Volume 2
Issue 1
2025



ANATOLIA

SCIENCE AND TECHNOLOGY JOURNAL

ANATOLIA
SCIENCE AND TECHNOLOGY JOURNAL

YEAR 2 VOLUME 2 ISSUE 1

Editorial Team

Editor in Chief

Assist. Prof. Dr. Veysel Fatih ÖZDEMİR, Atatürk University, Department of Animal Science, TÜRKİYE (veysel.ozdemir@atauni.edu.tr)

Associate Editor

Assist. Prof. Dr. Orhan YILDIRIM, Atatürk University, Department of Mechanical Engineering, TÜRKİYE (orhan.yildirim@atauni.edu.tr)

Editorial Board

Assoc. Prof. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN, Konya Technical University, Mechanical Engineering, TÜRKİYE (mhcetin@ktun.edu.tr)

Assoc. Prof. Dr. Halit ÖZTEKİN, Sakarya University of Applied Sciences, Department of Computer Engineering, TÜRKİYE (halitoztekin@subu.edu.tr)

Assoc. Prof. Dr. Emrah AYDEMİR, Sakarya University Faculty of Business, Department of Management Information, TÜRKİYE

Assoc. Prof. Dr. Yalçın ATA, OSTİM Technical University, Department of Electronical and Electronical Engineering, TÜRKİYE

Assoc. Prof. Dr. Halil NOHUTCU, Manisa Celal Bayar University, Department of Civil Engineering, TÜRKİYE (halil.nohutcu@cbu.edu.tr)

Assoc. Prof. Dr. Burak SÜRMEN, Karamanoğlu Mehmetbey University, Department of Biology, TÜRKİYE (buraksurmen@gmail.com)

Assoc. Prof. Dr. Erdem IŞIK, Munzur University, Department of Mechanical Engineering, TÜRKİYE (erdem@munzur.edu.tr)

Assoc. Prof. Dr. Halil İbrahim BURGAN, Akdeniz University, Department of Civil Engineering, TÜRKİYE (burgan@akdeniz.edu.tr)

Assist. Prof. Dr. Hasan Hüseyin ÇEVİK, Selçuk University, Department of Electric-Electronic Engineering, TÜRKİYE (hasanhcevik@selcuk.edu.tr)

Assist. Prof. Dr. İbrahim ÖZTÜRK, Osmaniye Korkut Ata University, Department of Electric and Electronics, TÜRKİYE (ibrahimozturk@osmaniye.edu.tr)

Assist. Prof. Dr. Mehmet ŞAHBAZ, Karamanoğlu Mehmetbey University, Department of Mechanical Engineering, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Ünal ŞİRİN, Van Yüzüncüyıl University, Department of Biosystem Engineering, TÜRKİYE (sirinunal@yyu.edu.tr)

Assist. Prof. Dr. Enes GÜL, İnönü University, Department of Civil Engineering, TÜRKİYE (enes.gul@inonu.edu.tr)

Assist. Prof. Dr. Abdullah DEMİR, Marmara University, Department of Mechanical Engineering, TÜRKİYE (ademir@marmara.edu.tr)

Assist. Prof. Dr. Osman KARA, Gümüşhane University, Department of Civil Engineering, TÜRKİYE (osmankara@gumushane.edu.tr)

Assist. Prof. Dr. Mahmut ÜNVER, Kırıkkale University, Department of Computer Technologies, TÜRKİYE (munver.kku.edu.tr)

YEAR 2 VOLUME 2 ISSUE 1

CONTENT

Research Articles

Piston Akımlı Anaerobik Biyoreaktörde Sığır Gübresi ve Gıda Atıklarının Birlikte Sindiriminin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi 1
Fatih Şevki ERKUŞ, Şima VAROL

DXD-HSK Dolu Koni Sprey Nozulu ile Fotovoltaik Panellerin Soğutma Performansının İncelenmesi 13
Muhammet Harun OSTA, Kenan YAKUT

Review Articles

Nötrino Fiziği ve Güncel Gelişmeleri Üzerine 22
Yusuf SAĞLAM

Otomatik Sağım Sistemleri 43
Semanur KARAGÖZ, Şeyma ÇİLO

Erimiş Tuz Reaktörleri'nin (MSR) Tarihsel Gelişimi, Teknolojik İlerlemeleri ve Gelecek Perspektifleri 52
Mürselat YÜRÜMEZ

Anatolia Science and Technology Journal (ASTEJ)

ASTEJ, 2025, 2(1)
DOI: 10.5281/zenodo.17427161
Araştırma Makalesi/ Research Article

Piston Akımlı Anaerobik Biyoreaktörde Sığır Gübresi ve Gıda Atıklarının Birlikte Sindiriminin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Fatih Şevki ERKUŞ[1*], Şima VAROL[1]
[1]Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Van-Türkiye

Özet

Anaerobik sindirim, biyokütleyi doğal olarak biyogaza dönüştüren ve aksi takdirde depolama alanlarına gömülmesi veya yakılması gereken atıkları azaltan biyolojik bir süreçtir. En yaygın kullanılan biyoreaktör tipleri, sürekli karıştırmalı tank reaktörler ve piston akımlı reaktörlerdir. Piston akımlı reaktörler, tarımsal biyogaz tesislerinin tasarımında basitlikleri, ekonomik olmaları ve maliyet etkinlikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Geleneksel olarak, gübrenin anaerobik sindirilmesi çiftliklerde uygulanmakta olsa da, tarımsal biyogaz tesislerinde sınırlı enerji üretimi, yaygınlaşmasını engellemektedir. Benzer şekilde, sığır gübresi gibi, gıda atıkları da yeterince değerlendirilememekte ve genellikle çöp sahalarına gömülmektedir. Bu çalışma, sığır gübresi ve kampüs kaynaklı gıda atıklarının anaerobik birlikte sindirimi yoluyla biyogaz üretiminin çevresel etkilerini değerlendirmek amacıyla karşılaştırmalı yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) uygulamaktadır. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi'nde bulunan pilot ölçekli piston akımlı biyoreaktör (PAR) verileri kullanılarak, iki biyogaz senaryosu analiz edilmiştir: (i) sığır gübresinin tekli sindirimi ve (ii) gıda atıkları ile birlikte sindirim. YDD sonuçları, birlikte sindirim senaryosunun küresel ısınma etkisini yaklaşık %60 oranında azalttığını göstermiştir. Çevresel etkideki bu iyileşme, büyük ölçüde gıda atıklarının düzenli depolamaya gönderilmemesi sayesinde sağlanan çevresel metan emisyonu kredilerinden kaynaklanmaktadır. Analizlerde, biyogazla üretilen 1 MJ enerjiye düşen çevresel etkilerin özellikle sindirim çamurunun açıkta depolanması kaynaklı olduğu görülmüştür. Birlikte sindirim, asidifikasyon ve kötü kokulu hava etkileri dışında değerlendirilen tüm kategorilerde daha üstün çevresel performans sergilemiştir. Bu bağlamda, sindirim çamurunun kapalı sistemlerde depolanması ve araziye uygulama süreçlerinin iyileştirilmesi önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Anaerobik sindirim, emisyon kredileri, piston akımlı reaktör, sindirim çamuru, yaşam döngüsü değerlendirmesi.

A Life Cycle Assessment of Co-Digestion of Cattle Manure and Food Waste in a Plug-Flow Anaerobic Digester

Fatih Şevki ERKUŞ[1*], Şima VAROL[1]
[1]Van Yuzuncu Yil University, Faculty of Agriculture, Department of Biosystems Engineering, Van-Türkiye

Abstract

Anaerobic digestion (AD) is a biological process that naturally converts biomass into biogas while reducing waste requiring landfill disposal or incineration. Commonly used digester types include continuously stirred tank reactors and plug flow reactors; the latter are favored in agricultural biogas facilities due to their simplicity, cost-effectiveness, and efficiency. While traditionally practiced on farms for manure management, wider adoption of agricultural AD has been limited by relatively low energy production. Similarly, food waste—such as cattle manure—is often underutilized and sent to landfills. This study employs a comparative Life Cycle Assessment (LCA) to evaluate the environmental impacts of biogas production through co-digestion of cattle manure and food waste sourced from a university campus. Data were collected from a pilot-scale plug flow reactor located at Van Yuzuncü Yil University, analyzing two scenarios: (i) mono-digestion of cattle manure and (ii) co-digestion with food waste. LCA results demonstrate that the co-digestion scenario reduced global warming potential by approximately 60%, largely due to avoided methane emissions from landfilling food waste. Environmental impacts per MJ of energy produced were primarily associated with open storage of digestate. Co-digestion demonstrated superior environmental performance across all assessed categories except for acidification and malodorous air potential; therefore, improved management practices such as enclosed digestate storage and optimized land application are recommended.

Keywords: Anaerobic digestion, digestate, emission credits, life cycle assessment, plug flow reactor.

* Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: Fatih Şevki ERKUŞ, e-posta: fatiherkus@yyu.edu.tr, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8541-7048
** Yazar/ Author: Şima VAROL, e-posta: simavarol1@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-4949-5307
*** Bu çalışma, 9. Uluslararası Küresel Disiplinlerarası Bilimsel Çalışmalar Uygulamaları Konferansı'nda (Havana, Küba 2025) sunulmuştur.
****Geliş/Received: 25/04/2025, Düzeltme/Revised: 12/05/2025, Kabul/Accepted: 14/05/2025, Yayınlanma/Published: 24/10/2025.

1. Giriş

İklim değişikliğiyle mücadele kapsamında, uluslararası sözleşmeler doğrultusunda hükümetler, yenilenebilir enerji üretimini artırma ve sera gazı emisyonlarını azaltma yönünde artan baskı altındadır. Türkiye'de yıllık yaklaşık 32 milyon ton atığın %34'ü gıda atıklarından oluşmakta ve bu atıkların büyük bölümü düzenli depolama sahalarında bertaraf edilmektedir (Bilgili & Çetinkaya, 2023). Bu durum, hem sera gazı emisyonlarının artmasına hem de organik atıkların geri kazanım potansiyelinin göz ardı edilmesine neden olmaktadır. Atık yönetimi uygulamalarında en son tercih edilecek yöntem olarak kabul edilen düzenli depolama, organik atıkların geri dönüşüm potansiyelini değerlendirememesi, toprak ve su kirliliğine neden olması ve sera gazı emisyonlarını artırması gibi olumsuzluklara rağmen, özellikle gelişmekte olan ülkelerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Masalegooyan ve ark., 2022). Mevcut biyolojik arıtma yöntemleri arasında, anaerobik sindirim, biyokütle, katı atık ve arıtma çamuru gibi organik maddeleri dönüştüren gelişmiş ve yaygın olarak kullanılan bir teknoloji sunmaktadır. Anaerobik sindirim, organik maddelerin anaerobik koşullar altında metabolik bozunma ve stabilizasyonunu içeren bir dizi süreçten oluşur. Bu süreçler hidroliz, asidojenez, asetojenez ve metanojenez aşamalarını kapsayarak yenilenebilir bir enerji kaynağı olan biyogazın (büyük oranda metan ve karbondioksit içeren karışım) oluşumuna yol açar (Longis ve ark., 2023). Bu süreçler sonucunda; yaklaşık %60 metan içeren ve sera gazı emisyon dengesi sıfır olan temiz enerji kaynağı elde edilir. Anaerobik sindirimde biyogaza ek olarak gübre üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını azaltarak toprak iyileştirici olarak değerlendirilebilen ve bitki besin elementleri açısından zengin anaerobik sindirim son ürünü olan sindirim çamuru elde edilmektedir (Shoshaa ve ark., 2024).

Tarım işletmelerinde faaliyet gösteren biyogaz tesislerinin yüksek yatırım maliyetleri ve düşük ekonomik verimliliği, biyogaz sektörü gelişiminin önündeki başlıca engellerden biridir (Kusz ve ark., 2024). Anaerobik sindirim sistemleri, atığın türüne ve işletme koşullarına bağlı olarak farklı reaktör tasarımlarına sahiptir. Tam karışımlı tank reaktörler, sıvı atıklar için uygunken; piston akımlı reaktörler yüksek katı madde içeriği olan atıklar için tercih edilir. Piston Akımlı Reaktörler, sürekli karıştırmalı tank reaktörlere kıyasla daha düşük ilk yatırım maliyeti ve enerji gereksinimiyle ekonomik açıdan avantajlı bir alternatif sunmaktadır (Shoshaa ve ark., 2024). Diğer anaerobik reaktör türleriyle karşılaştırıldığında, PAR'lar, içyapılarında daha az hareketli parça bulunması nedeniyle genellikle daha basit bir işletim sürecine sahiptir. Ayrıca, PAR'ların başlatma süreci genellikle diğer reaktör konfigürasyonlarına göre daha kısa sürede tamamlanmakta ve düşük maliyetli, inşası kolay yapıları sayesinde, özellikle çiftçilerin yaşam standartlarını iyileştirmeye yönelik uygun bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır (Dong ve ark., 2019).

Sığır gübresi, anaerobik sindirim sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir substrat olmasına rağmen, düşük karbon/azot (C/N) oranı ve sınırlı biyolojik parçalanabilirliği nedeniyle düşük biyogaz verimi ile sonuçlanmaktadır (Tan ve ark., 2021). Bu duruma çözüm olarak, gıda atıkları ve hayvansal gübrenin birlikte anaerobik sindirimi, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği açısından umut vadeden bir strateji olarak öne çıkmaktadır (Peng ve ark., 2020). Gıda atıkları, yüksek organik madde ve besin içeriği sayesinde hızla ayrışarak metan üretimini artırırken, çiftlik gübreleri yüksek tamponlama kapasiteleriyle sindirim sürecini stabilize etmektedir (Leung & Wang, 2016). Bu tamamlayıcı özellikler, birlikte sindirim sistemlerinde sinerjik etkiler yaratarak biyogaz verimini ve proses stabilitesini önemli ölçüde artırmaktadır. Ayrıca, gıda atıklarının anaerobik sindirim yoluyla değerlendirilmesi, düzenli depolama ve arazi uygulaması gibi geleneksel yöntemlere getirilen düzenleyici kısıtlamalara da alternatif oluşturmaktadır (Ebner ve ark., 2015). Tarımsal biyogaz tesisleri, teknik potansiyel açısından önemli fırsatlar sunmakla birlikte, tarımsal atıkların düşük C/N oranı ve kompleks lignoselülozik yapısı nedeniyle mikrobiyal kullanılabilirliği sınırlıdır (Hagos ve ark., 2017). Bu nedenle, özellikle gıda atıkları gibi biyolojik olarak daha kolay parçalanabilen substratların eklenmesi, sistemin genel verimliliğini artırmakta ve ekonomik sürdürülebilirliği desteklemektedir (Ankathi ve ark., 2024).

Literatürde yapılan çok sayıda YDD çalışması, hayvansal gübre ve gıda atıklarının birlikte anaerobik sindiriminin, yalnızca gübreye dayalı tekli sindirim sistemlerine kıyasla daha yüksek biyogaz verimi sağladığını ve sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azalttığını göstermektedir (Ebner ve ark., 2015). YDD metodolojileri, ürün veya süreçlerin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini ve maliyetlerini analiz ederek, sürdürülebilir atık yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır (Slorach ve ark., 2019).

Zhang ve ark. (2021), tarafından yürütülen çalışmada, domuz gübresi ile çim silajının birlikte sindirimi, 11 çevresel etki kategorisinin 9'unda en iyi çevresel performansı göstermiş; küresel ısınma potansiyelinde %48 oranında azalma ve enerji geri kazanımında %226 artış sağladığı gösterilmiştir. Benzer şekilde, Tan ve ark. (2022), tarafından Malezya'daki varsayımsal bir biyogaz tesisinde gerçekleştirilen LCA çalışmasında, sığır gübresi ile yem atığı, kanalizasyon çamuru ve iade süt ürünlerinin birlikte sindirimi, küresel ısınma, asidifikasyon ve ötrofikasyon kategorilerinde en iyi çevresel sonucu vermiştir.

Pehme ve ark. (2017), ise sığır gübresi ile enerji bitkisi ve doğal çimlerin birlikte sindirimini karşılaştırmış; birlikte sindirim senaryosunun, tekli sindirim ile kıyaslandığında küresel ısınmada %41, fosfor bazlı ötrofikasyonda ise 2 kat iyileşme sağladığını göstermiştir. Bu sonuçlar, enerji verimliliği ve çevresel etki azaltımı açısından birlikte sindirimin daha sürdürülebilir bir seçenek olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi'nde bulunan pilot ölçekli piston akımlı reaktörde gerçekleştirilen tekli ve birlikte sindirim senaryolarının yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılarak, gıda atıklarının yardımcı substrat olarak kullanılması durumunda elde edilecek çevresel kazanımlar sunulmuştur. Karşılaştırmalı analiz kapsamında çalışmada iki senaryo değerlendirilmiştir: (i) tekli sığır gübresi sindirimi ve (ii) sığır gübresi ile kampüs gıda atıklarının birlikte sindirimi. Bu analiz, mevcut çiftlik ölçekli biyogaz tesislerinde sürdürülebilir atık yönetimi ve enerji üretimi için öneriler sunmayı hedeflemektedir.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, hayvancılık sektöründe pilot çiftlik ölçekli piston akımlı biyoreaktörde birlikte sindirim sistemlerinin çevresel etkileri, geleneksel tekli sindirim gübre ve gıda atığı yönetim uygulamalarıyla karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, biyokütle yönetimi karar verme süreçlerini desteklemek için en uygun yöntem olarak kabul edilen karşılaştırmalı YDD yaklaşımıyla gerçekleştirilmiştir (Xiao ve ark., 2022; Hossain ve ark., 2023). Bu çalışmada uygulanan YDD çerçevesi ve ilkeleri, ISO-14040 standardına (ISO14040, 2006) dayanmaktadır. Değerlendirme süreci, Open LCA 2.4.0 YDD yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gıda atıkları ve sığır gübresi yönetimi sırasında ortaya çıkan CO_2 emisyonları biyojenik kökenli olarak değerlendirilmiş, IPCC (2019) rehberine göre küresel ısınma potansiyeli hesaplamalarına dâhil edilmemiştir. Geleneksel tekli sindirim ile birlikte sindirim sistemlerinin karşılaştırmalı kıyaslanması amacıyla tüm girdi ve çıktı akışlarının normalize edildiği fonksiyonel birim, biyogaz tesisinde üretilen 1 MJ biyogaz enerjisi üretimi olarak tanımlanmıştır.

2.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Çalışmasının Amaç ve Kapsamı

Çalışmada sindirim senaryolarının oluşturulmasında, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Uygulama Çiftliği bünyesinde kurulu bulunan 78 m^3 hacmindeki pilot ölçekli PAR tasarım parametreleri temel alınmıştır. Biyogaz tesisi, mevcut durumda 50 büyükbaş hayvan kapasiteli ahırlardan toplanan gübrelerin besleme tankına aktarılması, katı madde oranının ayarlanması ve mekanik karıştırıcı ile homojenleştirilmesi yoluyla işletilmektedir. Islak hacmi 67,5 m^3 olan biyoreaktöre organik atık beslemesi ve geri devir işlemi, eksantrik vidalı pompa aracılığıyla sağlanmaktadır. Hem tekli hem de birlikte sindirim senaryolarında, %10 toplam katı madde içeriğine ayarlanmış substratlar kullanılarak, 37–40 °C sıcaklık aralığında ve 30 günlük hidrolik bekleme süresi işletme koşulları uygulanmıştır.

Bu çalışmada ele alınan her iki senaryo için ortak bir sistem tanımı yapılmıştır. Çalışma, hayvansal atıkların ana giriş substratı olarak kullanıldığı ve çiftlikte mevcut olduğu varsayılan, beşikten-kapıya yaklaşımını temel alan bir sistem sınırını esas almaktadır. Sistem, biyogazın enerji amaçlı kullanılabilir hale gelmesiyle son bulmakta; anaerobik sindirim sonucu oluşan sindirim çamuru ise araziye uygulanana kadar açık depolama havuzlarında muhafaza edilmektedir. Genel uygulamada sindirim çamuru, ekimden önce yılda bir kez toprağa uygulanmaktadır (Korba ve ark., 2024). Toprağa uygulama öncesi sindirim çamuru çiftlikte açık beton havuzlarda depolandığından karşılaştırmalı YDD çalışmalarında atık olarak değerlendirilmektedir (Hossain ve ark., 2023). Pilot biyogaz tesisi ile gıda atığı kaynaklarının aynı kampüs alanında bulunması ve taşıma emisyonlarının toplam emisyonlara katkısının %1'in altında kalması nedeniyle, substrat taşımaya ilişkin çevresel etkiler ihmal edilebilir düzeyde kabul edilmiştir (Chen ve ark., 2015). Tekli sindirim ve birlikte sindirim sistem sınırları Şekil 1'de özetlenmiştir.

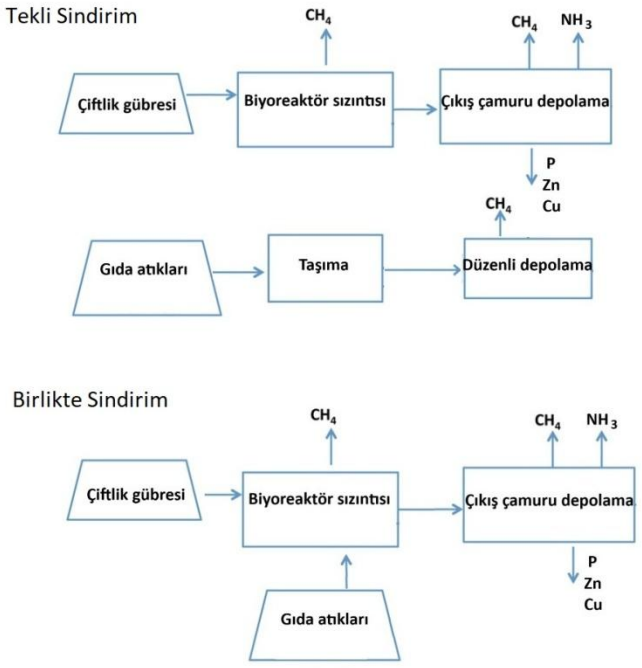
Bu çalışmada sığır gübresi, çevresel kirliliğin önlenmesi ve yenilenebilir enerji üretimi amacıyla ana substrat olarak değerlendirilmiştir. Birlikte sindirim senaryosu kapsamında ise, kolay erişilebilirliği ve mevcut atık yönetimi sistemlerinde etkin şekilde değerlendirilememesi nedeniyle gıda atıkları, ek substrat olarak seçilmiştir. PAR anaerobik sindirim süreçlerinde kullanılan ve substrat karışım oranlarını belirleyen her bir substratın biyokimyasal bileşimi Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. PAR biyoreaktörleri sindirim senaryolarında referans alınan subtrat biyokimyasal bileşimi
Table 1. *Reference substrate biochemical composition in PAR bioreactor digestion scenarios*

	Birim	Sığır gübresi	Gıda atığı	Sığır gübresi + Gıda atığı karışımı
Kül	% (TKM)	13,8	28,00	20,62
Uçucu Katılar	% TKM	79,71	86,07	82,76
P	g/kgTS	8,38	4,83	6,676
Zn	g/kgTS	0,280	0,060	0,174
Cu	g/kgTS	0,110	0,010	0,062
Karışım oranı	-	-	-	52:48

Tüm değerler El-Mashad ve Zhang (2010) çalışmasından alınmıştır. All properties taken from El-Mashad and Zhang (2010).

Mezofilik sindirim süreci sonucunda elde edilen biyogazın bileşimi, tekli sindirim için %66 CH_4 ve %33 CO_2 içeriğiyle 366 L/kg UKMeklenen biyogaz verimi ve birlikte sindirim için %59 CH_4 ve %40 CO_2 içeriğiyle 531 L/kg UKMeklenen biyogaz verimi olarak alınmıştır (El-Mashad & Zang, 2010). Elde edilen biyogazın yoğunluğu 1,15 kg/Nm³ ve alt ısıl değeri tekli sindirim için 20,85 MJ/kg ve birlikte sindirim için 17,30 MJ/kg olarak hesaplanmıştır (Linstrom, 2021). Biyogaz tesisinin anaerobik sindirim sürecinden kaynaklanan metan kayıpları, üretilen toplam metan veriminin %10'u; sindirim çamurunun açık depolanması sırasındaki kayıplar ise toplam biyogaz veriminin %9,2'si olarak kabul edilmiştir (Hossain ve ark., 2023).



Şekil 1. Anaerobik sindirim senaryoları sistem sınırları.
Figure 1. *System boundaries of anaerobic digestion scenarios.*

Birlikte sindirim senaryosunda, düzenli depolama sahasına gönderilmesi önlenen gıda atıkları çevresel kredi olarak değerlendirilmiş; buna karşılık, hava, su ve toprak ortamlarına salınan emisyonlar ise çevresel yük olarak ele alınmıştır. Ayrıca, biyojenik kökenli CO_2 emisyonları değerlendirme kapsamına alınmamıştır; zira gübrede bulunan karbonun, sığırların beslenmesinde kullanılan bitkiler tarafından atmosferden alındığı varsayılmaktadır. Çıkış ürünü olan sindirim çamuru ile ham gübrenin ise açık depolama havuzlarında bekletildiği ve ardından sonbahar döneminde yüzeysel arazi uygulaması yoluyla bertaraf edildiği varsayılmıştır (Aguirre-Villegas ve ark., 2019).

Birlikte sindirim sürecinde kullanılan gıda atıklarının düzenli depolamaya yönlendirilmediği varsayılmakta ve bu sayede söz konusu atıkların bertarafı sırasında oluşacak CH_4 kaynaklı sera gazı emisyonlarının önlendiği kabul edilmektedir. Bu durum, birlikte sindirim senaryolarının iklim değişikliği üzerindeki etkilerini dengeleyen çevresel krediler sağlamaktadır. Gıda atıklarının düzenli depolanmasından kaynaklanan önlenmiş metan emisyonu, IPCC yöntemleri temel alınarak hesaplanmıştır (Eggleston ve ark., 2006).

2.2. Yaşam Döngüsü Envanteri

Bu çalışmada, yaşam döngüsü etki değerlendirmesi yöntemi olarak CML2001 IA baseline yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşım, özellikle anaerobik sindirim tesislerinin çevresel performansını değerlendirmek amacıyla literatürde yaygın olarak tercih edilen ve geçerliliği yüksek bir yöntemdir (Jiang ve ark., 2021; Tan ve ark., 2022; Zhang ve ark., 2021). Küresel ısınma, asidifikasyon, ötrofikasyon, karasal ekotoksisite ve kötü kokulu hava oluşum potansiyelleri olmak üzere beş yaygın kullanılan etki kategorisi bu süreçte karakterizasyon, normalizasyon ve ağırlıklandırma adımları gerçekleştirilmiştir (Guinée ve ark., 2002). Her bir etki kategorisini karakterize etmek için eşdeğerlik faktörleri kullanılmıştır. Bu faktörler, küresel ısınma için CO_2 eşdeğerleri, asidifikasyon için SO_2 eşdeğerleri, ötrofikasyon için fosfat eşdeğerleri, karasal ekotoksisite için 1,4-diklorobenzen (DCB) eşdeğerleri şeklindedir (Hossain ve ark., 2023). Veri eksikliği durumlarında, ilgili bölgeye özgü bilgiler ile literatürde yer alan raporlar ve akademik yayınlardan elde edilen varsayımlar temel alınmıştır. Yaşam döngüsü envanteri kapsamında analiz edilen süreçlere ilişkin girdi ve çıktı verileri ile her bir alt sistemin toplam emisyon değerleri detaylı şekilde Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Tekli sindirim ve birlikte sindirim senaryoları için Yaşam Döngüsü Envanteri
Table 2. *Life Cycle Inventory for single digestion and co-digestion scenarios*

PAR besleme: 225 kg TKM/gün		**Tekli sindirim**	**Birlikte sindirim**	**Kaynaklar**
Parametre	Birim	SG	SG+GA	
UKM	kg/gün	179,35	186,21	
Biyogaz verimi (30 gün)	L/kg $UKM_{eklenen}$	366	531	El-Mashad ve ark., 2010
BMP (30 gün)	L/kg $UKM_{eklenen}$	241	311	
pH		6,9	7,2	
UKM giderimi	%	45	68	
Toplam Katı Madde	kg/MJ	0,1429	0,1144	
Biyogaz yoğunluğu	kg/m^3	1,15	1,15	
Metan, biyojenik	v/v	0,66	0,59	
Karbondioksit, biyojenik	v/v	0,33	0,40	
Amonyak	v/v	0,00943	0,00919	Hossain ve ark., 2023
Hidrojen sülfür	v/v	0,00057	0,00081	
Biyogaz alt ısıl değeri	MJ/kg	20,85	17,30	Linstrom, 2021

Toplam biyogaz	kg/MJ	0,04796	0,05780	
Biyoreaktör sızıntısı	Üretilen biyogazın %10'u			Hossain ve ark., 2023
CH_4	kg/MJ	0,003165	0,003410	
CO_2	kg/MJ	0,001583	0,002310	
NH_3	kg/MJ	0,000045	0,000053	
H_2S	kg/MJ	0,000003	0,000005	
Sindirim çamuru	kg/MJ	0,0950	0,0566	
Sindirim çamuru açık depolama	Üretilen biyogazın %9,2'si			Hossain ve ark., 2023
CH_4	kg/MJ	0,00291	0,00314	
NH_3	kg/MJ	0,00004	0,0000488	
Fosfor, P	kg/MJ	0,001197	0,000378	
Çinko, Zn	kg/MJ	0,0000400	0,00000984	
Bakır, Cu	kg/MJ	0,0000157	0,00000351	
Toplam düzenli depolama emisyonları	t CO_2-e/t		4,532	IPCC Tier 1
Düzenli depolama sahasına yönlendirilmesi önlenen gıda atıkları	kg/MJ		0,0549	
Düzenli depolama sahasına yönlendirilmesi engellenen gıda atıklarının iklim değişikliği üzerindeki etkisi	CO_2-e/MJ		0,249	

3. Bulgular ve Tartışma

Sığır gübresinin gıda atıkları ile birlikte sindirimi sonucu elde edilen biyogaz verimi, yalnızca sığır gübresine dayalı tekli sindirim yöntemine kıyasla yaklaşık %29 oranında daha fazladır (Tablo 1). Bu artış, sistemin enerji geri kazanım kapasitesini doğrudan artırmakta ve süreç verimliliğini iyileştirmektedir. Enerji verimliliği ve proses ekonomisi açısından değerlendirildiğinde, bu sonuçlar birlikte sindirim uygulamalarının tekli sindirim yöntemine göre daha sürdürülebilir ve ekonomik açıdan daha uygulanabilir bir alternatif sunmaktadır (Angelidaki & Ellegaard, 2003).

Her iki senaryoya ait toplam çevresel etkiler Tablo 3'te sunulmuştur. Pozitif değerler çevresel etkileri, negatif değerler ise çevresel faydaları temsil etmektedir. Birlikte sindirim senaryosu, asidifikasyon potansiyeli ve kötü kokulu hava dışındaki 5 çevresel etki kategorisinin 3'ünde referans senaryo tekli sindirime göre daha iyi performans sergilemiştir. Birlikte sindirim senaryosu, referans duruma kıyasla Küresel Isınma, Ötrofikasyon ve Karasal Ekotoksisite çevresel kategorilerinde sırasıyla %64,51, %67,75 ve %76,02 azalma sağlamıştır. İlgili çevresel etki kategorileri ve karşılaştırmalı performans değerleri Şekil 2'de grafiksel olarak sunulmuştur. Ayrıca, birlikte sindirim sistemi enerji üretimi açısından da daha avantajlı bir seçenek oluşturmakta ve tekli sindirim senaryosuna göre %20,52 daha yüksek bir net enerji oranı sağlamaktadır. Bu bulgular, birlikte

sindirimin yalnızca çevresel değil, aynı zamanda enerji verimliliği açısından da daha sürdürülebilir bir alternatif olduğunu göstermektedir.

Tablo 3. Üretilen her 1 MJ enerji için çevresel etkiler
Table 3. *Environmental impacts for every 1 MJ of energy produced*

Çevresel Kategoriler	Birim	Tekli sindirim, SG	Birlikte sindirim, SG+GA-ç.kredi	Değişim
Küresel ısınma	kg CO_2 e	0,358	0,386-0,249=0,137	-64,51
Asidifikasyon	kg SO_2 e	1,42 x 10^{-4}	1,72 x 10^{-4}	+21,13
Ötrofikasyon	kg PO_4 e	3,69 x 10^{-3}	1,19 x 10^{-3}	-67,75
Karasal ekotoksisite	kg 1,4-DB e	1,91 x 10^{-5}	4,58 x 10^{-6}	-76,02
Kötü kokulu hava	m^3 hava	7,07 x 10^3	1,17 x 10^4	+65,48

3.1. Küresel Isınma Potansiyeli

Küresel ısınma potansiyeli, bir sürecin yaşam döngüsü boyunca atmosfere saldığı sera gazlarının, belirli bir zaman aralığında iklim değişikliği üzerindeki toplam etkisini ifade eder. Genellikle karbondioksit eşdeğeri (CO_2-e) cinsinden hesaplanır. İnsan faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının, küresel iklim değişikliğinin başlıca itici gücü olduğu dikkate alındığında, bu etki kategorisi, çevresel performans değerlendirmelerinde kritik öneme sahiptir.

Enerji dengesi verileriyle gerçekleştirilen analizde, tekli sindirim senaryosunun toplam küresel ısınma potansiyeli 0,358 ton CO_2 eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Bu değer, birlikte sindirim senaryosunun hesaplanan 0,386 ton CO_2 eşdeğerine kıyasla %8 oranında daha yüksek bir emisyon potansiyeline işaret etmektedir. Birlikte sindirim sürecinde gözlemlenen bu artış, gıda atıklarının sisteme dâhil edilmesiyle ortaya çıkan ilave karbon ve azot yükünden kaynaklanan doğrudan sera gazı emisyonlarındaki yükselişle ilişkilendirilmektedir. Bununla birlikte, Şekil 2a'da detaylandırıldığı üzere, gıda atıklarının düzenli depolama alanlarına gönderilmesinin engellenmesiyle elde edilen çevresel kazanımların birlikte sindirim senaryosuna dâhil edilmesiyle, küresel ısınma potansiyeli değerinde %64,51'lik bir azalma kaydedilmiştir. Bu sonucun temel sebebi, düzenli depolama sahalarına depolanan gıda atıklarının depolanması sırasında ortaya çıkan CH_4 emisyonlarının önlenmesi ve bu metanın birlikte sindirim biyogaz senaryosunda yakalanarak yenilenebilir enerjiye dönüştürülmesidir.

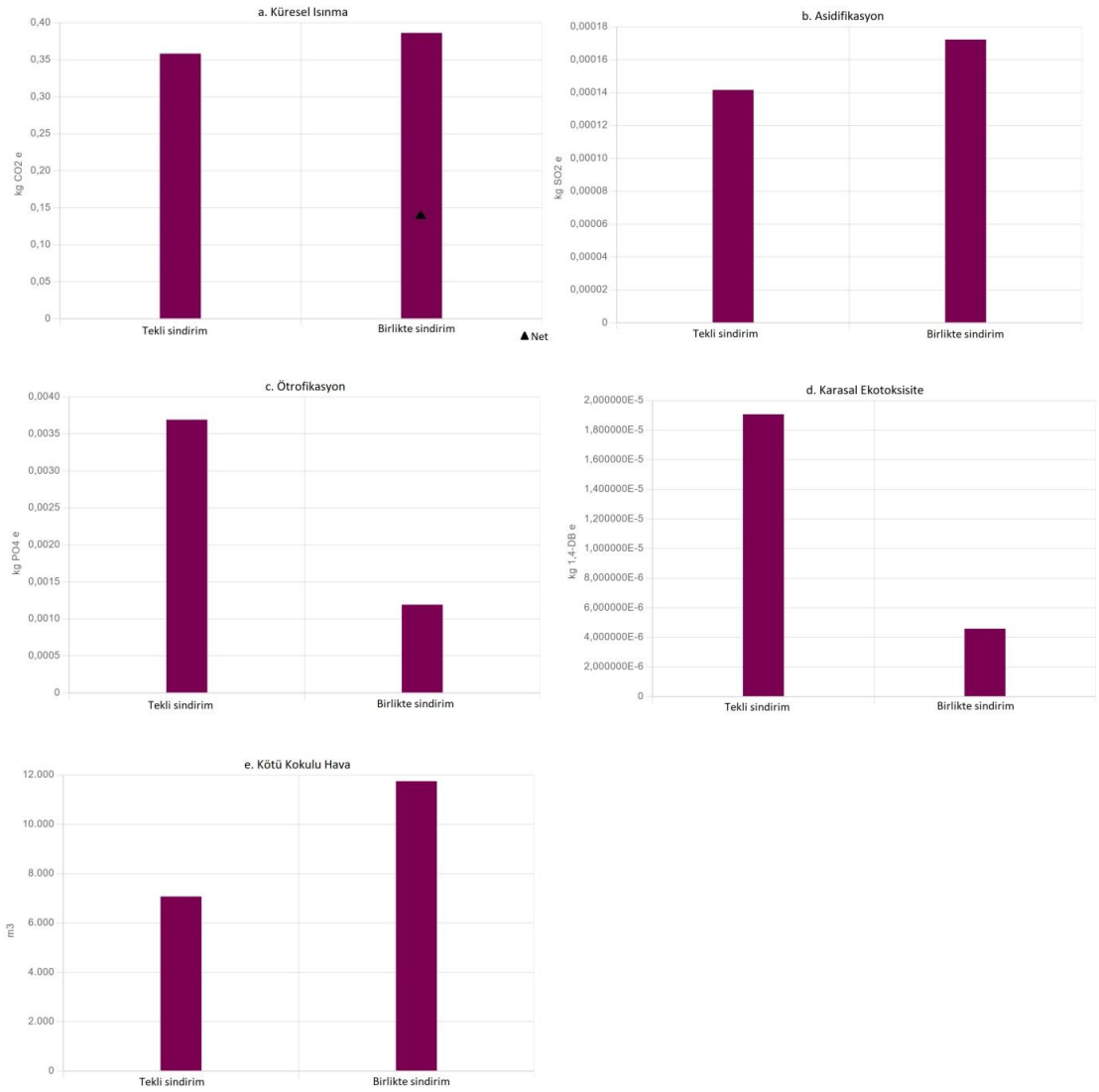
Jiang ve ark. (2021), tarafından domuz gübresi ve gıda atıkları kullanılarak yürütülen çalışmada, birlikte sindirim senaryosunda küresel ısınma potansiyeline en fazla katkıda bulunan süreçler, bu çalışmanın bulgularıyla uyumlu şekilde, anaerobik sindirim süreci (%46) ve sindirim çamurunun açıkta depolanması (%40) olarak belirlenmiştir. Tekli sindirim ve birlikte sindirim senaryolarının karşılaştırılmasında emisyon kredileri hariç tutulduğunda birlikte sindirimin çevresel performansında %69 oranında bir iyileşme tespit edilmiştir. Ancak, gıda atıklarının düzenli depolamaya gönderilmemesi ile sağlanan yüksek düzeydeki biyogaz üretimi ve metan emisyonu önleme kredileri dâhil edildiğinde, toplam küresel ısınma potansiyelinde net %213 oranında bir azalma sağlandığı rapor edilmiştir (Jiang ve ark., 2021). Bu sonuç, birlikte sindirimin yalnızca süreç bazlı emisyonlar açısından değil, aynı zamanda sistem dışı çevresel krediler bakımından da iklim değişikliği üzerindeki etkileri önemli ölçüde azaltabildiğini göstermektedir.

Ebner ve ark. (2015), gıda atıkları ile süt çiftliği gübresinin geleneksel yönetimi ile anaerobik birlikte sindirim yoluyla elektrik üretiminin çevresel etkilerini karşılaştırmak amacıyla kapsamlı bir YDD gerçekleştirmiştir. Elde edilen sonuçlar, anaerobik birlikte sindirim uygulamasının, gıda atıkları ve gübrenin ayrı ayrı yönetildiği geleneksel senaryolara kıyasla sera gazı emisyonlarını %71 oranında azaltabildiğini göstermiştir.

Chen ve ark. (2015), ekmek fırını atıklarının düzenli depolama sahasında bertaraf edilmesi, geleneksel gübre yönetimi ile anaerobik sindirim uygulanması ve fırın atıkları ile süt çiftliği gübresinin anaerobik birlikte sindirimi senaryolarını karşılaştıran bir yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışması gerçekleştirmiştir. Çalışma

sonuçlarında birlikte sindirim uygulamasının geleneksel gübre yönetimi senaryolarına kıyasla %67 oranında küresel ısınma potansiyeli düşüşü elde edilmiştir.

Usack ve ark. (2019), 10 farklı yardımcı substratın sığır gübresi ile çeşitli yükleme oranlarında birlikte sindirilmesini değerlendirmek amacıyla, belirsizlik analizi içeren çevresel yaşam döngüsü ve ekonomik değerlendirmeyi bir araya getiren bir çalışma gerçekleştirmiştir. Anaerobik Sindirim Modeli 1 kullanılarak yapılan simülasyonlar, yüksek yükleme oranlarının ekonomik açıdan avantaj sağladığını ancak atık stabilizasyonunu önemli ölçüde azalttığını ve bu durumun çiftlik seviyesinde metan emisyonlarında (> %450) belirgin artışlara yol açtığını göstermiştir. Bununla birlikte, artan elektrik üretimi sayesinde çoğu birlikte sindirim senaryosu, yalnızca gübre sindirimine kıyasla toplam yaşam döngüsü emisyonlarında net bir azalmaya neden olmuştur.



Şekil 2. YDD senaryolarının çevresel etki kategorileri ve karşılaştırmalı performans değerleri.
Figure 2. *Environmental impact categories and comparative performance values of LCA scenarios.*

3.2. Asidifikasyon

Asidifikasyon potansiyeli, havaya, toprağa ve suya salınan asitleştirici gazların (özellikle NH_3, NO_x, SO_x vb.) çevresel etkilerini ifade etmektedir. Bu çalışmada, sığır gübresinin gıda atıkları ile birlikte sindirime tabi tutulması, tekli sindirime kıyasla daha yüksek bir asidifikasyon etkisi (%21,13) oluşturmuştur. Bu artışın temel nedeni, yardımcı substrat olarak kullanılan gıda atıklarının sisteme daha yüksek miktarda azot yüklemesiyle açıklanabilir. Bu farkın oluşmasında, özellikle birlikte sindirim sürecinde artan NH_3 emisyonlarının baskın

katkı sağlayan etken olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmanın bulgularıyla paralel olarak, Tan ve ark. (2022) tarafından yürütülen çalışmada da sığır gübresinin tekli sindirimi, birlikte sindirim senaryolarına kıyasla daha düşük NH_3 emisyonu üretmiş ve dolayısıyla asidifikasyon potansiyeli açısından en düşük çevresel etkiye neden olmuştur.

Asidifikasyon etkisi, sindirim çamurunun ya da çamur fraksiyonunun pH'ının düşürülmesi yoluyla önemli ölçüde azaltılabilir. Bu yöntem, azotu uçucu olmayan amonyum (NH_4^+) formunda tutarak amonyak (NH_3) emisyonlarını minimize etmeyi amaçlamaktadır. Ancak bu strateji, yalnızca toprakların aşırı asidik olmadığı bölgelerde uygulanabilir (Pehme ve ark., 2017).

3.3. Ötrofikasyon

Ötrofikasyon potansiyeli, sucul ve karasal ekosistemlerde azot ve fosfor gibi aşırı besin elementlerinin birikimi sonucunda ortaya çıkan olumsuz çevresel etkileri ifade eder ve bu süreç, ekosistemlerin doğal ya da insan kaynaklı maddelere karşı verdiği bir tepkidir. Bu çalışmada, birlikte sindirim senaryosunun ötrofikasyon açısından %67 oranında daha düşük çevresel etkiye sahip olması, sindirim süreci sonunda oluşan çamur miktarının %40 oranında azalmış olmasıyla açıklanabilir (Tablo 1). Bu azalma, potansiyel besin elementlerinin çevreye taşınmasını sınırlandırarak ötrofikasyon riskini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu çalışmanın bulgularını destekler nitelikte, Tan ve ark. (2022) tarafından yürütülen çalışmada da birlikte sindirim senaryolarında daha düşük miktarda çıkış çamuru elde edildiği bildirilmiştir. Ayrıca, sığır gübresinin tekli sindirime kıyasla; yem atığı, kanalizasyon çamuru ve iade süt ürünleri ile birlikte sindirimi, ötrofikasyon potansiyeli açısından en düşük çevresel etkiyi göstermiştir.

3.4. Karasal Ekotoksisite

Bu çalışmada birlikte sindirim senaryosunun karasal ekotoksisite açısından %76 oranında daha düşük çevresel etkiye sahip olduğu görülmüştür. Gıda atıklarının, sığır gübresine kıyasla daha düşük çinko (Zn) ve bakır (Cu) konsantrasyonları içermesi, substrat karışımında seyreltme etkisi yaratarak karasal ekotoksisite potansiyelini azaltıcı yönde etki göstermiştir. Bu sonuç, ağır metal içeriklerinin yönetiminde birlikte sindirimin avantajlı bir strateji olabileceğini göstermektedir.

3.5 Kötü Kokulu Hava

Kötü kokulu hava, genellikle biyolojik atık işleme, gübre depolama ve hayvansal atıkların anaerobik ayrışması gibi süreçlerde oluşan, rahatsız edici, keskin ve istenmeyen kokulara sahip gaz karışımlarını ifade etmektedir. Bu gazlar, yalnızca insan konforunu ve yaşam kalitesini düşürmekle kalmayıp, aynı zamanda bazı bileşenleri (örneğin NH_3 ve H_2S) sağlık açısından da risk oluşturabilmektedir. Bu çalışmada, açık sindirim çamuru depolama alanları ve biyoreaktörlerden kaynaklanan NH_3 ve H_2S emisyonları nedeniyle, kötü kokulu hava kategorisinde birlikte sindirim senaryosunda %65,48 oranında artış tespit edilmiştir. Bu artış, özellikle gıda atıklarının içerdiği yüksek kükürt ve azot bileşiklerinin ayrışması sonucunda kokuya neden olan gazların oluşumunun artmasıyla ilişkilidir. Bu bulgular doğrultusunda, birlikte sindirim sistemlerinde substrat bileşiminin dikkatli şekilde yönetilmesi ve özellikle koku kontrol stratejilerinin (örneğin kapalı sindirim çamuru depolama, biyo-filtreleme, kimyasal yıkama sistemleri) entegre edilmesi önerilmektedir. Böylece hem çevresel etkiler azaltılabilir hem de tesislerin çevresel kabul edilebilirliği artırılabilir.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi'nde pilot ölçekli piston akımlı biyoreaktör kullanılarak gerçekleştirilen deneysel veriler temel alınarak sığır gübresinin tekli sindirimi ve sığır gübresinin gıda atıklarıyla birlikte sindiriminin çevresel performansı karşılaştırmalı YDD yöntemiyle analiz edilmiştir. YDD bulguları, birlikte sindirim senaryosunun küresel ısınma (%64,51), ötrofikasyon (%67,75) ve karasal ekotoksisite (%76,02) kategorilerinde tekli sindirim senaryosuna kıyasla belirgin çevresel iyileşmeler sağladığını göstermiştir. Bu kazanımların büyük ölçüde, kampüs kaynaklı gıda atıklarının düzenli depolamaya yönlendirilmesi yerine biyogaz üretimi yoluyla değerlendirilmesi sayesinde elde edilen metan emisyonu kredilerine dayandığı görülmüştür. Buna karşılık, asidifikasyon (%21,13) ve kötü kokulu hava (%65,48) etkileri birlikte sindirimde artış göstermiştir. Bu artışların temel nedenleri, gıda atıklarının sisteme sağladığı yüksek azot ve sülfür yükü ile sindirim çamurunun açıkta depolanması süreçleridir. Bu kapsamda, özellikle

sindirim çamurunun kapalı sistemlerde depolanması, pH düzenlemesi, substrat bileşimi optimizasyonu ve koku kontrol teknolojilerinin entegrasyonu gibi iyileştirme stratejileri önerilmektedir. Enerji verimliliği açısından da birlikte sindirim sistemi, tekli sindirime göre %20,52 oranında daha yüksek net enerji oranı sağlayarak hem çevresel hem ekonomik açıdan avantajlı bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmanın bulgularına göre, kentsel ve tarım kaynaklı organik atıkların entegre edilerek birlikte değerlendirilmesi, bölgesel ölçekte biyogaz üretim potansiyelini artıracak ve atık yönetiminde sürdürülebilirliği destekleyecektir.

Çıkar Çatışması Beyanı/ Conflict of Interest

Yazarlar, çıkar çatışması veya kişisel ilişki bulunmadığını beyan etmektedirler./ The authors have no conflicts of interest to declare.

Finansal Destek/ Funding

Yazarlar, bu çalışma için finansal destek almadığını beyan etmiştir./ The authors declared that this study has received no financial support.

Hakem Değerlendirmesi/Peer-review

Dış bağımsız/Externally peer-reviewed.

Yazar Katkıları/Author Contributions: Concept/Tasarım-FŞE, ŞV; Dizayn/Design- FŞE, ŞV; Denetleme/Supervision- FŞE, ŞV; Kaynaklar/Resources- FŞE, ŞV; Veri Toplanması ve/veya İşlemesi/Data Collection and/or Processing- FŞE, ŞV; Analiz ve/ veya Yorum/Analysis and/or Interpretation- FŞE, ŞV; Literatür Taraması/Literature Search- FŞE, ŞV; Yazıyı Yazan/ Writing Manuscript- FŞE, ŞV; Eleştirel İnceleme/Critical Review- FŞE.

Kaynakça

Aguirre-Villegas, H. A., Larson, R. A., & Sharara, M. A. (2019). Anaerobic digestion, solid-liquid separation, and drying of dairy manure: Measuring constituents and modeling emission. Science of The Total Environment, 696, 134059. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134059

Angelidaki, I., & Ellegaard, L. (2003). Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants: Status and future trends. Applied Biochemistry and Biotechnology, 109(1–3), 95–105. https://doi.org/10.1385/ABAB:109:1-3:95

Ankathi, S. K., Chaudhari, U. S., Handler, R. M., & Shonnard, D. R. (2024). Sustainability of biogas production from anaerobic digestion of food waste and animal manure. Applied Microbiology, 4(1), 418–438. https://doi.org/10.3390/applmicrobiol4010029

Bilgili, L., & Çetinkaya, A. Y. (2023). Application of life cycle assessment of system solution scenarios for municipal solid waste management in Turkey. Journal of Material Cycles and Waste Management, 25(1), 324–336. https://doi.org/10.1007/s10163-022-01542-2

Chen, R., Rojas-Downing, M. M., Zhong, Y., Saffron, C. M., & Liao, W. (2015). Life cycle and economic assessment of anaerobic co-digestion of dairy manure and food waste. Industrial Biotechnology, 11(2), 127–136. https://doi.org/10.1089/ind.2014.0029

Dong, L., Cao, G., Guo, X., Liu, T., Wu, J., & Ren, N. (2019). Efficient biogas production from cattle manure in a plug flow reactor: A large scale long term study. Bioresource Technology, 278, 450–455. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.100

Ebner, J. H., Labatut, R. A., Rankin, M. J., Pronto, J. L., Gooch, C. A., Williamson, A. A., & Trabold, T. A. (2015). Lifecycle greenhouse gas analysis of an anaerobic codigestion facility processing dairy manure and industrial food waste. Environmental Science & Technology, 49(18), 11199–11208. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01331

Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (Eds.). (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). IGES, Japan.

El-Mashad, H. M., & Zhang, R. (2010). Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. Bioresource Technology, 101(11), 4021–4028. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.027

Guinée, J. B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., Koning, A., ve ark. (2002). Handbook on life cycle assessment: Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIA: Guide. IIB: Operational annex. III: Scientific background (Vol. 692). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C., & Lu, X. (2017). Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 76, 1485–1496. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184

Hossain, S., Akter, S., Saha, C. K., Reza, T., Kabir, K. B., & Kirtania, K. (2023). A comparative life cycle assessment of anaerobic mono- and co-digestion of livestock manure in Bangladesh. Waste Management, 157, 100–109. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.12.011

International Organization for Standardization (ISO). (2006). ISO 14040:2006 — Environmental management: Life cycle assessment — Principles and framework. Geneva, Switzerland: ISO.

IPCC. (2019). Emissions from livestock and manure management. In 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4 – Agriculture, Forestry and Other Land Use, Chapter 10. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch10_Livestock.pdf

Jiang, Y., Zhang, Y., Wang, S., Wang, Z., Liu, Y., Hu, Z., & Zhan, X. (2021). Improved environmental sustainability and bioenergy recovery through pig manure and food waste on-farm co-digestion in Ireland. Journal of Cleaner Production, 280, 125034. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125034

Korba, J., Šařec, P., Novák, V., Brož, P., Dolan, A., & Dědina, M. (2024). Digestate application methods and rates with regard to greenhouse gas emissions and crop conditions. Agronomy, 14(2), 336. https://doi.org/10.3390/agronomy14020336

Kusz, D., Kusz, B., Wicki, L., Nowakowski, T., Kata, R., Brejta, W., Kasprzyk, A., & Barć, M. (2024). The economic efficiencies of investment in biogas plants—A case study of a biogas plant using waste from a dairy farm in Poland. Energies, 17(3760). https://doi.org/10.3390/en17153760

Leung, D. Y. C., & Wang, J. (2016). An overview on biogas generation from anaerobic digestion of food waste. International Journal of Green Energy, 13(2), 119–131. https://doi.org/10.1080/15435075.2014.909355

Linstrom, P. J. (2021). NIST Chemistry WebBook (NIST Standard Reference Database No. 69). NIST Office of Data and Informatics. https://doi.org/10.18434/T4D303

Longis, M., Pereira, J. C., Högl, T. H., Neubauer, P., & Junne, S. (2023). Plug-flow anaerobic digestion with multi-position sensors: The value of gradient measurement for process monitoring. Biomass and Bioenergy, 173, 106803. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106803

Masalegooyan, Z., Piadeh, F., & Behzadian, K. (2022). A comprehensive framework for risk probability assessment of landfill fire incidents using fuzzy fault tree analysis. Process Safety and Environmental Protection, 163, 679–693. https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.06.011

Pehme, S., Veromann, E., & Hamelin, L. (2017). Environmental performance of manure co-digestion with natural and cultivated grass – A consequential life cycle assessment. Journal of Cleaner Production, 162, 1135–1143. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.067

Peng, W., Lü, F., Hao, L., Zhang, H., Shao, L., & He, P. (2020). Digestate management for high-solid anaerobic digestion of organic wastes: A review. Bioresource Technology, 297, 122485. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122485

Shoshaa, R., Ghanimeh, S., & Almomani, F. (2024). Recent advances in plug flow reactors for anaerobic digestion and in-depth evaluation of mixing approaches: A review. Fuel, 377, 132711. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132711

Slorach, P. C., Jeswani, H. K., Cuéllar-Franca, R., & Azapagic, A. (2019). Environmental and economic implications of recovering resources from food waste in a circular economy. Science of The Total Environment, 693, 133516. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.322

Tan, W. E., Liew, P. Y., Bong, C. P. C., Fan, Y. V., Tan, L. S., & Jamian, N. R. (2021). Life cycle assessment and techno-economic assessment of anaerobic co-digestion: A short review. Chemical Engineering Transactions, 88, 397–402. https://doi.org/10.3303/CET2188151

Tan, W. E., Liew, P. Y., Tan, L. S., Woon, K. S., Mohammad Rozali, N. E., Ho, W. S., & NorRuwaida, J. (2022). Life cycle assessment and techno-economic analysis for anaerobic digestion as cow manure management system. Energies, 15(24), 9586. https://doi.org/10.3390/en15249586

Usack, J. G., Gerber Van Doren, L., Posmanik, R., Tester, J. W., & Angenent, L. T. (2019). Harnessing anaerobic digestion for combined cooling, heat, and power on dairy farms: An environmental life cycle and techno-economic assessment of added cooling pathways. Journal of Dairy Science, 102(4), 3630–3645. https://doi.org/10.3168/jds.2018-15518

Xiao, H., Zhang, D., Tang, Z., Li, K., Guo, H., Niu, X., & Yi, L. (2022). Comparative environmental and economic life cycle assessment of dry and wet anaerobic digestion for treating food waste and biogas digestate. Journal of Cleaner Production, 338, 130674. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130674

Zhang, Y., Jiang, Y., Wang, S., Wang, Z., Liu, Y., Hu, Z., & Zhan, X. (2021). Environmental sustainability assessment of pig manure mono- and co-digestion and dynamic land application of the digestate. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 137, 110476. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110476

Anatolia Science and Technology Journal (ASTEJ)

ASTEJ, 2025, 2(1)
DOI: 10.5281/zenodo.17427375
Araştırma Makalesi/Research Article

DXD-HSK Dolu Koni Sprey Nozulu ile Fotovoltaik Panellerin Soğutma Performansının İncelenmesi

Muhammet Harun OSTA[1*], Kenan YAKUT[1]
[1]Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum, Türkiye

Özet

Fotovoltaik panellerin hücre sıcaklığının maksimum çalışma sınırını aşması, elektriksel verimlilikte ciddi düşüşlere yol açmaktadır. Bu durumu önlemek amacıyla, doğrudan soğutma sağlayan bir sprey soğutma sistemi geliştirilmiş ve deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde, 1000 W/m² ve 750 W/m² güneş ışınımı koşulları altında, farklı sıcaklıklarda fotovoltaik panelin elektriksel verimliliği hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, 1000 W/m² ışınım seviyesinde verimliliğin %10'un altına, 750 W/m² seviyesinde ise %8'in altına düşmemesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, panelin optimum çalışma sıcaklık aralığı 45–25 °C olarak belirlenmiş ve sistemin etkin soğutma performansı sayesinde panel sıcaklığı kontrollü bir şekilde 25 °C'ye kadar düşürülmüştür. Sistemde, homojen dağılım sağlayan dolu koni sprey alanına sahip DXD-HSK model harici basınçlı sıvıya ihtiyaç duymayan kendinden emişli nozul kullanılmıştır. Bu nozul, suyu harici bir basınçlandırmaya ihtiyaç duymadan 120 ml/dk debiyle kendi emişiyle çekebilmekte ve basınçlı hava desteğiyle birlikte ince atomizasyon sağlayarak stabil püskürtme konisi ile düzgün damlacık dağılımı elde etmektedir. Deneylerde sprey soğutma performansını değerlendirmek amacıyla Sauter ortalama çapı (SMD) ve ısı transfer katsayısı gibi temel ısı transfer parametreleri hesaplanmış, soğuma süreleri ise deneysel olarak ölçülmüştür. Sprey geometrisi, Charged-Coupled Device (CCD) kamera ile elde edilen görüntüler üzerinden değerlendirilmiş ve püskürtme açısı ile jet çapı hesaplanmıştır. 1000 W/m² ve 750 W/m² güneş ışınımı koşullarında gerçekleştirilen deneylerde, 120 ml/dk su ve 2,5 m³/saat hava debisi ile uygulanan soğutma sonucunda ısı transfer katsayısı 0,78 W/cm²K olarak hesaplanmıştır. Soğutma süreleri 1000 W/m² ışınımda 25 dakika ve 750 W/m² ışınımda 11 dakika olarak ölçülmüş, Sauter ortalama damlacık çapı (SMD) ise 203,63 µm olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik, nozul, sprey soğutma, ısı transferi

Investigation of the Cooling Performance of Photovoltaic Panels Using a DXD-HSK Full Cone Spray Nozzle

Muhammet Harun OSTA[1*], Kenan YAKUT[1]
[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Atatürk University, 25240 Yakutiye, Erzurum, Türkiye

Abstract

Exceeding the maximum operating temperature of photovoltaic (PV) panel cells leads to a significant decrease in electrical efficiency. To prevent this, a spray cooling system providing direct cooling was developed and experimentally investigated. In the experiments, the electrical efficiency of the PV panel was calculated at different temperatures under solar irradiance levels of 1000 W/m² and 750 W/m². According to the obtained results, it was aimed to keep the efficiency above 10% at 1000 W/m² and above 8% at 750 W/m² irradiance levels. Accordingly, the optimal operating temperature range of the panel was determined to be between 45–25 °C, and thanks to the system's effective cooling performance, the panel temperature was successfully reduced to 25 °C in a controlled manner. The system employed a DXD-HSK model self-priming nozzle with a full cone spray pattern providing homogeneous distribution, which does not require externally pressurized liquid. This nozzle can draw water at a flow rate of 120 ml/min without external pressurization and, with the support of compressed air, enables fine atomization and forms a stable spray cone, achieving uniform droplet distribution. To evaluate the spray cooling performance in the experiments, fundamental heat transfer parameters such as the Sauter Mean Diameter (SMD) and heat transfer coefficient were calculated, and cooling durations were measured experimentally. The spray geometry was assessed based on images obtained using a Charge-Coupled Device (CCD) camera, and spray angle and jet diameter were determined. In the experiments conducted under 1000 W/m² and 750 W/m² solar irradiance, with a water flow rate of 120 ml/min and an air flow rate of 2.5 m³/h, the heat transfer coefficient was calculated as 0.78 W/cm²K. The cooling durations were measured as 25 minutes for 1000 W/m² and 11 minutes for 750 W/m² irradiance levels, while the Sauter Mean Diameter (SMD) was calculated as 203.63 µm.

Keywords: Photovoltaic, nozzle, spray cooling, heat transfer

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Muhammet Harun OSTA, e-posta: harun.osta@atauni.edu.tr, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6492-251X
** Yazar/Author: Kenan YAKUT, e-posta: kyakut@atauni.edu.tr, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7822-2445
*** Geliş/Received: 15/05/2025, Düzeltme/Revised: 21/07/2025, Kabul/Accepted: 27/07/2025, Yayınlanma/Published: 24/10/2025.

1. Giriş

Fotovoltaik (PV) sistemler, güneş ışınımının fotonik enerjisini, içerdiği yarı iletken malzemelerin sınır tabakasında fotovoltaik etki adı verilen bir mekanizma ile elektrik enerjisine dönüştürür (Özakın ve ark., 2020). PV sistemler, güneş enerjisinin tamamı elektrik enerjisine dönüştürülemez ve fazlası hücrede ısı olarak depolanır. Depolanan bu ısı, elektronların hücre içindeki hareketini kısıtlayarak sistemin performansını düşürmektedir (Öner ve ark., 2016). PV panellerin optimum çalışma sıcaklığı aşıldığında sistemin çıkış gücü azalır (Bayrak ve ark., 2019). Bu nedenle daha iyi performans için PV panellerin optimum çalışma sıcaklığında tutulması gerekmektedir. Gelen güneş ışınımının elektrik enerjisine dönüştürülemeyen kısmının neden olduğu atık ısıyı soğutma tekniği ile hücreden uzaklaştırıp faydalı işe dönüştüren ve böylece sistemi optimum çalışma sıcaklığında tutan sistemlere Fotovoltaik/termal (PV/T) sistemler adı verilmektedir (Masters, 2013). PV panellerin soğutma teknikleri genel olarak pasif, aktif ve hibrit olarak sınıflandırılabilir. Pasif soğutma teknikleri, enerji tüketmeden soğutma işlemi gerçekleştirir ve genellikle basitliği ve düşük maliyeti nedeniyle tercih edilir (Alizadeh ve ark., 2018). Isı borusu ve bakır kanatçıklar kullanarak yapılan gaz (hava) destekli pasif soğutma çalışmasında verimliliğin %18 oranında arttığı görülmüştür (Wu ve ark., 2019). Su destlekli pasif soğutma tekniği kullanılarak panel sıcaklığının 19 °C düştüğü ve verimliliğin %8,3 arttığı belirtilmiştir. (Fayaz ve ark., 2019) PCM ve termal kollektör pasif soğutması ile verimliliğin %12,3 oranında arttığı belirtilmiştir. Aktif soğutma tekniklerinde ise soğutma işlemi için enerji tüketilir. Aktif soğutma tekniklerinde, soğutmanın ana faktörü zorlanmış konveksiyondur. Akışkan olarak gaz ve sıvı kullanılmaktadır (Teo ve ark., 2012). Panelin arkasındaki kanallarla hava destekli aktif soğutma tekniği kullanarak panelin sıcaklığını 30°C düşürmüş ve verimliliği %4 artırmıştır (Baloch ve ark., 2015). Su içeren ısı değiştirici kullanarak su destekli aktif soğutma ile panel sıcaklığını 19°C düşürmüş ve verimliliği %36,1 artırmıştır.

PV/T sistemlerinin elektrik verimliliğini artırma avantajının yanı sıra kurulum maliyetinin yüksek olması, enerji israfı, panelin tamamının soğutulamaması ve sistemin kendi özelliklerinden kaynaklanan bazı verimsizlikler gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Floating Tracking Condensed Cooling (FTCC) verimli bir PV/T sistemidir. Ancak FTCC'nin güneş ışınımının yoğunluğunu artıran aynaları olması nedeniyle kurulum maliyeti yüksektir (Cazzaniga ve ark., 2012). Suya daldırma yöntemi ekonomiktir ve kurulum için arazi alanı gerektirmez. Ancak suya daldırma tekniğinde daldırma derinliği verimliliği olumsuz yönde etkilemektedir (Mehrotra ve ark., 2014). PV/T sistemlerde yüksek verimli uygulamalardan biri olan şeffaf kaplama tekniğinde, yansıyan ışınımdan kaynaklanan kayıplar dezavantaj oluşturmaktadır (Cracker ve ark., 2015). Son olarak yüksek verimli PV/T sistemlerinden cebri hava ve su sirkülasyonu tekniklerinde ısıtılan akışkanın evsel uygulamalarda kullanılabileceği ve su sirkülasyonunun havadan daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır (Siecker ve ark., 2017). Diğer soğutma tekniklerinden PCM soğutma sisteminin veriminin soğuk bölgelerde azaldığı ve malzemenin soğurma kabiliyetinde azalmalar olduğu tespit edilmiştir (Browne ve ark., 2015).

Diğer bir teknik olan sprey soğutma ise ısı transfer verimliliğini arttırmak için sprey damlacıkları ile faz değişiminin meydana geldiği bir soğutma mekanizmasıdır (Yan ve Chan, 2011). PV sisteminin sprey ile soğutulduğu bir çalışmada panelinin her iki yüzüne de su sağlayan bir soğutma sistemi geliştirmiş ve maksimum %16,3'lük elektrik çıkışı ve %14,1'lik verimlilik elde etmişlerdir. Bu yöntemle, PV panelinin yüzey sıcaklığı 54 °C'den 24 °C'ye düşürülmüş ve sürekli su tedariği sayesinde panelin kendini temizleyebilmesi sağlanmıştır (Nizetic ve ark., 2016). Sprey soğutma sistemlerinin ısı transfer verimini etkileyen en önemli parametrelerden biri sistemde kullanılan akışkanın cinsidir. İlgili bir çalışmada yüksek ısı akısı olan yüzeylerin soğutulması için kapalı devre sprey soğutma sistemi kurulmuştur. Çalışma akışkanı olarak FC-87, FC-72, metanol ve su kullanıldı. Deneylerde çeşitli sıcaklıklarda lüle basınç düşüşleri (0,69-3,10 bar) ve ısı akısı termal performans verileri elde edildi. Sonuçlara göre kritik ısı akılarına florokarbonlu sıvılarla 90 W/cm²'ye, metanolle ise 490 W/cm²'ye kadar ulaşılabileceği gösterilmiştir. Su için kritik ısı akısı 500 W/cm²'den yüksekti. Sonuç olarak sprey soğutma sistemine giren akışkanın ısı transfer özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve en iyi soğutmanın su ile elde edildiği gösterilmiştir (Lin, 2003).

Bir spreyi karakterize ederken, kesin damlacık boyutu dağılımı yerine ortalama damlacık çapıyla çalışmak daha uygundur. Meme çapı, ortalama damlacık çapının boyutunu doğrudan etkiler. Farklı nozul çaplarının etkisinin görülmesi amaçlanan bir çalışmada. Isıtılmış kare yüzeyi soğutan PF-5052 sıvı ile spreyin soğutma özelliklerini belirlemek için her biri 0,76, 1,19 ve 1,70 mm çapında, tam koni sprey şeklinde 3 farklı nozul

kullanılmıştır. Bu deneyde, her bir nozul çapı için kritik ısı akılarının sırasıyla 160, 200 ve 237 W/cm² olduğu bulunmuştur. Sonuç olarak, nozul çapının artmasıyla kritik ısı akısı ve Sauter ortalama çapı (SMD) değerlerinin arttığı, bunun sonucunda daha iyi sprey soğutma performansı elde edildiği görülmüştür (Rybicki and Mudawar, 2006).

Sprey soğutma, yüksek ısı akısına sahip cihazların termal yönetiminde büyük bir avantaja sahiptir. Bu tür uygulamalar üzerinde yapılan bir çalışmada, yaygın olarak tek fazlı akış sistemleriyle soğutulan invertör modüllerinin ısıl dirençlerinin büyük ölçüde azaldığı rapor edilmiştir. Bu sonuçlara göre sprey soğutma sistemi yüksek kapasiteli sistemlerin ısıl yönetimi için uygun bir yöntemdir (Bostancı, 2009).

Sprey soğutma çalışmalarında ısı transferini etkileyen en önemli parametreler hava debisinin sıvı debisine oranı, SMD değeri ve ısı transferi katsayısıdır. Sprey oluşumunu bozmayacak şeklide su debisi ne kadar yüksek olursa sprey o kadar ısı transferine etkisi o kadar fazla olur (Yesildal ve ark., 2022). Hava debisi ne kadar yüksek olursa sprey o kadar iyi atomize olur. SMD boyutu ne kadar küçük olursa damlacıkların toplam yüzey alanı artar. Isı transferi katsayısı ne kadar yüksek olursa zorlanmış taşınım ısı transferi o kadar artmaktadır. Literatürde sprey oluşumunu etkileyen çalışma sıvısı, ortam gazı ve nozul geometrisini iyileştirerek daha iyi sprey soğutma ısı transferi elde etmek için çalışılmıştır.

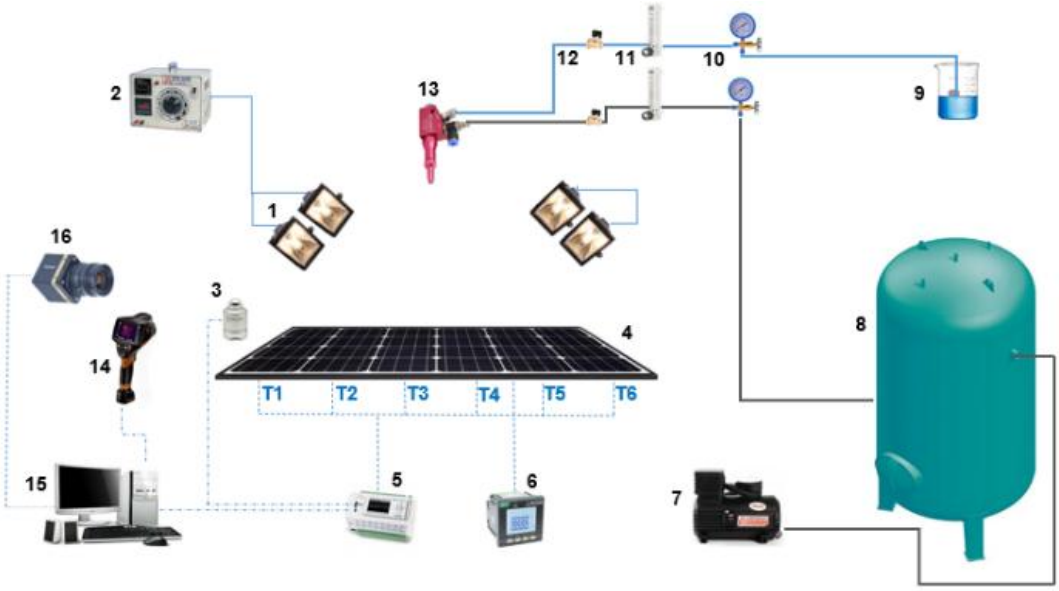
Bu çalışmada, DXD-HSK model nozul kullanılarak gerçekleştirilen sprey soğutma deneylerinde, hava debisinin sıvı debisine oranı olan ALR değerleri hesaplanmış ve farklı güneş ışınımı koşullarında elde edilen ısı transferi parametreleri incelenmiştir. Bu çalışmanın literatürdeki benzerlerinden temel farkı, harici pompaya ihtiyaç duymayan DXD-HSK model kendinden emişli nozülün kullanılması ve düşük SMD değeri ile homojen damlacık dağılımı sağlamasıdır.

2. Materyal ve Metot

Fotovoltaik sistemlerin sprey ile soğutulduğu bu deney sisteminde atomize olan su damlacıkları yüzey alanını arttırarak ısıtılmış yüzeye doğrudan temas eden sprey ile etkili soğutma sağlamaktadır. Bu sistemde DXD-HSK nozulu ile farklı güneş ışınım değerlerinde sprey soğutma deneyleri gerçekleştirilmiş ve her deney için SMD değeri, ısı transferi katsayısı hesaplanmış ve soğuma süreleri ölçülmüştür.

2.1. Deney Sistemi

Şekil 1'de fotovoltaik sistemlerin sprey ile soğutulduğu deney düzeneği görülmektedir. Sistemde akışkan olarak su ve basınçlı hava kullanılmıştır.



Şekil 1. Sprey soğutma deney düzeneği şematik resmi
Figure 1. *Schematic drawing of the spray cooling experimental setup*

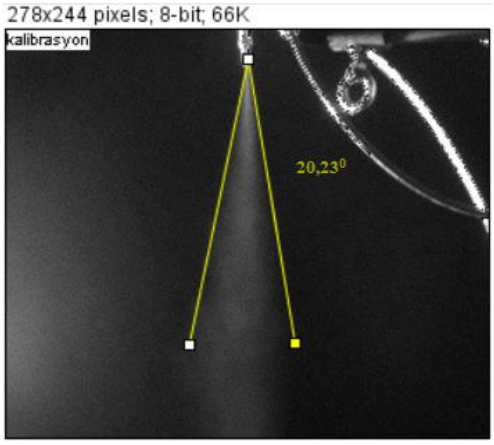
1. Halojen lambalar, 2. Varyak, 3. Piranometre, 4. PV panel, 5.Veri kayıt cihazı, 6.Güç analizörü, 7. Kompresör, 8.Basınçlı hava tankı, 9.Beher, 10. Su ve hava giriş basıncı, 11.Su ve hava debimetresi, 12. Selonoid Vana, 13.Nozul, 14. Termal Kamera, 15. Bilgisayar, 16. CCD Kamera

Dolu koni püskürtme özelliğine sahip olan DXD-HSK nozulu Şekil 2'de gösterilmiştir. Hava-su girişi ile spreyin atomize olmasını sağlayan bu nozul maksimum 30 cm kaplama alanı genişliği gösterebilir.



Şekil 2. DXD-HSK nozulu ve püskürtme alanı
Figure 2. *DXD-HSK nozzle and spray area*

Bu nozul, suyu harici bir basınçlandırmaya ihtiyaç duymadan 120 ml/dk debiyle kendi emişiyle çekebilmekte ve basınçlı hava desteğiyle birlikte ince atomizasyon sağlamaktadır. Şekil 3'te görüldüğü gibi CCD kamera ile görüntüsü alınarak sprey oluşumu incelenmiş ve sprey açısı hesaplanmıştır.



Şekil 3. Sprey görüntüsü
Figure 3. *Spray image*

2.2. Isı Transferi Hesaplamaları

Spreye ilişkin iki temel hidrodinamik parametre olan hacimsel akı (Q″) ve Sauter ortalama damlacık çapı (SMD), Mudawar ve Estes tarafından yapılan bir çalışmaya göre Eş. (1); kullanılarak belirlenmiştir.

$$SMD = d_{32} = 3{,}67 d_0 (We_{d_0}^{1/2} Re_{d_0})^{-0{,}259} \quad (1)$$

Sauter ortalama çapı hesaplamak için kullanılan ve nozul çapı ile hesaplanan Re sayısı Eş. (2); ve We sayısı Eş. (3);

$$Re_{d_0} = \frac{\rho_s (2\Delta P/\rho_s)^{1/2} d_0}{\mu_s} \quad (2)$$

$$We_{d_0} = \frac{\rho_h (2\Delta P/\rho_s) d_0}{\sigma_s} \quad (3)$$

İle hesaplanmıştır. Nusselt sayısı Eş. (4); aşağıdaki korelasyon ile hesaplanmıştır.

$$Nu = 7.144 Re^{0,438} \left(\frac{T_s}{T_{sat} - T_a}\right) \quad (4)$$

Burada T_y yüzey sıcaklığı, T_d suyun doyma sıcaklığı ve T_o ise ortam sıcaklığıdır. Nusselt korelasyonunu hesaplamak için kullanılan ve ortalama çap ile hesaplanan Re sayısı Eş. (5);

$$Re = \frac{\rho_w Q'' d_{32}}{\mu_w} \quad (5)$$

Burada ρ_s su yoğunluğu, Q'' hacimsek akı ve μ_s suyun viskozitesidir. Hacimsel akı Eş. (6);

$$Q'' = \frac{Q}{(\pi L^2/4)} \quad (6)$$

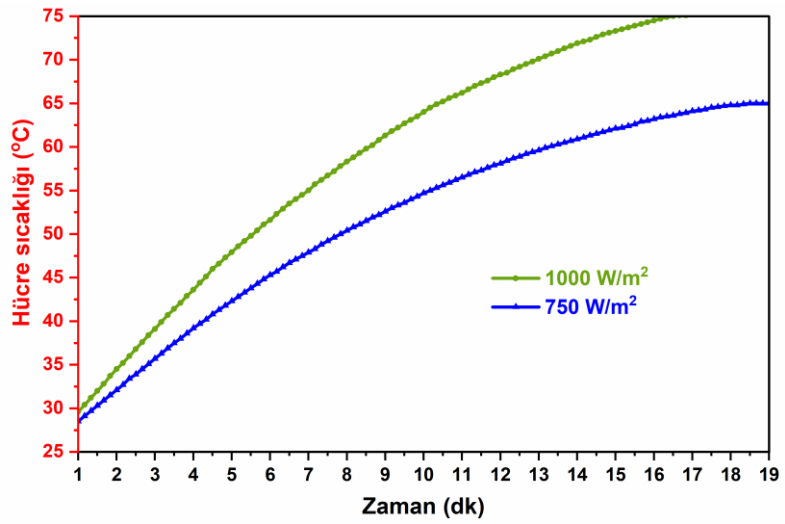
Sprey soğutma sistemindeki her nozul için ısı transferi katsayısı ise Eş. (7);

$$h = \frac{Nu\, k}{d_{32}} \quad (7)$$

ile hesaplanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

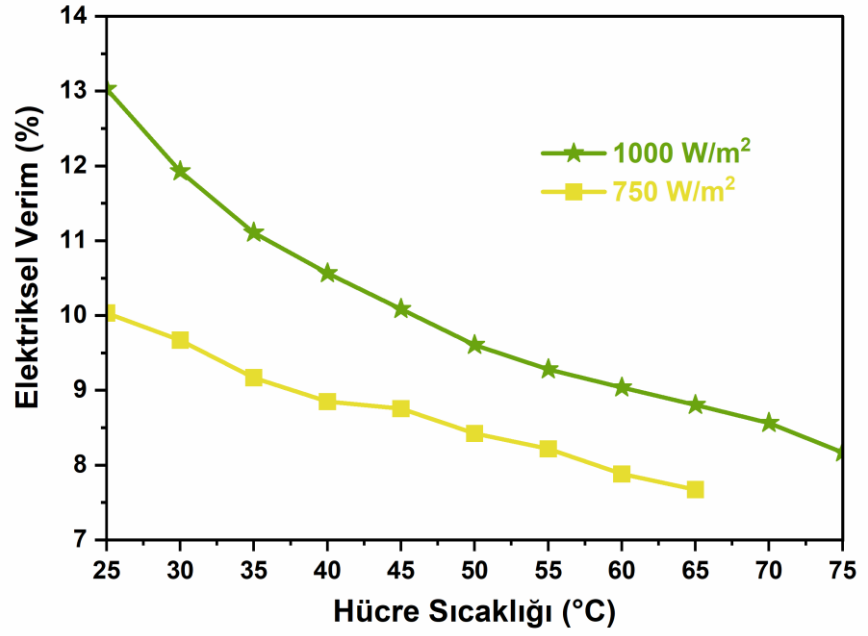
Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerde, kullanılan fotovoltaik panelin hücre sıcaklığı 1000 W/m² ışınım altında 75 °C'ye, 750 W/m² ışınım altında ise 65 °C'ye kadar yükselerek kararlı bir duruma ulaşmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. 1000 W/m² ve 750 W/m² ışınım değerlerinde fotovoltaik panelin hücre sıcaklığındaki değişimler.
Figure 4. *Changes in cell temperature of the photovoltaic panel at 1000 W/m2 and 750 W/m2 irradiance values.*

Fotovoltaik sistemlerde herhangi bir soğutma uygulanmadığı durumda, ısı birikiminin elektron hareketini kısıtlaması nedeniyle meydana gelen elektriksel verim düşüşü Şekil 5'te gösterilmiştir. 1000 W/m² ve 750

W/m² ışınım değerlerinde, elektriksel verimlilik 25 °C sıcaklıkta sırasıyla %13 ve %10 seviyelerinde iken, sıcaklığın 75 °C'ye yükselmesiyle bu değerler %8,2 ve %7,6'ya kadar düşmüştür.



Şekil 5. 1000 W/m² ve 750 W/m² ışınım değerleri altında fotovoltaik panelin sıcaklığa bağlı elektriksel verim düşüşü.

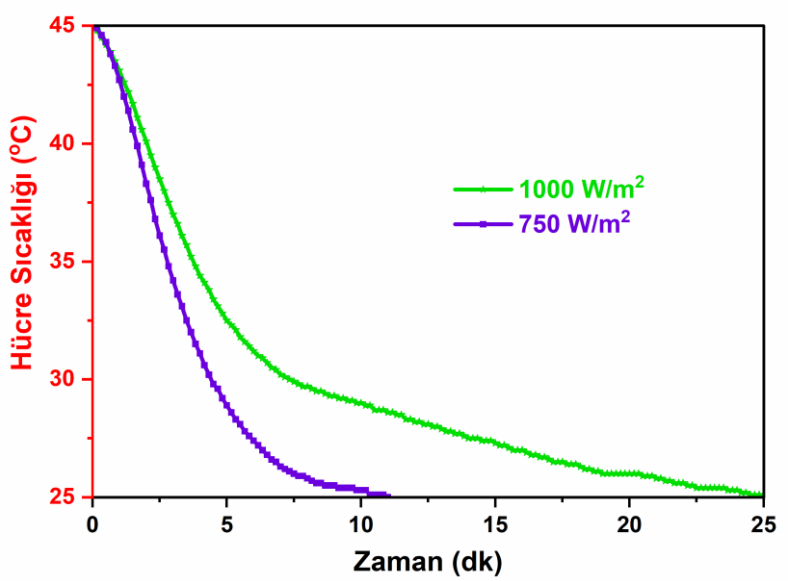
Figure 5. *Temperature-dependent electrical efficiency decrease of the photovoltaic panel under 1000 W/m2 and 750 W/m2 irradiance values.*

Fotovoltaik hücre sıcaklığının 45 °C ve üzerine çıkmasıyla elektriksel verimdeki düşüş dikkate alınarak yapılan deneylerde çalışma aralığı 45-25 °C olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Farklı ışınım değerlerinde yapılan sprey soğutma deneylerinin verileri.
Table 1. *Data of spray cooling experiments conducted at different irradiance values.*

Işınım (W/m²)	ALR	Soğuma Süresi (s)	SMD (μm)	h (W/cm²K)
1000	0,02083	25	203,63	0,78
750	0,02083	11	203,63	0,78

Tablo 1'de Farklı ışınım değerlerinde yapılan sprey soğutma deneylerinin verileri gösterilmiştir. Genel olarak sprey soğutma üzerine yapılan çalışmalarda, Sauter ortalama damlacık çapı (SMD) değerlerinin genellikle 32–583 μm aralığında değiştiği görülmektedir (Smakulski, 2016). Bu kapsamda, çalışmamızda elde edilen 203.64 μm SMD değeri, literatürdeki değerlerle uyumlu olup, atomizasyon açısından tatmin edici bir seviyededir. Ayrıca, Wang et al. (2015) tarafından uzay uygulamaları için geliştirilen çift nozüllü sprey soğutma sisteminde raporlanan 219–276 μm aralığındaki SMD değerlerine kıyasla daha düşük bir değere ulaşılmış; bu da daha homojen damlacık dağılımı ve dolayısıyla daha etkili soğutma sağlandığını göstermektedir. Ancak, literatürde su bazlı sistemler için bildirilen ısı transfer katsayısı değerlerinin 2–10 W/cm²K seviyelerine kadar çıkabildiği göz önüne alındığında, bu çalışmada elde edilen ısı transfer katsayısı değerlerinin bu aralığın altında kaldığı ve geliştirmeye açık olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 6. DXK-HSK nozulu ile yapılan 1000 W/m² ve 750 W/m² ışınım deneylerinin hücre sıcaklığı düşüşü.

Figure 6. *Cell temperature drop of 1000 W/m2 and 750 W/m2 irradiation experiments performed with DXK-HSK nozzle.*

Şekil 6'da, DXD-HSK model dolu koni nozulu kullanılarak yapılan sprey soğutma deneylerinde, 1000 W/m² ve 750 W/m² ışınım altında fotovoltaik hücre sıcaklığının zamanla nasıl değiştiği gösterilmektedir. Her iki durumda da başlangıç sıcaklığı yaklaşık 45 °C'dir. 750 W/m² ışınım altında sıcaklık daha hızlı düşerek yaklaşık 11. dakikada 25 °C'ye ulaşırken, 1000 W/m² ışınım altında bu sıcaklığa ulaşmak yaklaşık 25 dakika sürmüştür. Bu da, daha yüksek ışınım seviyelerinde hücreye daha fazla ısı aktarıldığını ve bu nedenle soğuma süresinin daha uzun sürdüğünü göstermektedir. Aynı su ve hava debileriyle yapılan her iki deney, sistemin her iki ışınım koşulunda da etkili şekilde çalıştığını, ancak ışınım arttıkça soğuma süresinin uzadığını ortaya koymaktadır.

4. Sonuçlar

Fotovoltaik panellerin elektriksel verimliliğindeki düşüşü önlemek amacıyla sprey soğutma sistemi kullanılarak deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, PV hücre sıcaklığı 1000 W/m² ışınımda 25 °C'den 75 °C'ye çıktığında verim %13'ten %8,2'ye, 750 W/m² ışınımda ise 25 °C'den 65 °C'ye ulaştığında verim %10'dan %7,6'ya düşmüştür. Hızlı ve doğrudan soğutma sağlayan sprey sistemiyle yapılan uygulamalarda, elektriksel verimlilik değerleri sırasıyla %10'un ve %8'in üzerinde tutulabilmiştir. Sprey soğutma deneylerinde, 120 ml/dk su debisi ile gerçekleştirilen uygulamalarda ısı transfer katsayısı 0,78 W/cm²K olarak hesaplanmış; soğutma süresi 1000 W/m² ışınımda 25 dakika, 750 W/m² ışınımda ise 11 dakika olarak ölçülmüştür. Her iki ışınım seviyesinde de Sauter ortalama damlacık çapı (SMD) 203,63 µm olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, sistemin özellikle düşük ışınım koşullarında daha hızlı ve verimli soğutma sağladığını göstermektedir. Damlacık boyutunun literatürle uyumlu olduğu ve bazı çalışmalara kıyasla daha düşük değerlerde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu durum atomizasyon kalitesinin yüksek olduğunu ve yüzeyle temasın daha etkili şekilde sağlandığını ortaya koymuştur. Öte yandan, elde edilen ısı transfer katsayısı değerlerinin literatürde bildirilen üst sınırlara göre daha düşük kaldığı görülmüştür. Bu bulgu sistemin ısı transfer kapasitesi açısından geliştirmeye açık olduğunu göstermektedir. Genel olarak, kullanılan sprey soğutma sisteminin fotovoltaik panellerin sıcaklık kontrolü için etkili bir yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Gözlemler, sprey soğutmanın fotovoltaik panellerin hücre sıcaklığını optimum çalışma aralığında tutabileceğini göstermektedir Bu yaklaşım, fotovoltaik panel verimliliğindeki düşüşü etkili bir şekilde önler ve enerji tasarrufunu artırır. Gelecekteki araştırmalar, fotovoltaik paneller için farklı nozul konfigürasyonları kullanarak sprey soğutma tekniklerindeki varyasyonları keşfedebilir. Ayrıca, gelecekteki çalışmalar yeni nesil PV/T sistemlerindeki gelişmelere öncelik vermeli ve ekserjetik verimlilik, ekonomik uygulanabilirlik ve

hesaplamalı akışkanlar dinamiğini (CFD) içeren kapsamlı analizler yapmalıdır. Bu çabalar, inovasyonu teşvik etmeyi ve çeşitli uygulamalarda fotovoltaik teknolojinin performansını artırmayı amaçlamaktadır.

Ekler-Semboller

$\dot{m}$	Kütlesel Debi [kg/s]
ϱ	Yoğunluk [kg/m^3]
μ	Viskozite [kg/m.s]
$\dot{Q}$	Isı Akısı [kW/m^2]
σ	Yüzey Gerilimi
As	Yüzey Alanı
ALR	Air Liquid Ratio
d_o	Nozul Çapı
eV	Elektron Volt
g	Yer Çekim İvmesi [m/s^2]
h	Isı Transferşi Katsayısı [W/cm^{2}K]
k	Isı İletim Katsayısı
η	Verim
Nu	Nusselt Sayısı
P	Basınç [bar]
PCM	Faz Değişim Malzemesi
PV	Photovoltaic Panel
Re	Reynolds Sayısı
SMD	Sauter Ortalama Çap
t	Zaman [s]
T	Sıcaklık [°C]
Q″	Hacimsel Akı [m/s]
V	Volt
W	Watt
We	Weber Sayısı

Çıkar Çatışması Beyanı/ Conflict of Interest
Yazarlar, çıkar çatışması veya kişisel ilişki bulunmadığını beyan etmektedirler. / The authors have no conflicts of interest to declare.

Finansal Destek/ Funding
Yazar, bu çalışma için finansal destek almadığını beyan etmiştir. / The authors declared that this study has received no financial support.

Hakem Değerlendirmesi/Peer-review
Dış bağımsız/Externally peer-reviewed

Yazar Katkıları/Author Contributions
Concept/Tasarım-MHO, KY.; Dizayn/Design-AP; Denetleme/Supervision-MHO, KY; Kaynaklar/Resources-MHO, KY; Veri Toplanması ve/veya İşlemesi/Data Collection and/or Processing-MHO, KY; Analiz ve/ veya Yorum/Analysis and/or Interpretation-MHO, KY; Literatür Taraması/Literature Search-MHO; Yazıyı Yazan/ Writing Manuscript-MHO; Eleştirel İnceleme/Critical Review-KY.

Kaynakça

Alizadeh, H., Ghasempour, R., Shafii, M. B., Ahmadi, M. H., Yan, W.-M., & Nazari, M. A. (2018). Numerical simulation of PV cooling by using single turn pulsating heat pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 127, 203–208.

Baloch, A. A. B., Bahaidarah, H. M. S., Gandhidasan, P., & Al-Sulaiman, F. A. (2015). Experimental and numerical performance analysis of a converging channel heat exchanger for PV cooling. *Energy Conversion and Management, 103*, 14–27.

Bayrak, F., Oztop, H., & Selimefendigil, F. (2019). Effects of different fin parameters on temperature and efficiency for cooling of photovoltaic panels under natural convection. *Solar Energy, 188*(1), 484–494.

Bostanci, H., Van, D., Saarloos, B. A., Rini, D. P., & Chow, L. C. (2009). Spray cooling of power electronics using high temperature coolant and enhanced surface. *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 609–613.

Browne, M. C., Norton, B., & McCormack, S. (2015). Phase change materials for photovoltaic thermal management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 47*, 762–782.

Cazzaniga, R., Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P., & Tina, G. M. (2012). Floating tracking cooling concentrating (FTCC) systems. *2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 514–519.

Cracker, H. (2015). Engineers invent clear coating that boost solar cell efficiency by cooling them. Retrieved from https://gadgtecs.com/2015/09/25/engineers-invent-clear-coating-that-boost-solar-cell-efficiency-by-cooling-them/

Estes, K. A., & Mudawar, I. (1995). Correlation of Sauter mean diameter and critical heat flux for spray cooling of small surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 38*, 2985–2996.

Fayaz, H., Rahim, N. A., Hasanuzzaman, M., Nasrin, R., & Rivai, A. (2019). Numerical and experimental investigation of the effect of operating conditions on performance of PVT and PVT-PCM. *Renewable Energy, 143*, 827–841.

Lin, L. (2003). Heat transfer characteristics of spray cooling in a closed loop. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 46*(1), 3737–3746.

Masters, G. M. (2013). *Renewable and efficient electric power systems*. John Wiley & Sons.
Mehrotra, S., Rawat, P., Debbarma, M., & Sudhakar, K. (2014). Performance of solar panel with water immersion cooling technique. *International Journal of Science, 3*, 1161–1172.

Nizetic, S., Coko, D., Yadav, A., & Grubisic-Cabo, F. (2016). Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: The performance response. *Energy Conversion and Management, 108*, 287–296.

Oner, V., Yesilyurt, M., Yilmaz, E. Ç., & Omeroglu, G. (2016). Photovoltaic Thermal (PVT) solar panels. *International Journal of New Technology and Research, 2*, 13–16.

Özakın, A. N., Yakut, K., & Khalaji, M. N. (2020). Performance analysis of photovoltaic heat pump (PV/T) combined systems: A comparative numerical study. *Journal of Solar Energy Engineering, 142*(2), 1116–1126.

Rybicki, J. R., & Mudawar, I. (2006). Single-phase and two-phase cooling characteristics of upward-facing and downward-facing sprays. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 49*(1), 5–16.

Siecker, J., Kusakana, K., & Numbi, B. (2017). A review of solar photovoltaic systems cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 79*, 192–203.

Smakulski, P. (2016). A review of the capabilities of high heat flux removal by porous materials, microchannel and spray cooling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 104*, 636–646.

Teo, H. G., Lee, P. S., & Hawlader, M. N. A. (2012). An active cooling system for photovoltaic modules. *Applied Energy, 90*, 309–315.

Wu, S. Y., Wang, T., Xiao, L., & Shen, Z. (2019). Effect of cooling channel position on heat transfer characteristics and thermoelectric performance of air-cooled PV/T system. *Solar Energy, 180*, 489–500.

Yan, Z., & Chan, P. (2011). Spray cooling. In A. Ahsan (Ed.), *Two phase flow, phase change and numerical modeling* (pp. 285–310). Swinburne University of Technology, Australia.

Yesildal, F., Ozakin, A. N., & Yakut, K. (2022). Optimization of operational parameters for a photovoltaic panel cooled by spray cooling. *Engineering Science and Technology, an International Journal, 25*.

Anatolia Science and Technology Journal (ASTEJ)

ASTEJ, 2025, 2(1)
DOI: 10.5281/zenodo.17427457
Derleme Makalesi/ Review Article

Nötrino Fiziği ve Güncel Gelişmeleri Üzerine

Yusuf SAĞLAM[1*]
[1]Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Astronomi ve Astrofizik Ana Bilim Dalı, 25240, Erzurum, Türkiye

Özet

Nötrinolar; maddeyle çok zayıf etkileşen, elektriksel olarak yüksüz, çok küçük kütleli temel parçacıklardır. Elektron, müon ve tau olmak üzere üç türü bulunur. Tarihsel olarak, varlıkları ilk kez 1930'da Wolfgang Pauli tarafından beta bozunumundaki enerji korunumunu açıklamak için öne sürülmüş ve 1956'da Cowan ve Reines tarafından deneysel olarak ispatlanmıştır. O günden bugüne kadar farklı keşiflerle yüksek enerji fiziği çalışmalarına ışık tutmuştur. Nötrino fiziğindeki en önemli keşif, bu parçacıkların yol alırken bir türden diğerine dönüşebildiğini gösteren "nötrino salınımları" dır. İlk olarak güneşten gelen nötrinoların beklenenden az saptanmasıyla ipuçları elde edilen bu olgu, 1998'de Super-Kamiokande deneyinin atmosferik nötrinoların salınımını gözlemlemesiyle kesin olarak kanıtlanmıştır. Salınım olgusu, nötrinoların çok küçük de olsa bir kütleye sahip olmaları gerektiğini ortaya koymuştur. Bu durum, nötrinoları tamamen kütlesiz varsayan ve yalnızca sol-elli bileşenlerini içeren Parçacık Fiziği Standart Modeli ile çelişmektedir. Bu çelişki, Standart Model'in ötesinde yeni bir fiziğin varlığına işaret eden en güçlü kanıtlardan biri haline gelmiştir. Nötrinoların kütlesini açıklamak için geliştirilen en popüler teorik çerçeve, çok ağır sağ-elli (steril) nötrinoların varlığını öngören "seesaw mekanizması"dır. Aynı zamanda karanlık madde adayı olarak da görülen bu varsayımsal parçacıklar, mevcut ve gelecek deneylerin (DUNE, Hyper-Kamiokande vb.) ana hedeflerindendir. Nötrinolar evrenin temel yapısına dair en derin soruların merkezinde yer almaktadır. Bu çalışmada nötrino fiziğinin temelleri ve gelecek perspektifi detaylıca ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Atomaltı parçacık, nötrino, nötrino salınımı, seesaw mekanizması, standart model (SM)

On Neutrino Physics and Current Developments

Yusuf SAĞLAM[1*]
[1]Atatürk University, Institute of Sciences, Astronomy and Astrophysics, 25240, Erzurum, Türkiye

Abstract

Neutrinos are fundamental particles that interact very weakly with matter, are electrically neutral, and have very small masses. There are three types: electron, muon, and tau. Historically, their existence was first proposed in 1930 by Wolfgang Pauli to explain energy conservation in beta decay and was experimentally proven in 1956 by Cowan and Reines. Since then, various discoveries have shed light on high-energy physics research. The most significant discovery in neutrino physics is "neutrino oscillations," which demonstrate that these particles can transform from one type to another as they travel. This phenomenon, first hinted at by the detection of fewer neutrinos from the sun than expected, was definitively proven in 1998 when the Super-Kamiokande experiment observed the oscillation of atmospheric neutrinos. The oscillation phenomenon revealed that neutrinos must have a mass, albeit very small. This contradicts the Standard Model of Particle Physics, which assumes that neutrinos are completely massless and contain only left-handed components. This contradiction has become one of the strongest pieces of evidence pointing to the existence of new physics beyond the Standard Model. The most popular theoretical framework developed to explain the mass of neutrinos is the "seesaw mechanism," which predicts the existence of very heavy right-handed (sterile) neutrinos. These hypothetical particles, which are also considered candidates for dark matter, are the primary targets of current and future experiments (DUNE, Hyper-Kamiokande, etc.). Neutrinos are at the center of the deepest questions about the fundamental structure of the universe. This study provides a detailed examination of the fundamentals of neutrino physics and its future prospects.

Keywords: Neutrino, neutrino oscillation, seesaw mechanism, standard model (SM), subatomic particle

* Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: Yusuf SAĞLAM (Yüksek Lisans), e-posta: yusuf.saglam18@ogr.atauni.edu.tr, ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7697-6951
**Geliş/Received: 13/06/2025, Düzeltme/Revised: 15/08/2025, Kabul/Accepted: 17/08/2025, Yayınlanma/Published: 24/10/2025.

1. Giriş

1.1. Nötrinonun Tarihsel Arka Planı

Nötrino kavramı ilk kez 1930 yılında Wolfgang Pauli tarafından, beta bozunması sırasında gözlemlenen enerji spektrumunun sürekliliğini açıklamak ve enerji-momentum korunumunu sağlamak amacıyla öne sürülmüştür. Pauli, bu bozunumda doğrudan tespit edilemeyen, yüksüz ve çok hafif bir parçacığın yayıldığını ileri sürerek, doğada bu şekilde "görünmeyen" bir parçacığın var olması gerektiğini belirtmiştir (Pauli, 1930; Jarlskog, 2018). Bu fikir, 1934 yılında Enrico Fermi tarafından geliştirilen kuantum alan kuramı tabanlı beta bozunması modeli ile kuramsallaştırılmış ve parçacığa İtalyanca "küçük nötr olan" anlamına gelen nötrino adı verilmiştir. Fermi'nin kuramı, zayıf etkileşimleri açıklamada ilk başarılı teorik çerçeve olmasının yanı sıra, nötrinoların ya kütlesiz ya da çok küçük kütleli olduklarını varsaymaktaydı (Fermi, 1934).

Nötrinoların varlığına dair ilk doğrudan deneysel kanıt 1956 yılında Clyde Cowan ve Frederick Reines tarafından "Project Poltergeist" adı verilen deneyle elde edilmiştir. Bu deneyde, nükleer reaktörden yayılan elektron antinötrinoları, ters beta bozunması reaksiyonuyla ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$) gözlemlenmiş ve açığa çıkan pozitronların bir elektronla etkileşimi ($e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$) sonucu elde edilen gama fotonlarıyla, elektron nötrinosunun varlığı teyit edilmiştir (Cowan vd., 1956; Reines, 1996). Bu başarı, nötrinonun deneysel olarak keşfi anlamına gelirken, Reines'e 1995 yılında Nobel Fizik Ödülü kazandırmıştır. 1962 yılında Brookhaven Ulusal Laboratuvarı (BNL)'nda Leon Lederman, Melvin Schwartz ve Jack Steinberger tarafından gerçekleştirilen bir diğer önemli deneyde, müon bozunumundan kaynaklanan nötrino akısı incelenmiş ve elektron nötrinosundan farklı bir tür olan müon nötrinosu keşfedilmiştir (Danby vd., 1962). Bu keşif, nötrinoların birden fazla türe sahip olduğunu göstermiş ve bu çalışmayla araştırmacılar 1988 yılında Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülmüştür.

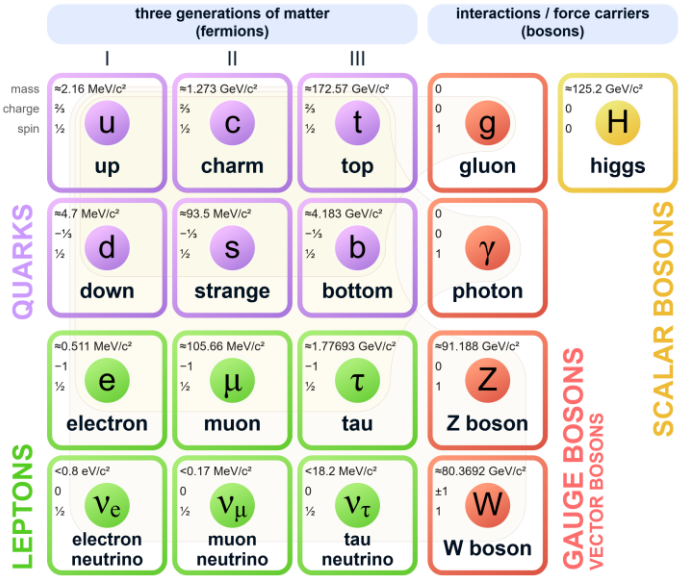
1970'li yıllarda tau nötrinosunun keşfi (Perl vd., 1975) ve Z bozonunun bozunma genişliğinin hassas ölçümleri, üç aktif nötrino türünün (ν_e, ν_μ, ν_τ) varlığını dolaylı olarak doğrulamıştır (Feldman vd., 1989). Nihayetinde, 2000 yılında Fermilab'da gerçekleştirilen DONUT (Direct Observation of Nu-Tau) deneyi ile tau nötrinosu doğrudan gözlemlenmiş ve böylece üçlü nötrino türü tamamlanmıştır (Kodama vd., 2001). Bu süreçte, Bruno Pontecorvo 1950'lerde (o dönemde yalnızca elektron nötrinosu bilinmesine rağmen) nötrinoların türler arası dönüşüm geçirebileceğini (tek bir türün farklı hallere bürünmesi) yani nötrino osilasyonu fikrini ortaya atmıştır (Pontecorvo, 1958). Bu fikir, uzun yıllar kuramsal kalsa da 1968'de Ray Davis'in güneşten gelen elektron nötrinolarını beklenenden üçte bir oranında daha az tespit etmesiyle gündeme gelmiş ve "güneş nötrino problemi" olarak anılmıştır (Bahcall & Davis, 1976). Bu eksiklik, farklı nötrino türlerine dönüşüm olasılığıyla açıklanmıştır.

1998 yılında Japonya'daki Super-Kamiokande deneyi, atmosfer kökenli müon nötrinolarının kaybolduğunu göstererek nötrino osilasyonlarına doğrudan kanıt sağlamıştır (Fukuda vd., 1998). Ardından Kanada'daki Sudbury Nötrino Gözlemevi (SNO), 2001–2002 yıllarında gerçekleştirdiği deneylerle güneşten gelen elektron nötrinolarının diğer nötrino türlerine dönüştüğünü net biçimde göstermiştir (Ahmad vd., 2002). Reaktör kökenli nötrinolarla yapılan KamLAND (Kamioka Liquid Scintillator Antineutrino Detector) deneyi ve Avrupa Nükleer Araştırma Merkezinden (CERN) Gran Sasso'ya gönderilen demet üzerinde çalışan OPERA (The Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus) deneyi gibi çalışmalar, osilasyonun farklı deneysel sistemlerde de gözlendiğini ortaya koymuştur (Eguchi vd., 2003; Adam vd., 2012). Bu gelişmelerin sonucunda Takaaki Kajita ve Arthur B. McDonald, nötrino osilasyonlarını deneysel olarak teyit etmeleri nedeniyle 2015 yılında Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülmüşlerdir. Nötrino osilasyonlarının gözlemlenmesi, aynı zamanda nötrinoların kütleli olduğunun bir kanıtıdır. Çünkü teorik olarak, osilasyon olayının gerçekleşebilmesi için nötrino türlerinin farklı kütlelere sahip olması gerekir. Böylece nötrinoların kütleli olduğu ve türler arası geçiş yapabildiği gerçeği, modern parçacık fiziğinin temel taşlarından biri haline gelmiştir.

1.2. Nötrino Türleri ve Temel Özellikleri

Nötrinoları tanımlayabilmek için ilk olarak iki temel kavramı açıklamak gerekir. Bunlardan biri Fermiyon diğeri ise Leptonlar'dır. Fermiyon, temel parçacık fiziğinde, maddeyi oluşturan iki temel parçacık sınıfından biridir (diğeri bozonlardır). Fermiyonları tanımlayan en temel özellik, yarım tam sayılı spine (1/2, 3/2 vb.) sahip olmalarıdır. Bu spin özelliği, onların çok önemli bir kuantum mekaniksel ilkeye, Pauli Dışlama İlkesi'ne

uymalarını zorunlu kılar. Pauli Dışlama İlkesi, iki özdeş fermiyonun aynı anda aynı kuantum durumunda (yani aynı enerji seviyesi, aynı spin yönelimi gibi tüm kuantum sayılarına sahip olma durumu) bulunamayacağını belirtir. Maddenin kararlı ve hacimli olmasının temel nedeni bu ilkedir. Temel fermiyonlar kuarklar ve leptonlar olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Kuarklar, proton ve nötron gibi parçacıkları oluşturan temel bileşenlerdir (up, down, charm, strange, top, bottom). Leptonlar ise elektron, müon, tau ve onlara karşılık gelen üç tür nötrinolardan meydana gelmektedir (bkz. Şekil 1). (Griffiths, 2020)



Şekil 1. Temel Parçacıkların Standart Modeli
Figure 1. *The Standard Model of Elementary Particles*

Nötrinolar, temel lepton parçacık grubuna ait, yalnızca zayıf nükleer kuvvet ve kütleçekim kuvveti (ihmal edilebilir düzeyde de olsa) yoluyla etkileşime giren elektriksel olarak yüksüz ve ½ spin değerine sahip fermiyonlardır. Spin, temel parçacıkların ve atom çekirdeklerinin, yörüngesel hareketten bağımsız olarak sahip oldukları içsel (oluşum temelinden gelen) bir kuantum mekaniksel açısal momentumdur. Bu momentumun herhangi bir ölçüm eksenine göre izdüşümü sürekli değerler almak yerine yalnızca ayrık ve kuantize olmuş değerlerle sınırlıdır (aşağı/yukarı spin).

Standart Model (SM) kapsamında üç temel nötrino türü tanımlanmıştır: Elektron nötrinosu (ν_e), Müon nötrinosu (ν_μ), Tau nötrinosu (ν_τ). Her temel parçacık gibi, nötrinoların da karşıt parçacıkları vardır. Bunlar elektron antinötrinosu ($\bar{\nu}_e$), müon antinötrinosu ($\bar{\nu}\mu$) ve tau antinötrinosu ($\bar{\nu}\tau$)'dur (bkz. Tablo 1). Her bir tür, sırasıyla elektron, müon ve tau leptonlarıyla zayıf nükleer kuvvet yoluyla etkileşimde rol alır.

$$\nu_e + n \rightarrow p + e \qquad (1)$$

Burada bir elektron nötrinosu (ν_e), bir nötronla (n) etkileşime girdiğinde; bir proton (p) ve bir elektron (e) üretimini göstermektedir. Nötrinoların en belirgin özelliklerinden biri elektriksel olarak yüksüz olmalarıdır. Bu durum onların elektromanyetik kuvvetle ve güçlü nükleer kuvvetle etkileşmediği anlamına gelir. Bu nedenle, nötrinolar maddeyle yalnızca zayıf nükleer kuvvet ve kütleçekim kuvveti (ihmal edilebilir düzeyde de olsa) yoluyla etkileşirler. (Giunti & Studenikin, 2015) Zayıf etkileşimlerin doğası gereği çok kısa menzilli ve "zayıf" olması, nötrinoların maddeyle son derece seyrek etkileşmesine yol açar. Bir nötrino, örneğin Dünya veya Güneş ile neredeyse hiç etkileşmeden bu gök cisimlerinden geçebilir. Bu özellikleri nedeniyle doğrudan tespit edilmeleri oldukça zordur. Dolayısıyla uzun yıllar boyunca nötrinoların kütlesiz olduğu varsayılmıştır (Navas vd., 2024). Ancak 1998 yılında Super-Kamiokande deneyinin atmosferik nötrinolarla (Fukuda vd., 1998) ve ardından SNO deneyinin güneş nötrinolarıyla (Ahmad vd., 2002) yaptığı gözlemler, nötrinoların farklı türlere dönüşebildiğini (salınım yapabildiğini) kesin olarak göstermiştir. Nötrino salınımları, ancak ve ancak nötrinoların kütleleri varsa ve bu kütleler birbirinden farklıysa gerçekleşebilir. Dolayısıyla, bu deneyler nötrinoların çok küçük de olsa sıfırdan farklı kütlelere sahip olması gerektiğini kanıtlamıştır. Ancak bu kütleler, diğer temel parçacıkların kütleleriyle karşılaştırıldığında son derece küçüktür. Örneğin, en hafif yüklü lepton olan elektronun kütlesi yaklaşık 0.511 MeV/c² iken, elektron nötrinosu için

KATRIN (The Karlsruhe Tritium Neutrino) deneyi tarafından belirlenen en güncel doğrudan kütle üst sınırı yaklaşık 0.8 eV/c² 'dir (KATRIN, 2025). Diğer nötrino türleri için doğrudan kütle ölçümleri daha zordur ancak kozmolojik gözlemler (örneğin Planck+DESI verileri), üç aktif nötrinonun kütlelerinin toplamının ($\sum m_\nu$) yaklaşık olarak 0.072 eV/c²'den küçük olması gerektiğini göstermiştir (Naredo-Tuero vd., 2024). Bu, her bir tür için nötrino kütlelerinin çok daha küçük olması gerektiği anlamına gelir. Nötrinoların mutlak kütle değerleri ve bu kütlelerin birbirlerine göre sıralaması (kütle hiyerarşisi) hala aktif bir araştırma konusudur.

Tablo 1. Üç Nötrino Türünün Özellikleri (Tanabashi vd., 2018; Zyla vd., 2020., Navas vd., 2024; KATRIN, 2025; Naredo-Tuero vd., 2024)
Table 1. *Properties of the Three Neutrino Types*

Özellik	**Elektron Nötrinosu (ν_e)**	**Müon Nötrinosu (ν_μ)**	**Tau Nötrinosu (ν_τ)**
İlgili Lepton	Elektron (e^-)	Müon (μ^-)	Tau (τ^-)
Kütle (üst sınır)	<0.8 eV/c²	<0.17 MeV/c² (dolaylı)	<18.2 MeV/c² (dolaylı)
Toplam Kütle	<0.072 eV/c²	<0.072 eV/c²	<0.072 eV/c²
Spin	½	½	½
Elektrik Yükü	0	0	0
Etkileşim Türü	Yalnızca zayıf kuvvet ve kütleçekim	Yalnızca zayıf kuvvet ve kütleçekim	Yalnızca zayıf kuvvet ve kütleçekim
Antiparçacığı	Elektron antinötrinosu ($\bar{\nu}_e$)	Müon antinötrinosu ($\bar{\nu}\mu$)	Tau antinötrinosu ($\bar{\nu}\tau$)
Üretim Kaynağı	Beta bozunması, güneş reaksiyonları	Pion ve kaon bozunmaları atmosferik CR	Yüksek enerjili parçacık etkileşimleri
Tespit Deneyleri	Homestake, SNO, Borexino,KATRİN	Super-Kamiokande, MINOS, T2K, NOvA	OPERA, DONUT, IceCube (dolaylı olarak)

Burada ν_μ ve ν_τ için verilen dolaylı sınırlar, ilgili yüklü leptonların ve mezonların bozunma kinematiğinden gelmektedir.

1.3. Nötrinoların Doğasındaki Temel Kavramlar: Helisite (Helicity), Kiralite (Chirality) ve CP İhlali

Nötrinoların ve genel olarak temel parçacıkların zayıf etkileşimlerdeki davranışını anlamak için helisite ve kiralite kavramları önem taşımaktadır. SM'de nötrinoların yalnızca sol-elli (ya da sol-kiral) olması, bu özelliklerle yakından ilişkilidir. Helisite, spin vektörünün (S) momentum vektörüne (p) göre olan izdüşümünü tanımlar:

$$h = S \cdot \hat{p} \,/\, |S| \qquad (2)$$

Burada $\hat{p} = p/|p|$ momentum yönündeki birim vektörü, "h" ise parçacığın helisite değerini temsil eder.Eğer spin, hareket yönüyle aynı yöndeyse (yani spin izdüşümü 1/2 ölçülmüşse) parçacık sağ-elli (right-handed, h= 1), hareket yönüyle aynı yöndeyse (yani spin izdüşümü $-1/2$ ölçülmüşse) sol-elli (left-handed, h=−1) kabul edilir. Ancak, kütleli bir parçacık için helisite Lorentz değişmezi değildir; yani parçacıktan daha hızlı hareket eden bir gözlemci için helisite tersine dönebilir. Kütlesiz parçacıklar ışık hızında hareket ettikleri için helisiteleri Lorentz değişmezidir ve gözlemcinin referans çerçevesine bağlı değildir. Kiralite, bir parçacığın Lorentz grubunun spinor temsillerine göre nasıl davrandığını tanımlayan daha temel bir özelliktir. Dirac denkleminin çözümleri olan dört bileşenli spinorlar (ψ), kiralite operatörü (Denklem 3) kullanılarak sağ-kiral (Denklem 4) ve sol-kiral (Denklem 5) bileşenlere ayrılabilir. Kiralitelerin toplamı ise Denklem 6 ile gösterilmiştir. Kütlesiz parçacıklar için kiralite ve helisite aynı anlama gelir: sol-kiral parçacıklar sol-elli, sağ-kiral parçacıklar ise sağ-ellidir. Ancak kütleli parçacıklar için kiralite ve helisite farklı kavramlardır, ancak yüksek enerjilerde (enerji kütleden çok büyükken, E≫m) yaklaşık olarak aynı olurlar. Zayıf etkileşimler,

kiraliteye duyarlıdır: yalnızca sol-kiral fermiyonlar ve sağ-kiral antifermiyonlar zayıf yüklü akım etkileşimlerine katılır aynı zamanda "V-A teorisi" olarak bilinmektedir. (Peskin & Schroeder, 1995)

$$\gamma^5 = i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3 \quad (3)$$

$$\psi_R = \frac{1+\gamma^5}{2}\psi \quad (4)$$

$$\psi_L = \frac{1-\gamma^5}{2}\psi \quad (5)$$

$$\psi = \psi_L + \psi_R \quad (6)$$

Daha basit bir şekilde; bir temel parçacığın spinini, kendi ekseni etrafında dönen bir topaca benzetebiliriz. Bu "dönüşün" bir yönü vardır. Helisite, işte bu dönüş yönünün, parçacığın hareket yönüyle olan ilişkisidir. Yani helisite, bir parçacığın hareket ederken hangi yöne doğru "döndüğünü" anlatan, gözlemlenebilir bir özelliktir. Kiralite ise daha temel bir özelliktir. Bunu anlamak için sağ ve sol elimizi düşünebiliriz (Birbirlerinin yerine geçemezler. Sol el, temelde "sol" bir yapıya sahipken, sağ el ise "sağ" bir yapıya sahiptir). Yani bir parçacık, hareketinden veya dönüşünden bağımsız olarak, doğası gereği ya "sol-kiral" ya da "sağ-kiral" bir yapıya sahiptir. Bu durum onun kimliği gibidir, değişmez.

Zayıf etkileşimlerin, parçacıkların bu "elli" yapısına duyarlı olduğu ve doğada bir tarafı tercih ettiği fikri, teorik bir varsayım olarak kalmamıştır. Bu durum, 1957 yılında Chien-Shiung Wu ve çalışma arkadaşları tarafından gerçekleştirilen Wu deneyi ile deneysel olarak doğrulanmıştır. Kobalt-60 atomlarının düşük sıcaklıklarda manyetik alan içinde hizalanarak yapılan beta bozunması deneyinde, yayılan elektronların tercihli olarak çekirdek spinine zıt yönde çıktığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç, zayıf etkileşimlerin parite simetrisini (P simetrisi, yani ayna yansıması altındaki değişmezlik) maksimal olarak ihlal ettiğini ve aynı zamanda yük eşlenik simetrisini (C simetrisi, parçacık-antiparçacık değişimi altındaki değişmezlik) de ihlal ettiğini göstermiştir (Wu vd., 1957).

Bu keşfi takiben, hâkim görüş, bu iki simetrinin birleşik dönüşümü olan CP simetrisinin evrenin temel bir değişmezi olabileceği yönündeydi. Söz konusu hipotez uyarınca, bir fiziksel sürecin kendisi ile, o süreçteki tüm parçacıkların anti-parçacıklarıyla değiştirilip uzamsal koordinatlarının ters çevrildiği (parite inversiyonu) CP-dönüşümlü hali arasında gözlemlenebilir bir fark olmamalıydı (Landau, 1957). Ancak bu öngörü, 1964 yılında nötral kaon (K^0) sisteminde gerçekleştirilen bir deneyle çürütülmüştür. James Christenson ve çalışma arkadaşları, uzun ömürlü nötral kaonların (K_L) bozunumlarını incelerken, CP simetrisinin mutlak korunumu durumunda yasaklı olan iki pionluk bozunum ($K_L \rightarrow \pi^+\pi^-$) modunu tespit etmişlerdir. K_L durumu CP-özdeğeri -1 olan bir durum olarak tanımlanırken, iki pionluk nihai durumun CP-özdeğeri +1'dir. Dolayısıyla, bu bozunumun düşük bir dallanma oranıyla dahi gerçekleşmesi, zayıf etkileşimlerin CP simetrisini de ihlal ettiğinin kesin kanıtını teşkil etmiştir (Christenson vd., 1964).

CP ihlalinin SM içerisindeki teorik çerçevesi, 1973 yılında Makoto Kobayashi ve Toshihide Maskawa tarafından oluşturulmuştur. Kobayashi ve Maskawa, kuarkların bilinen iki nesilden daha fazla, en az üç nesil olması durumunda, kuarkların kütle ve zayıf etkileşim öz durumları arasındaki ilişkiyi tanımlayan Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) matrisinin, Lagrangian'da giderilemeyen bir kompleks faz içerebileceğini ortaya koymuşlardır. Bu kompleks fazın varlığı, bir parçacığın dahil olduğu süreç ile onun anti-parçacığının dahil olduğu süreç arasında, bozunum oranları gibi gözlemlenebilir niceliklerde bir asimetriye yol açarak CP ihlalini tutarlı bir biçimde açıklar (Kobayashi & Maskawa, 1973).

CP simetrisinin ihlali, evrenin mevcut yapısının anlaşılması adına temel bir gereklilik olarak kabul edilmektedir. Gözlemlenen evrenin neredeyse tamamen baryonik maddeden oluşması ve anti-maddenin ihmal edilebilir düzeyde olması (Baryon Asimetrisi Problemi), Büyük Patlama'nın simetrik başlangıç koşullarıyla bir tutarsızlık arz eder. Andrei Sakharov, 1967'de, evrenin ilk anlarında bu baryon asimetrisinin dinamik olarak teşekkül edebilmesi (baryogenez) için üç temel koşulun gerekliliğini ifade etmiştir: (i) baryon sayısının korunumunun ihlali, (ii) C ve CP simetrilerinin ihlali ve (iii) termal dengeden ayrılma. CP ihlali, madde ve anti-maddenin bozunum yollarının farklılaşmasına olanak tanıyarak, erken evrendeki yok oluş sürecinden arta kalan küçük bir madde fazlasını açıklayan mekanizmayı teşkil eder (Sakharov, 1991).

Böylece, CKM matrisindeki faz tarafından öngörülen CP ihlali, kuarkların zayıf etkileşimlerine ilişkin tüm deneysel gözlemlerle uyumlu olsa da bu mekanizmanın ürettiği asimetrinin büyüklüğünün, gözlemlenen baryon asimetrisini niceliksel olarak açıklamaya yetmediği düşünülmektedir. Bu tutarsızlık, leptonlar alanında (PMNS matrisi aracılığıyla) veya Standart Model Ötesi yeni fizik kuramlarında ek CP ihlali kaynaklarının araştırılmasını teşvik eden başlıca kaynaklarından biridir.

1.4. Standart Model (SM)'deki Yeri ve Eksiklikleri

SM, günümüzde bilinen tüm temel parçacıkları ve bu parçacıklar arasındaki üç temel kuvveti (güçlü nükleer kuvvet, zayıf nükleer kuvvet ve elektromanyetik kuvvet) tanımlayan bir kuantum alan teorisidir. Kuantum alan teorisi, parçacıkları temel alanların kuantize olmuş uyarılmaları olarak ele alır ve etkileşimleri bu alanlar aracılığıyla tanımlar (Griffiths, 2020). SM, temel madde parçacıkları olan fermiyonları ve bu parçacıklar arasındaki etkileşimlere aracılık eden kuvvet taşıyıcı bozonları da içerir. Nötrinolar, SM'nin lepton ailesinin temel üyeleridir. Nötrinoların en belirgin özelliği, yalnızca zayıf nükleer kuvvet ve kütleçekim kuvveti (ihmal edilebilir düzeyde de olsa) aracılığıyla etkileşmeleridir. Elektriksel olarak yüksüz olmaları ve renk yükü taşımamaları nedeniyle elektromanyetik ve güçlü nükleer kuvvetlerle doğrudan bir etkileşime girmezler. Zayıf nükleer etkileşimler ise kütleli W^+, W^- ve W^0 bozonları aracılığıyla gerçekleşir. Nötrinolar, bu bozonlarla etkileşerek beta bozunması gibi nükleer süreçlerde, yıldızların enerji üretim mekanizmalarında ve yüksek enerjili parçacık çarpışmalarında önemli roller üstlenirler (Mohapatra & Pal, 2004).

SM'nin orijinal formülasyonunda nötrinolar kütlesiz kabul edildiği için, sol-elli nötrinolar aynı zamanda sol-kiral, sağ-elli antinötrinolar ise sağ-kiraldir. SM, yalnızca sol-kiral nötrinoları ve sağ-kiral antinötrinoları içerir; sağ-kiral nötrinolar ve sol-kiral antinötrinolar teorik olarak mümkün olsa da SM içinde etkileşimsiz (steril) olarak ayrı tutulmuştur. Bir parçacığa kütle kazandırmanın standart yolu olan yeniden normalleştirilebilir bir Dirac kütle terimi (bkz. Denklem 7) hem sol-kiral (Ψ_L) hem de sağ-kiral (Ψ_R) alanların varlığını gerektirir. SM'de sağ-kiral nötrinolar ya hiç bulunmadığından ya da steril kabul edilip Higgs alanı ile etkileşmediğinden, bilinen Higgs mekanizması aracılığıyla nötrinolara kütle kazandırmak için böyle bir Dirac kütle terimi yazılamazdı. Alternatif bir kütle mekanizması olan Majorana kütle terimi (bkz. Denklem 8) ise teorik olarak mümkündür. Bu iki kütle teriminin temel farklarını daha detaylı incelemek gerekirse:

Dirac kütlesi, Standart Model'deki elektron ve kuarklar gibi diğer tüm yüklü fermiyonların kütle kazanma mekanizmasıdır. Bu mekanizmayı, bir parçacığın "sol-elli" ve "sağ-elli" versiyonlarını birbirine bağlayan bir köprü gibi düşünebiliriz. Kütle, bu iki farklı kiral durum arasındaki geçişin veya etkileşimin bir ölçüsüdür. Matematiksel olarak bu terim, $\overline{\Psi_R}\Psi_L$ formunda yazılır ve bir sol-elli alanı sağ-elli bir alana dönüştürür. Dolayısıyla, bu "köprünün" kurulabilmesi için doğada hem sol-elli hem de sağ-elli bir alanın mevcut olması zorunludur. Standart Model'de etkileşen bir sağ-kiral nötrino alanı bulunmadığından, bu standart kütle köprüsü nötrinolar için kurulamaz. Dirac kütle mekanizması, lepton sayısı gibi kuantum sayılarını korur.

Majorana kütlesi ise çok daha farklı bir mekanizmadır. Bu mekanizma, yalnızca tek bir kiraliteye sahip alanlarla yazılabilir; örneğin sadece sol-kiral bir alan (Ψ_L) yeterlidir. Bunu, parçacığın kendi "ayna görüntüsüyle" veya başka bir ifadeyle kendi anti-parçacığıyla etkileşmesi gibi düşünebiliriz. Bu mekanizmanın işleyebilmesi için parçacığın elektriksel olarak tamamen nötr olması ve en önemlisi kendisinin anti-parçacığı olması gerekir. Yani bir Majorana parçacığı, parçacık-antiparçacık ayrımı olmayan bir fermiyondur. Bu durum, lepton sayısının korunumunu (Δ_L) iki birim kadar ihlal eder, çünkü kütle terimi bir parçacığı (lepton) doğrudan kendi anti-parçacığına (anti-lepton) dönüştürür. Bu teorik kısıtlamalar nedeniyle, SM'nin en minimal versiyonunda nötrinolar kütlesiz olarak kabul edilmiştir (Kayser, 2003).

$$\mathcal{L}_{\mathcal{D}} = -m_D(\overline{\Psi_R}\Psi_L + \overline{\Psi_L}\Psi_R) \tag{7}$$

$$\mathcal{L}_{\mathcal{M}} = -\frac{1}{2}m_M\left(\overline{\Psi_L^c}\Psi_L + \overline{\Psi_L}\Psi_L^c\right) \tag{8}$$

Ancak, 1998 ve 2002 yıllarında gerçekleşen nötrino salınımlarının keşfi, nötrinoların kütleli olduğunu kesin olarak ortaya koyarak bu varsayımı yeniden değerlendirmeyi zorunlu kılmıştır. Bu dönüşümün gerçekleşebilmesi için, nötrinoların kütleli olması ve kütle öz durumları ile çeşni öz durumlarının birbirinden

farklı olması gerekmektedir. Atmosferik nötrinoları inceleyen Super-Kamiokande deneyi ve Güneş'ten gelen nötrinoları inceleyen SNO (Sudbury Neutrino Observatory) deneyi, bu salınımları kesin olarak kanıtlamıştır. Nötrinoların kütleli olduğunun bu deneysel keşfi, SM'nin orijinal formülasyonuyla doğrudan bir çelişki oluşturmuş ve SM'nin eksik olduğunun en önemli deneysel kanıtlarından birini teşkil etmiştir. Bu eksiklik, SM'nin temel yapısının yanlış olmasından değil, modelin başlangıçta içerdiği parçacık ve simetri varsayımlarının eksik olmasından kaynaklanmaktadır. Minimal SM, gözlemlenen kütleyi üretecek ne uygun bir parçacığa (sağ-kiral nötrino gibi) ne de gerekli etkileşim mekanizmasına (lepton sayısını ihlal eden gibi) sahip değildir. Bu durum, SM'nin genişletilmesi gerekliliğini bir kez daha ortaya koymuştur (Mohapatra & Smirnov, 2006). Eğer nötrinolar kütleliyse, SM'de yer almayan sağ-kiral nötrino bileşenlerinin (veya sol-kiral antinötrino bileşenlerinin) var olması gerekir. Bu bileşenler SM'nin zayıf etkileşimlerine girmiyorsa, "steril nötrinolar" olarak adlandırılırlar.

Kütleli parçacıklar için helisite gözlemciye bağlıdır; ancak kiralite, Lorentz dönüşümlerine göre sabittir. Bu nedenle, zayıf etkileşimde hangi parçacıkların rol aldığını belirleyen esas nicelik kiralitedir (Donoghue vd., 2014). SM'nin sadece sol-kiral nötrinoları içerme varsayımı, kütlesiz olduğu varsayımıyla tutarlıydı, ancak kütlenin keşfiyle birlikte, sağ-kiral bir bileşenin de varlığı zorunlu hale gelmiştir. Bu sağ-kiral bileşenin SM etkileşimlerine katılıp katılmadığı (steril olup olmadığı), nötrino kütle mekanizmasının (Dirac mı Majorana mı) doğasını belirlemede kritik rol oynar. Eğer nötrinolar Dirac parçacıklarıysa (yani kendileriyle antiparçacıkları farklıysa ve lepton sayısı korunuyorsa) ve sağ-kiral bileşen SM'ye göre steril ise, kütle Higgs mekanizmasıyla doğrudan üretilemez. Eğer nötrinolar Majorana parçacıklarıysa (yani kendileriyle antiparçacıkları aynıysa ve lepton sayısı korunmuyorsa), kütle terimleri farklı bir yapıya sahip olur. Bu durum, seesaw mekanizması gibi alternatif kütle mekanizmalarının araştırılmasını gerektirir (Kayser, 2003).

Nötrino kütlelerinin deneysel olarak doğrulanması, SM'nin tamamlanmamış bir teori olduğunun güçlü bir göstergesidir. Bu durum, seesaw mekanizmaları, ekstra uzay-zaman boyutları veya yeni parçacıklar ve etkileşimler içeren çeşitli Standart Model Ötesi (BSM) fizik modellerinin geliştirilmesine yol açmıştır (Mohapatra & Pal, 2004). SM, bilinen temel parçacıkları ve üç temel kuvveti büyük bir başarıyla tanımlasa da, kütleçekimini içermez ve nötrino kütleleri, karanlık madde ve karanlık enerji gibi gözlemsel olguları açıklayamaz. Nötrino kütlelerinin varlığı, SM Lagrangian'ına basitçe bir kütle terimi eklenerek çözülemez (en azından Higgs mekanizması yoluyla bilinen şekilde değil, çünkü sağ-kiral nötrinoları gerektirir). Bu durum, daha temel bir teorinin varlığına işaret eder.

Nötrinoların SM'deki temel etkileşimleri, beta bozunması gibi süreçlerle örneklendirilebilir. Denklem 9'da zayıf etkileşimlerin temel Feynman diyagramlarını göstererek nötrinoların SM içindeki rolünü somutlaştırır. Özellikle bu parçacıkların W bozonu aracılığıyla nasıl etkileştiğini göstermesi önemlidir. Yüklü akım (CC) etkileşimleri (W bozonu değişimi) lepton türünü korurken, yüksüz akım (NC) etkileşimleri (Z^0bozonu değişimi) lepton türünü değiştirmez. Bu ayrım, SNO deneyinin Güneş nötrino problemini çözmesinde kritik rol oynamıştır (Ahmad vd., 2002). Nötrino fiziği, bu nedenle, BSM fizik arayışlarında yeni bir pencere veya rehber rolü üstlenmektedir.

$$n \rightarrow p + e^- + \nu_e^- \qquad (9)$$

Burada, nötrino kavramının teorik olarak ortaya çıktığı nükleer süreci, Fermi kuramı yaklaşımıyla, temsil eder. Bir nötron, bir proton, bir elektron ve bir elektron antinötrinosuna bozunur (Griffiths, 2020).

2. Nötrino Salınımları ve Kütle Problemi

Nötrino salınımlarının keşfi, 20. yüzyılın sonları ve 21. yüzyılın başlarındaki parçacık fiziğinin en önemli buluşlarından biridir. Bu durum, nötrinoların kütleli olduğunu kanıtlamış ve Standart Model'in ötesinde yeni bulguların arayışlarına yeni bir bakış kazandırmıştır.

2.1. Nötrino Salınımlarının Kuramsal Temelleri

Nötrino salınımı, bir nötrinonun zayıf etkileşimlerde belirli bir türde (elektron nötrinosu, müon nötrinosu, tau nötrinosu) üretildikten sonra, uzay-zamanda yol alırken başka bir türe dönüşebilmesi olgusunu ifade eder. Bu dönüşüm, nötrinoların kütleleri ve kuantum mekaniksel doğaları arasındaki karmaşık ilişkiden kaynaklanır. Daha anlaşılır bir ifadeyle, nötrinolar iki farklı "kimlikle" var olurlar: tür öz durumu (flavor

eigenstate) ve kütle öz durumu (mass eigenstate). Bir nötrino, zayıf nükleer kuvvet aracılığıyla bir parçacık bozunmasında ortaya çıktığında, bu her zaman belirli bir tür öz durumundadır (ν_e, ν_μ, ν_τ). Bu, onun hangi lepton (elektron, müon veya tau) ile ilişkili olduğunu tanımlar. Ancak nötrino uzayda hareket ederken, bu tür durumu aslında farklı kütlelere sahip olan üç farklı kütle öz durumunun (ν_1, ν_2, ν_3) kuantum mekaniksel bir süperpozisyonu, yani bir çeşit karışımıdır. Her bir kütle öz durumu, uzay-zamanda farklı bir hızla ilerler. Bu durum, başlangıçta belirli bir türde üretilen nötrinonun, yolculuğu sırasında kütle durumlarının fazlarının değişmesine ve farklı bir tür karışımına dönüşmesine neden olur. Dolayısıyla, bir deneyde müon nötrinosu olarak üretilen bir nötrino, daha uzaktaki bir dedektöre ulaştığında tau nötrinosu veya elektron nötrinosu olarak tespit edilebilir. Bu salınım olgusunun teorik temelleri, ilk olarak Bruno Pontecorvo'nun (1957) nötrino-antinötrino salınımları üzerine yaptığı çalışmalarla atılmıştır. Daha sonra Ziro Maki ve çalışma arkadaşları (1962), bu fikri farklı nötrino türleri arasındaki salınımları içerecek şekilde geliştirerek, tür ve kütle öz durumları arasındaki bu karışım ilişkisini matematiksel bir çerçeveye oturtmuşlardır. Bu dönüşüm, yalnızca nötrinoların kütleli olması ve bu kütle öz durumlarından en az ikisinin farklı kütle değerlerine sahip olması durumunda mümkündür. Bu nedenle nötrino salınımlarının gözlemlenmesi, nötrinoların kütlesi olduğunun doğrudan bir kanıtıdır. (Pontecorvo, 1958; Maki vd., 1962)

Tür öz durumları ile kütle öz durumları arasındaki ilişki, Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata (PMNS) matrisi adı verilen 3×3 boyutunda üniter bir matris (U_{PMNS} veya kısaca U) ile tanımlanır;

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{k=1}^{3} U_{\alpha k}^{*} \, |\nu_k\rangle \qquad (10)$$

Burada tür öz durumu, $|\nu_\alpha\rangle;\ \alpha = e, \mu, \tau$ ve kütle öz durumu $|\nu_k\rangle\ ;\ k = 1, 2, 3$ ile ifade edilmiştir. $U_{\alpha k}$ Elemanları ise k, kütle öz durumunun α, tür öz durumuna olan genliğini temsil eder.

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 1} & U_{\mu 1} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 1} & U_{\tau 1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \qquad (11)$$

Burada PMNS matrisi üniterdir, bu da toplam olasılığın korunmasını sağlar. Üç nesil nötrino için PMNS matrisi, üç karışım açısı (θ_{12}, θ_{23}, θ_{13}) ve bir CP (yük-parite) ihlal eden Dirac fazı (δ_{CP}) ile parametrize edilir. Eğer nötrinolar Majorana parçacıkları ise (kendi karşıt parçacıkları olması durumu), PMNS matrisinde iki ek Majorana fazı daha bulunur ancak bu Majorana fazları nötrino salınım olasılıklarını etkilemez, sadece lepton sayısını ihlal eden süreçlerde etki eder (Maki vd., 1962; Navas vd., 2024).

Navas ve arkadaşları tarafından kullanılan PMNS matrisinin standart parametrizasyonu şu şekildedir:

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\alpha_1/2} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad (12)$$

Burada $c_{ij} = cos(\theta_{ij})$ ve $s_{ij} = sin(\theta_{ij})$ olup, θ_{12} "güneş açısı", θ_{23} "atmosferik açı" ve θ_{13} "reaktör açısı" dır. δ_{CP}, Dirac CP-ihlali fazıdır. En sağdaki matris, Majorana fazlarını içerir ve sadece nötrinolar Majorana parçacıkları ise fizikseldir (geçerlidir); salınım hesaplamalarında genellikle ihmal edilir. PMNS matrisinin üniterliği, toplam olasılığın 1 olmasını sağlar. Kuark alanındaki CKM matrisindeki açılar genellikle küçüktür, bu da nesiller arası karışımın zayıf olduğunu gösterir. Nötrinolarda ise θ_{12} ve θ_{23} oldukça büyüktür, θ_{13} ise daha küçük ama sıfırdan farklıdır (Abe vd., 2021; Navas vd., 2024).

2.2. Salınım Olasılığı

Bir nötrino, belirli bir tür öz durumu ($|\nu_\alpha\rangle$) olarak üretildikten sonra, kütle öz durumlarının ($|\nu_k\rangle$) bir süperpozisyonu olarak yayılır. Kuantum mekaniğine göre, her bir kütle öz durumu, bir düzlem dalga olarak;

$$|\nu_k(t,x)\rangle = e^{-i(E_k t - p_k x)}|\nu_k(0)\rangle \quad (13)$$

şeklinde bir faza sahip olarak yayılır. Burada E_k enerji, p_k ise momentumdur. Nötrinoların neredeyse ışık hızında hareket ettiği ultra-rölativistik durumda ($E \gg m$), enerji $E \approx p + \frac{m_k^2}{2E}$ şeklinde yaklaştırılabilir. Doğal birimler ($\hbar = c = 1$) kullanıldığında ve nötrinonun katettiği mesafenin $L \approx t$ olduğu varsayıldığında, L mesafesi sonrası faz faktörü yaklaşık olarak:

$$e^{-i(E_k - p_k)L} \approx e^{-i\frac{m_k^2 L}{2E}} \quad (14)$$

olur (ħ=c=1 birimlerinde). Farklı kütle öz durumları($k = 1,2,3$) farklı kütlelere(m_k) sahip olduğundan, yayılırken aralarında bir faz farkı oluşur. Bu faz farkları, belirli bir L mesafesi ve E enerjisinde, başlangıçta α türünde olan bir nötrinonun β türünde bulunma olasılığının değişmesine, yani salınıma yol açar.

Başlangıçta saf bir $|\nu_\alpha\rangle$ durumunda olan bir nötrinonun, L mesafesini katettikten sonra $|\nu_\beta\rangle$ durumunda bulunma olasılığı (vakumda);

$$P(\nu_\alpha \to \nu_\beta; L, E) = \left| \sum_{k=1}^{3} U_{\beta k} e^{-i\frac{m_k^2 L}{2E}} U_{\alpha k}^* \right|^2 \quad (15)$$

denklemiyle verilir. Bu genel denklem, üç nötrino salınımlarını tanımlar. İki nötrino türü (ν_α, ν_β) arasındaki salınımları ele alan basitleştirilmiş bir durumda (örnek olarak, sadece iki kütle öz durumu ν_1, ν_2 ve tek bir karışım açısı θ varsayıldığında), $\nu_\alpha \to \nu_\beta$ $(\alpha \neq \beta)$ dönüşüm olasılığı;

$$P(\nu_\alpha \to \nu_\beta; L, E) = \sin^2(2\theta)\sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right) \quad (16)$$

Şekilde ifade edilir. Burada $\Delta m^2 = {m_2}^2 - {m_1}^2$ kütle kareleri farkıdır. $\nu_\alpha \to \nu_\alpha$ olasılığı, yani nötrinonun kendi türünde kalma olasılığı, "hayatta kalma olasılığı" olarak adlandırılır. Bu olasılık $P(\nu_\alpha \to \nu_\alpha) = 1 - P(\nu_\alpha \to \nu_\beta)$ ile hesaplanır.1 − $P(\nu_\alpha \to \nu_\beta)$ olur. Standart olarak kullanılan birimlerle (L kilometre, E GeV, Δm^2 eV^2 cinsinden alındığında) salınım argümanı, yani sinüs fonksiyonunun içindeki ifade genellikle;

$$\frac{\Delta m^2 L}{4E} \approx 1.267 \frac{\Delta m^2[\mathrm{eV}^2] L[\mathrm{km}]}{E[\mathrm{GeV}]} \quad (17)$$

şeklinde yazılır. Bu sonuçlar, salınımların varlığı için iki kritik koşulun gerekliliğini matematiksel olarak gösterir: İlki tür ve kütle öz durumları arasında bir karışım olmalı ($\theta \neq 0$), ikinici olarak en az iki nötrinonun kütlesi farklı olması ($\Delta m^2 \neq 0$) gerektiğini gösterir. Nötrinolar maddeden geçerken, elektronlarla olan koherent ileri saçılmaları nedeniyle etkin potansiyelleri değişir. Bu etki, Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein (MSW) etkisi olarak bilinir ve özellikle elektron nötrinoları için önemlidir (Wolfenstein, 1978; Mikheyev & Smirnov, 1985). Bu ek potansiyel, salınım olasılıklarını, özellikle Güneş'in merkezi, süpernovalar gibi yoğun ortamlarda önemli ölçüde değiştirebilmektedir (Bahcall & Davis, 1976).

2.3. Deneysel Kanıtlar ve Parametre Ölçümleri

Nötrino salınımlarının varlığı ve PMNS matrisinin parametreleri, farklı kaynaklardan (Güneş, atmosfer, nükleer reaktörler, parçacık hızlandırıcıları) gelen nötrinoların incelendiği çok sayıda deneyle doğrulanmış ve ölçülmüştür. Bunlar arasında;

Güneş Nötrionları: Homestake deneyi (Bahcall & Davis, 1976), Super-Kamiokande (Fukuda vd., 1998) ve SNO (Ahmad vd., 2002) gibi deneyler, Güneş'ten gelen ν_e akısındaki azalmayı ve $\nu_e \to \nu_{\mu,\tau}$ dönüşümünü kanıtlamıştır.

Reaktör Nötrinoları: Super-Kamiokande ve IceCube/DeepCore gibi deneyler, $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ salınımlarını kanıtlamıştır.

Atmosferik Nötrinolar: KamLAND (Eguchi vd., 2003), Daya Bay, RENO ve Double Chooz gibi deneyler, θ_{12}, $\Delta m^2{}_{21}$, ve θ_{13} parametrelerini ölçmüştür.

Hızlandırıcı Nötrinoları: T2K ve NOvA gibi deneyler, θ_{23}, $|\Delta m^2{}_{32}|$, θ_{13} ve δ_{CP} ile kütle hiyerarşisi hakkında bilgi sağlamaktadır (Ajmi, 2024; Abe vd.,2021).

PMNS matrisi parametrelerinin güncel değerlerinde (bkz. Tablo 2) bazı parametreler ortalama değerler sunarken, bazı ayrıntılı aralıklar verir. δ_{CP} değeri için T2K ve NOvA sonuçları arasında hala bir miktar fark bulunmaktadır (Ajmi, 2024; Abe vd.,2021).

Tablo 2. PMNS Matrisi Parametrelerinin Güncel Değerleri (Navas vd., 2024; Esteban vd., 2020).
Table 2. *Current Values of PMNS Matrix Parameters*

Parametre	Normal Hiyerarşide En İyi Uyum Değeri (NH)	Ters Hiyerarşide En İyi Uyum Değeri (IH)	3σ Aralığı (NH)	3σ Aralığı (IH)
$\sin^2(\theta_{12})$	0.307	0.307	0.269 − 0.343	0.269 − 0.343
$\boldsymbol{\Delta m^2_{21}}$ [10^{-5} eV^2]	7.53	7.53	6.82 − 8.04	6.82 − 8.04
$\sin^2(\theta_{23})$	0.558	0.553	0.403 − 0.618)	0.408 − 0.621
$\boldsymbol{\Delta m^2_{3\ell}}$ [10^{-3} eV^2]	+2.455 ($\Delta m^2{}_{32}$)	-2.529 ($\Delta m^2{}_{32}$)	-	-
$\sin^2(\theta_{13})$	0.0219	0.0219	0.02034 − 0.02410	0.02032 − 0.02408
$\boldsymbol{\delta_{CP}}$ [derece]	215° (1.19π rad)	215° (1.19π rad)	132° − 355°	183° − 350°

2.4. Kütleli Nötrinolar ve Standart Model Dışı Fiziğe Açılan Kapı

Nötrino salınımlarının deneysel olarak kanıtlanması, nötrinoların kütlesi olduğunu kesin olarak göstermiştir. Bu bulgu, SM' nin eksik veya tamamlanmamış olduğunun ilk kesin kanıtıdır (Kayser, 2003). SM, nötrinoları kütlesiz parçacıklar olarak tanımlar. Dolayısıyla, bu kütlelerin varlığı, doğada Standart Model'in ötesinde (Beyond the Standard Model-BSM) yeni bir yaklaşımın olması gerektiğini gösterir. Burada cevaplanması gereken temel soru, nötrinoların kütlesi neden sıfır değil ve diğer temel parçacıklara (elektron, kuarklar vb.) kıyasla neden bu kadar küçük olduğudur. Örneğin, en hafif yüklü parçacık olan elektronun kütlesi yaklaşık 511,000 eV iken, nötrino kütlelerinin üst sınırı 1 eV'den daha azdır. Nötrino kütlelerinin bu "anormal" küçüklüğü, yeni fizik modelleri için en önemli yol göstericilerden biri haline gelmiştir.

Standart Model'de parçacıklar, Higgs mekanizması aracılığıyla kütle kazanır. Ancak bu mekanizmayı nötrinolara doğrudan uygulamak, gözlemlenen aşırı küçük kütleleri doğal bir şekilde açıklayamaz. Bu noktada, "etkin operatörler" kullanarak yeni bir çözümler önerilmiştr. Bu çözümlerden en bilineni, Weinberg operatörü olarak adlandırılan ve "Tahterevalli (Seesaw) Mekanizması" adı verilen bir kavrama yol açan yaklaşımdır. (bkz. Denklem 18) Bu yaklaşım, bildiğimiz düşük enerjili SM etkileşimlerinin, aslında çok daha yüksek bir enerji ölçeğinde (Λ) geçerli olan daha temel bir teorinin sadece bir yansıması olduğunu varsayar. Weinberg operatörü, bu yeni ve bilinmeyen yüksek enerji fiziğinin düşük enerjideki etkisini tanımlayan matematiksel bir ifadedir.

$$\mathcal{L}_W = \frac{c_{\alpha\beta}}{\Lambda}(L_\alpha H)\big(L_\beta H\big) + \text{h.c.} \qquad (18)$$

Burada; L_α ve L_β, nötrinoyu içeren SM'nin sol-elli lepton çiftleridir. H, kütle kazandıran Higgs alanıdır. Λ, Standart Model'in geçerliliğini yitirdiği büyük bir enerji ölçeğini temsil eder. $c_{\alpha\beta}$ ise bir katsayı matrisidir.

Denklem 18, Higgs alanı "vakum beklenen değeri"ni aldığında ($\langle H\rangle = v/\sqrt{2}$, burada v≈246 GeV'lik bilinen elektrozayıf enerji ölçeğidir);

$$m_\nu \sim \frac{cv^2}{\Lambda} \qquad (19)$$

doğrudan nötrinolar için bir kütle terimine dönüşür. Burada denklemin pay kısmında bildiğimiz ve görece küçük olan elektrozayıf ölçeğin karesi (v^2), paydada ise varsayımsal, bilinmeyen ve çok büyük olan yeni bir ölçek (Λ) yer alır. Eğer Λ değeri, örneğin Büyük Birleşik Teori (Grand Unified Theory - GUT) ölçeği gibi devasa bir değerdeyse (yaklaşık olarak 10^{15} GeV), ortaya çıkan nötrino kütlesi (m_ν) çok küçük olur. Bu mekanizma, bir tahterevallinin bir ucuna çok ağır bir kütle (Λ) koyduğunuzda, diğer ucundaki kütlenin (m_ν) ne kadar yukarı fırlayacağını gösterir. (Mohapatra & Smirnov, 2006). Bu durum, nötrino kütlelerinin neden küçük olduğunu "tahterevalli" analojisiyle açıklar.
Sonuç olarak, nötrino kütlelerinin varlığı ve küçüklüğü, bizi doğrudan SM'nin çok ötesindeki enerji ölçeklerinde var olan yeni parçacıkların ve etkileşimlerin varlığına dair kanıt sunmaktadır. Bu nedenle, kütleli nötrinolar, modern parçacık fiziğinde yeni ufuklara açılan en önemli kapılardan biri olarak görülmektedir (King, 2025).

2.5. Seesaw (Tahterevalli) Mekanizması

1998 yılında Super-Kamiokande deneyiyle ortaya konulan nötrino salınımları, nötrinoların kütleli olduğunu doğrudan göstermiştir. Fakat Higgs mekanizması, yalnızca sağ elli fermiyonların varlığında fermiyonlara kütle kazandırabilir. SM'nin bu eksikliği, teorik genişletmelerin gerekliliğini ortaya koymuştur.

Seesaw mekanizması (özellikle Tip I seesaw), bu sorunu çözmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu mekanizmada, çok ağır sağ elli nötrinolar modele dahil edilir. Bu yeni parçacıklar, Majorana kütle terimleri aracılığıyla nötrinoların çok küçük ama sıfır olmayan kütleler kazanmasına neden olur. Seesaw ilişkisi genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$m_\nu \approx \frac{v^2}{M_R} \tag{20}$$

Burada v Higgs alanının beklenen değeridir (yaklaşık 246 GeV), M_R ise sağ elli nötrinonun büyük Majorana kütlesidir (Minkowski, 1977). Sonuç olarak Nötrinoların küçük kütlelerini açıklamak için en popüler mekanizma "seesaw" mekanizmasıdır. Bu mekanizma, aktif nötrinoların kütlelerinin, SM'ye eklenen çok ağır yeni varsayımsal parçacıkların kütleleriyle ters orantılı olduğunu öne sürer (Mohapatra & Senjanović, 1980).

Tip I Seesaw: SM'ye çok ağır sağ-elli Majorana nötrinoları (N_R) eklenir. Aktif nötrino kütle matrisi,

$$m_{\text{light}} \approx -m_D M_R^{-1} m_D^T \tag{21}$$

olur. $M_R \gg m_D$ ise m_{light} küçük olur (King, 2025; Ma, 2006). Bu model, en basit ve en yaygın kabul gören seesaw türüdür.

Tip II Seesaw: SM'ye yeni bir skaler $\text{SU}(2)_L$ Higgs tripleti (Δ) eklenir. Nötrino kütlesi,

$$m_\upsilon \approx y_\Delta \langle \Delta_0 \rangle \tag{22}$$

ile verilir ve $\langle \Delta_0 \rangle \approx \frac{\mu v^2}{M_\Delta^2}$ olduğundan, büyük M_Δ küçük m_υ anlamına gelir. Bu model, LHC gibi çarpıştırıcılarda test edilebilir yeni skaler parçacıklar öngörmektedir. (Mandal vd., 2022)

Tip III Seesaw: SM'ye fermiyonik $\text{SU}(2)_L$ tripletleri (Σ) eklenir ve Tip I'e benzer bir mekanizma işler. Bu tripletlerin nötr bileşenleri, ağır Majorana nötrinoları gibi davranarak hafif aktif nötrino kütleleri üretir (King, 2025).

Seesaw mekanizmalarının önemli bir sonucu, yalnızca nötrino kütlelerinin kökenini açıklamakla kalmayıp, aynı zamanda evrenin gözlemlenen madde-antimadde asimetrisine de bir çözüm sunabilmesidir. Bu bağlantı, leptogenez adı verilen teorik bir süreç üzerinden kurulur (Fukugita & Yanagida, 1986). Leptogenez, "leptonların doğuşu" anlamına gelir ve evrenin başlangıcında leptonlar (elektron, nötrino vb.) ile antileptonlar arasında net bir fazlalık oluşması sürecini ifade eder. Bu lepton fazlalığı, daha sonra standart elektrozayıf teorideki "sfaleron" süreçleri aracılığıyla, bugün gözlemlenen baryon asimetrisine dönüştürülmüştür (Kuzmin, Rubakov, & Shaposhnikov, 1985). Sonuç olarak, Seesaw mekanizması birçok

süreci mümkün kılmaktadır. Dolayısıyla nötrino kütlelerini açıklamak için önerilen aynı fiziksel mekanizma, evrendeki maddenin kökenini de doğal bir şekilde açıklama potansiyeli taşımaktadır.

2.6. Nötrino Kütle Hiyerarşisi Problemi: Normal mi Ters mi?

Nötrino salınım deneyleri, nötrinoların kütleleri arasındaki farkları büyük bir hassasiyetle ölçmüş olsa da bu kütlelerin mutlak sıralaması henüz kesin olarak bilinmemektedir. Bu durum, modern parçacık fiziğinin en temel sorularından birini oluşturur ve nötrino kütle hiyerarşisi problemi olarak adlandırılır. Problem, kütle öz durumlarının (m^1, m^2, m^3) sıralamasının nasıl olduğuyla ilgilidir. Salınım verileri, $\Delta m^2_{21} = m^2_2 - m^2_1$ farkının küçük ve pozitif olduğunu, yani m^2'nin m^1'den biraz daha ağır olduğunu göstermektedir. Ancak m^3 kütlesinin bu ikiliye göre konumu belirsizdir. Bu belirsizlik iki olası duruma yol açmıştır:

Normal Hiyerarşi (Normal Hierarchy - NH): Bu durumda m^3 en ağır kütle durumudur ve sıralama $m_1 < m_2 < m_3$ şeklindedir. Yapı, birbirine yakın kütleli iki hafif durum ve onlardan ayrık daha ağır bir durumdan oluşur.

Ters Hiyerarşi (Inverted Hierarchy - IH): Bu durumda ise m^3 en hafif kütle durumudur ve sıralama $m_3 < m_1 < m_2$ şeklindedir. Bu yapı da tek bir hafif durum ve birbirine yakın kütleli iki ağır durumdan meydana gelir.

Bu iki hiyerarşiden hangisinin doğru olduğunu belirlemek, nötrinoların madde içinden geçerken gösterdikleri davranış farklılıklarını (MSW etkisi) ölçmeye dayalıdır. Bu amaçla, uzun baz uzunluklu hızlandırıcı deneyleri (T2K, NOvA, DUNE), atmosferik nötrino deneyleri (Super-K, IceCube-Upgrade/PINGU, Hyper-K, ORCA) ve orta baz uzunluklu reaktör deneyleri (JUNO) gibi farklı stratejiler kullanan deneyler yürütülmektedir.

Mevcut küresel veri analizleri, NH lehine istatistiksel olarak anlamlı ancak henüz keşif düzeyinde olmayan bir tercih (yaklaşık 2-3σ) göstermektedir. Bu nedenle IH olasılığı kesin olarak dışlanmamıştır (Smirnov, 2013; Qian vd., 2015; Esteban vd., 2020; Ajmi, 2024; Parke vd., 2025). Gelecek nesil deneylerin, özellikle DUNE ve Hyper-K'nin, bu konuda kesin bir sonuca ulaşarak hiyerarşi problemini çözmesi beklenmektedir (Ge vd., 2025).

3. Astrofiziksel Nötrinolar

3.1. Güneş Nötrinoları

Güneş, merkezindeki proton-proton (pp) zinciri ve CNO çevrimi gibi nükleer füzyon reaksiyonları yoluyla büyük ölçekli bir elektron nötrinosu (ν_e) akısı üretir. Standart Güneş Modeli (SSM), bu reaksiyonların oranlarını ve dolayısıyla Dünya'ya ulaşması beklenen ve akısını hassas bir şekilde öngörmektedir. Ancak, 1960'larda başlayan ve Raymond Davis Jr.'ın öncülük ettiği Homestake deneyi, SSM'nin öngördüğü akının yaklaşık üçte birini ölçebilmiştir (Bahcall & Davis, 1976). Öngörülen ve ölçülen akı arasındaki bu belirgin tutarsızlık, parçacık fiziği ve astrofizik alanında on yıllarca süren ve "Güneş Nötrino Problemi" olarak bilinen bir durumu ortaya çıkarmıştır. Bu problemin çözümü, nötrino salınımları hipoteziyle mümkün olmuştur. Çözümün nihai ve doğrudan kanıtı ise SNO (Sudbury Neutrino Observatory) deneyiyle sağlanmıştır. SNO deneyi, ağır su (D_2O) kullanarak Güneş'ten gelen nötrinoları üç farklı reaksiyon kanalıyla tespit etme yeteneğine sahipti. Bunlar;
Yüklü Akım (Charged Current - CC): Sadece ve türüne duyarlı olan bu kanal, Dünya'ya ulaşan elektron nötrinosu akısını ölçtü.
Nötral Akım (Neutral Current - NC): Her üç nötrino türüne de (ν_e, ν_μ, ν_τ) eşit derecede duyarlı olan bu kanal, Güneş'ten gelen toplam nötrino akısını ölçtü.
Elastik Saçılma (Elastic Scattering - ES): Ağırlıklı olarak ν_e' ye duyarlı olmakla birlikte diğer türlere de kısmi hassasiyeti olan bir kanal.
SNO'nun ölçümleri, CC kanalıyla ölçülen ve akısının SSM beklentilerinden düşük olduğunu, ancak NC kanalıyla ölçülen toplam nötrino akısının SSM'nin öngörüleriyle mükemmel bir uyum içinde olduğunu göstermiştir (Ahmad vd., 2002). Bu, kaybolan elektron nötrinolarının aslında kaybolmadığını, Güneş'in yoğun maddesinden geçerken MSW etkisiyle güçlenen salınımlar sonucu diğer türlere dönüştüğünü kesin

olarak kanıtlamıştır. Super-Kamiokande deneyi de Güneş nötrinolarının elastik saçılma gözlemleriyle bu çözüme önemli katkılarda bulunmuştur (Bellerive vd., 2016).

3.2. SN1987A Süpernova Nötrino Gözlemi

23 Şubat 1987'de, Güneş Sistemi dışındaki bir kaynaktan gelen ilk ve şimdiye kadarki tek nötrino gözlemi gerçekleştirildi. Samanyolu'nun uydu galaksisi olan Büyük Macellan Bulutu'nda meydana gelen SN1987A süpernovasından yayılan ve çoğunluğu elektron antinötrinosu olan yaklaşık 20-25 nötrino, birbirinden bağımsız üç ayrı dedektör (Kamiokande-II, IMB ve Baksan) tarafından yaklaşık 13 saniyelik bir zaman dilimi içinde tespit edildi. Bu gözlemin en dikkat çekici yönlerinden biri, nötrino sinyalinin, süpernovanın optik olarak gözlemlenebilir hale gelmesinden yaklaşık üç saat önce Dünya'ya ulaşmasıydı (Arnett vd., 1989). Bu zaman farkı, çekirdek çökmesi teorisinin öngörüleriyle bir uyum içindedir. Teoriye göre, bir yıldızın çekirdeği çöktüğünde, açığa çıkan kütleçekimsel bağlanma enerjisinin %99'u nötrinolar aracılığıyla salınır. Zayıf etkileşen bu nötrinolar, çöken çekirdekten neredeyse anında kaçarken, fotonlar süpernovanın genişleyen ve opak (yoğun) olan dış zarfında hapsolur ancak saatler sonra yüzeye ulaşıp serbest kalabilirler (Pelaggi vd., 2017). Bu gözlem, çekirdek çökmesiyle süpernova patlaması modellerini doğrulamış, nötrino kütlesi ve diğer özellikleri üzerine önemli sınırlar getirmiş ve yıldızların yaşamlarının son anlarına dair yeni bir pencere açmıştır.

3.3. Kozmik Nötrino Arka Planı (CνB veya CNB)

Evrenin erken dönemlerindeki aşırı sıcak ve yoğun ortamda, sıcaklık genellikle parçacıkların ortalama enerjisini ifade eden enerji birimleriyle (elektron-volt, eV) tanımlanır. Büyük Patlama'dan yaklaşık 1 saniye sonra, evrenin ortalama parçacık enerjisi yaklaşık 1 Mega-elektron-volt'a (MeV) düştüğünde (bu, 10 milyar Kelvin'den daha yüksek bir sıcaklığa denktir), nötrinolar diğer parçacıklarla etkileşmeyi bırakarak serbest kalmıştır. Bu olayla oluşan ve o andan beri evrende serbestçe yayılan bu nötrinolara Kozmik Nötrino Arka Planı (Cosmic Neutrino Background - CνB) denir. Evrenin genişlemesiyle soğuyan bu nötrinoların bugünkü sıcaklıklarının ~1.95 K ve her bir aktif tür için sayı yoğunluğunun ~112 cm^{-3} olduğu tahmin edilmektedir (Scott, 2024). CνB'nin doğrudan tespiti mevcut teknolojiyle son derece zor olsa da varlığına dair güçlü dolaylı kanıtlar mevcuttur. Büyük Patlama Nükleosentezi (BBN) sırasında hafif elementlerin oluşum oranları ve Kozmik Mikrodalga Arka Planı (CMB) anizotropileri (örneğin Planck uydusu verileri), CνB'nin varlığı ve öngörülen özellikleriyle tutarlıdır. Bu kozmolojik gözlemler, CνB'nin evrenin yapısının oluşumundaki kütleçekimsel etkisi sayesinde, üç aktif nötrino türünün kütlelerinin toplamı (Σm_ν) üzerine de güçlü sınırlar koymaktadır. En güncel verilerin birleşik analizi, bu toplam kütlenin %95 güvenilirlik seviyesinde $\Sigma m_\nu < 0.072\ eV/c^2$ olduğunu göstermektedir (Adame vd., 2025; Naredo-Tuero vd., 2024). Ayrıca gelecekte ise, PTOLEMY (Princeton Tritium Observatory for Light, Early-universe, Massive-neutrino Yield) gibi tasarlanan deneyler, trityum beta bozunmasını hassas bir şekilde ölçerek CνB'yi doğrudan tespit etme gibi bir hedefi amaçlamaktadır (Hernandez-Molinero vd., 2025).

3.4. Diğer Astrofiziksel Nötrino Üretim Mekanizmaları

Güneş ve süpernovaların yanı sıra, nötrino fiziği ve astronomisi için temel öneme sahip başka astrofiziksel nötrino üretim mekanizmaları da mevcuttur. Bunlar:

Atmosferik Nötrinolar: Bu nötrinolar, birincil kozmik ışınların (çoğunlukla protonlar ve atom çekirdekleri) Dünya atmosferinin üst katmanlarındaki atom çekirdekleriyle çarpışması sonucu oluşan parçacık saçılmalarından doğar. Bu etkileşimler, kısa ömürlü pion ve kaon gibi mezonlar üretir. Bu mezonların ve ardından onların bozunma ürünü olan müonların zincirleme bozunmaları, tüm türleri içeren bir nötrino akısı oluşturur. Atmosferik nötrinoların gözlemlenmesi, nötrino salınımlarının ilk kesin kanıtını sunmuştur. Super-Kamiokande deneyi, farklı yönlerden gelen nötrino akılarını karşılaştırarak, özellikle $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ salınım kanalını keşfetmiş ve bu buluşla "atmosferik nötrino anomalisini" çözmüştür (Fukuda vd., 1998).

Yüksek Enerjili Astrofiziksel Nötrinolar: Bunlar, enerjileri TeV (Tera-elektron-volt) ile PeV (Peta-elektron-volt) ve ötesine uzanan, evrenin en şiddetli olaylarında üretilen nötrinolardır. Kaynakları arasında Aktif Galaktik Çekirdekler (AGN), blazarlar, gama ışını patlamaları (GRB) ve yıldız oluşum galaksileri gibi çok yüksek enerjili ortamlar bulunmaktadır. Yüksüz ve zayıf etkileşen parçacıklar oldukları için, manyetik alanlardan

sapmadan ve madde tarafından soğurulmadan kozmolojik mesafeleri kat edebilirler. Bu özellikleri sayesinde, geldikleri kaynaklara dair doğrudan bilgi taşıyarak nötrino astronomisi adı verilen yeni bir alan açmışlardır. IceCube Nötrino Gözlemevi, bu dağınık kozmik nötrino akısını ilk kez tespit eden ve kaynaklarıyla ilgili ipuçları sunan öncü deneydir (IceCube Collaboration, 2013).

Jeo-nötrinolar (Geoneutrinos): Dünya'nın kabuğunda ve mantosunda bulunan, uzun ömürlü radyoaktif izotopların (başlıca Uranyum-238 ve Toryum-232 zincirleri) beta bozunmalarından kaynaklanan elektron antinötrinolardır. Bu nötrinolar, gezegenimizin iç yapısı ve kimyasal bileşimi hakkında doğrudan bilgi sağlar. KamLAND ve Borexino gibi deneyler tarafından tespit edilmiştir. (Fiorentini vd., 2007)

Hızlandırıcılarda Üretilen Nötrinolar: T2K, NOvA gibi deneylerde salınım parametrelerini hassas bir şekilde ölçmek ve nötrino etkileşimlerini incelemek için kontrollü nötrino demetleri kullanılmıştır (Ajmi, 2024).

4. Yüksek Enerjili Nötrinolar ve Çoklu-Mesajcı (Multi-Messenger) Astrofizik

4.1. IceCube ve Benzeri Dedektörler

IceCube, Güney Kutbu'ndaki Antarktika buz tabakasının derinliklerine yerleştirilmiş, yaklaşık 1 km³ hacimli bir Çerenkov dedektörüdür. Yüksek enerjili bir nötrino buzla etkileştiğinde oluşan yüklü parçacıkların (müon, elektron, tau veya hadronik sağanaklar) yaydığı Çerenkov ışığını, binlerce optik sensör (DOM) aracılığıyla tespit etmektedir. Olaylar, genellikle iyi yön çözünürlüğü sağlayan "track" (iz) olayları (çoğunlukla ν_μ kaynaklı) ve iyi enerji çözünürlüğü sağlayan "cascade" (sağanak) olayları (çoğunlukla $\nu_e \upsilon_\tau$ ve tüm türlerin yüksüz akım etkileşimlerinden) olarak sınıflandırılırmıştır. IceCube, 2013 yılında Güneş Sistemi dışından gelen, TeV-PeV enerjili bir astrofiziksel nötrino akısı keşfederek yüksek enerjili nötrino astrofiziği çağını başlatmıştır (Halzen, 2024). Akdeniz'deki KM3NeT ve Baykal Gölü'ndeki Baikal-GVD gibi diğer büyük hacimli nötrino teleskopları da bu alanda önemli katkılar sunmaktadır.

4.2. Yüksek Enerjili Nötrino Kaynakları

Yüksek enerjili astrofiziksel nötrinoların üretimi için temel mekanizma, astrofiziksel ortamlarda çok yüksek enerjilere hızlandırılmış protonların (kozmik ışınlar) çevredeki madde (p-p etkileşimleri) veya foton alanları (p-γ etkileşimleri) ile etkileşerek pionlar üretmesi ve bu pionların bozunmasıdır (Murase vd, 2020). Bu süreçler aynı zamanda yüksek enerjili gama ışınları da üretir. Potansiyel kaynakları ise şunlardır:

Aktif Galaksi Çekirdekleri (AGN) ve Blazarlar: Merkezlerinde süper kütleli kara delikler bulunan ve güçlü jetler fırlatan bu nesneler, özellikle jetleri Dünya'ya yönelik olan blazarlar, önemli nötrino kaynağı adaylarıdır. 22 Eylül 2017'de IceCube tarafından tespit edilen ~290 TeV enerjili IceCube-170922A nötrinosu, gama ışını parlaması gösteren TXS 0506+056 blazarıyla ilişkilendirilmiştir (Aartsen vd., 2018a; Aartsen vd., 2018b). Bu, bir blazarın yüksek enerjili nötrino kaynağı olduğuna dair ilk güçlü multi-messenger kanıtıydı.

Gama Işını Patlamaları (GRB): Evrendeki en güçlü patlamalar olan GRB'lerin ultra-göreli jetlerinde nötrino üretimi beklenir, ancak bugüne kadar kesin bir ilişkilendirme yapılamamıştır (Murase vd, 2020).

Nötron Yıldızı Birleşmeleri: Nötron yıldızı birleşmeleri, evrendeki en şiddetli olaylar arasında yer alır ve kütleçekimsel dalgaların yanı sıra yüksek enerjili nötrinolar için de güçlü birer kaynak adayı olarak kabul edilirler. Tarihi bir olay olan GW170817 nötron yıldızı birleşmesi sırasında, IceCube ve ANTARES gibi büyük nötrino gözlemevleri bu olaydan gelebilecek bir sinyali aramış, ancak istatistiksel olarak anlamlı bir nötrino tespiti yapılamamıştır. Bu sonuç, bu tür birleşmelerdeki nötrino emisyon mekanizmalarının ve enerjilerinin üst sınırları hakkında önemli bilgiler sağlamıştır (Albert vd., 2017).

Yıldız Patlaması Galaksileri ve Saklı Kaynaklar: Yoğun gazla etkileşen kozmik ışınlar dağınık bir nötrino akısı üretebilir. Yani bu galaksilerdeki yoğun yıldız oluşum faaliyetleri, yüksek miktarda kozmik ışın üretir. Bu kozmik ışınların, galaksinin yoğun gaz ve toz ortamıyla etkileşime girmesi (özellikle proton-proton çarpışmaları), pion adı verilen parçacıkların ve ardından bu parçacıkların bozunmasıyla nötrinoların oluştuğu bir mekanizma sunar. Evrendeki tüm bu "saklı" kaynaklardan gelen nötrinoların birleşerek, gözlemlenen

dağınık astrofiziksel nötrino akısının önemli bir kısmını oluşturabileceği teorisi, güncel araştırmalarda güçlü bir hipotez olarak test edilmektedir (Murase vd., 2013).

4.3. Nötrino + Foton + Kütleçekimsel Dalga Korelasyonları (Multi-Messenger Astrofizik)

Çoklu-mesajcı astrofizik (multi-messenger astrophysics), aynı astrofiziksel kaynaktan yayılan farklı kozmik mesajcıları (elektromanyetik dalgalar, nötrinolar, kütleçekimsel dalgalar ve kozmik ışınlar) birleştirerek evreni bütüncül bir yaklaşımla inceler. Her bir mesajcı, kaynağın farklı bir fiziksel yönü hakkında bilgiler taşımaktadır:

Kütleçekimsel Dalgalar: Birleşen kara delikler veya nötron yıldızları gibi olayların merkezindeki "motoru", yani kütle-enerjinin dinamik hareketini ve uzay-zamanın bükülmesini ortaya çıkarır.
Nötrinolar: Yoğun ve opak ortamlardan neredeyse hiç etkileşmedikleri için, bir süpernovanın çöken çekirdeği veya birleşen nötron yıldızlarının etrafındaki disk gibi, ışığın kaçamadığı bölgelerdeki nükleer süreçler ve temel parçacık etkileşimleri hakkında doğrudan bilgi sunar.

Fotonlar (Elektromanyetik Dalgalar): Patlamadan kaynaklanan enkazın çevredeki ortamla etkileşimini, element sentezini ve şok dalgalarını görmemizi sağlar.

Bu alandaki ilk başarılar, bir nötrino sinyalinin (SN1987A) veya yüksek enerjili bir nötrinonun (TXS 0506+056 olayı) elektromanyetik gözlemlerle ilişkilendirildiği nötrino-foton korelasyonları olmuştur. Ancak çoklu-mesajcı çağını başlatan en büyük gelişme, kütleçekimsel dalga-foton korelasyonunun keşfiyle yaşanmıştır. 17 Ağustos 2017'de gözlemlenen GW170817 olayı, iki nötron yıldızının birleşmesinden kaynaklanan kütleçekimsel dalgaların LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) tarafından tespit edilmesinin hemen ardından, bu olayın bir kısa gama ışını patlamasından (GRB) bir kilonovaya (iki nötron yıldızının veya bir nötron yıldızı ile bir kara deliğin birleşmesi sonucu meydana gelen çok büyük bir patlama) kadar tüm elektromanyetik spektrumda takip edilmesiyle gerçekleşmiştir. Bu olay sırasında, IceCube ve ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental Research) gibi nötrino gözlemevleri de hemen kaynağı izlemiş fakat anlamlı bir nötrino sinyali tespit edilememiştir. Bu tespit edememe durumu bilimsel olarak anlamlıdır çünkü bu tür birleşmelerdeki nötrino emisyon mekanizmaları, jetlerin yapısı ve olaya bakış açımız hakkında önemli teorik kısıtlamalar getirmiştir (Abbott vd., 2017a; Abbott vd., 2017b).

Gelecekteki hedef, özellikle yakın bir galakside meydana gelecek bir çekirdek çökmesi süpernovasından veya bir nötron yıldızı birleşmesinden kaynaklanan üç mesajcıyı da (kütleçekimsel dalga + nötrino + foton) aynı anda tespit etmektir.SNEWS (SuperNova Early Warning System) ve AMON (Astrophysical Multimessenger Observatory Network) gibi küresel ağlar, dünya genelindeki farklı dedektörlerden gelen sinyalleri birleştirerek bu tür eş zamanlı gözlemleri mümkün kılmak ve koordine etmek için kurulmuştur (Razhkov vd., 2025).

4.4. Ekstragalaktik Nötrino Kökeni Araştırmaları

IceCube tarafından gözlemlenen yüksek enerjili (TeV-PeV) astrofiziksel nötrino akısının büyük ölçüde Samanyolu dışından (ekstragalaktik) kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu dağınık akının kesin kaynakları hala tam olarak bilinmemektedir. TXS 0506+056 gibi bireysel kaynaklar tanımlanmış olsa da, gözlemlenen toplam akının tamamını açıklamak için daha fazla kaynak veya farklı kaynak popülasyonları gerekebilir. Gelecek nesil nötrino teleskopları olan IceCube-Gen2 ve KM3NeT, bu araştırmalarda kritik rol oynayacaktır (Song vd., 2021).

5. Nötrino Fiziğinde Açık Sorular, Güncel Tartışmalar ve Gelecek Perspektifi

5.1. Nötrino Kütlesinin Doğası

Nötrinoların kütleli olduğu kesinleşmiş olsa da bu kütlenin doğası Dirac mı, yani kendisinden farklı bir karşıt parçacığa mı sahip, yoksa Majorana mı, yani kendi karşıt parçacığı mı hala bilinmemektedir. Bu soruyu yanıtlamanın yollarından biri, nötrinosuz çift beta bozunması ($0\nu\beta\beta$) adı verilen varsayımsal bir nükleer bozunma sürecini aramaktır.

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^{-} \quad (23)$$

Burada, lepton sayısını 2 birim ihlal eder ve yalnızca nötrinolar Majorana parçacıkları ise ve kütleleri varsa gerçekleşebilir. Gözlemlenmesi, lepton sayısı ihlalini, nötrinoların Majorana doğasını kanıtlayacak ve etkin Majorana nötrino kütlesi hakkında bilgi vermektedir.

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = \left| \sum_{i=1}^{3} U_{ei}^{2} m_i \right| \quad (24)$$

Bu, SM ötesi fiziğe dair önemli araştırma konularından biridir. Çünkü şu an için varsayımsal bir bozunma sürecidir fakat hala gözlemlebiridir. Çünkü değildir.Dünya çapında GERDA, Majorana Demonstrator, CUORE, EXO-200, KamLAND-Zen gibi deneyler bu bozunmayı aramış ve yarı ömür için $>10^{22}$ - 10^{26} yıl gibi alt sınırlar belirlemiştir. Gelecek nesil deneyler arasında LEGEND, nEXO, SuperNEMO ve SNO+ bulunmaktadır (bkz. Tablo 3). Mevcut deneyler, ters hiyerarşi durumunda beklenen $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ değerlerine ulaşmaya başlamıştır, ancak henüz bir sinyal gözlemlenmemiştir (Cardani, 2019; Dolinski vd., 2019;JINR News, 2024; Abgrall vd., 2025).

Tablo 3. Başlıca Nötrinosuz Çift Beta Bozunması (0νββ) Deneyleri ve Güncel Yarı Ömür Limitleri (%90 C.L.) (Dolinski vd., 2019; Abgrall vd., 2025; JINR News, 2024; Brugnera vd.,2025).
Tablo 3. *Başlıca Nötrinosuz Çift Beta Bozunması (0νββ) Deneyleri ve Güncel Yarı Ömür Limitleri (%90 C.L.)*

İzotop	Deney	$T^{0\nu}_{1/2}$ (yıl)	$\langle m_{\beta\beta} \rangle$(meV) (NME'ye bağlı aralık)
^{76}Ge	GERDA	$> 1.8 \times 10^{26}$	79 − 180
	Majorana Demonstrator	$> 8.3 \times 10^{25}$	113 − 266
	LEGEND-200 (proje)	$> 10^{27}$ (hedef)	35 − 80 (hedef)
^{130}Te	CUORE	$> 2.2 \times 10^{25}$	90 − 305
^{136}Xe	KamLAND-Zen	$> 2.3 \times 10^{26}$	36 − 156
	EXO-200	$> 5.7 \times 10^{25}$	75 − 200
	nEXO (proje)	$> 1.35 \times 10^{28}$ (hedef)	5.7 − 17.7 (hedef)

5.2. Steril Nötrinolar: Var mı yok mu?

SM'de yer alan ve sadece sol-elli (left-handed) kiraliteye sahip olan üç aktif nötrino (ν_e, ν_μ, ν_τ) türünün aksine, steril nötrinoların sağ-elli (right-handed) kiraliteye sahip olduğu öngörülür. Bu ayar etkileşimlerinden "steril" olmaları, onların doğrudan üretimini ve tespitini zor kılarken, varlıklarının potansiyel kanıtı, aktif nötrinolarla kütle karışımı mekanizması üzerinden ortaya çıkar. Bu karışım, standart 3x3 Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (PMNS) leptonik karışım matrisinin daha büyük boyutlu bir üniter matrise genişletilmesini gerektirir. Sonuç olarak; aktif nötrinolarla kütle karışımı yoluyla etkileşebilen varsayımsal sağ-elli nötrinolar "steril nötrinolar" olarak adlandırılır (Abazajian vd., 2012). Steril nötrinoların varlığı, bazı deneysel anomalileri açıklamayı hedeflemektedir. Bunlardan bazıları şu şekildedir:

LSND Anomalisi: Los Alamos Sıvı Sintilatör Nötrino Dedektörü (LSND) deneyi,$\overline{\nu_\mu} \rightarrow \overline{\nu_e}$ salınımlarına işaret eden bir $\bar{\nu}_e$ fazlalığı gözlemlemiştir (Abbasi, 2024; Du vd., 2025).

MiniBooNE Anomalisi: LSND sonucunu test etmek için yapılan MiniBooNE deneyi de düşük enerjilerde elektron benzeri olaylarda bir fazlalık gözlemlemiştir (Abbasi, 2024; Du vd., 2025).

Galyum Anomalisi: Radyoaktif kaynaklarla kalibre edilen galyum bazlı güneş nötrino deneyleri (SAGE, GALLEX), beklenenden daha düşük bir ν_e yakalama oranı göstermiştir. Bu durum, BEST deneyi tarafından da doğrulanmıştır (Abbasi, 2024; Barinov vd., 2022).

Reaktör Antinötrino Anomalisi: Kısa mesafeli reaktör deneylerinde gözlemlenen $\bar{\nu}_e$ akısında teorik beklentilere göre bir eksiklik durumudur (JINR News, 2024).

Bu anomaliler, ~1 eV² mertebesinde bir kütle kare farkına sahip dördüncü bir steril nötrino türünün varlığıyla açıklanmaya çalışılmıştır (3+1 modeli). Ancak, diğer birçok deney özellikle ν_μ ve ν_e kaybolma kanallarını inceleyenler (IceCube DeepCore, MINOS+, Daya Bay gibi) bu parametre bölgesinde steril nötrino varlığına dair bir kanıt bulamamış ve güçlü sınırlar getirmiştir. Bu nedenle, steril nötrino hipotezi hala tartışmalıdır ve farklı deney sonuçları arasında bir farklılık bulunmaktadır (Abbasi, 2024; Du vd., 2025; JINR News, 2024). Kozmolojik gözlemler de (CMB, BBN, LSS) steril nötrinoların özelliklerine sınırlar koymaktadır (Du vd., 2025). keV mertebesindeki steril nötrinolar ise sıcak karanlık madde adayı olarak kabul edilebilmektedir (Abazajian vd., 2012).

5.3. CP İhlali ve Leptogenez Senaryoları

Evrenimizdeki gözlenen madde-antimadde asimetrisi (baryon asimetrisi), parçacık fiziği ve kozmolojinin en büyük gizemlerinden biridir. Sakharov koşulları (baryon sayısı ihlali, C ve CP simetrilerinin ihlali, termal dengeden sapma) bu asimetrinin dinamik olarak nasıl oluşabileceğini açıklamaktadır (Sakharov, 1991). Leptogenez teorisi, evrenin erken dönemlerinde (genellikle seesaw mekanizmasındaki ağır Majorana nötrinolarının CP ihlal eden bozunmaları yoluyla) bir lepton asimetrisinin üretildiğini ve bu lepton asimetrisinin daha sonra SM'deki sphaleron süreçleriyle bir baryon asimetrisine dönüştüğünü öne sürer (Lin, 2024; Ginnett vd., 2025).

Leptogenez için gerekli olan CP ihlali, ağır Majorana nötrinolarının Yukawa eşleşmelerindeki karmaşık fazlardan veya PMNS matrisindeki CP ihlal eden faz (lar)dan kaynaklanabilmektedir (Ginnett vd., 2025). Düşük enerjili nötrino salınımlarında gözlemlenebilen Dirac CP fazı, leptogenez için gerekli olan yüksek enerjili CP ihlaliyle doğrudan ilişkili olmasa da lepton türünde CP ihlalinin varlığına dair bir kanıt sunar ve leptogenez senaryolarını desteklemektedir (Blanchet & Di Bari, 2006). T2K ve NOvA gibi mevcut deneyler CP fazının değeri hakkında ipuçları vermektedir ve CP fazının CP korunumlu değerlerden (0 veya π) farklı olma olasılığı giderek artmaktadır (Ajmi, 2024; Abe vd.,2021). Gelecekte yapılması planlanan deneyler olan DUNE ve Hyper-Kamiokande, CP fazını yüksek hassasiyetle ölçerek leptonik CP ihlalinin varlığını kesin olarak belirlemeyi ve leptogenez modelleri için önemli kısıtlamalar getirmeyi hedeflemektedir (Jamieson, 2022; Song vd., 2021).

5.4. Gelecek Deneyler: DUNE, JUNO, Hyper-Kamiokande, IceCube-Gen2

Nötrino fiziğindeki açık soruları yanıtlamak için birçok yeni nesil deney planlanmakta veya inşa edilmektedir. Bunlar;

DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment): Amerika Birleşik Devletleri'nde yürütülen büyük ölçekli bir fizik projesidir. Deney kapsamında, Fermilab'da üretilen yoğun bir nötrino demeti, 1300 kilometrelik bir mesafeyi yerkabuğunun altından kat ederek Güney Dakota'daki Sanford Yeraltı Araştırma Tesisi'ne gönderilir. Burada, gelen nötrinoları tespit etmek için oldukça büyük ve hassas Sıvı Argon Zaman Projeksiyon Odaları (LArTPC) kullanılır (https://www.dunescience.org/). DUNE'un temel amaçları; nötrinoların kütle sıralamasını kesin olarak belirlemek, madde ile antimadde arasındaki davranış farkını açıklayabilecek CP ihlalini araştırmak, protonun temel kararlılığını test etmek üzere olası bir bozunma arayışına girmek ve patlayan yıldızlardan (süpernova) yayılan nötrinoları saptamaktır (Jamieson, 2022; Song vd., 2021).

JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory): Çin'de inşa edilen JUNO, nükleer reaktörlerden gelen antinötrinoları incelemek için 20 kilotonluk bir sıvı sintilatör dedektörü kullanılması planlanmaktadır. (https://juno.ihep.cas.cn/). Temel amacı, ν_e^- enerji spektrumundaki hassas ölçümlerle nötrino kütle hiyerarşisini belirlemek ve salınım parametrelerini($\sin^2(\theta_{12}), \Delta m^2_{21}, |\Delta m^2_{ee}|$) kesin olarak ölçmektir (Jamieson, 2022; Song vd., 2021).

Hyper-Kamiokande (Hyper-K): Japonya'da Super-Kamiokande'nin devamı olarak inşa edilen Hyper-K, çok daha büyük bir su Çerenkov dedektörü (260 kiloton toplam hacim, ~190 kiloton iç hacim) olacaktır (https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/hk/). J-PARC'tan gelen yükseltilmiş bir nötrino demetiyle birlikte çalışarak CP fazını ölçecek, proton bozunması aramalarını önemli ölçüde geliştirecek ve astrofiziksel

nötrinolar (güneş, atmosferik, süpernova) için hassasiyeti artırmayı planlanmaktadır. (Jamieson, 2022; Song vd., 2021). Daha yüksek verimli foton sensörleri ve geliştirilmiş elektronikler kullanılacaktır.

IceCube-Gen2: Güney Kutbu'nda yer alan mevcut IceCube gözlemevinin bir uzantısı olarak planlanan IceCube-Gen2, daha büyük bir optik sistem, bir yüzey dizisi ve bir radyo sistemi içerecektir (https://icecube-gen2.wisc.edu/). Bu geliştirmeler, TeV'den EeV enerjilerine kadar yüksek enerjili nötrino gökyüzünü çözümlemeyi, kozmik ışın ve gama ışını ölçümlerini iyileştirmeyi ve BSM fizik ile karanlık madde aramalarını mümkün kılacaktır (Jamieson, 2022; Song vd., 2021).

6. Sonuç

Nötrino fiziği, Pauli'nin beta bozunumundaki enerji korunumunu açıklamak üzere öne sürdüğü teorik bir hipotezden, yaklaşık bir asırlık süreçte temel parçacık fiziği ve kozmolojinin önemli araştırma alanlarından biri haline gelmiştir. Bu derlemede ele alındığı gibi, nötrino salınımlarının deneysel olarak kanıtlanması, "Güneş Nötrino Problemi" gibi uzun süredir devam eden sorunları çözmekle kalmamış, aynı zamanda SM kütlesiz nötrino varsayımını geçersiz kılarak SM ötesi fizik arayışları için somut bir zemin oluşturmuştur. Bu keşif, parçacık fiziğindeki olguları önemli ölçüde etkilemiş ve nötrinoları, yeni teorileri test etmek için önemli bir araç haline getirmiştir.

SN1987A'dan gelen nötrino verileri ve IceCube tarafından astrofiziksel kaynaklarla ilişkilendirilen yüksek enerjili nötrinoların tespiti, nötrinoların evrenin yüksek enerjili olaylarını incelemek için önemli haberciler olduğunu göstermiş ve multi-messenger astronomi alanını ileriye taşımıştır. Ancak, kaydedilen bu önemli ilerlemelere rağmen, nötrino fiziği alanı henüz yanıtlanmamış temel sorular barındırmaktadır. Nötrinoların mutlak kütle ölçeği ve kütle durumlarının sıralaması (hiyerarşi), bu parçacıkların kendi karşıt parçacıkları olup olmadığı (Dirac veya Majorana doğası), lepton sektöründe CP simetrisinin ihlal edilip edilmediği ve bunun evrenin madde-antimadde asimetrisine olası katkısı (leptogenez) ile deneysel anomalilerin işaret ettiği olası steril nötrinoların varlığı gibi konular, günümüz fiziğinin öncelikli araştırma hedefleri arasındadır. Bu açık sorular, hem Seesaw mekanizması gibi teorik modellerin geliştirilmesini önemli kılmakta hem de büyük ölçekli deneysel projelere yön vermektedir. DUNE, Hyper-Kamiokande, JUNO, IceCube-Gen2 ve nötrinosuz çift beta bozunumu deneyleri gibi gelecek projeler, bu temel gizemleri çözmek için yüksek bir hassasiyetle tasarlanmaktadır. Bu deneylerden elde edilecek verilerin, sadece nötrinoların doğasına ilişkin bilgimizi derinleştirmekle kalmayıp, aynı zamanda evrenin temel yapıları, simetrileri ve kozmolojik evrimine dair mevcut paradigmaları test edecek veya geliştirecek bilgiler sunma potansiyeli bulunmaktadır. Sonuç olarak, nötrinolar evrenin anlaşılmasına yönelik önemli katkılar sunmaya devam etmekte ve gelecek yıllarda da önemli keşif potansiyeli barındıran bir alan olmayı sürdürmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı/ Conflict of Interest
Yazar, çıkar çatışması veya kişisel ilişki bulunmadığını beyan etmektedir./ The author has no conflicts of interest to declare.

Finansal Destek/ Funding
Yazar, bu çalışma için finansal destek almadığını beyan etmiştir./ The author declared that this study has received no financial support.

Hakem Değerlendirmesi/Peer-review
Dış bağımsız/Externally peer-reviewed.

Yazar Katkıları/Author Contributions: Concept/Tasarım-YS.; Dizayn/Design-YS; Denetleme/Supervision-YS; Kaynaklar/Resources-YS; Veri Toplanması ve/veya İşlemesi/Data Collection and/or Processing-YS; Analiz ve/ veya Yorum/Analysis and/or Interpretation-YS; Literatür Taraması/Literature Search-YS; Yazıyı Yazan/ Writing Manuscript-YS; Eleştirel İnceleme/Critical Review-YS.

Kaynakça

Aartsen, M. G., et al. (IceCube Collaboration). (2018a). Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A. *Science, 361*(6398), eaat1378.

Aartsen, M. G., et al. (IceCube Collaboration). (2018b). Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert. *Science, 361*(6398), 147-151.

Abazajian, K. N., Acero, M. A., Agarwalla, S. K., Aguilar-Arevalo, A. A., Albright, C. H., Antusch, S., ... & Schwetz, T. (2012). Light sterile neutrinos: a white paper. *arXiv preprint arXiv:1204.5379*.

Abbasi, R., Ackermann, M., Adams, J., Agarwalla, S. K., Aguilar, J. A., Ahlers, M., ... & Hidvegi, A. (2024). Search for a light sterile neutrino with 7.5 years of IceCube DeepCore data. *Physical Review D, 110*(7), 072007.

Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Acernese, F., Ackley, K., Adams, C., ... & Bersanetti, D. (2017a). Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger** Any correspondence should be addressed to lvc. publications@ ligo. org. *The Astrophysical Journal Letters*, *848*(2), l12.

Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Acernese, F., Ackley, K., Adams, C., ... & Cahillane, C. (2017b). GW170817: observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Physical review letters, 119*(16), 161101.

Abe, K., Akhlaq, N., Akutsu, R., Ali, A., Alt, C., Andreopoulos, C., ... & Malek, M. (2021). Improved constraints on neutrino mixing from the T2K experiment with 3.13× 10 21 protons on target. *Physical Review D, 103*(11), 112008.

Adam, T., Agafonova, N., Aleksandrov, A., Altinok, O., Alvarez Sanchez, P., Anokhina, A., ... & Sahnoun, Z. (2012). Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam. *Journal of High Energy Physics, 2012*(10), 1-37.

Adame, A. G., Aguilar, J., Ahlen, S., Alam, S., Alexander, D. M., Alvarez, M., ... & Rich, J. (2025). DESI 2024 VI: cosmological constraints from the measurements of baryon acoustic oscillations. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2025*(02), 021.

Ahmad, Q. R., Allen, R. C., Andersen, T. C., Anglin, J. D., Barton, J. C., Beier, E. W., ... & Smith, A. R. (2002). Direct evidence for neutrino flavor transformation from neutral-current interactions in the Sudbury Neutrino Observatory. *Physical review letters, 89*(1), 011301.

Ahmad, Q. R., Allen, R. C., Andersen, T. C., Anglin, J. D., Barton, J. C., Beier, E. W., ... & Smith, A. R. (2002). Measurement of day and night neutrino energy spectra at SNO and constraints on neutrino mixing parameters. *Physical Review Letters, 89*(1), 011302.

Ajmi, A. (2024, August). Latest Results from the T2K and NOvA Experiments. In *16th International Conference on Heavy Quarks and Leptons* (p. 24).

Albert, A., et al. (ANTARES Collaboration). (2017). First all-flavor neutrino point-like source search with the ANTARES neutrino telescope. *Physical Review D, 96*(8), 082001.

Arnett, W. D., Bahcall, J. N., Kirshner, R. P., & Woosley, S. E. (1989). Supernova 1987A. *IN: Annual review of astronomy and astrophysics. Volume 27 (A90-29983 12-90). Palo Alto, CA, Annual Reviews, Inc., 1989, p. 629-700. Research supported by the University of Arizona.*, *27*, 629-700.

Bahcall, J. N., & Davis, R., Jr. (1976). Solar neutrinos: A scientific puzzle. *Science, 191*(4224), 264-267.

Bahcall, J. N., & Davis Jr, R. (1982). An account of the development of the solar neutrino problem. *Essays in Nuclear Astrophysics*, 243-285.

Barinov, V. V., Cleveland, B. T., Danshin, S. N., Ejiri, H., Elliott, S. R., Frekers, D., ... & Zvir, A. I. (2022). Results from the Baksan experiment on sterile transitions (BEST). *Physical review letters, 128*(23), 232501.

Bellerive, A., Klein, J. R., McDonald, A. B., Noble, A. J., Poon, A. W. P., & SNO Collaboration. (2016). The sudbury neutrino observatory. *Nuclear Physics B, 908*, 30-51.

Blanchet, S., & Di Bari, P. (2006). Leptogenesis beyond the limit of hierarchical heavy neutrino masses. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2006*(06), 023.

Brandt, T. J., Burke-Spolaor, S., Burns, E., Conklin, J. W., Fryer, C., Gezari, L. S., ... & Tomsick, J. (2020). *Physics of the cosmos program analysis group (physpag) study analysis group (sag) on multimessenger astrophysics (mma) final report*.

Brugnera, R., & LEGEND collaboration. (2025). Neutrinoless double-beta decay search with the LEGEND experiment. *Journal of Instrumentation, 20*(03), C03050.

Cardani, L. (2019). Neutrinoless double beta decay overview. *SciPost Physics Proceedings, (1)*, 024.

Christenson, J. H., Cronin, J. W., Fitch, V. L., & Turlay, R. (1964). Evidence for the 2 π Decay of the K 2 0 Meson. *Physical Review Letters, 13*(4), 138.

Cowan Jr, C. L., Reines, F., Harrison, F. B., Kruse, H. W., & McGuire, A. D. (1956). Detection of the free neutrino: a confirmation. *Science, 124*(3212), 103-104.

Danby, G., Gaillard, J. M., Goulianos, K., Lederman, L. M., Mistry, N., Schwartz, M., & Steinberger, J. (1962). Observation of high-energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos. *Physical Review Letters, 9*(1), 36.

Dolinski, M. J., Poon, A. W., & Rodejohann, W. (2019). Neutrinoless double-beta decay: Status and prospects. *Annual Review of Nuclear and Particle Science, 69*(1), 219-251.

Donoghue, J. F., Golowich, E., & Holstein, B. R. (2014). *Dynamics of the standard model*. Cambridge university press.

Du, G. H., Li, T. N., Wu, P. J., Feng, L., Zhou, S. H., Zhang, J. F., & Zhang, X. (2025). Cosmological search for sterile neutrinos after DESI 2024. *arXiv preprint arXiv:2501.10785*.

DUNE Collaboration. (n.d.). *Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE)*. Retrieved June 12, 2025, from https://www.dunescience.org/

Eguchi, K., Enomoto, S., Furuno, K., Goldman, J., Hanada, H., Ikeda, H., ... & (KamLAND Collaboration). (2003). First results from KamLAND: evidence for reactor antineutrino disappearance. *Physical review letters, 90*(2), 021802.

Esteban, I., González-García, M. C., Maltoni, M., Schwetz, T., & Zhou, A. (2020). The fate of hints: updated global analysis of three-flavor neutrino oscillations. *Journal of High Energy Physics, 2020*(9), 1-22.

Feldman, G. J. (1989). *Measurement of the Z boson resonance parameters* (No. SLAC-PUB-5143; CONF-8908142-5). Stanford Linear Accelerator Center, Menlo Park, CA (USA).

Fermi, E. (1934). Versuch einer Theorie der β-Strahlen. I. *Zeitschrift für Physik, 88*(3), 161-177.

Fiorentini, G., Lissia, M., & Mantovani, F. (2007). Geo-neutrinos and earth's interior. *Physics Reports, 453*(5-6), 117-172.

Fukuda, Y., Hayakawa, T., Ichihara, E., Inoue, K., Ishihara, K., Ishino, H., ... & Super-Kamiokande Collaboration. (1998). Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos. *Physical review letters, 81*(8), 1562.

Fukugita, M., & Yanagida, T. (1986). Barygenesis without grand unification. *Physics Letters B, 174*(1), 45-47.

Ge, S. F., & Tan, L. (2025). Identifying neutrino mass ordering with cosmic gravitational focusing. *Physical Review D, 111*(8), 083539.

Ginnett, I., & Tait, T. M. (2025). Leptogenesis During an Era of Early SU (2) Confinement. *arXiv preprint arXiv:2503.09723*.

Giunti, C., & Studenikin, A. (2015). Neutrino electromagnetic interactions: a window to new physics. *Reviews of Modern Physics, 87*(2), 531-591.

Griffiths, D. (2020). *Introduction to elementary particles*. John Wiley & Sons.

Halzen, F., & Kheirandish, A. (2024). IceCube and high-energy cosmic neutrinos. In *The Encyclopedia of Cosmology: Set 2: Frontiers in Cosmology Volume 2 Neutrino Physics and Astrophysics* (pp. 107-235).

Hernandez-Molinero, B., Jimenez, R., & Garay, C. P. (2025). Effects of the Cosmic Neutrino Background Capture on Astrophysical Objects. *arXiv preprint arXiv:2503.07788*.

IceCube Collaboration*. (2013). Evidence for high-energy extraterrestrial neutrinos at the IceCube detector. *Science, 342*(6161), 1242856.

Jamieson, B. (2022). Future neutrino experiments. *arXiv preprint arXiv:2207.05044*.

Jarlskog, C. (2018, September). Birth of the neutrino, from Pauli to the Reines-Cowan experiment. In *History of the Neutrino 2018 conference proceedings*.

JINR News. (2024, June). Neutrino-2024: Review of important results. *JINR*.

KATRIN Collaboration†, Aker, M., Batzler, D., Beglarian, A., Behrens, J., Beisenkötter, J., ... & Zeller, G. (2025). Direct neutrino-mass measurement based on 259 days of KATRIN data. *Science, 388*(6743), 180-185.

Kayser, B. (2003). Neutrino mass, mixing, and flavor change. In *Neutrino Mass* (pp. 1-24). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

King, S. F. (2025). Right-handed neutrinos: seesaw models and signatures. *arXiv preprint arXiv:2502.0*.

Kobayashi, M., & Maskawa, T. (1973). CP-violation in the renormalizable theory of weak interaction. *Progress of theoretical physics, 49*(2), 652-657.

Kodama, K. T., Ushida, N., Andreopoulos, C., Saoulidou, N., Tzanakos, G., Yager, P., ... & DONut Collaboration. (2001). Observation of tau neutrino interactions. *Physics Letters B, 504*(3), 218-224.

Kuzmin, V. A., Rubakov, V. A., & Shaposhnikov, M. E. (1985). On anomalous electroweak baryon-number non-conservation in the early universe. *Physics Letters B, 155*(1-2), 36-42.

Landau, L. (1957). On the conservation laws for weak interactions.

Lin, C. (2024). Analysis on Neutrino Masses and Leptogenesis in the CP-Violating Standard Model. *arXiv preprint arXiv:2408.10621*.

Ma, E. (2006). Verifiable radiative seesaw mechanism of neutrino mass and dark matter. *Physical Review D—Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology, 73*(7), 077301.

Maki, Z., Nakagawa, M., & Sakata, S. (1962). Remarks on the unified model of elementary particles. *Progress of theoretical physics, 28*(5), 870-880.

Mandal, S., Miranda, O. G., Garcia, G. S., Valle, J. W., & Xu, X. J. (2022). Toward deconstructing the simplest seesaw mechanism. *Physical Review D, 105*(9), 095020.

Mikheev, S. P., & Smirnov, A. Y. (1985). Resonance enhancement of oscillations in matter and solar neutrino spectroscopy. *Soviet Journal of Nuclear Physics, 42*(6).

Mohapatra, R. N., & Senjanović, G. (1980). Neutrino mass and spontaneous parity nonconservation. *Physical Review Letters, 44*(14), 912.

Mohapatra, R. N., & Pal, P. B. (2004). *Massive neutrinos in physics and astrophysics* (Vol. 72). World scientific.

Mohapatra, R. N., & Smirnov, A. Y. (2006). Neutrino mass and new physics. *Annual Review of Nuclear and Particle Science, 56*(1), 569-628.

Murase, K., Ahlers, M., & Lacki, B. C. (2013). Testing the hadronuclear origin of PeV neutrinos observed with IceCube. *Physical Review D—Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology, 88*(12), 121301.

Murase, K., Kimura, S. S., Zhang, B. T., Oikonomou, F., & Petropoulou, M. (2020). High-energy neutrino and gamma-ray emission from tidal disruption events. *The Astrophysical Journal, 902*(2), 108.

Naredo-Tuero, D., Escudero, M., Fernández-Martínez, E., Marcano, X., & Poulin, V. (2024). Critical look at the cosmological neutrino mass bound. *Physical Review D, 110*(12), 123537.

Navas, S., Amsler, C., Gutsche, T., Hanhart, C., Hernández-Rey, J. J., Lourenço, C., ... & Piepke, A. (2024). Review of particle physics. *Physical Review D, 110*(3), 030001.

Parke, S. J., & Funchal, R. Z. (2025). Mass ordering sum rule for the neutrino disappearance channels in T2K, NOvA, and JUNO. *Physical Review D, 111*(1), 013008.

Pauli, W. (1930). Pauli's Letter-Dear Radioactive Ladies and Gentlemen. *Tübingen, December, 4*.

Pelaggi, G. M., Sannino, F., Strumia, A., & Vigiani, E. (2017). Naturalness of asymptotically safe Higgs. *Frontiers in Physics, 5*, 49.

Perl, M. L., Abrams, G. S., Boyarski, A. M., Breidenbach, M., Briggs, D. D., Bulos, F., ... & Wiss, J. E. (1975). Evidence for anomalous lepton production in e+− e− annihilation. *Physical Review Letters, 35*(22), 1489.

Peskin, M. E., & Schroeder, D. V. (1995). *An introduction to quantum field theory*. Addison-Wesley.

Pontecorvo, B. (1958). *Zh. É ksp. Teor. Fiz. 33, 549 1957 Sov. Phys. JETP, 6*, 429.

Qian, X., & Vogel, P. (2015). Neutrino mass hierarchy. *Progress in Particle and Nuclear Physics, 83*, 1-30.

Reines, F. (1996). The neutrino: From poltergeist to particle. *Reviews of Modern Physics, 68*(2), 317.

Rozhkov, V., & Troitsky, S. (2025). Multimessenger astronomy. *Physics of Particles and Nuclei, 56*(1), 104-111.

Sakharov, A. D. (1991). Violation of CPin variance, Casymmetry, and baryon asymmetry of the universe. *Usp. Fiz. Nauk, 161*, 61-64.

Scott, D. (2024). The cosmic neutrino background. *arXiv preprint arXiv:2402.16243*.

Smirnov, A. Y. (2013). Neutrino mass hierarchy and matter effects. *arXiv preprint arXiv:1312.7309*.

Song, N., Li, S. W., Argüelles, C. A., Bustamante, M., & Vincent, A. C. (2021). The future of high-energy astrophysical neutrino flavor measurements. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2021*(04), 054.

Tanabashi, M., Hagiwara, K., Hikasa, K., Nakamura, K., Sumino, Y., Takahashi, F., ... & Quadt, A. (2018). Review of Particle Physics: particle data groups. *Physical Review D, 98*(3), 1-1898.

The KATRIN Collaboration. Direct neutrino-mass measurement with sub-electronvolt sensitivity. *Nat. Phys.* **18**, 160–166 (2022). https://doi.org/10.1038/s41567-021-01463-1

Wolfenstein, L. (2018). Neutrino oscillations in matter. In *Solar neutrinos* (pp. 294-299). CRC Press.

Wu, C. S., Ambler, E., Hayward, R. W., Hoppes, D. D., & Hudson, R. P. (1957). Experimental test of parity conservation in beta decay. *Physical review, 105*(4), 1413.

Anatolia Science and Technology Journal (ASTEJ)

ASTEJ, 2025, 2(1)
DOI: 10.5281/zenodo.17427480
Derleme Makalesi/ Review Article

Otomatik Sağım Sistemleri

Semanur KARAGÖZ[1], Şeyma ÇİLO[2*]
[1] Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootekni Bölümü, 25240, Erzurum, Türkiye
[2] Muş Alparslan Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Hayvansal Üretim ve Teknolojileri Bölümü, 49100, Muş, Türkiye

Özet

1990'lı yıllarının başında geliştirilen otomatik sağım sistemleri (OSS), süt ineklerinin otomatik olarak sağılmasını sağlayan ileri teknolojik sistemdir. Sensörler sayesinde hayvanlar kolaylıkla izlenebilmekte, meme başları otomatik olarak temizlenerek hijyenik bir sağım sağlanmaktadır. Ayrıca süt üretimine ilişkin veriler sürekli ve güvenilir bir şekilde kaydedilmektedir. En önemlisi ise, inekler sağım ünitesine kendi istekleriyle girdiklerinden, bu sistem hem hayvan refahını artırmakta hem de iş gücü ve zaman kaybını azaltarak üretici açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Sağım sıklığının artmasıyla birlikte süt veriminde artış gözlenmektedir. Bunun yanı sıra, somatik hücre sayısı ve istenmeyen bakteri miktarındaki azalma, sütün hijyenik koşullarda sağılmasıyla birleştiğinde, süt kalitesini olumlu yönde etkilemektedir. Ancak sistemin ilk kurulum maliyetinin yüksek olması, bu teknolojiye yönelik eğitimli çiftçi ihtiyacının olması, hayvanın uyum sağlama süreci ve süt üretimi arttığından dolayı yem tüketiminin artmasıyla birlikte yem maliyetinin de artması gibi olumsuz yönleri de mevcuttur. Bu çalışmanın temel amacı, otomatik sağım sistemlerinin süt sığırcılığı işletmelerinde artan kullanımına bağlı olarak sistemin yapısı, çalışma prensipleri, avantajları, dezavantajları ve süt kalitesi ile verimine olan etkisini ele alarak genel bir değerlendirme sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Otomasyon, otomatik sağım sistemleri, sağım teknolojileri, süt kalitesi, süt verimi.

Automatic Milking Systems

Semanur KARAGÖZ[1] , Şeyma ÇİLO[2*]
[1] Atatürk Univesity, Faculty of Agriculture, Department of Animal Scicence, 25240, Erzurum, Türkiye
[2] Muş Alparslan University, Faculty of Applied Scicences, Department of Animal Production and Technologies, 49100, Muş, Türkiye

Abstract

Automatic milking systems (AMS), developed in the early 1990s, are advanced technologies that allow the automatic milking of dairy cows. With the help of sensors, animals can be easily monitored, and the teats are automatically cleaned before milking, ensuring a hygienic process. Moreover, data related to milk production are continuously and reliably recorded. Most importantly, since cows enter the milking unit voluntarily, the system not only enhances animal welfare but also reduces labor requirements and time loss, offering significant advantages from the producer's perspective. With the increased milking frequency, milk yield tends to improve. In addition, the reduction in somatic cell count and undesirable bacteria, together with the hygienic milking process, positively influences overall milk quality. However, the system also has disadvantages, including the high initial installation cost, the need for trained farmers to use this technology, and the increased feed consumption and feed costs due to increased animal adaptation and milk production. The main purpose of this study is to provide a general evaluation of the system's structure, operating principles, advantages, disadvantages and its effects on milk quality and yield, depending on the increasing use of automatic milking systems in dairy farms.

Keywords: Automatic milking systems, automation. milking technologies, milk quality, milk yield.

* Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: Şeyma ÇİLO, e-posta: s.cilo@alparslan.edu.tr, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0743-6299
** Yazar/ Author: Semanur KARAGÖZ, e-posta: karagozsema615@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-3923-949X
***Geliş/Received: 02/10/2025, Düzeltme/Revised: 19/10/2025, Kabul/Accepted: 19/10/2025, Yayınlanma/Published: 24/10/2025.

1. Giriş

Süt sağım işlemi teknolojinin ilerlemesiyle artık manuel müdahaleye gerek kalmadan otomatik olarak da yerine getirilmektedir (Butler ve ark., 2012; Coşkun ve ark., 2023). Otomatik sağım sistemleri (OSS) süt sağım ünitesine inekler bağımsız olarak istedikleri zaman girebilme özgürlüğünü sağlayan gönüllü bir sağım sistemidir (Kıyıcı, 2018). 1930 yılında sağım evi adında ilk sağımhane kurulmuştur (Kıyıcı, 2018). 1970'li yılların ortalarında OSS'ye dair ilk fikirler açığa çıkmıştır (Kulaç ve Ünal, 2025). Avrupa'da süt sığırcılığı işletmelerinde iş gücü problemlerini çözmek için 1992 yılında ilk ticari OSS Hollanda'da geliştirilmiştir (Bockhahn ve Terry, 2022; Siewert ve ark., 2018). Sistemin Amerika Birleşik Devletleri'nde tanıtılması 2000 yılında olmuştur. Başlangıçta benimsenme hızı yavaş olan OSS, özellikle son yıllarda artan iş gücü maliyetleri ve sistemin yıllar içerisinde kendini geliştirmesi neticesinde hızlanmıştır (Bockhahn ve Terry, 2022). OSS, sadece geleneksel süt sağım uygulamaların alternatif olmanın yanı sıra, süt sığırı sürülerinin üretim verimliliğini ve sağlığını yönetmede genel ve yeni bir yaklaşım olarak da düşünülebilmektedir (Cogato ve ark., 2021). Süt sığırcılığında, besleme ve bakım yönteminin beraberinde zamana en çok ihtiyaç duyan işlemler arasında sağım işlemi de yer almaktadır (Coşkun ve ark., 2023). OSS, ineklerin bir insan yardımına gerek kalmadan istedikleri zaman sağılmalarını sağlamaktadır. İnekler sisteme gönüllü olarak giriş yapar ve robot tarafından ayrıntılı veriler kaydedilir. Bu verilere uzaktan mobil cihaz ya da bilgisayar aracılığı ile erişim sağlanabilmektedir. Böylece üreticilerin sürülerin sağlığını ve performansını uzaktan kontrol etmesine olanak sağlamaktadır (Butler ve ark., 2012). OSS ineklerin beslenmesi için bir yandan zorluk diğer yandan da fırsat sunmaktadır. OSS' de başlıca güçlük, minimum ve nispeten sabit bir sağım sıklığını korumaktır (Bach ve Cabrera, 2017). Bununla beraber sağım sıklığı, çiftlik yerleşim düzeni, zemin türü, ineklere uygulanan trafik tipi, doğum sayısı, laktasyon dönemi, sürünün sosyal yapısı, ineğin sağlık durumu (topallık, metritis, mastitis gibi hastalıklar), yemlikte verilen rasyon türü ve OSS'de sunulan konsantre yem gibi pek çok etkene bağlıdır. Diğer taraftan OSS'nin sağladığı fırsat, daha fazla sağım yapılması ve ineklerin bireysel besin ihtiyacına daha uygun biçimde beslenme olasılığıdır. Bu durum da sistem, kârlılığı artırabilecek bir üretim yapısı haline gelmektedir (Bach ve Cabrera, 2017). Bu çalışmanın amacı süt sığır işletmelerinde giderek yaygınlaşan OSS'nin yapısı, işleyişi, avantaj ve dezavantajları ile süt verimi ve kalitesine olan etkilerini ele alarak genel bir bakış açısı kazandırmaktır.

2. Otomatik Sağım Sistemlerinin Genel Yapısı ve Teknik Özellikleri

OSS, temelde sağım işlemini yerine getiren mekanik donanımlar ile bu donanımı yöneten bilgisayar yazılımlarının bir araya gelmesiyle oluşan sistemlerdir (Şekil 1.). Bu sistemler, sağım bölmesi, meme başı sensörleri ve robot kol ya da kolları gibi ana bileşenlerden meydana gelmektedir (Türkyılmaz, 2005).

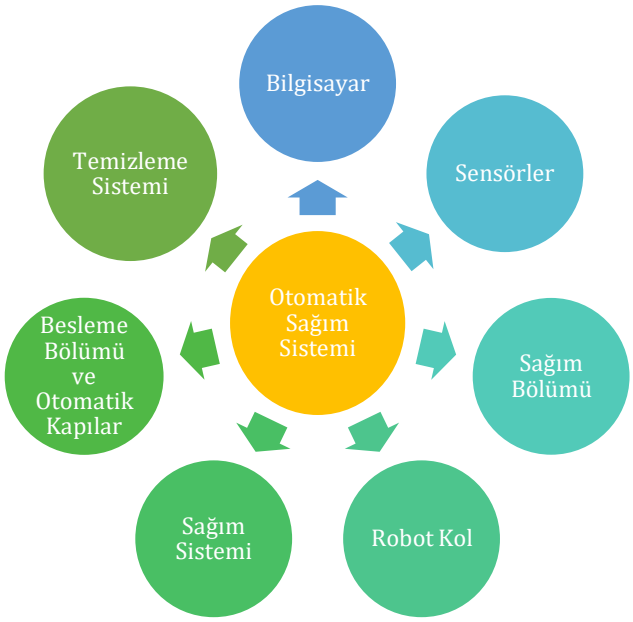
OSS uygulamalarında inekler, insan müdahalesine gerek duymadan istedikleri zaman sağım ünitesine girebilmekte ve ahır içerisinde serbest hareket edebilmektedir (Şekil 3.). Memenin sağıma hazırlanması, sağım aparatlarının takılıp çıkarılması, hayvanların tanınması ve tüm bu sürecin otomatik olarak denetlenmesi kontrol bilgisayarları aracılığıyla yürütülmektedir. Bu sistemin çalışma basamakları; otomatik kapıların kapanması, ineğin tanınması, memenin hazırlanması, sağım başlıklarının takılması ve denetlenmesi, süt kalitesinin ölçülmesi, sağımın tamamlanmasının ardından başlıkların çıkarılması, meme bakımı, ineğin serbest bırakılması ve elde edilen sütün toplama tankına iletilerek soğutucuya aktarılması şeklinde özetlenmektedir (De Koning ve ark., 2001; Graves, 2002; Reinemann, 2002). OSS'nin merkezi, tüm fonksiyonları yöneten ve beklenmedik durumları raporlayan bilgisayardır. Bu bilgisayar, farklı sensörlerden toplanan verileri değerlendirirken önceden yüklenmiş bilgiler (hayvanın kimlik bilgileri, laktasyon verileri, sağım parametreleri vb.) kullanır (Anonymous, 2005; Alıç ve Yener, 2006).

Sistemin temel çalışma adımları, sensörler aracılığıyla hayvanların tanınmasına ve doğru sağım pozisyonunun belirlenmesine dayanır. Girişteki sensörler, ineklerin boyunlarındaki manyetik tasmalar veya elektronik numaralar ile tanımlanmasını sağlar (Oostra, 2000; Alıç ve Yener, 2006). Meme ve meme başı pozisyonu, lazer, ultrasonik veya kameralı sistemler ile belirlenir (Schillingmann ve Mottram, 1993; Ordolff, 2001). Tespit edilen koordinatlar bilgisayara kaydedilir ve sağım başlıklarının doğru şekilde takılması sağlanır; bu da sonraki sağım uygulamalarında zaman tasarrufu sağlar (De Koning ve ark., 2001). Nem ve gübre gibi çevresel faktörlerin sensör performansını olumsuz etkileyebileceği dikkate alınmalıdır (De Koning ve ark., 2001). Sağım bölmesi, ineklerin rahatça girebileceği büyüklükte tasarlanmış olup, giriş ve çıkış kapıları otomatik olarak kontrol edilir ve ön kısmında hayvanları teşvik eden yemlikler bulunur (Halachmi ve ark., 2000; Türkyılmaz, 2005).

Sistemin hareketli ana bileşeni, pnömatik sistemle çalışan metal robot koldur. Robot kol, sensörleri ve sağım başlıklarını taşır; sağım pozisyonu yandan, arkadan veya alttan olabilir (Türkyılmaz, 2005). Sağım başlığı takıldıktan sonra robot kol, bağlantıyı bırakır ve bir sonraki sağım bölmesine hareket eder (De Koning ve ark., 2001).

Sağım süreci, ineğin sağım bölmesine girmesiyle başlar. Bilgisayar ineği tanır ve sağım işlemini başlatır (Gearin, 2001; Rodenburg, 2002). Elektronik kapılar kapandıktan sonra, elektronik yemleyiciler aracılığıyla yem verilir. Robot kol memelerin altına gelir ve üzerindeki yıkama sistemi ile meme başlarını temizler; bu işlem, süte bulaşabilecek kir ve patojenleri azaltmayı amaçlar (Graves, 2002; Alıç ve Yener, 2006). Meme başları temizlendikten sonra lazer ünitesi ile konumları tespit edilir ve robot kol sağım başlıklarını hassas şekilde memeye uygular (Alıç ve Yener, 2006).

Her bir sağım başlığı, süt akışını izleyen sensörlere sahiptir. Bilgisayar, süt miktarını ve akışını her bir meme başı için denetler ve geçmiş kayıtlarla karşılaştırarak mastitis ve diğer sağlık problemlerinin erken tespitini mümkün kılar (Anonymous, 2005; De Koning ve ark., 2001). Sağım tamamlandığında, bilgisayar vakumu keser ve başlıklar otomatik olarak çıkarılır. Robot kol, meme başlarına dezenfektan uygular ve inek sağım bölmesinden ayrılır. Süreç sonunda, hijyenin sağlanması amacıyla robot kol, sağım başlıkları ve süt iletim hattı yıkanır ve durulanır (Graves, 2002; Alıç ve Yener, 2006).



Şekil 1. Otomatik Sağım Sisteminin Bölümleri
Figure 1. *Components of the Automatic Milking System*

3. Otomatik Sağım Sistemlerinin Avantaj ve Dezavantajları

OSS, hassas hayvancılık uygulamaların ilerlemesinde öncülük etmiş ve süt sığırcılığı sektöründe küresel ölçekte çığır açmıştır (Ozella ve ark., 2023). OSS, süt sığırcılığı işletmelerine pek çok açıdan önemli avantajlar sunmaktadır. Bu sistemler, daha yüksek ortalama sağım sıklığı ve süt üretimi, sürü sağlığı ve üreme performansında iyileşmeler, bilgi toplama ve değerlendirme yoluyla gelişmiş sürü yönetimi, iş gücü ihtiyacının azalması ve zaman planlamasında esneklik gibi faydaların yanı sıra, işletme sahipleri için kârlılığın ve yaşam kalitesinin yükselmesine de katkı sağlamaktadır (Tse ve ark., 2017; Tse ve ark., 2018). Ayrıca, sağım rutinlerinin düzenli şekilde uygulanmasına olanak tanıyan bu sistemler; sağım sırasında meme başı uyarımının gerçekleşmesi, besleme desteği ve oksitosin salınımının yeterli düzeyde sağlanması açısından da önemli bir rol oynamaktadır (Svennersten-Sjaunja ve Pettersson, 2008). Günde iki kez sağım yapılan geleneksel sistemler ile kıyaslandığında, OSS'de inekler günde ortalama üç kez sağılabilmesi süt veriminin artışında önemli rol oynamaktadır. Sağım sayısının yükseltilmesi, bununla birlikte inek yatar pozisyondayken memenin maruz kaldığı dış basıncı ve meme bağları üzerindeki stresi de minimize ederek hayvanın konforunu artırmaktadır (Ozella ve ark., 2023). İnek, sağım için OSS'ye girdiğinde lazer teknolojisi ve 3 boyutlu bir

kamera robotik kolun her bir meme ucunu bulmasına ve ineğin hareketlerinin gözlemlenmesini sağlamaktadır. Meme başlıklarını takar ve her çeyrek için nabız değerini ayarlayarak her bir çeyrek için sağım yapar. OSS'de meme başı temizlenmesi ve normal olmayan sütün ayrılması için olanaklar dahil edilmiştir (Brouček ve TonGeL, 2015). Ek olarak sürüyü görebileceği bir yerde ve her ineğin ayrı ayrı sağılmasına imkan sağlamaktadır. Böylelikle sağımla ilgili stres azaltılmış olur (Sitkowska ve ark., 2015). Her ne kadar OSS'de çoklu sensörler ile veri analiz programlarının kullanımıyla sağım teknolojisinde önemli ilerlemeler sağlanmış olsa da sistemin yüksek yatırım ve bakım maliyetleri, bazı ineklerde adaptasyon güçlükleri, üretici açısından teknolojik bilgi gereksinimi ve doğrudan hayvan gözleminin azalması gibi çeşitli sınırlılıkları da bulunmaktadır (Jacobs ve Siegford, 2012). OSS için yüksek ilk kurulum maliyeti gerektirmekte ve geri ödeme süreleri işletme büyüklüğüne göre değişmekte; ayrıca sistemlerin kurulumu, bakım gereksinimleri ve işletme personelinin yeni teknolojiye adaptasyonu çiftlik için önemli yönetimsel zorluklar yaratabilmektedir (McCalmon ve ark, 2023). Üreticiler için süt ineklerini OSS'ye alışmasını sağlamak oldukça zor bir evredir. Geleneksel sağım sisteminden OSS'ye geçmek süt inekleri için fizyolojik, çevresel ve davranışsal değişikliklere yol açmaktadır (Cavallo ve ark., 2025).

Yapılan bir çalışmada (Weıss ve ark.,2005), geleneksel sağım sisteminden otomatik sağım sistemine geçişinde deneyimli ve deneyimsiz hayvanların üzerindeki davranış ve fizyolojik etkilerini araştırmışlardır. Araştırmacılar, ilk OSS ziyaretinde deneyimli ineklere kıyasla deneyimsiz ineklerde kalp atım hızının yükseldiğini, ayrıca deneyimsiz ineklerde ilk sağım esnasında süt atılımı bozulduğunu rapor etmişlerdir. Yapılan başka bir çalışmada (Hopster ve ark., 2002) Sağım esnasında davranışsal ve fizyolojik stres tepkilerindeki farklılıkları değerlendirmek için OSS ve geleneksel sağım sistemi kullanılarak karşılaştırılmış ve sonuç olarak OSS ineklerin düşük maksimum plazma adrenalin ve noradrenalin konsantrasyonları ve kalp atış hızına sahip olduğunu, OSS ineklerinde yüksek oksitosin düzeyleri sağım sonunda uzun sürdüğünü rapor etmişlerdir. Ayrıca daha fazla üretim daha fazla yem tüketimini gerektirdiğinden dolayı yem maliyetlerini de yükseltmektedir (Rotz ve ark., 2003). Şekil 2'de otomatik sağım sisteminin genel görünümü verilmiştir.



Şekil 2. Lely Astronaut A5 model otomatik sağım sisteminin genel görünümü (Ann Cristine EK, 2024).
Figure 2. *General view of the Lely Astronaut A5 model automatic milking system (photo by Ann Cristine EK, 2024).*



Şekil 3. Sağım İşlemi (Ann Cristine EK, 2024)
Figure 3. *Milking Process (photo by Ann Cristine EK, 2024)*

4. Otomatik Sağım Sisteminin Süt Verimi Üzerine Etkileri

OSS, günlük süt verimi ve laktasyon evresine göre kişiselleştirilmiş sağım sıklığına imkân sağlar. OSS, verimli ve tutarlı bir sağım süreci sağlayarak hayvan refahına öncelikli bir konum atfeder (Albayrak Delialioğlu ve Övgü Şen, 2025). OSS'nin kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte, birçok araştırmada bu teknolojinin süt verimi üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu rapor edilmiştir. Veysset ve ark. (2001), OSS kullanılan işletmelerde sağım sıklığının artmasına bağlı olarak süt üretiminde ortalama %3 civarında bir yükseliş görüldüğünü, sistemin iki yıldan uzun süredir kullanıldığı çiftliklerde ise bu oranın %9'a kadar ulaştığını bildirmiştir. Benzer şekilde, Erdman ve Varner (1995), robotlu sağım sistemleriyle elde edilen süt miktarının geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek olduğunu, günlük sağım sayısının ikiden üçe çıkarılmasıyla süt veriminde %6 ile %25 arasında artış sağlandığını ortaya koymuştur. Hogenboom ve ark. (2019) da OSS'nin sağım sıklığını artırarak süt veriminde %5–10'luk bir yükselişe yol açtığını ifade etmiştir. Ayrıca, Vijayakumar ve ark. (2017) tarafından yapılan bir araştırmada, OSS'nin sağım sıklığını artırması ile ineklerin süt verimi arasında anlamlı ve pozitif yönde etkilediği bildirilmiştir. Klei ve ark. (1997), laktasyon dönemini, erken (1-99 gün), orta (100-199 gün) ve geç (200-299 gün) olacak şekilde üç bölüme sınıflandırarak; yüz holstein inek, eşitlik açısından dengelenmiş dört ayrı grup olacak şekilde rastgele gruplandırılmıştır. Oluşturulan grupların sağım sayıları değiştirilerek kıyaslanmış ve laktasyondaki farklı dönem ve farklı gruplar birbiriyle kıyaslama yapıldığında süt veriminin yükseldiğini saptamışlardır. Genel olarak yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, OSS'nin sağım sıklığını artırarak süt verimini olumlu yönde etkilediği sonucuna ulaşılmaktadır. Süt veriminin artışı zorunlu sistemlere kıyasla serbest trafik robot ve inek başına günlük üretimin daha pozitif yönde seyrettiği ayrıca sağım sayısı ve süt sağım kutusunda geçirilen süredeki artışların da süt üretiminde artışla ilişkili olduğu ancak bu söz konusu iki parametrenin nadiren eş zamanlı arttığını gözlemlemişlerdir (Tremblay ve ark., 2016).

5. Otomatik Sağım Sisteminin Süt Kalitesi Üzerine Etkileri

OSS geleneksel sağım ile aynı sağım ilkelerini kullansa bile farklılıklar mevcuttur. OSS 24 saat kesintisiz çalışmaktadır ve sağım esnasında görsel kontrol gerekmez. İnekler sistemi gönüllü ziyaret eder ve bu durum

sağım sıklığında değişikliklere sebep olarak üretilen sütün kalitesini de etkileyebilmektedir (Yaranoğlu ve ark., 2023). Süt kalitesinin değerlendirilmesinde başlıca kriterler arasında somatik hücre sayısı, bakteri yükü ve protein içeriği yer almaktadır (Akıllı ve ark., 2014). Hale ve ark. (2003) ve Dahl ve ark. (2004) gibi bazı araştırmacılar, OSS'nin daha yüksek ortalama sağım sayısı sağlayarak sütteki somatik hücre sayısını önemli ölçüde azaltabileceğini bulmuşlardır. Ayrıca geleneksel bir sağımhaneye kıyasla, OSS kullanımı daha yüksek protein ve kazein içeriği ve daha düşük somatik ve toplam bakteri sayısıyla sonuçlanırken, yağ, donma noktası ve pH sistemlerden etkilenmemiştir (Sannino ve ark., 2018). Ancak De Koning ve ark. (2003), süt sığırcılığı işletmelerinde OSS'nin kullanılmaya başlanmasının ardından süt kalitesindeki değişimleri incelenmiş ve toplam bakteri sayısı, somatik hücre sayısı, donma noktası ve serbest yağ asitlerinde küçük fakat anlamlı bir artış gözlenmiştir. Bunların aksine Helgren ve Reinemann (2003), OSS sahip çiftlikler ile geleneksel çiftlikler arasında somatik hücre sayısında anlamlı bir fark görülmediğini ve OSS olan çiftliklerinden elde edilen sütün toplam bakteri sayısı geleneksel çiftliklerden elde edilen sütten daha düşük olduğu bildirmişlerdir. Aynı zamanda bir çiftliğin OSS kullandığı süre arttıkça hem somatik hücre sayısının hem de toplam bakteri sayısının azaldığına dair bazı kanıtlar mevcut olduğunu bildirmişlerdir. Göktepe ve ark. (2023), geleneksel sağım sistemi ve OSS kullanılarak elde edilen sütte bulunan aerobik bakteri sayısı (log10) otomatik sağım sisteminde (4,28) geleneksel sağım sistemine (4,83) kıyasla daha düşük çıktığını rapor etmişlerdir. Melin ve ark. (2004), geleneksel sağımda bakterilerin %65'i, OSS ise %95'inin uzaklaştırıldığı tespit etmişlerdir. Bu durum, OSS'de sağım öncesi meme başlarının otomatik olarak yıkanması, fırçalanması ve kurutulmasıyla ilgilidir. Böylece meme üzerindeki kir ve bakteriler daha etkili şekilde temizlenirken, geleneksel sağımda bu işlem elle yapıldığı için temizlik oranı daha düşüktür. Ayrıca OSS'de fazla sağımın önüne geçildiği için meme dokusu korunmakta meme enfeksiyonları azaltılabilmektedir.

6. Sonuç

OSS süt sığırcılığı işletmelerinde iş gücü ihtiyacını azaltması, hayvan refahını artırması ve süt verimi ile kalitesini olumlu yönde etkilemesi bakımından önemli bir teknolojik gelişme olarak öne çıkmaktadır. Özellikle sağım sıklığının artmasına bağlı olarak süt üretiminde artışlar elde edilmekle beraber somatik hücre sayısında düşüşler gözlenmekte ve süt hijyeni iyileşmektedir. Bununla birlikte yüksek kurulum maliyetleri, bakım ve işletim gereksinimleri, personelin teknolojiye adaptasyonu gibi faktörler bu sistemlerin yaygınlaşmasını sınırlayan başlıca dezavantajlardır. Ayrıca, artan süt üretimine bağlı olarak yem tüketiminin yükselmesi de ekonomik açıdan dikkat edilmesi gereken bir husustur.

Genel olarak değerlendirildiğinde, OSS geleneksel sağım yöntemlerine kıyasla hem üretici hem de hayvan açısından birçok avantaj sunmaktadır. Ancak bu avantajların sürdürülebilir bir şekilde elde edilebilmesi için işletme ölçeği, ekonomik koşullar, çiftçi eğitimi ve teknik destek gibi unsurların dikkate alınması gerekmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmaların, sistemlerin verimlilik ve kârlılığını artırmaya yönelik teknik iyileştirmelere ve farklı işletme koşullarında uzun dönemli performans değerlendirmelerine odaklanması önem arz etmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı/ Conflict of Interest
Yazarlar, çıkar çatışması veya kişisel ilişki bulunmadığını beyan etmektedirler./ The authors have no conflicts of interest to declare.

Finansal Destek/ Funding
Yazarlar, bu çalışma için finansal destek almadığını beyan etmiştir./ The authors declared that this study has received no financial support.

Hakem Değerlendirmesi/Peer-review
Dış bağımsız/Externally peer-reviewed.

Yazar Katkıları/Author Contributions: Concept/Tasarım-SK, ŞÇ; Dizayn/Design- SK, ŞÇ; Denetleme/Supervision-SK, ŞÇ; Kaynaklar/Resources-SK, ŞÇ; Veri Toplanması ve/veya İşlemesi/Data Collection and/or Processing-SK, ŞÇ; Analiz ve/ veya Yorum/Analysis and/or Interpretation- SK, ŞÇ; Literatür Taraması/Literature Search-SK, ŞÇ; Yazıyı Yazan/ Writing Manuscript-SK, ŞÇ; Eleştirel İnceleme/Critical Review-SK, ŞÇ.

Kaynakça

Albayrak, Delialioğlu, R., & Övgü, Şen, A. (2025). Prediction of Lactation Milk Yield in Simmental Cattle Milked with Robotic Milking System Using CHAID and CART Algorithms. Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences, 39(2), 476-486.

Akıllı, A., Atıl, H., & Kesenkaş, H. (2014). Çiğ süt kalite değerlendirmesinde bulanık mantık yaklaşımı. Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 20(2), 223–229.

Alıç, D., & Yener, S. M. (2006). Süt sığırcılığı işletmelerinde robotlu sağım sistemi. Tarım Bilimleri Dergisi, 12(4), 369–380.

Bach, A., & Cabrera, V. (2017). Robotic milking: Feeding strategies and economic returns. Journal of Dairy Science, 100(9), 7720–7728.

Anonymous. (2005). Device profile: DeLaval voluntary milking system 2005. DeLaval. https://linuxdevices.org/device-profile-delaval-voluntary-milking-system/ Erişim: (14.09.2025).

Bockhahn, J., & Terry, T. X. (2022). Robotic milking systems, Part 1: Overview of RMS. Dairy Environmental Systems Program.

Brouček, J., & ToNGeI', P. (2015). Adaptability of dairy cows to robotic milking. Slovak Journal of Animal Science, 48(2), 86-95.

Butler, D., Holloway, L., & Bear, C. (2012). The impact of technological change in dairy farming: Robotic milking systems and the changing role of the stockperson. Journal of the Royal Agricultural Society of England, 173(622), 1–6.

Cavallo, C., Amato, A., Lıotta, L., Mınutı, A., & Lopreıato, V. (2025). The adaptation in the first week to the automatic milking system influences long-term milk performance and behavior of Holstein cows. Slovak Journal of Animal Science, 58(1), 23-29.

Cogato, A., Brščić, M., Guo, H., Marinello, F., & Pezzuolo, A. (2021). Challenges and tendencies of automatic milking systems (AMS): A 20-years systematic review of literature and patents. Animals, 11(2), 356.

Coşkun, G., Şahin, Ö., & Aytekin, İ. (2023). Robotik sağımda sürü yönetimi. Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi, 10(3), 361–371.

Dahl, G. E., Wallace, R. L., Shanks, R. D., & Lueking, D. (2004). Hot topic: Effects of frequent milking in early lactation on milk yield and udder health. Journal of Dairy Science, 87(4), 882–885.

De Koning, K., Slaghuis, B., & van der Vorst, Y. (2003). Robotic milking and milk quality: effects on bacterial counts, somatic cell counts, freezing point and free fatty acids. Italian Journal of Animal Science, 2(4), 291-299.

De Koning, K., Vorst, V., & Meijering, A. (2001). Automatic milking: Experience and development in Europe. In Proceedings of the International Symposium on Automatic Milking. Lelystad, The Netherlands

Erdman, R. A., & Varner, M. (1995). Fixed yield responses to increased milking frequency. Journal of Dairy Science, 78(5), 1199–1203.

Gearin, M. (2001). Robot revolution for dairy industry. Landline: Australia's National Rural Affairs Weekly.

Göktepe, A. E., Akçay, A., & Gürler, H. (2023). Otomatik/robotik ve geleneksel makineli sağımın somatik hücre ve aerobik kültür sayısı üzerine etkisinin değerlendirilmesi. Veteriner Hekimler Derneği Dergisi, 94(2), 156-160.

Graves, R. E. (2002). A primer on robotic milking systems (G105). College of Agricultural Sciences, Pennsylvania State University.

Halachmi, I., Adan, I. J. B. F., van der Wal, J., Heesterbeek, J. A. P., & van Beek, P. (2000). The design of robotic dairy barns using closed queueing networks. European Journal of Operational Research, 124(3), 437–446.

Hale, S. A., Capuco, A. V., & Erdman, R. A. (2003). Milk yield and mammary growth effects due to increased milking frequency during early lactation. Journal of Dairy Science, 86(6), 2061–2071.

Helgren, J. M., & Reinemann, D. J. (2003). Survey of milk quality on United States dairy farms utilizing automatic milking systems. In Proceedings of the 2003 ASAE Annual Meeting (Paper No. 033116, pp. 1–10).

Hogenboom, J. A., Pellegrino, L., Sandrucci, A., Rosi, V., & D'Incecco, P. (2019). Invited review: Hygienic quality, composition, and technological performance of raw milk obtained by robotic milking of cows. Journal of Dairy Science, 102(9), 7640–7654.

Hopster, H. R. M. B., Bruckmaier, R. M., Van der Werf, J. T. N., Korte, S. M., Macuhova, J., Korte-Bouws, G., & Van Reenen, C. G. (2002). Stress responses during milking; comparing conventional and automatic milking in primiparous dairy cows. Journal of Dairy Science, 85(12), 3206-3216.

Jacobs, J. A., & Siegford, J. M. (2012). Invited review: The impact of automatic milking systems on dairy cow management, behavior, health, and welfare. Journal of Dairy Science, 95(5), 2227–2247.

Kıyıcı, J. M. (2018). Türkiye'de Süt Sağım Teknolojisi Projeksiyonu. Alinteri Journal of Agriculture Science, 33(1), 7-11.

Klei, L. R., Lynch, J. M., Barbano, D. M., Oltenacu, P. A., Lednor, A. J., & Bandler, D. K. (1997). Influence of milking three times a day on milk quality. Journal of Dairy Science, 80(3), 427-436.

Kulaç, S., & Ünal, H. (2025). Türkiye'deki Robotik Sağım Sistemli Çiftliklerin Yönetim Uygulamalarının İncelenmesi. Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences, 12(2), 285-296.

McCalmon, A., Eckelkamp, L., & Burns, R. (2023). Automatic Milking System Considerations (UT Extension Publication W1188). University of Tennessee Institute of Agriculture.

Melin, M., Wiktorsson, H., & Christianson, A. (2004). Teat cleaning efficiency before milking in DeLaval VMS versus conventional manual cleaning. In A. Meijering, H. Hogeveen, & C. J. A. M. de Koning (Eds.), Automatic milking: A better understanding (pp. 117–122). Wageningen Academic Publishers.

Oostra, H. (2000). Combining video observations with data files from automatic milking. In Proceedings of the 3rd International Conference on Methods and Techniques in Behavioral Research. Nijmegen, The Netherlands.

Ordolff, D. (2001). Introduction of electronics into milking technology. Computers and Electronics in Agriculture, 30(1–3), 125–149.

Ozella, L., Brotto Rebuli, K., Forte, C., & Giacobini, M. (2023). A literature review of modeling approaches applied to data collected in automatic milking systems. Animals, 13(12), 1916.

Reinemann, D. J. (2002). Application of cleaning and cooling principles to robotic milking. In Proceedings of the DeLaval Inaugural Symposium. Kansas City, MO.

Rodenburg, J. (2002). Strategies for incorporating robotic milking into North American herd management. Ontario Ministry of Agriculture and Food. Madison, WI.

Rotz, C. A., Coiner, C. U., & Soder, K. J. (2003). Automatic milking systems, farm size, and milk production. Journal of Dairy Science, 86(12), 4167-4177.

Sannino, M., Faugno, S., Crimaldi, M., Di Francia, A., Ardito, L., Serrapica, F., & Masucci, F. (2018). Effects of an automatic milking system on milk yield and quality of Mediterranean buffaloes. Journal of Dairy Science, 101(9), 8308–8312.

Schillingmann, D., & Mottram, T. T. (1993). Automatic milking: Development of a robot system and ultrasonic teat location. Journal of Agricultural Engineering Research, 55(1), 69–78.

Siewert, J. M., Salfer, J. A., & Endres, M. I. (2018). Factors associated with productivity on automatic milking system dairy farms in the Upper Midwest United States. Journal of dairy science, 101(9), 8327-8334.

Sitkowska, B., Piwczyński, D., Aerts, J., & Waśkowicz, M. (2015). Changes in milking parameters with robotic milking. Archives Animal Breeding, 58(1), 137-143.

Svennersten-Sjaunja, K. M., & Pettersson, G. (2008). Pros and cons of automatic milking in Europe. Journal of animal science, 86(suppl_13), 37-46.

Tremblay, M., Hess, J. P., Christenson, B. M., McIntyre, K. K., Smink, B., van der Kamp, A. J., ... & Döpfer, D. (2016). Factors associated with increased milk production for automatic milking systems. Journal of Dairy Science, 99(5), 3824-3837.

Tse, C., Barkema, H. W., De Vries, T. J., Rushen, J., & Pajor, E. A. (2017). Effect of transitioning to automatic milking systems on producers' perceptions of farm management and cow health in the Canadian dairy industry. Journal of Dairy Science, 100(3), 2404–2414.

Tse, C., Barkema, H. W., De Vries, T. J., Rushen, J., Vasseur, E., & Pajor, E. A. (2018). Producer experience with transitioning to automatic milking: Cow training, challenges, and effect on quality of life. Journal of Dairy Science, 101(10), 9599–9607.

Türkyılmaz, M.,K., (2005). Süt sığırcılık işletmelerinde sağım robotu kullanımı. Erciyes Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 2(1), 61–65.

Veysset, P., Wallet, P., & Prugnard, E. (2001). Automatic milking systems: Characterising the farms equipped with AMS, impact and economic simulations. INRA, France.

Vijayakumar, M., Park, J. H., Ki, K. S., Lim, D. H., Kim, S. B., Park, S. M., ... & Kim, T. I. (2017). The effect of lactation number, stage, length, and milking frequency on milk yield in Korean Holstein dairy cows using automatic milking system. Asian-Australasian journal of animal sciences, 30(8), 1093.

Yaranoğlu, B., Ozdemir, S. S., Tavsanli, H., Avcilar, O. V., Guner, T. E., Camliyurt, B., & Sihlaroglu, M. (2023). Investigation of dairy farms using different milking systems in Balıkesir province in terms of bulk tank milk quality, somatic cell count and total bacteria count. Eurasian Journal of Veterinary Sciences, 39(2), 123–134.

Weiss, D., Moestl, E., & Bruckmaier, R. M. (2005). Physiological and behavioural effects of changeover from conventional to automatic milking in dairy cows with and without previous experience. Vet. Med. Czech, 50, 253-261.

Anatolia Science and Technology Journal (ASTEJ)

ASTEJ, 2025, 2(1)
DOI: 10.5281/zenodo.17427516
Derleme Makalesi/ Review Article

Erimiş Tuz Reaktörleri'nin (MSR) Tarihsel Gelişimi, Teknolojik İlerlemeleri ve Gelecek Perspektifleri

Mürselat YÜRÜMEZ[1*]
[1]Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, 25240, Erzurum, Türkiye

Özet

Erimiş Tuz Reaktörleri (Molten Salt Reactor/MSR), nükleer enerjide kalıplaşmış anlayışları değiştiren ve sürdürülebilir enerjiye geçişte yenilikçi çözümler sunan önemli bir konsepttir. İlk olarak 1950'lerde Oak Ridge National Laboratory'de (ORNL) gerçekleştirilen Aircraft Reactor Experiment (ARE) ve Molten-Salt Reactor Experiment (MSRE) projeleriyle uygulanabilirliği kanıtlanan bu teknoloji, düşük basınçta güvenli işletim, yüksek sıcaklıklarda verimli enerji üretimi ve çevrim içi yakıt işleme potansiyeli ile öne çıkmaktadır. MSRE'nin Uranyum-233 ile başarılı çalışmaları, Toryum tabanlı yakıt çevrimlerinin uygulanabilir olduğunu kanıtlamıştır. Günümüzde nükleer kapasitenin büyük kısmı hafif su reaktörü (Light Water Reactor/LWR) ve basınçlı su reaktörü (Pressurized Water Reactor/PWR) tipi reaktörlerden oluşuyor olsa da MSR'ler atmosfer basıncına yakın koşullarda çalışıyor olması sayesinde daha güvenilir ve 600–800 °C çıkış sıcaklıklarıyla daha verimlidir. Ayrıca hidrojen üretimi ve endüstriyel ısı uygulamalarında da kullanılma potansiyeline sahiptir. Bu özelliklerinin yanında toryum tabanlı yakıt döngüsü, geniş coğrafi rezervleriyle enerji arz güvenliğini artırmakta nükleer silahlanma riskini ve uzun ömürlü atıkların azaltılmasınada katkı sunmaktadır. Günümüzde araştırmalar, MSR'ın tarihsel temellerine ticari bir boyut kazandırmaktadır. Çin'de yürütülen TMSR-LF1 projesi, Avrupa'daki SAMOFAR projesi ve ABD'deki IMSR ile ThorCon tasarımları; çevrim içi yakıt yönetimi, hızlı spektrumda atık yakma, modüler inşa ve düşük maliyetli enerji arzı gibi yenilikçi yaklaşımlar geliştirmektedir. Bununla birlikte, MSR teknolojisi hala bazı kritik sorunlara sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda korozyonu, tuz kimyasının kararlılığı, fisyon ürünlerinin uzaklaştırılması ve lisanslama süreçlerindeki belirsizlikler çözüm üretilmesi gereken başlıca alanlardır. Böylece MSR'ler, yalnızca elektrik üretiminde değil, karbon nötr hedeflere katkı sağlayacak çok yönlü enerji çözümleriyle küresel enerji dönüşümünde stratejik bir rol üstlenmesi şaşırtıcı olmaz. Ancak bunun gerçekleşmesi için malzeme bilimi, tuz kimyası ve regülasyon alanlarında uluslararası iş birliği ve yoğun araştırmalar gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Erimiş tuz reaktörü (MSR), toryum yakıt çevrimi, enerji güvenliği, pasif güvenlik sistemleri, karbon nötr enerji

The Historical Development, Technological Advances and Future Perspectives of Molten Salt Reactors (MSR)

Mürselat YÜRÜMEZ [1*]
[1]Atatürk University, Faculty of Engineering, Electrical and Electronics Engineering, 25240, Erzurum, Türkiye

Abstract

Molten Salt Reactors (MSR) are an important concept that challenges conventional thinking in nuclear energy and offers innovative solutions for the transition to sustainable energy. First demonstrated in the 1950s through the Aircraft Reactor Experiment (ARE) and Molten-Salt Reactor Experiment (MSRE) projects at Oak Ridge National Laboratory (ORNL), this technology stands out for its safe operation at low pressure, efficient energy production at high temperatures, and potential for in-cycle fuel processing. The MSRE's successful work with Uranium-233 has proven the feasibility of Thorium-based fuel cycles. Although most of today's nuclear capacity consists of light water reactors (LWR) and pressurized water reactors (PWR), MSRs are more reliable and efficient with outlet temperatures of 600–800 °C, thanks to their operation at near atmospheric pressure. They also have the potential to be used in hydrogen production and industrial heat applications. In addition to these features, the thorium-based fuel cycle contributes to increasing energy supply security with its extensive geographical reserves, reducing the risk of nuclear proliferation, and minimizing long-lived waste. Today, research is adding a commercial dimension to the historical foundations of MSR. The TMSR-LF1 project in China, the SAMOFAR project in Europe, and the IMSR and ThorCon designs in the US are developing innovative approaches such as online fuel management, fast spectrum waste burning, modular construction, and low-cost energy supply. However, MSR technology still faces some critical challenges. Corrosion at high temperatures, the stability of salt chemistry, the removal of fission products, and uncertainties in licensing processes are the main areas requiring solutions. Consequently, it would not be surprising for MSRs to play a strategic role in the global energy transition, not only in electricity generation but also through versatile energy solutions that contribute to carbon neutrality goals. However, for this to happen, international collaboration and intensive research in materials science, salt chemistry, and regulation are required.

Keywords: Molten salt reactor (MSR), thorium fuel cycle, energy security, passive safety systems, carbon-neutral energy

* Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: Mürselat YÜRÜMEZ (Lisans), e-posta: murselatyr@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2779-6424
**Geliş/Received: 25/09/2025, Düzeltme/Revised: 15/10/2025, Kabul/Accepted: 17/10/2025, Yayınlanma/Published: 24/10/2025.

1. Giriş

MSR'ler, nükleer reaktör tasarımları içerisinde stratejik bir konuma sahip olup, nükleer enerji teknolojilerinde kalıplaşmış anlayışları değiştirerek nükleer teknolojilerin geleceğine yön verebilecek potansiyele sahip öncü bir konsept olarak öne çıkmaktadır. Konseptin kökeni, 1950'li yıllarda ORNL tarafından gerçekleştirilen ve süpersonik uçaklarda gerekli olan enerjinin sıvı yakıtlı reaktör ile karşılanması fikri ile ortaya çıkan ARE ile atılmıştır. Burada erimiş tuzun yüksek sıcaklıklarda ve düşük basınç altında güvenli biçimde kullanılabileceği kanıtlanmıştır (Bettis et al., 1957). ARE projesin ardından 1965–1969 yıllarında yürütülen MSRE, Uranyum-235 ve Uranyum-233 ile kritik işletimde başarıya ulaşmış ve sıvı yakıtın yüksek sıcaklıklarda kararlı bir yapıda sürkile olacağını aynı zamanda ise soğutucu olarak kullanabileceğini kanıtlamıştır (Rosenthal et al., 1970). Bu öncü deneyler ışığında yalnızca katı yakıtlı reaktörler ile kısıtlı kalınmayacağı aynı zamanda sıvı yakıtlı tasarımların teknik olarak mümkün olduğu gösterilmiştir.

Klasik hafif su reaktörleri (LWR) ve onların alt türü olan basınçlı su reaktörleri (PWR), günümüzde dünya çapında nükleer kapasitenin temelini oluşturur. PWR'ler ticari reaktörlerin yaklaşık olarak %70'ini oluşturmakta ve bu sayede dünya genelinde en yaygın tercih edilen reaktör tipidir (Schneider & Froggatt, 2023). PWR tasarımlarında uranyum oksit yakıt peletleri ve yüksek basınç altında su kullanılırken, MSR'ler erimiş tuz içinde çözünmüş yakıt kullanır ve yaklaşık olarak atmosfer basıncına yakın koşullarda işletilebilmektedir. Bu fark, basınç kaynaklı kaza risklerini minimum seviyelere indirmektedir (LeBlanc, 2010). Ayrıca MSR'ler 600–800 °C sıcaklık aralığında çalışarak hem daha yüksek termodinamik verimlilik performansı ortaya koyarken hem de hidrojen üretimi ve endüstriyel ısı sağlama gibi yüksek sıcaklık gerektiren uygulamaları da destekleme potansiyeline sahiptir (Serp et al., 2014; Wulandari et al., 2023). Erimiş tuzda yakıtın çevrim içi işlenebilmesi, uzun ömürlü atık miktarını azaltmaktadır ve toryum tabanlı yakıt döngülerini mümkün kılar (Ignatiev et al., 2019). MSR, LWR ve PWR'nin farklılıklarını ayrıntılı biçimde Tablo 1'de kıyaslanmıştır.

Tablo 1. MSR ve PWR reaktörlerinin özelliklerinin karşılaştırması (Barré et al., 2016)
Table 1. *Comparison of the characteristics of MSR and PWR reactors*

Özellik	MSR	PWR
Çalışma basıncı	Atmosfere yakın	Çok yüksek (155 bar=15-16 MPa)
Çıkış sıcaklığı	600–800 °C	300–330 °C
Soğutucu / Yakıt	Erimiş tuz / sıvı yakıt	Basınçlı su / katı yakıt
Güvenlik geri beslemeleri	Negatif sıcaklık katsayısı	Boşluk katsayısı riski
Yakıt çevrimi	Toryum çevrimi, çevrim içi arıtım	Uranyum zenginleştirme
Atık profili	Daha düşük uzun ömürlü atık	Yüksek uzun ömürlü atık
Gelişim durumu	Ar-Ge	Ticari

MSR'lerin tekrar gündeme gelmesinde yalnızca teknik avantajlar değil, aynı zamanda enerji güvenliği ve jeopolitik dinamikler gibi faktörlerde rol oynamaktadır. Geleneksel uranyum tedarik zinciri sınırlı sayıda tedarikçi ülkeye (özellikle Rusya ve Kanada) bağlıdır. Rusya, küresel zenginleştirme kapasitesinin yaklaşık %40'ını kontrol etmekte ve yakıt pazarında stratejik anlamda önemli bir konumda bulunmaktadır (World Nuclear Association, 2025). Uranyum zenginleştirme kapasitesini Amerika özelinde değerlendirecek olursak Amerika'nın mevcut ticari reaktörlerinin ihtiyaç duyduğu yakıtın yalnızca %5'i yerli kaynaklarınca karşılanabilmektedir geri kalan kısmı ise ithal edilmektedir (World Nuclear Association, 2024). Bu durum, enerji güvenliği açısından önemli bir jeopolitik riskler oluşturmaktadır. Ancak uranyum rezervlerine kıyasla toryum rezervleri daha geniş coğrafi dağılıma sahiptir; Hindistan, Türkiye, Brezilya ve ABD gibi ülkeler büyük toryum potansiyeline sahiptir MSR'lerin toryum tabanlı çevrimleri kullanabilmesi nükleer yakıt tedarikinde çeşitliliği artırarak stratejik bağımsızlığa katkı sunabilir. Bununla birlikte, günümüzün en büyük sorunlarından. birisi olan iklim değişikliği ile mücadele bağlamında düşük karbonlu enerji üretimin önemi giderek artmaktadır. MSR'larda elektrik ve ısı üretimi nükleer fisyona dayandığı için yakıt yanması sürecinde CO2 salınımı gerçekleşmez buna ek olarak toryum döngüsünde yüksek yanma oranı ve düşük oranda uzun ömürlü radyoaktif atık üretimi gibi faktörler göz önünde tutulduğunda hem radyoaktif atık üretimi hem de karbon emisyonlarını azaltma potansiyeli sayesinde küresel iklim politikalarıyla uyumlu çevreci bir seçenek olarak öne çıkmaktadır (Davidson, 2022). Çevreci özelliklerinin yanı sıra yüksek sıcaklıkta kararlı çalışabilmesi, yalnızca elektrik üretiminde değil sahip olduğu çoklu enerji çıkışı potansiyeli sayesinde aynı

zamanda hidrojen üretimi, sentetik yakıt sentezi ve proses ısısı sağlama gibi endüstriyel uygulamalarda da kullanılma potansiyeli olduğunu göstermektedir (Fox et al., 2020).

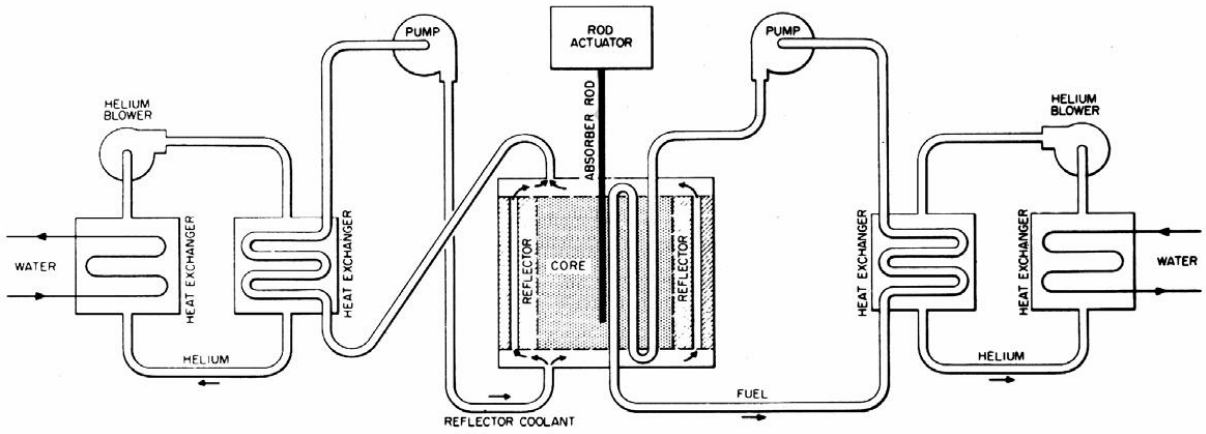
Teknik açıdan ise son yıllarda özellikle malzeme bilimi ve termohidrolik analiz yöntemlerinde önemli ilerlemeler meydana gelmiştir. LiF–BeF_2 gibi tuz karışımlarının korozyon etkileri üzerine yapılan çalışmalar, yapısal malzemelerin yüksek sıcaklık ve radyasyon koşullarında davranışına ışık tutmaktadır (Young et al. 2018). Ayrıca gelişen simülasyon yöntemleri sayesinde MSR'lerin akışkan dinamiği ve güvenlik analizlerinde daha gerçekçi öngörüler sunarak tasarımların son halini almasına katkı sağlamaktadır (Leandro et al., 2019). Bu güncel bulgular MSR'lerin teknik açıdan da hızla geliştiğini ortaya koymaktadır.

Bu nedenlerle Generation IV International Forum (GIF), MSR'leri 4. nesil reaktör tasarımları arasında öncelikli bir alan olarak belirlemiştir (Serp et al., 2014). Dünya üzerinde çeşitli ülklere de yürütülen MSR programları, Çin'de yürütülen TMSR, Avrupa'daki SAMOFAR projesi ve Kuzey Amerika'da geliştirilen IMSR programı, teknolojinin araştırma aşamasından ticarileşmeye doğru hızla ilerlediğini göstermektedir (Fan & Guo, 2024; Allibert et al., 2018).

MSR'ler tarihsel ORNL deneylerinden günümüzdeki enerji güvenliği, iklim politikaları ve jeopolitik stratejilere uzanan çok boyutlu bir bakış acısıyla ele alınarak yeniden gündeme gelmiştir. Ancak MSR'lar hala ticari uygulanabilirliğini sağlayamamış ve literatürde hala çözülmesi gereken sorunları vardır bunları ele alacak olursak, malzeme dayanımı, uzun dönemli yakıt tuzu kararlılığı, toryum döngüsünün ekonomik fizibilitesi ve küresel yakıt arz zincirinin çeşitlendirilmesi gibi faktörlerdir. Bu çalışmada amacımız, söz konusu eksiklikleri de sistematik biçimde ele alarak MSR'lerin bilimsel açıdan gelecekteki potansiyelini değerlendirmektir.

2. Tarihsel ve Teorik Arka Plan

MSR fikri, 1950'li yıllarda ORNL tarafından geliştirilen deneyler sonucunda ortaya çıkmıştır. Bu fikrin ilk önemli adım 1954 yılında geliştirilen ARE projesi olmuştur. Bu proje, süpersonik uçaklara güç sağlamak için tasarlanmış ve bu deneyde yakıt olarak UF_4, taşıyıcı tuz olarak ise FLiBe kullanılmıştır. ARE, yakıt çıkışında yaklaşık olarak 860 dereceye ulaşmış; düşük sistem basınçlarında çalışacak şekilde tasarlanmış ve totalde 221 saat nükleer işletim gerçekleştirmiştir. Bu işletme sürecinin son 74 saatinde ise MW düzeyinde, toplamda ise 96 MW.h (Bettis et al., 1957). Bu deney, erimiş tuzların yüksek sıcaklıklarda güvenle kullanılabileceğini kanıtlamış ve bu konudaki soruları ortadan kaldırmıştır.



Figür 1. ARE'nin tasarım diyagramı
Figure 1. *Design diagram of ARE*

Günümüz MSR fikrinin tarihsel anlamda bugünlere gelmesinde ise bir diğer önemli adım 1965-1969 yılları arasında geliştirilen MSRE projesi olmuştur. Bu projenin deneylerinde reaktör 7 MWt güç seviyesinde çalıştırılmış, başlangıçta uranyum-235 kullanılmasında temel faktör bilinen bir yakıt ile sistemin güvenliğini test edilmesidir. Daha sonra ise başka bir reaktörde toyrum döngüsü ile üretilen uranyum-233 kullanılarak toryum çevrimine yönelik hem kritik veriler elde edilmiş hem de uranyum-233 ile kararlı bir fisyon zinciri başlatılabildiği kanıtlanmıştır. MSRE'nin önemli katkılarından birkaçını ele alacak olursa grafit moderatör ile termal spektrumda kararlı reaktivite sağlanabileceğini ve bunun toryum döngüsünde kullanılabileceği kanıtlanmıştır. Bir diğer önemli katkı ise, fisyon sonucu ortaya çıkan Ksenon-135 gibi nötron zehirlerinin

helyum sıyırma yöntemiyle uzaklaştırılabilmesidir. Bu uygulama, geçici reaktivite kayıplarını azaltarak reaktörün reaktivite yönetimini kolaylaştırmış ve yakıt verimliliğinin artırılabileceği sonucuna varılmıştır. MSRE'nin dört yıllık çalışma süresinde birçok deney yapılmış ve geniş bir veri setleri elde edilmiştir. Bu deneyler arasında çevrim içi yakıt işleme amacıyla yürütülen florlandırma deneyi de yer almaktadır. Bu deney ile ilk kez çevrim içi yakıt işleme fikri test edilmiştir ve bu deneyler sonucunda ise bu yöntemin uygulanabilirliği doğrulanmıştır. MSRE'nin dört yıllık çalışma sürecinde oluşturulan veri seti, yüksek sıcaklıklarda malzeme davranışları ve korozyon sürecine ilişkin kritik verilerin toplanmasını sağlamıştır (Rosenthal et al., 1970; Rosenthal et al., 1972)

Bu iki deney ile birlikte MSR teknolojisinin güvenlik ve yakıt çevrimi açısından yenilikçi potansiyeli ortaya koymaktadır. Ancak MSR'ın gelişim sürecini etkileyen en önemli faktörlerden biri de 1970'lerde uranyum fiyatlarının düşük olması ve hızlı çoğaltıcı reaktörlere odaklanılmasıydı bu da MSR araştırmalarının uzun bir süre önceliğini yitirmesine neden olmuştur (LeBlanc, 2010). MSR'lerın fiziksel ve kimyasal temellerini ele alacak olursak atmosfere yakın basınçta çalıştığından yüksek basınç dayanımına duyulan ihtiyaç azalır; 600–800 °C aralığında olan çıkış sıcaklıkları ise yüksek verimli Brayton çevrimi ve endüstriyel ısı uygulamaları ile de uyumludur (Serp et al., 2014; Fox et al., 2020). MSR'lerde yakıtın sıvı hâlde olması, nötronik, termal, kimyasal süreçlerin birbirinden etkilenmesine yol açar. Yanma süreci sırasında izotopik dengesi ile kimyasal denge birlikte değişir; bu etkileşim reaktörün güvenlik ve ekonomik işletim potansiyeli açısından kritik bir faktördür (Walker, 2023). MSR'ların yakıt ve birincil soğutucusu olarak kullanılan tuz karışımlarını ele alacak olursak, FLiBe düşük buhar basıncı ve düşük nötron absorbsiyonu ile yüksek nötron ekonomisi sayesinde öne çıkmaktadır. FLiNaK ise berilyumun toksik etkisinin sistemden uzaklaştırılmasına rağmen benzer termofizik performans sunar. Güncel çalışmalar ısıl iletkenlik, viskozite, difüzyon parametreleri için daha dar belirsizlik aralıkları raporlayarak tasarım hesaplarının güvenilirliğini artırmıştır (Rybin et al., 2024).

MSR'lerdeki önemli sorunlardan biri yakıt tuzunun korozyon etkisidir. Bu soruna çözüm olarak Hastelloy-N gibi özel alaşımlar geliştirilmiştir. Ancak günümüzde halen özellikle krom çözünmesi ve tellür nedeniyle meydana gelen gevrekleşme sorunları devam etmektedir. (Young et al., 2018). Yakıt içerisinde mevcut ulan istenmeyen miktarda bulunan oksijen korozyonu hızlandırması nedeniyle redoks potansiyelinin sürekli olarak izlenmesini gerekli kılmaktadır. Bu potansiyelin HF/H_2 tamponu veya Be(0)/Be(II) çiftleriyle dengelenmesi, malzeme ömrünü uzatmaktadır (Wang et al., 2021; Liu et al., 2023).

MSR'larda sıcaklık artışıyla yoğunluk ve moderasyon azalır negatif sıcaklık katsayısı MSR'lere pasif bir güvenlik sistemi kazandırır. MSR'ların sahip olduğu bir diğer pasif önlem ise Freeze-plug (eriyen tıkaç) boşaltma sistemidir. Bu sistem sayesinde çekirdek içerisindeki yakıt tuzu acil bir durumda eriyebilen tıpa sayesinde yerçekimiyle güvenli tanklara transfer edilebilir (Serp et al., 2014; Ignatiev et al., 2019).

Toryum çevriminde Toryum-232'den Protaktinyum-233 elde edilir ve bundan da Uranyum-233 elde edilir, sıvı yakıt mimarisi Protaktinyum-233'ün çevrim içi ayrımını mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşım, Uranyum-233 üretim verimini artırmakta ve toryum çevriminin sürdürülebilirliğini desteklemektedir (Delpech et al., 2009; Huo et al., 2022). Toryum yakıt çevrimi açısından dikkat çeken önemli avantajlar arasında ise kaynak esnekliği ve uzun ömürlü aktinitlerin azaltılabilmesidir yer almaktadır (Ignatiev et al., 2019; Jyothi et al., 2023).

MSR'ları ölçeklenebilirlik ve ekonomik uygulanabilirlik kapsamında ele aldığımızda ise, sürekli kimyasal işleme ve redoks izleme gibi proses karmaşıklıkları işletme maliyetlerini belirleyici faktörlerdir. Prototip (First of a Kind/ FOAK) tesislerden sonraki nesil tesislere (Next of a Kind/NOAK) geçişte maliyet düşüşleri olması beklenmekle birlikte, literatürde hala belirsizliğini koruyan maliyet öngörüleri olduğu vurgulamaktadır (Abou-Jaoude, 2023). Ayrıca, yakıt tuzlarının nükleer saflıkta üretimi ve malzeme nitelendirmesi sermaye ve işletme maliyetleri üzerindeki etkisini sürdürmeye devam etmektedir. Bu nedenle endüstriyel ölçek için standartlaşmış kimyasal akış şemaları ve kalıcı kalite güvencesi önemli gereksinimler arasında yerini korumaktadır (Walker, 2023).

Güncel olarak yürütülen programlar önemli jeopolitik referanslar sunmaktadır. Çin'de TMSR-LF1 prototipi kapsamında toryum-tuz araştırmaları hız kazanmaya devam etmekte olup, program MSR'lerin yakıt ve güvenlik konseptlerini pilot olarak sınamayı hedeflemektedir (Fan & Guo, 2024). Avrupa'da yürütülen çalışmalarda ise SAMOFAR projesi aracılığıyla MSFR için savunma hatları yaklaşımıyla güvenlik metotları

geliştirilmiş; boşaltma sistemleri, reaktivite kontrolü ve çok-fizikli doğrulama simülasyonları ile sistematik çıktılar elde edilmiştir (Beils et al., 2019).

MSR'ler, düşük basınçta güvenli işletim ve yüksek sıcaklık verimliliği gibi mühendislik üstünlüklerinin yanı sıra enerji güvenliği tartışmalarında da önemli bir konuma sahiptir. Enerji güvenliği, "hayati enerji sistemlerinin düşük kırılganlığı" olarak tanımlanmakta ve üç ana başlık altında incelenmektedir bu başlıklar, egemenlik/jeopolitik, dayanıklılık/altyapı ve sürdürülebilirlik/çevre başlıklarıdır (Cherp & Jewell, 2014). Bu bağlamda Rusya'nın dönüştürme ve zenginleştirme kapasitesindeki yüksek payı (yaklaşık %38 dönüşüm, %46 zenginleştirme), birçok ülkenin yakıt döngüsü konusunda Rusya'ya bağımlılıklarını gün yüzüne çıkarmıştır. Bu durum, yakıt çeşitlendirmesi, yerelleştirilmiş tedarik ve ileri reaktör seçenekleri (MSR dahil) üzerinden yeni politika arayış sürecini hızlandırmaktadır (Szulecki & Overland, 2023).

MSR'lerin enerji güvenliğine katkısı ise üç boyutta ele alınabilir. Teknik açıdan, negatif reaktivite katsayıları ve pasif boşaltma gibi altyapı sistemleri sayesinde gelişmiş bir güvenlik sunmaktadır (Serp et al., 2014; Ignatiev et al., 2019). Yakıt döngüsü boyutunda ise toryum bazlı seçenekler jeolojik ve jeopolitik dağılım bakımından arz esnekliği sağlamakta ve atık envanterini azaltma potansiyeline sahiptir (Yüksel et al., 2023; Jyothi et al., 2023). Politika ve jeopolitik açıdan ise, yakıt ve hizmet tekelleşmesinin risklerine karşı çeşitlendirme ve yerelleşme stratejileriyle uyumludur. Bu Avrupa'da MSFR güvenlik metodolojilerinin kurumsallaşması katkı sağlamaktadır. Araştırma motivasyonu bakımından literatür, uzun dönemli malzeme dayanımı, çevrim içi kimyasal işlemlerin endüstriyel ölçeğe taşınması ve ekonomik belirsizliklerin ortadan kaldırılması halen kritik bir önem taşımaktadır (Walker, 2023; Szulecki, 2023; Beils et al., 2019).

3. Modern Teknolojik Yaklaşımlar ve Uygulamalar

ARE ve MSRE deneyleri sonucunda elde edilen, düşük basınçta çalışma, sıvı yakıt çevrimi ve negatif sıcaklık katsayıları gibi tasarım standartları günümüz modern tasarımlarına aktarılmıştır (Serp, et al., 2014). Günümüzde ise Çin, Avrupa ve ABD merkezli programlar, bu temellerden yola çıkarak daha geniş ölçekli ve ticari uygulanabilir tasarımlara dönüştürmektedir.

Çin'in TMSR-LF programı kapsamında 2021'de işletmeye alınan TMSR-LF1 prototipinde (2 MWt), toryum tabanlı yakıt çevrimi için FLiBe esaslı bir tuz kullanılarak test edilmektedir (Fan & Guo, 2024). Çin'in bu projede hedefi 373 MWt ölçeğinde ticari bir reaktör olup ayrıca enerji güvenliği ve karbonsuzlaştırma politikalarıyla uyumlu bir vizyon ortaya koymaktır (Alang, 2023).

Avrupa'da yürütülen SAMOFAR projesi (2015–2019), erimiş tuz hızlı reaktörü (Molten Salt Fast Reactor /MSFR) konseptini güvenlik ilkeleri doğrultusunda geliştirmiştir. Bu kapsamda, cok katmanlı güvenlik yaklaşımı ile nötron taşınımı, fisyon ürünlerinin davranışı ve çevrim içi yakıt işleme senaryoları ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir (Beils et al., 2019). Sonraki araştırmalar ise, MSFR'nin plütonyum ve diğer uzun ömürlü aktinitleri yakma kapasitesi ortaya koyulmuş, bu özelliği ile de Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın (European Green Deal/EGD) 2050 karbon nötr hedefleriyle uyumlu olduğunu kanıtlanmıştır (Allibert et al., 2020).

ABD'de ise bu süreçte özel sektör de yer almakta ve ticari çözümler geliştirmektedir. Terrestrial Energy'nin IMSR tasarımı, 400 MWt güçte olup kartuş tipi yakıt yönetim sistemi ile modüler işletim kolaylığı sağlamaktadır (Carter et al., 2020). ThorCon ise 500 MW ölçekli tasarımlarında, reaktör modüllerini gemi yapımında kullanılan büyük ölçekli çelik konstrüksiyon yöntemleri ile doğrudan tersanelerde üretilip sonrasında ise sahaya taşıyarak kurmayı hedefleyen inşa yaklaşımını benimsemiştir bu yöntemin terixh edilmesinde ise ana faktör sermaye maliyetini düşürmektir.

MSR'ler, literatürde hem güvenlik hem de sürdürülebilirlik açısından öne çıkan avantajlar sunmaktadır. Bu güvenlik faktörlerinden negatif sıcaklık katsayısı özelliği ele alacak olursak sıcaklık artıkça reaktivitenin doğal olarak düşmesi, sistemin kendini dengeleyerek kararlı bir yapıya geçmesini sağlamaktadır (Ignatiev et al., 2019). Ayrıca, atmosfer basıncında çalışması sayesinde PWR tipi reaktörlerde karşılaşılan basınç kapı riskleri ortadan kalkmaktadır bunlara ek olarak sıvı yakıt sayesinde pasif soğutmaya uygun olması önemli bir tasarım üstünlüğü oluşturmaktadır (Serp et al., 2014). Toryum yakıt döngüsü kullanımı ise ağır aktanitlerin üretimini azaltmakta nükleer silah üretimini sınırlamakta ayrıca uzun vadeli radyotoksisiteyi yaklaşık %60–70 oranında azaltarak atık yönetiminde büyük bir avantaj sunmaktadır (Yüksel et al., 2023). Ancak MSR teknolojisinin çözülmesi gereken zorlukları da mevcuttur. Yakıt ortamında krom çözünmesi ve grafit moderatör ile

etkileşimler, korozyon başlıca sorunları arasında yer almaktadır (Young et al. 2018). Aynı şekilde, Ksenon ve Kripton gibi fisyon sonucunda oluşan gazlarının uzaklaştırılması ile redoks potansiyelinin kontrol altında tutulması kritik mühendislik sorunları olarak literatürdeki yerini korumaktadır. (Wang et al., 2021). Ekonomik açıdan ise ilk nesil prototip reaktörlerin sınırlı üretim koşullarında seviyelendirilmiş elektrik maliyetinin (Levelized Cost of Electricity/LCOE) 100–120 USD/MWh aralığında gerçekleşmesi öngörülmektedir. Ancak seri üretim ve standartlaşmanın sağlanmasıyla birlikte bu maliyetin 60–80 USD/MWh düzeyine düşebileceği tahmin edilmektedir (Mignacca & Locatelli, 2020).

Tablo 2. Güncel MSR projelerinin temel parametreleri
Table 2. *Basic parameters of current MSR projects*

Proje/ Bölge	Güç Seviyesi	Yakıt / Tuz Karışımı	Tasarım Özellikleri	Hedeflenen Uygulama	CAPEX (M$/MWe)	LCOE (USD/MWh)
TMSR-LF1	2 MWt; planlanan 373 MWt	FLiBe + ThF_4 + UF_4	Yüksek sıcaklık (650–700 °C), çevrim-içi yakıt yönetimi	Elektrik, hidrojen, proses ısısı	4000–5000	70–90
MSFR	3000 MWt (konsept)	FLiBe + aktinitler	Hızlı spektrum, çevrim-içi kimya entegrasyonu	Atık yakma, elektrik üretimi	5000+	80–100
IMSR	400 MWt	LEU + FLiBe	7 yıllık kartuş, modüler inşa	Orta ölçekli enerji arzı	3500–4500	65–85
ThorCon	500 MWt	LEU + FLiBe	Tersane üretimi, hızlı kurulum	Gelişmekte olan ülkelere enerji arzı	3000–4000	60–75

MSR'ler yalnızca elektrik üretimiyle sınırlı değildir, çok yönlü enerji çözümleri sağlamaktadır. Karbon nötr hedefler açısından, MSR'ler düşük karbonlu baz yük üretimi sağlayarak yenilenebilir kaynakların sahip olduğu dengesizliği telafi etme kapasitesine sahiptir (Serp et al., 2014). Bunun yanında hidrojen üretimi için de öne çıkan bir uygulama alanıdır. Örneğin Hibrit Kükürt (Hybrid Sulfur/HyS) yöntemiyle hidrojen üretilebileceği öngörülmektedir (Fox, et al., 2020). Ayrıca, MSR tabanlı iyot-kükürt (S-I) çevriminin, PWR tabanlı sistemlere kıyasla yaklaşık %30 daha yüksek termokimyasal verim sunduğu gözlenmektedir (Fallah Vostakola, et al., 2023). Endüstriyel ısı uygulamaları kapsamında ise, MSR'lerin özellikle çelik ve çimento gibi sektörlerinde karbon emisyonlarını potansiyeline sahiptir (Jenet et al., 2024).

Tablo 3. PWR–MSR karşılaştırmalı hidrojen ve ısı üretim potansiyeli
Table 3*. PWR–MSR comparative hydrogen and heat production potential*

Reaktör Tipi	Çıkış Sıcaklığı	Hidrojen Üretimi (ton/saat, 100 MWt)	Endüstriyel Uygunluk
PWR	280–320 °C	<0.5 (SOEC verimsiz)	Düşük – sadece elektrik
MSR	650–700 °C	2–2.5 (SOEC) / %30 daha verimli S-I	Yüksek – hidrojen, proses ısısı

Aslında MSR araştırmaları teknik, ekonomik ve politik boyutlarıyla çok katmanlı bir süreçtir. Malzeme geliştirme alanında, Hastelloy-N türevlerinin 20 yılı aşkın bir süre test edilmesi, yüksek sıcaklıklarda uzun süreli korozyon dayanımı açısından önemli veriler sunmaktadır (Liu et al., 2023). Simülasyon tarafında ise nötronik, termal-hidrolik ve tuz kimyası disiplinlerin birlikte meydana getirdiği çoklu-fizik yaklaşımları, reaktör davranışının daha gerçekçi modellenmesini mümkün kılmaktadır (Wu et al., 2022). Çevrim entegrasyonu açısından ise, MSR'lerin süperkritik karbondioksit (sCO_2) Brayton çevrimiyle birleştirilmesi ile %45'in üzerinde verimlilik potansiyele sahiptir (Lee et al., 2023).

Politik boyutta, Rusya ve Çin'in mevcut yakıt tedarikindeki belirleyici bir rol üstlenmektedir, Avustralya'nın toryum rezervleri ve Hindistan'ın toryum döngüsü Ar-Ge çalışmaları ile birlikte küresel enerji güvenliği dinamiklerini yeniden şekillendirmektedir (Szulecki & Overland, 2023; IAEA, 2020). Nükleer silahsızlanma

kapsamında, MSR teknolojisinin yayılımı NPT çerçevesi ve IAEA denetim mekanizmalarıyla uyumlu bir şekilde geliştirilmelidir. Bu açıdan uluslararası iş birlikleri kritik öneme sahiptir. Euratom, GIF ve IAEA INPRO gibi oluşumlar, güvenlik standartlarının birbiri ile uyumla hale gelmesinde ve ortak yaklaşımların geliştirilmesinde önemli bir rol üstlenmektedir (Nuclear Energy Agency, 2022).

4. Sonuç

MSR'ler 1950'lerde ORNL'de gerçekleştirilen ARE ve ardından MSRE ile nükleer teknolojide yeni bir yaklaşım sunmuştur. Bu deneyler, sıvı yakıt çevrimi, düşük basınçta güvenli işletim ve negatif sıcaklık katsayıları gibi prensiplerin pratikte doğrulanmasını sağlamıştır (Bettis et al., 1957; Rosenthal et al., 1970). Günümüzde ise Çin'in TMSR-LF1 prototipi, Avrupa'daki SAMOFAR programı ve ABD'deki özel girişimler aracılığıyla daha geniş ölçekli, ticari ve sürdürülebilir reaktör tasarımlarına dönüşmektedir (Fan & Guo, 2024; Carter, et al., 2020).

MSR teknolojisinin modern araştırmalarda öne çıkan avantajları, yüksek güvenlikli pasif soğutma mekanizmaları, çevrimiçi yakıt işleme potansiyeli ve düşük atık üretimi gibi konularla sınırlı değildir. Bu konuların yanında hidrojen üretimi ve yüksek sıcaklık endüstriyel ısı uygulamalarıyla karbon nötr enerji sistemlerine katkı sağlamaktadır (Yüksel et al., 2023; Fox, et al., 2020). Bununla birlikte, zorluklar da hala devam etmektedir. Yüksek sıcaklıklarda korozyon, tuz kimyasının kontrolü, fisyon ürünlerinin uzaklaştırılması ve uzun vadeli malzeme testleri mühendislik açısından çözüm üretilmeyi bekleyen önemli konulardır (Young et al. 2018; Liu et al., 2023). Ayrıca, lisanslama süreçlerinde ise belirsizlikler hala devam etmektedir. Mevcut nükleer regülasyon çerçeveleri katı yakıtlı, PWR üzerine kurulu olduğundan, sıvı yakıtlı reaktörler için yeni standartların belirlenmesi gerekmektedir (Belles, 2018).

Enerji politikaları ve jeopolitik bağlamda ise MSR'ler stratejik bir konuma sahiptir. Enerji güvenliği açısından, yakıt çevriminde toryum kullanımı ve yerli kaynakların değerlendirilmesi, özellikle ithalata bağımlı ülkeler için önemli bir avantaj sağlamaktadır (Szulecki & Overland, 2023). Küresel ölçekte, COP26 ve COP28 gibi iklim zirvelerinde vurgulanan karbon nötr hedeflerle uyumlu olarak MSR'ler, yenilenebilir enerji kaynaklarının dalgalı üretimini dengeleyebilecek güvenilir baz yük seçeneğidir (IEA, 2023).

Sonuç olarak, MSR'ler yalnızca bir enerji üretim teknolojisi gözüyle bakmak doğru değildir aynı zamanda küresel enerji dönüşümünün yapı taşı olma potansiyeline sahiptir. Ancak bu potansiyelin gerçeğe dönüşebilmesi için malzeme bilimi, tuz kimyası, lisanslama ve ekonomik uygulanabilirlik alanlarında daha fazla araştırma ve uluslararası iş birliği zorunlu bir ihtiyaçtır. Böylelikle, tarihsel deneylerden modern prototiplere uzanan bu teknoloji, sürdürülebilir nükleer enerjinin geleceğinde kritik bir rol üstlenecektir.

Çıkar Çatışması Beyanı/ Conflict of Interest
Yazar, çıkar çatışması veya kişisel ilişki bulunmadığını beyan etmektedir./ The author has no conflicts of interest to declare.

Finansal Destek/ Funding
Yazar, bu çalışma için finansal destek almadığını beyan etmiştir./ The author declared that this study has received no financial support.

Hakem Değerlendirmesi/Peer-review
Dış bağımsız/Externally peer-reviewed.

Yazar Katkıları/Author Contributions: Concept/Tasarım-MY.; Dizayn/Design-MY; Denetleme/Supervision-MY; Kaynaklar/Resources-MY; Analiz ve/ veya Yorum/Analysis and/or Interpretation-MY; Literatür Taraması/Literature Search-MY; Yazıyı Yazan/ Writing Manuscript-MY; Eleştirel İnceleme/Critical Review-MY.

Kaynakça

Abou-Jaoude, A. (2023). Literature review of advanced reactor cost estimates. Idaho National Laboratory.

Alang, I., & Rashid, M. D. (2024). Sustainable Electricity Generation Using Molten Salt Nuclear Reactors (MSR). Universiti Teknologi Malaysia: Pagoh, Malaysia.

Allibert, M., Merle, E., Delpech, S., Gerardin, D., Heuer, D., Laureau, A., & Moreau, S. (2020). Preliminary proliferation study of the molten salt fast reactor. EPJ Nuclear Sciences & Technologies, 6, 5.

Andrews, H. B., Ballinger, R., & Bragg-Sitton, S. (2021). Review of molten salt reactor off-gas management considerations. Nuclear Engineering and Design, 382, 111315.

Barré, B., Anzieu, P., Lenain, R., & Thomas, J. B. (2016). Nuclear Reactor Systems. EDP Sciences.

Beils, S., Gérardin, D., Uggenti, A. C., Carpignano, A., Dulla, S., Merle, E., Heuer, D., & Allibert, M. (2019). Application of the lines of defence method to the molten salt fast reactor in the framework of the SAMOFAR project. EPJ Nuclear Sciences & Technologies, 5, 18.

Belles, R., Flanagan, G. F., Holcomb, D. E., & Poore III, W. P. (2018). A safety and licensing roadmap to identify the research and development gaps of commercial molten salt reactors (No. ORNL/TM-2018/944). Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, TN (United States).

Bettis, E. S., Cottrell, W. B., Mann, E. R., Meem, J. L., & Whitman, G. D. (1957). The aircraft reactor experiment—operation. Nucl. Sci. Eng, 2(6), 841-853.

Bettis, E. S., Schroeder, R. W., Cristy, G. A., Savage, H. W., Affel, R. G., & Hemphill, L. F. (1957). The aircraft reactor experiment—design and construction. Nucl. Sci. Eng, 2(6), 804-825.

Carter, J. P., Heidet, F., O'Grady, D., & Hu, R. (2020). Integral molten salt reactor temperature sensitivities using a surrogate model. Nuclear Engineering and Design, 365, 110728.

Cherp, A., & Jewell, J. (2014). The concept of energy security: Beyond the four As. Energy Policy, 75, 415–421.

Davidson, A. J. (2022). The role of nuclear energy in the global energy transition. Oxford Institute for Energy Studies.

Delpech, M., Anzieu, P., Heuer, D., Laureau, A., & Merle-Lucotte, E. (2009). Reactor physics and reprocessing scheme for innovative molten salt reactor system. Journal of Fluorine Chemistry, 130(11), 1117–1123.

Fallah Vostakola, M., Asadi Amirabedin, S., & Akbarzadeh, M. (2023). Recent advances in high-temperature steam electrolysis for green hydrogen production using SOECs. Energies, 16(8), 3327.

Fan, Z. H. A. N. G., & Bolong, G. U. O. (2024). Molten Salt Reactor Technology: Progress, Challenges, and Prospects. Southern energy construction.

Fox, E. B., Colon-Mercado, H., Gorensek, M. B., & Thompson, A. B. (2020). Hybrid electrical/thermal hydrogen production process integrated with a molten salt reactor nuclear power plant. Savannah River National Laboratory.

Hu, M., Yang, X., Wang, X., Liu, H., Su, X., & Zhou, X. (2024). Effect of Te on the corrosion behavior of GH3535 alloy in molten LiF-NaF-KF salt. Corrosion Science, 227, 111761.

Huo, Y., Zhang, L., Ma, X., & Yue, Y. (2022). Evaporation behaviour of ^{233}Pa in FLiBeZr molten salt during vacuum distillation. RSC Advances, 12(17), 10371–10381.

IEA (2023), World Energy Outlook 2023, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023, Licence: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A)

Ignatiev, V. V., Kormilitsyn, M. V., Kormilitsyna, L. A., Semchenkov, Y. M., Fedorov, Y. S., Feinberg, O. S., ... & Khaperskaya, A. V. (2019). Molten-salt reactor for nuclear fuel cycle closure on all actinides. Atomic Energy, 125(5), 279-283.

Jenet, A., Beneš, O., Bøgh, S. A., Capelli, E., Caverzan, A., Ferguson, N., Holcomb, D. E., Ivanov, E., Krepel, J., Marchand, O., Martin, A., Maurer, P., Nilsson, K.-F., Pantalos, N., Paviet-Hartmann, P., Perez-Medina, M., Pyy, P. T., Rose, M. A., Smith, A., ...Taucer, F., (2024). Molten salt reactor technologies : putting science into standards, Publications Office of the European Union. https://data.europa.eu/doi/10.2760/49425.

Jyothi, R. K., et al. (2023). An overview of thorium as a prospective natural resource for sustainable energy. Frontiers in Energy Research, 11, 1132611.

Leandro, A. M., Heidet, F., Hu, R., & Brown, N. R. (2019). Thermal hydraulic model of the molten salt reactor experiment with the NEAMS system analysis module. Annals of Nuclear Energy, 126, 59-67.

LeBlanc, D. (2010). Molten salt reactors: A new beginning for an old idea. Nuclear Engineering and Design, 240(6), 1644–1656.

Lee, W., Lee, S., & Park, J. (2023). Design considerations of the supercritical CO_2 Brayton cycle for a molten salt reactor system. Progress in Nuclear Energy, 159, 104475.

Liu, Q., Liu, X., Hao, G., & Xu, H. (2023). Effect of O2-additive on the corrosion behavior of Hastelloy N alloy in molten FLiNaK. Corrosion Science, 213, 111001.

Magnusson, J., Memmott, M., & Munro, T. (2020). Review of thermophysical property methods applied to fueled and un-fueled molten salts. Annals of Nuclear Energy, 146, 107608.

Mignacca, B., & Locatelli, G. (2020). Economics and finance of molten salt reactors. Progress in Nuclear Energy, 118, 103140.

Park, J., Lee, S. Y., & Lee, I. B. (2019). Study of alternative reactor–separator network in bunsen process of sulfur-iodine cycle for hydrogen production. Journal of Chemical Engineering of Japan, 52(7), 638-649.

Rosenthal, M. W. (1972). The development status of molten-salt breeder reactors (ORNL-4812). Oak Ridge National Laboratory. https://moltensalt.org/references/static/downloads/pdf/ORNL-4812.pdf

Rosenthal, M. W., Briggs, R. B., & Kasten, P. R. (1970). Foreword: The Status and Technology of Molten-Salt Reactors—A Review of Molten-Salt Reactor Work at the Oak Ridge National Laboratory. Nuclear Applications and Technology, 8(2), 106-106.

Rybin, N., Fedorov, M., & Volkov, A. (2024). Thermophysical properties of molten FLiNaK: MD assessment. Journal of Molecular Liquids, 405, 123456.

Schneider, M., & Froggatt, A. (2023). The world nuclear industry status report 2023. Mycle Schneider Consulting

Serp, J., Allibert, M., Beneš, O., Delpech, S., Feynberg, O., Ghetta, V., ... & Zhimin, D. (2014). The molten salt reactor (MSR) in generation IV: overview and perspectives. Progress in Nuclear Energy, 77, 308-319.

Szulecki, K., & Overland, I. (2023). Russian nuclear energy diplomacy and its implications for energy security in the context of the war in Ukraine. Nature Energy, 8(4), 413-421.

Walker, S. A. (2023). Depletion-driven thermochemistry of molten salt reactors. Frontiers in Nuclear Engineering, 1, 1214727.

Wang, Y., Sridharan, K., & Couet, A. (2021). Method for identification of redox control parameters for corrosion mitigation in molten fluoride salts. Journal of Nuclear Materials, 543, 152624.

World Nuclear Association. (2024, June). Uranium enrichment. World Nuclear Association. https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/uranium-enrichment

World Nuclear Association. (2024, June). USA: Nuclear fuel cycle. World Nuclear Association. https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/usa-nuclear-fuel-cycle

World Nuclear Association. (2025, 23 Oct). Nuclear Fuel Cycle Overview. https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview (world-nuclear.org)

Wu, J., Chen, J., Cai, X., Zou, C., Yu, C., Cui, Y., ... & Zhao, H. (2022). A review of molten salt reactor multi-physics coupling models and development prospects. Energies, 15(21), 8296.

Wulandari, C., Pretorius, G., & Droste, B. (2023). Neutronic design performance of 100 MWe MSR with Th-U(enriched) and Th-Pu-MA fuel. Nuclear Engineering and Design, 398, 111938.

Young, G., Hackett, M. J., & Sham, T. L. (2018). Materials Challenges for Molten Salt Reactors. Proceedings of the Canadian Nuclear Society.