFN yöntemini izleyerek, coğrafi konuma ve gıda ürünleri grubuna göre değerlendirilmiştir.

Su tüketimi ile ilgili yedi ana gıda ürünü grubunu ele alınmıştır: tahıllar, sebzeler, meyveler, et, süt ürünleri, bitkisel yağlar ve yumurtalar. Kahve, çay, baharatlar ve şekerler hariç tutulmuştur, çünkü bu gruplar düşük tüketim miktarlarını/hacimlerini temsil etmekte, bu da düşük bir su ayak izi katkısı anlamına gelmektedir. Ayrıca gıda güvenliği açısından stratejik gıda ürünleri değildirler. Bu çalışmada, başta kırmızı et olmak üzere hayvansal kaynaklı gıda tüketimindeki artışın, su ayak izini zaman ve mekân açısından önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir. Kentsel diyetler, daha yüksek yaşam standartları ile orantılı olarak, kırsal diyetlerden daha yüksek su ayak izi anlamına gelmektedir. Diyetteki dahili mavi su ayak izinin payını en aza indirmek için tahıllar, baklagiller ve bazı meyve ağaçları gibi yağmurla beslenen mahsullerin üretimini desteklemek ve aynı zamanda sanal su kavramını uluslararası ticaret stratejilerinde etkili bir parametre olarak entegre etmek önemlidir. Tunus'ta gıda güvenliği stratejilerini ve su yönetimini iyileştirmek amacıyla su ayak izini azaltmak için politika yapıcılar tarafından fiyat politikaları, tüketicilerin duyarlı hale getirilmesi ve üretim sistemlerindeki değişikliklerle ilgili özel önlemlerin alınması gerekebilir (Souissi ve diğ., 2019).

Hayvansal ürünlerin tüketimindeki artışın dünyanın tatlı su kaynakları üzerinde baskı oluşturması muhtemeldir ve su kıtlığı sürdürülebilir kalkınma için tehdit oluşturabilir. Süt hayvancılığı, sadece hayvanlar için içme ve temizleme suyu olarak doğrudan tüketim suyu kullanımını değil, aynı zamanda yeme gömülü dolaylı suyu da içeren su yoğun bir faaliyettir. Su ayak izi, sürdürülebilir süt hayvancılığı için bir araç olarak kullanılabilir. Su ayak izi, doğrudan ve dolaylı kullanım dahil olmak üzere sütü üretmek için kullanılan toplam su hacmini hesaplar. Sütün su ayak izi, yem dönüştürme verimliliğine, yem bileşimine ve yem kaynağına bağlıdır. Yem üretimi su ayak izine maksimum katkı sağlar. Su ayak izi, süt üretimindeki suyu hesaplamak için kullanılacak sürdürülebilir süt hayvancılığı için bir araç görevi görebilir. Ana dolaylı bileşen olduğu için, mahsul üretimi için su kullanımının azaltılmasıyla esas olarak azaltılabilir. Yüksek mahsul verimliliği (damlama ve yağmurlama gibi sulama yöntemleri, hassas arazi tesviyesi, malçlama), az su tüketen yüksek besin değeri olan yem bitkileri, uygun besleme modelleri, su tasarrufu teknikleri (su bütçesi, bahçeleri yıkamak için atık yıkama suyunun kullanılması, çatı suyu) toplanması ve daha büyük hacimli ineklere geçerek süt verimliliğinin artırılması, sütün daha sürdürülebilir bir şekilde su üretimine olanak tanıyarak su ayak izini azaltabilir (Thakur ve diğ., 2018).

Yapılan bir çalışmada (Mekonnen ve Hoekstra, 2010) farklı türlerdeki çiftlik hayvanları ve hayvansal ürünlerin küresel yeşil, mavi ve gri su ayak izlerinin kapsamlı bir açıklaması, farklı üretim sistemlerini birbirinden ayırarak ve dünyanın tüm ülkelerindeki koşulları ayrı ayrı ele alarak sunulmuştur. Aşağıdaki hayvan kategorileri dikkate alınmıştır: besi sığırı, süt sığırı, domuz, koyun, keçi, etlik piliç, yumurta tavuğu ve atlar. Çalışma, besi sığırlarından elde edilen etin su ayak izinin (küresel ortalama olarak 15400 m³/ton), koyundan (10400 m³/ton), domuzdan (6000 m³/ton), keçiden (5500 m³/ton) veya tavuktan (4300 m³/ton) elde edilen etin ayak izinden çok daha büyük olduğunu göstermektedir. Tavuk yumurtasının küresel ortalama su ayak izi 3300 m³/ton iken, inek sütünün su ayak izi 1000 m³/ton'dur. Bir ton ürün başına, hayvansal ürünler genellikle bitkisel ürünlerden daha büyük bir su ayak izine sahiptir. Kalori başına su ayak izine baktığımızda da aynı şey geçerlidir. Sığır eti için kalori başına ortalama su ayak izi, tahıllar ve nişastalı köklerden yirmi kat daha fazladır. Protein için su gereksinimlerine baktığımızda, süt, yumurta ve tavuk eti için gram protein başına düşen su ayak izinin bakliyalara göre yaklaşık 1.5 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Sığır eti için, gram protein başına su ayak izi baklagillere göre 6 kat daha fazladır. Yağ söz konusu olduğunda, tereyağının gram yağ başına nispeten küçük bir su ayak izine sahip olduğu, hatta yağlık ürünlerden bile daha düşük olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, diğer tüm hayvansal ürünler, petrol mahsullerine kıyasla gram yağ başına daha büyük su ayak izine sahiptir. Çalışma, tatlı su kaynakları açısından bakıldığında, bitkisel ürünlerden kalori, protein ve yağ elde etmenin hayvansal ürünlerden daha verimli olduğunu göstermektedir. Küresel hayvan üretimi yılda yaklaşık 2422 Gm³ su gerektirir (%87.2 yeşil, %6.2 mavi, %6.6 gri su). Bu hacmin üçte biri besi sığırıcılığı sektörü için; %19'u ise süt sığırıcılığı sektörü içindir. Toplam su hacminin çoğu (%98), hayvanlar için yemin su ayak izini ifade eder. Hayvanlar için içme suyu, servis suyu ve yem karma suyu sırasıyla sadece %1.1, %0.8 ve %0.03'tür. Hayvansal ürünlerin su ayak izleri üç ana faktörden anlaşılabilir: hayvanın yemden yararlanma etkinliği, yemin bileşimi ve yemin menşei. Üretim sisteminin türü (otlatma, karma, endüstriyel) önemlidir, çünkü üç faktörü de etkiler. Hayvansal ürünlerin su ayak izlerindeki ilk açıklayıcı faktör, yemden yararlanma verimliliğidir. Hayvansal ürün birimi başına ne kadar çok yem gerekiyorsa, (yemi üretmek için) o kadar çok su gerekir. Besi sığırları için elverişsiz yem dönüştürme verimliliği, sığır etinin nispeten büyük su ayak izinden büyük ölçüde sorumludur. Koyun ve keçiler de, sığırlardan daha iyi olmasına rağmen, olumsuz bir yem dönüştürme verimliliğine sahiptir. İkinci bir faktör, yem bileşimi, özellikle

konsantrelerin kaba yemlere oranı ve konsantredeki değerli mahsul bileşenlerinin mahsul kalıntılarına karşı yüzdesidir. Tavuk ve domuz, yemlerinde nispeten büyük oranda tahıl ve küspe içerir, bu da yemlerinde nispeten büyük su ayak izlerine neden olur ve olumlu yem dönüştürme verimliliklerinin etkisini ortadan kaldırır. Bir hayvansal ürünün su ayak izini etkileyen üçüncü bir faktör, yemin menşesidir. Belirli bir hayvansal ürünün su ayak izi, çeşitli yem bileşenlerinin elde edildiği bölgelerdeki iklim ve tarımsal uygulamalardaki farklılıklar nedeniyle ülkeler arasında değişiklik gösterir. Bazen yemin nispeten büyük bir kısmı ithal edildiğinden, diğer zamanlarda ise yem çoğunlukla yerel olarak elde edildiğinden, su ayak izinin sadece boyutu değil, aynı zamanda mekansal boyutu da yemin tedarik edilmesine bağlıdır. Bir hayvansal ürünün hangi tür üretim sisteminden elde edildiğini dikkate almak önemlidir: otlatma, karma veya endüstriyel sistem. Endüstriyel üretim sistemlerinden elde edilen hayvansal ürünler, süt ürünleri hariç (çok az farkın olduğu yerlerde), ortalama sistemlerinden elde edilen ürünlerden genellikle ürün birimi başına daha küçük toplam su ayak izine sahiptir. Bununla birlikte, endüstriyel sistemlerden gelen ürünler, otlatma sistemleriyle karşılaştırıldığında her zaman ton ürün başına daha büyük mavi ve gri su ayak izine sahiptir, bu sefer tavuk ürünleri istisnadır. Daha küçük toplam ayak izini açıklayan, endüstriyel sistemlerdeki daha düşük yeşil su ayak izidir. Tatlı su sorunlarının genellikle mavi su kıtlığı ve su kirliliği ile ve daha az ölçüde yeşil su rekabeti ile ilgili olduğu gerçeği göz önüne alındığında, bu, su kaynakları açısından endüstriyel üretim sistemleri yerine otlatma sistemlerinin tercih edildiği anlamına gelir. Sığır, domuz, koyun ve keçilerde, yemden yararlanma verimlerinin daha kötü olması nedeniyle, otlatma sistemleri için ton ürün başına toplam su ayak izi daha fazladır, ancak bu sistemlerin daha çok kaba yemlere (konsantre yemde bulunan yem bitkilerine göre daha az sulanan ve daha az gübrelenen) bağlı olması, otlatma sistemlerinden gelen ürünlerin mavi ve gri su ayak izlerinin daha küçük olmasını sağlar. Yem bileşimi yoluyla bu telafi, tavuk durumunda gerçekleşmez. Bunun nedeni, tavuğun tüm üretim sistemlerinde konsantre yemlere büyük ölçüde güvenmesidir. Karma üretim sistemleri genellikle endüstriyel ve otlatma sistemleri arasında yer almaktadır. Bu çalışmada dikkate alınmayan, sanayileşmiş hayvansal üretimin çoğu zaman yakın arazide tamamen geri dönüştürülemeyen büyük miktarlarda hayvansal atık üretmesidir. Yoğun bir yerde üretilen bu kadar büyük miktarlarda atığın, uygun şekilde işlenmediği takdirde tatlı su kaynaklarını kirlettiği bilinmektedir.

Mekonnen ve Hoekstra (2012) tarafından yapılan çalışmada, hayvan türü ve ülke bazında farklı üretim sistemleri ve yem bileşimi dikkate alınarak, hayvansal ürünlerin su

ayak izleri incelenmiştir. Dünyadaki tarımın toplam su ayak izinin yaklaşık üçte biri hayvansal ürünlerin üretimi ile ilgilidir. Herhangi bir hayvansal ürünün su ayak izi, eşdeğer besin değerine sahip bitkisel ürünlerin su ayak izinden daha büyüktür. Sığır eti için kalori başına ortalama su ayak izi, tahıllar ve nişastalı köklerden 20 kat daha fazladır. Süt, yumurta ve tavuk eti için gram protein başına düşen su ayak izi, baklagillere göre 1.5 kat daha fazladır. Hayvansal ürünler için elverişsiz yem dönüşüm verimliliği, hayvansal ürünlerin mahsul ürünlerine kıyasla nispeten büyük su ayak izinden büyük ölçüde sorumludur. Endüstriyel sistemlerden elde edilen hayvansal ürünler genellikle otlatma veya karma sistemlerden elde edilen hayvansal ürünlerden daha fazla yeraltı ve yüzey suyu kaynaklarını tüketir ve kirletir. Artan küresel et tüketimi ve hayvansal üretim sistemlerinin yoğunlaşması, önümüzdeki yıllarda küresel tatlı su kaynakları üzerinde daha fazla baskı oluşturacaktır. Çalışma, tatlı su perspektifinden bakıldığında, otlatma sistemlerinden elde edilen hayvansal ürünlerin endüstriyel sistemlerden elde edilen ürünlerden daha küçük mavi ve gri su ayak izine sahip olduğunu ve hayvansal ürünlere göre bitkisel ürünlerden kalori, protein ve yağ elde etmenin su açısından daha verimli olduğunu göstermektedir. Sonuçlar, hayvansal ürünlerin (tavuk ürünleri hariç) mavi ve gri su ayak izlerinin endüstriyel sistemler için en büyük olduğunu göstermektedir. Herhangi bir hayvansal ürünün su ayak izi, eşdeğer besin değerine sahip bitkisel ürünlerin su ayak izinden daha büyüktür. Son olarak, dünyadaki tarım sektörünün toplam su ayak izinin %29'u hayvansal ürünlerin üretimi ile ilgilidir; Hayvansal üretimin küresel su ayak izinin üçte biri besi sığırlarıyla ilgilidir. Hayvansal ürünlere yönelik bu artan talebi karşılamak için, geleneksel kapsamlı ve karma çiftçilikten endüstriyel çiftçilik sistemlerine geçiş devam edecek gibi görünmektedir. Endüstriyel sistemlerde konsantre yemlere daha fazla bağımlılık nedeniyle, hayvansal üretim sistemlerinin bu şekilde yoğunlaşması, hayvansal ürün birimi başına mavi ve gri su ayak izlerinin artmasına neden olacaktır. Böylece hem artan et tüketimi hem de tüketilen birim et başına artan mavi ve gri su ayak izi nedeniyle küresel tatlı su kaynakları üzerindeki baskı artacaktır. Bu çalışma, hayvansal ürünlerin küresel su kaynakları üzerinde nasıl baskı oluşturduğunu belirleyen faktörler hakkında daha sonra yapılacak araştırmalar için zengin bir veri kaynağı sunmaktadır. Bildirilen yeraltı sularının tükenmesi, nehirlerin kuruması ve artan kirlilik seviyeleri, artan su kıtlığının bir göstergesidir. Hayvansal üretim ve tüketim, dünyanın kıt tatlı su kaynaklarının tüketilmesinde ve kirletilmesinde önemli rol oynadığından, hayvansal

ürünlerin su ayak izi, kıt tatlı su kaynaklarını nasıl sürdürülebilir bir şekilde kullanabileceğimizi anlamamıza yardımcı olacaktır (Mekonnen ve Hoekstra, 2012).

Süt ürünleri, insan beslenmesinin vazgeçilmez bir yönü ve Avrupa'daki gıda endüstrisinin en büyük ve en önemli alt sektörlerinden biridir. Ancak bunların üretimi, sera gazı emisyonları ve su ve enerji tüketimi gibi ciddi çevresel etkilerle ilişkilidir. Yapılan bir çalışma, İspanyol La Fageda süt fabrikasındaki çeşitli yoğurt türlerinin LCA tabanlı su ayak izi (WF) ve karbon ayak izini (CF) değerlendirmektedir. 1 kg yoğurt üretimi için toplam su tüketimi 204 L su ve sera gazı emisyonu 1.94 kg CO₂ eşdeğeridir. Tesisin doğrudan etkileri açısından, yerinde temizlik ve temizlik operasyonları su ihtiyacının %70'ini, buzdolapları, pastörizasyon ve paketlenme ise tesisteki enerji tüketiminin %70'ini oluşturmaktadır. Su ve karbon ayak izi, üretim sürecine ve bölgeye göre değişir. Duyarlılık analizi, yüksek yağış ve çiğ süt üretimi için farklı tekniklerin uygulanmasının, su kullanımı açısından tesisin doğrudan etkilerinin katkısını %2'den %15'e çıkardığını göstermektedir. Bu çalışmanın bulguları, yoğurdu çevresel profilinin, işleme aşamalarında ürün kayıplarının ve atık oluşumunun azaltılması yoluyla iyileştirilebileceğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, gıda endüstrisinden kaynaklanan atıklarla ilgili sanal su kayıpları hakkında hala sınırlı bilgi bulunmaktadır (Vasilaki ve diğ., 2016).

Palhares ve Pezzopane, (2015) tarafından yapılan bir çalışmada, hem geleneksel hem de organik süt ürünleri üretim sisteminin su ayak izini değerlendirmek ve yeşil, mavi, gri su ve sanal su açısından en fazla su kullanımına sahip bileşenleri ve süreçleri belirlemek hedeflenmiştir. Ek olarak, elementin gri su ayak izi üzerindeki etkisi analiz edilmiş ve su kıtlığını değerlendirmek için göstergeler kullanılmıştır. Yeşil su ayak izi, toplam ayak izi değerlerine en önemli katkıyı yapmıştır. Sanal su, geleneksel için ayak izi değerinin %39 ila %57'sini ve organik için %32 ila %59'unu temsil etmektedir. Sulama için su tüketimi mavi suyun en büyük yüzdesini, %95'ini konvansiyonel ve %96'sını organik olarak oluşturmuştur. Gri su ayak izini hesaplamak için kullanılan öge, değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Element olarak fosfor içeriğine göre hesaplanan ayak izleri, geleneksel ve organik için sırasıyla 1.5 ve 1.9 kat daha yüksektir. Çalışmada, su mevcudiyetine bağlı olarak, daha düşük su ayak izine sahip bir ürünün, daha yüksek su ayak izine sahip bir ürüne göre çevreye daha fazla zarar verebileceği sonucuna varılmıştır. Su ayak izi hesaplamaları, hayvan beslenmesi ile su verimliliği arasındaki ilişkiyi kanıtlamıştır. Kesin bir beslenme yönetimi, atıksudaki

yeşil ve mavi su tüketimini ve besin yükünü azaltmaktadır (Palhares ve Pezzopane, 2015).

Yapılan bir çalışmada (Drastig ve diğ., 2010), Brandenburg'da (Almanya) mandıracılık için mavi su talebinin hesaplanması sunulmuştur. Çalışmada ineklerin 10 yıllık süreçte yemleme, süt işleme ve bakım için kullandıkları su değerlendirilmiştir. Doğrudan mavi su ayak izi hesaplamasının ilk sonuçları, Brandenburg'da hayvan sayısının azalması ve inek başına ortalama süt veriminin artması nedeniyle süt üretiminde 1999 yılında 5.98×10^9 L/yıl olan su talebinin 2008 yılında 5.00×10^9 L/yıl'a düştüğünü göstermektedir. İyileştirilmiş besleme uygulamaları ve daha büyük hacimli Holstein-Friesian inek üretimine kaydırılan yetiştirme, sütün daha sürdürülebilir bir şekilde su üretimine olanak tanımaktadır. 1999-2008 yılları arasında 1 kg süt üretimi için ortalama mavi su tüketimi 3.94 ± 0.29 L'dir. Tüketilen suyun büyük bir kısmının inek yemi üretiminde dolaylı olarak kullanılan yeşil sudan kaynaklandığı görülmektedir (Drastig ve diğ., 2010).

Yapılan bir başka çalışmada (Huang ve diğ., 2014), Çin'de süt endüstrisinde su kullanımının çevresel etkilerini belirlemek amacıyla, büyük bir üretim bölgesi olan Heilongjiang'daki büyük ölçekli üretim sistemleri için su kullanılabilirliği ayak izini hesaplamak üzere yaşam döngüsü değerlendirmesi kullanılmıştır. ABD (Kaliforniya) ve Yeni Zelanda'dan ithal edilen ürünlerle de karşılaştırmalar yapılmıştır. Su tüketimi, yağ ve protein içeriği %4.0 yağ ve %3.3 protein standardına göre düzeltilmiş yağ ve protein düzeltilmeli süt (FPCM) miktarına göre ifade edilmiştir. Heilongjiang'da üretilen sütün (başlangıçtan çiftliğe kadar) su ayak izi yaklaşık 11 L H_2O_e (H_2O eşdeğerleri)/kg FPCM olarak bulunmuştur. Bu, Kaliforniya ve Yeni Zelanda'daki üretim için sırasıyla 461 ve 0.01 L H_2O_e /kg FPCM ile karşılaştırılmıştır. Buna göre, Heilongjiang'da üretilen süt ürünlerinin (başlangıçtan fabrika kapısına kadar) su ayak izleri, Kaliforniya'dan ithal edilenlerden çok daha düşük, ancak Yeni Zelanda'dan ithal edilenlerden daha yüksek bulunmuştur. Buna göre, gıda endüstrisi açısından bakıldığında, süt ürünleri tedarikinin Kaliforniya'dan Yeni Zelanda'ya veya Heilongjiang'a kaydırılması, süt bazlı işlenmiş gıdaların ilgili yaşam döngüsü su ayak izlerini büyük ölçüde azaltabilir. Çalışmanın sonuçları, süt ürünlerinin tatlı su kıtlığının önlenmesine katkıda bulunmak için minimum potansiyelle üretilebileceğini vurgulamaktadır. Bununla birlikte, süt ürünleri üretim sistemleri, hem üretim modeli hem de yerel çevre bağlamında değişiklik gösterir. Çin'de mandıra çiftçiliğinin yaygınlaşmasıyla, su sıkıntısı çeken bölgelerde yüksek

tüketim suyu gereksinimleri olan tarım sistemlerinin geliştirilmesinden kaçınılmalıdır (Huang ve diğ., 2014).

Yapılan bir çalışmada (Owusu-Sekyere ve diğ., 2017), su ayak izi ağ değerlendirme metodolojisini kullanarak 1996–2005 ve 2006–2013 dönemleri için Güney Afrika'daki süt ürünlerinin su ayak izini ve ekonomik su verimliliklerini incelenmiştir. Güney Afrika'da seçilen tüm süt ürünlerinin toplam su ayak izlerini küresel ortalamaların üzerinde bulunmuştur. 1996–2005 döneminde Güney Afrikalı süt ürünleri üreticileri, süt ürünleri üretiminde daha fazla yeşil su kullanmıştır. Rendelenmiş veya rendelenmemiş, toz veya toz haline getirilmiş, mavi damarlı ve her türden peynir, tereyağı ve peynir ürünlerinin üretimi, Güney Afrika'daki tüm süt ürünleri arasında en yüksek toplam su ayak izine sahip bulunmuştur. 2006–2013 dönemi için, karma üretim sistemlerine göre, tek başına otlatma sistemi altında süt ürünleri üretimi yüksek su ayak izine ve düşük ekonomik su verimliliğine sahiptir. Güney Afrika'da mavi su kıtlaşırken, süt hayvancılığı üreticilerinin üretimlerini oldukça verimli ve düşük su ayak izine sahip bir sisteme kaydırmalarının zamanı geldiği belirtilmiştir. 2006–2013 dönemi için süt ürünlerinin çoğunun su ayak izi, 1996–2005'e göre değişen oranlarda azalmış; bu da süt endüstrisi zincirlerindeki su kullanıcılarının suyu dikkatli bir şekilde yönettiğini göstermiştir. Bulgular, yüksek ekonomik su verimliliğine sahip süt ürünlerini ortaya çıkarmış ve karı maksimize eden ve çevresel olarak sürdürülebilir süt ürünleri üreticilerinin ve su kullanıcılarının, üretim kararlarında hem mavi su sürdürülebilirliği hem de ekonomik su verimliliği göstergelerini entegre etmeleri gerektiğini öne sürmüştür (Owusu-Sekyere ve diğ., 2017).

Bai ve diğ., (2018) tarafından gerçekleştirilen bir çalışma, Çin'deki bir süt ürünleri işletmesinin ISO 14046 standardı yöntemiyle su ayak izini belirlemeyi amaçlamıştır. Çalışmanı kapsamı bir işletmenin süt çiftliği ve beş işleme tesisi üzerine odaklanmıştır. Çalışmada iki önemli sonuç elde edilmiştir. Birincisi, su tüketiminin büyük çoğunluğunun yem bitkileri ekiminden kaynaklanan dolaylı su ayak izinden kaynaklandığını, yeşil tedarik zinciri yönetiminin tüm yaşam döngüsü boyunca su tüketimini etkili bir şekilde azaltabileceğini göstermiştir. İkincisi, farklı üretim süreçlerinin farklı çevresel etki kategorilerine katkıda bulunduğu, inek yetiştiriciliğinin su kaynaklarına daha bağımlı olduğu ve süt işlemenin su kirliliği üzerinde daha büyük etkisi olduğu görülmüştür. Bu çalışmayla gösterilen metodoloji, su yönetimini ve verimliliğini artırmak için Çin'deki farklı ölçeklerdeki yoğun süt ürünleri işletmelerine de uygulanabilir. Sonuçlar, nehir suyunun sürdürülebilirliğini gözeterek, her üretim

sürecinin su verimliliğini artırarak, atık su arıtma kapasitesini geliştirerek ve tedarik zincirinin su ayak izini azaltarak süt endüstrisinin su ayak izini önemli ölçüde azaltabileceğini göstermektedir (Bai ve diğ., 2018).

Endüstriyel faaliyetlerin ve ürünlerin su ayak izi takibinde sadece üretim prosesinde ve tesislerde kullanılan su miktarı değil, bunun yanı sıra ham maddelerin temini ve ithalat-ihracat politikaları da su ayak izini önemli düzeyde etkileyen faktörlerdir. Zhao ve diğ., (2010) çalışmasında, 1997, 2000 ve 2002 yıllarında su sıkıntısı yaşanan Haihe Nehri havzasındaki nihai tüketim ürünlerinin su ihracatı ve sanal su ticaretini hesaplayabilmek için su ayak izi muhasebesi çerçevesine dayalı bir girdi-çıktı analizi gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmanın temel amacı, Çin'de uygulanmaya çalışılan sanal su politikasının etkili olup olmadığını değerlendirmektir. Bu politika kapsamında, su yoğun ürünlerin ithal edilmesi ve düşük su yoğunluğuna sahip ürünlerin ihraç edilmesi öngörülmektedir. Yapılan analiz sonuçları, bu politika hedefine ulaşıldığını ve havza için sanal su ithalatının, sanal su ihracatının üzerine çıktığını göstermiştir (Zhao, 2010)

Ercin ve diğ., (2011) çalışmasında, hipotetik bir fabrikada üretilen şeker içeren bir ürünün su ayak izi hesaplanmıştır. Bu su ayak izi hesaplamalarında tüm tedarik zinciri göz önünde bulundurulmuş, ayrıca şeker içeren ürünün şekerinin farklı ülkelerden ve farklı kaynaklardan (şeker kamışı, şeker pancarı veya yüksek fruktozlu mısır şurubu) elde edilmesi alternatifleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, 0,5 litrelik bir pet şişede sunulan şekerli içeceğin su ayak izi 150 ile 300 litre arasında değişmektedir. Bu su miktarının neredeyse tamamının tedarik zincirindeki su tüketiminden kaynaklandığı, ayrıca nihai ürün göz önüne alındığında içeriğinde küçük bir miktar olmasına rağmen tarım ürünü olan şekerin su ayak izinin büyük bir bölümünü oluşturduğu belirlenmiştir.

Manzardo ve diğ., (2014), kimyasal kağıt endüstrisindeki kimyasal hamurun su ayak izine odaklanarak, önceki çalışmalarda genellikle kimyasal kağıt maliyetine ve su ayak izine odaklanılmış olmasına rağmen, bu çalışmaların farklı ülkelerdeki tedarikçilerin nihai maliyeti ve nihai su ayak izini nasıl etkileyeceğini hesaba katmamış olmalarının eksikliğine vurgu yapmışlardır. Bu bağlamda, çok kriterli karar analizi yöntemini kullanarak tedarik karışımı optimizasyonu için çok amaçlı bir model geliştirmişlerdir. Bu model aracılığıyla kimyasal hamurun maliyetini ve su ayak izini en aza indiren tedarik karışımı belirlenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında Mersin’de faaliyet gösteren, süt ürünleri üretimi yapan bir tesiste, tez süresinde üretimi yapılan farklı süt ürünlerinin (beyaz peynir, kaşar peyniri ve yoğurt) su ayak izi hesaplanmasının yapılması ve sonuçların yorumlanması hedeflenmiştir. Su ayak izi hesaplamasında Su Ayak İzi Ağı (WFN) tarafından geliştirilen, Hoekstra ve diğ., (2011) tarafından ana hatları çizilen terminolojiler ve ampirik prosedürler benimsenmiştir. Süt ürünleri üretim tesisinde üretilen ürün bazında mavi, yeşil ve gri su ayak izleri hesaplanmış ve ürün bazında tesisin toplam su ayak izinde katkıları belirlenmiştir. Kavramsal olarak, seçilen süt ürünlerinden herhangi birini üretmek için kullanılan yüzey ve yeraltı suları, o ürünün mavi su ayak izi, kullanılan yağmur suyu, o süt ürününün yeşil su ayak izi ve su kalitesinin kabul edilebilir standarda ayarlanması için kullanılan nicel su miktarı, gri su ayak izi olarak hesaplanmıştır. Çeşitli süt ürünlerine odaklanıldığından, süt ürünlerinin su ayak izi ölçümlerinde kademeli kümülatif prosedür uygulanmıştır (Hoekstra ve diğ., 2011). Bunun için sütün üretilmesi esnasında ihtiyaç duyulan su ve süt ürünlerinin üretilmesi esnasında ihtiyaç duyulan su miktarları ve kategorileri belirlenmiştir.

3.1. Çalışma Alanı

Tez çalışmasında süt ürünlerinin üretiminde su ayak izinin hesaplanması amacıyla, üretim prosesi üç genel kategoriye ayrılmıştır:

- 1- Süt üretiminin gerçekleştirilmesi
- 2- Sütün toplanması ve iletilmesi
- 3- Süt ürünlerinin üretilmesi

Süt ürünleri üretiminin yapıldığı tesis Mersin ilinde 60 ton/gün çiğ süt işleme kapasitesine sahip bir tesistir. Seçilen bu tesis civardaki benzer özelliklere sahip olan farklı çiftliklerden çiğ süt temini yapmaktadır. Bu amaçla bu tesise süt teminini sağlayan, günlük 14 ton süt toplama ve iletimi kapasitesinde bir işletme ile görüşülmüş ve hesaplamalarda ihtiyaç duyulan veriler temin edilmiştir. Bu işletmenin süt temin ettiği benzere özelliklere sahip olan çiftliklerden bir tanesi ile görüşülerek süt üretimi aşamasındaki bilgilere ulaşılmıştır. Her aşama için temin edilen bilgiler aşağıda verilmektedir.

Birinci aşamada genel özellikleri Çizelge 3.1’de verilen Mersin ilinde bir çiftlik seçilmiştir. Çiftlikte 40 sağmal inek, 20 düve mevcuttur ve günlük 1 ton süt üretme kapasitesindedir. Hayvanların beslenmesinde kullanılan yem bileşenlerinin tamamı dışarıdan temin edilmekte ve çiftlikte karışımı yapılmaktadır. Yem karıştırmak için kullanılan, hayvanların içme suyu tüketimi ve çiftlikte çalışan personelin tükettiği su şehir şebekesinden temin edilmektedir. Bunun dışında 2 tonluk süt tankı ve 12 adet sağım makinesi günde 2 kez temizlenmekte ve bunun için de şebeke suyu kullanılmaktadır.

Çizelge 3.1. Süt üretiminin yapıldığı çiftlik bilgileri

Özellik	Miktar
Süt üretim kapasitesi	1 ton/gün
Hayvan tür ve sayısı	40 sağmal inek, 20 düve
Tüketilen yem miktarı	27 kg/gün.hayvan
Yem içeriği	10 kg süt yemi 3 kg saman 2 kg yonca 12 kg mısır silajı
Yem karıştırmak için kullanılan su miktarı	100 L/gün
Hayvanlar tarafından tüketilen içme suyu	90 L/gün.hayvan
Oluşan gübre miktarı	10 ton/ay
Çiftlikte çalışan personel su tüketimi	400 L/gün (2 kişi)
Süt tankları ve sağım ünitelerinin temizliğinde kullanılan su	900 L/gün
Çiftlikte elektrik tüketimi	2500 kW.sa/ay (Yaz aylarında) 1500 kW.sa/ay (Kış aylarında)

Sütün toplanması ve iletiminde günlük 14 ton çiğ süt kapasitesine sahip bir işletme seçilmiştir ve işletme hakkında genel bilgiler Çizelge 3.2’de verilmiştir. Tesiste günlük olarak süt toplama ve dağıtma işleminin yapıldığı araçların ve süt biriktirme tanklarının yıkanması işlemi şebeke suyu kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bunun yanı sıra çalışan personele ait bir tüketimi de mevcuttur.

Çizelge 3.2. Süt toplama ve iletimini sağlayan işletme bilgileri

Özellik	Miktar
Süt toplama ve iletim kapasitesi	14 ton/gün
Süt toplamada kullanılan araç sayısı ve yakıt tüketimi	9 binek araç, 25 L yakıt/gün.arac
Süt toplama araçlarının temizliğinde kullanılan toplam su miktarı	70 L/gün.arac
Süt biriktirme tanklarının kapasitesi	19 L/gün
Süt biriktirme tanklarının temizleme sıklığı ve kullanılan su miktarı	Her gün, 200 L/gün
Süt dağıtımında kullanılan araç sayısı ve yakıt tüketimi	2 kamyonet, 20 L yakıt/gün araç
Süt dağıtım araçlarının temizliğinde kullanılan toplam su miktarı	50 L/gün
İşletmede çalışan personel su tüketimi	200 L/gün (1 kişi)
Tesisin yıkanması ve temizlenmesinde kullanılan su miktarı	100 L/gün
Tesiste elektrik tüketimi	12500 kW.sa/ay

Süt ürünleri üretimi yapan tesis günde 6 ton çiğ süt işleme kapasitesine sahip olan bir tesistir. Tesiste beyaz peynir, kaşar peyniri ve yoğurt üretimi yapılmaktadır. Piyasadaki ihtiyaç doğrultusunda yıl içerisinde günlük ürün üretim yüzde dağılımları değişebilmekte, ancak günlük çiğ süt işleme kapasitesi sabit kalmaktadır. Tesise ait genel özellikler Çizelge 3.3’de özetlenmiştir.

Çizelge 3.3. Süt ürünleri üretim tesisine ait bilgiler

Özellik	Miktar
Çiğ süt işleme kapasitesi	6 ton/gün
1 kg beyaz peynir üretimi için kullanılan süt miktarı	6.5 L
1 kg kaşar peyniri üretimi için kullanılan süt miktarı	10 L
1 kg yoğurt üretimi için kullanılan süt miktarı	1.3 L
Beyaz peynir üretiminde proses içerisinde kullanılan su miktarı	1 ton süt için 200 L
Tesiste çalışan personel su tüketimi	5000 L/gün (25 kişi)
Tankların ve ekipmanların temizliğinde kullanılan su	1.17 L süt için 1 L
Kalorifer kazanı için kullanılan su	1 m ³ /gün
Tesiste elektrik tüketimi	60000 kW.sa/ay (Yaz aylarında) 30000 kW.sa/ay (Kış aylarında)
Araç yakıt tüketimi	300 L yakıt/gün

Tesiste beyaz peynir üretiminde çiğ süte 63⁰C’de 30 dakika pastörizasyon, 39⁰C’de soğutma işlemi uygulanmakta, kültür ilave edilerek 1. mayalama işlemi başlatılmakta, CaCl₃ ilavesinin ardından ise tekrar maya eklenerek 2. mayalama işlemi gerçekleştirilmektedir. 30 dakikalık pıhtı kırma işleminden sonra telemenin peynir altı suyundan ayrılması sağlanmaktadır. Bu aşamada prosesten açığa çıkan peynir altı suyu atıksu olarak uzaklaştırılmamakta, farklı amaçlarla değerlendirilmektedir. Peynir kesim işlemi yapıldıktan sonra şebeke suyu ile hazırlanan salamura suyu bu aşamada ilave edilmekte, 36⁰C’de 2.5 saat bekletilmekte, sonrasında süzme işlemi yapılarak 5-6 saat dinlendirilmekte ve yeniden salamura suyu ilave edilerek paketleme/sevkiyat işlemi

gerçekleştirilmektedir. Beyaz peynir üretiminde proses içerisinde salamura suyunun ilave edilmesi söz konusudur ve bu işlem için 1 ton süt kullanımında 200 L su eklenmektedir.

Kaşar peyniri üretiminde çiğ süt 65°C 'de 15 dakika pişirilmekte, seperatörde süt yağı ayrıldıktan sonra, kültür ve maya ilavesiyle $36\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de 60 dakika bekletilmektedir. Pıhtı kırma işleminde peynir altı suyu oluşmakta ve sistemden uzaklaştırılmaktadır. Beyaz peynir üretiminde olduğu gibi bu su farklı amaçlarla değerlendirilmektedir. Proseste eritme tuzları eklendikten sonra 80°C 'de 2 saat telemenin kuru haşlama işlemi yapılmakta, hamur yoğurma makinesine alındıktan sonra, gramajlama ve ardından paketleme/sevkiyat yapılmaktadır. Kaşar peyniri üretiminde prosese herhangi bir su ilavesi yapılmamaktadır.

Yoğurt üretiminde çiğ süt öncelikle kaynatma ve pastörizasyon işlemine tabi tutulmakta, sonrasında soğutma ve olgunlaştırma prosesleri uygulanmaktadır. En son ikinci bir soğutma işlemi sonrasında paketleme/sevkiyat işlemi gerçekleştirilmektedir. Proses içerisinde herhangi bir su ilavesi ve atıksu oluşumu mevcut değildir.

Süt ürünleri üretimi tesisinde su tüketimi beyaz peynir üretiminde sisteme ilave edilen proses suyu, kalorifer kazanı için kullanılan su, personelin su ihtiyacı ve tank ve ekipmanların temizlenmesinde kullanılan sudur.

Bu çalışma kapsamında süt ürünleri üretim tesisinde oluşan atıksuların arıtılması tez kapsamına dahil edilememiştir. Bunun birinci sebebi tez kurgusunun süt ürünü üretim tesisinin tüm kapasitenin tek bir ürün üretimi halinde tükettiği su miktarının belirlenmesine odaklanmasıdır. Süt ürünleri üretim tesisi piyasa talebine göre belirli sürelerde ürün yelpazesini değiştirebilmekte, bu durum atıksu kirleticilerinin takibini üretilen ürün bazında sağlamayı zorlaştırmaktadır. Bunun yanı sıra arıtma tesisinde arıtılan atıksu bir alıcı ortama deşarj edilmemekte, organize sanayi bölgesinde kanalizasyona deşarj edilerek, bu bölgenin arıtma tesisine iletilmektedir. Bu tez kapsamında atıksu özellikleri ve verildiği ortamla ilgili sağlıklı bilgi temin edilemediği için atıksu arıtma tesisi çalışma alanı içerisine dahil edilmemiştir.

3.2. Su Ayak İzi Hesaplama Yöntemi

Su ayak izi hesaplamasında Su Ayak İzi Ağı (WFN) tarafından geliştirilen, Hoekstra ve diğ., (2011) tarafından ana hatları çizilen terminolojiler ve ampirik prosedürler benimsenmiştir. Çeşitli süt ürünlerine odaklanıldığından, süt ürünlerinin su

ayak izi ölçümlerinde kademeli kümülatif prosedür uygulanmıştır (Hoekstra ve diğ., 2011). Bunun için sütün üretilmesi esnasında ihtiyaç duyulan su ve süt ürünlerinin üretilmesi esnasında ihtiyaç duyulan su miktarları ve kategorileri belirlenmiştir. Canlı bir hayvanın su ayak izi yemin dolaylı su ayak izi ve tüketilen içme suyu ve servis suyuyla ilgili doğrudan su ayak izi şeklinde farklı bileşenlerden oluşur. Servis suyu, çiftlik avlusunu temizlemek, hayvanı yıkamak ve çevreyi korumak için, gerekli diğer hizmetleri gerçekleştirmek için kullanılan suyu ifade eder. Bir hayvanın tüketilen yemle ilgili su ayak izi iki bölümden oluşur: çeşitli yem bileşenlerinin su ayak izi ve yemi karıştırmak için kullanılan su. Bu su miktarlarının hesaplanmasında yem dönüşüm verimliliği, hayvansal ürünlerin yıllık toplam üretimi ve yem bileşiminin tahmin edilmesi gerekmektedir. Tüm bu hesaplamalarda Mekonnen ve Hoekstra (2010), Mekonnen ve Hoekstra (2012) ve Owusu-Sekyere ve diğ., (2017) yapmış oldukları çalışmalarda yaklaşım ve formülasyonlardan, bunun yansısı güncel çalışmalarda elde edilen sonuçlardan faydalanılmıştır.

3.2.1. Canlı hayvan su ayak izi

Bir hayvanın su ayak izi Eşitlik 3.1’de verildiği şekilde ifade edilir:

$$WF[a, c, s] = WF_{feed}[a, c, s] + WF_{drink}[a, c, s] + WF_{serv}[a, c, s] \quad (3.1)$$

$WF_{feed}[a, c, s]$: s üretim sistemlerinde c ülkesindeki a hayvan kategorisi için bir hayvanın yem ile ilgili su ayak izi

$WF_{drink}[a, c, s]$: s üretim sistemlerinde c ülkesindeki a hayvan kategorisi için bir hayvanın içme suyu ile ilgili su ayak izi

$WF_{serv}[a, c, s]$: s üretim sistemlerinde c ülkesindeki a hayvan kategorisi için bir hayvanın servis suyu tüketimi ile ilgili su ayak izidir.

Servis suyu, çiftlik avlusunu temizlemek, hayvanı yıkamak ve çevreyi korumak için gerekli diğer hizmetleri yürütmek için kullanılan suyu ifade eder. Bir hayvanın ve onun üç bileşeninin su ayak izi, m³/yıl/hayvan cinsinden veya hayvanın ömrü boyunca toplandığında m³/hayvan cinsinden ifade edilebilir. Süt sığırları ve yumurta üreten tavuklar için, hayvanın yıllık su ayak izine bakmak en kolay yoldur, çünkü bu yıllık

hayvan su ayak izini, hayvanın ortalama yıllık üretimi (süt, yumurta) ile kolayca ilişkilendirebilmektedir.

3.2.2. Yem İle İlgili Su Ayak İzi

Bir hayvanın tüketilen yemle ilgili su ayak izi iki bölümden oluşur: çeşitli yem bileşenlerinin su ayak izi ve yemi karıştırmak için kullanılan su (Eşitlik 3.2).

$$WF_{feed}[a, c, s] = \frac{\sum_{p=1}^n (Feed[a, c, s, p] \times WF_{prod}^*[p]) + WF_{mixing}[a, c, s]}{Pop^*[a, c, s]} \quad (3.2)$$

$Feed[a, c, s, p]$: c ülkesindeki üretim sistemi s için, hayvan kategorisi a tarafından tüketilen yem bileşeni p'nin yıllık miktarı (ton/yıl)

$WF_{prod}^*[p]$: yem bileşeni p'nin su ayak izi (m^3/ton)

$WF_{mixing}[a, c, s]$: c ülkesinde ve üretim sistemi s'de hayvan kategorisi a için yemi karıştırmak için tüketilen suyun hacmi ($m^3/yıl/hayvan$)

$Pop^*[a, c, s]$: c ülkesindeki hayvan kategorisi a ve üretim sistemi s için yılda kesilen hayvan sayısı veya bir yılda süt veya yumurta üreten hayvan sayısını temsil eder.

Yem bileşeninin su ayak izinin hesaplanmasında Eşitlik 3.3 kullanılmaktadır.

$$WF_{prod}^*[p] = \frac{P[p] \times WF_{prod}[p] + \sum_{n_e} (T_i[n_e, p] \times WF_{prod}[n_e, p])}{P[p] + \sum_{n_e} T_i[n_e, p]} \quad (3.3)$$

$P[p]$: bir ülkedeki p yem ürününün üretim miktarı (ton/yıl)

$T_i[n_e, p]$: ihracatçı ülkeden ithal edilen yem ürünü p miktarı (ton/yıl),

$WF_{prod}[p]$: dikkate alınan ülkede üretildiğinde p yem ürününün su ayak izi (m^3/ton)

$WF_{prod}[n_e, p]$: yem ürününün su ayak izi p, ihraç eden ülke cinsinden (m^3/ton).

Kepek, saman, saman tozu gibi ürün artıklarının su ayak izi ve şeker pancarının yaprakları ve üst kısımları ana üründe zaten hesaba katılmış olduğundan su ayak izi sıfıra eşitlenmiştir.

Tüketilen yem miktarının hesaplanmasında Eşitlik 3.4-3.6'dan faydalanılmıştır.

$$Feed[a, c, s] = FCE[a, c, s] \times P[a, c, s] \quad (3.4)$$

$Feed[a, c, s]$: c ülkesinde ve üretim sistemi s'de hayvan kategorisi a tarafından tüketilen toplam yem miktarı (ton/yıl)

$FCE[a, c, s]$: c ülkesindeki hayvan kategorisi a ve üretim sistemi s için yem dönüşüm verimliliği (kg kuru yem kütlesi/kg ürün)

$P[a, c, s]$: c ülkesinde ve s üretim sisteminde hayvan kategorisi a tarafından üretilen toplam ürün (et, süt veya yumurta) miktarı (ton/yıl).

$$FCE[a, c, s] = \frac{FI[a, c, s]}{PO[a, c, s]} \quad (3.5)$$

$FI[a, c, s]$: c ülkesinde ve üretim sistemi s'de a kategorisindeki geviş getiren hayvanlara göre kişi başına yem alımı (kg kuru kütle/yıl/hayvan)

$PO[a, c, s]$: c ülkesindeki geviş getiren hayvan kategorisi a ve üretim sistemi s için kişi başına ürün çıktısı (kg ürün/yıl/hayvan).

$$PO[a, c, s] = \frac{P[a, c, s]}{Pop[a, c, s]} \quad (3.6)$$

$P[a, c, s]$: c ülkesindeki üretim sistemindeki toplam yıllık sığır eti, süt, koyun eti veya keçi eti üretimi (kg/yıl)

$Pop[a, c, s]$: o ülkedeki besi sığırları, süt sığırları, koyun veya keçinin toplam nüfusu ve üretim sistemi.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Süt Üretiminin Gerçekleştirildiği Çiftlikte Su Ayak İzi Hesaplanması

Süt üretiminin gerçekleştirildiği çiftlikte 60 hayvan bulunmaktadır, bunlardan 40 tanesi sağmal inek, 20 tanesi ise düvedir. Her bir hayvanın tükettiği günlük yem miktarı 27 kg'dır, yem içeriği ise 10 kg süt yemi, 3 kg saman, 2 kg yonca ve 12 kg mısır silajından oluşmaktadır. Tüketilen yemin tamamı çiftlik dışından temin edilmekte, çiftlikte yem bitkilerinin üretimi ile ilgili herhangi bir faaliyet bulunmamaktadır. Yemin karıştırılması için günlük 100 L su kullanılmaktadır. Her bir hayvan tarafından tüketilen içme suyu miktarı günlük 90 L'dir. Ayda 10 ton gübre oluşmakta, gübre ile ilgili çiftlikte herhangi bir işlem yapılmamakta ve belirli aralıklarla satışı yapılmaktadır. Çiftlikte 2 tane personel çalışmaktadır ve günlük su kullanımları 200 L/gün.kişi olarak kabul edilmiştir. Tesiste 2 tonluk bir süt tankı ve 12 adet sağım ekipmanı mevcuttur. Tank ve sağım üniteleri günde 2 kez yıkanmakta, süt takının temizliğinde 500 L/gün, sağım ünitelerinin temizliğinde ise 400 L/gün su kullanılmaktadır. Çiftlikteki elektrik tüketimi yaz ayları için aylık ortalama 2500 kW.sa ve kış aylarındaki aylık ortalama ise 1500 kW.sa olarak belirlenmiştir. Genel bilgiler çiftlik sahibi ve çalışanlarından temin edilmiş ve su/elektrik faturaları ile doğrulanmıştır.

Çiftlikte süt üretimine ait su ayak izinin hesaplanmasında öncelikle canlı hayvan su ayak izi hesaplanmıştır. Bu hesaplamada Eşitlik 3.1-6'dan faydalanılmıştır. Canlı hayvan su ayak izi yemden kaynaklı su ayak izi, içme suyu ve servis suyundan kaynaklı su ayak izlerinin toplamıdır. Yem bileşenlerinin su ayak izinin belirlenmesinde literatürde daha önce yapılmış olan çalışmalardan faydalanılmıştır. Mekonnen ve Hoekstra (2010) çiftlik hayvanları ve hayvansal ürünlere ait yeşil, mavi ve gri su ayak izlerini belirledikleri çalışmada, 1996-2005 yıl aralığı için, seçilen ülkelerde yem bileşenlerinin ortalama su ayak izini hesaplamışlardır. Yem bileşeni olarak buğday, arpa, mısır, darı, manyok, şeker pancarı, soya fasulyesi, kolza tohumu, susam kabuğu, pamuk tohumu kabuğu, yem bitkileri ve mera; bölge olarak Avustralya, Brezilya, Çin, Mısır, Almanya, Hindistan, Meksika, ABD ve dünya ortalaması için yeşil/mavi/gri su ayak izleri verilmiştir. Kepek, saman ve şeker pancarının yaprakları ve üst kısımları gibi ürün artıkları ve yan ürünlerin su ayak izi yaklaşık sıfır alınmış, bunun sebebi de mahsul yetiştirmenin su ayak izinin, düşük değerli kalıntılara değil esas olarak ana mahsul ürünlerine veya yan ürünlere atfedilebileceği şeklinde açıklanmıştır. Gri su ayak izleri,

yalnızca nitrojenli gübrelerin sızması ve akışına bakılarak tahmin edilmiştir. Bir ülkedeki hayvan yemi yerli üretim ve ithal ürünlerden oluştuğu için, bir ülkedeki hayvan yemi su ayak izinin hesaplanmasında yerli üretim ve ithalatın göreceli hacimlerine göre ağırlıklı ortalama su ayak izi alınmıştır (Mekonnen ve Hoekstra, 2010). Cezayir, Mısır, İsrail, Ürdün, Kuveyt, Lübnan, Moritanya, Fas, Umman, Katar, Suudi Arabistan, Sudan, Tunus, Türkiye ve Yemen ülkelerini kapsayan Orta Doğu ve Kuzey Afrika bölgesi (MENA) için yapılan bir çalışmada (Mourad ve diğ., 2019), literatürde global ölçekte yapılan son çalışmanın 1995-2005 dönemini içermesi nedeniyle, bölgede son on yılda yaşanan nüfus artışının bu rakamlar üzerinde etkisinin olabileceği, dolayısıyla su ve gıda politikalarına yön verecek yeni bir tahmine ihtiyaç olduğu düşünülmüştür. Bu amaçla, farklı hayvansal ürünler (yumurta, tavuk, sığır eti, süt, keçi ve koyun eti) için ithal ve yerel WF (mavi, yeşil ve gri) ve buna karşılık gelen sanal su içeriği (mavi, yeşil ve gri) için yeni tahminler belirlenmiştir. İlk olarak, Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) istatistik veri tabanından her ülke için yem bileşenin üretimini (2010–2016 ortalaması) ve ithalatını (ortalama 2011–2013) belirlenmiştir. Daha sonra bu üretimi söz konusu bileşenin WF'si ile çarpılarak ve bunu toplama (ithalat ve üretim) bölerek her bir yem bileşeninin ağırlıklı ortalama WF'sinin yerel fraksiyonunu elde edilmiştir. İthal edilen fraksiyona gelince, yem maddesinin ithal edilen miktarını ihracatçı ülkedeki karşılık gelen WF'si ile çarpılmış, sonuç toplanıp toplama (ithalat ve üretim) bölünmüştür. Bu hesaplama tezde bir önceki bölümde verilen Eşitlik 3.3'de belirtilen hesaplamanın yerel ve ithal edilen yem bileşenlerine ayrılmasından ibarettir. Söz konusu çalışmada (Mourad ve diğ., 2019), Türkiye için mısır, soya, buğday ve arpa yem bileşenlerinin toplam su ayak izi sırasıyla 1186, 2082, 2376 ve 1559 m³/ton olarak hesaplanmıştır. Yine aynı çalışmada mısır için yeşil, mavi ve gri su ayak izleri m³/ton biriminde, yerel üretim için sırasıyla 549, 177, 235 ve ithal ürünler için sırasıyla 151, 46, 28 olarak belirlenmiştir. Avrupa Birliği tarafından finanse edilmiş bir projede ülkemizde sütçülük sektörünün su sürdürülebilirliği verimlilik, riskler ve kırılganlıklar açısından incelenmiştir (URL-1). Projenin WFN teknik uzmanı tarafından hazırlanan raporunda (Ercin, 2020) Türkiye'de kullanılan yem bitkilerinin TUIK üretim verileri kullanılarak hesaplanan yeşil ve mavi su ayak izleri mısır için sırasıyla 646 ve 208 m³/ton, yonca için ise sırasıyla 135 ve 0 m³/ton olarak verilmiştir. Projenin sektördeki su kullanımı ile ilgili raporunda (ASÜD, 2019), 2004-2018 yılları arasında iller bazında mısır (slaj), arpa ve yonca üretim değerlerine göre mavi, yeşil ve gri su ayak izleri hesaplanmıştır. Yeterli veri elde edilemeyen illerde ise Türkiye ortalama değerleri baz

alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Mersin ilinde yeşil, mavi, gri su ayak izleri mısır (slaj) için sırasıyla 600, 440, 312 m³/ton ve yonca için sırasıyla 125, 0, 32 m³/ton olarak hesaplanmıştır (ASÜD, 2019). Bu tez çalışmasında sütün temin edildiği çiftlikte yem bitkilerinin üretiminin yapılmıyor oluşu ve her bir yem bileşeninin hazır satın alınarak çiftlikte karıştırılması nedeniyle; en güncel değerler olarak Avrupa Birliği projesi raporunda verilen mısır ve yonca için Mersin ili bazında hesaplanan, mısır (slaj) için sırasıyla 600, 440, 312 m³/ton ve yonca için sırasıyla 125, 0, 32 m³/ton yeşil, mavi ve gri su ayak izlerinin kabul edilmesi uygun görülmüştür (ASÜD, 2019). Yem işlenmesinde kullanılan su miktarı ise, 90 litre/ton yem olarak hesaba katılmıştır (Ercin, 2020). Çiftlikten alınan bilgiler doğrultusunda, yem karıştırma için günlük 100 L su kullanıldığı ve her bir hayvanın günlük 90 L su tükettiği belirlenmiştir. Servis suyu olarak da personelin su kullanımı, süt tankı ve sağım ünitelerinin temizliğinde kullanılan suyun toplamı olan günlük 1300 L olarak kabul edilmiştir. Eşitlik 3.1-6 kullanılarak yemden kaynaklı su ayak izleri hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Yem su ayak izi hesaplanırken her bir yem bileşeninin yemdeki karışım oranları baz alınmıştır.

Elektrikten kaynaklı su ayak izinin belirlenmesinde literatürde farklı ülkeler için belirli aralıklarda su ayak izleri kabul edilmiştir. Bu çalışmada elektrikten kaynaklı su ayak izinin belirlenmesinde Mekonnen ve Hoekstra (2011) tarafından kabul edilen değerler baz alınmıştır. Söz konusu çalışmada, seçilen 35 bölge için hidroelektriğin mavi su ayak izi (elektrik enerjisi üretmek için insan yapımı rezervuarlardan buharlaştırılan su) değerlendirilmiştir. Türkiye’deki Karakaya Barajı için 21.8 m³/GJ değeri verilmiştir. Yapılan bir tez çalışmasında (Çankaya, 2019) da bir artıma tesisindeki elektrik tüketimi için bu değer dünya ortalamalarıyla da uyumlu olduğu için kabul edilmiştir. Ülkemizdeki bir baraja ait bir değer olması sebebiyle bu tez çalışmasında da elektrikten kaynaklı mavi su ayak izi hesabında bu kabul baz alınmıştır. Elektrik tüketiminden kaynaklanan su ayak izinin hesaplanmasında 1 GJ değeri 277.778 kW.sa olarak alınmış, 1 kW.sa elektrik tüketimi için 0.07848 m³ mavi su ayak izine karşılık geldiği bulunmuştur. Çizelge 4.1’de verilen $WF_{elektrik}$ değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$WF_{elektrik} = 2000 \text{ kW.sa/ay} \times 12 \frac{\text{ay}}{\text{yıl}} \times \frac{0.07848 \text{ m}^3}{\text{kW.sa}} = 1883.5 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

Çizelge 4.1. Süt üretiminin gerçekleştiği çiftlikteki su ayak izi değerleri

	Yeşil	Mavi	Gri	Toplam
	Su Ayak İzi	Su Ayak İzi	Su Ayak İzi	Su Ayak İzi
<i>WF*prod (m³/ton)</i>				
Süt yemi	-	0.09	-	0.09
Saman	-	-	-	-
Yonca	125	-	32	157
Mısır silajı	600	440	312	1352
<i>WF feed (m³/yıl/hayvan)</i>	2719.3	1928.1	1389.9	6037.3
<i>WF drink (m³/yıl/hayvan)</i>	-	32.9	-	32.9
<i>WF serv (m³/yıl/hayvan)</i>	-	6.5	-	6.5
<i>WF feed+drink+serv (m³/yıl)</i>	163155.0	118049.2	83395.2	364599.4
<i>WF elektrik (m³/yıl)</i>	-	1883.5	-	1883.5
<i>WF toplam (m³/yıl)</i>	163155	119932.7	83395.2	366482.9

Süt üretiminin yapıldığı çiftlikte toplam su ayak izinin %44.5'ini yeşil su ayak izi, %32.7'sini mavi su ayak izi ve %22.8'ini gri su ayak izi oluşturmaktadır. Yeşil ve gri su ayak izlerinin tamamı yem bitkileriyle ilişkilidir. Canlı hayvan su ayak izinde, yeşil ve gri su ayak izlerinin tamamı, mavi su ayak izinin ise % 98'i hayvan yemi kaynaklıdır. Çiftlikteki toplam su ayak izinin ise % 99.5'i canlı hayvan su ayak izinden oluşmaktadır. Bu sonuçlar yem bileşenlerinin üretiminde, özellikle su kıtlığı problemiyle karşı karşıya kalan bölgeler için, daha az mavi su kaynaklarının kullanımının sağlanması veya su problemi daha az olan ülkelere ithal yem bileşenlerinin kullanım alternatiflerinin değerlendirilmesinin önemini açıklamaktadır.

4.2. Sütün Toplanması ve İletilmesinin Gerçekleştirildiği İşletmede Su Ayak İzi Hesaplanması

Süt ürünleri üretim tesislerinin günlük kapasitelerine göre çiğ süt temini yapmaları gerekmektedir. Özellikle yüksek kapasiteye sahip tesislerin günlük çiğ süt ihtiyaçlarının karşılanabilmesi için, çok sayıda çiftlikten alım yapmaları gerekmektedir. Bu nedenle sütün günlük olarak üreticiden toplanması ve süt ürünleri üretim tesislerine veya daha küçük satış ofislerine aktarılması farklı bir sektördür. Bu tez çalışmasında günlük olarak bir önceki başlıkta genel özelliklerini verdiğimiz çiftlik tarzında pek çok üreticiden çiğ süt toplayan ve süt ürünleri üretim tesisine ileten bir işletme ile görüşülmüştür. İşletme Mersin ilinde faaliyet gösteren günlük 14 ton çiğ süt toplama ve dağıtma kapasitesine sahiptir. Süt toplama işlemi farklı çiftliklerden 9 binek araç

kullanılarak sağlanmakta, işletmede bulunan 19 ton/gün kapasitesinde depoda muhafaza edilerek, 2 adet kamyonet şeklinde araçla çiğ süt dağıtımı yapılmaktadır. Bu işletmede su tüketimi süt toplama ve iletme araçlarındaki ekipmanların günlük temizliği için kullanılan 680 L/gün miktarındaki su, süt depolama tankının temizliğinde kullanılan 200 L/gün miktarındaki su ve çalışan 1 adet personelin kullanımı için kabul edilen 200 L/gün miktarındaki kullanım suyudur. Bununla birlikte süt dağıtım ve iletiminde araçların yakıtlarından ve işletme elektrik kullanımından kaynaklı dolaylı bir su tüketimi de mevcuttur. İşletmeye ait su ayak izi hesap sonuçları Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Elektrik ve yakıt tüketimi için tesis işletmecisi ile görüşülerek 2023 yılı içerisinde yıllık tüketimler belirlenmiştir. Elektrikten kaynaklı su ayak izi hesabında bir önceki başlık altında verilen kabuller uygulanarak hesaplama yapılmıştır. Dizel yakıt kaynaklı su ayak izi hesabında Francke ve Castro’nun çalışmalarında (2013) uygulanan değerler kabul edilmiştir. Çalışmada bir kozmetik firmasına ait bir ürünün tedarik zinciri, üretim süreci, tüketici kullanım ve imha aşamaları da dahil olmak üzere su ve karbon ayak izi hesabı yapılmıştır. Çalışmada dizel yakıt kaynaklı su ayak izinin 18.8 L/L mavi su ayak izi, 18.8 L/L değerinin ise gri su ayak izine sahip olduğu belirtilmiştir (Francke ve Castro, 2013).

Çizelge 4.3. Süt toplama ve iletiminin yapıldığı işletmedeki su ayak izi değerleri

	Yeşil	Mavi	Gri	Toplam
	Su Ayak İzi	Su Ayak İzi	Su Ayak İzi	Su Ayak İzi
<i>WF araç temizliği (m³/yıl)</i>	-	248.2	-	248.2
<i>WF tesis (m³/yıl)</i>	-	182.5	-	182.5
<i>WF elektrik (m³/yıl)</i>	-	11772	-	11772
<i>WF yakıt (m³/yıl)</i>	-	1818.4	1818.4	3636.9
<i>WF toplam (m³/yıl)</i>	-	14021.1	1818.4	15839.6

Çizelgede de görüldüğü üzere süt toplama ve iletim tesisinde hesaplanan su ayak izinin %88.5’ini mavi su ayak izi oluşturmaktadır. Gri su ayak izi ise elektrik tüketiminden kaynaklanmaktadır.

4.3. Süt Ürünlerinin Üretimine Gerçekleştirildiği Tesiste Su Ayak İzinin Hesaplanması

Süt üretimi çiftliğinde günlük 1 ton/gün süt üretimi gerçekleşmektedir. Elde edilen sütün ürüne dönüşüm yüzdeleri hesaplanarak, çiftlikteki su ayak izinin m³/yıl.ton ürün biriminden hesapları yapılmıştır. Bu birime dönüştürme farklı süt ürünleri için tezdeki çalışma alanındaki su ayak izinin kıyaslanmasına olanak sağlayacaktır. İlk olarak süt ürünleri üretim tesisinde bu tez kapsamında incelediğimiz beyaz peynir, kaşar peyniri ve yoğurt için, 1 kg ürün elde edebilmek için kullanılması gereken süt miktarı hesaplandı. Bu hesaplamada tesiste üretim aşamasında görevli personel ve yöneticiden alınan bilgilerden faydalanıldı. Beyaz peynir, kaşar peyniri ve yoğurt üretiminde her bir üründen 1 kg üretebilmek için sırasıyla 6.5, 10 ve 1.3 L süt kullanıldığı kabul edildi. Sütün 1 litresinin 1.028 kg olduğu kabul edildi. 1 kg beyaz peynir, kaşar peyniri ve yoğurt üretimi için gerekli süt miktarları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\frac{1 \text{ kg süt}}{1.028 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \times 6.5 \text{ L}} = 0.150 \frac{\text{kg beyaz peynir}}{\text{kg süt}}$$

$$\frac{1 \text{ kg süt}}{1.028 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \times 10 \text{ L}} = 0.097 \frac{\text{kg kaşar peyniri}}{\text{kg süt}}$$

$$\frac{1 \text{ kg süt}}{1.028 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \times 1.3 \text{ L}} = 0.748 \frac{\text{kg yoğurt}}{\text{kg süt}}$$

Süt ürünleri üretim tesisinde günlük çiğ süt işleme kapasitesi 6 tondur. Piyasa talepleri doğrultusunda günlük süt ürünleri üretim miktarlarında değişiklik yapılabilen, ancak günlük çiğ süt işleme kapasitesi değişmemektedir. Bu nedenle bu tez çalışmasında süt ürünlerinin üretiminde su ayak izinin hesaplanmasında, günlük kapasitenin sadece bir ürünün işlenmesinde kullanıldığı baz alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Tüm hat boyunca (Sütün üretilmesi, toplanması, taşınması ve süt ürünlerinin üretimi) tüketilen elektrik ve su sarfiyatları için son bir yıllık değerler temin edilmiş ve ortalamaları alınarak yıllık sarfiyat hesaplanmıştır. Aşağıda Çizelge 4.4'de

tüm kapasitenin tek bir ürünün üretiminde kullanılması hali için hesaplanan, tesisin yıllık 300 gün çalışması sonucu üretilebilecek süt ürünleri miktarları verilmektedir.

Çizelge 4.4. Süt ürünleri üretim tesisindeki üretim kapasiteleri

Süt ürünü	kg ürün/kg süt	Tesis ürün üretim kapasitesi (kg/yıl)
Beyaz peynir	0.150	269,380
Kaşar peyniri	0.097	175,097
Yoğurt	0.748	1,346,902

Süt ürünleri üretim tesisinde her bir ürünün üretim prosesleri bu tezde Materyal ve Yöntem başlığı altında verilmiştir. Tesiste su kullanımı, çalışan personelin su tüketimi (25 personelin her biri için günlük 200 L), kalorifer kazanı için kullanılan su (1 m³/gün) ve süt ürünlerinin üretiminin yapıldığı tank ve ekipmanlarda kullanılan su (1.17 L süt işleme için 1 L su kullanımı) olarak listelenebilir. Bunun dışında kaşar peyniri ve yoğurt üretiminde proses içerisinde herhangi bir su ilavesi yapılmamaktadır. Beyaz peynir üretiminde salamura suyu olarak iki farklı aşamada şehir şebekesinden temin edilen su (1 ton süt için 200 L su) proses suyu olarak ilave edilmektedir. Tesiste elektrik ve yakıt tüketiminden kaynaklı dolaylı su tüketimi de söz konusudur ve bu kategorideki su ayak izi önceki kısımlarda yapılan kabullere göre hesaplanmıştır. Tesisteki elektrik tüketimi 2023 yılı için aylık ortalama 45000 kW.sa ve yakıt tüketimi 300 L/gündür. Çizelge 4.5’de tesise ait su ayak izi hesap sonuçları verilmektedir.

Çizelge 4.5. Süt ürünleri üretim tesisindeki su ayak izi değerleri

	Yeşil Su Ayak İzi	Mavi Su Ayak İzi	Gri Su Ayak İzi	Toplam Su Ayak İzi
WF tesis (m ³ /yıl)	-	3296.7	-	3296.7
WF yakıt (m ³ /yıl)	-	1692	1692	3384
WF elektrik (m ³ /yıl)	-	42379.2	-	42379.2
WF toplam (m ³ /yıl)				
Beyaz peynir	-	47727.9	1692	49419.9
Kaşar peyniri	-	47367.9	1692	49059.9
Yoğurt	-	47367.9	1692	49059.9

Süt ürünleri üretim tesisinde toplam su ayak izinin %96.6’sı mavi su ayak izi ve kalan %3.4’ünü gri su ayak izi oluşturmaktadır.

4.4. Süt Ürünlerinin Toplam Su Ayak İzi Değerleri

Önceki başlıklar altında (4.1.1-3) süt üretim çiftliği, süt toplama ve iletim tesisi ve son olarak süt ürünleri üretim tesisinin her biri için mavi, yeşil ve gri su ayak izleri hesaplanmış ve sonuçlar verilmiştir. Sonuçların her bir ürün bazında hesaplanarak, her üç tesisteki verilerin birleştirilebilmesi için, Çizelge 4.4’de verilen birim süt miktarına göre üretilen ürün miktarları kullanılarak su ayak izleri m³/ton ürün olarak hesaplanmış ve Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Farklı süt ürünleri için hesaplanan toplam su ayak izi değerleri

	Yeşil Su Ayak İzi	Mavi Su Ayak İzi	Gri Su Ayak İzi	Toplam Su Ayak İzi
Süt üretiminin gerçekleştiği çiftlik				
WF (m ³ /ton ürün) (beyaz peynir)	3634.0	2671.3	1857.5	8162.7
WF (m ³ /ton ürün) (kaşar peyniri)	5590.8	4109.7	2857.7	12558.1
WF (m ³ /ton ürün) (yoğurt)	726.8	534.3	371.5	1632.6
Süt toplama ve iletiminin yapıldığı işletme				
WF (m ³ /ton ürün) (beyaz peynir)	-	22.3	2.9	25.2
WF (m ³ /ton ürün) (kaşar peyniri)	-	34.3	4.5	38.8
WF (m ³ /ton ürün) (yoğurt)	-	4.5	0.6	5.0
Süt ürünleri üretim tesisi				
WF (m ³ /ton ürün) (beyaz peynir)	-	177.2	6.3	183.5
WF (m ³ /ton ürün) (kaşar peyniri)	-	272.6	9.7	282.2
WF (m ³ /ton ürün) (yoğurt)	-	35.2	1.3	36.4
Toplam				
WF (m ³ /ton ürün) (beyaz peynir)	3634	2871	1867	8371
WF (m ³ /ton ürün) (kaşar peyniri)	5591	4417	2872	12879
WF (m ³ /ton ürün) (yoğurt)	727	574	373	1674

Çizelge 4.6’da her bir adım için verilen su ayak izi değerleri incelendiğinde en yüksek su ayak izine sahip ürün bütün adımlar için kaşar peyniridir, bunu beyaz peynir ve yoğurt takip etmektedir. Yoğurdun düşük su ayak izine sahip olması ve peynir türlerinin daha yüksek su ayak izlerinin bulunması literatür çalışmalarıyla da uyumludur (Mekonnen ve Hoekstra, 2010; Owusu-Sekyere ve diğ., 2017). Bu sıralamada süt ürünleri üretiminde birim ürün üretimi için ihtiyaç duyulan çiğ süt miktarının etkisi büyüktür. Yeşil su ayak izi sadece süt üretiminin gerçekleştirildiği çiftlikte hayvan yemi üretiminden kaynaklı dolaylı su ayak izidir. Süt ürünlerinin üretiminde toplam su ayak izinin yaklaşık %97.5’i süt üretiminin sağlandığı çiftlikte oluşan su ayak izidir, bunun da önemli bir kısmı yem bitkilerinin üretiminde oluşan su ayak izidir. Mekonnen ve Hoekstra da çalışmalarında (2012) hayvansal üretimde en büyük su ayak izinin, toplam

su ayak izinin %98'ini oluşturan tükettikleri yemden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Yine aynı çalışmada hayvan kategorisi başına toplam su ayak izini ele alındığında, çiftlik hayvanı üretiminin küresel su ayak izine en büyük katkıyı besi sığırlarının (%33) sağladığını, bunu süt sığırı (%19), domuz (%19) ve tavukların (%11) takip ettiği belirtilmiştir. Orta Doğu ve Kuzey Afrika'daki 15 ülkede yapılan bir çalışmada (Mourad ve diğ., 2019), hayvansal ürünler üretmek için ihtiyaç duyulan suyun %90'ından fazlasının bu hayvanlara yönelik yem üretimine gittiği tespit edilmiştir.

Hayvansal ürünlerin su ayak izleri ülkelere ve üretim sistemlerine göre büyük farklılıklar göstermektedir. Üretim sisteminin türü, bir hayvansal ürünün su ayak izinin boyutu, bileşimi ve coğrafi yayılımıyla son derece alakalıdır, çünkü yem dönüşüm verimliliğini, yem bileşimini ve yemin kökenini belirler. Ülkeler arasındaki farklılıklar, yem dönüştürme verimliliğindeki mevcut ülke farklılıklarıyla ilişkilidir, ancak aynı zamanda yem bitkilerinin su ayak izinin, iklim ve tarımsal uygulamalardaki farklılıkların bir fonksiyonu olarak ülkeler arasında farklılık göstermesi gerçeğiyle de ilgilidir (Mekonnen ve Hoekstra, 2012). Mekonnen ve Hoekstra (2012) yaptıkları çalışmada 1996-2005 yılları arasında hayvan türüne ve ülkeye göre farklı üretim sistemleri ve yem kompozisyonunu dikkate alarak hayvansal ürünlerin su ayak izinin araştırmışlardır. Süt ürünleri kategorisinde peynir için 4264 m³/ton, 439 m³/ton ve 357 m³/ton sırasıyla yeşil, mavi ve gri su ayak izini dünya çapında farklı tarımsal uygulamaların ortalaması olarak belirlemişlerdir. Toplam su ayak izi 5060 m³/ton olarak bulunmuştur. Yoğurt için ise dünya ortalaması yeşil, mavi, gri ve toplam su ayak izi olarak sırasıyla 1003 m³/ton, 99 m³/ton, 84 m³/ton ve 1186 m³/ton olarak verilmiştir. Süt hayvancılığında, ürün birimi başına toplam su ayak izi her üç üretim sisteminde (otlatma, karışık ve endüstriyel) de karşılaştırılabilir olarak yorumlanmıştır. Süt ürünleri için su ayak izi, karma bir sistemden elde edildiğinde en küçük, otlatma veya endüstriyel sistemden elde edildiğinde biraz daha büyük, ancak karşılaştırılabilir düzeyde bulunmuştur (Mekonnen ve Hoekstra, 2012). Mekonnen ve Hoekstra çalışmalarında (2010) 1996-2005 periyodunda Türkiye için hayvansal ürünlerin su ayak izlerini incelemiş; yeşil, mavi ve gri su ayak izlerini yoğurt için 1058, 135, 119 m³/ton; peynir için 4500, 590, 505 m³/ton değerlerini belirlemişlerdir. Bu iki ürün için belirtilen yıllar arasında Türkiye'deki tüm su ayak izleri dünya ortalamasını üzerindedir.

Bu tez çalışmasında bulunan yoğurt ve peynir türleri için toplam su ayak izleri, 1996-2005 yılları arasında Mekonnen ve Hoekstra (2010) tarafından Türkiye için bulunan ortalama değerlerin üzerindedir. Ancak yoğurt ve beyaz peynir için yeşil su

ayak izleri daha düşük, mavi ve gri ayak izleri daha yüksek bulunmuştur. Kaşar peyniri için ise tüm kategorilerde su ayak izleri yüksektir. Bu sonuç bu tezde incelenen çalışma alanında yeşil su kullanımının çok daha düşük olması nedeniyle ihtiyaç duyulan suyun mavi su kaynaklarından sağlandığını göstermektedir. Yüksek su ayak izleri süt üretiminde hayvanların düşük yem dönüşüm verimliliklerinden kaynaklanabilmekte, bu sorunun üstesinden gelebilmek için de yem kalitesinin gözden geçirilmesi ve süt verimi yüksek hayvan türlerinin yetiştirilmesi düşük süt verimlerini artırmaya katkı sağlayacaktır (Owusu-Sekyere ve diğ., 2017). Süt ürünleri içerisinde yüksek su ayak izine sahip olan tereyağı ve bazı peynir türleri için, daha az su tüketiminin olduğu yeni teknolojilerin araştırılması ya da bu ürünlerin yeterli su kaynağına sahip ülkelerden ithal edilmesi, yetersiz su kaynağına sahip olan ülkeler için bir alternatif çözüm olabilecektir (Owusu-Sekyere ve diğ., 2017). Hayvansal ürünler için genel su ayak izini azaltmak için, diyetle etin yüksek yerel mavi su ayak izinden düşük yerel mavi, yüksek ithal mavi ve yüksek yerel yeşil su ayak izine geçiş yapılması önemlidir (Mourad ve diğ., 2019). Türkiye'nin de içinde bulunduğu Orta Doğu ve Kuzey Afrika bölgesinde kullanılan mısır, buğday ve arpanın yaklaşık %50'si ve soya fasulyesinin %95'inden fazlasının ithal edildiği, geri kalanı ise yerel olarak üretilmektedir. Bu ithalatlar bölgede yılda yaklaşık 48 milyar m³ su tasarrufu sağlamaktadır. Bu bölgede aynı zamanda mavi sulardan tasarruf etmek amacıyla sulanan mahsuller yerine yağmurla beslenen mahsullerden yem üretimine daha fazla odaklanılması da bir çözüm sunacaktır (Mourad ve diğ., 2019).

Özellikle su kıtlığı problemi yaşayan ülkeler için, süt hayvancılığı üreticilerinin yem rasyon formülasyonunda daha yüksek mavi su ayak izine yol açan faaliyetlere özellikle dikkat etmeleri gerekmektedir. Örneğin yonca, mısır, sorgum ve yulaf silajları gibi yemlerin mavi su ayak izinin yüksek olması nedeniyle verimli ve sürdürülebilir bir şekilde üretildiklerinden emin olmak için özellikle dikkat edilmesi önemlidir. Su kullanımı açısından sürdürülebilir olabilmek için, mavi su ayak izine daha fazla katkı sağlayan mısır silajının yerine, su ayak izinin düşük ve süt verimine yüksek katkı sağladığı tespit edildiğinden tritikale silajı kullanımı alternatifi gibi, hem su ayak izini düşüren hem de verime katkısı bulunan alternatifler düşünülmesi de önemlidir (Owusu-Sekyere ve diğ., 2016).

Orta Doğu ve Kuzey Afrika'da 15 farklı ülkede hayvansal ürünlerin su ayak izinin takip edildiği bir çalışmada (Mourad ve diğ., 2019) Yemen, Türkiye ve Moritanya'nın, kişi başına en fazla ithal edilen sanal yeşil suya ve aynı zamanda

hayvancılık ile ilgili en yüksek yerel mavi suya sahip olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar ayrıca, çalışmada incelenen ülkelerin kişi başına ithal edilen sanal mavi suyu benzer şekilde paylaşmasına rağmen, kişi başına ithal edilen yeşil su miktarında yüksek değişkenlik olduğunu göstermektedir. Türkiye, Tunus ve Yemen, başta sığır eti olmak üzere kişi başına en yüksek mavi su tüketimine sahip ülkeler olduğu tespit edilmiştir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışması insan beslenmesinde önemli bir yeri bulunan süt ürünlerinin, sırasıyla çiftlikte süt üretimi, sütün çiftlikten alınarak üretim tesisine iletilmesi ve süt ürünlerinin üretiminin yapıldığı tesis dahilinde yeşil, mavi ve gri su ayak izinin takip edilmesini hedeflemiştir. Üç farklı süt ürünü (beyaz peynir, kaşar peyniri ve yoğurt) baz alınarak birim ürün üretiminde harcanan doğrudan ve dolaylı toplam su miktarı hesaplanmıştır. Süt üretiminin gerçekleştirildiği çiftlikte toplam su ayak izinin %44.5'ini yeşil su ayak izi, %32.7'sini mavi su ayak izi ve %22.8'ini gri su ayak izi oluşturmaktadır. Yeşil ve gri su ayak izlerinin tamamı yem bitkileriyle ilişkilidir. Süt toplama ve iletim tesisinde hesaplanan su ayak izinin %88.5'ini mavi su ayak izi oluşturmaktadır. Gri su ayak izi ise elektrik tüketiminden kaynaklanmaktadır. Süt ürünleri üretim tesisinde toplam su ayak izinin %96.6'sı mavi su ayak izi ve kalan %3.4'ünü gri su ayak izi oluşturmaktadır. Her bir adım için verilen su ayak izi değerleri incelendiğinde en yüksek su ayak izine sahip ürün bütün adımlar için kaşar peyniridir, bunu beyaz peynir ve yoğurt takip etmektedir. Yoğurdun düşük su ayak izine sahip olması ve peynir türlerinin daha yüksek su ayak izlerinin bulunması literatür çalışmalarıyla da uyumlu bulunmuştur. Toplam su ayak izleri kaşar peyniri için 12879 m³/ton, beyaz peynir için 8371 m³/ton ve yoğurt için 1674 m³/ton olarak belirlenmiştir. Süt ürünlerinin üretiminde toplam su ayak izinin yaklaşık %97.5'i süt üretiminin sağlandığı çiftlikte oluşan su ayak izidir, bunun da önemli bir kısmı yem bitkilerinin üretiminde oluşan su ayak izidir.

5.2 Öneriler

İnsan diyetinde vazgeçilmez bir yere sahip olan hayvansal ürünler, hammaddenin oluşumundan en son ürünün işlenip paketlenmesi aşamasına kadar farklı kategorilerde ve miktarlarda su tüketimine neden olmakta ve su kaynakları üzerinde baskı oluşturmaktadır. Bölgesel, coğrafi şartlara, tarımsal faaliyetlerin uygulanma yöntemlerine ve ürünlerin üretim proseslerine bağlı olarak her bir ürün farklı miktarlarda su tüketimine neden olmaktadır.

Süt ürünleri ile ilgili çalışmaların pek çoğu büyük çalışma alanları kapsamında yapılmış ve farklı uygulamaların ortalamasını vermiştir. Daha küçük çalışma alanları özelinde yapılan incelemeler pik değerlerin tespit edilebilmesinde daha çok katkı sağlayabilecektir. Bu tez çalışmasında orta ölçekte bir işletme için veriler temin edilmiş ve bu kategorideki su tüketimi hakkında bilgi sağlamıştır. Süt üretim çiftliğinde toplam su ayak izinin %99.5'lik kısmını canlı hayvan su ayak izinin oluşturması ve bu kategoride de yem bileşenlerinin üretiminin önemli bir kısmı oluşturması nedeniyle, süt ürünleri üretim sektöründe su tüketiminin azaltılmasında alınması gereken en etkili tedbirler yem bileşenleri ile ilgili olmalıdır. Yem bileşenlerinin üretiminde, özellikle su kıtlığı problemiyle karşı karşıya kalan bölgeler için, daha az mavi su kaynaklarının kullanımının sağlanması veya su problemi daha az olan ülkelere ithal yem bileşenlerinin kullanım alternatiflerinin değerlendirilmesi en uygun alternatiflerdir. Bunun yanı sıra süt ürünleri içerisinde daha yüksek su ayak izine sahip olan ürünlerin üretiminde su tüketimin azaltan yeni teknolojilerin araştırılması ve bu ürünlerin daha uygun ülkelere ithal edilmesi de global su problemlerinin üstesinden gelinmesine katkı sağlayacaktır. Bu tez çalışmasında tez kurgusu ile örtüşmediği için sağlıklı bilgi elde edilemeyeceği düşünüldüğü için süt ürünleri üretim tesisi atıksu arıtma proseslerine ait su ayak izi hesapları tez kapsamına dahil edilmemiştir. Bundan sonraki yapılacak çalışmalarda atıksu arıtma tesisi ve oluşacak gri suların hesaplamasının yapılması daha aydınlatıcı sonuçların elde edilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Alqahtani, S. H., Alropy, E. T., Kotb, A. A., & Alaagib, S. E. B., 2021, Estimation of the standard model of the water footprint of individuals in the Kingdom of Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1-12.
- Ansorge, L., Stejskalová, L., & Dlabal, J., 2020, Effect of WWTP size on grey water footprint—Czech Republic case study. *Environmental Research Letters*, 15(10), 104020.
- ASÜD, 2019, Türkiye Sütçülük Sektöründe Mevcut Su Kullanımı Analizi, Ambalajlı Süt ve Süt Ürünleri Sanayicileri Derneği, Türkiye Sütçülük Sektörünün Su Sürdürülebilirliği: Verimlilik, Riskler ve Kırılganlıklar projesi Sivil Toplum Diyalogu-V.
- Bai, X., Ren, X., Khanna, N. Z., Zhou, N., & Hu, M., 2018, Comprehensive water footprint assessment of the dairy industry chain based on ISO 14046: A case study in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 369-375.
- Batan, M., 2021, Planning the use of water in Şanlıurfa province, which struggles with drought: Water footprint analysis. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(4), 2135-2150.
- Chang, H., 2019, Water and Climate Change, *International Encyclopedia of Geography*. pp.1–6, doi: 10.1002/9781118786352.wbieg0793.pub2.
- Chapagain , A. K. ve Hoekstra, A. Y., 2004, Water footprints of nations Value of Water. <https://research.utwente.nl/en/publications/water-footprints-of-nations>
- Chen, H. L., Liu, Y., Gong, X. Z., Hao, L. W., Sun, B. X., & Li, X. Q., 2020, A Review on Water Footprint Research of Materials Industry. In *Materials Science Forum* (Vol. 993, pp. 404-413). Trans Tech Publications Ltd.
- Çankaya, T., 2019, Atık su arıtma tesislerinde su ayak izi hesaplama yöntem önerisi ve haddeleme-galvanizleme tesisinde uygulama örneği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul.
- Dourte, D. R., Fraisse, C. W. ve Uryasev, O., 2014, Water footprint on agro climate: A dynamic, web-based tool for comparing agricultural systems. *Agricultural Systems*, 125, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.11.006>
- Drastig, K., Prochnow, A., Kraatz, S., Klauss, H., & Plöchl, M., 2010, Water footprint analysis for the assessment of milk production in Brandenburg (Germany). *Advances in Geosciences*, 27, 65-70.
- Egan, M., 2011, *The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard*, vol. 31, no. 2. 2011. doi: 10.1080/0969160x.2011.593864.
- Ercin E. 2020, Türkiye Sütçülük Sektörünün Kırılganlıkları: Değişen İklimde Su Riskleri. *Water Footprint Network. Teknik Rapor*. Ercin, E. (2020). *Vulnerabilities of the Turkish Dairy Sector*.

- Ercin, A. E., Aldaya, M. M. ve Hoekstra, A. Y., 2011, Corporate water footprint accounting and impact assessment: the case of the water footprint of a sugar-containing carbonated beverage. *Water Resources Management*, 25(2), 721–741. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9723-8>
- Ewaid, S. H., Abed, S. A., Chabuk, A., & Al-Ansari, N. (2021, April). Water footprint of rice in Iraq. In *IOP conference series: earth and environmental science* (Vol. 722, No. 1, p. 012008). IOP Publishing.
- Falkenmark, M., Widstrand .C., 1992, Population and water resources: a delicate balance. <https://www.semanticscholar.org/paper/Population-and-water-resources%3A-a-delicate-balance.-Falkenmark-Widstrand/1499bb8d40cd481b33d23e366ed4bcac1f7a7008>.
- FAO, 2020, The State of Food and Agriculture 2020. doi: 10.4060/cb1447en.
- FAO, 2021, FAO Publication Series. [Online]. Available: <http://www.fao.org/e-agriculture/news/e-agriculture-action-blockchain-agriculture>
- Francke, I. C. M., ve Castro, J. F. W., 2013, Carbon and water footprint analysis of a soap bar produced in Brazil by Natura Cosmetics. *Water Resources and Industry*, 1, 37-48.
- Gibin, D., Simonetto, A., Zanini, B., & Gilioli, G., 2022, A framework assessing the footprints of food consumption. An application on water footprint in Europe. *Environmental Impact Assessment Review*, 93, 106735.
- Hoekstra , A. Y. ve Mekonnen, M. M., 2012, The water footprint of humanity, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 109, no. 9. pp. 3232–3237, 2012. doi: 10.1073/pnas.1109936109.
- Hoekstra, A. Chapagain, A. Aldaya, M. and Mejonnen, M., 2009, Water footprint manual. *Ambio*, vol. 34, no. 1. p. 19,
- Hoekstra, A. Y., 2012, The hidden water resource use behind meat and dairy, *Anim. Front.*, vol. 2, no. 2, pp. 3–8, Apr. 2012, doi: 10.2527/AF.2012-0038.
- Hoekstra, A. Y., 2015, The Water Footprint: The Relation Between Human Consumption and Water Use. doi: 10.1007/978-3-319-16393-2_3.
- Hoekstra, Arjen Y, Chapagain, A. K., Aldaya, M. M. ve Mekonnen, M. M., 2011, The water footprint assessment manual (1st ed.). Retrieved from <http://www.hydrology.nl/images/docs/dutch/key/TheWaterFootprintAssessmentManual.pdf%0Ahttp://www.waterfootprint.org/downloads/TheWaterFootprintAssessmentManual.pdf>
- Huang, J., Xu, C. C., Ridoutt, B. G., Liu, J. J., Zhang, H. L., Chen, F., & Li, Y., 2014, Water availability footprint of milk and milk products from large-scale dairy production systems in Northeast China. *Journal of Cleaner Production*, 79, 91-97.
- Joy, M. K., Rankin, D. A., Wöhler, L., Boyce, P., Canning, A., Foote, K. J., & McNie, P. M., 2022, The grey water footprint of milk due to nitrate leaching from dairy farms in

- Canterbury, New Zealand. *Australasian Journal of Environmental Management*, 29(2), 177-199.
- Manzardo, A., Ren, J., Piantella, A., Mazzi, A., Fedele, A. ve Scipioni, A., 2014, Integration of water footprint accounting and costs for optimal chemical pulp supply mix in paper industry. *Journal of Cleaner Production*, 72, 167–173. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.014>
- Mekonnen , M. M. ve Hoekstra, A. Y., 2012, A Global Assessment of the Water Footprint of Farm Animal Products. *Ecosystems*, vol. 15, no. 3, pp. 401–415, Apr. 2012, doi: 10.1007/S10021-011-9517-8.
- Mekonnen, M., & Hoekstra, A. Y., 2010, The green, blue and grey water footprint of farm animals and animal products. Volume 1: Main Report.
- Mekonnen, M., & Hoekstra, A. Y., 2011, The water footprint of electricity from hydropower, Research Report Series No:51, UNESCO-IHE, Institute for Water Education, The Netherlands.
- Mohsin, A.K.M., 2022,. Bursa ilinin su ayak izinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bursa.
- Mourad, R., Jaafar, H. H., & Daghir, N. (2019). New estimates of water footprint for animal products in fifteen countries of the Middle East and North Africa (2010–2016). *Water resources and industry*, 22, 100113.
- Muratoğlu, A. (2020). Üretimin su ayak izinin incelenmesi: Diyarbakır ili için bir vaka çalışması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(2), 845-858.
- Owusu-Sekyere, E., Jordaan, H., & Chouchane, H., 2017, Evaluation of water footprint and economic water productivities of dairy products of South Africa. *Ecological indicators*, 83, 32-40.
- Palhares, J. C. P. ve Pezzopane, J. R. M., 2015, Water footprint accounting and scarcity indicators of conventional and organic dairy production systems. *Journal of Cleaner Production*, 93, 299–307. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.035>
- Pegram, G., Conyngham, S., Aksoy, A., Dıvrak, B., & Öztok, D., 2014, Türkiye'nin su ayak izi raporu: su, üretim ve uluslararası ticaret ilişkisi. In: WWF-Türkiye, <http://d2hawiim0tjbd8.cloudfront.net/downloads>.
- Ridoutt, B. G. ve Pfister, S., 2010, A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity. *Glob. Environ. Chang.*, vol. 20, no. 1, pp. 113–120, 53 Feb. 2010, doi: 10.1016/J.GLOENVCHA.2009.08.003.
- Souissi, A., Mtimet, N., Thabet, C., Stambouli, T., & Chebil, A., 2019, Impact of food consumption on water footprint and food security in Tunisia. *Food Security*, 11, 989-1008.

- Sütürmak, T., 2020, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Avcılar Kampüsü Su Ayak İzi Profili, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul.
- Şahin, H., 2018, Su Ayak İzi Kavramının Sürdürülebilir Su Yönetimi Çalışmalarında Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Antalya.
- Thakur, A., Kumar, A., Vanita, B., Panchbhai, G., Kumar, N., Kumari, A., & Dogra, P., 2018, Water footprint a tool for sustainable development of Indian dairy industry. *International Journal of Livestock Research*, 8(10), 1-18.
- Tompa, O., Kiss, A., Maillot, M., Sarkadi Nagy, E., Temesi, Á., & Lakner, Z., 2022, Sustainable Diet Optimization Targeting Dietary Water Footprint Reduction—A Country-Specific Study. *Sustainability*, 14(4), 2309.
- Tzanakakis, V. A. Paranychianakis, N. V and Angelakis, A. N., 2020, Water Supply and Water Scarcity. doi: 10.3390/w12092347.
- UNESCO, 2015, UNESCO's contribution to The United Nations World Water Development Report 2015 - FACING THE CHALLENGES- CASE STUDIES AND INDICATORS. [Online]. Available: <http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002321/232179E.pdf>
- UN-Water, 2019, The United Nations world water development report. leaving no one behind-UNESCO Digital Library. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367306>
- UN-Water, 2020, UN World Water Development Report UN World Water Development Report 2020 'Water and Climate Change' <https://www.unwater.org/world-water-development-report-2020-water-and-climate-change/>
- UN-Water, 2021, Progression Level of Water Stress. <https://www.unwater.org/publications/progress-on-level-of-water-stress-642-2021-update/>
- URL-1: <https://www.wsdr.org/tr/> [Ziyaret tarihi: 15.10.2023].
- Vasilaki, V., Katsou, E., Ponsá, S., & Colón, J., 2016, Water and carbon footprint of selected dairy products: A case study in Catalonia. *Journal of cleaner production*, 139, 504-516.
- WWF., 2014, Türkiye'nin Su Ayakizi Raporu: Su, Üretim ve Uluslararası Ticaret İlişkisi. 2014. [Online]. Available: http://d2hawiim0tjbd8.cloudfront.net/downloads/su_ayak_izi_raporweb.pdf
- Zhao, R., He, H., & Zhang, N. (2015). Regional water footprint assessment: A case study of Leshan City. *Sustainability*, 7(12), 16532-16547.
- Zhao, X., Yang, H., Yang, Z., Chen, B. ve Qin, Y., 2010, Applying the input-output method to account for water footprint and virtual water trade in the Haihe River Basin in China. *Environmental Science & Technology*, 44(23), 9150–9156.

Zhuo, L., Mekonnen, M. M. ve Hoekstra, A. Y., 2014, Sensitivity and uncertainty in crop water footprint accounting: A case study for the Yellow River basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(6), 2219–2234. <https://doi.org/10.5194/hess-18-2219-2014>

