



TEORİ VE UYGULAMADA MÜHENDİSLİK 1

Editörler

Prof. Dr. Aydın RUŞEN

Doç. Dr. Selmin Ener RUŞEN



TEORİ VE UYGULAMADA MÜHENDİSLİK 1

Editörler:

Prof. Dr. Aydın RUŞEN

Doç. Dr. Selmin Ener RUŞEN



TEORİ VE UYGULAMADA MÜHENDİSLİK I

Editörler: Prof. Dr. Aydın RUŞEN, Doç. Dr. Selmin Ener RUŞEN

Genel Yayın Yönetmeni: Berkan Balpetek

Kapak Tasarımı: Duvar Design

Yayın Tarihi: Aralık 2024

Yayıncı Sertifika No: 49837

ISBN: 978-625-5530-53-0

© Duvar Yayınları

853 Sokak No:13 P.10 Kemeraltı-Konak/İzmir

Tel: 0 232 484 88 68

www.duvar yayinlari.com

duvarkitabevi@gmail.com

**Yayınevi ve editörler, yazarların belirtmiş olduğu görüş ve düşünceler ile doğabilecek etik ihlallerinin sorumluluğunu kabul etmekle yükümlü olmayıp kitapta yer alan yazıların sorumluluğu yazar(lar)ına aittir.*

İÇİNDEKİLLER

1. Bölüm.....5

Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Üretim Yöntemlerinin İncelenmesi

Devrim Demiray SOYASLAN

2. Bölüm.....25

Binalarda Yenilebilir Enerji Teknolojilerinin Kullanımı

Alev AKILLI EL, Zeki ARGUNHAN

3. Bölüm.....50

Suriye El-Bab Tarım Arazileri İçin PVSYST Simülasyon Destekli Güneş Enerjisi ile Sürdürülebilir Sulama Sistemi

Fadel AL HAMADO AL CHEHABI ,Mustafa TAHİR AKKOYUNLU

Ali KAHRAMAN

4. Bölüm.....67

Hilbert Eğrisi ile S-box Tasarlama Yaklaşımı

Fırat ARTUĞER , Songül KARAKUŞ

5. Bölüm.....81

Dizel Motorlarında Yenilenebilir Alternatif Yakıt Olarak Biyodizel Kullanımı

Murat KARABEKTAŞ, Mehmet ÇALIŞKAN

6. Bölüm.....107

Gıdalarda pH'nın Önemi: Et Teknolojisi Örneği

Abdülkadir DİLBER, Süleyman GÖKMEN

7. Bölüm.....119

Dizel Motorlarda Kullanılan

Hibrit Gaz Yakıtlar Üzerine Bir Analiz

Kutlutuğ KOCAGÖZ, Can COŞKUN, Zuhai OKTAY

8. Bölüm.....134

Gıda İşlemede Uygulanan Geleneksel Dondurma İşleminde

Novel Teknolojilerin Kullanımı

Abdülkadir DİLBER, Süleyman GÖKMEN

1. Bölüm

Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Üretim Yöntemlerinin İncelenmesi

Devrim Demiray SOYASLAN¹

¹ Doç. Dr. Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5145-8551>

GİRİŞ

Günümüzde, mühendislik malzemeleri alanında hızlı bir gelişme yaşanmaktadır. Bu gelişmeler, endüstriyel uygulamalardan dayanıklı yapı malzemelerine kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Bu malzemeler arasında, özellikle elyaf takviyeli kompozitler (ETK) önemli bir yer tutmaktadır. Elyaf takviyeli kompozitler, farklı mühendislik disiplinlerinde kullanılan ve çeşitli avantajlara sahip olan karmaşık malzemelerdir.

ETK'lar, bir polimer matris içerisine yerleştirilmiş olan takviye elyafı lifleri sayesinde üstün mekanik özellikler sunarlar. Bu takviye elyafı lifleri genellikle karbon, cam veya aramid gibi malzemelerden yapılmış olabilir ve matrise entegre edilerek malzemenin dayanıklılığını artırır. ETK'ların benzersiz özellikleri, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek sertlik, kimyasal direnç, korozyon direnci ve iyi termal özellikler gibi avantajlarla sonuçlanır.

ETK'ların üretimi, karmaşık bir süreçtir ve bir dizi farklı yöntem kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu yöntemler arasında el dokuma, kesit yöntemi, presleme, filament sarma, enjeksiyon kalıplama ve vakum infüzyon gibi teknikler bulunur. Her bir yöntem, belirli bir uygulama veya üretim gereksinimine uygun olarak seçilebilir ve özelleştirilebilir. Bu yöntemlerin seçimi, son ürünün özellikleri, maliyet, üretim hacmi ve zaman gibi faktörlere bağlıdır. ETK'ların üretimi, geleneksel malzemelerin üretim süreçlerine kıyasla daha karmaşık olabilir, ancak bu malzemelerin benzersiz özellikleri ve avantajları, bu çabayı haklı çıkarmaktadır. ETK'ların uygulama alanları giderek genişlemekte olup, otomotiv endüstrisinden havacılığa, denizcilikten spor ekipmanlarına kadar birçok sektörde kullanılmaktadır.

Sonuç olarak, elyaf takviyeli kompozitlerin üretim yöntemleri, mühendislik alanında büyük bir öneme sahiptir. Bu tez çalışması, bu yöntemlerin detaylı bir analizini sunarak, endüstriyel uygulamalar ve malzeme geliştirme süreçlerine katkıda bulunmayı hedeflemektedir. ETK'ların gelecekteki potansiyelini değerlendirmek ve daha da geliştirmek için bu çalışmanın önemli bir temel sağlaması beklenmektedir.

1. GENEL BİLGİLER

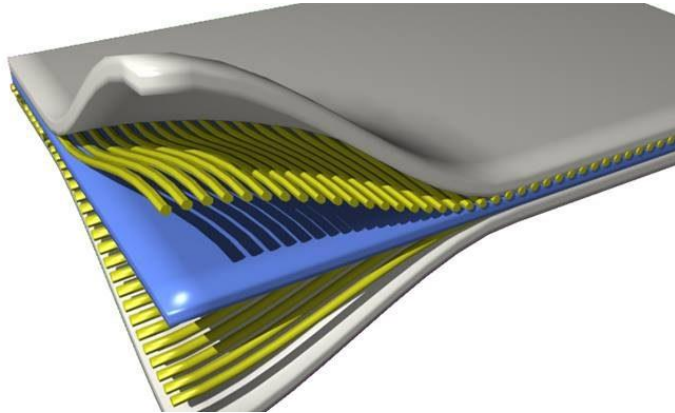
1.1. Kompozit

Kompozit malzeme, farklı bileşenlerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan ve özelliklerinin birleşiminden dolayı özel performans özellikleri sergileyen bir malzeme türüdür. Bu malzemeler, genellikle bir matris ve takviye edici liflerin

kombinasyonuyla oluşturulur. Matris, kompozit malzemenin temel yapı taşıdır ve genellikle polimer, metal, seramik veya birleşiklerden oluşur. Matris, liflerin yerleştirildiği ve dağıldığı bir ortam sağlar. Lifler ise, matris içerisinde yer alan takviye edici unsurlardır ve malzemenin mekanik özelliklerini artırır. Lifler genellikle cam elyaf, karbon elyaf, aramid veya doğal elyaf gibi malzemelerden oluşur.

Kompozit malzemelerin özellikleri, matris ve liflerin kombinasyonuna bağlı olarak değişir. Örneğin, karbon elyaf takviyeli bir polimer matrisli kompozit malzeme, yüksek mukavemet, hafiflik ve kimyasal dayanıklılık gibi özellikler sergileyebilir (Dünya Gazetesi, 2022). Diğer bir örnek olarak, cam elyaf takviyeli bir matrisin kullanıldığı kompozit malzemeler, mukavemet, rijitlik ve düşük maliyet gibi avantajlar sunabilir. Kompozit malzemelerin kullanım alanları oldukça geniştir. Otomotiv, havacılık, uzay, denizcilik, yapı malzemeleri, spor ekipmanları ve tıbbi cihazlar gibi birçok endüstri ve sektörde yaygın olarak kullanılırlar. Bu malzemelerin hafiflik, yüksek mukavemet, korozyon direnci, yüksek sıcaklık dayanımı gibi özellikleri, performans gereksinimleri yüksek uygulamalarda tercih edilmelerini sağlar.

Kompozit malzemelerin birçok avantajı vardır, ancak bazı zorlukları da beraberinde getirirler. Örneğin, üretim süreçleri karmaşık olabilir ve yüksek maliyetlere yol açabilir. Ayrıca, geri dönüşüm süreçleri de bazı kompozit malzemeler için zor olabilir, bu da çevresel sürdürülebilirlik açısından bir endişe kaynağı oluşturabilir. Sonuç olarak, kompozit malzemeler, farklı bileşenlerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan ve özel performans özellikleri sunan malzemelerdir (Şekil 1). Bu malzemeler, çeşitli endüstrilerde kullanılmakta olup, hafiflik, yüksek mukavemet ve kimyasal dayanıklılık gibi avantajlarıyla dikkat çeker (Three Star Composite, 2022).



Şekil 1. Kompozit malzeme görünümü (Three Star Composite, 2022)

Kompozit malzemeler, birçok açıdan önemli ve değerli hale getiren bir dizi özelliğe sahiptir. İşte kompozit malzemelerin neden önemli olduğunu açıklayan bazı faktörler: Yüksek Mukavemet ve Hafiflik: Kompozit malzemeler, takviye edici liflerin sağladığı yüksek mukavemet özellikleriyle bilinir. Örneğin, karbon elyaf takviyeli kompozitler, çelikten çok daha hafif olmalarına rağmen aynı mukavemet seviyesini sunabilir. Bu özellikleri, havacılık, otomotiv ve uzay endüstrileri gibi alanlarda hafif yapıların ve yakıt verimliliğinin gerektiği uygulamalarda önemli bir avantaj sağlar.

Özelleştirilebilirlik: Kompozit malzemeler, bileşenlerin oranlarını ve yönelimini ayarlayarak özelleştirilebilir. Bu, mühendislerin belirli uygulamalara özel malzemeler tasarlamasını sağlar. Örneğin, lif yönelimini optimize ederek belirli bir yönde daha yüksek mukavemet elde etmek mümkündür. Bu esneklik, performans gereksinimlerine ve tasarım ihtiyaçlarına göre kompozit malzemelerin uyarlanmasını sağlar. Kimyasal Dayanıklılık: Kompozit malzemeler, çeşitli kimyasal ortamlara dayanıklılık gösterebilir. Özellikle seramik matrisli kompozitler, yüksek sıcaklık, aşındırıcı kimyasallar ve oksidasyon gibi zorlu ortamlarda kullanılabilir. Bu özellikleri, enerji üretimi, kimya endüstrisi ve nükleer santraller gibi alanlarda kullanımlarını önemli kılar.

Düşük Termal Genleşme: Bazı kompozit malzemeler, düşük termal genleşme katsayısı gösterir. Bu, malzemenin sıcaklık değişimlerine karşı daha az tepki verdiği anlamına gelir. Özellikle hassas ölçüm cihazları, teleskoplar ve uydu antenleri gibi uygulamalarda, termal stabilite önemli bir faktördür. Elektriksel Özellikler: Kompozit malzemeler, elektriksel iletkenlik ve yalıtım özellikleri açısından esneklik sunar. Örneğin, karbon elyaf takviyeli polimer kompozitler, elektrik iletkenliği nedeniyle elektromanyetik etkileşimlere karşı iyi bir koruma sağlayabilir. Bu özellikleri, elektronik ve telekomünikasyon endüstrilerinde kullanımlarını önemli hale getirir.

İyi Titreşim ve Şok Emilasyonu: Kompozit malzemeler, titreşim ve şok emilimi konusunda iyi performans gösterebilir. Bu, yapısal dayanıklılığı artırırken, titreşim ve gürültü azaltımı sağlar. Bu nedenle, otomotiv, havacılık ve savunma sanayii gibi alanlarda kullanılan taşıtlarda ve ekipmanlarda tercih edilir. Çevresel Sürdürülebilirlik: Bazı kompozit malzemeler geri dönüştürülebilir veya yeniden kullanılabilir özelliklere sahiptir. Bu, atık miktarını azaltmaya ve doğal kaynakları korumaya yardımcı olur. Aynı zamanda, daha hafif yapısı sayesinde enerji tasarrufu sağlayarak çevresel etkileri azaltabilir. Bu nedenlerle, kompozit malzemeler endüstriler arasında önemli bir yere sahiptir ve mühendislik, yenilikçilik ve sürdürülebilirlik açısından büyük potansiyel sunarlar (Three Star Composite, 2022).

1.2. Matris Malzeme

Matris malzemesi, genellikle polimerik bir bileşik olan matrisin oluşturulmasında kullanılan malzemedir. Matris, takviye edici bir malzeme ile birleştirilerek bir kompozit malzeme oluşturur. Matris malzemesi, takviye malzemelerini (genellikle fiberler veya partiküller) bir arada tutmak ve dağıtmak için kullanılır. Matris malzemeleri, kompozit malzemenin mekanik özelliklerini, kimyasal direncini ve dayanıklılığını belirler. Polimer matrisler, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve kimyasal direnç gibi özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılır. Örneğin, epoksi, poliester, vinilester, fenolik ve poliüretanlar gibi polimerler matris malzemeleri olarak kullanılabilir.

Matris malzemesi, takviye malzemesi ile birleştirildiğinde kompozit malzemenin mekanik özelliklerini artırır. Örneğin, karbon fiber takviye malzemesi ile epoksi matris malzemesi bir araya getirildiğinde, sonuçta yüksek mukavemetli ve hafif bir karbon fiber kompozit malzeme elde edilir. Matris malzemesi seçimi, kullanım amacı, işlenebilirlik gereksinimleri, sıcaklık dayanımı, kimyasal direnç, maliyet ve diğer faktörlere bağlı olarak yapılır. Farklı uygulamalarda farklı matris malzemeleri tercih edilebilir. Örneğin, havacılık ve uzay endüstrisinde genellikle epoksi veya poliimid matris malzemeleri kullanılırken, otomotiv endüstrisinde daha düşük maliyetli polimer matris malzemeleri tercih edilebilir (Demircan vd., 2019).

1.3. Takviye Malzeme

Takviye malzeme, bir malzemenin dayanıklılığını, mukavemetini ve özelliklerini geliştirmek için kullanılan ek malzemelerdir. Genellikle yapısal malzemelerde kullanılır ve malzemenin mekanik özelliklerini artırır.

Takviye malzemeleri, ana malzemenin mukavemetini ve dayanıklılığını artırmak için kullanılır. Bu malzemeler, ana malzemeye eklenerek veya bir matris içinde dağıtılarak işlenir. Bir matris malzemesi, takviye malzemesinin etrafında bulunan ve malzemenin şeklini veren bir çerçeve görevi görür.

Takviye malzemeleri, birçok farklı türde olabilir. Örnek olarak, fiber takviyeli polimerler (FRP), cam elyafı, karbon elyafı veya aramid gibi liflerin polimer matrisine yerleştirilmesiyle oluşur. Diğer takviye malzemeleri arasında metalik takviyeler (örneğin, alüminyum veya çelik) ve seramik takviyeler (örneğin, seramik elyaf veya parçacıklar) yer alabilir.

Takviye malzemeleri, bir malzemenin mukavemetini, sertliğini, dayanıklılığını, termal ve elektriksel iletkenliğini veya diğer özelliklerini geliştirebilir. Ayrıca, takviye malzemeleri malzemenin ağırlığını azaltabilir veya termal genleşme özelliklerini kontrol altında tutarak istenmeyen deformasyonları

engelleyebilir. Takviye malzemeleri, havacılık, otomotiv, inşaat, denizcilik ve birçok diğer endüstride kullanılan çeşitli uygulamalara sahiptir. Örneğin, karbon fiber takviyeli polimerler hafif ve yüksek mukavemetli yapısal bileşenlerin üretiminde kullanılırken, cam elyafı takviyeleri yapısal panellerin güçlendirilmesinde yaygın olarak kullanılır. Bu şekilde, takviye malzemeleri, malzemelerin performansını artırarak daha dayanıklı ve verimli yapılar oluşturmayı mümkün kılar (Three Star Composite, 2022).

1.4.Elyaf Takviyeli Kompozitler

Elyaf takviyeli kompozitler, farklı malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan dayanıklı ve hafif yapı malzemeleridir. Bu malzemeler genellikle bir polimer matrisi (reçine) ile birlikte güçlendirici elyaf malzemelerini içerir. Elyaf takviyeli kompozitler, genellikle polimer matrisin içinde yer alan cam elyaf, karbon elyaf, aramid elyaf gibi yüksek mukavemetli elyaf malzemeleriyle takviye edilirler. Elyaf malzemeleri, polimer matrisin dayanıklılığını artırarak, malzemeye yüksek mukavemet ve sertlik kazandırır. Bu tür kompozit malzemeler, birçok avantaja sahiptir. Hafif olmaları, yüksek mukavemet-gövde ağırlık oranı sağlar ve özellikle havacılık, otomotiv, denizcilik ve inşaat gibi alanlarda kullanımları yaygındır. Elyaf takviyeli kompozitler, yüksek darbe dayanımı, korozyona dayanıklılık, termal stabilite gibi özellikler sunabilir. Elyaf takviyeli kompozitler, uçak gövdeleri, arabaların parçaları, gemi yapısı, spor malzemeleri, yapısal elemanlar, elektrikli cihazlar gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Malzemelerin özellikleri, kullanılan elyaf türü, matris malzemesi ve üretim süreci gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir (Erdoğan ve Temiz, 2021).

1.4.1. Elyaf Kompozitlerin Çeşitleri

Elyaf takviyeli kompozitler, farklı elyaf türleri ve matris malzemeleri kullanılarak çeşitli kombinasyonlarda üretilebilir. İşte yaygın olarak kullanılan bazı elyaf kompozit türleri: Karbon Fiber Takviyeli Kompozitler: Karbon fiber, hafiflik, yüksek mukavemet, yüksek sertlik ve düşük termal genleşme katsayısı gibi özelliklere sahip olan yaygın bir elyaf malzemesidir. Karbon fiber takviyeli kompozitler, havacılık, otomotiv, spor malzemeleri, uzay endüstrisi gibi birçok uygulamada kullanılır.

Cam Fiber Takviyeli Kompozitler: Cam elyaf, düşük maliyeti ve iyi mekanik özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılan bir elyaf malzemesidir. Cam fiber takviyeli kompozitler, inşaat malzemeleri, tekne yapımı, su deposu ve boru sistemleri gibi birçok endüstriyel uygulamada bulunur.

Aramid Fiber Takviyeli Kompozitler: Aramid elyaf, yüksek mukavemet, yüksek tokluk ve kimyasal direnç gibi özelliklere sahip olan bir elyaf malzemesidir. Bu tür kompozitler, balistik koruma ekipmanları, zırh malzemeleri, hafif yapı elemanları ve yüksek performanslı spor eşyaları gibi uygulamalarda kullanılır.

Doğal Fiber Takviyeli Kompozitler: Doğal elyaf malzemeleri, karbon, cam veya aramid gibi sentetik elyafların aksine bitkisel veya hayvansal kaynaklardan elde edilen elyaflardır. Örnekler arasında ahşap elyafı, kenaf, keten, jüt, bambu ve kenevir bulunur. Bu tür kompozitler, çevresel açıdan sürdürülebilir uygulamalarda, mobilya, ambalaj malzemeleri ve otomotiv iç döşemeleri gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Bunlar, yaygın olarak kullanılan bazı elyaf kompozit türleridir. Her bir türün kendine özgü özellikleri ve uygulama alanları vardır. Ancak, gelişen teknoloji ile birlikte yeni elyaf malzemeleri ve kompozit türleri ortaya çıkabilir (Erdoğan & Temiz, 2021).

2.4.2. Elyaf Malzemeler

Elyaf malzemeler, çeşitli endüstrilerde kullanılan ve genellikle tekstil üretiminde kullanılan malzemelerdir. İşte yaygın olarak kullanılan bazı elyaf malzeme türleri:

Pamuk: Pamuk, bitkisel kaynaklı bir elyaf malzemesidir. Doğal, yumuşak ve nefes alabilen bir yapıya sahiptir. Tekstil ürünleri, giyim, ev tekstili ve mobilya gibi birçok alanda kullanılır.

Yün: Yün, koyunların veya diğer hayvanların postundan elde edilen bir elyaf malzemesidir. Sıcak tutma özelliği yüksek olan yün, özellikle kış aylarında kullanılan giyim ve ev tekstili ürünlerinde tercih edilir.

Polyester: Polyester, sentetik bir elyaf malzemesidir ve genellikle dayanıklılığı ve kırışıklık direnci nedeniyle tercih edilir. Giyim, yatak takımları, perde, döşeme kumaşları gibi birçok alanda kullanılır.

Naylon: Naylon, bir diğer sentetik elyaf malzemesidir. Hafif, dayanıklı ve esnek yapısı nedeniyle giyim, iç çamaşırı, çorap, halat, halı gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılır.

Akrilik: Akrilik elyaf, yünün bir alternatifi olarak kullanılan sentetik bir malzemedir. Yumuşak, hafif ve kolay bakımı olan bir yapıya sahiptir. Özellikle örgü giyim, battaniye, halı gibi ürünlerde kullanılır.

Modakrilik: Modakrilik, akrilik elyafa benzer özelliklere sahip olan bir sentetik elyaf malzemesidir. Alev geciktirici özelliği nedeniyle genellikle iş elbiseleri, yüksek görünürlük gerektiren giysiler, işçi kıyafetleri gibi güvenlik odaklı ürünlerde kullanılır.

Viskon: Viskon, selüloz bazlı bir elyaf malzemesidir. Yumuşak, parlak ve iyi bir sıvı emicilik özelliğine sahiptir. Giyim, iç çamaşırı, yatak takımları, perdeler ve döşemeler gibi birçok alanda kullanılır.

Bu listede yer alan malzemeler, sadece elyaf malzemelerin bazı örnekleridir. Farklı elyaf türleri ve karışımları da mevcuttur ve çeşitli özelliklere sahiptir. Tekstil endüstrisinde sürekli olarak yeni malzemeler geliştirilmekte ve kullanılmaktadır (Erdoğan ve Temiz, 2021).

2.4.3. Elyaf Malzemelerde Takviye Elemanları

Elyaf takviyeli kompozitler, bir polimer matris içinde yer alan güçlendirici elyaf takviyelerinden oluşan malzemelerdir. Elyaf takviyeleri, kompozitin mukavemet ve rijitlik özelliklerini artıran temel bileşenlerdir. İşte yaygın olarak kullanılan bazı elyaf takviye elemanları:

- Cam elyafı
- Karbon elyafı
- Aramid elyafı
- Polietilen elyafı
- Bazalt elyafı

Bu liste, yaygın olarak kullanılan bazı elyaf takviye elemanlarını içermektedir. Ayrıca doğal elyaf takviyeleri (örneğin, ahşap elyafı) ve diğer özel elyaf takviye malzemeleri de mevcuttur. Elyaf takviyeli kompozitler, belirli uygulama gereksinimlerine ve mühendislik ihtiyaçlarına göre çeşitli takviye elemanları kullanılarak özelleştirilebilir (Erdoğan ve Temiz, 2021).

2.4.3.1. Cam Elyafı

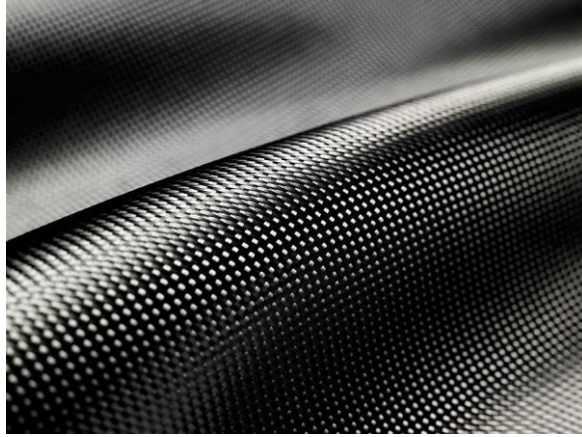
Cam elyafı, silika temel alınarak üretilen inorganik bir elyaf takviyesidir. Yüksek mukavemet ve rijitlik özelliklerine sahiptir ve kimyasal direnci yüksektir (Şekil 2). İnşaat, otomotiv, denizcilik ve rüzgar enerjisi gibi birçok sektörde kullanılır (Çeyrek Mühendis, 2020).



Şekil 2. Cam Elyaf (Emtel , 2022)

2.4.3.2. Karbon Elyafı

Karbon elyafı, karbon fiber olarak da bilinen bir elyaf takviye elemanıdır. Karbon elyafı, karbon atomlarının düzenli bir şekilde dizildiği son derece güçlü ve hafif bir malzemedir (Şekil 3). Havacılık, otomotiv, uzay ve spor ekipmanları gibi birçok alanında kullanılır (Akçay, 2017).



Şekil 3. Karbon Elyafı (Akçay, 2017)

2.4.3.3 Aramid Elyafı

Aramid elyafı, özellikle yüksek mukavemet ve yüksek enerji emilimi gerektiren uygulamalarda kullanılan bir elyaf takviye malzemesidir. Kevlar ve Nomex gibi markalar, aramid elyafının bilinen örnekleridir. Balistik koruma, otomotiv parçaları, havacılık ve denizcilik gibi alanlarda kullanılır (Şekil 4).



Şekil 4. Aramid Elyafı (Termopak, 2022)

2.4.3.4 Polietilen Elyafi

Polietilen elyafi, yüksek yoğunluklu polietilen malzemesinden yapılan bir elyaf takviye elemanıdır. Yüksek mukavemet, düşük ağırlık, yüksek enerji emilimi ve kimyasal direnç özelliklerine sahiptir. Balistik koruma, spor ekipmanları, denizcilik ve otomotiv sektöründe kullanılır (Şekil 5).



Şekil 5. Polietilen Elyafi (Saydaş Plastik, 2021)

2.4.3.5 Bazalt Elyafi

Bazalt elyafi, bazalt kayaların eritilip elde edilen bir elyaf takviye malzemesidir (Şekil 6). Yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal direnç ve düşük termal genişleme katsayısı gibi avantajlara sahiptir. İnşaat, havacılık, otomotiv ve enerji sektörlerinde kullanılır (Demircan vd., 2019).



Şekil 6. Bazalt Elyafi (Carbonier, 2022)

2. ARAŞTIRMA BULGULARI

2.1. Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Elyaf takviyeli polimer kompozitler, polimer matrisine takviye edici elyaf malzemelerin eklenmesiyle oluşturulan mühendislik malzemeleridir. Bu kompozitler genellikle hafif, yüksek mukavemetli ve düşük yoğunluklu olmaları nedeniyle birçok endüstriyel uygulamada tercih edilir. Bu üretim yöntemleri ikiye ayrılır bunlar açık kalıp yöntemleri ve kapalı kalıp yöntemleridir (Metalurjik.com, 2022).

3.1.1 Açık Kalıp Yöntemleri

Açık kalıp yöntemleri, elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanılan yaygın yöntemlerdir.

3.1.1.1 Elle Yatırma Yöntemi

Elle yatırma yöntemi, elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Elyaf takviyeli kompozitler, bir polimer matrisine (genellikle epoksi veya polyester) yerleştirilmiş güçlendirici elyaf tabakalarından oluşan malzemelerdir. Elle yatırma yöntemi, bu elyaf tabakalarının el ile matrise yerleştirilmesini ve birleştirilmesini içerir. İşte elle yatırma yöntemi hakkında daha ayrıntılı bilgiler:

Hazırlık: Elle yatırma yöntemi, elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanılan birçok malzeme ve ekipman gerektirir. Bu malzemeler arasında polimer matris, güçlendirici elyaf tabakaları, yapıştırıcılar, rulo veya spatula gibi araçlar yer alır. Ayrıca uygun bir çalışma alanı, temizlik malzemeleri ve kişisel koruyucu ekipmanlar da gereklidir.

Elyaf Yerleştirme: Elle yatırma işlemi sırasında elyaf tabakaları, önceden hazırlanan polimer matris üzerine el ile yerleştirilir. Elyaf tabakaları, genellikle önceden kesilmiş boyutlarda ve şekillerde gelir ve dikkatlice matris üzerine yerleştirilir. Elyaf tabakaları, matrisin tamamen kaplanmasını sağlayacak şekilde düzenlenir ve gerektiğinde kesilerek uygun şekle getirilir.

Yapıştırıcı Kullanımı: Elyaf takviyeli kompozitlerin elle yatırılması sırasında yapıştırıcılar kullanılabilir. Yapıştırıcılar, elyaf tabakalarının matris üzerine daha sağlam bir şekilde yapışmasını sağlar. Yapıştırıcı, elyaf tabakalarının altına ve üstüne uygulanabilir, böylece daha güçlü bir bağlantı elde edilir. Yapıştırıcılar, polimer matris ve elyaf arasında kimyasal bir bağ oluşturarak kompozitin mekanik özelliklerini artırabilir.

Rulo veya Spatula Kullanımı: Elyaf tabakalarının matris üzerine yerleştirilmesi sırasında rulo veya spatula gibi araçlar kullanılır. Bu araçlar, elyaf tabakalarını düzgün bir şekilde matrise yerleştirmek için kullanılır. Rulo, elyaf

tabakalarını matris üzerine bastırırken spatula, matrisin üzerine yayarak elyaf tabakalarını düzgün bir şekilde yayılmasını sağlar. Bu işlem, elyaf tabakalarının hava kabarcıkları ve boşluklar olmadan matrise tamamen temas etmesini sağlar.

Kurutma ve Sertleştirme: Elle yatırma işlemi tamamlandıktan sonra, elyaf takviyeli kompozit materyal kurumaya ve sertleşmeye bırakılır. Bu süreç, polimer matrisin kimyasal reaksiyonlarla sertleştiği ve elyaf tabakalarının matrise sıkıca bağlandığı bir dönemdir. Kurutma ve sertleşme süresi, kullanılan polimer matris ve ortam koşullarına bağlı olarak değişir.

Elle yatırma yöntemi, elyaf takviyeli kompozitlerin düşük maliyetli ve basit bir üretim yöntemidir. Ancak, daha karmaşık ve yüksek performanslı kompozit ürünler için otomatik veya yarı otomatik üretim yöntemleri tercih edilebilir. Bu nedenle, üretim süreci ve kullanılacak malzemeler, hedeflenen ürünün özelliklerine ve kullanım amacına bağlı olarak değişebilir (Çeyrek Mühendis, 2020).

3.1.1.2 Püskürtme Yöntemi

Elyaf takviyeli kompozitlerde püskürtme yöntemi, güçlendirici elyaf ve polimer matris malzemelerinin birleştirilmesi veya kaplanması için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, elyaf takviyeli kompozitlerin üretim sürecinde farklı aşamalarda kullanılabilir. İşte elyaf takviyeli kompozitlerde püskürtme yöntemi hakkında daha ayrıntılı bilgiler:

Püskürtme Matrisi: Elyaf takviyeli kompozitlerde püskürtme yöntemi için kullanılan matris malzemesi, genellikle polimer bazlı bir malzemedir. Örneğin, epoksi veya polyester bazlı bir reçine kullanılabilir. Bu matris malzemesi, püskürtme sürecinde elyaf takviyeli kompozitin parçalarına veya yüzeylerine uygulanacak olan bağlayıcı olarak görev yapar.

Elyaf Takviyesi: Püskürtme yöntemiyle elyaf takviyeli kompozitler üretildiğinde, elyaf takviye malzemeleri genellikle kırılmış veya kesilmiş elyaflardır. Bu elyaflar, püskürtme işlemi sırasında matris malzemesine tutunacak şekilde dağıtılır. Elyaf takviyeli kompozitin mekanik özelliklerini artırmak ve dayanıklılığını sağlamak için uygun elyaf malzemesi seçimi büyük önem taşır.

Püskürtme Yöntemi: Elyaf takviyeli kompozitlerde püskürtme yöntemi, matris malzemesi ve elyaf takviyelerinin birleştirilmesi veya kaplanması için kullanılır. Bu işlem genellikle özel bir püskürtme tabancası veya püskürtme ekipmanı ile gerçekleştirilir. Püskürtme tabancası, matris malzemesini yüksek basınç altında veya hava yardımıyla partiküller halinde püskürtürken, aynı zamanda elyaf takviyelerini de dağıtabilir.

Kaplama ve Birleştirme: Elyaf takviyeli kompozitlerde püskürtme yöntemi, kompozit parçaların kaplanması veya birleştirilmesi amacıyla kullanılabilir. Püskürtme işlemi sırasında matris malzemesi, elyaf takviyeleriyle birleşerek homojen bir tabaka veya katman oluşturur. Bu tabaka, kompozit parçaların yüzeyine tutunur ve birleştirme veya kaplama amacına hizmet eder.

Avantajlar ve Kullanım Alanları: Elyaf takviyeli kompozitlerde püskürtme yöntemi, birçok avantaja sahiptir. Bu yöntem, kompleks geometrilere sahip parçaların kaplanması veya birleştirilmesi için uygundur. Ayrıca, büyük yüzey alanlarının hızlı ve verimli bir şekilde kaplanmasını sağlar. Püskürtme yöntemi, maliyet etkinliği, hafiflik, korozyon direnci ve mekanik dayanıklılık gibi özellikleri nedeniyle otomotiv, havacılık, denizcilik ve yapı sektörleri gibi birçok endüstride yaygın olarak kullanılır. (Demircan vd., 2019)

3.1.1.3 Elyaf Sarma Yöntemi

Elyaf takviyeli kompozitler, genellikle polimer veya epoksi matris malzemelerinin güçlendirilmesi için kullanılan malzemelerdir. Elyaf takviyeli kompozitlerin üretimi için çeşitli yöntemler bulunmaktadır, bunlardan biri de elyaf sarma yöntemidir.

Elyaf sarma yöntemi, bir makarada veya bobinde bulunan elyaf malzemesinin kompozit parçanın üzerine sarılması işlemidir. Bu yöntem, özellikle boru hatları, silindirler, depolar gibi silindirik veya tüp şeklindeki parçaların üretimi için kullanılır. Elyaf sarma yöntemi, iki temel aşamadan oluşur: elyafın sarılması ve matris malzemesinin uygulanması.

Elyaf Sarılması: İlk aşamada, uygun elyaf malzemesi makaradan veya bobinden çıkarılır ve kompozit parçanın üzerine düzgün bir şekilde sarılır. Elyaf malzemesi genellikle karbon, cam, aramid veya bazı diğer liflerden oluşur. Sarma işlemi, elle veya otomatik sarma makineleri kullanılarak gerçekleştirilebilir.

Matris Malzemesinin Uygulanması: Elyafın sarılmasının ardından, matris malzemesi elyaf takviyelerinin üzerine uygulanır. Matris malzemesi genellikle polimer veya epoksi reçinelerinden oluşur. Matris malzemesi, elyaf takviyeleri arasındaki boşlukları doldurarak ve sıkıştırarak kompozit parçanın dayanıklılığını artırır. Matris malzemesi ayrıca kompozit parçanın yüzeyini korur ve istenen son şekli verir.

Elyaf sarma yöntemi, kompozit parçanın mukavemetini ve sertliğini artırırken aynı zamanda hafiflik sağlar. Bu yöntem, yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda sıklıkla tercih edilen bir üretim yöntemidir. (Emtel , 2022)

3.1.2 Kapalı Üretim Yöntemleri

Elyaf takviyeli kompozitlerin kapalı kalıp üretim yöntemleri, kompozit parçaların kapalı bir kalıp içerisinde üretildiği yöntemlerdir. Bu yöntemler, parçanın istenen şekli, boyutları ve özellikleri elde etmek için kullanılır.

3.1.2.1. Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi

Elyaf takviyeli kompozitlerin Reçine Transfer Kalıplama (Resin Transfer Molding - RTM) yöntemi, kapalı bir kalıp kullanılarak matris reçinenin elyaf takviyeleri arasına transfer edildiği bir üretim yöntemidir. Bu yöntem, karmaşık geometrilere sahip ve yüzey kalitesi önemli olan kompozit parçaların üretimi için kullanılır.

RTM yönteminde, önceden kesilmiş elyaf takviyeleri, kalıbın içerisine yerleştirilir. Kalıp daha sonra kapatılır ve vakum altına alınır veya bir basınç sistemi kullanılır. Ardından matris reçine, kalıbın bir bölümünden veya enjektörler vasıtasıyla, elyaf takviyelerinin arasına enjekte edilir.

Matris reçine, elyaf takviyeleri arasında yayılırken vakum veya basınç etkisiyle hava kabarcıkları çıkarılır. Reçine, polimerizasyon veya sertleşme sürecine girerek kompozitin istenen şeklini almasını sağlar. Bu süreç genellikle kontrollü bir ısıtma sistemi kullanılarak gerçekleştirilir.

RTM yöntemi, yüksek mukavemetli ve hafif kompozit parçaların üretimi için tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntem, otomotiv, havacılık, denizcilik, rüzgar enerjisi ve spor ekipmanları gibi çeşitli endüstrilerde kullanılan karmaşık şekilli parçaların üretiminde etkilidir. RTM, yüzey kalitesi, üretim verimliliği ve kalıp maliyetleri gibi avantajlarıyla popüler bir seçenektir. (Termopak, 2022)

3.1.2.2. Vakum İnfüzyon Yöntemi

Vakum infüzyon yöntemi, bir kompozit parçasının üretim sürecinde kullanılan bir kompozit üretim yöntemidir.

Vakum infüzyon yöntemi, genellikle tek parça veya laminat halindeki kompozit parçalarının üretiminde kullanılır. Bu yöntemde, bir kalıp veya kalıp üzerindeki kalıplama kalıbı, bir elyaf takviyesi ve reçine ile birleştirilerek kompozit parça oluşturulur.

Vakum infüzyon yönteminde, öncelikle bir kalıp hazırlanır ve kalıp üzerine elyaf takviyesi yerleştirilir. Daha sonra, takviye malzemenin üzerine bir vakum torbası veya membran yerleştirilir. Bu torba veya membran, kalıp ve takviye malzeme arasında sızdırmaz bir bariyer oluşturur.

Sonraki adımda, bir vakum pompası kullanılarak torbanın içindeki hava tahliye edilir. Bu, torbanın içinde bir vakum oluşturur ve torbanın kalıp ve takviye malzemesine sıkıca yapışmasını sağlar.

Daha sonra, vakum altındaki torbanın içine reçine enjekte edilir. Reçine, takviye malzemesinin etrafına doğru yayılırken, vakumun etkisiyle boşlukları doldurur ve takviye malzemesiyle doygunluk sağlanır. Bu adıma "infüzyon" denir. Reçine, takviye malzemesinin içine nüfuz ederken, sıkıştırma kuvveti ve vakum etkisi altında havayı ve boşlukları dışarı atar. Bu süreç, homojen bir kompozit parçası oluşturmak için reçinenin tamamen takviye malzemesine yayılmasını sağlar.

Kompozit parça, reçine tamamen sertleştikten ve uygun bir zaman geçtikten sonra kalıptan çıkarılır ve son şeklini alır. Vakum infüzyon yöntemi, kompozit parçaların üretiminde kullanılan birçok faydalı özelliğe sahiptir. Bu yöntemle yüksek kaliteli, hafif ve mukavemetli kompozit parçalar üretilebilir. Ayrıca, malzeme ve reçine israfının azalması, daha iyi takviye reçine dağılımı ve kompleks geometrilerin üretimi gibi avantajları da vardır. Bu yöntem, otomotiv, havacılık, denizcilik, rüzgar enerjisi gibi birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. (Özgür Ansiklopedi, 2022)

3.1.2.3. Vakum Torbalama Yöntemi

Elyaf takviyeli kompozitlerin vakum torbalama yöntemi, kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan bir başka yaygın yöntemdir. Bu yöntemde, vakum torbaları kullanılarak kompozit parçalarının üretimi gerçekleştirilir.

Vakum torbalama yöntemi, bir kalıp veya kalıplama kalıbı üzerine elyaf takviyesi ve reçine yerleştirilerek kompozit parçaların oluşturulduğu bir süreçtir.

İlk olarak, kalıp veya kalıplama kalıbı hazırlanır ve üzerine elyaf takviyesi düzenlenir. Elyaf takviyesi, genellikle kumaş, mat veya lifler şeklinde olabilir ve belirli bir şekli ve yönelimi takip eder. Daha sonra, takviye malzemenin üzerine bir vakum torbası yerleştirilir. Vakum torbası, takviye malzemesi ve kalıp arasında sızdırmaz bir bariyer oluşturarak vakumun etkisini sağlar. Torbanın kenarları, yapıştırıcı veya vakum contaları kullanılarak kalıp üzerinde sızdırmaz bir şekilde sabitlenir. Ardından, vakum pompası veya vakum cihazı kullanılarak torbanın içindeki havanın tahliye edilmesi sağlanır. Torbanın içinde bir vakum oluşturulur ve takviye malzemesi, reçine enjeksiyonu için hazır hale getirilir.

Reçine enjeksiyonu için uygun yöntemler kullanılarak reçine, vakum altındaki torbanın içine enjekte edilir. Enjekte edilen reçine, vakumun etkisiyle takviye malzemesinin etrafına yayılır ve boşlukları doldurur. Bu işlem sırasında hava kabarcıkları ve boşluklar vakum etkisiyle dışarı çıkarılır. Reçine, takviye malzemesine ve kalıba nüfuz ederken, uygun sertleşme süresi boyunca bekletilir. Bu süre, reçinenin tamamen sertleşmesi ve kompozit parçanın istenen mukavemet özelliklerini kazanması için gereklidir. Sertleşme tamamlandıktan sonra, vakum torbası ve kalıp çıkarılır ve kompozit parça son şeklini alır. Vakum

torbalama yöntemi, homojen bir malzeme dağılımı sağlar, boşlukları minimize eder ve yüksek kaliteli kompozit parçaların üretilmesine imkan tanır. Ayrıca, kompleks geometrilerin üretimi için uygundur ve malzeme ve reçine kullanımında tasarruf sağlar. (Durgun, 2014)

3.1.2.4 Sıcak Presleme Yöntemi

Elyaf takviyeli kompozitlerin sıcak presleme yöntemi, polimer matrisli kompozit malzemelerin üretimi için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, elyaf takviyeli kompozit malzemenin şekli ve boyutu belirlenen kalıplar arasına yerleştirilir ve ardından sıcaklık ve basınç kontrollü bir ortamda preslenir. Sıcak presleme yöntemi, çeşitli endüstrilerde kullanılan yüksek mukavemetli, hafif ve dayanıklı kompozit malzemelerin üretiminde etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Genellikle karbon elyafı, cam elyafı veya aramid gibi yüksek mukavemetli elyaflar, polimer matris malzemesi ile birleştirilir.

Sıcak presleme işlemi genellikle aşağıdaki adımları içerir:

Hazırlık: Elyaf takviyeli malzemelerin kesimi ve düzenlenmesi gibi hazırlık işlemleri gerçekleştirilir. Elyaf takviyeli örtü, önceden kesilmiş veya sarılmış şekilde kullanılabilir.

Kalıplama: Elyaf takviyeli malzeme, kalıplar arasına yerleştirilir. Kalıp, istenen son ürünün şeklini ve boyutunu belirler.

Isıtma: Kalıpların bir araya getirilmesinden sonra, sıcak presleme makinesi kullanılarak malzeme ısıtılır. Sıcaklık, polimer matris malzemesinin erime veya yumuşama sıcaklığına ulaşacak şekilde kontrol edilir.

Basınç uygulama: Sıcak presleme işlemi sırasında kalıplar arasına belirli bir basınç uygulanır. Bu basınç, malzemenin içindeki hava kabarcıklarının çıkmasını sağlar ve elyaf takviyeli malzemenin daha sıkı bir şekilde birleşmesini sağlar.

Soğutma: Presleme işlemi tamamlandıktan sonra, malzeme soğutulur. Bu, polimer matris malzemesinin tekrar sertleşmesine ve istenen son özelliklere sahip bir kompozit malzeme oluşturmasına olanak tanır.

Sıcak presleme yöntemi, yüksek mukavemetli kompozit malzemelerin üretiminde avantajlıdır, çünkü homojen ve sıkı bir yapı sağlar. Ayrıca, bu yöntemle kompleks şekiller ve büyük parçalar üretmek mümkündür. Bununla birlikte, prosesin zaman alıcı olabileceği ve yüksek maliyetli ekipman gerektirebileceği unutulmamalıdır.

3.1.2.5 Pultrüzyon Yöntemi

Pultrüzyon yöntemi, elyaf takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan bir süreçtir. Bu yöntemde, uzun elyaf takviyeleri bir reçine matrisine daldırılır ve ardından bir kalıp içinden geçirilir. Pultrüzyon işlemi, kontrollü bir

şekilde gerçekleştirilen çekme kuvvetiyle malzemenin şekillendirilmesini sağlar. Pultrüzyon yöntemi, genellikle düz veya karmaşık kesitlere sahip çubuklar, borular, profil çubuklar ve levhalar gibi lineer veya nesnel kompozit parçaların üretimi için tercih edilir. Bu süreç, cam elyafı, karbon elyafı veya aramid elyafı gibi çeşitli elyaf takviye tipleriyle birlikte kullanılabilir. Reçine matrisi olarak polyester, vinilester veya epoksi reçineleri yaygın olarak kullanılır.

Pultrüzyon süreci genellikle aşağıdaki adımları içerir:

Elyaf hazırlığı: Elde edilecek parçanın gereksinimlerine bağlı olarak, uygun uzunlukta ve kesitte elyaf takviyeleri kesilir veya bobinlerden çıkarılır.

Elyaf ön-impregnasyonu: Elyaf takviyeleri, önceden hazırlanan reçine matrisine daldırılır veya ön-impregnasyon işlemi uygulanır. Bu adım, reçinenin elyaf yüzeyine emilmesini sağlar ve daha iyi bir matris bağlantısı sağlar.

Pultrüzyon kalıbı hazırlığı: Parçanın istenen kesitine ve geometrisine sahip bir pultrüzyon kalıbı hazırlanır. Kalıp, genellikle bir çekme sistemine bağlıdır ve malzemenin istenen profilini oluşturacak şekilde tasarlanır.

Pultrüzyon işlemi: Elyaf takviyeleri, reçine ile emdirildikten sonra pultrüzyon kalıbının bir ucu içinden geçirilir. Bu sırada, çekme sistemi, elyaf takviyelerini kalıp boyunca çeker ve şekillendirir. Malzeme, kalıp boyunca düzgün bir şekilde yerleştirilirken, fazla reçine dışarı çıkarılır.

Polimerizasyon: Pultrüzyon işlemi sonrasında, kalıptan geçen malzeme, polimerizasyon sürecine tabi tutulur. Bu adım, reçinenin sertleşmesini ve tamamen kürleşmesini sağlar.

Pultrüzyon yönteminin avantajları arasında yüksek mukavemet, hafiflik, korozyona dayanıklılık, yüksek rijitlik, termal ve elektriksel yalıtım özellikleri yer alır. Ayrıca, otomotiv, havacılık, inşaat, denizcilik ve rüzgar enerjisi gibi birçok endüstride geniş bir uygulama potansiyeline sahiptir. Ancak, pultrüzyon yöntemiyle üretilen parçaların karmaşık geometrileri sınırlı olabilir ve üretim süreci genellikle otomasyon gerektirir. Ayrıca, kalıpların maliyetli ve özelleştirilmiş olması da bir dezavantaj olarak gösterilebilir. (Akçay, 2017)

3.1.2.6 Sürekli Laminasyon Yöntemi

Sürekli laminasyon yöntemi, elyaf takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde yaygın olarak kullanılan bir süreçtir. Bu yöntemde, elyaf takviyeleri bir rulo halinde bulunur ve reçine matrisiyle birleştirilerek sürekli bir laminat oluşturulur. Bu sürekli laminat daha sonra istenen şekillerde kesilerek parçalar haline getirilir.

Sürekli laminasyon yöntemi genellikle cam elyafı, karbon elyafı veya aramid elyafı gibi uzun sürekli elyaf takviyeleri kullanır. Reçine matrisi olarak polyester, vinilester veya epoksi reçineleri sıklıkla tercih edilir.

Sürekli laminasyon yöntemi genellikle aşağıdaki adımları içerir:

Elyaf takviye hazırlığı: Elyaf takviyeleri, bir rulo halinde veya kesilmiş parçalar şeklinde kullanılmak üzere hazırlanır. Genellikle bir elyaf besleme sistemi kullanılarak kontrollü bir şekilde elyaf takviyeleri beslenir.

Elyaf takviyelerinin impregnasyonu: Elyaf takviyeleri, bir reçine matrisiyle doyurulur veya ön-emprenye edilir. Bu adım, reçinenin elyaf takviyeleri arasında eşit şekilde dağılmasını sağlar ve matris bağlantısını güçlendirir.

Laminasyon işlemi: Impregne edilmiş elyaf takviyeleri, bir sürekli laminasyon hattında veya bir kalıp içinde düzgün bir şekilde birleştirilir. Bu adımda, reçine emdirilmiş elyaf takviyeleri düzgün bir şekilde yerleştirilir ve arzu edilen kalınlıkta ve geometride sürekli bir laminat oluşturulur.

Sertleştirme: Laminasyon işlemi sonrasında, elde edilen sürekli laminat, reçinenin polimerizasyon sürecine tabi tutulmasıyla sertleştirilir. Bu adım, reçinenin tamamen kürleşmesini sağlar ve laminatın istenen fiziksel özelliklere sahip olmasını sağlar.

Kesme ve şekillendirme: Sertleştirilen sürekli laminat, istenen şekil ve boyutta parçalara kesilir. Bu adımda, kesme makineleri, kesim kalıpları veya CNC (bilgisayarlı sayısal kontrol) tezgâhları kullanılabilir.

Sürekli laminasyon yöntemi, otomotiv, havacılık, denizcilik, rüzgar enerjisi ve spor malzemeleri gibi birçok endüstride geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu yöntemle üretilen parçalar, yüksek mukavemet, hafiflik, rijitlik ve dayanıklılık gibi avantajlara sahip olabilir. Ancak, sürekli laminasyon süreci karmaşık olabilir ve otomasyon ve özel ekipman gerektirebilir. (Erdoğan & Temiz, 2021)

3. SONUÇ

Son zamanlarda elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerini arttırmak için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Örneğin, doğal elyaf takviyeli kompozitler bazı alanlarda sentetik elyaf takviyeli kompozitlere alternatif hale gelmiştir. Matris malzemelerinin çeşitli seramik nanopartiküller ile birleştirilmesi de bu konudaki umut verici yaklaşımlardan birisidir. Özellikle karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) teknolojisi kullanılarak yapılan çalışmalar gelecekteki olası büyük çaplı bir depremde binlerce binanın yıkılmasını önleyecek çözüm olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

1. Akçay, S. (2017). Ana sayfa Nedir? Karbon Elyaf Nedir? Malzeme Bilimi.net: 10/06/2023 tarihinde <https://malzemebilimi.net/karbon-elyaf-nedir.html> adresinden alındı
2. Carbonier. (2022). Bazalt Elyaf Nedir? Carbonier: 09/06/2023 tarihinde <https://www.carbonier.com/teknik-donatilar/bazalt-elyaf-nedir> adresinden alındı
3. Çeyrek Mühendis. (2020, Kasım 4). Kompozit Üretim Yöntemleri. Çeyrek Mühendis: 05/06/2023 tarihinde <https://www.ceyrekmuhendis.com/kompozit-uretim-yontemleri/> adresinden alındı
4. Demircan, G., Kısa, M., Özen , M., & Değirmenci, M. (2019). Alümina Takviyeli Aramid-Epoksi Nanokompozitlerin Üretimi ve Basma Özellikleri. 1. Uluslararası Harran Multidisiplinler Çalışmalar Kongresi, (s. 168-174). Şanlıurfa.
5. Durgun, İ. (2014). El Yatırma Yöntemi İle Kompozit Parça Üretimi. 7. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu (s. 283-287). Ankara: Çankaya Üniversitesi.
6. Dünya Gazetesi. (2022, Haziran 27). Deprem Yıkımına Karbon Elyafli Çözüm. Dünya: 06/06/2023 tarihinde <https://www.dunya.com/sirketler/deprem-yikimina-karbon-elyafli-cozum-haberi-339264> adresinden alındı
7. Emtel . (2022). Epoksi Cam Elyaf Kumaş 300 gr/m². Emaye Tel & Kablo Sanayi : 10/06/2023 tarihinde <https://shop.emtel.com.tr/epoksi-cam-elyaf-kumas-300-gr> adresinden alındı
8. Erdoğan, Y. E., & Temiz, Ş. (2021). Doğal Elyaf Takviyeli Grafen Nanoplatelet Dolgulu Epoksi Matrisli Kompozitlerde Abrasif Aşınma. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(1), 440-449.
9. Metalurjik.com. (2022, Nisan 2). Kompozit Malzemelerde Kullanılan Elyaf (Fiber) Çeşitleri ve Özellikleri. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği: 05/06/2023 tarihinde <https://www.metalurjik.com/kompozit-malzemelerde-kullanilan-elyaf-fiber-cesitleri-ve-ozellikleri> adresinden alındı
10. Özgür Ansiklopedi. (2022, Haziran 24). Karbon elyafı. Vikipedi: 05/06/2023 tarihinde https://tr.wikipedia.org/wiki/Karbon_elyafi adresinden alındı

11. Saydaş Plastik. (2021). Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) Nedir? Saydaş Plastik: 09/06/2023 tarihinde <https://saydasplastik.com.tr/yuksekyogunluklu-polietilen-hdpe-nedir/> adresinden alındı
12. Termopak. (2022). Kevlar Aramid Şerit Bant. Termopak: 08/06/2023 tarihinde <http://termopak.com.tr/product/aramid-seritler/> adresinden alındı
13. Three Star Composite. (2022). Kompozit Nedir? Three Star Composite: 10/06/2023 tarihinde <https://threestarcomposite.com/kompozit-nedir/> adresinden alındı

2. Bölüm

Binalarda Yenilebilir Enerji Teknolojilerinin Kullanımı

Alev AKILLI EL¹
Zeki ARGUNHAN²

¹ Öğr. Gör. Dr., Bitlis Eren Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu aakilli@beu.edu.tr

² Bitlis Eren Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
zargunhan@beu.edu.tr

BİNALARDA YENİLEBİLİR ENERJİ TEKNOLOJİLERİNİN KULLANIMI

Özet

Günümüzde teknolojik gelişmelerle birlikte enerji ihtiyacı sürekli artmaktadır. Enerji kaynağı olarak kullanılan fosil yakıtların çevre kirliliğine yol açması ve bu yakıtların tükenebilir olması, yenilenebilir temiz enerji kaynaklarına yönelimi artırmıştır. Binalarda kullanılan enerjinin büyük bir kısmı fosil yakıt kaynaklarından elde edilmektedir. Binalar birincil enerji tüketiminin yaklaşık %40'ından sorumludur. Bu değer de elektrik tüketiminin yaklaşık %74'ünü oluşturmaktadır. Artan enerji ihtiyacı, fosil bazlı yakıtların yakın zamanda tükenerek olması ve küresel iklim değişikliği gibi nedenler binalarda enerji tüketiminin azaltılmasını, enerji verimliliğinin artırılmasını ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Bu çalışmada, binaları enerji verimi yüksek, uygun maliyetli, çevreye duyarlı, teknolojik açıdan cazip ve sürdürülebilir gelişime elverişli hale getirmek için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı konusunda kapsamlı bir araştırma yapılmıştır.

1. GİRİŞ

Tüm dünyadaki insanlık modern bir medeni toplum olarak birleşmeye çalışsa bile, enerji krizi, sınırlı doğal kaynaklar ve kötüleşen yaşam ortamı gibi üstesinden gelinmesi gereken üç kritik ikileme karşı karşıya kalacaklardır. Bu önemli sorunları çözmek için, küresel iş birliğiyle tüm bireylerden akıllı ve hızlı çözümler beklemektedir.

Küreselleşen dünyada enerji tüketiminin artması, sınırlı doğal kaynaklardan elde edilen enerji kaynaklarının hızla tükenmesine ve ekolojik dengenin bozulmasına yol açmaktadır. Fosil yakıtların azalmasıyla birlikte, inşaat sektörü de dahil olmak üzere birçok sektörde, tükenmez nitelikte, enerji verimliliği sağlayan ve karbon emisyonlarını azaltan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı kaçınılmaz bir gereklilik haline gelmiştir [1].

Yapıların, imalat/inşaat, kullanım ve yıkım süreçlerini kapsayan yaşam döngüsü boyunca yüksek miktarda enerji tüketimi gerçekleşmektedir. Dünya genelinde, temiz su kaynaklarının yaklaşık %17'si, orman ürünlerinin %25'i ve enerji kaynaklarının %40'ı inşaat sektörü tarafından kullanılmaktadır. Ülkemizde ise toplam enerji üretiminin yaklaşık dörtte biri yapı sektöründe tüketilmektedir [2].

Yenilebilir enerji, son on yılda Avustralya, Kanada, Çin, Danimarka, Fransa, Almanya, Hindistan, İtalya, Japonya, Hollanda, Portekiz, Güney Afrika, İsveç, ABD ve Türkiye gibi çoğu gelişmiş veya gelişmekte olan ülkede hızla artan kullanımıyla tüm dünyada vazgeçilmez ve aranan bir hale gelmiştir. Bu nedenle yenilebilir enerji kaynakları elektrik tüketiminde daha cazip hale gelmiştir. yenilebilir enerji kaynaklarından elde edilen güç üretimi, geleneksel veya klasik güç kaynaklarından elde edilen güce kıyasla daha temiz, uygun maliyetli, çevre dostu ve sürdürülebilir olarak kabul edilmektedir [3–5].

Günümüzde, konut ve yaşam alanı, dünyanın her yerinde binaları mümkün olduğunca konforlu ve kullanışlı hale getirmekte oldukça bağlantılıdır. İnşaat sektörü, toplam küresel temel kaynakların %30-40'ına yatırım yaparak hızla büyümektedir. Günümüzde binalar, sanayi ve tarımdan sonra üçüncü büyük fosil enerji tüketicisi haline gelmiştir [6].

Enerji verimli binaların ve tesislerin inşası giderek daha fazla sürdürülebilir biyoiklimsel varsayımların uygulanmasına dayanmaktadır. Mevcut bina stoğu, yeni inşaat stoğundan çok daha büyüktür. Bu nedenle, günümüzde enerji verimliliği ilkeleri yalnızca yeni binaların tasarım ve inşasında uygulanmamakta, aynı zamanda mevcut binaların enerji performansını iyileştirmeye yönelik uygun önlemlerin ve faaliyetlerin uygulanması da zorunlu hale gelmektedir [7].

Yenilebilir enerji, sürekli olarak yenilenen doğal süreçlerden elde edilmektedir. Farklı biçimlerde güneş, rüzgar, yağmur, biyokütle ve yer

kabuğunun derinliklerinde üretilen ısıdan kaynaklanan jeotermal kaynaklarda üretilmektedir [8]. Bu enerji kaynakları binalarda genellikle aktif ve pasif sistemler olarak tasarlanıp uygulanmaktadır. Aktif sistemler, güneş, rüzgâr ve jeotermal enerjiden yararlanarak ısıtma, soğutma ve elektrik üretimi sağlamak amacıyla kullanılan mekanik ve elektronik donanımlardır. Bu sistemler arasında güneş kolektörleri, güneş panelleri, yer altı ısı pompaları ve rüzgâr türbinleri bulunmaktadır. Pasif sistemler ise aktif sistemlere kıyasla daha basit ve ekonomik bir yapıya sahiptir. Güneş ve rüzgâr enerjisinden faydalanarak ısıtma, soğutma, havalandırma ve aydınlatma işlevlerini yerine getiren bu sistemlere trombe duvarlar, güneş bacaları ve rüzgâr bacaları örnek olarak verilebilir.

Bu çalışmada, yenilebilir enerji kaynaklarının binalarda kullanım alanları ve bu kaynakların binalarda kullanımı için tercih edilen sistemler hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca, binalarda kullanılan yenilebilir enerji kaynakları belirlenerek bu kaynakların kullanımından sağlanan avantaj ve dezavantajları belirlenmiştir.

2. YENİLEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

Doğada bulunabilen, belirli bir sınırı olmayan ve sürdürülebilir olan enerjilere yenilebilir enerji denir. Yenilebilir enerji kaynağı; enerji kaynağından alınan enerji tükenme hızıyla aynı oranda veya daha hızlı kendini yenileyebilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır [9]. Günümüzde birçok yenilebilir enerji kaynağı bulunmaktadır. Bu kaynaklar güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji, hidrolik enerji, biyokütle enerjisi, hidrojen enerjisi, dalga ve gelgit enerjisi olarak sıralanabilir [10]. Günümüzde dünya enerji talebinin yaklaşık %85'i petrol, kömür ve doğal gaz gibi geleneksel enerji kaynaklarından sağlanmaktadır [5]. Ancak bu kaynaklarla ilgili pek çok olumsuzluk, temiz ve yenilenebilir alternatif enerji kaynaklarına yönelik çalışmaları hızlandırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtlar olan kömür, petrol ve doğal gazla olan bağımlılığı azaltmada kritik bir rol üstlenmektedir.

Yenilebilir enerji kaynakları önemli sayıda potansiyel ve avantaja sahiptir. Sera gazı emisyonu üretmedikleri için çevre kalitesini arttırabilirler. Dünyanın hemen her yerinde bulunabildikleri için enerjiyi eşit şekilde dağıtırlar ve enerji güvenliği ile enerji yoksulluğu sorunlarını çözerler ve fosil yakıtlara kıyasla güvenilir bir enerji kaynağı olarak kabul edilebilirler. Ayrıca, düşük maliyeti ve ekonomik faydaları vardır ve makro ekonomik düzeyde istihdamı destekler ve enerji fiyatlarını dengeler. Bir binanın içerisindeki yaşam koşullarını iyileştirebilir ve çoğu enerji ihtiyacını karşılayabilirler [11].

Yenilebilir enerji kaynaklarının başlıca dezavantajları arasında, kullanıcılar için aşırı ve saydırıcı olabilen yüksek ilk maliyetleri ayrıca oldukça yüksek olan depolama sistemlerinin maliyeti yer alır. Ayrıca, yenilebilir enerji hava

koşullarına bağlıdır ve uzun süre boyunca öngörülmeleyen hava koşulları enerji eksikliğine yol açabilir [12]. Buna ek olarak, gerekli yenilebilir enerji teknolojilerini kurmak için geniş arazi alanlarına ihtiyaç vardır. Aşılması gereken küçük engellere rağmen yenilebilir enerji kaynakları, dünyanın enerji talebini karşılamak, fosil yakıtların aşırı kullanımının yerini almak ve uygun fiyatlı ve temiz enerji için en iyi seçenek olarak kabul edilmektedir [13].

2.1. Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, güneş ışığından veya ısısından gelen enerjiyi ifade eder [14]. Fotovoltaik veya yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemlerinde üretilir. Fotovoltaikler, güneş ışığını hızlı bir şekilde elektriğe dönüştürebilen, kişisel kullanım için ve daha büyük ölçüde kullanılabilen panellerdir. Gelecekteki enerji ve elektrik üretiminde çok önemli bir rol oynamaları beklenmektedir. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemlerinde, sıvıyı ısıtan güneş ışınlarını toplamak için aynalar kullanılır ve ortaya çıkan buhar, elektrik üretmek için bir türbini hareket ettirir. Güneş sonsuz şekilde enerji üretebilir, bu da güneş enerjisinin potansiyel olarak fosil yakıt kullanımını ortadan kaldıracabileceği ve tüm enerji taleplerini karşılayabileceği anlamına gelir [15].

Güneş enerjisi teknolojisi incelendiğinde, kesintili ve dalgalı özellikleri nedeniyle kullanım alanları ve verimliliğinin sınırlı olduğu görülmektedir. Büyük enerji şebekelerinden uzak kırsal ve dağlık bölgelerde genellikle güneş enerjisine dayalı hibrit sistemler tercih edilmektedir. Ancak, güneş enerjisinin rastlantısal ve değişken yapısı, sürekli ve kararlı bir aktif güç çıktısı sağlamasını engellemektedir [16]. Doğal kaynakların dağılımının, toplulukların kültürel ve coğrafi özelliklerine bağlı olması nedeniyle güneş enerjisi her bölgede uygulanabilir nitelikte değildir [8]. Termik santraller ve kömür santralleri gibi fosil yakıtlara dayalı elektrik üretim sistemleri, güneş enerjisi santrallerine kıyasla daha yüksek güç üretimi kapasitesine sahiptir. Bununla birlikte, güneş enerjisi sistemlerinin yüksek başlangıç maliyetleri, kullanımını kısıtlayan önemli bir faktördür. Tüm bu hususlar dikkate alındığında, küresel enerji talebindeki artışı karşılamak amacıyla, güneş enerjisi teknolojisinin dezavantajlarını ve sınırlamalarını aşmaya yönelik yeniliklerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

2014 yılında küresel birincil enerji tüketimi yaklaşık 160.310 milyon MWh olarak gerçekleşmiş olup, bu değer 2040 yılına kadar 240.318 milyon MWh'ye ulaşması öngörülmektedir [17]. 2010 yılında, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik üretim sistemleri, toplam elektrik üretimine kıyasla yaklaşık %20'lik bir paya ulaşmış, bu oranın 2035 yılı itibarıyla %31'e yükselmesi beklenmektedir [18]. Uluslararası Enerji Ajansı'nın sürdürülebilir gelecek senaryosuna göre, 2025 yılı itibarıyla dünya elektrik arzının %57'si yenilenebilir

enerji kaynaklarıyla karşılanacaktır [18]. Bu hedeflere ulaşabilmek için uzun vadeli öngörüler ve kapsamlı planlamalar gereklidir. Dünya genelinde güneş enerjisi kullanılarak elektrik üretimi hızla artmaktadır [19]. Konvansiyonel enerji üretim süreçlerinin olumsuz ve geri döndürülemez çevresel etkileri göz önüne alındığında, güneş enerjisi tedarik teknolojilerinin teşvik edilmesi ve geliştirilmesi kritik önem taşımaktadır. Son yıllarda bu alanda kayda değer yatırımlar gerçekleştirilmiş, teknolojik ilerlemeler ise ülkelerin güneş enerjisini daha ekonomik ve verimli bir şekilde üretmesine olanak tanımıştır [20].

Araştırmacılar, güneş enerjisi alanında yüksek verimlilik elde edilmesi ve çevresel kirliliğin azaltılması amacıyla önemli yenilikler geliştirmektedir. Güneş enerjisi alanında, kristal silisyum kullanılarak yapılan güneş hücrelerinin üretimi, çıkarma ve işleme maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle pahalı olabilmektedir. Bu bağlamda, gelecekte organik malzemelerin güneş hücreleri üretiminde yeni bir alternatif olarak kullanılacağı öngörülmektedir. Organik malzemelerin güneş fotovoltaik hücrelerinde kullanımı, düşük üretim maliyetleri ve çevre dostu özellikleri nedeniyle çeşitli avantajlar sunmaktadır [17]. Geleneksel güneş hücreleri, yalnızca güneş ışınımı varlığında elektrik üretebilmekteyken, yakın gelecekte "anti-güneş hücresi" konsepti çerçevesinde, güneş ışığı olmadan gece saatlerinde de elektrik üretimi sağlanabilecektir [21].

2.2. Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr enerjisi, havanın kinetik enerjisini rüzgâr türbinleri veya rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri aracılığıyla mekanik enerjiye, ardından elektrik enerjisine dönüştürerek elektrik üretir [22]. Türbinlerin kanatları, rüzgârın etkisiyle dönerek, bağlı olduğu türbini hareket ettirir ve enerji üretimi, türbinin boyutuna ve kanat uzunluğuna bağlı olarak gerçekleşir. Avrupa'da, 2019 yılında yeni rüzgâr enerjisi kurulumları 15,4 GW seviyesine ulaşmış, bu da 2018 yılına göre %27'lik bir artışı temsil etmektedir. Ayrıca, rüzgâr enerjisi, 2019 yılında Avrupa Birliği'nin toplam elektrik talebinin %15'ini karşılamıştır [13].

Rüzgâr enerjisi, diğer yenilenebilir enerji kaynakları gibi birçok avantaja sahiptir. Rüzgârın hareketiyle enerji ve elektrik üreten türbinler kullanarak sera gazı emisyonlarını azaltır ve elektrik maliyetlerini düşürebilir. Türbinlerin çalışabilmesi için ihtiyaç duyduğu tek şey rüzgardır; rüzgâr, doğanın hareket halindeki havasıdır ve hava her yerde mevcuttur. Rüzgâr, tükenmeyen, bol ve sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır ve bu kaynağı kullanmak onu değersizleştirmez. Bu kaynağın faydalarından maksimum şekilde yararlanmamız teşvik edilmektedir çünkü bu, dünyamızı daha temiz ve daha iyi bir yer haline getirebilir. Ayrıca, yerli büyümeyi birçok açıdan destekleyecektir. İlk olarak, türbinlerin yapımında kullanılan yerli malzemeler, yerel ekonomiyi destekler. İkinci olarak, türbinler karlı bir yatırımdır; teknoloji alanındaki büyüme ve

gelişmeler, yüksek bir geri dönüş potansiyeli öngörmekte olup, yapılan yatırımların artması ülkenin GSYİH'sını artırmaktadır. Son olarak, rüzgâr enerjisi yeni pazarlar ve fırsatlar yaratmaktadır. Şu anda mühendisler, rüzgârın düşük olduğu zamanlarda enerji depolanabilmesi için kapasite faktörlerini artırmak üzerinde çalışmaktadır. İnsanlar doğayı kontrol edemezler, aksi takdirde toplum duraklar. Rüzgâr enerjisi, doğayla uyum içinde çalışan yağlar ve yakıtlar tükenmiş bir dünyanın karamsar öngörüsünü reddederek sosyal ilerlemeyi teşvik eden bir alternatiftir [8].

Rüzgâr enerjisinin birçok olumlu etkisi bulunmakta olup, en temiz enerji türlerinden biri olarak kabul edilmektedir; ancak, bu enerji kaynağının dikkate alınması gereken bazı sınırlamaları da mevcuttur. Başlıca olumsuz etki, doğrudan ve dolaylı olarak yaban hayatı üzerinde, özellikle göçmen kuşlar üzerinde ortaya çıkmaktadır (rüzgâr enerjisi, hayvanlarla en uyumlu enerji kaynağı olarak kabul edilmesine rağmen) [23]. Diğer olumsuz etkiler arasında ise, gürültü kirliliği, telekomünikasyon sinyallerine müdahale ve görsel estetik kaygılar yer almaktadır[24].

2.3. Biyoenerji

Biyokütle enerjisi veya biyoenerji, doğrudan arazi ürünlerinden veya diğer mahsul artıklarından gelebilen biyokütlenin dönüştürülmesinden üretilen enerji biçimini ifade eder [22]. Daha spesifik olarak, gıda mahsulleri, tarım ve belediye veya endüstriyel atıklardan gelen artıklar, çimenli veya odunsu bitkiler ve hatta çöplüklerden gelen metan dumanı biyokütle enerjisi üretimi için kullanılabilir. Ayrıca, modern biyoenerji sıvı biyoyakıtlar, biyogaz ve ayrıca biyo-rafineriler ve diğer teknolojileri kullanır [13].

Biyoenerji yenilenebilirdir, her yerde üretilebilir ve elektrik, ısıtma ve ulaşım için kullanılabilir [25]. Bu potansiyeller ve yaygın kullanımı nedeniyle, dünyadaki yenilenebilir enerjinin yaklaşık %75'i biyokütle enerjisini içerir. Ayrıca, karbon nötrdür, yani atmosfere net bir karbondioksit eklenmesine neden olmaz [26]. Biyoenerjinin sosyoekonomik faydaları da vardır, çünkü üretimi kırsal istihdamı ve geliri teşvik edebilirken, gelişmekte olan ülkelerdeki yoksulluğun azaltılmasına katkıda bulunabilir [25].

Dezavantajlarına gelince, biyokütle enerjisi düşük bir enerji yoğunluğuna sahiptir ve fosil yakıtlar kadar verimli değildir. Ayrıca, karbon nötr olmasına rağmen, genellikle toprak ve bitki örtüsünün bozulması ve ormansızlaşma ile bağlantılı olduğundan olumsuz bir çevresel etkiye sahip gibi görünmektedir [12]. Dezavantajları iyi yönetilebilir ve en aza indirilebilirse, biyoenerjinin büyük bir potansiyeli vardır [27].

Biyokütle enerjisinin kullanımı sera gazı emisyonlarını, yabancı petrole bağımlılığı, çöp sahalarını büyük ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir ve son

olarak yerel tarım ve orman ürünleri endüstrilerini destekler. Enerji için başlıca biyokütle hammaddeleri kâğıt fabrikası kalıntısı, kereste fabrikası hurdası ve belediye atıklarıdır. Biyokütle yakıtları için günümüzde kullanılan en yaygın hammaddeler mısır tanesi (etanol için) ve soya fasulyesidir (biyodizel için). Uzun vadeli planlar arasında hızlı büyüyen ağaçlar, otlar ve algler gibi özel enerji mahsullerinin yetiştirilmesi ve kullanılması yer almaktadır. Bu yem stokları, yoğun gıda mahsullerini desteklemeyecek arazilerde sürdürülebilir bir şekilde yetişebilir. Biyokütlenin bir diğer faydası da ham petrol gibi bir dizi değerli yakıt, kimyasal madde, malzeme ve ürüne dönüştürülebilmesidir. Bu ürünler şu şekildedir:

- **Biyoyakıt**- Biyokütlenin ulaşım için sıvı yakıtlara dönüştürülmesi
- **Biyoenjerji**- Elektrik üretmek için biyokütlenin doğrudan yakılması veya daha verimli yanan gaz veya sıvı yakıtlara dönüştürülmesi
- **Biyo-ürünler**- Biyokütlenin, tipik olarak petrolden yapılan plastik ve diğer ürünlerin yapımında kullanılan kimyasallara dönüştürülmesi.

2.4. Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji, yer kabuğunun derinliklerinden elde edilen, yer yüzeyinin altındaki sıcaklık farkları nedeniyle doğal olarak meydana gelen enerji kaynağıdır. Yeraltındaki magma ve sıcak kayaçların ısı enerjisinin, su buharı veya sıcak su biçiminde yüzeye çıkarılmasıyla elde edilen bu enerji, elektrik üretimi, ısıtma, seracılık gibi pek çok alanda kullanılmaktadır.

Jeotermal enerji, her yerde geliştirilebilen sürdürülebilir, güvenilir ve uygun maliyetli bir enerji kaynağı olarak kabul edilir [22]. Başlangıçta küçük ölçekte bireyler tarafından kullanılmış ve son zamanlarda kullanımı daha büyük boyutlara ulaşmaya başlamıştır. Çevre dostudur ve yüksek kapasite ve verimliliğe sahiptir [28]. Ayrıca, kullanımının enerji güvenliğini artırdığı ve yaşam standartlarını iyileştirdiği düşünülmektedir.

Jeotermal enerjinin kullanımından kaynaklanan başlıca olumsuz etkiler arasında, fosil yakıtların saldığı miktarlara kıyasla önemli ölçüde düşük olmasına rağmen, atmosfere belirli sera gazlarının salınması yer alır. Buna ek olarak ve jeotermal enerji yenilenebilir olarak kabul edilmesine rağmen, yenilenmesinin birçok farklı faktöre bağlı olması nedeniyle tükenme ve aşırı sömürülme olasılığı tartışılmıştır. Son olarak, yüksek ilk maliyetler kullanıcıları buna yatırım yapmaktan caydırabilmektedir [29].

Jeotermal enerjinin birçok kullanıma alanı vardır. Bu alanlar; ısıtma sistemleri, elektrik üretimi ve jeotermal ısı pompalarında kullanımı olarak sınıflandırılabilir. Dünyanın çekirdeği, potasyum ve uranyum gibi elementlerin radyoaktif bozunumu ile sürekli olarak ısı ürettiğinden, jeotermal enerji yerinilebilir enerji kaynağı olarak ortaya çıkmaktadır. Bir jeotermal enerji

tesisinde yakıt kullanılmaz, bu nedenle hem sürdürülebilir hem de çevre için güvenlidir [8].

Jeotermal enerji santrallerinin en büyük dezavantajı konumudur. Bu santraller için uygun yerler bulmak oldukça zordur. Ayrıca bu santrallerin yapılabileceği yerlerin sayısı oldukça sınırlıdır. Kolayca sondaj yapılabilmesi için konumun sıcak kayalara sahip olması gerekir. Uygun jeotermal enerji santrali konumlarının nasir olmasının yanı sıra, güvenlik sorunu da mevcuttur. Jeotermal enerji yoğunluğu genellikle volkanların yoğunlaştığı ve depremlerin en sık görüldüğü levha sınırların boyunca bulunabilir. Çok sık olmasa da jeotermal enerji santrallerinde buhar tükenebilir ve bu süre zarfında santral elektrik üretemez. Jeotermal enerji, diğer enerji kaynaklarına göre nispeten daha az güç sağlar. Bu nedenle, jeotermal enerji santralleri sadece çevrelerindeki alanlara enerji sağlayabilir. Buharın kendisi temiz ve güvenli olsa da yeraltından hidrojen, sülfür, cıva, amonyak ve arsenik gibi tehlikeli maddeler ortaya çıkabilir.

2.5. Hidroelektrik

Hidroelektrik enerjisi, suyun kinetik enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle elde edilen bir enerji türüdür. Bu enerji, genellikle barajlar veya nehirlerin akışları aracılığıyla sağlanır. Barajlar, suyu biriktirerek yüksek bir noktada depolar ve bu suyun serbest bırakılmasıyla oluşturulan su akışı, türbinleri döndürerek elektrik üretir. Su akışının hızı ve miktarı, üretilen elektrik enerjisinin miktarını belirler. Hidroelektrik santralleri barajlı veya barajsız olabilir: barajlı hidroelektrik büyük bir depolama kapasitesine sahiptir ve daha büyük ölçekte enerji üretebilirken, barajsız hidroelektrik daha küçük ihtiyaçlar için önerilir ve daha da çevre dostu bir seçenek olarak kabul edilir.

Hidroelektrik temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Ekonomik, teknik ve çevresel faktörler göz önüne alındığında ,hidroelektriğin faydaları nedeniyle çoğu ülke hidroelektriğin geliştirilmesine öncelik vermektedir [8]. Ayrıca düşük işletme maliyetlerine sahip ve sosyoekonomik kalkınmayı teşvik eden güvenilir bir enerji kaynağıdır [30]. Hidroelektrik, enerji kaynakları arasında %90'a ulaşan en iyi dönüşüm verimliklerinden birine sahiptir ve aynı zamanda yenilebilir enerji kaynakları tarafından üretilen elektriğin yaklaşık %97'sini sağlayabilmektedir [31].

Hidroelektrik en önemli dezavantajı, suyun bulunduğu alanlara müdahale edeceğinden su kalitesinin izlenmesini ve yönetilmesi gerekmektedir [30]. Ayrıca, yağışa bağlı olan bir sisteme sahip olduğundan dolayı suyun eksikliği söz konusu değildir. Son olarak, ilk maliyetler gerçekten yüksek kaldığı için maliyet açısından etkili teknolojik çözümlerin geliştirilmesi gerekmektedir [8].

3. TÜRKİYEDE YENİLEBİLİR ENERJİ SEKTÖRÜNÜN DURUMU

Türkiye'deki elektrik santrallerinin kurulu gücü, Temmuz 2024 itibarıyla 112.999 MW (megawatt) (100 GW- gigawatt) seviyesine ulaşmıştır ve santrallere sağlanan çeşitli teşviklerle birlikte bu artış eğiliminin devam ettiği gözlemlenmektedir. Temmuz 2024 itibarıyla Türkiye'nin kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı şu şekilde belirlenmiştir: %28,5'lik kısmı hidrolik enerji, %21,9'u doğal gaz, %19,3'ü kömür, %10,9'u rüzgâr, %15,6'sı güneş, %1,5'i jeotermal ve %2,4'ü ise diğer kaynaklardan oluşmaktadır [32]. 2005 yılından bu yana, kurulu güç içerisinde yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen payın sürekli olarak arttığı vurgulanmalıdır. Özellikle, 2021 yılında gerçekleşen yaklaşık 3.160 MW'lık net kurulu güç artışının, tamamen yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üreten santrallerden sağlandığı gözlenmiştir. Öte yandan, 2008 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik, toplam üretimin %17,7'sini oluştururken, bu oran 2021 yılında %35,7'ye, 2022 yılında ise %40'a yükselmiştir [33].

Türkiye bulunduğu coğrafi konumu nedeniyle, yenilenebilir enerji kaynaklarına ulaşmada birçok ülkeye göre avantajlı durumda olduğu söylenilebilir [34]. Türkiye'de elektrik enerjisi üretim santrali sayısı, 2024 yılı temmuz ayı sonu itibarıyla lisanssız santraller dahil 30.380'e yükselmiştir. Mevcut santrallerin 763'ü hidroelektrik, 69'u kömür, 367'si rüzgâr, 63'ü jeotermal, 350'si doğal gaz, 28.288'i güneş ve 480'i ise diğer kaynaklı santrallerden oluşmaktadır. Tablo 1'de Türkiye'de kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarının yıllara göre enerji kurulu gücü bilgileri verilmiştir.

Tablo 1. Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Kurulu Gücü (MW)

Yıllar	Hidroelektrik	Rüzgâr	Güneş	Jeotermal	Biyokütle
2013	22289	2760	-	311	224
2014	23679	3630	40	405	288
2015	25868	4503	249	624	362
2016	26681	5751	833	821	489
2017	27273	6516	3421	1064	634
2018	28291	7005	5063	1283	811
2019	28503	7591	5995	1515	1163
2020	30984	8832	6667	1613	1485
2021	31493	10607	7816	1676	2035
2022	31558	10976	8479	1686	2172

Tablo 1, Türkiye'deki yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güç kapasitesini (MW) göstermektedir. 2011-2022 dönemine ait istatistikler, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen kurulu gücün her yıl arttığını ortaya koymaktadır. 2022 yılının ilk yarısında hidroelektrik santrallerin 31.500 MW'ı aşan kurulu gücü, Türkiye'deki en yüksek yenilenebilir enerji kapasitesini oluşturmaktadır. Aynı yıl, rüzgâr enerjisinin kurulu gücü yaklaşık 11.000 MW seviyesine ulaşarak, hidroelektrikten sonra en yüksek kurulu güce sahip ikinci yenilenebilir kaynak olmuştur. Son 10 yıl içinde rüzgâr enerjisinin kurulu gücünde 6 katın üzerinde bir artış kaydedilmiştir.

2014 yılından itibaren güneş enerjisi santrallerinin kurulu gücünde de dikkat çekici bir artış gözlemlenmiştir. Bu artışın devam etmesi durumunda, güneş enerjisinden elde edilen toplam enerji miktarının da önemli ölçüde artması beklenmektedir. 2022 yılı itibarıyla güneş enerjisi kurulu gücü yaklaşık 8.500 MW seviyesine ulaşmıştır. Tablo 1'de ayrıca jeotermal enerji santrallerinin kurulu gücünün söz konusu dönemde yaklaşık 15 kat, biyokütle enerji santrallerinin kurulu gücünün ise 19 kat arttığı görülmektedir. 2022 yılında, jeotermal enerji santrallerinin kurulu gücü 1.686 MW, biyokütle enerji santrallerinin kurulu gücü ise 2.172 MW olarak kaydedilmiştir.

2024 yılının ilk yarısı itibarıyla Türkiye'nin toplam elektrik kurulu gücünün 110 bin megavatı aştığı görülmektedir. Toplam kurulu güç içinde en yüksek yenilenebilir enerji kapasitesine sahip kaynak, 23 bin 855 megavat ile hidroelektrik santralleri olmuştur. Güneş enerjisi santralleri 14 bin 994 megavat, rüzgâr enerjisi santralleri 12 bin 194 megavat, biyokütle santralleri 2 bin 94 megavat ve jeotermal enerji santralleri ise 1.691 megavat kapasite ile bu güce katkıda bulunmaktadır.

Yenilenebilir enerji kurulu gücü açısından dünya sıralamasında, Brezilya, Hindistan, Almanya, Japonya, Kanada, İspanya, Fransa ve İtalya ilk sıralarda yer alırken, Türkiye'nin bu sıralamadaki yeri 11. olarak belirtilmiştir[34].

4. YENİLEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ BİNALARDA KULLANIMI

Binaların sürdürülebilirlik değerlendirmesi, özellikle tüm dünyadaki bina sektöründe sürdürülebilir kalkınma için gerekli hale gelmiştir. Sürdürülebilir tasarımın temel hedefleri, enerji, su ve hammaddeler gibi kritik kaynakların tükenmesini azaltmak, tesislerin ve altyapının yaşam döngüsü boyunca neden olduğu çevresel bozulmayı önlemek, suyun ve güneş enerjisinin güvenli, üretken ve etkili bir şekilde kullanıldığı inşa edilmiş yapılar ortaya çıkarmaktır[6].

Binalarda enerji tasarrufu için muazzam bir potansiyel bulunmaktadır. Yeni inşa edilen binalar ve tadilat altındaki binalar için enerji tasarrufu önlemleri

geliştirilmektedir. Ancak, standart enerji verimliliği yöntemlerinin dışında binalarda enerji tüketiminde önemli bir azalma sağlamak için, yenilebilir teknolojilerin uygulanması gerekir [35].

Enerji açısından verimli bir binada, tüm dış bölmelerin uygun tasarımı ve inşası, odaların uygun termal konforunun elde edilmesi üzerinde temel bir etkiye sahiptir [36]. Bir evin enerji verimliliği, malzemelerin diğer özelliklerinin yanı sıra, zemindeki döşeme, duvarlar, çatı, pencereler ve kapılar gibi her bir elemanın ısı transfer katsayısı ile belirlenir. Isı transfer katsayısının değeri ne kadar düşükse, bölmenin sergilediği yalıtım özellikleri o kadar iyi olur. Duvarlar bir evin en önemli unsurlarından biridir. Yağmur, kar, rüzgâr, don ve UV ışınları gibi olumsuz hava koşullarına maruz kalırlar. Bu nedenle, dayanıklı olmalı ve aynı zamanda iyi ısı yalıtımı, sızdırmazlık ve ses geçirmezlik sağlamalı, emici olmamalı ve güneşin etkisiyle oluşan renk solmasına ve dona karşı dayanıklı olmalıdır [37].

Enerji dengesi, düşük enerjili ve pasif binaların tasarımında önemli bir unsurdur. Nu inşaat sektörünün amacı, merkezi ısıtma sisteminden gelen ısı talebini azaltmak veya tamamen ortadan kaldırmaktır. Enerji dengesi, geleneksel bir evdeki kayıpların çok büyük olduğunu göstermektedir. İklim koşullarında, toplam enerji tüketiminin en büyük bileşeni binaların ısıtma talebidir, bu nedenle enerji tasarrufu sağlayan bir nesne, ısıtma amaçlı düşük talebi olan bir binadır [38].

Yenilebilir enerji kaynakları teknolojisinin seçiminin ön karlılık analizini yapmak için, belirli bir tesisin dış duvarlar, çatı, tavan, zemindeki döşemeler veya ısıtılamayan bir bodrumun üzerindeki tavan, pencereler ve dış kapılar tarafından üretilen ısı kayıplarını karşılamak için gereken enerji miktarını tahmin etmek gerekir. Bununla birlikte, aydınlatma, sıcak su tesisatı, havalandırma, klima vb. gibi sistemleri de hesaba katmak gerekir.

Güneş panelleri, güneş kolektörleri, ısı pompaları veya düşük ısı transfer katsayısına sahip pencerelerde çift cam kullanımı da dahil olmak üzere yenilebilir enerji kaynaklarının kullanımı sayesinde dünyada sıfır enerji tüketimli inşaatın yoğun bir şekilde gelişmesine neden olmuştur [39].

Yapı sektöründe enerji tüketimini azaltmak ve yenilebilir enerji kullanımını arttırmak, Avrupa Birliği Üye Devletleri'nde öncelikli bir eylemdir. Bu faaliyetler, fosil yakıtların potansiyelinin etkili ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını ve yakıtın enerji sürecinden kaynaklanan gaz ve toz emisyonlarının azaltılmasını sağlar. Enerji taşıyıcıların sürekli artan fiyatları, belirli bir binanın, özellikle yeni inşa edilen bir binanın enerji performansının iyileştirilmesi gerekliliğin zorunlu kılar [40].

4.1. Güneş Enerjisinin Binalarda Kullanımı

Yenilebilir enerji teknolojilerinin sürdürülebilirlik ve enerji arzının güvenliği, artan istihdam ve enerji sistemlerinin uzun ömrü gibi çeşitli faydaları vardır. Güneş enerjisi sistemlerinin ilk maliyetleri yüksek seviyelerde olsa bile Avrupa ve uluslararası taahhütlere uygun görünmektedir. Bunun nedeni güneş teknolojisinin binalar ve kentsel uygulamalar için çevre açısından oldukça elverişli olmasıdır. Bu tür teknolojiler, pahalı ve ithal edilen geleneksel enerji kaynaklarının (petrol, doğal gaz, kömür) yerini alabildikleri için çoğu ülkenin ekonomisi için oldukça önemlidir. Güneş enerjisi sistemleri ısıtma, soğutma, elektrik ve aydınlatma ihtiyaçlarını karşılamak için binalara çok uyumlu bir şekilde uygulanabilir [6].

Yenilebilir enerjinin en önemli kaynağı olan güneş enerjisi, diğer enerji kaynaklarına kıyasla daha temiz, yenilebilir, tükenmez ve yaygın olarak dağıtılmış enerji özelliklerine sahiptir. Güneş enerjisi sistemleri artık yerel şebekeden sağlanan elektriğe eşit veya daha düşük maliyetle elektrik üretebilir. Daha da önemlisi, güneş enerjisi, aktif veya pasif yöntemlerle binaların ihtiyaç duyduğu hemen hemen tüm enerji biçimlerini sağlayabilir [41].

Güneş enerjisi, binalarda ısıtma veya soğutma sağlamak için ısı pompaları ve absorpsiyon soğutucuları gibi enerji kullanım ekipmanlarıyla entegre edilebilir. Güneş kolektörleri ve güneş yoğunlaştırıcı kolektörler genellikle yüksek sıcaklıkta sıcak su üretmek için kullanılır ayrıca su, alan soğutması için absorpsiyon soğutucularını çalıştırmak için daha sonra kullanılabilir. Güneş enerjisi ayrıca pasif yöntemlerle binalara doğrudan alan ısıtması sağlayabilir. Faz değişim malzemeleri (FDM) ve güneş spektrumu seçici malzemeleri genellikle termal enerji depolama kapasitesini arttırmak veya kızılötesi güneş radyasyonunun neden olduğu soğutma yükünü azaltmak için güneş pasif tasarımlarıyla birleştirilmiştir.

4.1.1. PV (Fotovoltaik) sistemler

Fotovoltaik güneş pilleri, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bu prensip, ilk kez 1839 yılında Fransız fizikçi Becquerel tarafından keşfedilmiştir. Becquerel, elektrolit içine yerleştirilmiş elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışık miktarına bağlı olarak değiştiğini gözlemlemiştir [42].

Bir fotovoltaik sistemi, PV modüller, invertörler (Dönüştürücüler) ve akü bileşenlerinden meydana gelmektedir. Şekil 1' de Fotovoltaik bir sisteminin bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 1. Fotovoltaik sistem bileşenleri

Fotovoltaik güneş panelleri, içerdikleri yarı iletken silikon teknolojisine sahip güneş hücreleri sayesinde güneş ışınlarını doğrudan doğruya DC elektrik enerjisine dönüştürür. Günümüzde farklı türlerde güneş panelleri kullanılmaktadır. En yaygın olanları ise monokristal, polikristal ve ince film (thin film) güneş panelleridir. Ancak, bu çeşitler arasında en yaygın kullanılan polikristal güneş panelleridir.

Günümüzde birçok ülke, çeşitli şirketler tarafından üretilen fotovoltaik modülleri kullanmaktadır. Bu modüller, yapısal özelliklerine göre farklı sınıflara ayrılmaktadır.

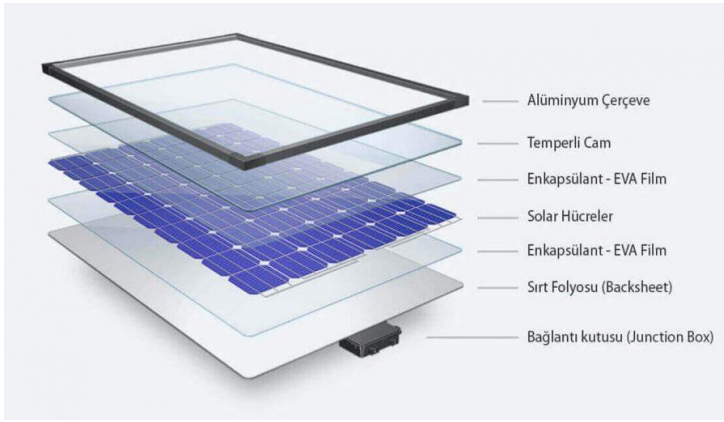
- **Alüminyum çerçeveli ve camlı modüller;** Bu modüllerde güneş enerjisi paneli, alüminyum bir çerçeveye yerleştirilmiştir. Panel, çevresel koşullardan korunması için cam bir tabaka ve koruyucu bir film ile kaplanmış PV hücrelerinden oluşur. Bu modül tipi, kullanım yaygınlığı açısından en çok tercih edilenlerden biridir.

- **Çerçevesiz modüller;** Bu modüller, oldukça yüksek verim sağlayan monokristal silikon PV hücrelerinden üretilir ve iki katman optik film ile kaplanır. Modülün yapısında, arka kısmında PET (polyethylene terephthalate) filmi, ortasında PV hücresi ve ön kısmında PET film veya cam bulunur. Çerçevesiz tasarımları sayesinde, genellikle trafik ikaz ışıkları veya hibrit sistemler gibi başka bir sistemle bağlantının gerekmediği durumlarda tercih edilir.

- **Metal tabanlı modüller;** Bu modüller, optik film tabakaları arasında ince katmanlar halinde yerleştirilmiş, yüksek verimli monokristal silikon güneş

hücrelerinden üretilir. Paslanmaz çelik, metal veya alüminyum alaşım üzerine, özel yapışkan ve yalıtım sağlayan bir kaplama ile monte edilir. Yapısında metal bir taban, PET film, orta kısımda fotovoltaik hücreler ve ön yüzeyde PET film veya cam bulunur. Bu tasarım, dayanıklılık ve uzun ömür gerektiren uygulamalarda sıkça kullanılır.

• **Çift yüzeyli modüller;** Hem ön hem de arka yüzeyiyle enerji üretebilen, yenilikçi bir modül türüdür. Bu modüller, geleneksel sistemlere kıyasla daha fazla enerji üretme kapasitesine sahiptir ve farklı türde PV uygulamalarında kullanılabilir. Çift yüzeyli tasarımları sayesinde enerji maliyetlerinde önemli bir azalma sağlarlar. Tipik bir PV modül yapısının genel görünümü şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Tipik bir PV modül yapısı

Güneş panelleri, bünyelerindeki hücrelerin verimliliğine ve dizilim şekline bağlı olarak farklı güçlerde üretilebilmektedir. Genellikle santrallerde, evlerde ve tarımsal sulama sistemlerinde tercih edilen panellerin güç kapasitesi 150W ile 285W arasında değişmektedir.

PV panellerin elektrik üretiminde verimliliklerini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bunlar arasında sıcaklık, havadaki toz partikülleri, gölgelenme, bulutluluk ve panellerin güneşle yaptığı açı öne çıkmaktadır. Özellikle sıcaklığın, PV panellerin verimini olumsuz etkilediği bilinen bir gerçektir. Panelin sıcaklığı arttıkça ürettiği voltaj değeri düşer ve bu durum, voltajın kritik öneme sahip olduğu güneş santralleri, sulama sistemleri veya şebekeye bağlı ev sistemlerinde performans kayıplarına neden olabilir.

Güneş enerjisinden yapılarda faydalanma, aktif ve pasif olmak üzere iki şekilde gerçekleşmektedir. Aktif yararlanma ise termodinamik sistemler ve fotovoltaik sistemler olarak ikiye ayrılmaktadır. PV modüller aracılığıyla güneş

enerjisinden doğrudan elektrik enerjisi üreterek yapıların elektrik ihtiyacını karşılamaktadır.

Günümüzde PV modüller, yapılara monte edilerek ya da entegre edilerek yapı kabuğunun bir bileşeni olarak kullanılmaktadır. Özellikle yapıların düşey cephelerinde uygulanan bu sistemler, geleneksel cam-giydirme cephelerden görsel olarak farksız olup ek bir konstrüksiyona ihtiyaç duymaz. Kullanılan yarı-geçirgen veya opak PV modüller sayesinde, hem güneş kontrolü sağlanarak iç mekânda konfor artırılmakta hem de üretilen elektrik enerjisi yapı içerisinde kullanılabilir [43].

4.1.2. Güneş termal sistemleri

Güneş termal panelleri, elektrik yerine ısı üretmek için güneş enerjisini kullanımı bakımından PV'lerden farklıdır [44]. Bu şekilde elde edilen enerji daha düşük kalitede olsa da, güneş termal panelleri %70'e kadar verimlilikle PV panellerinden çok daha yüksek verimlilik elde edilebilir [45]. Güneş termal sistemleri bir daldıra ısıtıcı, kazan veya kolektör ile kullanılabilir. Evlerde kullanılan tipik bir güneş termal sistemi için düz plakalı güneş kolektörleri en fazla miktarda güneş enerjisini toplamak için çatıya optimum açıyla yerleştirilir [46]. Panellerin içindeki su, daha soğuk aylarda hasar oluşmasını önlemek için bir antifriz çözeltisiyle birleştirilir. Antifriz çözeltisi güneş kolektörlerinde ısıtılıp ve daha sonra evin suyunu ısıtmak için bir ısı eşanjöründen geçirilir. Ayrıca antifriz çözeltisi, su sıcaklığı çok düşük olması durumunda yardımcı bir ısıtıcıya sahip bir depolama tankında tutulur [47].

4.2. Isı Pompalarının Binalarda Kullanımı

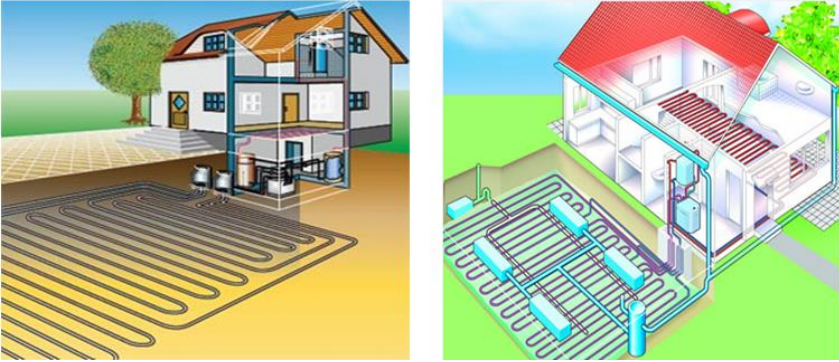
Isı pompası, düşük sıcaklıktaki taraftan ısı enerjisini emen, bu tarafta soğuma sağlayan ve ardından bu ısıyı yüksek sıcaklıktaki karşı tarafa aktararak onu ısıtan bir cihazdır. Bu işlem, genellikle soğutma ve ısıtma sistemlerinde enerji verimliliğini artırmak amacıyla kullanılır. Isı pompası, çevredeki düşük sıcaklıklı havadan, yer altından veya sudan ısı alarak iç mekanları ısıtmak için kullanılırken, aynı zamanda soğutma işlemi de yapabilir [48]. Isı transferi, iç soğutucu akışkanın dolaştırılması, sıkıştırılarak ısıtılması ve genişletilerek soğutulmasıyla gerçekleştirilir. Sıvı olarak, soğutucu akışkan düşük sıcaklıktaki bir ısı eşanjöründe buharlaşarak çevresinden ısı alır. Buhar sıkıştırılır ve daha sonra yüksek sıcaklıktaki bir ısı eşanjöründe yoğunlaşarak çevresine ısı verir.

Isı pompası, sıkıştırma, yoğuşma, genişleme ve buharlaşma olmak üzere dört aşamalı bir döngüyü takip eder. Soğutucu, kaynaktan ısıyı emerken faz değişimine uğrar. Daha sonra, faz değişimini tersine çevirerek ısı, mekân ve sıcak su ısıtması için hava ve su gibi emiciye aktarılır. Ayrıca, soğutucu akışımı tersine çevirmek için dört yönlü bir vana kullanılarak, ısı pompası ayrıca iç mekândan

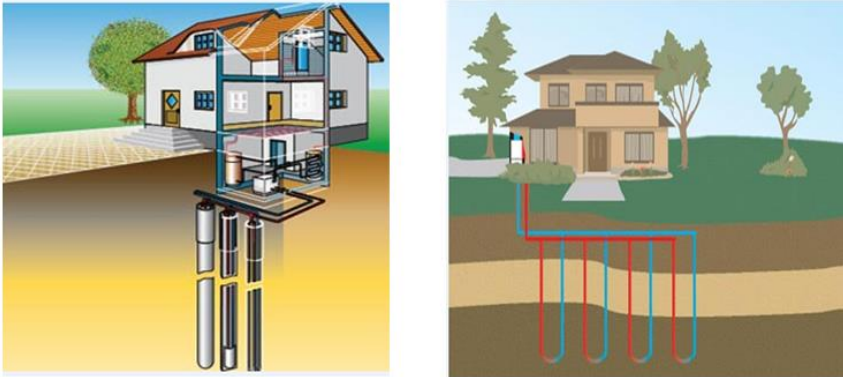
ısıyı emebilir ve bunu dışarıdaki emiciye aktarabilir ve böylece mekân soğutmasını mümkün hale getirebilir [49].

Son zamanlarda yeraltı kaynaklı ısı pompası sistemleri yüksek enerji verimliliği ve çevre dostu olması nedeniyle giderek daha fazla ilgi görmektedir [50,51]. Güneş, rüzgâr, biyokütle ve hidro gibi yenilebilir enerji biçimleri gibi enerji biçimleri düşük ve sera gazı üretmez. Zemin sıcaklığı donma çizgisinin altında oldukça sabittir. Zemin, kış ortasında dışarıdaki havadan daha sıcak ve yaz ortasında daha soğuktur. Bu nedenle, zemin verimli bir ısı kaynağıdır.

Mevcut toprak alanı, toprağın bileşimi, yoğunluğu, içerdiği nem miktarı ve boruların toprağa gömülme derinliği gibi faktörler, toprak kaynaklı ısı pompalarında ısı değiştiricisinin seçiminde ve boyutlandırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Toprak kaynaklı ısı pompalarında, ısı topraktan iki şekilde çekilebilir: Yatay toprak ısı değiştiricili sistem ve dikey toprak ısı değiştiricili sistem. Her iki tip toprak kaynaklı ısı pompasının çalışma prensibi aynıdır. Şekil 3'te yatay tip ısı pompası uygulamaları, Şekil 4'te ise dikey toprak ısı değiştiricili sistem gösterilmiştir.



Şekil 3. Yatay tip ısı pompası uygulamaları



Şekil 4. Dikey sondaj uygulamaları

Yeraltı suyunu ısı kaynağı veya emici olarak kullanan yeraltı kaynaklı ısı pompası sistemi, düşük ilk maliyeti ve diğer ısı pompaları sistemlerine kıyasla minimum yer ve yüzey alanı gereksinimi gibi bazı belirgin avantajlara sahiptir [52]. Ancak, yeraltı suyunun sınırlı bulunabilirliği ve borulardaki ve ekipmanlardaki korozyondan kaynaklanan yüksek bakım maliyeti gibi bir dizi faktör bu sistemin geniş alanlarda uygulamasını ciddi şekilde kısıtlamaktadır. Sistemin en büyük dezavantajı ise, yüzey suyu sıcaklığının özellikler kış aylarına hava koşullarından daha fazla etkilenmesidir.

4.3. Rüzgâr Enerjisinin Binalarda Kullanımı

Yeryüzünün farklı bölgelerinin çeşitli derecelerde ısınması, hava sıcaklığı, nem ve basınçta farklılıklara yol açmakta, bu basınç farkları da hava kütlelerinin hareket etmesine neden olmaktadır. Bu hava hareketine rüzgâr denir [53]. Diğer bir deyişle, dönüşüme uğramış güneş enerjisi olan rüzgâr enerjisi, hava kütlelerinin sahip olduğu kinetik enerjinin mekanik enerjiye dönüştürülmesidir. Rüzgâr enerjisi, doğal, tükenmeyen, kullanım sırasında atık üretmeyen ve radyoaktif etkisi bulunmayan, bu nedenle doğaya ve insan sağlığına olumsuz etkisi olmayan, aynı zamanda hızlı bir teknolojik gelişim gösteren bir enerji kaynağıdır.

Rüzgârdan enerji elde edilmesi, çok eski çağlara dayanmaktadır. Yel değirmenleri, rüzgâr enerjisi sistemlerinin ilk örnekleri olarak kabul edilmektedir. Modern rüzgâr enerjisinin kullanımı ise 1973-1979 yılları arasındaki petrol kriziyle başlamıştır. Bu dönemde, devlet destekli birçok Ar-Ge programı başlatılmış ve zamanla özel sektör de bu alana ilgi göstermeye başlamıştır. Teknolojik gelişmeler ve fosil yakıtların neden olduğu zararlı emisyonların ekosistem üzerinde yarattığı olumsuz etkileri azaltma çabaları, rüzgâr enerjisinin kullanımını ve bu alandaki araştırmaları hızlandırmıştır. Rüzgâr enerjisi, binalarda pasif sistemlerde doğal havalandırma amacıyla, aktif sistemlerde ise enerji üretimi için kullanılmaktadır.

Rüzgâr enerjisi, dünyanın en hızlı büyüyen ve en düşük maliyetli enerji kaynağı olmasının yanı sıra çevre kirliliğine yol açmayan bir alternatif enerji seçeneği olarak gelişmiş ülkelerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle günümüzde A.B.D.'de inşa edilmesi planlanan yüksek binalarda, rüzgâr enerjisiyle ilgili tasarımlar giderek daha fazla ön planda yer almaktadır. Rüzgâr türbinlerindeki teknolojik ilerlemeler sayesinde, önceki dezavantajlar ortadan kaldırılmıştır. Ticari amaçla kullanılan ilk rüzgâr türbinleri oldukça gürültülü iken, günümüzde geliştirilen yeni türbinler, bu sorunu çözerek ses seviyesini önemli ölçüde düşürmüştür [54].

Binaya entegre edilen rüzgâr türbinleri, yapının topografyasına ve yerleşim durumuna göre rüzgâr verileri alınarak, yapının farklı bölümlerinde kullanılabilir. Yatay ve düşey rüzgâr türbinleri, bina veya binalara entegre edilmektedir. Bina

veya binaların rüzgâr açısı, türbinlerden maksimum verim elde edebilmek için büyük önem taşır. Bölgenin hâkim rüzgâr yönü ve binanın konumu, türbinlerin hangi yüzeylere monte edileceğini belirler.

Binaya entegre edilmiş rüzgâr türbinleri, yapının mimari tasarımında türbinin nasıl çalışacağına odaklanarak planlanmaktadır. Bina veya binaların formu, rüzgârın yönünü, hızını veya şiddetini değiştirmek ve artırmak suretiyle elde edilecek enerjiyi maksimum seviyelere çıkarmayı hedefleyen türbinler olarak tasarlanmıştır. Bu türbinler aktif hale geldiğinde, yapıya ekstra bir yük bindireceğinden, binanın statik açıdan güçlendirilmesi gerekebilir. Rüzgâr türbinlerinin mimari şekil üzerindeki etkisi büyüktür. Bina tasarımının temel amacı, rüzgâr enerjisinden elektrik üreterek yapının elektrik ihtiyacına katkı sağlamaktır. Bu tasarımlar yapılırken, türbinin dönüşünden kaynaklanan gürültüyü minimum seviyeye indirmek için cephelerde farklı tasarımlar kullanılmalıdır. Şekil 5'te farklı binalara monte edilen rüzgâr türbinleri gösterilmiştir.



Şekil 5. Lighthouse / Castlehouse

5. SONUÇLAR

Uzun yıllardır devam eden küresel enerji sorunu, son yıllarda inşaat teknolojilerinin geliştirilmesi ve çeşitlendirilmesinin gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Fosil yakıtların tükenmesi ve çevreye verdiği zararlar, binalarda enerji tüketimini ve çevreye verilen zararı azaltmaya yönelik önlemlerin alınmasını zorunlu hale getirmiştir. Enerji, mimarlık alanındaki tasarım süreçlerini yönlendiren en önemli etkenlerden biri haline gelmiş ve yenilenebilir

enerji kaynaklarının binalarda pasif ve aktif kullanım süreçlerinin, tasarım aşamasından itibaren büyük bir önem kazandığı gözlemlenmiştir. Bu gelişmelerin bir sonucu olarak, bina tasarımlarında yenilebilir enerji kaynaklarından yararlanma çalışmalarının hız kazandığı ve bu kaynakların verimli bir şekilde kullanılmaya başlandığı görülmektedir.

Teknolojinin gelişimiyle birlikte artan enerji ihtiyacı, doğaya zarar vermeyen yenilenebilir enerji kaynaklarının, yani güneş, rüzgâr, hidrolik ve jeotermal enerji kaynaklarının kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Bu durum, sürdürülebilir ve sağlıklı bir yaşam için büyük önem taşımaktadır. Çünkü enerji kaynağının tükenmesini göz ardı etmemek gerekir; yenilenemeyen fosil yakıtlar üzerinde sürdürülebilir bir üretim sağlanmamalıdır. Binalarda enerji tüketiminin en fazla gerçekleştiği alanlar olan ısıtma, soğutma ve aydınlatma sistemlerinin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre edilmesi, enerji tasarrufu sağlanmasına olanak tanır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının yapıları kullanımı incelendiğinde, en yaygın olarak kullanılan enerji türlerinin rüzgâr, güneş enerjisi ve ısı pompası olduğu görülmektedir. Bu enerji sistemleri, aktif ve pasif olarak yapıların ısıtma, soğutma, aydınlatma, havalandırma ve elektrik tüketimine katkı sağlamaktadır. Binalar tasarlanırken, yenilenebilir enerji kaynaklarından maksimum verim elde etmek, enerji korunumu ve tasarrufu sağlamak adına öncelikle ele alınması gereken konulardan biridir. Bu yaklaşım, yapı tasarımı yapıldıktan ve kullanıma alındıktan sonra, gereksiz tadilatların önüne geçilmesini sağlar. Bu nedenle, ihtiyaçların tasarım aşamasında düşünülerek, doğal verilerden faydalanılması önemlidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarını yapı bileşeni olarak kullandığımızda, çevresel tasarım ilkelerine uygun hareket etmek, değişken iklim koşullarına uyum sağlamayı mümkün kılar. Ayrıca, çevresel etkileri göz önünde bulundurduğumuzda, binaların iç mekânında kullanıcıların ergonomik düzeyde pozitif etkilerle enerji tüketiminin minimuma indirilmesi sağlanmış olur.

Ekonomisi güçlü olan ülkelere bakıldığında, tüketilen enerji ile doğru orantılı olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıldığı gözlemlenmektedir. Bu bağlamda, her canlının, enerjinin düzenli ve verimli bir şekilde kullanılması adına yeşil enerji teknolojilerinin yapılarda kullanımı dikkate alınarak bilinçli bir yaklaşım benimsenmelidir. Bu şekilde, dış kaynaklardan ithal edilen enerjiye bağımlılıktan ziyade, yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının yapılarında kullanılması teşvik edilmelidir. Bunun için devletin desteğiyle, bu tür projelerin hayata geçirilmesi önemlidir.

KAYNAKLAR

- [1] R. Demircan Kılıç, A.B. Gültekin, Binalarda Pasif ve Aktif Güneş Sistemlerinin İncelenmesi, *Tübvav Bilim Derg.* 10 (2017).
- [2] E. Işık, B. Ün, G. Mıstıkoğlu, E. Erdiş, Yapı Sektöründe Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımı, *Int. Conf. Appl. Eng. Nat. Sci.* 1 (2023).
<https://doi.org/10.59287/icaens.1089>.
- [3] M. Senatla, R.C. Bansal, Review of planning methodologies used for determination of optimal generation capacity mix: The cases of high shares of PV and wind, *IET Renew. Power Gener.* 12 (2018).
<https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2017.0380>.
- [4] N.T. Mbungu, R.C. Bansal, R.M. Naidoo, M.W. Siti, D.H. Tungadio, Modelling of a smart hybrid water-power system for freshwater and energy supply network, in: *2020 1st Int. Conf. Power, Control Comput. Technol. ICPC2T 2020*, 2020.
<https://doi.org/10.1109/ICPC2T48082.2020.9071473>.
- [5] N.T. Mbungu, R. Naidoo, R.C. Bansal, M. Bipath, Optimisation of grid connected hybrid photovoltaic-wind-battery system using model predictive control design, *IET Renew. Power Gener.* 11 (2017).
<https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2017.0381>.
- [6] A. Chel, G. Kaushik, Renewable energy technologies for sustainable development of energy efficient building, *Alexandria Eng. J.* 57 (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.02.027>.
- [7] M. Milošević, D. Milošević, V. Dimić, D. Stević, A. Stanojević, The analysis of energy efficiency indicators and renewable energy sources for existing buildings, in: *Zbornik Međunarodne konferencije o obnovljivim izvorima električne energije–MKOIEE*, 2017.
- [8] J. Mohtasham, Review Article-Renewable Energies, in: *Energy Procedia*, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.774>.
- [9] M. Cakir, I. Cankaya, I. Garip, I. Colak, Advantages of Using Renewable Energy Sources in Smart Grids, in: *10th Int. Conf. Smart Grid, IcSmartGrid 2022*, 2022.
<https://doi.org/10.1109/icSmartGrid55722.2022.9848612>.
- [10] M.S. Hossain, N.A. Madlool, N.A. Rahim, J. Selvaraj, A.K. Pandey, A.F. Khan, Role of smart grid in renewable energy: An overview, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 60 (2016).
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.098>.
- [11] I. Siksnelyte-Butkiene, E.K. Zavadskas, D. Streimikiene, Multi-criteria decision-making (MCDM) for the assessment of renewable energy technologies in a household: A review, *Energies* 13 (2020).

- <https://doi.org/10.3390/en13051164>.
- [12] P.A. Owusu, S. Asumadu-Sarkodie, A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation, *Cogent Eng.* 3 (2016).
- <https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1167990>.
- [13] G.E. Halkos, E.C. Gkampoura, Reviewing usage, potentials, and limitations of renewable energy sources, *Energies* 13 (2020).
- <https://doi.org/10.3390/en13112906>.
- [14] G.R. Timilsina, L. Kurdgelashvili, P.A. Narbel, Solar energy: Markets, economics and policies, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (2012).
- <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.009>.
- [15] E. Kabir, P. Kumar, S. Kumar, A.A. Adedun, K.H. Kim, Solar energy: Potential and future prospects, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82 (2018).
- <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>.
- [16] O. Peter, C. Mbohwa, Renewable energy technologies in brief, *Int. J. Sci. Technol. Res.* 8 (2019).
- [17] T.T.D. Tran, A.D. Smith, Evaluation of renewable energy technologies and their potential for technical integration and cost-effective use within the U.S. energy sector, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 80 (2017).
- <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.228>.
- [18] M.A. Islam, M. Hasanuzzaman, N.A. Rahim, A. Nahar, M. Hosenuzzaman, Global renewable energy-based electricity generation and smart grid system for energy security, *Sci. World J.* 2014 (2014).
- <https://doi.org/10.1155/2014/197136>.
- [19] F.R. Pazheri, M.F. Othman, N.H. Malik, A review on global renewable electricity scenario, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 31 (2014).
- <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.020>.
- [20] S. Abolhosseini, A. Heshmati, J. Altmann, A Review of Renewable Energy Supply and Energy Efficiency Technologies, *SSRN Electron. J.* (2021).
- <https://doi.org/10.2139/ssrn.2432429>.
- [21] R.J. Parise, G.F. Jones, Energy from deep space the Nighttime Solar Cell™ electrical energy production, in: *35th Intersoc. Energy Convers. Eng. Conf. Exhib.*, 2000.
- <https://doi.org/10.2514/6.2000-2822>.
- [22] O. Ellabban, H. Abu-Rub, F. Blaabjerg, Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 39 (2014).
- <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.113>.

- [23] R. Saidur, N.A. Rahim, M.R. Islam, K.H. Solangi, Environmental impact of wind energy, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011).
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.024>.
- [24] M.R. Safaei, H.R. Goshayeshi, I. Chaer, Solar still efficiency enhancement by using graphene oxide/paraffin nano-PCM, *Energies* 12 (2019).
<https://doi.org/10.3390/en12102002>.
- [25] M.E. Bildirici, Economic growth and biomass energy, *Biomass and Bioenergy* 50 (2013).
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.09.055>.
- [26] T. Abbasi, S.A. Abbasi, Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14 (2010).
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.006>.
- [27] F. Bilgili, E. Koçak, Ü. Bulut, S. Kuşkaya, Can biomass energy be an efficient policy tool for sustainable development?, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 71 (2017).
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.109>.
- [28] J.W. Lund, Direct utilization of geothermal energy, *Energies* 3 (2010).
<https://doi.org/10.3390/en3081443>.
- [29] R. Shortall, B. Davidsdottir, G. Axelsson, Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 44 (2015).
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.020>.
- [30] D.K. Okot, Review of small hydropower technology, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 26 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.006>.
- [31] A.M. Bagher, M. Vahid, M. Mohsen, D. Parvin, Hydroelectric Energy Advantages and Disadvantages, *Am. J. Energy Sci.* 2 (2015).
- [32] E.G. Yıldırım, Yenilebilir Enerji Kapasitesi Bakımından Türkiye'nin Potansiyelinin Değerlendirilmesi, *J. Econ. Res.* 5(2) (2024) 61–72.
- [33] Enerji Piyasaları Düzenleme Kurumu (EPDK), Elektrik Piyasası 2021 Yılı Piyasa Gelişim Raporu, 2022.
- [34] İ. Kavaz, B. Kaya, Türkiye'de Yenilebilir Enerji Tüketimi, Ekonomik Büyüme ve CO2 Emisyonu Arasındaki İlişkinin Analizi:ARDL Sınır Testi Yaklaşımı, *İşletme Ekon. ve Yönetim Araştırmaları Derg.* (2023) 219–243.
- [35] D. Chwieduk, Towards sustainable-energy buildings, *Appl. Energy* 76 (2003).
[https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(03\)00059-X](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(03)00059-X).

- [36] P. Olczak, M. Olek, D. Kryzia, The ecological impact of using photothermal and photovoltaic installations for DHW preparation, *Polityka Energ.* 23 (2020).
<https://doi.org/10.33223/epj/118999>.
- [37] R. Szczerbowski, The forecast of Polish power production sector development by 2050 – coal scenario, *Polityka Energ.* 19 (2016).
- [38] M. Niekurzak, Determining the unit values of the allocation of greenhouse gas emissions for the production of biofuels in the life cycle, *Energies* 14 (2021).
<https://doi.org/10.3390/en14248394>.
- [39] D. Shaw-Williams, C. Susilawati, G. Walker, J. Varendorff, Towards net-zero energy neighbourhoods utilising high rates of residential photovoltaics with battery storage: a techno-economic analysis, *Int. J. Sustain. Energy* 39 (2020).
<https://doi.org/10.1080/14786451.2019.1668394>.
- [40] P. Wróblewski, M. Niekurzak, Assessment of the Possibility of Using Various Types of Renewable Energy Sources Installations in Single-Family Buildings as Part of Saving Final Energy Consumption in Polish Conditions, *Energies* 15 (2022).
<https://doi.org/10.3390/en15041329>.
- [41] J. Yan, Y. Yang, P. Elia Campana, J. He, City-level analysis of subsidy-free solar photovoltaic electricity price, profits and grid parity in China, *Nat. Energy* 4 (2019).
<https://doi.org/10.1038/s41560-019-0441-z>.
- [42] Ş. Oktik, Güneş-Elektrik Dönüşümleri Fotovoltaik Güneş Gözeleri ve Güç Sistemleri, Temiz Enerji Vakfı Yayınları, Ankara, 2001.
- [43] K. Selçuk, S. İlhan, Güneş enerjisinden aktif olarak yararlanmada kullanılan fotovoltaik (PV) sistemler ve yapılarda kullanım biçimleri, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik ve Mimar. Fakültesi Derg.* 26 (2011) 89–106.
- [44] S.A. Kalogirou, Solar thermal collectors and applications, *Prog. Energy Combust. Sci.* 30 (2004).
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2004.02.001>.
- [45] K. Voss, E. Musall, M. Lichtmeß, From low-energy to net zero-energy buildings: Status and perspectives, *J. Green Build.* 6 (2011).
<https://doi.org/10.3992/jgb.6.1.46>.
- [46] J. Pérez, F. Alay, A. Joshi, R. Nallim, L. Chacha, L. Rojas-Solórzano, Improving energy efficiency in a municipal building: Case study of Ekurhuleni Metropolitan Municipality buildings in South Africa, in:

- Green Energy Technol., 2018.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-89845-2_55.
- [47] K. Patel, M. Pragna Patel, M.J. Patel, Review of Solar Water Heating Systems, *Int. J. Adv. Eng. Technol.* 3 (2012).
- [48] C. Verhelst, D. Degrauwe, F. Logist, J. van Impe, L. Helsen, Multi-objective optimal control of an air-to-water heat pump for residential heating, *Build. Simul.* 5 (2012).
<https://doi.org/10.1007/s12273-012-0061-z>.
- [49] R. Valancius, R.M. Singh, A. Jurelionis, J. Vaiciunas, A review of heat pump systems and applications in cold climates: Evidence from Lithuania, *Energies* 12 (2019).
<https://doi.org/10.3390/en12224331>.
- [50] J. Luo, J. Rohn, M. Bayer, A. Priess, Modeling and experiments on energy loss in horizontal connecting pipe of vertical ground source heat pump system, *Appl. Therm. Eng.* 61 (2013).
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.07.022>.
- [51] D. Pahud, B. Matthey, Comparison of the thermal performance of double U-pipe borehole heat exchangers measured in situ, *Energy Build.* 33 (2001).
[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00106-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00106-7).
- [52] I. Sarbu, C. Sebarchievici, General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings, *Energy Build.* 70 (2014).
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.068>.
- [53] J. E. Aronin., Climate and architecture., *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, New York (Reinhold), 1955.
<https://doi.org/10.1002/qj.49708134740>.
- [54] G. Tekbıyık, Sürdürülebilir mimarlıkta yenilebilir enerji kaynaklarının kullanımı, kamu binalarında uygulama yöntemleri ve örneklerinin incelenmesi, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, 2018.

3. Bölüm

Suriye El-Bab Tarım Arazileri İçin PVSYST Simülasyon Destekli Güneş Enerjisi ile Sürdürülebilir Sulama Sistemi

Fadel AL HAMADO AL CHEHABI¹

Mustafa TAHİR AKKOYUNLU²

Ali KAHRAMAN³

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enst./Makine Mühendisliği (D.R.), Konya / Türkiye , Orcid : 0000-0001-7872-3098, abomahmud1991@gmail.com

²Doç .Dr. Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Konya / Türkiye, Orcid: 0000-0001-5748-6759, makkoyunlu @erbakan.edu.tr

³Prof. Dr. Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Konya / Türkiye, Orcid: 0000-0003-3203-4697, akahraman@erbakan.edu.tr

1.Giriş

Dünya nüfusunun artışıyla gıda ve enerji talepleri de yükselmektedir. 2018 verilerine göre, dünya nüfusunun %45'i kırsal alanlarda yaşamakta, 2 milyardan fazla insan (%26,7) geçimini tarımdan sağlamaktadır. Dünya genelinde 570 milyondan fazla tarım arazisinin %90'ı bireysel veya aile işletmesi olarak ekilmekte olup, tarımsal üretimin %80'ini bu aileler gerçekleştirmektedir (Food and Agriculture Organization [FAO], 2014; FAO, 2018).

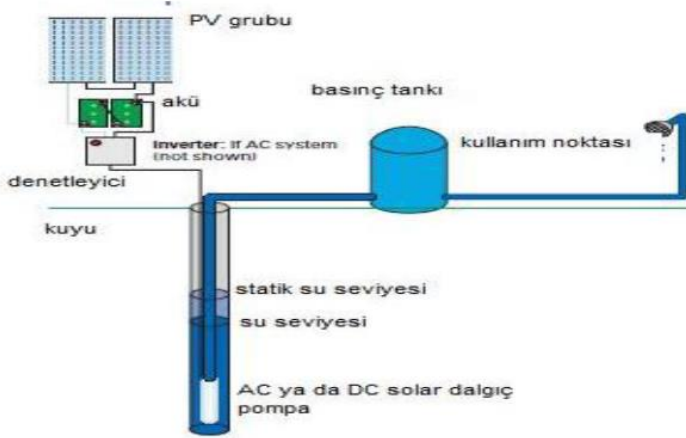
Günümüzde, Güneş Enerjili Su Pompalama (GESP) Sistemleri, çevre dostu bir alternatif olarak fosil yakıtlarla çalışan geleneksel sistemlerin yerine dünya genelinde geniş kabul görmektedir. Gelecekte fosil yakıt rezervlerinin azalması ve özellikle gelişmekte olan ülkelerde elektrik altyapı yatırımlarının yüksek maliyetleri, GESP sistemlerini daha cazip kılmaktadır. Bu sistemler, özellikle uzak ve kırsal bölgelerde, hem içme suyu hem de sulama suyu temininde güvenilir bir performans sunar. Elektrik iletim hatlarının bulunmadığı bölgelerde GESP sistemlerinin kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır (Sontake & Kalamkar, 2016, s. 1045).

2. Güneş Enerjisi ile Çalışan Su Pompalama Sistemleri

Bu kısımda öncelikle GESP sistemlerinin çalışma prensibi, sistemin temel bileşenleri, farklı türleri ve uygulama alanlarındaki gelişimi ele alınacaktır.

2.1.GESP Sistemlerinin Temel Çalışma prensibi

GESP sistemleri, Fotovoltaik (PV) modüller, pompa (DC veya AC), akü, şarj kontrol ünitesi ve isteğe bağlı olarak su deposundan oluşmaktadır (Şekil 1). Sistem tasarımında bu bileşenlerin uygun seçimi kritik öneme sahiptir. Güneş paneli yüzeyine ulaşan güneş enerjisi, PV modüller aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmekte ve elde edilen bu enerji, kontrol ünitesi tarafından pompa motoruna ihtiyaç doğrultusunda aktarılmaktadır. Pompa devreye girdiğinde, suyu kaynaktan boru hattı üzerinden depolama tankına iletmektedir. Bu tankta depolanan su, gerekli görüldüğünde sulama veya kullanım suyu olarak değerlendirilebilmektedir (International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, 2018).



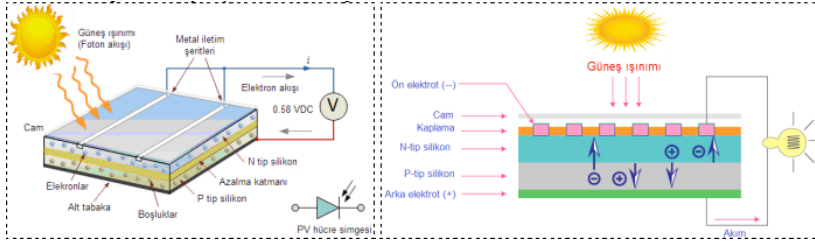
*Şekil 1. Fotovoltaik sulama sistemi şeması
(Yusufoğlu, 2013, s. 23)*

2.2. GESP Sisteminin Ana Bileşenleri

2.2.1. Güneş Enerji Panelleri

Fotovoltaik paneller, güneşten yeryüzüne ulaşan ışınım enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren sistemler olarak işlev görmektedir. Panellerin verimliliği, genellikle 1 kW/m^2 lik güneş ışınım yoğunluğu ve 25°C sıcaklık koşullarına göre değerlendirilir. Optimum enerji üretimini sağlamak amacıyla, panellerin gün boyunca en fazla güneş ışığı alan yöne doğru konumlandırılması gerekmektedir. Eğim açısı, bulunduğu enlem doğrultusunda ayarlanır; kış ayları için enlemin 15° üzerinde, yaz aylarında ise enlemin 15° altında bir eğim tercih edilir. Ancak, sabit sistemlerde kurulum sonrası açının değiştirilmesi güç olduğundan, paneller genellikle kış koşullarına uygun şekilde eğimlendirilir (Gençoğlu, 2015).

Güç talebine uygun olarak fotovoltaik (PV) paneller seri veya paralel bağlantılarla düzenlenebilir. Elektriksel ve mekanik koşullara bağlı olarak, farklı tiplerde PV panel üretimleri bulunmaktadır. Sistem tasarımında, kullanılan panellerin türünün doğru seçimi, sistemin verimliliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Fotovoltaik hücrenin enerji dönüşüm prensibi ve iç yapısı Şekil 2'de detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 2. PV hücrenin çalışma ilkesi ve PV hücrenin yapısı gösterilmektedir. (Öztürk, n.d.).

Güneş hücreleri, dört ana grupta sınıflandırılabilir:

- Silisyum tabanlı hücreler: Bu grup, monokristal ve polikristal gibi silisyum kullanılarak üretilen hücreleri içerir.
- İnce film hücreler: Amorf silisyum, kadmiyum tellür ve kadmiyum sülfür gibi malzemelerden yapılmış ince film hücreleri kapsar.
- Organik/inorganik tabanlı hücreler: Yığın heteroeklem ve hibrit perovskit gibi organik veya inorganik materyallerle üretilmiş hücreleri içerir.
- III-V tabanlı hücreler: Güneş ışığının yoğunlaştırıldığı sistemlerde ve uzay uygulamalarında kullanılan GaAs, GaInAs ve GaInP gibi III-V grubu bileşiklerden oluşan hücreler bu grupta yer alır (Karadavut, 2019).

2.2.2.Pompalar

Güneş enerjili sulama sistemlerinde kullanılan pompalar, çalışma prensiplerine göre iki ana gruba ayrılmaktadır: doğru akımla çalışan pompalar ve alternatif akımla çalışan pompalar. Bu iki tip pompa hem yüzeyde hem de dalgıç olarak kullanılabilir. Güneş panelleri doğru akım ürettiğinden, alternatif akımla çalışan bir pompa kullanılacaksa sisteme bir inverter eklenmesi gereklidir; bu inverter doğru akımı alternatif akıma dönüştürür. Doğru akımla çalışan pompalar kullanıldığında ise invertere gerek kalmadığından, bu durum sistemi maliyet açısından daha avantajlı hale getirmektedir. Ayrıca, doğru akımlı pompalar inverter kaynaklı kayıplar olmadığı için alternatif akımlı pompalara kıyasla daha yüksek verimlilik sunmaktadır (Sarı, 2019).

2.2.3.İnverterler

İnverterler, güneş panellerinde üretilen doğru akımı alternatif akıma dönüştüren önemli güç elemanlarıdır. Bu cihazlar, doğru akım ve gerilim değerlerini, şebeke tarafında ise alternatif akımın gerilim ve frekansını kontrol eder. Genellikle transistör, tristör, mosfet ve IGBT gibi anahtarlama elemanları kullanılmaktadır ve bu elemanların seçimi, sistemin güç gereksinimine göre yapılır. PV sistemlerde en sık arıza veren bileşenlerden biri olan inverterlerin kullanımı, yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşmasıyla artış göstermiştir.

Tek fazlı ve üç fazlı sistemlerde kullanılabilen inverterlerin seçiminde; sistemin gücü, kurulum yüzeyinin durumu ve kurulum bölgesinin özellikleri dikkate alınmalıdır (Akkas, 2017).

2.2.4.Şarj regülatörleri

Şarj regülatörleri, üretilen gerilimi belirlenen seviyeye düşürerek sistemin ihtiyaç duyduğu voltajı sağlar. Bu regülatörler, genellikle şebekeden bağımsız (off-grid) sistemlerde kullanılır ve akülerin şarj edilmesini ve aşırı deşarjdan korunmasını sağlar. Bu sayede akülerde oluşabilecek hasarların önüne geçilerek kullanım ömrü uzatılır. Şarj regülatörleri hassas yapıya sahip elemanlardır; arıza durumunda akü değişimi gerekebilir ve bu durum yüksek bakım maliyetlerine yol açabilir(Gençoğlu, 2015).

2.2.5.Aküler

Aküler, elektrik enerjisini kimyasal enerji formunda depolayan ve ihtiyaç halinde bu enerjiyi elektrik enerjisi olarak geri veren bileşenlerdir. Özellikle güneşsiz hava koşullarında veya geceleri, depolanan enerji sayesinde sistemin enerji ihtiyacı karşılanır. Bölgedeki güneşsiz gün sayısı ve bu günlerdeki süre dikkate alınarak, gerekli akü kapasitesi belirlenir. Güneş enerjisinden elde edilen enerjiyi depolamak için en çok tercih edilen akü türleri ise OPzS aküler, jel aküler ve kuru akülerdir.

2.2.6.Su Deposu

Güneş enerjili sulama sistemlerinde su deposu, suyu depolamak ve güneşsiz günlerde kullanım sağlamak amacıyla kullanılır. Su deposunun yerden yüksekliği, hidrolik enerji kayıplarını minimize etmek için mümkün olduğunca düşük tutulmalıdır. Ayrıca, deponun çapının yüksekliğine oranının büyük olması, sistem verimliliği açısından tercih edilmektedir(Gençoğlu, 2015).

2.3.GESP Sistem Tipleri

GESP sistemleri, üzerlerindeki ekipmanların özelliklerine göre aşağıdaki şekilde gruplandırılabilir:

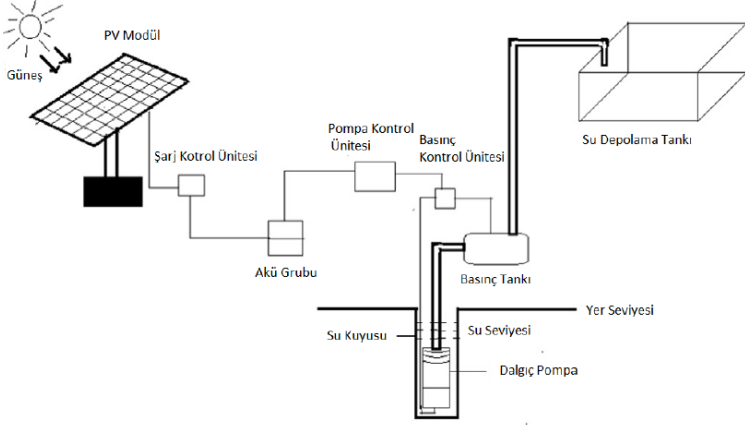
- **Enerji depolama özelliğine göre:** Akü destekli sistemler ve doğrudan sistemler,

- **Pompa tipine göre:** Santrifüj pompalı sistemler ve derin kuyu (dalgıç) pompalı sistemler,

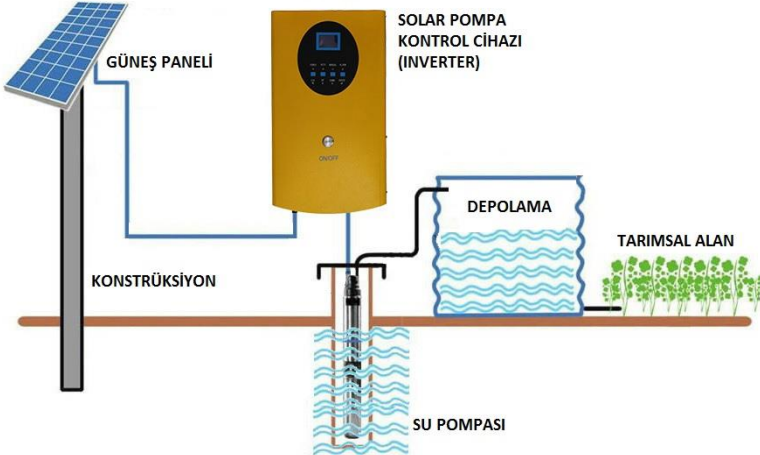
- **Fotovoltaik dizilerin hareketine göre:** Sabit ve güneş izleyicili sistemler. (International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, 2018).

Akü Destekli Sistemler: Bu sistemler, enerji depolamak için aküler içerir. Aküler, enerji üretiminin olmadığı zamanlarda pompanın çalışmasını sürdürerek kesintisiz su temini sağlar. Bu tür sistemlerde genellikle bir su depolama tankı bulunmaz.

Doğrudan Sistemler: Akü bulunmayan bu sistemler, enerjiyi su tankında depolar. Şekil 3'ta akü destekli bir sistem, Şekil 4'te ise doğrudan sistem örnekleri gösterilmektedir(Sontake & Kalamkar, 2016).



Şekil 3. Akü Destekli Güneş Enerjili Su Pompalama Sistemi şeması (Sontake & Kalamkar, 2016).



Şekil 4. Doğrudan (Aküsüz) GESP Sistemi (Şamlı Solar, n.d.).

Santrifüj Pompalı Sistemler: Bu tip pompalar, su yüzeyine yakın bir noktaya monte edilir ve suyu genellikle yatay mesafelerde boru hattına aktarmak için kullanılır. Eğer su, kaynaktan pompaya doğal akıyla ulaşabiliyorsa, bu pompalar suyu istenen yüksekliğe basmak için idealdir.

Dalgıç (Derin Kuyu) Pompalı Sistemler: Bu pompalar, yerin altındaki su kaynaklarından suyu çekmek için tasarlanmıştır ve yalnızca tamamen su altında olduğunda çalışabilir. Yerin altındaki su kaynağından suyu depolama tankına taşır ve genellikle güneş enerjili su pompalama sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Alternatif akım (AA) veya doğru akımla (DA) çalışabilen bu pompalar, %40-70 arasında değişen verimlilik oranlarına sahiptir.

Sabit Sistemler: Bu sistemlerde, fotovoltaik (FV) diziler sabit bir metal platforma monte edilir ve eğim açısı genellikle kurulum bölgesinin enlemine göre ayarlanır. Sabit sistemlerin yatırım maliyetleri, izleme sistemlerine göre daha düşüktür, ancak verimleri izlemeli sistemlere kıyasla daha azdır.

Güneş İzlemeli Sistemler: Bu sistemler, GESP Sisteminin verimliliğini artırmak amacıyla kullanılır ve üç tür izleme yapılabilir: manuel izleme ve otomatik izleme. Manuel izleme, yılda iki kez veya günde üç kez (sabah, öğle, öğleden sonra) yapılabilirken, otomatik izleme bir yazılım aracılığıyla iki veya üç eksenle gün boyunca güneşi takip eder. Tek eksenli güneş izleme sistemi, fotovoltaik modüllerin kuzey-güney doğrultusunda hareket ederek en uygun açıda maksimum üretim sağlamasına olanak tanır (Sontake & Kalamkar, 2016; Reca-Cardena & López-Luque, 2018).

3.PVSYST Yazılımı ile Suriye El-Bab Tarım Arazileri İçin Güneş Enerjisi Destekli Su Pompalama Sistemi Tasarımı ve Simülasyon Tabanlı Sürdürülebilir Sulama Uygulaması

Bu çalışma, Suriye'nin El-Bab bölgesinde yer alan 5 hektarlık bir tarım arazisi için 20 beygir gücünde bir sulama pompa sistemine yönelik olarak tasarlanmış 24,2 kW gücünde bir güneş enerjisi sisteminin fizibilitesini incelemektedir. Bu bağlamda, gerekli sistem bileşenleri, maliyet analizleri ve geri ödeme süreleri değerlendirilmiştir. Çalışmada ayrıca, bileşenlerin fiyatları ve sistemin toplam yatırım maliyeti hesaplanmıştır. Varsayım olarak, arazinin günlük 400 m³ su ihtiyacı olduğu öngörülmüştür.

3.1.Sistem Özeti

• **Sistem Kapasitesi:** Bu proje kapsamında, 24 kW kapasiteli bir fotovoltaik (PV) sistem simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

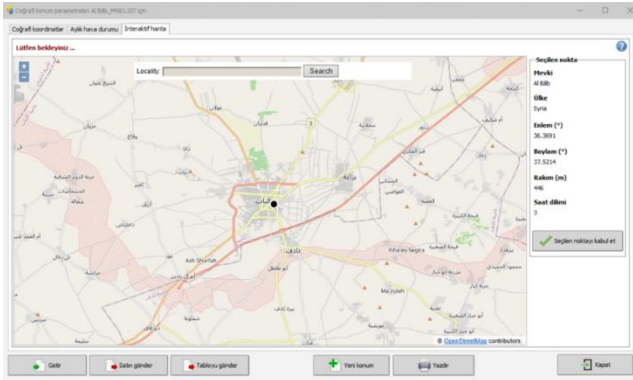
• **Pompa Sistemi:** Sulama için gerekli olan 15 kW gücünde bir pompa sistemi kullanılmıştır.

- **Enerji Üretimi:** PV sistemi, sulama pompasının ihtiyaç duyduğu enerjiyi karşılayacak şekilde tasarlanmıştır.
- **Sistem Verimliliği:** Yüksek verimlilik ve enerji tasarrufu sağlamak amacıyla sistem optimizasyonu yapılmıştır.

3.2.PVSYST ile Fotovoltaik Sistem Simülasyonu

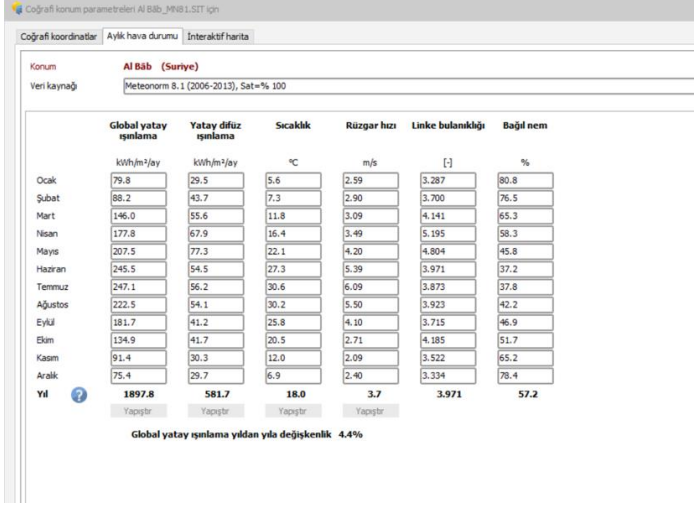
PVSYST programı, belirli bir coğrafi konum için güneş ışığı, hava koşulları ve sistem bileşenlerinin özelliklerini kullanarak 24 kW'lık bir PV sisteminin enerji üretimini simüle etmek amacıyla kullanıldı. Bu simülasyonlar, sistemin optimize edilmiş bir şekilde kurulması için rehberlik sağladı ve PV sisteminin ihtiyaç duyduğu kapasiteyi karşılayacak şekilde beslenmesini sağlar. Bu tür sistemler, genellikle yaygın olarak tercih edilen ve uygulanan bir sistem türüdür.

Şekil 5, PVSYST yazılımında fotovoltaik (PV) sistemin kurulacağı yerin nasıl belirlendiğini göstermektedir. Harita üzerinde, kurulacak PV sistemin konumu seçilmiş olup, bu noktaya ait enlem, boylam ve rakım bilgileri sisteme girilmiştir. Bu konum bilgileri, simülasyonun doğru sonuçlar vermesi ve güneş ışınımının etkili bir şekilde değerlendirilmesi için kritik öneme sahiptir.



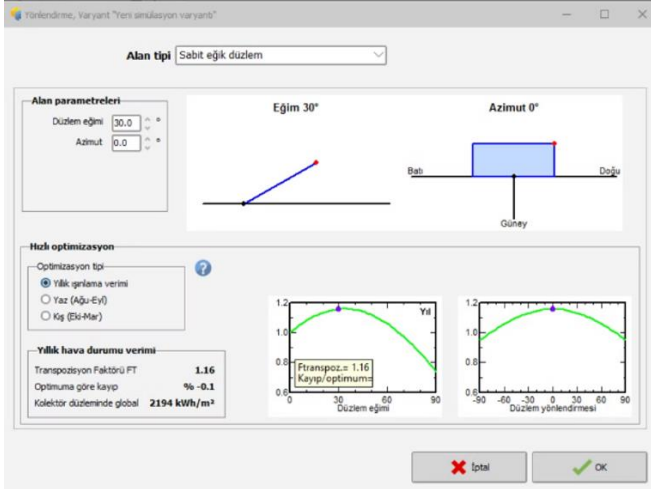
Şekil5. PVSYST Yazılımında Konum Belirleme Süreci Gösterilmiştir.

Şekil 6, PVSYST yazılımı kullanılarak Suriye'nin Al Bab bölgesine ait aylık hava durumu ve güneş ışınımı verilerini göstermektedir. Bu tablo, yıl boyunca her ay için global yatay ışınım, yatay difüz ışınım, ortalama sıcaklık, rüzgar hızı, linke bulanıklığı ve bağıl nem oranlarını içermektedir. Bu veriler, güneş enerjisi sistemlerinin tasarımında ve performans analizinde önemli rol oynamaktadır.



Şekil 6. Al Bab Bölgesi İçin Aylık Hava Durumu ve Işınım Verilerini Göstermektedir

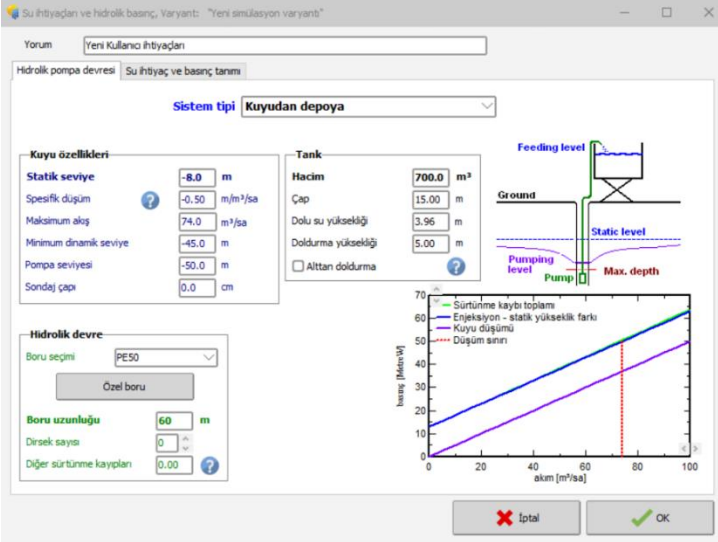
Şekil 7, PVSYS yazılımında sabit eğimli fotovoltaik (PV) bir düzlemin optimizasyon sürecini göstermektedir. Eğim açısı 30° , azimut açısı ise 0° olarak belirlenmiştir. Şekilde, düzlemin yıllık ışınım verimi ile ilgili optimizasyon seçenekleri sunulmaktadır. Yıllık hava durumu verim tablosunda transpozisyon faktörü (FT) 1.16 olarak gösterilmiş ve yıllık toplam enerji üretimi 2194 kWh/m^2 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, verim kayıplarını minimize edecek optimum açı değerleri grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 7. Sabit Eğimli PV Düzlem İçin Yıllık Işınım ve Verim Optimizasyonu Gösterilmiştir.

Şekil8, PVSYS yazılımında kuyudan depoya su pompalama sisteminin hidrolik ve basınç parametrelerini göstermektedir. Kuyu özellikleri bölümünde

statik seviye, spesifik düşüm, maksimum akış ve pompa seviyesi gibi değerler yer almaktadır. Tank özelliklerinde ise tank kapasitesi, dolu su yüksekliği ve dolun yüksekliği bilgileri gösterilmiştir. Hidrolik devre kısmında boru tipi, boru uzunluğu ve sürtünme kaybı gibi hidrolik sistem parametreleri belirlenmiştir. Şekilde ayrıca, pompalama sisteminin akışa göre basınç grafiği gösterilmiş olup, sistemin çeşitli kayıplar ve basınç değerleri görselleştirilmiştir. Bu bilgiler, su pompalama sisteminin optimum performansını sağlamak için önemlidir.



Şekil 8. Kuyudan Depoya Su Pompalama Sisteminin Hidrolik ve Basınç Özellikleri Gösterilmiştir

Şekil 9, PVSYS yazılımında yıllık su ihtiyacı ve hidrolik basınç tanımlama ekranını göstermektedir. Bu bölümde, yıllık ortalama su ihtiyacı 400 m³/gün olarak belirlenmiştir. Yıllık su ihtiyacı toplam 146.000 m³ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, sistemin yıllık ortalama basıncı 13.0 metre su sütunu olarak belirlenmiştir. Ek basınçlar bölümünde, dinamik basınç ve düşüm gibi çeşitli hidrolik değerler de yer almaktadır. Yıllık özet kısmında, hidrolik enerji ihtiyacı 5.172.050 W ve PV gücü ihtiyacı ise yaklaşık 17.467.241 W olarak hesaplanmıştır. Bu bilgiler, sistemin yıllık su temin ihtiyacını karşılayacak şekilde optimize edilmesi için önemlidir.

Şekil 9. Yıllık Su İhtiyaç ve Hidrolik Basınç Tanımlama Ekranı Gösterilmiştir.

Şekil 10, PVSYST yazılımında pompaların tanımlanması ve hidrolik enerji hesaplama aracını göstermektedir. Görselde, Lorentz marka, 15 kW gücünde, 10-50 m basınç aralığında çalışabilen, AC çok kademeli santrifüj pompa modeli seçilmiştir. Pompa özellikleri bölümünde, pompanın maksimum gücü 15.000 W, çalışma gerilimi 700 V ve maksimum akımı 12.1 A olarak belirtilmiştir. Farklı basınç seviyelerine göre verimlilik ve akış hızları da detaylandırılmıştır. Hidrolik enerji hesaplama aracı bölümünde, projeye uygun akış hızı, basınç ve güç değerleri tanımlanmış olup, örneğin akış hızı 44.7 m³/sa, basınç 35.5 MetreW, güç ise 4.325 kW olarak belirlenmiştir. Bu bilgiler, su pompalama sisteminin ihtiyaç duyduğu enerji gereksinimlerini optimize etmek için kullanılır.

Şekil 10. Pompaların Tanımlanması ve Hidrolik Enerji Hesaplama Aracı Gösterilmiştir.

Şekil 11, PVSYSY yazılımında fotovoltaik (PV) sistem tasarımına yönelik modül ve sistem bileşenlerinin ayarlarını göstermektedir. Bu ekranda, seçilen pompa modeli ve özellikleri, PV modülü seçimi, gerilim sınırları, kontrol cihazı modu ve PV alan tasarımı gibi detaylar bulunmaktadır.

- **Sistem Bilgisi:** Seçilen pompa modeli olarak "PSK2-15 C-SJ42-6" gösterilmiş olup, maksimum gücü 15.000 W, basınç aralığı ise 10-50 metreW arasında belirlenmiştir.

- **PV Modülü Seçimi:** CW Enerji tarafından üretilen 550 Wp'lik, 27V'lik Si-mono PV modülü seçilmiştir. Gerilim sınırları sıcaklığa bağlı olarak V_{mpp} (60°C) 27.3 V ve V_{oc} (-10°C) 41.7 V olarak belirtilmiştir.

- **Denetleyici Modu:** MPPT-AC dönüştürücü kullanılarak evrensel bir denetleyici seçilmiştir. Bu denetleyici, sistemin özelliklerine göre otomatik olarak ayarlanmaktadır.

- **PV Alan Tasarımı:** Seri modül sayısı 22 olarak ayarlanmıştır. Panel sayısı toplamda 44 olup, yüzey alanı 113 m²'dir. Nominal güç (STC) 24.2 kWp olarak hesaplanmıştır.

Bu tasarım ayarları, PV sisteminin verimli çalışması ve pompa gereksinimlerini karşılayabilmesi için optimize edilmiştir.

The screenshot shows the PVSYSY software interface for PV system design. The main window is titled 'Pompa tanımlama' and 'Alt alan tasarımı'. It contains several sections:

- Sistem bilgisi:** Seçilen pompa: PSK2-15 C-SJ42-6, Teknoloji: Çok kademeli santrifüj, Maks güç: 15000 W, Basınç: 10.0 - 50.0 MetreW, Akım: 64.99 - 32.54 m³/sa.
- Ön boyutlandırma yardımı:** Boyutlandırılmaz, Planlanan gücü giriniz: 5.6 kWp, ... veya mevcut alan: 0 m².
- PV modül seçimi:** Mevcut: CW Enerji, 550 Wp 27V, Si-mono, CWT550 - 108PM12, 2022 yılından beri. Gerilim boyutlama: V_{mpp} (60°C) 27.3 V, V_{oc} (-10°C) 41.7 V.
- Denetleme modunu ve denetleyiciyi seçiniz:** Evrensel denetleyici, denetleme modu: MPPT-AC dönüştürücü. Ürünler: 1000 W, MPPT-AC dönüştürücü, Universal MPPT - AC Inverter, Generic device, Adaptabl.
- PV alan tasarımı:** Modül ve zincir sayısı: Seri mod. sayısı: 22 (olmasa gerekleri: 19 ile 20 arasında), panel sayısı: 44, Yüzey: 113 m². İşletme koşulları: V_{mpp} (60°C) 601 V, V_{mpp} (20°C) 703 V, V_{oc} (-10°C) 917 V, Yüzey işlem: 1000 kWh/m², İmpo: 35.2 A, İsc: 37.0 A, İsc (STC'de): 37.0 A, Maksimum işletme gücü (1000 W/m² için ve 50°C): 22.1 kW, Alan nominal gücü (STC): 24.2 kWp.

Şekil 11. PV Modülü ve Sistem Bileşenlerinin Tasarım Ayarları Gösterilmiştir.

3.2.PVSYSY ile Güneş Enerjili Su Pompalama Sistemi Simülasyonu: Proje Özeti ve Sonuçlar

Şekil 12'nin PVSYSY simülasyon sonuçlarına göre, sistem yıllık olarak toplam 144481 m³ su üretmektedir. Projenin günlük hedef su ihtiyacı ise 400 m³ olarak belirlenmiştir. Bu ihtiyaca göre sistemin yıllık toplamda sağlaması gereken

su miktarı 146000 m³tür. Bu durumda, sistemin yıllık ihtiyacın %99'unu karşıladığı, yalnızca 1519 m³ eksik kaldığı görülmektedir.



PVSyst V7.3.1
VCO, Simülasyon tarihi:
08/05/24 14:12
v7.3.1 ile

Proje: EL BAB SULAMA PROJESİ
Varyant: Yeni simülasyon varyantı

Proje özeti			
Coğrafi konum	Konum		Proje ayarları
El Bab	Enlem	36.37 °N	Albedo
Syria	Boylam	37.52 °E	0.20
	Rakım	446 m	
	Saat dilimi	UTC+3	
Hava durumu verileri			
El Bab			
Meteonorm 8.1 (2006-2013), Satı=% 100 - Senetlik			
Sistem özeti			
Pompalama PV sistemi	Kuyudan depoya		
Kolektör düzleminin yönlendirmesi	Su ihtiyacı		
Sabit düzlem	Yıl boyunca sabit	400.00 m ³ /gün	
Eğim/Azım	30 / 0 °		
Sistem bilgisi			
PV alanı			
Panel sayısı	44 adet		
Toplam nom. güç	24.20 kWp		
Sonuçların özeti			
Su	Enerji	Verimler	
Pompalanan su	Pompadaki enerji	Sistem verimliliği	61.0 %
144481 m ³	27830 kWh	Pompa verimi	61.5 %
Özel	Özel		
1636 m ³ /kWp/bar	0.19 kWh/m ³		
Su ihtiyacı	Kullanılmayan (depo dolu)		
146000 m ³	Kullanılmayan PV enerji		
Eksik su	12768 kWh		
1.0 %	Kullanılmayan oran		
	28.0 %		

Şekil 12. El Bab Sulama Projesi PVSYST Simülasyon Verileri ve Sonuçlarını Göstermektedir.

Şekil 13, PVSYST simülasyon sonuçlarına göre sistemin yıllık 144481 m³ su pompalayarak ihtiyaç duyulan yıllık su miktarının %99'unu karşıladığını ve 1484.4 m³ eksik su bıraktığını göstermektedir. Yıllık enerji üretimi 27830 kWh olarak hesaplanmış, sistem verimliliği %61.0 ve pompa verimliliği %61.5 olarak belirlenmiştir. Üretilen enerjinin %28'i, yani 12768 kWh'lik kısmı kullanılmamış olarak kaydedilmiştir.

Aylık Performans Düzeyi:

- **En Yüksek Performanslı Ay (Temmuz):** Temmuz ayında sistem, aylık 247.1 m³ su üretimi sağlayarak tüm su ihtiyacını eksiksiz karşılamıştır.
- **En Düşük Performanslı Ay (Ocak):** Ocak ayında düşük güneş ışınımı nedeniyle 12246 m³ su üretimi yapılmış ve 153.9 m³ eksik su kalmıştır.

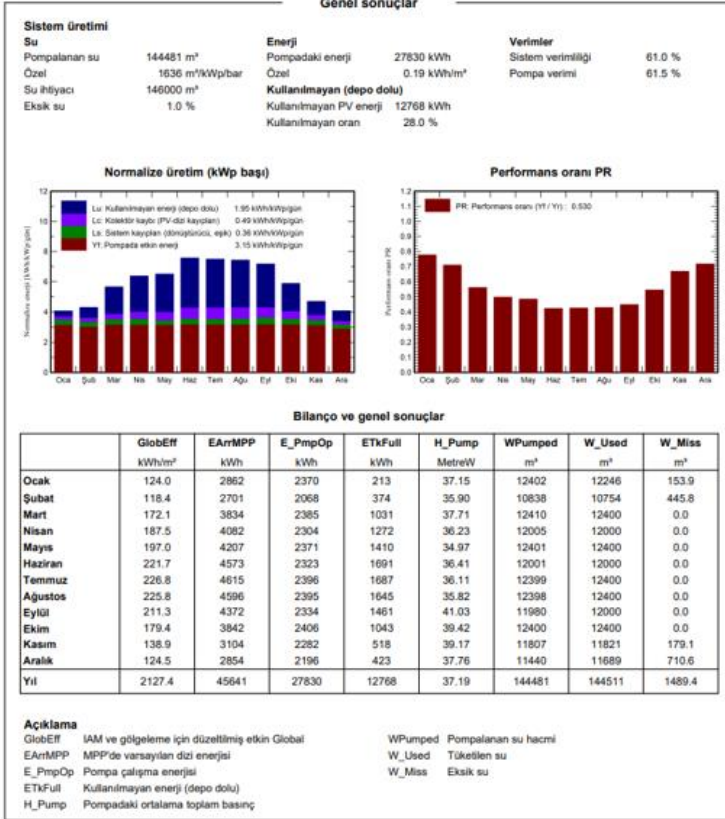
Bu sonuçlar, sistemin genel olarak sulama ihtiyacını karşıladığını, ancak kış aylarında güneş ışınımı düşüklüğü nedeniyle eksiklik yaşandığını göstermektedir. Sistemin performansını artırmak amacıyla, enerji depolama çözümleri veya ek güneş panelleri gibi ilave önlemler uygulanabilir.



PVsyst V7.3.1
VC0, Simülasyon tarihi:
08/05/24 14:12
V7.3.1 ile

Proje: EL BAB SULAMA PROJESİ

Varyant: Yeni simülasyon varyantı



Şekil 13. PVSYST Simülasyonu Genel Sonuçlarını Göstermektedir

4.Projenin Maliyeti ve Geri Ödeme Süresi

4.1.Proje Maliyeti

El Bab Sulama Projesi için güneş enerjili su pompalama sisteminin toplam maliyeti 8804 USD olarak belirlenmiştir. Bu maliyet, güneş panelleri, inverter, taşıyıcı malzemeler, mühendislik hizmetleri ve işçilik gibi tüm bileşenleri kapsamaktadır.

Tablo 1. Projenin Maliyeti

Malzeme Adı	Ürün Tipi	Miktar	Birim	Birim Fiyatı	Fiyat (USD)
Güneş Paneli	550w lık CW	44	Adet	110	4840
Taşıyıcı malzemeler	44 Set	44	Adet	25	1100
İnverter Sürücü	Tommatech	1	Adet	1500	1500
Kablolama	DC / AC	12	Metre	4,5	54
Ana Pano	Muhtelif	1	Adet	250	250
İzleme Sistemi	Muhtelif	1	Adet	50	50
Mühendislik	-			500	500
İşçilik				1500	1500
Toplam Sistem Maliyeti					

4.2.Jeneratör Kullanımında Yıllık Yakıt Maliyeti

Sulama Projesi için güneş enerjili su pompalama sistemini kullanmasak ve jeneratör kullansak, yıllık yakıt ihtiyacı 9030 litre olacak ve yakıt bedeli 9030 USD olarak hesaplanacaktır.

Tablo 2. Yakıt Maliyeti

	Günlük	Yıllık
Su ihtiyacı	400.00 m ³ /gün	144481 m ³ /yıl
Yakıt ihtiyacı	25 lt/gün	9030 lt/yıl
Yakıt fiyatı	\$25	\$9030

4.3.Dizel Jeneratör ve GES Sisteminin Maliyet ve Geri Ödeme Süresi

Karşılaştırması

Tablo 3, güneş enerjili su pompalama sistemi (GESP) ile dizel jeneratör kullanımının maliyetlerini ve geri ödeme sürelerini karşılaştırmaktadır:

- **İlk Yatırım Maliyeti:** Dizel jeneratör için 1500 USD, GES sistemi için ise 8804 USD olarak belirlenmiştir. GES sisteminin başlangıç maliyeti daha yüksektir.
- **Yıllık İşletme Maliyeti:** Dizel jeneratör yıllık 9030 USD işletme maliyetine sahiptir (yakıt masrafı), ancak GESP sistemi güneş enerjisi kullandığından yıllık işletme maliyeti yoktur.
- **Yıllık Toplam Yatırım:** Dizel jeneratör için toplam yıllık yatırım 10530 USD, GESP sistemi için ise yalnızca ilk yatırım maliyeti olan 8804 USD'dir.
- **Geri Ödeme Süresi:** GESP sisteminin yüksek başlangıç maliyeti, dizel jeneratörün yıllık işletme maliyetine kıyasla 10 ay içinde kendini amorti etmektedir.

Bu veriler, GESP sisteminin uzun vadede daha ekonomik olduğunu göstermekte ve işletme maliyetlerinin olmaması nedeniyle geri ödeme süresinin kısa olduğunu vurgulamaktadır.

Tablo 3. Geri ödeme Süresi

	Dizel Jeneratör	GES Sistemi
İlk Yatırım Maliyeti(\$)	1500	8804
Yıllık İşletme Maliyeti(\$)	9030	0
Yıllık toplam yatırım(\$)	10530	8804
Geri ödeme süresi	10 Ay	

Kaynakça

- Akkas, C. (2017, Kasım 23). *FV güneş enerji santrallerinde inverterler*. Wordpress. Erişim adresi: <https://vcantugakkas.wordpress.com/2017/11/23/fv-gunes-enerji-santrallerinde-invertorler/>
- Food and Agriculture Organization. (2014). *The state of food and agriculture in brief*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Food and Agriculture Organization. (2018). *World food and agriculture statistical pocketbook 2018*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Gençoğlu, E. (2015). *Güneş pili ile çalışan bir su pompalama sisteminin tasarımı ve gerçekleştirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elazığ.
- International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank. (2018). *Solar pumping: The basics*. Washington, DC: World Bank.
- Karadavut, A. (2019). *Yarı kesik ve tam hücreli fotovoltaik modüllerin matematiksel modellenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli.
- Öztürk, H. H. (n.d.). *Güneş enerjisinden fotovoltaik yöntemle elektrik üretiminde güç dönüşüm verimi ve etkili etmenler*. Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü. Elektrik Mühendisleri Odası. Erişim adresi: https://www.emo.org.tr/ekler/3a921ffad054cb0_ek.pdf (3a921ffad054cb0_ek).
- Reca-Cardena, J., & López-Luque, R. (2018). *Design principles of photovoltaic irrigation systems*. University Carlos III of Madrid, Spain.
- Sarı, E. (2019). *PVSYST yazılımı kullanılarak örnek bir güneş enerjili su pompalama sistemi tasarlanması ve konvansiyonel sistemlerle karşılaştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Temiz Tükenmez Enerjiler Anabilim Dalı, Ankara.
- Sontake, V. C., & Kalamkar, V. R. (2016). Solar photovoltaic water pumping system: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1038–1067. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.021>
- Şamlı Solar. (n.d.). *Tarımsal sulama sistemleri*. Şamlı Solar. Erişim adresi: <https://www.samlisolar.com/hizmetlerimiz/tarimsal-sulama-sistemleri.html>
- Yusufoğlu, G. (2013). *Şebeke elektriğinin bulunmadığı tarımsal alanlarda güneş enerjisiyle sulamanın yapılması* (Yüksek Lisans Tezi). Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

4. Bölüm

Hilbert Eğrisi ile S-box Tasarlama Yaklaşımı

Fırat ARTUĞER¹
Songül KARAKUŞ²

¹Dr. Öğr. Üyesi; Munzur Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü.
firartugger@munzur.edu.tr ORCID No: 0000-0002-4096-0458

²Dr. Öğr. Üyesi; Bitlis Eren Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü.
skarakuş@beu.edu.tr ORCID No: 0000-0003-1999-0203

ÖZET

Bilgisayar güvenliğinde sağlanması gereken ilk şartlardan bir tanesi hiç şüphesiz gizlilik. Gizlilik şartı genellikle şifreleme algoritmaları ile sağlanmaktadır. Bu algoritmalara bakıldığında şifreleme için çoğunlukla blok şifreleme yaklaşımı kullanılmaktadır. Blok şifreleme algoritmalarının en önemli yapı taşlarından bir tanesi s-box 'dır. S-box yapıları karıştırma olarak adlandırılan gereksinimi karşılayan en önemli birimdir. Bu yüzden bu birimin lineer olmayan ve karmaşık bir yapıya sahip olması gerekmektedir. Aksi takdirde algoritma çeşitli saldırılara maruz kalabilmektedir. Bu problemin çözümü için uzun yıllardır farklı yöntemler tasarlanmaktadır. Bu çalışmada, güçlü s-box yapıları elde etmek için Hilbert eğrisinden faydalanılmıştır. Rastgele bir şekilde elde edilen bir s-box yapısı Hilbert eğrisi ile tekrar konumlandırılmaktadır. Hilbert eğrisi, s-box üzerinde konumların karıştırılmasına oldukça uygun bir yapıya sahiptir. Bu yapısı sayesinde s-box üzerinde uygulama fikrini doğurmuştur. Bu çalışmada bu şekilde 5 farklı s-box yapısı üretilmiştir. Elde edilen s-box yapıları öncelikle rastgele elde edilip özellikleri kaydedilmiştir. Elde edilen s-box 'lar daha sonra Hilbert eğrisi ile yeniden konumlandırılıp özellikleri tekrar hesaplanmıştır. Yapılan analizler özellikle lineer olmama değerinde artış olduğunu göstermiştir. Bunun yanı sıra performansı kötü olan s-box yapıları Hilbert eğrisi ile taranırsa daha karmaşık bir yapıya kavuşacağı gösterilmiştir. Ayrıca bu çalışmanın Hilbert eğrisinin kriptografik uygulamalarda farklı şekillerde kullanılabilmesinde araştırmacılara bir ilham sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: S-box, Hilbert eğrisi, Lineer olmama, Bilgi güvenliği

1. Giriş

Günümüz internet çağında, iletilen-depolanan veri miktarının ve dijital teknolojilerin her geçen gün artmasıyla birlikte çeşitli problemler ortaya çıkmaktadır. Kişilerin, verilerin, fiziksel cihazların ve ağların korunması söz konusu olduğunda karşımıza; gizlilik, bütünlük, erişilebilirlik, kimlik doğrulama, yetkilendirme ve hesap verilebilirlik kavramları çıkmaktadır[1]. Bu çalışma özelinde gizlilik üzerine durulmuştur. Gizlilik kavramı, verilerin depolanırken veya iletilirken yetkisiz kişilerin bu verilere erişememesi, erişseler dahi verilerin anlaşılabilmesi anlamına gelmektedir. Gizlilik özelliğinin sağlanması kriptografik yapılar ile sağlanmaktadır. Bu noktada blok şifreleme algoritmaları ön plana çıkmaktadır[2]. Bu algoritmalarda veri eşit uzunlukta bloklara bölünerek blok blok şifrelenmektedir. Daha sonra şifrelenen bloklar birleştirilerek şifreli veri elde edilmektedir. Bu algoritmaların sağlaması gereken temelde iki özellik vardır. Bunlar yayma ve karıştırma olarak adlandırılmaktadır[3]. Yayma gereksinimi verinin kendi içinde karıştırılmasını ifade etmektedir ve genellikle permütasyon işlemleriyle yapılmaktadır. Karıştırma özelliği ise verinin başka değerlere dönüştürüldüğü önemli bir süreçtir[4]. Blok şifreleme algoritmalarında karıştırma gereksinimini gerçekleştiren en önemli birimlerden bir tanesi s-box yapılarıdır. Günümüz şifreleme standardı olan AES[5] algoritmasında 16×16 boyutunda güçlü bir s-box kullanılmaktadır. Bu yüzden literatürde genellikle buna benzer s-box yapıları üretmek üzerine odaklanılmıştır. Çoğunlukla AES öncesi kullanılan DES[6] algoritmasında özellikle s-box üzerine yapılan saldırılar göz önüne alınarak AES algoritmasında saldırılara karşı daha etkili bir s-box yapısı oluşturulmuştur. Ancak yapılan çalışmalar AES s-box yapısının da bazı saldırılara maruz kaldığını göstermiştir[7]. Bu durum araştırmacıları farklı teknikler kullanılarak yeni s-box yapıları geliştirmeye itmiştir.

S-box, temelde matematiksel bir dönüşümü ifade etmektedir. Bir değer başka bir değerle değiştirilmesi mantığına dayanmaktadır. Bu dönüşümün sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için s-box 'ın lineer bir yapıya sahip olmaması en önemli kriterlerden biridir. Lineer olmama değerinin artırılması yani yüksek lineer olmama değerlerine sahip s-box yapıları üretmek son yılların popüler konularından biri haline gelmiştir. AES benzeri s-box yapıları 0 ile 255 aralığında 256 değerden oluşmaktadır. 256 değer içeren güçlü bir s-box elde etmek zor bir problemdir. Çünkü 256 değer içerisinde arama yapmak $256!$ uzayında bir s-box aramak anlamına gelmektedir. Bu problem NP-hard olarak adlandırılan zor bir problemdir. Bu yüzden s-box üretmek aslında bir optimizasyon problemi olarak da düşünülebilir. Son yıllarda s-box tasarlamak için birçok farklı felsefe kullanılarak 200'den fazla çalışma önerilmiştir. Bu çalışmalar kaotik haritalar,

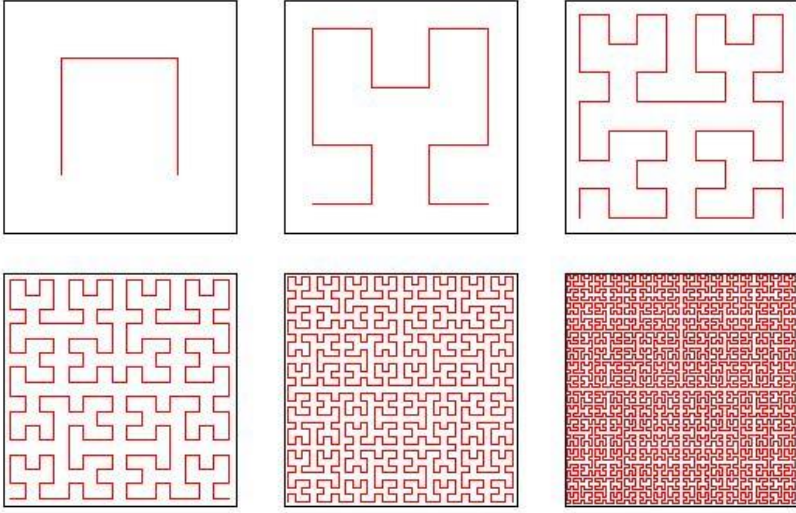
matematiksel dönüşümler, optimizasyon teknikleri gibi yaklaşımları temel almaktadır.

Kaotik haritalar kullanılarak s-box rastgele bir şekilde elde edilebilir. Buradaki temel mantık random() fonksiyonu yerine kaotik haritaların parametrelerini kullanarak değerleri üretip tabloyu doldurmaktır. Bu şekilde elde edilen s-box yapılarının avantajı, hızlı ve kolay bir şekilde elde edilebilmesidir. Ancak genellikle düşük lineer olmama değerlerine sahiptirler. Literatürde bu şekilde birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Lojistik harita[8], Lu-Chen sistemi[9], kaotik Lorenz sistemi[10], kaotik ölçekli Zhongtang sistemi[11], kesir sıralı kaotik Chen sistemi[12] bunlardan bazılarıdır. Matematiksel dönüşüm tabanlı teknikler genellikle cebirsel dönüşümlere dayanmaktadır. Bu yöntemler oldukça etkilidir. Bu çalışmaların çoğunda yüksek lineer olmama değerlerine ulaşılabildiği görülmektedir. Ancak bu felsefe ile elde edilen s-box yapıları çeşitli cebirsel[13] saldırılara maruz kalabilmektedir. Bu şekilde son yıllarda dönme matrisleri[14], boole fonksiyonları[15], grup teorisi[16] gibi yaklaşımlar s-box tasarlamak için kullanılmıştır. Bir diğer yaklaşım ise optimizasyon tekniklerini kullanarak s-box tasarlamaktır. Buradaki temel mantık başlangıçta zayıf bir s-box elde etmek, daha sonra bu s-box'ı bir optimizasyon tekniği ile iyileştirmektir. Bu şekilde de matematiksel dönüşümlerde olduğu gibi yüksek lineer olmama değerlerine ulaşılabilmektedir. Ancak bu algoritmaların karmaşıklığı ve hesaplama maliyetleri yüksek olabilmektedir. Son yıllarda balina optimizasyonu[17], Gri kurt optimizasyonu[18], tiki-taka algoritması[19], genetik algoritma[20], parçacık sürüsü optimizasyonu[21] gibi yöntemler s-box tasarlamak için kullanılmıştır.

Yukarıda bahsedilen yaklaşımların dışında birçok farklı teknikle s-box üreten çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmada rasgele elde edilen bir s-box yapısının Hilbert eğrisi ile tarandıktan sonra performansının nasıl değiştiği incelenmiştir. Bu tarz tarama yöntemleri s-box üzerinde kullanılmaktadır. Örneğin önceki çalışmalarda s-box, zik-zak tarama yöntemi ile yeniden konumlandırıldığında lineer olmama değerinde artış olduğu görülmüştür[22]. Bu çalışmada da Hilbert eğrisinin benzer bir etki yaratabileceği görülmüştür. Bu çalışmanın bir diğer katkısı ise, Hilbert eğrisi gibi farklı tekniklerin kriptografik uygulamalarda nasıl kullanılabileceğine bir örnek göstermek olmuştur.

2. Önerilen Yöntem

Önerilen yöntemde öncelikle rastgele bir şekilde 16*16 boyutunda bir s-box yapısı üretilmektedir. Bu noktada kaotik haritalar sıklıkla kullanılabilir. Ancak bu çalışmada random() fonksiyonu ile değerler üretilmiştir. Bu tarz bir s-box oluşturmak aslında oldukça basittir ve sıklıkla kullanılmaktadır. Elde edilen bu s-box yapısı daha sonra Hilbert eğrisi kullanılarak taranmaktadır. Böylece s-box hücreleri yeniden konumlandırılmaktadır. Hilbert eğrisi 1891 yılında alman matematikçi David Hilbert tarafından geliştirilen bir fraktal uzay doldurma eğrisidir[23]. Hilbert eğrisinin nasıl elde edildiği Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Hilber eğrileri

Şekil 1’de görüldüğü gibi bu yapı bir eğri ile başlamaktadır. Daha sonra sol alt taraf saat yönünde 90 derece, sağ alt taraf ise saat yönünün tersine 90 derece döndürülmektedir. Bu şekilde her bir seviyede kare sayısı artırılarak karmaşık fraktal yapı elde edilmektedir. Şekil 1’de görüldüğü gibi bu kareler arttırıldığında sonsuz sayıda kare ile desenler oluşturulabilmektedir. Bu fraktal yapı bilgisayar bilimlerinde birçok noktada kullanılabilir. Bu çalışmanın amaçlarından bir tanesi bu eğrinin s-box üzerindeki etkisini incelemektir. Önerilen algoritmanın adımları aşağıda verilmiştir.

Adım 1. 0-255 aralığında rastgele bir değer üretilir.

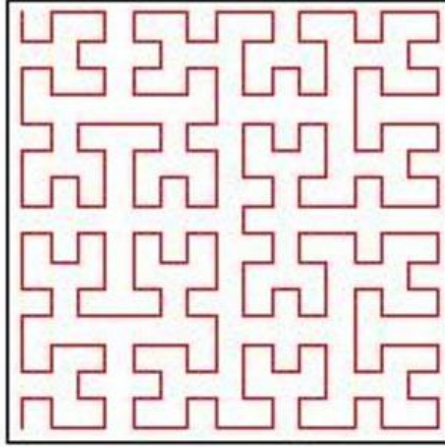
Adım 2. Bu değer s-box’da yoksa eklenir.

Adım 3. Bu değer s-box’da varsa Adım 1’e dönlür.

Adım 4. S-box’ın tüm hücreleri dolana kadar bu adımlar devam ettirilir.

Adım 5. Elde edilen rastgele s-box yapısı Hilbert eğrisi ile taranarak hücreler yeniden konumlandırılır.

Yukarıdaki adımlar kullanılarak kolaylıkla bir s-box elde edilebilmektedir. Bu algoritma öncelikle 0 ile 255 aralığında rastgele bir değer üretir ve bu değer s-box'da olup olmadığını kontrol eder. Bu değer s-box 'da yoksa eklenir, varsa yeni bir değer üretilir ve bu şekilde s-box 'ın tüm hücreleri dolana kadar işleme devam edilir. Bu şekilde rastgele elde edilen s-box yapılarının kriptografik özellikleri genellikle düşük seviyelerde kalmaktadır. Bu yüzden elde edilen bu rastgele s-box, Hilbert eğrisi ile taranarak daha karmaşık bir yapıya kavuşturulur. Bu çalışmada, rastgele elde edilen s-box yapısı Şekil 2'de verilen Hilbert eğrisi ile taranarak yeniden oluşturulmuştur. Şekil 2'de verildiği gibi ilk değerden başlanarak s-box'ın tüm değerleri bu şekilde gezilerek yeniden konumlandırılmıştır.



Şekil 2. S-box taramak için kullanılan Hilbert eğrisi

3. Analiz Sonuçları

Sonuçların daha objektif değerlendirilebilmesi önerilen algoritma kullanılarak 5 farklı s-box yapısı üretilmiştir. Bu sayı araştırmacıların tercihine göre değiştirilebilir. Bu s-box'lar öncelikle rastgele bir şekilde oluşturulmuştur. Bunlardan bir tanesi (s-box 1) Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Rastgele üretilen s-box 1

240	200	82	130	164	3	18	127	49	144	53	211	34	39	212	222
54	158	234	149	8	40	176	96	114	232	79	73	135	85	15	120
231	202	99	80	77	199	30	84	153	186	207	112	223	189	74	56
20	209	21	121	235	185	118	92	24	131	106	182	233	201	64	252
192	218	246	140	229	2	174	65	10	125	175	236	60	205	239	46
129	32	179	126	141	227	51	217	105	210	190	111	177	33	178	62
1	83	119	183	71	35	43	225	102	253	55	249	97	198	220	167
113	242	137	9	193	68	157	238	128	115	52	107	19	100	172	213
224	245	37	226	17	93	216	173	165	203	76	25	94	150	22	70
110	109	142	59	78	123	132	48	28	116	143	204	188	241	156	81
196	208	4	160	38	95	139	117	63	98	58	87	7	248	6	104
88	41	146	151	194	195	251	154	91	134	197	168	36	221	219	23
133	89	69	50	44	66	191	75	11	230	108	169	16	31	255	27
45	148	215	26	155	86	29	171	166	214	13	90	162	184	181	138
228	57	187	12	180	42	14	122	124	5	159	206	247	161	103	101
47	250	67	170	152	72	145	163	136	243	244	147	237	61	0	254

Başlangıçta rastgele bir şekilde üretilen s-box yapıları daha sonra Şekil 2'de verilen Hilbert eğrisine göre yeniden konumlandırılmıştır. S-box 1'in Hilbert eğrisi ile tarandıktan sonraki hali Tablo 2 'de verilmiştir.

S-box yapıları genellikle blok şifreleme algoritmalarında karıştırma gereksinimini gerçekleştiren en önemli birim olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yüzden oldukça kritik bir öneme sahiptir. Bir şifreleme algoritmasında kullanılacak bir s-box yapısının bazı kriptografik kriterleri sağlaması gerekmektedir. Literatüre bakıldığında bu kriterlerden öne çıkanlar şunlardır; bijektiflik, katı çığ kriteri(KÇK), eşit olası giriş-çıkış XOR dağılımı, çıkış bitlerinden bağımsızlık kriteri (BBK) ve lineer olmama metrikleri kullanılmıştır. Bu metrikler aşağıda açıklanmıştır.

Tablo 2. Hilbert eğrisi ile taranan s-box 1

240	54	158	200	82	130	149	234	99	80	121	21	209	202	231	20
192	218	32	129	1	113	242	83	119	137	9	183	126	179	246	140
229	2	227	141	71	193	68	35	43	157	238	225	217	51	174	65
92	84	30	118	185	235	77	199	40	8	164	3	18	176	96	127
49	144	232	114	153	24	131	186	207	106	182	112	73	79	53	211
34	135	85	39	212	222	120	15	74	56	252	64	201	189	223	233
60	177	33	205	239	46	62	178	220	167	213	172	100	198	97	19
107	52	55	249	111	236	175	190	210	125	10	105	102	253	115	128
165	203	116	28	63	91	134	98	58	197	168	87	204	143	76	25
94	188	241	150	22	70	81	156	6	104	23	219	221	248	7	36
16	162	184	31	255	27	138	181	103	101	254	0	61	161	247	237
147	244	159	206	90	169	108	13	214	230	11	166	124	5	243	136
163	122	14	145	72	152	180	42	86	155	44	66	191	29	171	75
154	251	139	117	48	173	216	132	123	93	17	78	38	95	195	194
151	146	4	160	59	226	37	142	109	245	224	110	196	208	41	88
133	45	148	89	69	50	26	215	187	12	170	67	250	57	228	47

3.1. Bijektiflik

Bijektiflik, bir fonksiyonun birebir ve örten olduğu anlamına gelmektedir. Bir s-box yapısında bu kriter oldukça önemlidir. Yani s-box hücrelerindeki her bir değer yalnızca bir kez kullanılması gerekmektedir. Aksi halde bir değer defalarca kullanılırsa yani s-box bijektif olmazsa çeşitli güvenlik zafiyetleri oluşturabilmektedir. Bu çalışmada 16×16 boyutunda AES algoritmasında kullanılan s-box'a benzer s-box 'lar üretildiği için 256 değer içermektedir. Yani üretilen s-box yapılarında $[0,255]$ aralığında her değer yalnızca bir kere kullanılarak bijektif s-box yapıları üretilmiştir.

3.2. Katı Çıg Kriteri (KÇK)

KÇK, bir verinin girişinde meydana gelen bir değişikliğin, çıkışta meydana getirdiği etkiyi hesaplamaktadır[24]. Burada istenen durum, girişe uygulanan bir bitlik değişimin, çıkıştaki bitlerin yarısını veya yarısına yakınının değişmesidir. Ters yönden bakıldığında girişe yapılan bir bitlik bir değişim, çıkışta meydana gelen bitlerin yarısından çok daha fazlasını veya azını etkilediğinde çeşitli çıkarımlarda bulunmak mümkün hale gelmektedir. Bu sebeplerden dolayı KÇK oldukça önemli bir kriterdir. Bir s-box yapısında bu değer 0.5 civarı çıkması beklenmektedir. Bu çalışmada elde edilen s-box yapılarında bu değer 0.5'e oldukça yakın değerler olduğu görülmektedir. Ayrıca Tablo 2'deki s-box yapısının KÇK değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Hilbert eğrisi ile taranan s-box 1 için KÇK değerleri

0,5156	0,4375	0,4531	0,4688	0,5469	0,5469	0,5469	0,5
0,5625	0,4844	0,5469	0,6094	0,4844	0,3906	0,5781	0,4844
0,5156	0,5312	0,375	0,5469	0,5	0,5625	0,5625	0,4375
0,4844	0,5469	0,5312	0,5312	0,4844	0,5312	0,4688	0,4688
0,4531	0,5781	0,4375	0,5625	0,5469	0,5312	0,5469	0,5
0,5938	0,4375	0,5469	0,5312	0,5	0,4688	0,5469	0,5312
0,5625	0,4844	0,4375	0,5625	0,4531	0,5156	0,5156	0,5
0,5312	0,4844	0,625	0,5156	0,5312	0,5	0,5469	0,6094

3.3. Eşit Olası Giriş-Çıkış XOR Dağılımı

XOR dağılımı, çıkışta bulunan XOR değerleriyle, girişteki XOR değerlerinin aynı olasılığa sahip olması gerektiğini ifade etmektedir[25]. Bu kriter bir s-box yapısının özellikle diferansiyel kriptanalize karşı çeşitli zafiyetler gösterebileceğini söylemektedir. Günümüz şifreleme standardı olan AES algoritmasında en yüksek XOR değeri 4 olarak hesaplanmaktadır. Bu çalışmada ve literatürdeki çoğu çalışmada bu değerinde elde edilmesi oldukça zor bir problemdir. Tablo 2 'deki s-box yapısının en yüksek XOR dağılım değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Bu değerlerin iyileştirilmesi gelecek çalışmalar için ayrı bir motivasyon kaynağıdır.

Tablo 4. Hilbert eğrisi ile taranan s-box 1 için XOR değerleri

10	8	6	6	8	6	8	6	6	6	8	6	8	8	8	
6	6	6	6	6	10	6	8	10	8	8	8	6	6	6	8
6	6	8	6	8	10	8	6	6	6	8	8	8	6	6	6
6	6	8	8	8	8	8	6	6	6	6	8	6	6	8	6
8	6	6	6	8	6	6	8	8	8	8	8	6	8	8	8
6	6	6	4	8	6	10	6	6	8	6	8	6	6	6	6
6	8	8	8	6	8	8	6	6	8	6	10	6	8	8	8
6	6	10	6	6	6	6	6	6	8	6	8	6	6	8	12
6	6	8	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	8	6
6	6	6	6	8	8	8	8	8	8	6	10	6	6	6	8
8	6	6	8	6	8	6	4	6	6	8	8	8	8	6	6
6	10	6	6	6	6	10	8	6	10	6	6	6	6	6	8
6	6	8	6	6	6	6	6	6	8	8	6	6	6	6	6
6	8	6	6	6	6	8	8	6	8	8	6	8	8	4	8
6	8	6	8	6	6	8	6	6	4	10	8	8	8	6	8
8	6	6	6	6	8	6	8	8	8	6	10	8	8	6	0

3.4. Lineer Olmama

S-box, şifreleme algoritmalarında karıştırma özelliğini sağlayan en önemli birimlerin başında geldiği için bu yapının lineer olmaması gerekmektedir. Bu yüzden bir s-box'da lineer olmama en önemli kriterlerin başında yer almaktadır. Literatürdeki çalışmaların çoğu bu değeri arttırmak üzerine odaklanmıştır. AES algoritmasında kullanılan s-box yapısında bu değer 112 olarak hesaplanmıştır. Böylece bu değere ulaşmak çoğu çalışmanın amacı haline gelmiştir. Tablo 2'deki s-box yapısının lineer olmama değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Hilbert eğrisi ile taranan s-box 1 için lineer olmama değerleri

102	104	106	106	104	104	106	100
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

3.5. Çıkış Bitlerinden Bağımsızlık Kriteri (BBK)

BBK, bir verideki bitlerin birbirlerinden bağımsız olarak değişmesi gerektiğini ifade etmektedir[24]. Burada lineer olmama ve KÇK değerleri farklı bir şekilde hesaplanmaktadır. Bu kriterde lineer olmama değerinin yüksek ve KÇK değerinin ise 0.5'e yakın olması istenen değerlerdir. Tablo 2'deki s-box yapısının BBK değerinde, lineer olmama değerleri Tablo 6'da KÇK değerleri ise Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 6. Hilbert eğrisi ile taranan s-box 1 için BBK 'da lineer olmama değerleri

0	106	106	100	106	106	98	106
106	0	104	106	96	106	108	108
106	104	0	108	102	100	102	102
100	106	108	0	98	98	104	102
106	96	102	98	0	104	102	98
106	106	100	98	104	0	106	102
98	108	102	104	102	106	0	102
106	108	102	102	98	102	102	0

Tablo 7. Hilbert eğrisi ile taranan s-box 1 için BBK 'da KÇK değerleri

0	0,5078	0,5078	0,5059	0,5	0,4844	0,5254	0,502
0,5078	0	0,4746	0,4961	0,4844	0,5098	0,498	0,4961
0,5078	0,4746	0	0,4961	0,4941	0,4707	0,5137	0,5
0,5059	0,4961	0,4961	0	0,4941	0,5039	0,502	0,5039
0,5	0,4844	0,4941	0,4941	0	0,4766	0,4727	0,4902
0,4844	0,5098	0,4707	0,5039	0,4766	0	0,4766	0,5039
0,5254	0,498	0,5137	0,502	0,4727	0,4766	0	0,5176
0,502	0,4961	0,5	0,5039	0,4902	0,5039	0,5176	0

Yukarıda açıklanan kriterlerde sadece Tablo 2 ‘deki s-box 1 yapısının performans değerleri tablolar halinde sunulmuştur. Bu çalışmada elde edilen 5 farklı s-box yapısının performans kriterlerinin ortalama değerleri Tablo 8’de ayrıca verilmiştir. Bu tablonun ilk bölümünde rastgele elde edilen 5 farklı s-box yapısının performans değerleri, ikinci bölümünde ise Hilbert eğrisi ile tarandıktan sonraki hallerinin performans değerleri verilmiştir. Bu tablo incelendiğinde özellikle lineer olmama değerinde bir artış olduğu görülmektedir.

Tablo 8. Önerilen yöntem ile elde edilen s-box yapılarının ortalama performans değerleri

Rastgele Oluşturulan S-box Yapıları							
S-box	Lineer Olmama			max XOR	BBK		Ort. KÇK
	min	max	ort		Lineer O.	KÇK	
1	100	106	103	12	102.93	0.503	0.5002
2	96	106	102.25	10	104.07	0.4981	0.4985
3	98	106	102.5	12	104.14	0.5034	0.4985
4	98	106	102.75	14	101.57	0.4998	0.5015
5	96	106	102.5	12	104	0.5009	0.5059
Hilbert Eğrisi ile Tarandıktan Sonraki S-box Yapıları							
1	100	106	104	12	103.07	0.4967	0.5144
2	100	108	103.75	12	104.36	0.506	0.5
3	98	106	103.25	10	102.86	0.5042	0.4966
4	102	106	104	12	103.14	0.4996	0.5039
5	104	108	105.75	10	103.21	0.502	0.5088

4. Sonuçlar ve neriler

Bu çalışmada, s-box yapıları tasarlamak için yeni bir tarama tekniği kullanılmıştır. S-box yapısı bir matris olduğu için farklı tarama teknikleri sıklıkla kullanılmaktadır. Hilbert eğrisi bu problemin çözümüne oldukça uygun bir yapıya sahiptir. Bu yüzden herhangi bir programlama dilinin random() fonksiyonu ile rastgele elde edilen bir s-box'ın Hilbert eğrisi ile tarandıktan sonra performans değerlerinde nasıl bir değişim olduğu gözlemlenmiştir. Rastgele elde edilen s-box yapılarının bazı kriptografik özellikleri düşük kalabilmektedir. Özellikle lineer olmama değerleri oldukça düşüktür. Bu çalışmada bu şekilde 5 farklı s-box üretilmiştir. Bu s-box yapılarının lineer olmama dışındaki diğer performans değerleri literatüre de bakıldığında kabul edilebilir değerlerdir. Ancak lineer olmama değerleri 102.25-103 aralığında kalmıştır. Bu s-box yapıları daha sonra Hilbert eğrisi temel alınarak hücreler yeniden konumlandırılmıştır. Elde edilen yeni s-box yapılarının diğer performans değerlerinde ciddi bir değişim olmadığı görülmüştür. Ancak lineer olmama değerlerinin 103.25-105.75 aralığına yükseldiği görülmektedir. Sonuç olarak düşük lineer olmama değerlerine sahip s-box yapıları Hilbert eğrisi mantığına göre tarandığında bu değerleri artabileceği tespit edilmiştir.

Güçlü s-box yapıları üretmek oldukça sıcak bir konudur. Gelecek çalışmalarda, başlangıçta elde edilen s-box yapıları farklı şekillerde elde edilebilir. Elde edilen bu s-box'lar farklı tarama teknikleri kullanılarak yeniden konumlandırılabilir. Bu çalışmada lineer olmama değeri temel alınarak bu değer arttırılmaya çalışılmıştır. Ancak diğer performans kriterlerinin ne şekilde arttırılabileceğinin araştırılması gelecek çalışmalar için önemli bir motivasyon kaynağı olabilir. Bu çalışmanın bir diğer önemli noktası, Hilbert eğrisi gibi yapıların kriptografik uygulamalarda nasıl kullanılabilceğini göstermek olmuştur. Bu tarz yapılar birçok kriptografik uygulamada farklı şekillerde kullanılarak yeni yöntemler geliştirilebilir. Gelecek alışmalarda Hilbert eğrisinin rastgele sayı üretme, görüntü şifreleme, görüntü sıkıştırma vb. yapılarda nasıl kullanılabilceği araştırılabilir.

Kaynaklar

- [1] Van Oorschot, P. C. (2020). *Computer Security and the Internet*. Springer International Publishing.
- [2] Katz j., Lindell Y. (2007). *Introduction to Modern Cryptography: Principles and Protocols*, Chapman and hall/CRC.
- [3] Cusick, T. W., & Stanica, P. (2017). *Cryptographic Boolean functions and applications*. Academic Press.
- [4] Shannon CE. (1949). Communication theory of secrecy systems. *Bell Syst Tech J* 28(4):656–715.
- [5] Daemen, J., & Rijmen, V. (2002). *The design of Rijndael (Vol. 2)*. New York: Springer-verlag.
- [6] Standard, D. E. (1999). *Data encryption standard*. Federal Information Processing Standards Publication, 112.
- [7] Bard, G. (2009). *Algebraic Cryptanalysis*, Springer Science & Business Media,
- [8] Özkaynak, F. (2020). On the effect of chaotic system in performance characteristics of chaos based s-box designs. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 550, 124072.
- [9] Savadkouhi, M. B., & Tootkaboni, M. A. (2024). S-Boxes design based on the Lu-Chen system and their application in image encryption. *Soft Computing*, 1-22.
- [10] Khan, M., Shah, T., Mahmood, H., Gondal, M. A., & Hussain, I. (2012). A novel technique for the construction of strong S-boxes based on chaotic Lorenz systems. *Nonlinear Dynamics*, 70(3), 2303-2311.
- [11] Çavuşoğlu, Ü., Zengin, A., Pehlivan, I., & Kaçar, S. (2017). A novel approach for strong S-Box generation algorithm design based on chaotic scaled Zhongtang system. *Nonlinear dynamics*, 87(2), 1081-1094.
- [12] Özkaynak, F., Çelik, V., & Özer, A. B. (2017). A new S-box construction method based on the fractional-order chaotic Chen system. *Signal, Image and Video Processing*, 11(4), 659-664.
- [13] Wei, Y., Pasalic, E., Zhang, F., & Hodžić, S. (2017). Efficient probabilistic algorithm for estimating the algebraic properties of Boolean functions for large n. *Information Sciences*, 402, 91-104.
- [14] Malik, M. S. M., Ali, M. A., Khan, M. A., Ehatisham-UI-Haq, M., Shah, S. N. M., Rehman, M., & Ahmad, W. (2020). Generation of highly nonlinear and dynamic AES substitution-boxes (S-boxes) using chaos-based rotational matrices. *IEEE Access*, 8, 35682-35695.
- [15] Hussain, I. (2020). True-chaotic substitution box based on Boolean functions. *The European Physical Journal Plus*, 135(8), 1-17.

- [16] Razaq, A., Ahmad, M., Yousaf, A., Alawida, M., Ullah, A., & Shuaib, U. (2022). A group theoretic construction of large number of AES-like substitution-boxes. *Wireless Personal Communications*, 122(3), 2057-2080.
- [17] Artuğer, F. (2023). A new S-box generator algorithm based on 3D chaotic maps and whale optimization algorithm. *Wireless Personal Communications*, 131(2), 835-853.
- [18] Khan, H., Hazzazi, M. M., Jamal, S. S., Hussain, I., & Khan, M. (2023). New color image encryption technique based on three-dimensional logistic map and Grey wolf optimization based generated substitution boxes. *Multimedia Tools and Applications*, 82(5), 6943-6964.
- [19] Zamli, K. Z., Kader, A., Din, F., & Alhadawi, H. S. (2021). Selective chaotic maps Tiki-Taka algorithm for the S-box generation and optimization. *Neural Computing and Applications*, 1-18.
- [20] Wang, Y., Zhang, Z., Zhang, L. Y., Feng, J., Gao, J., & Lei, P. (2020). A genetic algorithm for constructing bijective substitution boxes with high nonlinearity. *Information Sciences*, 523, 152-166.
- [21] Hematpour, N., & Ahadpour, S. (2021). Execution examination of chaotic S-box dependent on improved PSO algorithm. *Neural Computing and Applications*, 33(10), 5111-5133.
- [22] Artuğer, F., & Özkaynak, F. (2020). A novel method for performance improvement of chaos-based substitution boxes. *Symmetry*, 12(4), 571.
- [23] Hilbert, D. (1935). Über die stetige Abbildung einer Linie auf ein Flächenstück. *Dritter Band: Analysis· Grundlagen der Mathematik· Physik Verschiedenes: Nebst Einer Lebensgeschichte*, 1-2.
- [24] Webster, A. F., & Tavares, S. E. (1985, August). On the design of S-boxes. In *Conference on the theory and application of cryptographic techniques* (pp. 523-534). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [25] Biham, E., & Shamir, A. (1991). Differential cryptanalysis of DES-like cryptosystems. *Journal of Cryptology*, 4(1), 3-72.

5. Bölüm

Dizel Motorlarında Yenilenebilir Alternatif Yakıt Olarak Biyodizel Kullanımı

Murat KARABEKTAŞ¹
Mehmet ÇALIŞKAN²

¹Prof. Dr.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Makine Mühendisliği
Bölümü, Sakarya, Türkiye. ORCID No: 0000-0002-1025-1431

²Prof. Dr.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Makine Mühendisliği
Bölümü, Sakarya, Türkiye. ORCID No: 0000-0002-8835-9414

1. Giriş

Farklı birçok etkenin yanı sıra özellikle iki husus alternatif yakıt kullanımının yaygınlaşması için ön plana çıkmaktadır. İlk olarak mevcut içten yanmalı motorlarda kullanılan yakıtların ana kaynağı olan petrol rezervlerinin sınırlı olması bilinen bir husustur. Bunun yanı sıra son yıllarda sıklıkla gündeme gelen sera gazları ve bunların yol açtığı küresel ısınma etkisi alternatif yakıt araştırmaları ve kullanımı konusunda ön plana çıkan diğer bir husus olarak görülmektedir. Petrol kökenli yakıtlar olan benzin, motorin ve LPG esas olarak hidrojen ve karbon içeriğinden oluşmaktadır. Yakıtların içeriğinde bulunan karbonun hava ile karıştırılarak yakılması sonucu karbondioksit (CO₂) gazı oluşmaktadır. CO₂ yanma sonucu sera gazları arasında en çok üretilen ve atmosfere salınan gaz olarak bilinmektedir. CO₂ gazı; sanayi, tarım, evsel kullanım, enerji gibi sektörlerin yanı sıra ulaştırma sektöründen de kaynaklanan oldukça yüksek oranlarda salınım miktarına sahiptir. Enerji sektörü içinde, ulaştırma sektörü tek başına küresel sera gazı emisyonlarının %16,2'sinden sorumlu olarak belirtilmektedir (Azad vd., 2023). Dünya genelindeki enerji talebinin yılda 12 milyar ton petrol yakıtını aştığı tahmin edilmektedir. Bu durum yaklaşık 39,5 Gt CO₂ oluşumuna neden olmakta ve yakın gelecekte enerji tüketimindeki mevcut artış oranı göz önüne alındığında bunun 75 Gt' a ulaşma olasılığı bulunmaktadır (Padmanbaha ve Mohanty, 2024).

Benzin motorlarında karbonmonoksit (CO), hidrokarbon (HC) ve azotoksit (NO_x) kirletici egzoz emisyonları yanma sonucu üretilmektedir. Dizel motorlarında ise bu emisyonlara ilave olarak partikül madde (PM) ve kükürtdioksit (SO₂) emisyonları yakıt özellikleri ve motor çalışma koşullarına bağlı olarak atmosfere salınmaktadır. Ulaştırma sektöründe çoğunlukla içten yanmalı motorlar kullanılmakta olduğundan alternatif yakıt kullanımı için plana çıkan sektör olarak görülmektedir.

Taşıtlarda benzin ve dizel yakıtına alternatif olarak kullanılan, araştırmaları devam eden yakıtlar ve sistemler şu şekilde sınıflandırılabilir:

- 1-) Sıvı yakıtlar (Biyodizel, etanol, metanol, izobutanol, MTBE, DME)
- 2-) Gaz yakıtlar (Doğalgaz, hidrojen, LPG)
- 3-) Hibrit ve elektrikli araçlar

Bu yakıtlar arasında biyodizel, dizel motorlarında kullanım konusunda yaygınlaşan ve üzerinde çalışmalar sürdürülen bir alternatif yakıt olarak dikkat çekmektedir. Biyodizel üretiminde ana hammadde olarak bitkisel yağlar kullanılmaktadır. Bu yönüyle biyodizel yenilenebilir alternatif bir yakıt olarak tanımlanabilir (Shameer vd., 2017). Son yıllarda ise atık yağların biyodizel üretimi amacıyla kullanımı yaygınlaşmış ve atık sorunu konusunda etkili bir çözüm yöntemi olmuştur.

Biyodizel yakıtı; yağlı tohumlardan, atık yağlardan ve hayvansal yağlardan bir katalizör ile kısa zincirli bir alkol (metanol, etanol) ortamında reaksiyonu sonucunda elde edilen ve yakıt olarak kullanılan yağ asidi esteri olarak ifade edilmektedir.

Bilindiği gibi bitkilerin yetişmesinde temel unsur olan fotosentez olayında atmosferden CO₂ emilip oksijen (O₂) salınmaktadır. Biyodizelin üretimi için kullanılan yağ içeren bitkilerin üretilmesinde atmosferden karbon emilimi artmaktadır. Dolayısıyla bu durum atmosferdeki karbon dengesinin sağlanması için önemli bir etken olarak görülmektedir. Biyolojik karbon döngüsü içinde biyodizel amaçlı ekilen bitkiler, fotosentez ile egzoz emisyonları sonucu atmosfere bırakılan CO₂'yi dönüştürüp karbon döngüsünü arttırdığı için, biyodizel yakıtların motorlarda kullanımının sera etkisini artırıcı yönde bir etkisinin olmadığı belirtilmektedir. Dolayısıyla biyodizel yakıt kullanımı için bitkisel yağ üretim süreci göz önüne alındığında CO₂ emisyonları açısından doğal bir yutak durumda olduğu görülmektedir. Biyodizelin yanması sonucu yayılan CO₂' in esasen biyodizel hammaddesi olan bitkiler tarafından fotosentez yoluyla emildiği göz önüne alındığında, biyodizel genellikle karbon nötr bir enerji kaynağı olarak kabul edilir (He vd., 2024).

Günümüzde alternatif enerji kullanımı artırılarak sürdürülebilir enerji temininin sağlanması büyük önem arz etmektedir. Çevresel açıdan çok önemli yönde olumlu özellikleri olan biyodizel yakıt kullanımı ekonomik ve sosyal yönlerden bakıldığında da çok önemli avantajlara sahiptir. Yağ bitkisinin üretiminden yakıt haline dönüştürülmesi için geçen süreçte birçok farklı işlemlerden geçmesi gerekmektedir. Bu yönüyle bakıldığında iş olanakları ile istihdam oluşumu sağlanması yanında belirgin bir katma değer oluşturulması söz konusudur. Ayrıca biyodizel yakıtı için kullanılacak bitkisel yağ üretimi yerli kaynaklardan karşılanabileceği için dışa bağımlı petrol temini konusunda ise ithalat harcamalarında belirgin azalmaya sebep olacaktır. Bu çalışmada, dizel motorlarında son yıllarda kullanım olanağı bulan yenilenebilir alternatif yakıt olan biyodizelin kullanımı ile ilgili hususlar ayrıntılı olarak incelenmiştir.

2. Biyodizel

Biyodizel yakıtı günümüzde petrol kökenli dizel yakıtının en iyi alternatiflerinden biri olarak görülmektedir. Biyodizelin başlıca avantajı, mevcut dizel motorlarında ve yakıt sistemlerinde çok az modifikasyon yapılarak veya hiç yapılmadan kullanılabilmesidir. Çünkü, biyodizel başta setan sayısı, yoğunluk ve ısıl değer gibi yakıt özellikleri göz önüne alındığında dizel yakıtına yakın özellikler göstermektedir.

Biyodizelin diğer önemli bir avantajı ise, mevcut dizel motorlarında saf olarak veya dizel yakıtı ile belli oranlarda karışım yapılarak kullanılabilmesidir.

Biyodizel yakıtının ana hammaddesi olan bitkisel yağ üretim potansiyeli göz önüne alındığında en yaygın kullanım oranlarının %5 gibi düşük oranlarda olmasının daha avantajlı olacağı anlaşılmaktadır. Günümüzde düşük oranlı biyodizel kullanımı birçok ülkede yasal olarak zorunlu hale getirilmiştir. Örneğin Malezya'da B5 kullanımı yasal zorunluluk haline getirilmiştir (Altarazi vd., 2022). Ayrıca yapılan araştırmalarda da %20 gibi biyodizel içerikli yakıt kullanımının dizel motorlarında emisyon yönünden avantajlar oluşturduğu ifade edilmektedir. B20 karışımı kullanımı ile yeterli malzeme uyumluluğu, maliyet, soğuk hava performansı ve emisyon değerleri elde edildiği için mevcut dizel motorlarda değişiklik yapılmadan kullanılabilir. Biyodizel yakıt içeriklerine göre biyodizel uygulamaları şu şekilde belirtilebilir;

B5: %5 biyodizel, %95 dizel yakıtı karışımı

B20: %20 biyodizel, %80 dizel yakıtı karışımı

B100: %100 saf biyodizel

Biyodizel genel bir ifadeyle kimyasal formülü $C_{16}-C_{18}$ olan yağ asidi zincirlerini içeren metil veya etil ester tipi bir yakıt olarak açıklanabilir. Tablo 1'de yaygın biyodizel yakıtlarındaki yağ asidi bileşimleri verilmektedir. Metil veya etil ester terimi biyodizel üretiminde kullanılan alkolün metanol veya etanol olmasıyla ifade edilir. Başka bir ifadeyle biyodizel, uzun zincirli yağ asitlerinin (YA) mono alkil esterlerinden oluşur. Biyodizel için kullanılan bir başka tanım ise, yağ asidi metil esteridir (YAME). Biyodizelin diğer bir özelliği, biyodizeli oluşturan yağ zinciri asitlerinin toksik olmaması ve biyolojik olarak parçalanabilir olmasıdır. Bu yönüyle çevre açısından önemli bir avantaja sahip olmaktadır.

Biyodizel, hayvansal yağlar, bitkisel yağlar ve atık yemeklik yağ gibi çeşitli doğal kaynaklardan elde edilir. Ayrıca, günümüzde alglerin kullanımı gibi yeni biyodizel kaynakları için çalışmalar sürdürülmektedir. Petrol kökenli dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında biyodizelin önemli üstün yönlere sahip olduğu görülmektedir. Toksik madde içermeyen yapısı, doğada biyolojik olarak parçalanabilmesi, son derece düşük kükürt ve aromatik içeriği, yüksek parlama noktasına bağlı olarak güvenli olması ve üstün yağlayıcılık özelliği önemli hususlar olarak görülmektedir (Ismaeel vd.,2024).

Biyodizel yakıtının önemli avantajları şu şekilde belirtilebilir (Tamilselvan vd., 2017).

- Dizel yakıt özelliklerine yakın değerlere sahip olması. Yenilenebilir yakıt niteliğinde olup yerel kaynaklardan temin edilebilir.

- Herhangi bir oranda ve karışım maddesi olmadan dizel yakıtı ile yüksek karışabilme özelliği

- Oksijen (O_2) içermesi (~ kütlece %11)

- Aşınmayı azaltmak ve pompa gibi yakıt sistemi elemanlarının ömrünü uzatmak için mükemmel yağlama özelliği
- Güvenli depolama, taşıma ve nakliye kolaylığı

Fosil dizel ile karşılaştırıldığında CO₂ emisyonlarını azaltma veya CO₂ nötr kalma yeteneği

Tablo 1: Yaygın biyodizel yakıtlarındaki yağ asitlerinin bileşimleri (Lee vd., 2021)

Yağ asidi metil esteri	Lipid sayıları	Palmiye	Soya	Kolza	Jatropha
Laurik	C12:00	0.2	0.1	0.0	0.0
Miristik	C14:00	0.8	0.1	1.0	0.1
Palmitik	C16:00	39.5	10.2	3.5	15.6
Stearik	C18:00	5.1	3.7	0.9	10.5
Oleik	C18:00	43.1	22.8	64.1	42.1
Linoleik	C18:2	10.4	53.7	22.5	30.9
Linolenik	C18:3	0.1	8.6	8.0	0.2
Diğerleri (Arahidik, Behenik, vb.)		0.8	0.8	0.0	0.6

3. Biyodizel yakıt standartları

Mevcut dizel yakıtı kullanımı için dizayn edilen dizel motorlarında biyodizel yakıt kullanımının oluşturacağı bazı etkiler olmaktadır. Bu etkilerin en önemli nedeni yakıtın sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özellikleridir. Biyodizel yakıt kullanımında yakıtın sahip olduğu özelliklere göre motor ve sistemleri üzerinde yapılacak düzenlemeler ve ayarlar için yakıtın belli standartlara sahip olması gereği vardır. Genel olarak biyodizel için Tablo 2’de görüldüğü gibi Avrupa birliği için EN standartları ve ABD için ise ASTM standart düzenlemeleri bulunmaktadır. Burada motorda hava-yakıt karışım oluşumu, yanma performansı, ve egzoz emisyonlarını etkileyecek olan vizkozite, yoğunluk ve setan sayısı gibi özellikler standartlarla belirlenmiştir. Bunun yanı sıra yakıt sistemi üzerinde etki yapacak olan bakır korozyonu, oksidasyon kararlılığı gibi özelliklerinde değerleri belirtilmektedir.

Tablo 2: Biyodizel özellikleri için bazı EN ve ASTM standartları (Addison vd., 2024)

Özellik	Birim	EN 14214	ASTM D6751-23
Parlama noktası	°C	> 101	>130
Kinematik viskozite (40 °C de)	mm ² /s	3.5-5.0	1.9-6.0
Yoğunluk (15 °C de)	kg/m ³	860-900	
Kükürt içeriği	ppm	<10	<0.5
Bulutlanma noktası	°C	<2.0	
Oksidasyon kararlılığı	Saat	>8.0	>3.0
Bakır korozyonu	Derecelendirme	Sınıf 1	Sınıf 3
Setan sayısı			>47

Yakıt standartlarında belirtilen özelliklerden bazıları oluşturduğu etkiler göz önüne alındığında aşağıda olduğu gibi açıklanabilir. Bu özellikler performans ve emisyon açısından önemli etkilere sahiptir.

Kinematik viskozite:

Viskozite, bir akışkanın akışa karşı göstermiş olduğu direnç olarak tanımlanmakta ve sıcaklık artışı ile azalmaktadır. Akışa karşı direnç olması nedeniyle viskozite, püskürtme atomizasyonunda ve penetrasyonunda önemli bir rol oynar (Sakthivel vd., 2018). Dizel motorlarında kullanılan yakıt aynı zamanda pompa enjektör gibi yakıt sistemi elemanlarını yağlama ve kısmen soğutma gibi işlevleri de yapar. Çok düşük viskoziteli yakıt geri dönüş ve sızıntıları arttıracığından yakıt sistemi elemanlarının yağlanması problemi ortaya çıkar. Çok yüksek viskoziteli yakıt ise yakıtın pompalanması yanı sıra püskürtülmesi sürecinde sorunlar oluşturur. Çok yüksek viskoziteli yakıt motorda sıkıştırılan hava içine püskürtüldüğünde yakıt hava karışımını olumsuz etkileyeceğinden tutuşma gecikmesi sürecini uzatır. Bunun sonucunda yanma kötüleşeceğinden motorda ısıl verim düşer ve belirgin olarak is emisyonları artar.

Yoğunluk:

Yakıtın belirli bir sıcaklıkta, birim hacimde sahip olduğu kütle miktarını gösterir. Yoğunluk değeri ile biyodizel yakıtın dizel yakıtı ile karışımı yanı sıra motorlarda yakıtın hava ile karışım oluşturması arasında bağıntı vardır. Çok yüksek veya düşük yoğunluğa sahip yakıtlar karışımı oluşturan bileşikler arasında stabilite yönünden dezavantaj oluştururlar. Biyodizel yakıtı mevcut

dizel yakıtına göreceli olarak yakın yoğunluk değerine sahip olduğundan her karışım oranında bir olumsuzluk ortaya çıkmaz. Bunun yanında, biyodizel yakıtının oksijen içermesi nedeniyle dizel yakıtına göre motorlarda karışım oluşumu daha iyi olmaktadır.

Kükürt içeriği

Kükürt içeriği motor yakıtlarına özgü bir karakteristiktir ve her yakıtın kükürt içeriği farklıdır. Örneğin dizel yakıtı önemli oranda kükürt içerirken benzin, LPG ve doğalgaz gibi yakıtlar kükürt içermezler. Yakıtın içerdiği kükürt (S) hava ile karıştırılıp yandığında kükürt dioksit (SO_2) emisyonunu oluştururlar (Addison vd., 2024). SO_2 emisyonları, atmosfere salındığında sülfirik asit oluştururlar ve bundan dolayı asit yağmuru oluşturan ana unsurlardan biri olarak belirtilebilir. Günümüzde mevcut dizel yakıtı içerisindeki kükürt oranı kısmen düşürülmüş ve düşük kükürtlü yakıt (LSD) olarak isimlendirilmiştir. Biyodizel ise yakıt özelliği olarak son derece düşük kükürt değerine sahiptir ve hatta ifade edilirken kükürt içermediği belirtilmektedir. Mevcut dizel yakıtıyla belli oranda karışım yapılarak biyodizel kullanımı kükürt içeriğinin azaltılması yönünde belirgin katkı yapmaktadır.

Setan sayısı

Setan sayısı, yakıtın kendi kendine tutuşma kabiliyetini gösteren önemli bir parametredir. Dizel motorlarında sıkıştırma zamanı sonunda sıcaklığı artan havanın içine püskürtülen yakıtın tutuşabilme özelliğinin iyiliğini ifade eder. Bir yakıtın dizel motorlarında kullanımına uygunluğu için ilk değerlendirilen değer setan sayısıdır ve yüksek olması istenir. Yüksek setan sayısına sahip bir yakıtın kullanımı ile tutuşma gecikmesi süresi kısalmır (Hasan ve Rahman, 2017). Buna bağlı olarak ısıl verim artacağı gibi motorlarda gürültü de azalır. Düşük setan sayılı yakıtların dizel motorlarında saf olarak kullanım olanağı olmadığından düşük oranlarda karışım yakıt içerisinde püskürtülür. Biyodizel yakıtının dizel motor yakıtı olarak en belirgin özelliği mevcut dizel yakıtına yakın veya yüksek setan sayısı değerine sahip olmasıdır. Buna bağlı olarak biyodizel yakıt kullanımı ile iyileşen yanma sonucu verim artışı yanı sıra kirlenici emisyonlar azalmaktadır.

Parlama noktası

Parlama noktası, bir tutuşma kaynağı kullanılarak belirli koşullar altında yakıt buharının tutuşmasına neden olunan en düşük sıcaklık değeri olarak tanımlanabilir. Parlama noktası yakıtın depolanmasını, kullanımını ve taşınmasını, etkilediği için öneme sahiptir (Zaharin vd., 2017). Yakıtların ve yanıcı sıvıların tehlikesini belirlemede önemli ölçüt olarak parlama noktası değeri gösterilebilir. Parlama noktası yağın yanma tehlikesi hakkında bilgi verdiğinden güvenlik sınıflandırmasında ve taşınması için ihtiyaç duyulan

belgelerde belirtilir. Dizel yakıtı ile kıyaslandığında, biyodizel daha yüksek parlama noktası değerine sahip olduğundan taşıma açısından daha güvenli olduğu görülmektedir.

4. Biyodizel üretiminde kullanılan hammaddeler

Hammaddelerin özelliklerine, bulunabilirliğine ve ihtiyaçlara bağlı olarak yıllar itibariyle biyodizel farklı kaynaklardan üretilmektedir. Bu durum göz önüne alındığında, çeşitli hammaddelerden üretilen biyoyakıtlar genel olarak birinci nesil, ikinci nesil, üçüncü nesil ve dördüncü nesil biyoyakıtlar olmak üzere dört farklı kategoride sınıflandırılabilir.

Birinci nesil biyoyakıtlar:

Genellikle yenilen bitkisel yağlardan transesterifikasyon yöntemiyle üretilen biyodizel türü birinci nesil olarak belirtilir. Biyodizel hammaddesi olarak gıda sınıfı bitkisel yağlar olan mısır, kanola, hindistan cevizi, ayçiçek ve kolza gibi yağlı bitkiler kullanılmaktadır. Birinci nesil biyodizel üretimi için yenilenebilir yağlar kullanıldığından gıda sektörü ile bir rekabet oluşmuştur. Dolayısıyla birinci nesil biyodizel yakıtı hammaddesinden dolayı enerji sektöründe sürdürülebilirlik konusunda bir dezavantaj ortaya çıkmıştır. Ayrıca enerji temini konusunda önemli hususlardan biri de yakıtın maliyeti konusudur. Biyodizel yakıtı maliyetinin azaltılması içinde diğer biyodizel hammaddeleri konusuna ilgi olmakta ve çalışmalar yapılmaktadır.

İkinci nesil biyoyakıtlar:

Biyodizel üretimi için yenilebilir bitkisel yağ hammaddelerine olan bağımlılığı en aza indirmek amacıyla yenilebilir olmayan hammaddeler gibi alternatif kaynaklar aranmıştır (Ashraful vd., 2014). İkinci nesil biyodizel hammaddesi olarak karanja, mahua, pamuk tohumu, Jojoba, keten tohumu ve Jatropha gibi yenilemeyen yağlı tohumlu bitkiler kullanılmaktadır.

Üçüncü nesil biyoyakıtlar:

Üçüncü nesil biyoyakıtlar genellikle mikroalglerden ve atık bitkisel yağlardan üretilmektedir. Ayrıca bitkisel atıklarda diğer üçüncü nesil biyoyakıt hammaddesidir. Alglerin önemli avantajı daha verimli olmaları, üretim için daha az alana ihtiyaç duymaları ve daha geniş bir yakıt türü yelpazesi kullanılarak üretim imkanına sahip olmalarıdır. Alglerden elde edilen üçüncü nesil biyoyakıtların üretiminde; solvent ekstraksiyonu, transesterifikasyon ve süperkritik akışkan ekstraksiyon teknikleri kullanılmaktadır (Malik vd., 2024). Biyodizel üretiminde atık bitkisel yağ kullanımı ile önemli avantajlar elde edilmektedir. En önemli avantaj şehirlerde gittikçe artan atık sorununun, özellikle atık yağ sorununun çözümünde önemli katkı sağlamalarıdır. Ayrıca atık yağ kullanımı ile biyodizel üretim maliyetleri de önemli oranda azalmaktadır.

Dördüncü nesil biyoyakıtlar:

Dördüncü nesil biyodizel hammaddesini kullanma esas amacı sera gazı CO₂' i yakalayıp depolamak ve sürdürülebilir enerji üretimini sağlamaktır. Bu amaçla CO₂' i absorbe eden farklı biyokütle türleri diğer nesil hammaddelere benzer şekilde bir işlem uygulanarak biyodizel üretmek için kullanılır (Ghosh ve Halder, 2022). Dördüncü nesil uygulamada, genetiği değiştirilmiş bitkiler, mikrobiyolojik sistemler ve gelişmiş atık bertaraf yolları gibi yeni alanlar araştırılmakta ve daha gelişmiş dönüşüm teknolojileri üzerinde çalışmalara odaklanılmaktadır. Bu tür CO₂ absorbe eden biyokütle kaynakları doğada bol miktarda bulunmakta olup bunların kullanımının uzun süreçte maliyet açısından etkili olacağı görülmektedir. Bu yenilikçi dönemde, son teknoloji kullanılarak karbon nötrlüğü, güçlendirilmiş sürdürülebilirlik ve biyoyakıt üretiminde öncü atılımlar yapmak hedeflenmektedir (Malik vd., 2024). Ayrıca çevresel açıdan sorumluluk duyan ve optimize edilmiş biyoyakıt üretim süreçlerine yenilikçi yönde yeni atılımlar yapılması amaçlanmaktadır. Dördüncü nesil biyodizel üretimin en belirgin farkı, üretim sürecinin her aşamasında CO₂ birikimi sağlamalarıdır ve sonuçta CO₂ absorbe edilmesi, bu süreci karbon negatif hale getirir. Genetik olarak ileri düzeyde değişime sahip alg biyokütlesi, örneğin *C. reinhardtii*, *C. vulgaris*, biyodizel üretmek için kullanılabilen dördüncü nesil hammaddeler olarak belirtilebilir. Tablo 3' de farklı biyodizel hammaddelerinin avantaj ve dezavantajları belirtilmektedir.

Tablo 3: Farklı çeşitlerdeki biyodizel hammaddelerinin avantaj ve dezavantajları (Osman vd., 2024)

Hammaddede çeşidi	Avantaj	Dezavantaj
Yenilebilir bitkisel yağ	*Biyolojik olarak parçalanabilir *Düşük sülfür içeriği *Yüksek yağ içeriği *Düşük maliyet	*Yüksek vizkozite *Gıda bitkileriyle rekabet *Ormanların yok olmasına ve yaşam alanlarının tahrip olmasına yol açar
Yenmeyen bitkisel yağ	*Gıda mahsulleriyle rekabeti en aza indirebilmek	*Yaygın olarak üretilmiyor *Kolayca temin edilemiyor
Hayvansal yağlar	* Düşük maliyet * Atık azaltma potansiyeli *Gıda mahsulleriyle rekabeti en aza indirebilme	*Oda sıcaklığında katılaşma
Atık bitkisel yağ	*Kirlilik azaltma potansiyeli *Atık azaltma potansiyeli *Gıda mahsulleriyle rekabeti en aza indirebilme	*Kullanılabilirlik bölgeye göre değişir *İyi gelişmiş bir koleksiyon altyapısına ihtiyaç vardır
Mikroalgler	*Hızlı büyüme *Yüksek yağ içeriği *Gıda bitkileriyle rekabeti en aza indirebilme	*Yüksek enerji gereksinimi *İleri teknoloji gerekli *Yüksek üretim maliyeti

	*Çeşitli çevre koşullarında gelişebilme	
--	---	--

5. Biyodizel yakıt kullanımı ve üretimi

Saf bitkisel yağların viskozitelerinin yüksek olması yanında sahip oldukları fiziksel ve kimyasal özellikleri, dizel motorlarda %100 saf olarak kullanımlarında bazı sorunlara neden olur. Bu sorunlar genellikle enjektör tıkanması ve motorda oluşacak birikintiler olarak ortaya çıkar. Saf bitkisel yağların dizel motorlarında yakıt olarak kullanılabilmesi için özelliklerinin dizel yakıtına benzer olacak şekilde değiştirilmesi gereklidir. Bitkisel yağların saf olarak kullanımında yüksek viskoziteleri en büyük sorun olarak görülmektedir. Yağların dizel motorlarında alternatif yakıt olarak kullanılabilmesi amacıyla farklı uygulamalar yapılmaktadır. Bu yöntemler doğrudan kullanım, termal kraking, mikroemülsiyon ve transesterifikasyon olarak belirtilebilir (Pydimalla vd., 2023). Bu yöntemler arasında günümüzde en çok uygulanan yöntem olarak transesterifikasyon ön plana çıkmaktadır.

Doğrudan Kullanım- Biyoyakıt olarak isimlendirilen farklı yağlar yüksek ısıl değere sahip olduğundan bu özellik bitkisel yağların dizel motorunda yakıt olarak doğrudan kullanımına kısmen imkanvermektedir. Eski yıllarda uygulanan bu yöntem için Rudolph Diesel' in motoru fıstık yağı ile çalıştırması belirtilebilir. Dizel motorda saf bitkisel yağ kullanımı ile atomizasyonun azalması, yakıt filtresinin tıkanması, yüksek viskozite ve yoğunluktan dolayı biyodizelin uçuculuğunun azalmasıyla oluşan kısmi yanma gibi çeşitli sorunlar ortaya çıkabilmektedir (Kale ve Patle, 2022).

Saf bitkisel yağların yüksek viskoziteleri nedeniyle motorun uzun süreli bu yöntemle çalışmalarında bazı olumsuzluklar ortaya çıkmaktadır. Buna örnek olarak motor ve yakıt istemlerinde oluşan karbon birikintileri ve yağlama yağındaki bozulma da gösterilebilir. Günümüz motorları yüksek basınçlı yakıt püskürtme yapabilen oldukça hassas toleransları olan yakıt sistemlerine sahiptir. Bu yönüyle günümüzde yüksek viskoziteli saf bitkisel yağların yakıt olarak bu motorlarda kullanımı yöntemi tercih edilmemektedir. Saf bitkisel yağların ve dizel yakıtın özellikleri Tablo 4' de verilmektedir.

Tablo 4: Saf bitkisel yağların dizel yakıtı ile karşılaştırmalı özellikleri (Singh ve Singh, 2010)

Bitkisel Yağ	Kinematik Viskozite mm ² /s (38°C de)	Setan Sayısı	Isıl Değeri (MJ/kg)	Bulut Noktası (°C)	Akma Noktası (°C)	Parlama Noktası (°C)	Yoğunluk (kg/l)	Karbon Kalıntısı (wt.%)
--------------	--	--------------	---------------------	--------------------	-------------------	----------------------	-----------------	-------------------------

Mısır	34,9	37,6	39,5	-1,1	-40	277	0,9095	0,24
Pamuk tohumu	33,5	41,8	39,5	1,7	-15	234	0,9148	0,24
Keten tohumu	27,2	34,6	39,3	1,7	-15	241	0,9236	0,22
Yer fıstığı	39,6	41,8	39,8	12,8	-6,7	271	0,9026	0,24
Kolza tohumu	37	37,6	39,7	-3,9	-31,7	246	0,9115	0,30
Aspir	31,3	41,3	39,5	18,3	-6,7	260	0,9144	0,25
Susam	35,5	40,2	39,3	-3,9	-9,4	260	0,9133	0,24
Soya fasulyesi	32,6	37,9	39,6	-3,9	-12,2	254	0,9138	0,25
Ayçiçeği	33,9	37,1	39,6	7,2	-15	274	0,9161	0,27
Palmiye	39,6	42	-	31	-	267	0,9180	0,23
Dizel yakıtı	3,06	50	43,8	-	-16	76	0,855	-

Termal kraking/Piroliz- Bu yöntem ile yağ hammaddesi oksijen yokluğunda 350 -800 °C arasındaki sıcaklıklara maruz bırakılır (Pydimalla vd., 2023). Bu durumda katalizörlü veya katalizörsüz olarak bitkisel yağın içeriğinde bulunan trigliseritlerin kimyasal bağları bozulur ve sonuçta dizel yakıtı ile karşılaştırılabilir özelliklere sahip biyodizel ortaya çıkar. Dizel yakıtına benzer biçimde, pirolizle üretilen biyodizel yakıtı düşük viskozite, yüksek setan sayısı, kabul edilebilir bakır korozyon oranı, kabul edilebilir kükürt içeriği ve makul miktarda su içeriği gibi motorlarda kullanım imkanı veren yakıt özelliğine sahip olur.

Mikroemülsiyon- Emülsiyon uygulaması, yağ ve su gibi birbiriyle karışma özelliği göstermeyen iki sıvı maddenin bir yüzey aktif madde yardımıyla mikrometre çapında sıvı içinde dağıtılması için uygulanan bir yöntemdir. Suyun dispersiyonları için yağ ve yüzey aktif madde karışımı bir yardımcı madde ile birlikte uygulanan fiziksel yöntem mikroemülsiyon olarak adlandırılır. Biyoyakıtlara su eklenerek emülsiyon oluşturma işlemi yanma reaksiyonlarından kaynaklanan kirletici emisyonları azaltma yöntemi olarak bilinmektedir. Sıvı biyoyakıtlara su eklenmesinin amacı, yanma bölgesindeki yerel sıcaklığı düşürmek ve özellikle PM ve NOx'i emisyonlarını azaltmaktır (Lee vd., 2021). Biyodizel damlacıklarına su eklenmesi mikro patlamayı artırır ve buna bağlı olarak yakıtın atomizasyonu iyileşir. Su biyodizele kıyasla düşük bir kaynama noktasına sahip olduğundan, yakıt damlacıkları içerisindeki su önce buharlaşır. Bu durum yakıt karışımının daha küçük damlacıklara ayrışmasına ve daha sonra mikro patlamaya neden olur. Sonuçta yakıt damlacıklarının buharlaşma süresi daha ince boyutları nedeniyle daha kısadır. Ayrıca, buharlaşma süreci sırasında, suyun ısıyı emmesi, adyabatik alev sıcaklığının azalmasına neden olur ve böylece NOx gibi kirletici emisyon

oluşumu azalır. Su-biyodizel emülsiyon yönteminin zorluğu, gösterdiği kararlılık olarak görülmektedir. Bu nedenle, yüzey aktif maddelerin kullanımı emülsiyonu kararlı hale getirmede önemli bir etkidir. Yüzey aktif maddelerin hidrofilik-lipofilik dengesi su-biyodizel emülsiyonunun kararlılığını artırır.

Yağa uygulanan mikroemülsiyon sonucu yakıt, dizel motorlarda kullanılmadan önce herhangi bir kimyasal işleme ihtiyaç duymaz. Mikroemülsiyonlar faza bağlı olarak iki gruba ayrılır; (i) suyun yağda dağılması ve (ii) yağın suda dağılması (Ghosh ve Halder, 2022). Yağ ve su, mikroemülsiyon işlemi termodinamik olarak kararlı olduğundan daha uzun süre dispersiyonda kalır ve kararlılığını korur. Mikroemülsiyon uygulaması ile motorlarda NO_x emisyonu azalması önemli bir avantaj olarak görülür. Mikroemülsiyon ile oluşturulan yakıtın yanma sıcaklığını kısmen düşürmesi NO_x emisyonu azalması için ana neden olarak belirtilebilir. Ayrıca, mikroemülsiyon ile oluşan biyodizellerin uygun setan sayısı, yan ürün olmaması, daha yüksek likidite, basit uygulama olanağı, çevre dostu işlem ve atık su üretimi olmaması diğer avantajlar olarak görülür.

Transesterifikasyon- Transesterifikasyon işlemi en genel ifadeyle trigliserit esterlerini mono alkil esterlere veya biyodizele dönüştüren yöntem olarak ifade edilebilir. Transesterifikasyon işleminde biyodizel hammaddesi olan yağ, mono hidrik bir alkolle (etanol, metanol) katalizör (asidik, bazik katalizörler ile enzimler) eşliğinde ana ürün olarak yağ asidi esterleri (YAME) ve gliserin meydana getirerek esterleşir. Bu işlemde katalizör olarak genellikle sodyum hidroksit (NaOH) veya potasyum hidroksit (KOH) kullanılmaktadır. Katalizörlerin kullanılma amacı, reaksiyon hızını ve üretim verimini arttırmak olarak belirtilebilir. Bir yan ürün olan gliserin başta sabun yapımı olmak üzere farklı kimyasal maddelerin üretimi için kullanılabilen değerli bir hammadde olarak değerlendirilir. Transesterifikasyon reaksiyonu, saf bitkisel yağların viskozitesini, yoğunluğunu azaltmak için yaygın olarak kullanılan en elverişli yöntemdir (Kale ve Patle, 2022). Biyodizel üretmek için transesterifikasyon işlemi için uygulanan aşamalar genel hatlarıyla aşağıdaki gibi sıralanabilir;

1-) Kullanılacak katalizör maddenin bir reaktörde alkol içerisine katılarak hızlı biçimde karıştırılması sonucu çözülmesi sağlanır.

2-) Hammadde yağ reaktör içerisine aktarılarak katalizör/alkol karışımına ilave edilmiş olur. Oluşturulan yağ, katalizör ve alkol karışımı yine hızlı biçimde bir süre karıştırılır. Daha sonra karışım içindeki alkolün uçmasını önlemek amacıyla katalizör kapatılır ve bir süre transesterifikasyon reaksiyonunun oluşması beklenir.

3-) Oluşan transesterifikasyon reaksiyonu sonucunda yağ asidi esteri ve ham gliserin üretilmiş olur. Ham gliserin esterleşmiş yakıtı göre daha ağır

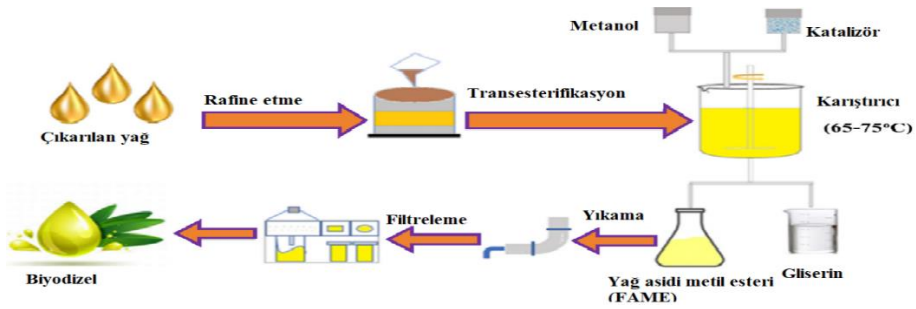
olduğundan reaktörün alt kısmında çökeler. Gliserinin tam olarak çökmesi için uzun bir zamana ihtiyaç vardır.

4-) Yağın esterleştirilmesi ile biyodizel üretildikten sonra reaksiyona giremeyen alkol, katalizör ve gliserini ayırmak amacıyla saf su ile yıkama işlemi yapılır.

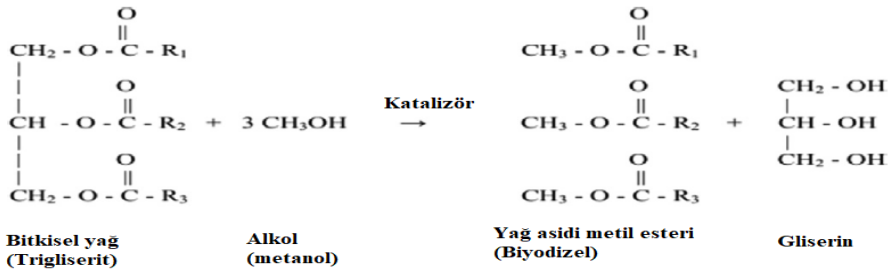
5-) Çökeltme tamamlandığında ise su ilave edilerek bir süre daha karıştırılır ve sonuçta gliserinin yeniden çökmesi için bir süre beklenir. Esterleşmiş yakıtın yıkama işlemi dikkatlice yapılması gereken bir süreçtir.

6-) Bütün işlemler tamamlandığında biyodizel üst kısımda gliserin ise alt kısımda birikerek ayrışır. Biyodizel tabakası gliserin kısmına temas etmeden dikkatlice ayrı bir kaba alınır.

Biyodizel üretimi için yapılan işlemler Şekil 1’de, biyodizel üretimi için transesterifikasyon reaksiyonları ise Şekil 2’de verilmektedir.



Şekil 1: Biyodizel yakıt üretimi için yapılan işlemler (Khalaf vd., 2024)



Şekil 2: Biyodizel üretimi için transesterifikasyon reaksiyonu (Gaur ve Goyal 2022)

6. Biyodizelin motor yakıtı olarak özellikleri

6.1. Biyodizel yakıt özelliklerinin dizel motor performansına etkisi

Biyodizel yenilebilir bitkisel yağlar (mısır, Ayçiçek), yenilemez bitkisel yağlar (mahua, jatropha) ve atık bitkisel yağlar gibi çok farklı hammaddelerden üretilmektedir. Çok yüksek vizkozite ve yoğunluğa sahip olan bu yağlardan transesterifikasyon işlemi sonucu biyodizel üretilmekte olup sonuçta üretilen bu biyodizel yakıtların vizkozite ve yoğunluklarının azaldığı anlaşılmaktadır.

Tablo 5' de biyodizel yakıt özellikleri dizel yakıtıyla karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Tabloda *Jatropha curcas* metil esteri (JCME), foetida metil ester (SFME), pentandra metil ester (PTME) olarak belirtilmektedir. Farklı yağlardan üretilen bu yakıtlardan elde edilen biyodizelin yakıt özellikleri çoğunlukla birbirine yakın değerler göstermektedir. Görüldüğü gibi genel bir değerlendirme yapıldığında dizel yakıtına göre biyodizel yakıtın yüksek vizkozite, yüksek yoğunluk, düşük alt ısı değer, yüksek parlama noktası, düşük kükürt oranı gibi değerler gösterdiği ifade edilebilir. Bunun yanı sıra biyodizel yakıtların daha yüksek setan sayısı ve düşük oranda karbon içeriğine sahip olduğu ve dizel yakıt içeriğinde bulunmayan %11 gibi bir oksijen içeriği olduğu anlaşılmaktadır.

Isıl değer yakıtın birim kütle sinin yanma sonucu ele edilen enerji içeriğini gösterir. Biyodizel yakıtlar dizel yakıtına göre oksijen içerdiğinden daha düşük ısı değere sahiptirler. Oksijen içeriği biyodizelin ısı değerini dizel yakıtına göre yaklaşık %10 oranında azaltır (Pullen ve Saeed, 2014) . Bunun sonucu olarak motorlarda yanmaları neticesi dizel yakıtına göre yakıt tüketimi artış gösterir (Sakthivel vd, 2018). Özgül yakıt tüketimi değeri birim güç başına olan kütle sel yakıt tüketimi (gr/kwh) olup yakıtın ne kadar verimli yandığını da ifade eder. Bunun en önemli göstergesi ise ısı (termik) verim değeri olup biyodizel yakıt kullanımında benzer veya biraz yüksek yüksek ısı verim değerleri ortaya çıkmaktadır.

Biyodizel-dizel karışımı kullanıldığında, dizel yakıtına kıyasla tutuşma gecikme süresi kısalmış, maksimum ısı salınım oranında bir azalma ortaya çıkar. Ayrıca maksimum silindir gaz basıncı mevcut dizel yakıtından biraz daha yüksektir (Hasan ve Rahman, 2017).

Setan sayısı yakıtın kendi kendine tutuşma yeteneğini gösteren bir değerdir. Dizel motorlarında yanma, sıkıştırılan ve sıcaklığı artan hava içerisine püskürtülen yakıtın tutuşması sonucu gerçekleşir. Bunun için yüksek setan sayılı yakıtlara ihtiyaç duyulur. Düşük setan sayılı metanol, etanol gibi yakıtlar yüksek oktan sayısına rağmen düşük setan sayılarına sahip olduklarından benzin motorlarında %100 oranda kullanılmasına rağmen dizel motorlarında maksimum %10-20 oranında karışım yakıt halinde kullanılabilir. Tablo 5' de görüldüğü gibi biyodizelin dizel yakıtına göre setan sayısı daha yüksektir. Bu nedenle sıkıştırılan hava içerisine püskürtüldüğünde kolayca tutuşarak tutuşma

gecikmesi süresini kısaltırlar ve yanmayı iyileştirir. Biyodizel kullanımı sonucu ısıl verimde sağlanan küçük oranda artışın ana sebeplerinden biri yüksek setan sayısıdır.

Dizel yakıtı oksijen içermez buna karşın biyodizel içeriğinde %11 dolayında oksijen vardır. Buna bağlı olarak biyodizel yakıtın karbon içeriği daha azdır. Oksijen içeriği yakıt-hava karışımı oluşumu iyileştirdiği gibi yanma üzerinde de olumlu yönde etki gösterir. Biyodizel yakıtı kullanımı ile ısıl verimin artmasının, oksijen içeriğinden kaynaklandığı ifade edilebilir.

Biyodizelin vizkozite ve yoğunluk değerleri dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında bir miktar yüksek olmasına rağmen bunların tolere edilebilir sınırlar içerisinde olduğu anlaşılmaktadır. Biyodizel üretiminin esas amacı saf bitkisel çok yüksek olan yağın vizkozitesi ve yoğunluğunu azaltarak dizel yakıtına yakın değerlere getirmektir. Biyodizelin azaltılan vizkozitesi sıkıştırılan hava içine püskürtülmesi sonucu damlacık çapı ve dağılımını iyileştirmiş olur.

Biyodizel, petrol kökenli dizel yakıtına göre yüksek parlama noktasına sahiptir (yaklaşık olarak dizel yakıtı 71 °C, dizel yakıtı 160-190 °C arası). Bu yönüyle biyodizel güvenlik ve taşıma açısından daha avantajlı olarak görülmektedir.

Tablo 5: Farklı biyodizel yakıt özelliklerinin dizel yakıtı ile karşılaştırılması (Ong vd., 2013)

Özellik	Birim	Dizel yakıtı	Biyodizel		
			JCME	SFME	CPME
Kinematik Viskozite (40°C ' de)	mm ² /s	2.91	3.91	4.92	4.15
Yoğunluk (15°C ' de)	Kg/m ³	839.0	838.8	873.0	856.9
Parlama Noktası	°C	71.5	161.5	160.5	163.5
Akma Noktası	°C	1.0	2.0	-3.0	1.7
Bulut Noktası	°C	2.0	3.0	1.2	2.5
Bulut Filtre Tıkanma Noktası	°C	-8	0.0	-2.5	1.0
Isıl Değer	MJ/kg	45.825	40.427	40.179	40.490
Asit Değeri	Mg KOH per g	0.17	0.24	0.14	0.38
İyot değeri	g I ₂ /100 g	–	105	103	107
Conradsons Karbon Kalıntısı (örnek %100)	% m/m	0.187	0.020	0.015	0.029
Bakır Şerit Korozyonu (50°C ' de 3 saat)	–	1	1a	1a	1a
Sülfat Külü İçeriği	% w/w	0.02	0.006	0.003	0.009
Kükürt İçeriği (S 15 derece)	ppm	–	8.01	14.33	13.97
Kükürt İçeriği (S 500 derece)	ppm	449.65	–	–	–
Oksidasyon Kararlılığı 110°C	–	23.7 h	9.40	3.44	4.22
Metanol İçeriği	% m/m	–	0.04	0.04	0.04
FAME İçeriği	% m/m	–	96.89	96.05	96.44
Setan Sayısı	–	49.7	58.2	56.5	57.2
Su İçeriği	vol.%	–	0.035	0.031	0.045
Karbon	wt.%	88.5	74.4	72.6	78.0
Hidrojen	wt.%	13.5	12.1	11.8	12.5
Oksijen	wt.%	0.0	11.45	11.07	11.68
Grup 1 Metalleri (Na ve K)	mg/kg	–	5.0	5.0	5.0
Grup 2 Metalleri (Ca + Mg)	mg/kg	–	1.0	1.0	1.0

6.2. Biyodizel yakıt kullanımı ile egzoz emisyonları

Esas olarak karbon ve hidrojen içeren yakıtların dizel motorlarında yanması sonucu tam yanma ürünleri olan CO₂, H₂O ve N₂ üretilmektedir. Bunun yanısıra yakıt içeriği ve yanma koşullarına bağlı olarak ise farklı kirletici egzoz gazları ortaya çıkmaktadır. Bu gazlar; karbonmonoksit (CO), hidrokarbon (HC), azotoksitler (NO_x), kükürtdioksit (SO₂) ve partikül madde (PM) dir.

Motorlarda CO emisyonu oluşumu için ana neden olarak, hava-yakıt karışımının zengin karışım olarak yanması gösterilebilir. CO emisyonu bir eksik yanma ürünü olup hava fazlalık katsayısı ile yakın bağlantılıdır. Bunun yanısıra silindir içerisindeki karışımın homojen bir dağılım göstermeyip silindir içerisinde bazı bölgelerde zengin karışım kısımlarının oluşması da CO emisyonu üretiminde etkindir. Biyodizel yakıtı oksijen içerdiğinden dizel motorunda yanması neticesi daha düşük oranda CO emisyonu üretirler. Bunun ana nedeni, oksijen içeriğine bağlı olarak biyodizel yakıtı kullanımı sonucu iyileşen karışım oluşumu ve yanma sonucu daha fazla oranda karbonun tam yanmasıdır. Ayrıca biyodizelin düşük karbon içeriği de CO emisyonu azalmasında bir etken olarak belirtilebilir. HC emisyonu ise motorlarda yanmamış yakıtın dışarı atılması sonucu oluşur. Biyodizel yakıtı kullanımı ile HC emisyonlarında oluşan düşük değerler belirtilen iyi yanma özelliği sonucudur. Palm yağı biyodizelinin yüksek setan sayısı ve oksijen içeriği, yanma sürecini iyileştirerek CO ve HC emisyonlarında azalma eğilimine yol açtığı belirtilmektedir (He vd., 2024).

Normal şartlardaki yanmada havanın bileşiminde buluna azot yanma reaksiyonuna iştirak etmez ve dışarı N₂ olarak atılır. Ancak motorlarda olduğu gibi yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen yanma işleminde havadaki azot oksijenle reaksiyonu sonucunda NO_x emisyonları ortaya çıkar. Motorda üretilen NO_x emisyonları büyük oranda NO olup atmosfere atıldıklarında diğer azotoksit türlerine dönüşürler. NO_x oluşumu için diğer bir etkende hava-yakıt karışımının HFK oranıdır. Zengin karşıma sahip HFK oranlarında yanma reaksiyonuna giren hava miktarı azalacağı için silindir içi basınç ve sıcaklık azalır ve NO_x üretimi düşer. Çok fakir karışımlarda da yanma hızının azalmasına bağlı olarak yanma sonu sıcaklığı ve NO_x emisyon oluşumu düşecektir. Biyodizel sahip olduğu yüksek setan sayısı nedeniyle yakıt hava karışımının kolay tutuşmasına imkan vermektedir. Kısalan tutuşma gecikmesi nedeniyle silindir içi sıcaklık ve basınç artmaktadır. Ayrıca biyodizelin oksijen içeriği de yanma reaksiyonunu iyileştirmektedir. Tüm bu etkiler nedeniyle genellikle dizel yakıtına oranla biyodizel veya karışım yakıtlarla NO_x emisyon artışı ortaya çıkar. Ayrıca,

Biyodizel yakıtının yapısında bulunan oksijen molekülleri nedeniyle yanma sıcaklığı daha yüksektir ve bu CO, HC ve is emisyonlarını azaltan ancak NO_x emisyonlarını artıran duruma neden olur (Mohammed vd., 2023).

Sıkıştırma zamanı sonunda silindirde bulunan havanın içerisine püskürtülen yakıt içeriğinde bulunan hidrojen molekülleri oksijenle hızlıca reaksiyona girer. Yakıtın diğer içeriği olan karbon ise yeterli oksijen bulamama, yeterli zaman bulamama, düşük sıkıştırma basıncı ve sıcaklığı gibi nedenlerle yanmayarak partikül madde (is) emisyonu olarak ortaya çıkar. Biyodizel yakıtının en belirgin özelliklerinden biri de dizel yakıtı kullanımı ile karşılaştırıldığında düşük is emisyon değerleri göstermesidir. Daha önce ifade edildiği gibi bu durum biyodizelin düşük karbon içeriği, oksijen içeriği ve yüksek setan sayısı gibi avantajlı özelliklerinin yanma reaksiyonunda oluşturduğu iyileşme etkisinden kaynaklanmaktadır.

SO₂ emisyonu, yakıtın kükürt içeriğinden kaynaklanan ve yanma sonucu oluşan bir kirleticidir. Atmosfere atıldığında su buharı ile birleşen SO₂ emisyonu sülfirik asite (H₂SO₄) dönüşür. Biyodizel için EN ve ASTM standartlarında kükürt içeriği çok düşük oranlarla kısıtlanmıştır. Tablo 5' de görüldüğü gibi biyodizelin kükürt içeriği dizel yakıtıyla karşılaştırıldığında son derece düşüktür ve hatta kükürt içermediği belirtilmektedir. Bu durum, insan ve çevre sağlığı göz önüne alındığında biyodizelin dizel motor yakıtı olarak kullanımında en avantajlı yönlerinden biri olarak anlaşılmaktadır. Biyodizel herhangi bir kükürt ve aromatik bileşik içermediğinden herhangi bir kükürtlü bileşen üretmez (Tamiselvan vd, 2017)

Özetle ifade etmek gerekirse; biyodizelin dizel motorlara uygulanması CO, HC, kükürt oksitleri ve PM emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Ancak, NO_x emisyonları biyodizel yakıtlı motorlarda dizel yakıtlı motorlara göre daha yüksek olarak görülmektedir (Doppalapudi vd, 2025).

7. Dizel motor katkı maddesi olarak oksijen içeren yakıtlar

Oksijen içeren alkol yakıtlar ve eter türleri sahip oldukları bazı özellikleri nedeniyle dizel motorlarda özellikle karışım yakıt olarak uygulanma imkanı bulmuştur. Etanol, metanol, propanol, bütanol ve pentanol gibi alkollerin bitkisel yağ, biyodizel ve dizel yakıtına ilavesi ile karışımın viskozitesi, yoğunluğu ve setan sayısı azalmaktadır. Alkollerin düşük viskozitesi, yakıt atomizasyon sürecini iyileştirir ve yakıt enjeksiyonu sırasında yakıt direncini azaltır (Naik vd., 2022) . Tablo 6' da görüldüğü gibi alkol yakıtların hepsi benzer şekilde biyodizel ve dizel yakıtına oranla daha yüksek oksijen içeriği ve buharlaşma gizli ısısına sahiptir. Buna karşın alkol yakıtlar daha düşük

vizkozite, yoğunluk, alt ısıl değer, setan sayısı ve moleküler ağırlık değeri göstermektedir.

Tablo 6: Farklı alkol yakıtların özellikleri (Zaharin vd., 2017)

Özellik	Birim	Metanol	Etanol	Propanol	Bütanol	Pentanol
Kimyasal formül		CH ₃ OH	C ₂ H ₅ OH	C ₃ H ₇ OH	C ₄ H ₉ OH	C ₅ H ₁₁ OH
Moleküler ağırlık	g/mol	32.04	46.07	60.10	74.12	88.15
Oksijen	% wt	49.93	34.73	26.62	21.59	18.15
Yoğunluk	Kg/m ³	791.3	789.4	803.7	809.7	814.8
Kaynama noktası	°C	65	79	97	117	138
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı	°C	385	363	350	345	300
Alt ısıl değer	MJ/kg	20.08	26.83	29.82	32.01	32.16
Buharlaşma gizli ısısı	kJ/kg	1162.64	918.42	727.88	585.40	308.05
Setan sayısı		2	11	12	17	20

Biyodizel yakıtının göreceli olarak yüksek olan vizkozite ve yoğunluğunu alkol yakıt katkısı yaparak azaltmak karışım oluşumu ve yanma özelliklerini iyileştirir. Ancak çok yüksek oranda alkol içeren yakıtların dizel motorlarında kullanımı, düşük setan sayıları nedeniyle tutuşma gecikmesini arttıracığından motor performansında olumsuzluk yapar. Ayrıca, alkollerin düşük setan sayısına sahip olması yanmayı kötüleştirir ve vuruntuya yol açar (Khan vd.,2022).

Buna göre çok düşük setan sayıları nedeniyle dizel motorlarında alkol yakıtları saf olarak kullanımı yerine %10-20 oranında karışım halinde kullanmak en uygun yöntem olarak görülmektedir. Ayrıca dizel motoru yakıt sisteminde bulunan yüksek basınç pompası ve enjektör gibi elemanlara kullanılan yakıtla yağlama ve soğutma yapılır. Çok yüksek oranda alkol yakıt karışımı yakıt kullanmak yakıt geri dönüş miktarını arttıracığından bu parçaların yağlanması kötüleşir.

Alkollerin buharlaşma gizli ısıları dizel yakıtına ve biyodizele göre oldukça yüksektir. Karışım yakıt içinde alkol yakıt katkısı kullanmak yakıtın buharlaşma gizli ısısını yükselteceğinden emme zamanı süresince silindir içi daha soğuk olduğundan volümetrik verim artar. Bu sayede silindire kütleli olarak daha fazla dolgu maddesi almak mümkün olacaktır. Genel olarak alkoller yüksek oranda oksijen içerdiklerinden dizel yakıtı ve biyodizele göre daha düşük alt ısıl değere sahiptir. Bu durum aynı motor gücü elde etmek için kütleli olarak daha fazla yakıt tüketimi olarak ortaya çıkar. Dizel yakıtına katkı olarak alkollerin uygulanması ile ilgili en belirgin sonuç yanmanın iyileşmesi nedeniyle ortaya

çıkan is emisyonunda meydana gelen azalmadır. Bunun yanısıra kükürt içeriği olmayan alkol yakıt katkıları karışımın kükürt oranını azaltacağından sonuçta üretilen SO₂ emisyonu düşecektir.

Oksijen içeren diğer başka tür yakıt katkı maddesi çeşidi de başta dietil eter (DEE) ve dimetil eter (DME) olmak üzere farklı eter türleridir. DEE ve DME yakıt özellikleri Tablo 7’de belirtilmektedir. Eterler, alkol yakıtlara benzer olarak düşük viskozite, yoğunluk, alt ısı değer ve karbon içeriği özelliğine sahiptir. Ayrıca dizel yakıtından farklı olarak oksijen içermektedirler. Alkol yakıtlardan en belirgin farkları yüksek setan sayılarıdır. Tablo 7’ de belirtildiği gibi eterlerin dizel motor yakıtı olarak en avantajlı özelliği dizel yakıtına ve hatta biyodizel göre yüksek setan sayısı değerleridir (DEE: 55-60, DME:125, DF:48). Dizel motorlarında yakıtların tutuşma özelliğini belirten bu değer yüksek olması dikkat çeken katkı maddesi olmalarını sağlamıştır. Ancak düşük viskozite ve yoğunlukları değerleri dizel yakıt sistemindeki hareket eden parçalar üzerinde yağlayıcılık özelliğini azaltır. DME'nin son derece düşük viskozitesi yakıt pompasında veya enjektörde dahili sızıntıya neden olabilir (Kim ve Boehman, 2023). Bu nedenle direk saf yakıt olarak kullanımı yerine dizel yakıtlarıyla düşük oranda katkı yaparak kullanımı ön plana çıkmıştır.

Dietil eter, biyokütle kaynağı olan etanolden üretilen başka bir biyokütle bazlı oksijenli katkı maddesidir. Yüksek uçuculuğa ve yanıcılığa sahip renksiz bir sıvıdır. Çok yüksek setan sayısına, makul sayılabilecek enerji yoğunluğuna, yüksek oksijen içeriğine ve düşük kendi kendine tutuşma sıcaklığına sahiptir. Hem dizel yakıtı hem de biyodizel ile yüksek karışılabilirlik özelliğine sahiptir. Bu yönleriyle, dizel motorda dizel yakıtı veya biyodizel ile birlikte katkı yakıtı olarak kullanılmaya çok uygundur (Imtanan vd., 2015).

Tablo 7: Dietil eter (DEE) ve dimetil eter (DME) özellikleri (Venu ve Madhavan, 2017) (Kim ve Boehman, 2023).

Özellik	Dizel	Jatropha biyodizel	Dietil eter (DEE)	Dimetil Eter (DME)
Yoğunluk, kg/m ³	840	874.3	718	655
Kinematik viskozite, cSt (40 C’de)	2,84	4.34	0.23	0.15
Alt ısı değer, MJ/kg	42.7	42.67	33.90	28.62
Setan sayısı	48	52.7	125	55-60
Parlama noktası, °C	68	130	45	
Buharlaşma gizli ısı, kJ/kg	250	200	350	
Moleküler ağırlık	170	290	74	
Elemental analiz (% wt)				
C	80.12	82.2	64.9	52.2
H	12.2	11.96	13.5	34.8

O ₂		5.74	21.6	13
----------------	--	------	------	----

Sonuçlar

Yenilenebilir alternatif dizel motor yakıtı olarak kullanılabilen biyodizel, özellikle yüksek setan sayısı, oksijen içeriği, yüksek parlama noktası, iyi yağlayıcılık özelliği, çözünebilirliği, yerel kaynaklardan üretilmesi gibi özellikleri ile dikkat çekmektedir. Farklı başlıklar altında yapılan değerlendirmeler sonucunda biyodizel ile ilgili sonuçlar şu şekilde belirtilebilir;

- Mevcut dizel motorlarında çok fazla modifikasyon gerektirmeden kullanılabilen biyodizel yakıtı saf olarak veya dizel yakıtı ile %5, %20 gibi farklı oranlarda karışım halinde uygulanabilmektedir. Üretimi için kullanılan bitkisel yağların zirai olarak üretimi ile son kullanımına kadar geçen süreç değerlendirildiğinde biyodizelin CO₂ salınımı azalması yönünden önemli etkisi olduğu belirtilmektedir. Buna göre biyodizel, karbon nötr bir yakıt olarak ifade edilebilir.

- Biyodizel, mısır, ayçiçek, kolza gibi yenilebilir bitkisel yağların yanı sıra karanja, jatropha gibi yenilemeyen bitkisel yağlardan özellikle transesterifikasyon yoluyla üretilmektedir. Ayrıca atık bitkisel yağların biyodizel üretimi için kullanımı atık sorunu çözümü için bir aşama olmaktadır. Son yıllarda yeni teknolojilerin gelişmesine bağlı olarak algler gibi yeni hammaddelerin kullanımı üzerinde çalışmalar yapılmaktadır.

- Biyodizel üretimi için günümüzde farklı yöntemler uygulanmaktadır. Ancak transesterifikasyon yöntemi en yaygın kullanılan yöntem olarak ön plana çıkmaktadır. Saf bitkisel yağın transesterikasyon yöntemi ile reaksiyonu sonucunda dizel yakıtına yakın setan sayısı, yoğunluk gibi değerler gösteren biyodizel elde edilmektedir.

- Dizel yakıtından farklı olarak kükürt içermeyen biyodizel yakıtının yanması sonucu SO₂ emisyonu üretilmez. Ayrıca biyodizelin oksijen içeriği ve yüksek setan sayısı gibi özellikleri nedeniyle hava-yakıt karışımı ve buna bağlı olarak yanma iyileşmektedir. Bunun sonucu olarak biyodizel kullanımı ile dizel yakıtına oranla CO ve is emisyonları azalmaktadır. Ancak NO_x emisyonlarında belirgin artış olmaktadır.

- Biyodizel yakıtının oksijen içeriği gibi özelliklerinin daha uygun hale getirilmesi için farklı katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bu katkı maddeleri içerisinde, oksijen içeren katkılar karışım olarak veya farklı yöntemlerle

uygulanma olanağı bulmuştur. Oksijen içeren katkı maddeleri olarak etanol, metanol, bütanol gibi farklı oksijen içeren alkoller ön plana çıkmaktadır. Ayrıca dimetil eter ve dietil eter başta olmak üzere farklı eter maddeleri de katkı olarak kullanılmaktadır.

Kaynaklar

- Addison G., Milligan, K.A., Ohlig, S., (2024). Comparative analysis of ZnO and CeO₂ nanoparticle additives for the improvement of hemp biofuels as a sustainable biodiesel alternative: A comprehensive review. *Industrial Crops & Products*, 214, 118480
- Alterazi, Y.S.M., Talib, A.R.A., Yusaf, T., Yu, J., Gires, E., Gafir, M.F.A., Lucas, J., (2022). A review of engine performance and emissions using single and dual biodiesel fuels: Research paths, challenges, motivations and recommendations. *Fuel*, 326, 125072
- Ashraful, A.M., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Fattah, I.M.R., Imtenan, S., Shahir, S.A., Mobarak, H.M., (2014). Production and comparison of fuel properties, engine performance, and emission characteristics of biodiesel from various non-edible vegetable oils: A review. *Energy Conversion and Management*, 80, 202-228
- Azad, A.K., Doppalapudi, A.T., Khan, M.M.K., Hassan, N.M.S., Gudimetla, P., (2023). A landscape review on biodiesel combustion strategies to reduce emission. *Energy Reports*, 9, 4413-4436
- Doppalapudi A.T., Azad, A.K., Nabi, Md., Rasul, M.G., Khan, M.M.K., (2025). Pragmatic investigation of the effect of ether additives on biodiesel combustion to reduce NO_x and other harmful emissions. *Fuel*, 382, 133712
- Gaur, R.K., Goyal, R., (2022). A review: Effect on performance and emission characteristics of waste cooking oil Biodiesel- diesel blends on IC engine. *Materials Today: Proceedings*, 63, 643-646
- Ghosh, N., Halder, G., (2022). Current progress and perspective of heterogeneous nanocatalytic transesterification towards biodiesel production from edible and inedible feedstock: A review. *Energy Conversion and Management*, 270, 116292
- Padmanabha, H S.A., Mohanty, D.K., (2024). Enhancement of combustion, performance and emission characteristics of diesel engines fuelled with jatropha-karanja biodiesel using EGM and TGME as additive. *Energy*, 300, 131523
- Hasan, M.M., Rahman, M.M., (2017). Performance and emission characteristics of biodiesel–diesel blend and environmental and economic impacts of biodiesel production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 938-948
- He, L., Li, Y., Min, Y., Yoong, J., Chen, S., Jiao, J., Li, Z., Zhu, L., Zhang, S., Wu, Y., (2024). Tailpipe emissions and fuel consumption of a heavy-duty

- diesel vehicle using palm oil biodiesel blended fuels. *Science of the Total Environment*, 955, 177048
- Imtenan, S., Masjuki, H.H., Varman, M., Fattah, I.M.R., Sajjad, H., Arbab, M.I., (2015). Effect of n-butanol and diethyl ether as oxygenated additives on combustion–emission–performance characteristics of a multiple cylinder diesel engine fuelled with diesel–jatropha biodiesel blend. *Energy Conversion and Management*, 94, 84-94
- Ismaeel, H.Kh., Albayati, T.M., Dhahad, H.A., Al-Suldani, F.T., Salih, I.K., Saady, N.M.C., Zendejboudi, S., (2024). Strategies for biodiesel production with the role of reactor technologies: A comprehensive review. *Chemical Engineering & Processing Intensification*, 200, 109767
- Kale, B.N., Patle, S.D., (2022). State of art review of algal biodiesel and its blends influence on performance and emission characteristics of compression ignition engine. *Cleaner Engineering and Technology*, 7, 100431
- Khalaf, M., Xuan, T., Abdel-Fadeel, W.A., Mustafa, H.M.M., Abdelhady, S., Esmail, M.F.C., (2024). A comparative study of diesel engine fueled by Jatropha and Castor biodiesel: Performance, emissions, and sustainability assessment. *Process Safety and Environmental Protection*, 188, 453-466
- Khan, Md., Sharma, R.P., Kadian A.K., Hasnain, S.M.M., (2022). An assessment of alcohol inclusion in various combinations of biodiesel diesel on the performance and exhaust emission of modern-day compression ignition engines– A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 5, 81-98
- Kim, T., Boehman, A.L., (2023). Development of novel dimethyl ether – Glycerol blends with improved viscosity and miscibility for potential compression-ignition engine application. *Fuel*, 346, 128301
- Lee, C.C., Tran, M., Tan, B.T., Scribano, G., Chong, C.T., (2021). A comprehensive review on the effects of additives on fundamental combustion characteristics and pollutant formation of biodiesel and ethanol. *Fuel*, 288, 119749
- Malik, M.A.I., Zeeshan, S., Khubaib, M., Ikram, A., Hussain, F., Yassin, H., Qazi, A., (2024). A review of major trends, opportunities, and technical challenges in biodiesel production from waste sources. *Eney Conversion and Management: X*, 23, 100675
- Mohammed, A.S., Atnaw, S.M., Ramaya, A.V., Alemayehu, G., (2023). A comprehensive review on the effect of ethers, antioxidants, and cetane improver additives on biodiesel-diesel blend in CI engine performance and emission characteristics. *Journal of the Energy Institute*, 108, 101227

- Naik, B.D., Meivelu, U., Thangarasu, V., Annamalai, S., Sivasankaralingam, V., (2022). Experimental and empirical analysis of a diesel engine fuelled with ternary blends of diesel, waste cooking sunflower oil biodiesel and diethyl ether. *Fuel*, 320, 123961
- Ong, H.C., Silitonga, A.S., Masjuki, H.H., Mahlia, T.M.I., Chong, W.T., Boosroh, M.H., (2013) . Production and comparative fuel properties of biodiesel from non-edible oils: *Jatropha curcas*, *Sterculia foetida* and *Ceiba pentandra*. *Energy Conversion and Management*, 73, 245-255
- Osman, W.N.A.W., Rosli, M.H., Mazli, W.N.A., Samsuri, S., (2024). Comparative review of biodiesel production and purification. *Carbon Capture Science & Technology*, 13, 100264
- Pullen, J., Saeed, K., (2014). Factors affecting biodiesel engine performance and exhaust emissions e Part I: Review. *Energy*, 72, 1-16
- Pydimalla, M., Husaini, S., Kadire, A., Verma, R.K., (2023). Sustainable biodiesel: A comprehensive review on feedstock, production methods, applications, challenges and opportunities. *Materials Today: Proceedings*, 92, 458-464
- Sakthivel, R., Ramesh, K., Purnachandran, R., Shameer, P.M., (2018). A review on the properties, performance and emission aspects of the third generation biodiesels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2970-2992
- Shameer, P.M., Ramesh, K., Sakthivel, R., Purnachandran, R., (2017). Effect of fuel injection parameters on emission characteristics of diesel engines operating on various biodiesel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 1267-1281
- Singh, S.P., Singh, D., (2010). Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 200-216
- Tamilselvan, P., Nallusamy, N., Rajkumar, S., (2017). A comprehensive review on performance, combustion and emission characteristics of biodiesel fuelled diesel engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1134-1159
- Venu H., Madhavan, V., (2017). Influence of diethyl ether (DEE) addition in ethanol-biodiesel-diesel (EBD) and methanol-biodiesel-diesel (MBD) blends in a diesel engine. *Fuel*, 189, 377-390
- Zaharin, M.S.M., Abdullah, N.R., Najafi, G., Sharudin, H., Yusaf, T., (2017) . Effects of physicochemical properties of biodiesel fuel blends with

alcohol on diesel engine performance and exhaust emissions: A review.
Renewable and Sustainable Energy Reviews, 79, 475-493.

6. Bölüm

Gıdalarda pH'nın Önemi: Et Teknolojisi Örneği

Abdülkadir DİLBER¹,
Süleyman GÖKMEN^{1*}

¹ Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Karaman, Türkiye

*sorumlu yazar: sugokmen42@hotmail.com

Gıdalarda pH'nın Önemi: Et Teknolojisi Örneği

ÖZET

Gıdaların muhafazasında ve raf ömrünün belirlenmesinde farklı tekniklerden yararlanılmaktadır. pH değeri nin tespiti bu teknikler arasındadır. Gıdaların mikrobiyal kalite değışiminin saptanması, duyu sal kalitesinin değışmesi, raf ömrünün tespit edilmesi, fermantasyon ve olgunlaştırma süresinin hesaplanması gibi önemli işlem aşamalarında pH takibinin önemi büyüktür. Bu nedenle bu araştırmada et ve et ürünleri örnek alınarak pH'nın gıda teknolojisindeki önemi hakkında bilgi verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: gıda, pH, kalite özellikleri

1.Giriş

Tüketicilerin yüksek kaliteli, minimum düzeyde işlenmiş, katkısız, raf ömrü uzun, kullanışlı ve güvenli gıda ürünleri talebini karşılamak için gıda endüstrisinde yoğun çalışmalar yapılmaktadır (Andres-Bello ve ark.,2013). Dolayısıyla çiftlikten çatala, tarladan tabağa kadar, bir gıda hammaddesinin son ürün haline dönüşene dek geçirdiği her aşamada gerekli analizlerin yapılarak, kalite ve gıda güvenliği kriterlerinin sağlanması gerekmektedir. Bu amaçla bir gıdanın ya da hammaddesinin toplam asitlik ve alkalilik özelliklerinin saptanması, temel uygulamalar arasında önemli bir yere sahiptir (Crespo ve ark., 2012). Gıda sektöründe kalite kriteri olarak daha çok “asitlik” kavramı önemlidir(Tyl ve ark., 2017).

Gıdanın yapısındaki bileşenler arasında biyokimyasal etkileşimler (denatürasyon, jelatinizasyon, enzimatik ve Maillard reaksiyonu gibi enzimatik olmayan reaksiyonlar, mikrobiyal faaliyet, renk, aroma ve yapısal değişiklikler vb.) söz konusudur (Andres-Bello ve ark.,2013; Stippl ve ark;2004). Bu etkileşimlerden faydalanılarak bir gıda hammaddesinin ya da son ürünün pH gibi kriterlerindeki değişimin ölçülmesi, gıdanın güvenliği ve kalitesi hakkında önemli ve belli ölçülerde bilgi sağlayabilmektedir (Andres-Bello ve ark.,2013).

Bazı gıdalar için protein ekstraksiyonu ve denatürasyon derecelerinin saptanması için asitlik ölçümü yapılmaktadır. Çünkü proteinlerin çöktüğü ve çözündüğü pH değerleri bilindiği takdirde, asitlik bu pH aralığına ayarlanabilmektedir. Bu özellik özellikle et ürünleri için önemlidir. Et ve et ürünlerinin pH'ı 4.5-6.0 arasında değişmektedir (Aksoy, 2021).

pH, et teknolojisinde etin kalitesi ve işlenmesi üzerindeki etkisi nedeniyle kritik bir parametre olarak kabul edilir. pH'nın etin biyokimyasal ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkisi, kas dokusunun enerji metabolizması, su tutma kapasitesi, etin rengi, yumuşaklığı ve raf ömrü gibi birçok faktörü doğrudan etkiler.

Et teknolojisi, hayvan kesiminden son tüketiciye ulaşan süreç boyunca etin kalite, güvenlik ve besin değerini korumayı hedefleyen bir dizi uygulamayı içerir. Bu süreçte pH değeri, etin fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkileyen kritik bir faktördür. Etin pH değeri, hem hayvan kesiminden sonra kas dokusundaki biyokimyasal değişiklikleri hem de etin raf ömrünü, renk, yumuşaklık ve lezzet gibi kalite özelliklerini doğrudan etkiler (Aberle ve ark., 2001).

Bu çalışmada pH değerinin kusurlu etler, etin kas dokusu, rengi, fonksiyonel özellikleri, duyu ve mikrobiyal kalitesi, bozulmaya ve raf ömrü üzerine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca günümüzde pH tahmininde kullanılan yöntemler hakkında bilgi verilmiştir.

2. Kas Dokusu ve pH İlişkisi:

Hayvanın kesiminden sonra kas dokusunda meydana gelen biyokimyasal değişiklikler, etin pH değerini belirleyen en önemli süreçlerden biridir. Kesim sonrası kas dokusunda oksijenin yokluğunda anaerobik metabolizma devreye girer ve glikojen laktik aside dönüştürülür. Bu dönüşüm, kas içi pH değerinin düşmesine yol açar ve kas dokusu eti haline getirir. Normal koşullarda, sağlıklı bir hayvandan elde edilen etin pH değeri kesimden birkaç saat sonra yaklaşık 5.4 ile 5.8 arasında stabilize olur. Bu pH aralığı, etin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin ideal seviyede olmasını sağlar (Aberle ve ark., 2001).

Ancak, stres altında olan hayvanlarda, kesim öncesi kaslarda glikojen depolarının tükenmesi nedeniyle yeterli laktik asit üretilemez. Bu durum, etin pH değerinin yüksek kalmasına ($pH > 6.0$) neden olur ve bu tür etler koyu, sert ve kuru (DFD: Dark, Firm, Dry) olarak tanımlanır. DFD eti, düşük su tutma kapasitesi ve mikrobiyal stabilite sorunları nedeniyle ticari olarak daha az tercih edilir (Lawrie & Ledward, 2006).

2.1. Kasın Kesim Sonrası Metabolik Değişimleri ve pH Düşüşü

Kas dokusunun pH'ı, kesim sonrası en önemli parametrelerden biridir. Hayvan kesildikten sonra oksijen temini sona erer ve kaslar anaerobik solunuma geçer. Bu süreçte glikojen laktik aside dönüşür ve bu da kas pH'ının düşmesine neden olur. Normalde, kasın pH'ı yaklaşık 7,2'den başlar ve 24 saat içinde 5,4-5,8 civarına düşer (Honikel, 1998). Bu süreç, etin son kalite özelliklerini belirler.

2.2. pH Seviyesi ve Et Kalitesi

Kas dokusundaki pH, etin renk, su tutma kapasitesi ve tekstürü üzerinde doğrudan etkilidir. Eğer pH çok düşük veya çok yüksek olursa et kalitesi olumsuz etkilenir:

Düşük pH (Pale, Soft, Exudative - PSE): pH'nın hızla düşmesi (5,5'in altına) ve glikojenin fazlaca birikmesi sonucu ortaya çıkar. Bu durumda et, aşırı su kaybederek yumuşak ve sulu bir yapıya bürünür. PSE durumunda etin protein yapısı denatüre olur ve su tutma kapasitesi azalır (Bendall & Swatland, 1988).

Yüksek pH (Dark, Firm, Dry - DFD): Hayvanın kesim öncesinde stres yaşaması sonucu kaslardaki glikojen depoları azalır. Bu durum, kesim sonrası yeterince laktik asit üretilmemesine ve pH'nın yüksek (6,0 veya üzeri) kalmasına neden olur. DFD et genellikle koyu renkte, sert ve kuru olur, su tutma kapasitesi yüksektir, ancak pişirme sırasında sertleşir ve lezzet kalitesi düşüktür (Huff-Lonergan & Lonergan, 2005).

2.3. Kas Proteinlerinin pH ile İlişkisi

pH değişimleri, kas proteinlerinin denatürasyonu ve çözünürlüğü üzerinde doğrudan etkili olur. Kesim sonrası hızla düşen pH, kas proteinlerinin yapısını

değiştirir. Özellikle miyofibrillerin su tutma kapasitesinde belirgin azalmalar görülür. Kas proteinlerinin denatüre olması, suyu bağlama kapasitelerini kaybetmelerine neden olur. Bu etki özellikle PSE durumunda açıkça görülür (Offer & Trinick, 1983).

2.4. Soğutma ve pH Etkileşimi

Kesim sonrası etin soğutulma hızı da pH seviyesiyle doğrudan ilişkilidir. Hızlı bir soğutma, kasların kısılmasına ve sertleşmesine yol açabilir. Soğutma sırasında pH'nın kontrolü, etin optimum yumuşaklık ve su tutma kapasitesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Uygun soğutma yöntemleri, kas dokusunun optimal pH aralığında kalmasını sağlayarak etin kalitesini iyileştirir (Lawrie & Ledward, 2006).

3. Etin Rengi Üzerindeki Etkisi:

Etin rengi, tüketicilerin kalite algısını ve satın alma davranışlarını doğrudan etkileyen bir faktördür. pH değeri, etin rengini belirleyen başlıca unsurlardan biridir. Etin pH değeri düşük olduğunda (5.4-5.8 aralığında), kas proteinleri suyu bağlama yeteneğini kaybeder ve et yüzeyinde ışık yansımalarını artıran açık kırmızı bir renk oluşur. Bu renk, tüketiciler tarafından genellikle taze ve kaliteli olarak algılanır.

Öte yandan, yüksek pH değerine sahip ($pH > 6.0$) DFD eti, daha koyu ve mat bir renge sahip olur. Bu durum, kas hücrelerinde kalan suyun proteinlere sıkıca bağlanmasına ve yüzeyde ışığın daha az yansımaya neden olur. Sonuç olarak, etin koyu bir renk alması, tüketicilerin bu eti bayat veya düşük kaliteli olarak algılamasına yol açar (Honikel, 1998).

3.1. Miyoglobin ve Et Rengi İlişkisi

Etin kırmızı rengini belirleyen temel pigment miyoglobindir. Miyoglobin, kaslarda oksijen taşıyan bir proteindir ve farklı formları etin rengini belirler. Kas pH'ı düştükçe miyoglobinin oksidasyon durumu değişir ve bu durum etin rengini etkiler. Düşük pH seviyelerinde (yaklaşık 5,5), miyoglobin oksidasyona daha duyarlı hale gelir ve parlak kırmızı rengini korur. Ancak pH yükseldikçe (6,0 ve üzeri), miyoglobinin oksidasyonu daha hızlı gerçekleşir ve etin rengi koyulaşır (Ramanathan ve ark ., 2020).

3.2. Düşük pH: PSE (Pale, Soft, Exudative) Etin Renk Özellikleri

Düşük pH seviyeleri, PSE (Pale, Soft, Exudative) et durumuna yol açar. PSE etinde pH'nın hızla düşmesi (5,5'in altına) etin rengini etkileyerek soluk, pembe-beyaz bir görünüm oluşturur. Bu durum, kas proteinlerinin denatüre olması ve su kaybıyla ilgilidir. Su tutma kapasitesinin azalması, etin yüzeyinden daha fazla ışık yansımaya neden olur ve bu da etin solgun görünmesine yol açar (Adzitey & Nurul, 2011).

3.3. Yüksek pH: DFD (Dark, Firm, Dry) Etin Renk Özellikleri

Yüksek pH (>6,0) seviyeleri, DFD (Dark, Firm, Dry) et durumuna yol açar. Yüksek pH, kasın yeterince laktik asit üretmemesi ve kas pH'ının kesim sonrası hızla düşmemesi sonucu meydana gelir. DFD et, koyu kırmızı veya mor renkte olur. Yüksek pH, kas proteinlerinin daha fazla su tutmasına neden olur, bu da ışığın yüzeyden daha az yansımaya yol açar ve etin daha koyu görünmesine neden olur (Hughes ve ark., 2017).

3.4. pH'nın Oksijene Bağlı Renk Değişimleri

Kas dokusunda pH seviyesinin düşmesi, oksijenin bağlanma kapasitesini ve etin rengini etkiler. Normal pH aralığında (5,5-5,8), et daha parlak kırmızı bir renk alır çünkü miyogloblin, oksijenle birleşerek oksimiyogloblin (parlak kırmızı pigment) oluşturur. Ancak pH yüksek olduğunda, kas yüzeyindeki oksijen konsantrasyonu düşer ve deoksimiyogloblin (koyu mor pigment) birikerek etin rengini koyulaştırır (Mancini & Hunt, 2005).

3.5. Soğutma ve pH'nın Et Rengindeki Rolü

Etin soğutulma süreci de pH ile etkileşim içinde olup et rengini etkiler. Uygun bir pH seviyesi (5,5-5,8) ve kontrollü soğutma, etin parlak kırmızı renkte kalmasını sağlar. Ancak pH'nın hızla düşmesi durumunda (PSE et), et solgun ve pembe bir renk alabilir. Aksi şekilde, yüksek pH seviyeleri (DFD et) etin soğutulması sırasında renginin koyulaşmasına neden olur (Lawrie & Ledward, 2006).

4. Su Tutma Kapasitesi ve pH:

Etin su tutma kapasitesi (WHC: Water Holding Capacity), işleme sırasında su kaybının minimize edilmesi açısından önemlidir. pH değeri, etin su tutma kapasitesini doğrudan etkiler. Özellikle işlenmiş et ürünlerinde, su tutma kapasitesi, nihai ürünün kalitesini belirleyen önemli bir faktördür (Huff-Lonergan & Lonergan, 2005).

Etin su tutma kapasitesi, etin işlenmesi sırasında ve pişirme sürecinde ne kadar su kaybedeceğini belirler. Bu özellik, hem ekonomik açıdan hem de tüketici memnuniyeti açısından büyük önem taşır. Düşük pH değerine sahip etlerde, kas proteinleri denatüre olur ve su bağlama kapasiteleri azalır. Bu durum, etin su kaybetmesine ve pişirme sırasında küçülmesine neden olur. Aynı zamanda, düşük su tutma kapasitesine sahip etler kuru, sert ve düşük kaliteli bir yapı sergiler (Huff-Lonergan & Lonergan, 2005).

Yüksek pH değerine sahip DFD etleri ise, yüksek su tutma kapasitesi nedeniyle yumuşak ve sulu bir yapı sergiler. Ancak, bu tür etlerin mikrobiyal büyümeye daha yatkın olması ve renginin tüketici tarafından cazip bulunmaması gibi dezavantajları vardır.

4.1. pH ve Su Tutma Kapasitesi Arasındaki Temel İlişki

Kesim sonrası kaslarda pH düşüşü, su tutma kapasitesini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Normal bir pH aralığında (yaklaşık 5,5-5,8), etin su tutma kapasitesi yüksektir. Düşük pH seviyeleri, kas proteinlerinin yapısının değişmesine ve suyu daha iyi tutmalarına yardımcı olur. Yüksek pH seviyeleri ise, etin su tutma kapasitesini azaltır ve daha fazla su kaybına neden olur (Huff-Lonergan & Lonergan, 2005).

4.2. Kas Proteinlerinin pH ile Etkileşimi

pH düzeyleri, kas proteinlerinin yapısını ve işlevini etkiler. Düşük pH seviyeleri, kas proteinlerinin denatüre olmasına ve bu proteinlerin daha iyi su tutmasına yol açar. Bu denatürasyon, etin suyu bağlama kapasitesini artırır. Öte yandan, yüksek pH seviyeleri, proteinlerin su tutma kapasitesini azaltır. Bu durum, etin suyu kaybetmesine ve daha kuru bir doku yapısına neden olur (Offer & Trinick, 1983).

4.3. Düşük pH ve PSE Et

Düşük pH seviyeleri (5,5'in altı), PSE (Pale, Soft, Exudative) etin oluşmasına neden olur. PSE et, genellikle yumuşak ve solgun görünür. Bu durumda, etin su tutma kapasitesi azalır ve pişirme sırasında su kaybı artar. Düşük pH, kas proteinlerinin denatürasyonunu artırarak etin daha az su tutmasına neden olur (Adzitey & Nurul, 2011).

4.4. Yüksek pH ve DFD Et

Yüksek pH seviyeleri (>6,0), DFD (Dark, Firm, Dry) etin oluşumuna yol açar. Bu durumda, etin su tutma kapasitesi artar, ancak etin kalitesi düşük olur. DFD et, genellikle koyu renkte ve sert yapıda olur. Yüksek pH, kas proteinlerinin su tutma kapasitesini artırabilir, ancak etin kalitesi, lezzeti ve doku yapısı üzerinde olumsuz etkilere neden olur (Hughes ve ark., 2017).

4.5. Kesim ve Soğutma Süreci

Kesim sonrası soğutma süreci, etin pH ve su tutma kapasitesi üzerindeki etkisini artırır. Uygun soğutma, kasların pH seviyesini kontrol altında tutarak su tutma kapasitesinin korunmasına yardımcı olur. Kesim sonrası hızlı bir pH düşüşü, etin daha fazla su kaybetmesine neden olurken, kontrollü soğutma, etin su tutma kapasitesini artırabilir (Lawrie & Ledward, 2006).

5. Raf Ömrü ve Mikrobiyal Stabilite:

Etin pH değeri, mikrobiyal büyüme hızını ve dolayısıyla raf ömrünü önemli ölçüde etkiler. Düşük pH, çoğu patojen ve bozulmaya neden olan mikroorganizmalar için elverişsiz bir ortam oluşturur ve böylece etin raf ömrünü uzatır. Laktik asit üretimi sonucu düşük pH'ya sahip etlerde, mikrobiyal çoğalma engellenir ve etin raf ömrü artar. Ancak, yüksek pH değerine sahip

etlerde, mikrobiyal aktivite daha hızlı gerçekleşir ve bu da etin daha çabuk bozulmasına yol açar (Zamora & Veum, 2011).

Yüksek pH değerine sahip etlerde, bakteriyel büyüme hızlanır ve bu durum etin çabuk bozulmasına, kötü koku oluşmasına ve potansiyel sağlık risklerine neden olabilir. Bu nedenle, etin pH değerinin kontrol altında tutulması, hem mikrobiyal güvenliği sağlamak hem de raf ömrünü uzatmak için hayati öneme sahiptir.

5.1. pH'nın Mikrobiyal Stabilite Üzerindeki Etkisi

pH, etin içinde gelişebilecek mikroorganizmaların türlerini ve büyüme hızlarını belirler. Genel olarak, pH 5,0-5,5 aralığındaki etlerde, mikrobiyal gelişim için uygun bir ortam oluşur. Bu pH aralığında, bazı zararlı bakterilerin (örneğin *Escherichia coli*, *Salmonella*) büyüme hızı artarken, faydalı bakterilerin (örneğin laktik asit bakterileri) kontrolsüz çoğalması engellenir (Ferguson ve ark., 2014).

5.2. Düşük pH ve Mikrobiyal Gelişim

Düşük pH seviyeleri, mikrobiyal büyümeyi inhibe etme potansiyeline sahiptir. Özellikle, pH'nın 5,0'ın altına düşmesi, patojenik mikroorganizmaların çoğalmasını zorlaştırır. Bununla birlikte, düşük pH seviyeleri, bazı bakteri türleri için (özellikle asidofilik olanlar) daha uygun olabilir. Bu durum, etin kalitesini etkileyen mikrobiyal flora değişikliklerine neden olabilir (Aaslyng ve ark., 2003).

5.3. Yüksek pH ve Mikrobiyal Gelişim

Yüksek pH seviyeleri (6,0 ve üzeri), etin mikrobiyal stabilitesini olumsuz yönde etkiler. Yüksek pH, zararlı mikroorganizmaların büyümesine elverişli bir ortam sağlar ve bu da etin raf ömrünü kısaltır. DFD etlerinde (Dark, Firm, Dry) görülen yüksek pH, çeşitli patojenlerin ve bozulma bakterilerinin gelişiminde bir artışa yol açabilir (Hughes ve ark., 2017).

5.4. pH ve Etin Raf Ömrü

pH'nın etkisi, etin raf ömrü üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Düşük pH seviyeleri, etin oksidatif bozulmasını yavaşlatarak raf ömrünü uzatabilir. Aynı zamanda, düşük pH'lı etlerde mikrobiyal yük azalır ve bu da etin daha uzun süre taze kalmasına yardımcı olur. Örneğin, pH 5,5 altında olan etler, genellikle daha uzun bir raf ömrüne sahiptir (Lawrie & Ledward, 2006).

5.5. Asidifikasyon ve Mikrobiyal Kontrol

Asidifikasyon, etin pH'sını düşürerek mikrobiyal stabiliteyi artırma potansiyeline sahiptir. Laktik asit bakterileri, etin pH'ını düşürerek zararlı mikroorganizmaların büyümesini inhibe eder. Bu, etin raf ömrünü uzatmak ve kalitesini korumak için etkili bir yöntemdir (Mancini & Hunt, 2005).

6. İşlenmiş Et Ürünlerinde pH'nin Önemi:

İşlenmiş et ürünlerinin kalitesi, pH kontrolüne bağlı olarak büyük ölçüde değişir. Salam, sucuk gibi fermente ürünlerde pH değeri, fermentasyon sürecinin başarısını belirleyen kritik bir parametredir. Fermentasyon sırasında pH'nın düşmesi, istenen lezzet profilinin oluşmasına ve patojen mikroorganizmaların inhibe edilmesine katkı sağlar. Düşük pH, ayrıca ürünün sertlik ve dilimlenebilirlik gibi fiziksel özelliklerini de iyileştirir (Toldrá, 2002).

Fermente et ürünlerinde, pH'nın hedeflenen seviyelerde (genellikle 4.6-5.0) tutulması, ürünün mikrobiyal güvenliğini sağlamanın yanı sıra, ürünün raf ömrünü ve tüketici beğenisini artırır. Bunun yanı sıra, pH değeri, etin emülsiyon stabilitesi ve bağlayıcı özellikleri üzerinde de etkili olup, işlenmiş et ürünlerinin nihai kalitesini doğrudan etkiler.

6.1. Mikrobiyal Kontrol

pH, işlenmiş et ürünlerinde mikrobiyal stabiliteyi etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Düşük pH seviyeleri (genellikle 5,0-5,5 arası), çoğu patojenik mikroorganizmanın büyümesini inhibe ederken, ürünlerin raf ömrünü uzatır. Bu durum, özellikle nitrit veya laktik asit gibi asidik bileşenler eklenerek sağlanabilir. Örneğin, işlenmiş etlerdeki pH'nın kontrolü, *Listeria monocytogenes* ve *Salmonella* gibi zararlı bakterilerin büyümesini önleyebilir (Böcker ve ark., 2015).

6.2. Lezzet ve Doku Gelişimi

pH, işlenmiş et ürünlerinin lezzet ve doku özelliklerini de etkiler. Düşük pH, etin su tutma kapasitesini artırarak daha lezzetli ve yumuşak bir doku sağlar. Örneğin, sosis ve pastırma gibi ürünlerde, pH'nın düşürülmesi, ürünlerin daha nemli ve yumuşak olmasını sağlarken, yüksek pH, sert ve kuru bir dokuya yol açabilir (Lyon ve ark., 1995).

6.3. Raf Ömrü Üzerindeki Etkiler

pH'nın kontrolü, işlenmiş et ürünlerinin raf ömrünü önemli ölçüde etkiler. Düşük pH seviyeleri, mikrobiyal bozulmayı yavaşlatır ve ürünlerin daha uzun süre taze kalmasına yardımcı olur. Özellikle fermente edilmiş et ürünlerinde, pH'nın düşürülmesi, raf ömrünü uzatmanın yanı sıra ürünlerin kalitesini artırır (Bhat ve ark., 2016).

6.4. Renk ve Görsel Kalite

pH, işlenmiş et ürünlerinin rengini etkileyen bir diğer önemli faktördür. Düşük pH, etteki miyoglobinin oksidasyonunu artırarak parlak kırmızı bir renk elde edilmesine yardımcı olur. Bu durum, tüketici algısını ve satın alma kararlarını etkileyebilir. Örneğin, pastırma veya sucuk gibi işlenmiş et ürünlerinde, düşük pH seviyeleri daha çekici bir görünüm sağlar (Mancini & Hunt, 2005).

6.5. Asidifikasyon ve Fermentasyon

Asidifikasyon, işlenmiş et ürünlerinin pH seviyesini kontrol etmede önemli bir yöntemdir. Fermente edilmiş ürünlerde, laktik asit bakterileri pH'yı düşürerek hem lezzeti hem de mikrobiyal stabiliteyi artırır. Bu durum, ürünlerin daha uzun süre dayanmasını sağlar ve istenmeyen mikroorganizmaların gelişimini engeller (Cocconcelli et al., 2016).

7. Gıdaların pH takibinde yeni gelişmeler:

Son yıllarda yapay zeka kullanımıyla ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle önemli parametrelerin tahmin edilmesinde yapay sinir ağları ve modellemeler sıklıkla kullanılmaktadır (Akkoyunlu et al., 2015; Pusat et al., 2016; Akkoyunlu et al., 2018; Akkoyunlu et al., 2020). Gıdalarda pH takibinin önemli olduğu göz önüne alındığında bu yöntemlerle ilgili çalışmaların gıdaların asitlik ve pH değerlerine yoğunlaşması gerekmektedir.

7. Sonuç

pH, etin kalitesini, güvenliğini ve işlenebilirliğini belirleyen kritik bir faktördür. Etin biyokimyasal yapısını etkileyen pH, etin rengi, su tutma kapasitesi, mikrobiyal stabilitesi ve son ürün kalitesi üzerinde doğrudan etkilidir. Et teknolojisinde pH kontrolü, ürün kalitesinin optimize edilmesi, mikrobiyal risklerin azaltılması ve tüketici memnuniyetinin artırılması açısından vazgeçilmez bir uygulamadır. Bu nedenle, et endüstrisinde pH'nın dikkatlice izlenmesi ve kontrol edilmesi, kaliteli ve güvenli et ürünlerinin üretilmesi için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle etin pH değerinin tahmini etin kalitesinin sürdürülebilirliği açısından önemlidir. Bu kapsamda etteki pH takibinin makine öğrenme yöntemiyle belirlenmesi hem işlem kolaylığı sağlayacak hem de eti et ürününe işlemede önemli bir kriter olacaktır.

Et teknolojisinde pH, etin kalitesini ve güvenliğini doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. pH'nın kontrolü, etin renk, su tutma kapasitesi, mikrobiyal stabilite ve nihai ürünün kalitesi üzerinde belirleyici bir rol oynar. Etin işlenmesi sırasında pH'nın optimize edilmesi, ürünün pazarlanabilirliğini ve tüketici memnuniyetini artırır. Bu nedenle, et endüstrisinde pH kontrolü, hem kalite yönetimi hem de ürün güvenliği açısından temel bir uygulama olarak görülmelidir. Tüm bu nedenlerle etlerin pH değerinin takibinin gerekli olduğu ve et ile et ürünlerinde sürdürülebilir kalitelerinin sağlanmasında önemli bir parametre olduğunun sonucuna varılmıştır.

Kaynakça

- Aaslyng, M. D., et al. (2003). Effect of pH and temperature on the growth of *Lactobacillus sakei* in meat. *Meat Science*, 65(4), 1245-1251.
- Aberle, E. D., Forrest, J. C., Gerrard, D. E., & Mills, E. W. (2001). *Principles of Meat Science*. 4th ed. Dubuque, IA: Kendall/Hunt Publishing Company.
- Adzitey, F., & Nurul, H. (2011). Pale, soft, and exudative (PSE) and dark, firm, and dry (DFD) meats: Causes and measures to reduce these incidences— A mini review. *International Food Research Journal*, 18(1), 11-20.
- Akkoyunlu, M. C., Pekel, E., Akkoyunlu, M. T., & Pusat, S. (2020). Using hybridized ANN-GA prediction method for DOE performed drying experiments. *Drying Technology*, 38(11), 1393-1399.
- Akkoyunlu, M. T., Akkoyunlu, M. C., Pusat, S., & Özkan, C. (2015). Prediction of accurate values for outliers in coal drying experiments. *Arabian journal for science and engineering*, 40, 2721-2727.
- Akkoyunlu, M. T., Pekel, E., Akkoyunlu, M. C., Pusat, S., Özkan, C., & Kara, S. S. (2018). Determination of effective parameters for coal moisture content determination using a 'design of experiment' method. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 38(8), 443-450.
- Aksoy, A., (2021). Gıdalarda pH Ölçümünün Önemi. *Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. 4/2: 193-216.
- Andres-Bello, A., Barreto-Palacios, V., Garcia-Segovia, P., Mir-Bel, J. ve Martinez- Monzo, J., (2013). Effect of pH on color and texture of food products, *Food Engineering Reviews*, 5(3), 158-170.
- Bendall, J. R., & Swatland, H. J. (1988). A review of the relationships between pH and physical aspects of meat. *Meat Science*, 24(2), 85-102.
- Bhat, Z. F., et al. (2016). The role of pH in the processing and preservation of meat products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(1), 16-30.
- Böcker, U., et al. (2015). Impact of pH on microbial safety and quality of processed meat products. *Meat Science*, 109, 1-8.
- Cocconcelli, P. S., et al. (2016). Role of lactic acid bacteria in the production of fermented meat products. *Food Control*, 64, 167-173.
- Crespo, G.A., Afshar, M.G. ve Bakker, E., (2012). Direct detection of acidity, alkalinity, and pH with membrane electrodes, *Analytical Chemistry*, 84, 10165-10169.
- Ferguson, L. R., et al. (2014). Influence of pH on the microbial safety and quality of fresh meats. *Meat Science*, 96(3), 1188-1194.
- Honikel, K. O. (1998). Reference Methods for the Assessment of Physical Characteristics of Meat. *Meat Science*, 49(4), 447-457.

- Huff-Lonergan, E., & Lonergan, S. M. (2005). Mechanisms of Water-Holding Capacity of Meat: The Role of Postmortem Biochemical and Structural Changes. *Meat Science*, 71(1), 194-204.
- Hughes, J. M., Oiseth, S. K., Purslow, P. P., & Warner, R. D. (2017). A structural approach to understanding the interactions between colour, water-holding capacity and tenderness. *Meat Science*, 132, 1-12.
- Lawrie, R. A., & Ledward, D. A. (2006). *Lawrie's Meat Science*. 7th ed. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Lyon, B. G., et al. (1995). Quality of processed meat products: A review. *Journal of Food Science*, 60(5), 1012-1018.
- Mancini, R. A., & Hunt, M. C. (2005). Current research in meat color. *Meat Science*, 71(1), 100-121.
- Offer, G., & Trinick, J. (1983). On the mechanism of water holding in meat: The swelling and shrinking of myofibrils. *Meat Science*, 8(4), 245-281.
- Pusat, S., Akkoyunlu, M. T., Pekel, E., Akkoyunlu, M. C., Özkan, C., & Kara, S. S. (2016). Estimation of coal moisture content in convective drying process using ANFIS. *Fuel processing technology*, 147, 12-17.
- Ramanathan, R., Hunt, M. C., & Nair, M. N. (2020). Factors influencing the color of fresh meat from postmortem to the consumer's plate. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(3), 580-610.
- Stipl, V. M., Delgado, A. ve Becker, T.M., (2004). Development of a method for the optical in situ determination of pH value during high-pressure treatment of fluid food. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 5, 285–292.
- Testo, Guide to pH measurement engineering. (2004). <http://pst-ir.com/wp-content/uploads/2013/11/https.ex.testo.de.pdf.download.php.filepublications.Publications.EN.02-FIELD-MANUALS.Guide-to-.pdf> (Erişim tarihi: 20.07.2020).
- Toldrá, F. (2002). *Dry-Cured Meat Products*. New York: Food & Nutrition Press.
- Tyl, C., Sadler ve G.D., (2017). pH and Titratable Acidity. Nielsen's. (Eds) *Food Analysis*. Food Science Text Series. Springer.
- Zamora, R. G., & Veum, T. L. (2011). Influence of pH on the Bacterial Count and Quality of Fresh Meat. *Journal of Food Protection*, 74(7), 1218-1225.

7. Bölüm

Dizel Motorlarda Kullanılan Hibrit Gaz Yakıtlar Üzerine Bir Analiz

Kutlutuğ KOCAGÖZ¹
Can COŞKUN²
Zuhal OKTAY³

¹ İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, kutlutug@hotmail.com, 2417104004@std.idu.edu.tr, <https://orcid.org/0009-0003-5709-0764>

² İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, dr.can.coskun@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4100-0296>

³ İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, zuhal.oktay@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6167-7048>

1. GENEL BİLGİLER

Otomotiv, sanayi, elektrik enerjisi üretimi gibi pek çok alanda içten yanmalı motorlar kullanılmaktadır. İçten yanmalı motorlar genel perspektifte ‘verimli üretim’ ve ‘sağlam yapı’ kavramlarıyla ön plana çıkmaktadır. İçten yanmalı motorlarda kullanılan yakıtla ilgili olarak emisyon salınımları değişiklik arz etmektedir. İçten yanmalı motorlarda kullanılan fosil yakıtların sürdürülebilirlik üzerine negatif etkisi araştırmacıları alternatif yakıtların kullanımı üzerine çalışmalarını yoğunlaştırmaya sebep olmuştur. Bu bağlamda içten yanmalı motorların emisyon salınımları noktasındaki olumsuz etkilerini en aza indirmek amacıyla hibrit gaz yakıt teknolojilerinin kullanımı üzerine bazı çalışmalar yürütülmektedir. Günümüzde doğal gaz, metan, biyogaz gibi gaz yakıtlar, dizel motorlarda kullanılan geleneksel yakıtların ikamesi yahut bir bileşeni olan kullanılabilir. Hibrit gaz yakıt karışımları dizel motorların emisyon seviyesinin düşürülmesini katkı sağlamaktadır. Doğalgaz ve biyogaz gibi alternatif gaz yakıtlar dizel yakıtla oranla çok daha temiz bir yanma gerçekleşmesinden dolayı karbondioksit ve diğer zararlı gaz emisyonlarını düşürmektedir. Hibrit gaz yakıt karışımları dizel motorlarda az yük ve yavaş hızda daha verimli çalışabilmektedir. Ancak yüksek hızlarda dizel yakıtın tek başına kullanımı daha uygun hale gelmektedir. Hibrit gaz yakıt karışımlarının en önemli avantajı; dizel motorda toplam yakıt tüketim miktarının düşürülmesini sağlayarak ekonomik bir kullanım sağlamasıdır. Dizel yakıtlardaki emisyon parametreleri, çevresel açıdan büyük sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Hibrit gaz yakıt karışımları çevresel etkileri minimize ederken işletme maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlamaktadır. Biyogaz özelinde düşünüldüğünde yenilenebilir olan bu yakıt türü, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak enerji arz güvenliğine katkı sağlamaktadır. Dizel motorlarda kullanabildiğimiz hibrit gaz yakıt karışımları, dizel motorların daha çevre dostu, verimli ve ekonomik olmasını sağlayan önemli bir alternatiftir. Bu tür hibrit gaz yakıt karışımlarının yakın bir gelecekte daha yaygın hale gelmesiyle olumsuz çevresel etkilerin azaltılmasına katkıda bulunmakla kalmayacak, aynı zamanda enerji verimliliğinin artırılmasına yardımcı olacaktır. Bu nedenle, hibrit gaz yakıt karışımlarının kullanımı dizel motorların sürdürülebilirliğini artırmanın önemli seçeneklerden birisidir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Aliustaoğlu ve Ayhan (Aliustaoğlu ve Ayhan,2019) yaptıkları çalışmada LPG-dizel çift yakıt karışımının direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda emisyonlar ve performans üzerine etkisini incelemiştir. LPG (sıvılaştırılmış petrol gazı), dizel motorlarda ikinci bir yakıt olarak veya modifikasyonla kullanılabilir. Hibrit gaz yakıt karışımlarının kullanımı dizel motorların sürdürülebilirliğini artırmanın önemli seçeneklerden birisidir.

Bu kullanım noktasında maliyet avantajı sağlamaktadır. LPG-dizel çift yakıt sistemi, yakıt ekonomisi bağlamında tasarruf sağlarken aynı zamanda is emisyonlarını azaltarak çevreyi korumaya katkıda bulunmaktadır. Aliustaoğlu ve Ayhan bu çalışmada, direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda %20 LPG - %80 dizel karışımıyla yapılan deneylerde özgül yakıt tüketiminin iyileştiğini ve motor performansının korunduğunu ortaya çıkarmışlardır. Ayrıca, yakıt maliyetlerinin standart dizel sisteme kıyasla saatte ortalama 1.26 \$ azaldığı ve is emisyonlarının %38-42 oranında iyileştiğini tespit edilmişlerdir. Çalışmada ortaya koyulan sonuçlar, LPG'nin dizel yakıtla kıyasla daha yüksek ısıl enerjiye ve ekonomik avantaja sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sistemin özellikle lojistik ve toplu taşıma araçlarında kullanılması, maliyetleri düşürürken çevresel etkileri de azaltabilecektir. Ciniviz ve arkadaşları (Ciniviz ve arkadaşları, 2001) yapmış oldukları çalışmada dizel motorlarında dizel yakıtı + LPG kullanımının performans ve emisyonu etkisini incelemişlerdir. %30 LPG ve %70 dizel karışımının motor performansı ve emisyon değerlerine etkisi ortaya konmaktadır. Tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motor, LPG-dizel çift yakıt sistemiyle çalışacak şekilde modifiye edilmiştir. Deneyler sonrasında ortaya çıkan sonuçlar, çift yakıtlı çalışmada motor torku ve gücünün %5,8 oranında arttığını göstermiştir. Emisyon bağlamında değerlendirdiğimizde, NO_x emisyonlarında %5,9 ve k faktöründe 1/9 oranında iyileşme gözlemlenmiştir. Güç, NO_x, O₂ ve hava fazlalık katsayısı üzerinde çift yakıt sisteminin etkisi oldukça düşük iken özgül yakıt tüketimi (Ö.Y.T.) ve k faktörü üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada ortaya çıkan sonuçlar sonrasında yapılan öneriler doğrultusunda; LPG oranının artırılmasıyla egzoz ve duman emisyonlarının iyileştirme olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, setan sayısının yükseltilmesi, NO_x ve duman emisyonlarını daha da azaltabilmektedir. Çift yakıtlı sistem, düşük emisyon avantajı sayesinde forkliftlerde kullanılabilirken, tork ve güç artışı nedeniyle ağır hizmet tipi araçlar için uygunluk açısından da araştırma yapılması önerilmektedir. Bu sistem, performansı artırırken çevre dostu bir alternatif olarak dikkat çekmektedir. Atelge (Atelge, 2021) ortaya koyduğu çalışmada kısmi yük koşullarında çift yakıtlı dizel motorunda dizel + biyogaz kullanımının enerji ve ekserji verimi üzerine etkisi incelenmiştir. Artan enerji talebi ve fosil yakıt kullanımının olumsuz etkileri, biyogaz gibi alternatif yakıtların önemini artırmaktadır. Bu çalışma kapsamında deneyler, 1500 rpm sabit hızda %25, %50 ve %75 kısmi motor yüklerinde gerçekleştirilmiştir. Kısmi yük artışıyla, hem dizel hem de dizel-biyogaz sistemlerinde enerji ve ekserji verimliliği artışı göstermiştir. Faydalı iş miktarları sırasıyla %25 yükte 1,60 kW, %50 yükte 3,20 kW ve %75 yükte 4,81 kW olarak ölçülmüştür. Kayıp güç miktarları ise dizel yakıt sisteminde %25 yükte 5,18 kW, %75 yükte 11,32 kW

olarak tespit edilirken, çift yakıt sisteminde %25 yükte 8,04 kW, %75 yükte ise 12,36 kW olmuştur. Biyogazın içeriğinde %30 oranında CO₂ içermesi nedeniyle tam yanma sağlanamamıştır. Enerji verimliliği açısından, sadece dizel kullanımında enerji verimi %25 yükte %25.75, %75 yükte ise %64 olarak ölçülmüştür. Enerji verimliliği noktasında çift yakıt sisteminde %25 yükte %18.01, %75 yükte ise %27.97 olarak ölçülmüştür. Ekserji verimi noktasında dizel için %25 yükte %22.96, %75 yükte ise %26.43 olarak ölçümlenmiştir. Biyogaz birleşik dizel yakıtlı sistemin için %25 yükte %17.17, %75 yükte %25.80 olarak bulunmuştur. Analiz sonuçları olarak, dizel yakıtla birleşik biyogaz kullanımı enerji ve ekserji performansında düşüşe neden olsa da çevresel faydalar ve sürdürülebilirlik açısından önemli bir alternatif yakıt olarak değerlendirilmektedir. Ancak, CO₂ içeriğinin etkilerini azaltacak optimizasyonların yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmada en iyi performans, %75 yük koşulunda elde edilmiştir. Yük azaldıkça, eksik yanma nedeniyle enerji ve ekserji verimleri hem dizel hem de dizel-biyogaz karışımında düşmektedir. Dizel-biyogaz karışımı noktasında püskürtme zamanlaması, sıkıştırma oranı gibi motor parametrelerinin optimizasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır. Düşük yüklerde tam yanmayı engelleyen en temel faktör, biyogazda bulunan CO₂ olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle çalışmada, CO₂ oranının azaltılması veya H₂ gibi yüksek kalorifik değere sahip gazların eklenmesi önerilmektedir. Genel olarak, yüksek yüklerde biyogaz, enerji ve ekserji veriminde ciddi bir düşüş yaratmadan alternatif bir biyoyakıt olarak kullanılabilirken, düşük yüklerde biyogaz performansını artırmak için motor çalışma parametrelerinde önemli optimizasyonlar yapılması gerekmektedir. Bu sonuçlar, biyogazın sürdürülebilir bir yakıt kaynağı olarak kullanılabilirliğini gösterirken, sistemin daha verimli ve çevre dostu hale getirilmesi için geliştirilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Yılmaz ve Gümüş (Yılmaz ve Gümüş, 2017) yaptıkları bu çalışmada, biyogazın çift yakıtlı bir dizel motorda ana yakıt olarak kullanılmasıyla silindir basınçlarının, özgül yakıt tüketiminin ve egzoz emisyonlarının nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Deneyseller; 1750 devir/dakika sabit motor devrinde, 50 Nm, 75 Nm ve 100 Nm motor yüklerinde ve ana yakıt olarak %60 CH₄ + %40 CO₂'den oluşan biyogaz kullanılarak yapılmıştır. Biyogazın birleşik dizel çifti yanma sürecinde sabit basınç fazından sabit hacim fazına geçişi sağladığı için daha yüksek silindir basınçları üretilebilmiştir. Ancak bu yüksek basınçlar dönüşüm enerji dönüşüm verimliliğini azalmasına sebep olmuştur. Biyogazın ısı değerinin dizelden daha düşük olmasının bir sonucu olarak, çift yakıtlı çalışmada özgül yakıt tüketimi dizel yakıtlı sisteme kıyasla daha yüksek olmuştur. Emisyonlar açısından incelendiğinde HC emisyonların tüm yüklerde artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

NO_x emisyonları ise düşük yükte azalmış, ancak yük arttıkça silindir içi sıcaklıkların yükselmesiyle birlikte artmış kaydetmiştir. İS emisyonları noktasında çift yakıtlı sistemde önemli ölçüde azalma kaydedilmiştir. Performansın artırabilmesi ve emisyonların azaltılabilmesi için motor parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Optimizasyon noktasında özellikle püskürtme zamanlaması, sıkıştırma oranı ve yağlama yağı türü üzerine çalışılması gerekmektedir. Genel olarak, biyogazın dizel motorlarda yakıt olarak kullanılabilmesi gözlemlenmiştir. Bu karışım özellikle is emisyonlarının azaltılması konusunda etkili bir yöntem sunmaktadır. Ancak, verimlilik ve çevre dostu kullanım için motor çalışma parametrelerinin daha fazla optimize edilmesi gerekmektedir. Özer ve Vural (Özer ve Vural, 2020) yapmış oldukları çalışmada, dizel motorlarda CNG (Sıkıştırılmış Doğalgaz) ve pilot yakıt olarak kullanılan n-heptan ve toluen katkılı karışımların motor performansı ve emisyonlar üzerindeki etkilerini incelenmişlerdir. Deneilerini 1 kW'dan 4 kW'a kadar değişen yüklerde ve 3000 devir/dakika motor hızında gerçekleştirilmişlerdir. Fren özgül yakıt tüketimi (FÖYT) açısından en düşük değere (106 gr/kWh) 4 kW motor yükünde %40 CNG ile DH10 karışımında ulaşılmıştır. En yüksek fren özgül yakıt tüketimi değerine (802,5 gr/kWh) 1 kW motor yükünde %20 CNG ile DT10 karışımında rastlanmıştır. Egzoz gazı sıcaklıkları noktasında değerlendirme yapıldığında en yüksek değer olarak ölçülen 395°C'ye 4 kW yükte % 40 CNG ile DT10 karışımında ulaşılmıştır. En düşük egzoz gazı sıcaklık olarak gözlemlenen 170°C'ye 1 kW yükte CNG ilavesi olmadan ulaşılmıştır. CO emisyonları bakımından, en düşük değer olarak %0,03 değerine 2kW yükte CNG ilavesi olmadan n-heptan katkılı yakıtta ulaşılmıştır. En yüksek CO emisyonu değeri olan % 0.23 değeri % 40 CNG ilavesiyle DT10 karışımında gözlemlenmiştir. HC emisyonları bakımından, en düşük değer olarak 9 ppm değeri 1 kW yükte CNG ilavesi olmadan DH10 yakıt karışımında kaydedilmiştir. NO_x emisyonları bakımından, en düşük değer olarak 115 ppm değerine %40 CNG ile DT5 karışımında ulaşılmıştır. NO_x emisyonları bakımından, en yüksek değer olarak 288 ppm değerine %40 CNG ile DH10 karışımında kaydedilmiştir. İS emisyonları noktasında değerlendirildiğinde ölçülen en düşük değer %2.6 olarak 1 kW yükte %40 CNG ile DH10 ilavesinde oluşmuştur. En yüksek is emisyonuna 4 kW yükte D yakıtına CNG ilavesi olmadan ulaşılmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar değerlendirildiğinde genel olarak n-heptan katkılı yakıtlar, CO emisyonlarını düşülmesine ve motor performansının iyileştirilmesine katkı sunmaktadır. CNG ilavesi ise emisyonlar noktasında is ve NO_x emisyonlarını azaltmada katkı sağlarken HC ve CO emisyonlarının artışına sebep olmaktadır. Ticari uygulanabilirlik açısından CNG'nin motor parçalarına etkilerinin incelenmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, pilot yakıtta toluen ve n-heptan ilavesi, CNG ile

çalışan dizel motorlarda çevresel ve performans açısından olumlu sonuçlar vermekteldir. Ancak motorun uzun vadeli dayanıklılığı ve malzeme etkileri üzerine ek araştırmalar yapılması gerektiği vurgulanmaktadır. Kahraman ve arkadaşları (Kahraman ve ark., 2007) yapmış oldukları çalışmada içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt olarak hidrojen kullanımını incelemişlerdir. Geri tutuşma ve erken ateşleme gibi sorunlar içten yanmalı motorlarda hidrojenin güvenli kullanımını zorlaştıran önemli etmenlerden biri olarak nitelendirilmiştir. Hidrojenin dūřuk tutuşma enerjisi, motorun ilk hareketini kolaylaştırmaktadır. Yūksək yanma hızı ile kendi kendine tutuşma sıcaklığının vuruntu ihtimali azalmaktadır. Yūksək uçuculuğu sayesinde sızıntı durumunda hızla sistemden uzaklaşarak tehlike oluşturmamaktadır. Bu faktörlerin bir etkisi olarak hidrojenle çalışan motorlarda, özel yakıt sistemleri ve tasarım değişiklikleri gerekmektedir. Yakıt içeriği olarak yapısında karbon içermemesi, egzoz emisyonlarında karbon monoksit (CO) ve karbondioksit (CO₂) gibi gazların bulunmamasına sebebiyet vermekteldir. Bu noktada önemli çevresel faydalar sağlamaktadır. Ates ve arkadaşları (Ates ve ark., 2013) tek silindirli, dōrt zamanlı, hava soğutmalı bir dizel motorda hidrojenin-dizel yakıt karışımının kullanılmasının emisyonlar üzerine etkisini incelemişlerdir. Kural Tabanlı Mamdani Tipi Bulanık Mantık Modelleme (RBMTF) sistemi kullanarak CO, CO₂ ve NO_x egzoz emisyonlarının modellenmesi ve tahmin edilmesi üzerine çalışmışlar yūrdmūřlerdir. Uyguladıkları RBMTF modeli, MATLAB programı kullanılarak geliştirilmiştir. Modele, hidrojen karışım oranı ve motor hızı olmak üzere iki girdi verilerek CO, CO₂ ve NO_x emisyon seviyeleri ıktıları alınabilmektedir. Oluřturulan modelin gerçek değerlere ne kadar yakınsadığı, model tahminleri ile deneysel verilerin karışılaştırılması ile elde edilmiştir. Analiz sonucunda yūksək korelasyon katsayılarına ulaşılmıştır. Ulaşılan korelasyon katsayıları CO için R² = %97.7, CO₂ için R² = %96.84, NO_x için ise R² = %97.31 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, modelin deneysel verilerle gūçlü bir uyum sağladığını ve emisyon seviyelerini tahmin etme konusundaki güvenilir olduğunu gōstermiřtir. Optimal koşullar, motor hızının 2400 rpm ve hidrojen hacminin toplam yakıt karışımının %20'si olduğu durumlarda elde edilmiştir. Belirtilen koşulda, CO ve CO₂ emisyonları önemli ölçūde azalmış ancak daha yūksək yanma sıcaklıklarının bir sonucu olarak NO_x emisyonlarında artış gözlemlenmiştir. Yakıtta % 20'nin üzerindeki hidrojen ilavesi, motorun hacimsel verimliliğini dūřürmūř ve performans üzerinde olumsuz etkiler yaratmıştır. RBMTF modeli sayesinde doğruluk oranı yūksək tahminler yaparak deneysel çalışmalarda zaman ve maliyet tasarrufu sağlanabileceği gōrūřü ortaya konmuştur. Ayrıca, RBMTF modeli gelecekte yapay sinir ağları gibi daha gelişmiş yöntemlerle birleştirilerek çok daha iyi sonuçlar konulabileceği ifade edilmiştir. alık (alık, 2018) yapmış

olduğu bu çalışmada atık kızartma yağlarından üretilen biyodizele hidrojen (H_2) ilavesi ile yakıt zenginleştirmenin, sıkıştırma ateşlemeli bir motorun performansı ve emisyon değerleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, hidrojen gazı giriş havasına belirli bir debide verilerek motorun operasyonel özellikleri değerlendirilmiştir. Çalışmada katkısız dizel yakıt referans olarak kullanılmıştır. Hidrojen ile zenginleştirilmiş yakıt motor performansını artırmış ve fren özgül yakıt tüketimini azaltmıştır. Çalışmada hidrojen ilavesiyle yanma verimliliği artmış ve motorun genel çalışma özellikleri iyileştirilmiştir. Emisyonlar açısından, hidrojen ilavesi yanma sürecini iyileştirerek CO ve CO_2 emisyonlarında azalma sağlamıştır. Ancak hidrojenin yüksek yanma sıcaklıklarına yol açması nedeniyle NO_x emisyonlarında bir artış gözlenmiştir. Atık kızartma yağlarından üretilen biyodizele hidrojen ilavesinin emme manifoldundaki etkileri incelenmiş ve motor titreşim seviyeleri üzerinde de değerlendirmeler yapılmıştır. Atık kızartma yağlarından üretilen biyodizel, sürdürülebilir bir yakıt olarak dizel yakıtına alternatif sunarken, hidrojen ilavesiyle daha temiz bir yanma ve verimlilik artışı elde sunmaktadır. Çalışmadan çıkarılacak sonuç olarak, hidrojenin biyodizel ve dizel yakıtlarla kombinasyonu, motor performansını iyileştirirken emisyonları optimize etmek için umut vadetmektedir. Ancak, NO_x emisyonlarını azaltmaya yönelik ek stratejiler geliştirilmesi gereklidir. Bu kombinasyon, hem çevre dostu hem de enerji verimli bir çözüm sunmaktadır. Şanlı ve Yılmaz (Şanlı ve Yılmaz, 2023) yapmış oldukları çalışmada dört silindirli bir dizel motorda emme havasına farklı oranlarda (H10-H50) hidrojen ilavesinin motorun yanma karakteristikleri ve çevrimsel değişimlere etkisini incelenmişlerdir. Testler, 1750 devir/dakika sabit bir motor devrinde ve 60 Nm ve 100 Nm olmak üzere iki farklı motor yükünde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, motorun performansı, silindir basıncı, yanma sıcaklığı ve çevrimsel değişim katsayıları (ÇDK) gibi parametreler analiz edilmiştir. Sonuçlara göre, 60 Nm yükte maksimum silindir basıncı, %50 hidrojen ilavesi durumunda 82.97 bar olarak 365° krank açısında elde edilmiştir. 100 Nm yükte maksimum silindir basıncı, %50 hidrojen ilavesi durumunda 109.32 bar olarak 374° krank açısında elde edilmiştir. H10'dan H40'a kadarki hidrojen oranlarında silindir basıncı dalgalanmaları azalmış, ancak H50'de dalgalanmalarda artış gözlemlenmiştir. Maksimum silindir basıncı genellikle Üst Ölü Nokta'dan (ÜÖN) sonra 4° ile 15° krank açısı aralığında meydana gelmiştir. 60 Nm yükde en yüksek yanma gaz sıcaklığı, %20 hidrojen ilavesi koşulunda 1571 K (390° krank açısında) olarak gözlemlenmiştir. 100 Nm yükde en yüksek yanma gaz sıcaklığı, %50 hidrojen ilavesi koşulunda 2449 K (392° krank açısında) olarak ortaya çıkmıştır. Hidrojen kullanımı, maksimum yanma sıcaklıklarına dizel yakıtına göre daha erken ulaşılmasına sebep olmaktadır. Isı

Dağılımı Oranı (IDO) açısından değerlendirildiğinde, 60 Nm yükünde en düşük Isı Dağılımı Oran H50 ile, en yüksek Isı Dağılımı Oran ise H20 ile gözlemlenmiştir. 100 Nm yükde en düşük ısı dağılımı oranı H30 ile, en yüksek ısı dağılımı oranı ise H50 ile elde edilmiştir. Maksimum ısı dağılımı oranı, üst ölü nokta'dan sonra 10-19° krank açısı aralığında meydana gelmiştir. Ortalama İndike Basınç (OİB) için çevrimsel değişim katsayıları değerleri, H50 haricinde tüm çalışma koşullarında %0,7-1,4 aralığında ideal düzeyde kalmıştır. En düşük çevrimsel değişim katsayı değeri, hem 60 Nm hem de 100 Nm yükde H20 yakıt karışımında elde edilmiştir. Çevrimsel stabilite açısından, H10'dan H40'a kadar olan hidrojen-dizel karışımları, her iki motor torkunda çevrimsel değişimler açısından stabil çalışma sağlamıştır. Ancak, H50'deki yüksek hidrojen oranı, stabiliteyi olumsuz etkileyen dalgalanmalara yol açmıştır. Genel olarak, hidrojen ilavesi yanma sürecini hızlandırarak, maksimum silindir basıncı ve yanma sıcaklıklarını daha erken krank açıları oluşturarak yanma verimliliğini artırmıştır. Çevrimsel değişim katsayı değerleri ve stabilite açısından H10-H40 arası karışımlar ideal bulunmuş, ancak H50'de stabilite sorunları gözlemlenmiştir. Bu nedenle, hidrojen kullanımında uygun oranların belirlenmesi kritik önem taşıdığı ifade edilmektedir. Erçelik ve Doğan (Erçelik ve Doğan, 2024) yapmış oldukları çalışmada ağır ticari araçlarda dizel yerine sıvılaştırılmış doğal gaz kullanımının yakıt tüketimine etkisini incelemiştir. Yapılan çalışmada, ağır ticari araç sınıfında yer alan bir çekicinin dizel ve sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) yakıtlı motorlara sahip olması durumunda yakıt tüketimi ve ivmelenme performansı gerçek yol sürüş testleri ile karşılaştırılmıştır. Testler, Euro VI normlarına uygun 338 kW gücünde motorlara sahip araçlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Test araçları, 164.3 km otoyolda, 44.4 km kırsal yolda ve 54.7 km şehir içi yolda olmak üzere toplam 263.4 km boyunca test edilmiştir. Test süreci sonrasında oluşan bulgular, LNG yakıtlı aracın hızlanma performansı dizel yakıtlı araca göre daha düşük seviyede olduğunu göstermiştir. Süreç yakıt maliyetleri açısından değerlendirildiğinde; LNG yakıtlı araç, 100 km'de 28.8 \$ ile dizel yakıtlı araca göre %27 daha düşük maliyetle test mesafesini kat etmiştir. Çevresel açıdan, LNG yakıtlı araçlar dizel yakıtlı araçlara kıyasla daha düşük emisyon değerleri sağlamaktadır, bu da çevresel faktörler açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Yakıt maliyeti açısından önemli avantajlara sahip olsa da LNG yakıtlı araçların ilk satın alma maliyeti dizel araçlara göre %30 daha yüksektir. Bununla birlikte, uzun mesafelerde elde edilen yakıt tasarrufu, ilk yatırım maliyetindeki artışı dengeleyebilecek bir avantaj sunmaktadır. LNG motorların maksimum tork aralığına uygun bir şanzıman yazılımı adaptasyonu ile LNG araçların hızlanma performansı artırılabilir. Çalışmadan ortaya çıkan genel sonuçlar noktasında, LNG yakıtlı araçlar, uzun

mesafelerde dizel araçlara göre daha düşük yakıt maliyeti ve çevresel faydalar sunarak satın alınabilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Reşitoğlu ve Keskin (Reşitoğlu ve Keskin, 2019) yapmış oldukları çalışmada, iki ayrı propan-dizel karışımlarının (P3: %3 propan - %97 dizel, P6: %6 propan - %94 dizel) direkt enjeksiyonlu tek silindirli bir dizel motorda yakıt tüketimi ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini incelenmiştir. Çalışmada tam yük koşullarında yapılan motor testlerinde, propan ilavesinin motor performansı ve emisyon değerleri üzerinde olumlu etkiler yarattığı gözlemlenmiştir. Ortaya çıkan sonuçlar propan ilavesinin yakıt karışımının viskozite, ısıl değer, parlama noktası ve setan sayısı değerlerinde düşüğe neden olduğunu göstermiştir. Yakıt karışımlarının, özgül yakıt tüketimini (SFC) düşük ısıl değer ve setan sayısına rağmen küçüğe olsa azalttığı gözlemlendi. Egzoz emisyonları açısından ise, özellikle P6 karışımıyla CO emisyonlarında %25.37'ye varan bir azalma sağlanmıştır. Çalışmada CO emisyonlarındaki azalma, karışım yakıtların içerdiği oksijen miktarının yanmayı iyileştirmesiyle ilişkilendirilmiştir. P6 yakıt kullanımında 1600 devir/dakika hızında NOx emisyonlarında %8.05 oranında bir azalma elde edilmiştir. Duman emisyonları açısından değerlendirildiğinde, P3 yakıtı tüm motor hızlarında duman emisyonlarında bir azalmaya sebep olmuştur. P6 yakıt karışımı kullanımında, düşük motor hızlarında bir azalma eğilimi gözlemlenmiş ve duman emisyonları %12.08'e kadar azaltılabilmektedir. Propan ilavesinin yanma sürecinde katalitik bir etki sağlayarak emisyon değerlerini genel olarak iyileştirme sağlamıştır. Çalışmadaki genel değerlendirme olarak; propan-dizel karışımları özellikle CO ve partikül madde emisyonlarını azaltmada etkili olmuştur. NOx emisyonlarında önemli bir değişiklik olmamakla birlikte, düşük motor hızlarında bir miktar azalma gözlemlenmiştir. Propan ilavesi motor performansında belirgin bir olumsuz etki yaratmadan, emisyon değerlerini iyileştiren çevre dostu bir katkı maddesi olarak değerlendirilmiştir. Ancak, bu karışımların uzun vadeli etkileri ve ekonomik fizibilitesi daha fazla araştırılması gerektiği ortaya konmuştur. Saleh (Saleh, 2008) yapmış olduğu çalışmada direk enjeksiyonlu bir dizel bir motoru LPG kullanabilecek şekilde revize etmişlerdir. Doğal emişli, dört zamanlı ve iki silindirli motor LPG-dizel yakıtı birleşik olacak biçimde yakacak hale getirilmiştir. LPG-dizel yakıt karışımı için en uygun karışım oranını belirlemeye çalışmışlardır. Belirlenen karışım oranının hem egzoz emisyon değerlerini düşürürken hem de termal verimi artırması istenmiştir. Ayrıca LPG içeriğindeki varyasyonların performans ve emisyon üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Ortaya çıkan sonuçlar göstermektedir ki; bileşimdeki propan oranının artışıyla egzoz gazındaki CO oranı düşmektedir, bütan oranının artmasıyla ise NOx emisyonlarının azaldığını tespit etmiştir. Ayhan ve arkadaşları (Ayhan ve ark., 2011) yapmış oldukları çalışmada dizel bir motorun emme hattına ikinci yakıt

olarak LPG'nin verilmesi sonrası emisyon değerlerinin ve motor performans parametrelerinin nasıl değiştiğini incelemiştir. Test sonuçlarından elde edilen verilere göre ikinci yakıt olarak LPG'nin kullanılmasıyla dizel motorda fren torku, özgül yakıt tüketimi, fren gücü ve fren verimliliği önemli ölçüde artmıştır. Farklı yük şartlarında deneyler gerçekleştirilmiş olmasına karşın oransal olarak %5'lik bir LPG ilavesinde is emisyonlarında kayda değer bir azalma gözlemlenmiştir. İs emisyonlarında artış olup olmadığı araştırıldığında %10 ve üzeri bir LPG ilavesinde is emisyonlarında artış eğilimi gözlemlenmiştir. Kumaraswamy ve Prasad (Kumaraswamy ve Prasad, 2012) yapmış olduğu çalışmada dizel bir motorda ikinci yakıt olarak LPG kullanılması durumunda motor performansının ve emisyon değerlerinin nasıl değiştiğini incelemiştir. Tek silindire sahip, dört zamanlı dizel bir motor modifikasyonlar yapılarak dizel+LPG yakıt karışımıyla çalışabilecek bir noktaya getirildi. Tüm bu süreçte EGR sistemin uyumlaştırılmasına dikkat edildi. Deney çıktıları, LPG+dizel yakıt çiftinin tam yük şartlarında NOx emisyonlarını düşürdüğünü ortaya koymuştur.

Bunun aksine yük oranı düşürüldüğünde HC, CO ve özgül yakıt tüketiminde yükselmeler olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Emisyonlar noktasında LPG+Dizel yakıt çiftinin ortaya koyduğu olumlu bir sonuç is emisyonlarında gözlemlenmiştir. İs emisyonlarında önemli düzeyde bir iyileşme gözlemlenmiştir. Nedunchezhan ve arkadaşları (Nedunchezhan ve ark., 2016) tek silindirli dört zamanlı bir motorda pamuk yağı biyodizeli etanol karışımına doğalgaz ilavesinin performans ve emisyonlar açısından etkilerini incelemiştir. Çalışmada CNG'yi emme manifoldundan hava ile birlikte motora ilave etmişlerdir. Elde ettikleri bulgular biyodizel etanol karışımı ile kullanılan bir motorda CNG ilavesinin NOx ve CO₂ emisyonlarında azalmaya, CO ve HC emisyonlarının ise artışına neden olmuştur. Zhang ve arkadaşları (Zhang ve ark., 2017) son yıllarda deniz taşımacılığında kullanılan gemilerin motorlarında kullanılan sıvılaştırılmış doğalgazın (LNG) çevreye bıraktığı etkileri incelemiştir. Bu amaçla bu tip motorlardaki en önemli emisyon olarak görülen partikül miktarının etkileri üzerinde durmuşlardır. Partikül emisyonları dizel motorlarında istenmeyen fakat yakıtın tam yanamaması sonucunda çevreyi fiziksel olarak da kirleten önemli bir emisyondur. Yaptıkları çalışmada dizel yakıtına LNG ilavesi ile birlikte partikül emisyonlarının azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca laboratuvar koşullarında yapılan yanma incelemesinde de LNG'nin dizel yakıtına göre partikül emisyonları miktarı oldukça düşük olduğunu belirtmişlerdir. You ve arkadaşları (You ve ark., 2020) yapmış oldukları çalışmada 6 silindirli turbo şarjlı bir motorda dizel yakıtına kütlece değişik oranlarda doğalgaz ilavesinin motor performansına ve emisyonlarına etkisini incelemiştir. Bu amaçla doğalgaz emme manifolduna kendi yapmış

oldukları gaz enjektörü aparatı ile ilave etmişlerdir. Bu çalışmada türbülanslı bir ilavenin silindir içerisindeki yanmaya etkilerini de araştırmışlardır. Bu amaçla imal ettikleri aparatın yönünü değiştirerek etkilerini de incelemiştir. Ayrıca doğalgazın silindir içerisine püskürme avansının yanma üzerindeki değişimlerini gözlemlemek için doğalgazın değişik püskürtme avanslarında silindir içerisine gönderilmesini sağlamışlardır. Elde ettikleri sonuçlar göstermiştir ki, dizel yakıtına doğalgaz ilavesi ile birlikte enjeksiyon zamanlamasının değiştirilmesi yanma süresini ve silindir içi basıncı değiştirerek emisyon değerlerini etkilemektedir. Ayrıca emme manifolduna bağlanan doğalgaz enjektörünün yönü de yanmada etkilidir. Yousefi ve arkadaşları (Yousefi ve ark., 2019) yaptıkları bu çalışmada karma olarak dizel/doğalgaz yakıt karışımı ile çalışan bir motorun termik veriminin yükseltilmesi için doğalgaz basınç değerlerinin silindir içerisindeki yanmaya etkilerini incelemiştir. Bu amaçla çalışmalarını teorik hesaplama ve uygulamalı olarak gerçekleştirmişlerdir. Teorik olarak hesaplamalarını uygulamaya dökerek sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Çift yakıt ile çalışan bu sistemde pilot yakıt olarak kullanılan dizel yakıtının püskürtme basıncının aşırı artırılmasının termal verimi düşürdüğünü belirtmişlerdir. Bunun yanında doğalgaz basıncının değiştirilmesinin yanmayı etkilediğini bildirmişlerdir. Wang ve ark., (Wang ve arkadaşları, 2018) pilot yakıt olarak motorin kullanan bir motorda maksimum ne kadarlık bir doğalgaz ilavesi yapabileceğini araştırmışlardır. Bu amaçla altı silindirli turbo şarjlı bir motor kullanmışlardır. Deneyler sırasında motor performansı ve egzoz emisyonu değerlerini de ölçerek doğalgaz miktarının etkilerini karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda dizel yakıtına %75 oranına kadar doğalgaz ilave edilebileceğini görmüşlerdir. Ayrıca çalışmalarında doğalgazın ilavesinin zamanlamasının önemine de vurgu yapmışlardır. Wang ve arkadaşları (Wang ve ark., 2017) yapmış oldukları çalışmada doğalgazlı bir motorda enjeksiyon ve ateşleme avanslarının etkilerini teorik olarak incelemiştir. Ateşleme avansının doğalgazla çalışan motorlarda yanma parametreleri açısından etkili bir mekanizma olduğunu bildirmişlerdir. Motorun birebir modeli üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada ayrıca motorun her bir avans değişimi sırasında silindir içi yanma ve ısı yayılımı grafiklerini de karşılaştırma imkanı bulmuşlardır. Yaptıkları çalışmada doğalgazın avansının yanma parametrelerini doğrudan etkilediğini ve önemli bir değişken olduğunu bildirmişlerdir. Distaso ve arkadaşları (Distaso ve ark., 2018) dizel yakıt ile çalışan bir iş makinasında 800 ila 3500 devir/dakika arasındaki motor hızlarında ve 5 farklı motor yük değerlerinde CNG ilavesinin motor performansı ve partikül emisyonları açısından etkilerini incelemiştir. Bu çalışmada diğerlerinden farklı olarak ise partiküllerin boyutları ve miktarını da incelemiştir. Dizel yakıtına doğalgaz

ilavesi ile birlikte motor gücünün ve motor torkunun düştüğünü, partikül miktarının ise azaldığını belirtmişlerdir. Bunun yanında ise motor yükünün ve motor hızının partikül miktarı üzerinde etkili olduğunu görmüşlerdir. Bu amaçla yaptıkları çalışmada en yüksek partikül miktarının ise %80 motor yükünde oluştuğunu bildirmişlerdir. Sezgin (Sezgin, 2019) yaptığı çalışmada dizel motoru CNG motoruna dönüştürerek %100 CNG ile çalıştırılmasını sağlamıştır. Bu amaçla motor üzerindeki pistonu değiştirmiş ve enjektör yerine de buji takarak motorun fiziksel özellikleri üzerinde oynama yapmıştır. Elde ettiği sonuçlar motor üzerindeki bu değişikliklerle motorun CNG ile çalıştırılabileceği göstermiştir. Selim (Selim, 2005) tarafından yapılan çalışmada çift yakıtlı motorda çevrimsel farklar deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada saf dizel yakıtının yanında dizel+LPG ve dizel+metan karışımları da kullanılmıştır. Burada dizel yakıtı pilot yakıt olarak LPG ve metan ise ana yakıt olarak kullanılmıştır. Çeşitli parametreler değiştirilerek bunların çevrimsel farka etkisi incelenmiştir. En fazla çevrimsel fark LPG kullanıldığında en az ise saf dizel yakıtı kullanıldığında meydana gelmiştir. Her bir yakıt için çevrimsel farklar genellikle yük arttıkça artmıştır.

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada, gaz yakıtların dizel motorlarda ilave olarak kullanımının farklı motor parametreleri üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu gaz hibrit sistemleri, enerji verimliliğini artırmak, maliyetleri azaltmak ve çevresel etkileri iyileştirmek için etkili bir yol sunmaktadır. Bu nokta dizel sistemler ile karşılaştırıldığında daha fazla önem kazanmaktadır. Hibrit teknolojiler altında, daha temiz alternatif gaz yakıtları dizel motorları ile birleştirilerek, daha düşük emisyon değerleri ile daha verimli yanma süreçleri elde edilebilir. Doğal gaz, metan ve biyogaz gibi alternatif yakıtların eklenmesi, dizel motorları daha az kirletici hale getirmekle kalmaz, aynı zamanda fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak sürdürülebilir bir enerji çözümü sunar. Hibrit gaz yakıt sistemlerinin maliyet avantajları, ulaşım ve sanayi sektöründe en belirgin şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu teknolojiler, çevre dostu bir şekilde operasyonel maliyetleri ve fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmaktadır. Önümüzdeki yıllarda hibrit gaz yakıt teknolojilerinin ilerlemesi ve daha geniş bir şekilde benimsenmesi, dizel motorların çevresel ayak izinin ve enerji tüketiminin azaltılması için önemli bir adım olacaktır; bu iki unsur verimli bir şekilde dengelenecektir. Sonuç olarak, gaz hibrit sistemleri, dizel motorları daha çevre dostu ve maliyet etkin hale getirme potansiyeline sahiptir ve gelecekte enerji geçişinin merkezinde yer alacaktır.

KAYNAKLAR

- Aliustaoğlu, S., Ayhan, V. (2019) Direk Enjeksiyonlu Bir Dizel Motorda Lpg Dizel Çift Yakıt Karışımının Performans ve İS Emisyonlarına Etkileri. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*. 2147-3455
- Ciniviz, M., Salman, M.S., Çarman, K. (2001) Dizel motorlarında dizel yakıtı + LPG kullanımının performans ve emisyona etkisi. *Selçuk-Teknik Online Dergisi* 2(1):1302- 6178
- Atelge, M. R. (2021) Kısmi yük koşullarında dizel-biyogaz kullanılarak çift yakıtlı dizel motorun enerji ve ekserji analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 27;334-346
- Yılmaz, İ.T., Gümüş, M. (2017) Biyogaz-dizel çift yakıtlı dizel motor üzerine bir araştırma. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 32:3;919-927
- Özer, S., Vural, E. (2020) Pilot Yakıt Olarak Dizel/n-Heptan, Dizel/Toluen Kullanan Dizel Bir Motorda CNG İlavesinin Etkileri. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 6(1):1-15
<https://dergipark.org.tr/en/pub/gmbd/issue/54119/691643>
- Kahraman, N., Akansu, S.O., Albayrak, B. (2007) İçten Yanmalı Motorlarda Alternatif Yakıt Olarak Hidrojen Kullanılması. *Mühendis Makine*. 48:569
https://mmo.org.tr/sites/default/files/8ab2f9b45957ab5_ek.pdf
- Ates, A., Akbiyik, T., Dincer, K. (2013) The fuzzy logic modeling of diesel engine emissions using fuel mixed with different ratios of hydrogen. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies* 2: 4;111-117 <https://dergipark.org.tr/en/pub/ijaet/issue/7966/104564>
- Çalık, A. (2018) Hidrojen ile Yakıt Zenginleştirmenin Dizel Motorun Motor Performansı ve Emisyon Özelliklerine Etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(3): 255-262
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/cukurovaummfd/issue/42374/504771>
- Şanlı, A., Yılmaz, İ.T. (2023) Hidrojen Kullanılan Ortak Hat Yakıt Püskürtme Sistemli Bir Dizel Motorda Çevrimsel Yanma Değişimlerinin Araştırılması. *Mühendislikte Yakıtlar, Yangın ve Yanma Dergisi*, 11(1): 53-66. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/fce/issue/79329/1228061>
- Erçelik, B.B., Doğan, B. (2024) Ağır ticari araçlarda dizel yerine sıvılaştırılmış doğal gaz kullanımının yakıt tüketimine etkisi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(1):1204-1214. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ogummf/issue/84150/1388761>
- Reşitoğlu, İ.A., Keskin, A. (2019) Propanın dizel yakıtıyla kullanımı: dizel motor yakıt tüketimi ile egzoz emisyonları üzerindeki etkileri. *Ömer Halisdemir*

- Saleh, H.E. (2008) Effect of variation in LPG composition on emissions and performance in a dual fuel diesel engine, *Fuel*, 87, 3031-3039.
- Ayhan, V., Parlak, A., Cesur, İ., Boru, B., Kolip, A. (2011) Performance and exhaust emission characteristics of a diesel engine running with LPG, *International Journal of the Physical Sciences*, 6(8), 1905-1914.
- Kumaraswamy, A., Prasad, B.D. (2012) Performance Analysis of a Dual Fuel Engine Using LPG and Diesel with EGR System, *SciVerse ScienceDirect*, 38, 2784-2792.
- Nedunchezian, N., Thirugnanasambantham, K., Raja, R.S., Sivakumar, V. (2016). Performance, Emission and Combustion Characteristics of a dual fuel Engine with Diesel-Ethanol-Cotton seed oil Methyl ester Blends and Compressed Natural Gas (CNG) as fuel. *Energy*. 112. 899-907.
- Zhang, C., Zhou, A., Shen, Y., Li, Y., Shi, Q. (2017) Effects of combustion duration characteristic on the brake thermal efficiency and NO_x emission of a turbocharged diesel engine fueled with diesel-LNG dual-fuel”, *Applied Thermal Engineering*, 127;2017:312-318.
- You, J., Liu, Z., Wang, Z., Wang D., Xu, Y. (2020) Impact of natural gas injection strategies on combustion and emissions of a dual fuel natural gas engine ignited with diesel at low loads”, *Fuel*, 260;2020:116414
- Yousefi, A., Guob, H., Birouka, M., Likob, B. (2019) On greenhouse gas emissions and thermal efficiency of natural gas/diesel dual-fuel engine at low load conditions: Coupled effect of injector rail pressure and split injection, *Applied Energy*, 242;2019:216-231
- Wang, Z., Du, G., Wang, D., Xu, Y., Shao, M. (2018) Combustion process decoupling of a diesel/natural gas dual-fuel engine at low loads, *Fuel*, 232;2018:550-561
- Wang, T., Zhang, X., Zhang, J., Hou, X. (2017) Numerical analysis of the influence of the fuel injection timing and ignition position in a direct-injection natural gas engine, *Energy Conversion Management*, 149;2017:748–759
- Distaso, E., Amirante, R., Tamburrano, P.R.D. (2018) Steady-state Characterization of Particle number Emissions from a Heavy-Duty Euro VI engine Fueled with Compressed Naturel Gas, *Energy Procedia*, 148;2018:671-678
- Sezgin, O. (2019) Bir dizel motorda CNG dönüşümü, Yüksek Lisans Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Aydın

Selim, M.Y.E (2005) Effect of engine parameters and gaseous fuel type on the cyclic variability of dual fuel engines. *Fuel*, 84;7: 961-971.

8. Bölüm

Gıda İşlemede Uygulanan Geleneksel Dondurma İşleminde Novel Teknolojilerin Kullanımı

Abdülkadir DİLBER¹
Süleyman GÖKMEN²

¹ Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu,
Gıda İşleme Bölümü, Karaman, Türkiye

² Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü,
Karaman, Türkiye

*sorumlu yazar e-mail: sugokmen42@hotmail.com

Özet

Dondurma gıdalarda mikrobiyal ve enzimatik faaliyetleri azaltarak ve/veya durdurarak gıdaların besin değerini korumak ve raf ömrünü uzatmak için uygulanan bir gıda muhafaza metodudur. Dondurma metodu geleneksel olarak durgun havada yapılmaktadır. Bu metot gıdalarda büyük buz kristallerinin oluşumuna neden olmakta, gıdanın dokusuna zarar vermekte, besin değerini düşürmekte ve gıdaların raf ömrünü kısaltmaktadır. Tüm bu olumsuzlukları önlemek ve/veya kabul edilebilir seviyelere indirmek için geleneksel dondurma işlemiyle birlikte ultrasound, magnetik alan, yüksek basınç, mikrodalga, osmotik dehidrasyon uygulama örnekleri gibi novel gıda işleme yöntemlerinin kombine olarak uygulanabilirliği araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Novel Teknolojiler, Geleneksel Dondurma Yöntemi, Gıda Kalitesi, Raf Ömrü

GİRİŞ

Gıdaların dondurulması uzun süre raf ömrüne sahip olmasını ve besin değerlerini korumasını sağlamayı amaçlamaktadır. Uygulanan dondurma işlemi mikrobiyal gelişmeyi yavaşlatarak ve/veya engelleyerek gıdaların bozulmasını önlemektedir. Bu amaçla ticari olarak kullanılan dondurma yöntemleri bulunmaktadır. Bunlar aşağıda verilmiştir.

Geleneksel (Yavaş) dondurma yöntemi: Bu yöntemde ev tipi buzdolaplarında yapılan dondurma işlemidir. Bu nedenle dondurma işlemi yavaş ve uzun sürmektedir.

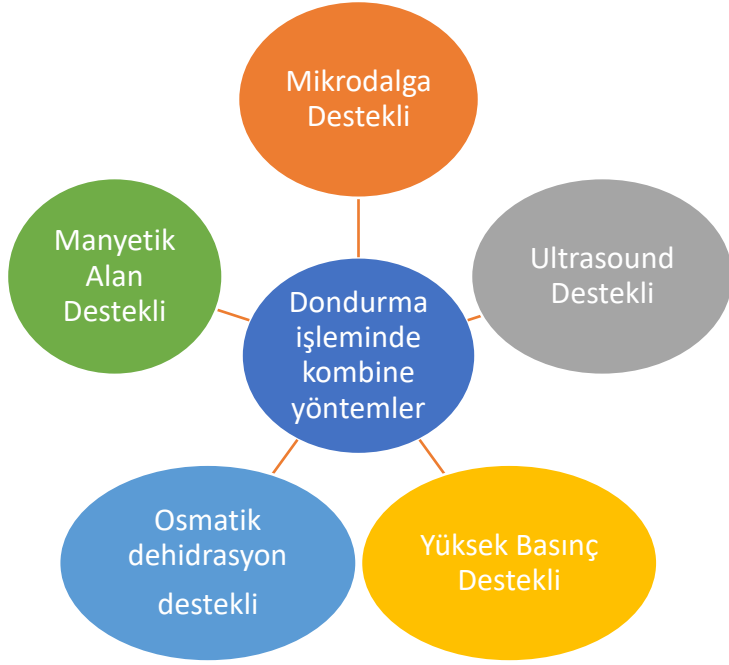
Hızlı dondurma yöntemi: Bu yöntemde ise yavaş dondurma yönteminin daha gelişmiş şeklidir. Dondurma yöntemi daha hızlı ve dondurma süresi daha kısadır. Bu yöntem daha çok sanayi tipi dondurucularda kullanılmaktadır. Yöntemde sürenin kısa olması ve hızlı bir dondurma yapılmasından dolayı gıdaların dokularında oluşan buz kristalleri daha küçük olur. Bu nedenle gıdaların dokusuna verilen zarar yavaş dondurma yöntemine göre daha azdır.

Kriyojenik dondurma yöntemi: Bu yöntemde diğer yöntemlerden farklı olarak sıvı azot veya karbondioksit kullanılarak çok daha düşük sıcaklıklarda dondurma işlemi gerçekleştirilir. Diğer yöntemlere göre çok daha düşük sıcaklıklara ulaşıldığından gıda daha kısa sürede dondurulur. Böylece gıda kalitesi sözü edilen diğer yöntemlere göre daha iyi korunmaktadır.

Vakum dondurma yöntemi: Bu yöntemde gıdalar çok daha düşük basınç altında dondurulur. Özellikle dondurarak kurutma yönteminde; meyve ve sebzelerin kurutulması ve/veya dondurulmasında yararlanılmaktadır (Kaur ve Kumar, 2019).

Dondurma işlemi su aktivitesi yüksek ve kolay bozulabilen gıdaların uzun süre saklanmasında, özellikle vitamin ve mineral içeriği gibi besin değerlerinin, doku ve lezzetinin korunmasında yararlanan yaygın bir ısıl işlemdir. Gıdaların bu özelliklerinin korunmasında dondurma işleminde dikkat edilmesi gereken bazı hususlar bulunmaktadır. Gıdaların uygun ambalaj materyallerinde saklanması (mümkünse hava almayan kaplarda ve/veya dondurucu poşetlerinde muhafaza edilmesi), üzerine etiket yapıştırmak (hangi gıdanın ne zaman dondurulduğunu öğrenme açısından önemli bir bilgi içermekte), gıdaların mümkünse küçük parçalar halinde dondurulmasını sağlamak (gıdalar küçük parçalar halinde dondurulursa daha kısa sürede ve daha hızlı dondurulabilmesi), dondurma işleminin etkinliğini arttırmak için gıdaların bir takım ön işlemlerden geçirilmesi (örneğin bazı sebzelerde dondurma öncesi uygulanan ön haşlama sayesinde hem gıda bünyesinde bulunan serbest hava alınır hem de hacmi küçülerek fazla yer kaplaması önlenir, ayrıca enzimler inaktif hale gelir, dondurma süresi kısalmaya önemli hususlardan bazılarıdır. Geleneksel dondurma yöntemlerinin bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar aşağıda verilmiştir.

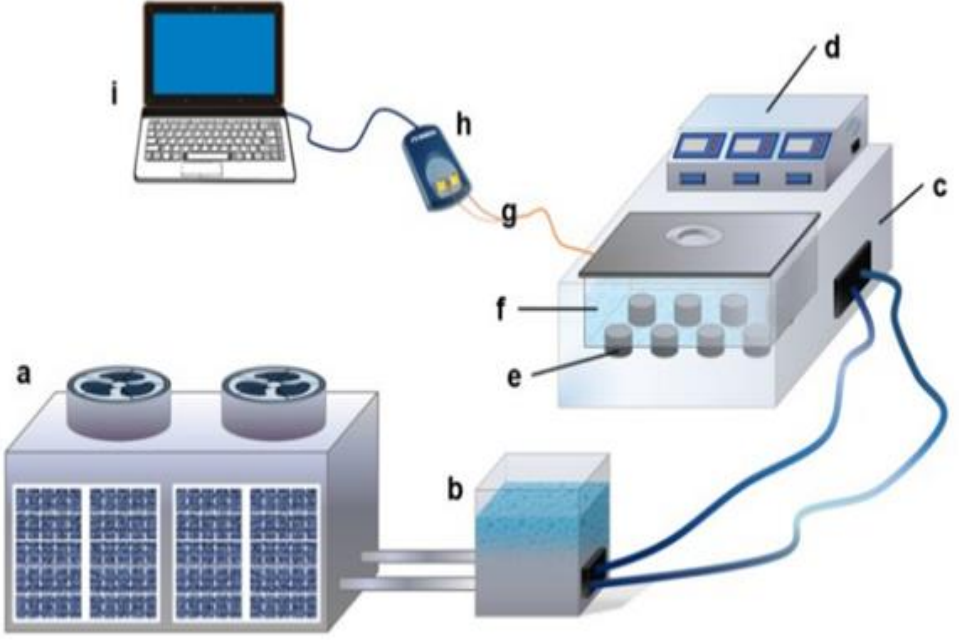
Büyük buz kristallerinin meydana gelmesi: sistemde yavaş dondurma ve durgun hava kullanıldığından gıda ürünlerinde büyük buz kristallerinin oluşumu teşvik edilmektedir. Büyük buz kristallerinin oluşması gıdalarda bazı olumsuz değişikliklerin oluşmasına neden olmaktadır. Gıdanın hücre yapısı bozularak dokusunun zarar görmekte ve gıdalarda tat bozuklukları meydana gelmektedir. Gıdalarda meydana gelen doku bozulması özellikle meyve ve sebzelerde sulu yapının oluşmasına ve bu da kalite kayıplarının meydana gelmesine neden olmaktadır. Gıdalara uygulanan yavaş dondurma işlemiyle vitamin ve mineral kayıpları daha fazla olmaktadır. Gıdaların duyuşal özelliklerinde (renk, tat, aroma, doku) olumsuz değişiklikler meydana gelmektedir. Yavaş dondurma ile gıdaların dondurma süreleri uzamakta buna paralel olarak ta enerji sarfiyatı artmakta ve çevre etkileri de olumsuz yönde olmaktadır. İşlem süresinin uzun olması mikrobiyal inaktivasyon açısından önemli bir risk oluşturmakta ve gıda güvenliğinin sağlanmasında sorunlar ortaya çıkmaktadır. Geleneksel yöntemlerin dezavantajlarını aşmak için çeşitli modern dondurma yöntemleri geliştirilmiştir: Bu teknikler, hızlı ve homojen dondurmaya sağlayarak gıdanın kalitesini artırır. Bu dezavantajları göz önünde bulundurarak, dondurma yöntemlerinizi seçerken modern teknikleri dikkate almak faydalı olabilir (Loayza-Salazar et al., 2024). Tüm bu nedenlerle geleneksel dondurma yöntemleri kullanılıyorsa bu olumsuzlukları azaltmak ve/veya engellemek için yeni tekniklerin bu yöntem ile kombinasyonu gerekmektedir. Tüm bu nedenlerle bu çalışmada geleneksel yöntemle kombine edilebilecek novel yöntemler araştırılmış ve uygulanabilirlikleri tartışılmıştır. Dondurma işleminde kombine edilebilecek novel yöntemler Şekil-1’de verilmiştir (Kaur ve Kumar, 2019).



Şekil 1.Dondurma teknolojisinde kullanılan kombine destek işlemleri.

1. Ultrasound destekli dondurma

Ultrasound tanım olarak yüksek yoğunluklu ve düşük frekanslı akustik dalgalar olarak tarif edilmiştir (Otero et al., 2017; Zhang et al. 2018). Ultrasound destekli dondurma sistemi Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2. Ultrason destekli dondurma sisteminin şematik diyagramı. a: Soğutma makinesi; b: Soğutucu tankı; c: Ultrason destekli dondurma cihazı; d: Kontrol paneli; e: Ultrason dönüştürücü; f: Dondurma odası; g: T tipi termokupl; h: Termokupl veri kaydedici; i: Bilgisayar (Tian et al., 2020).

Ultrasound ile dondurma esnasında dondurulan gıda da ısı ve kütle transfer oranında önemli artışlar meydana gelmektedir. Bunun sonucu olarak gıdanın dokusunda buz kristallerinin oluşumu daha kolay olmakta ve oluşan buz kristalleri küçük, mikroskobik yapıya sahip olup gıda da homojen bir dağılım sergilemektedir. Tüm bunlardan dolayı buz kristallerinin neden olduğu doku zararları önlenebilmektedir (Otero et al., 2017; Zhang et al. 2018). Bu nedenlerden dolayı gıda ürünlerinin doldurulmasını dondurulma süreçlerinde ve dondurma süreçlerinden sonraki aşamalarda dondurma da meydana gelen olumsuzlukları minimize etmek için veya tamamen ortadan kaldırmak için yüksek basınç destekli dondurma sistemi kullanılabilir (Li et al., 2024; Loayza et al., 2024). Et ve et ürünlerinde dondurma ve ardından pişirme sonrasında etin kalitesini ve lezzetini artırabilir. Meyve ve sebzelerde ise meyve ve sebzelerin dokusunu ve besin değerini korumaya yardımcı olabilmektedir (Li et al., 2024; Loayza et al., 2024).

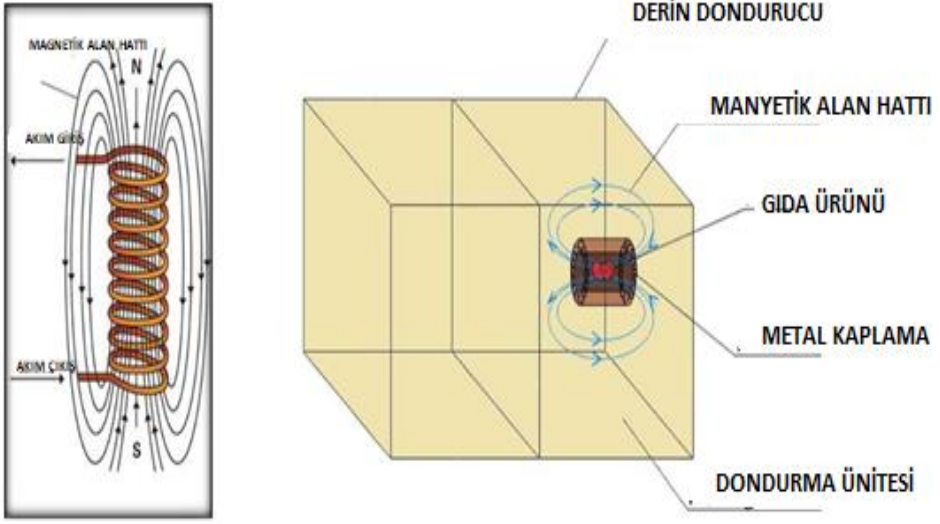
Ultrasound destekli dondurma işleminde gıda ürünlerinden meydana gelen kalite kayıplarının minimize edilmesi özellikle et ürünlerinde Sızıntı suyu kaybının azaltılması yağ oksidasyonunun azalması veya hassasiyetinin düşürülmesi ve renk

Tabii sesini arttırması için kullanılabilir alternatif bir dondurma yöntemidir. Tüm bu nedenlerden dolayı gıda teknolojisinde ultrasound destekli dondurma işlemi kullanımı faydalı olabilmektedir (Li et al., 2024; Loayza et al., 2024). Et ve et ürünlerinde ultrasound destekli dondurma işleminin kullanılması pişirme işlemlerinde özellikle et kalitesinin ve lezzetinin artırılmasında önemli kriterlere sahiptir. Özellikle meyve ve sebzelerde sebze ve meyvelerin dokusunu iyileştirip dokuda meydana gelen zararları azaltıp gıdaların besin değerlerini koruma da bu teknolojinin yardımcı olacağı yapılan çalışmalarda bildirilmiştir (Li et al., 2024; Loayza et al., 2024). Ultrasound destekli dondurma işleminde konu ile ilgili birçok çalışmalar yapılmış ve elde edilen sonuçlar olumlu şekilde incelenmiştir. Yapılan bir çalışmada ultrasonik parametrelerin söz konusu işlemlere tabi tutulacak gıdanın doğasına bağlı olduğu özellikle içsel özellikleri ve işlemin verimliliğini birebir etkilediği bildirilmiştir.

Yapılan çalışmalarda meyve ve sebzelerden yaban mersininin ultrasonik destekli dondurma işlemi ile dondurma sürecini hızlandırarak zaman, enerji tasarrufu sağladığı ve yaban mersininde daha yüksek kaliteli bir ürün elde edildiği rapor edilmiştir. Aynı şekilde çilekte de yapılan ultrason destekli dondurma işleminde eklenmesini daha düşük bir aşırı soğuk ama derecesinde teşvik edilmiş ve dondurma süresince de yüksek bir ışınlama yoğunluk dondurma süresinin kısaldığı rapor edilmiştir. Elmanın ultrasonik destekli dondurulmasında yoğunluk özellikle ustasının yoğunluğu birebir gelmiş ve Elma'daki damlama kayıtları oranının azaldığı ve Elmada hızlı bir çekil çekirdeklenme meydana geldiği bildirilmiştir. Böylece elmanın daha küçük oluşan buz kristalleri sayesinde ürün de kalitenin bildirilmiştir. Pepino meyvesinin aynı teknikle dondurulmasında ise önünde dondurma süresi kısalmış ve ürün yapısı korunmuştur.

2. Manyetik Alan Destekli Dondurma

Manyetik alan destekli dondurma (Manyetik Alan Destekli Dondurma), gıda ürünlerinin dondurulma sürecini geliştirmek için manyetik alanların kullanıldığı bir tekniktir. Manyetik alan destekli dondurma sistemi Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Manyetik Alan Destekli Dondurma

Bu tekniğin avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmiştir.

Avantajları;

- Buz kristallerinin boyutlarındaki küçülme: Daha küçük buz kristallerinin oluşumu gıdanın dokusunun ve kalitesinin korunmasına yardımcı olur.
- Dondurma hızında artış: Manyetik alanlar çekirdeklenme oranını ve kristal büyüme hızını artırarak daha hızlı donma süreleri sağlayabilir.
- Kalitede meydana gelen artış: Manyetik alan destekli dondurma, et ürünlerinde meyve suyu kaybını ve yağ oksidasyonunu azaltabilir, hassasiyeti ve renk stabilitesini iyileştirebilir.

Bu metodun kullanılmasında yararlanılan çalışma mekanizması aşağıda özetlenmiştir.

Manyetik alanlar çekirdeklenme sıcaklığını artırır bu sayede daha fazla çekirdeklenme bölgesinin meydana gelmesine imkan sağlar. Manyetik alanlar buz kristallerinin boyutunu ve dağılımını kontrol etmeye yardımcı olarak hücre yapısına zarar verebilecek büyük kristallerinin oluşmasını engelleyerek buz kristallerinin küçük olmasını teşvik etmektedir.

Manyetik alan bir bobinden elektrik akımı geçirilerek oluşturulmaktadır. Bu amaçla manyetik çekirdeğin etrafında tel bobine sarılır, manyetik alan oluşturulur. Bu, alanların dönmesine ve çekirdekten küçük manyetik alanların oluşmasına neden

olarak jeomanyetik alan etkisini yaratır (Kaur ve Kumar, 2020). Bu yöntemde dondurma işleminde su molekülleri arasındaki hidrojen bağlarını güçlendirerek molekülün kararlılığı ve düzeninin artması sağlanır. Bu sayede yüksek seviyede aşırı soğutmaya yol açarak gıdada mikroskobik, ince ve homojen dağılımlı buz kristalleri oluşmaktadır (Li et al., 2018; Tang et al., 2020; Yang et al., 2020; Panayampadan et al., 2022; Leng et al., 2022).

Tekniğin gıdalardaki uygulamaları aşağıda verilmiştir.

Et ürünlerinde manyetik alan destekli dondurma, dondurma ve ardından pişirme sonrasında etin kalitesini ve lezzetini artırabilir. Meyve ve sebzelerde ise meyve ve sebzelerin dokusunu ve besin değerini korumaya yardımcı olabilir. Konuyla ilgili yapılan literatür çalışmaları aşağıda özetlenmiştir. Yaban mersinin manyetik alan destekli dondurulmasıyla yapılan bir çalışmada dondurma işlemiyle oluşan buz kristallerinin boyutları önemli ölçüde küçülmüştür. Yine yapılan farklı bir çalışmada teknik kiraza uygulanmış, kirazın besin kayıpları ve enerji sarfiyatları düşmüştür. Çeri domatesinde ise hasat sonrası olgunlaşma sürecini geciktirmiş ve ürün rengini korumuştur.

Guavada ise dokunun bütünlüğü korunmuş, dondurma hızı artırılmış ve ürünün kalitesi korunmuştur. Aynı teknik elma, şeftali, hint hünnabı ve salatalıkta kullanıldığında işlem sırasında oluşan buz kristallerinin boyutunun azaltılmasını sağlamıştır (Li et al., 2018; Tang et al., 2020; Yang et al., 2020; Panayampadan et al., 2022; Leng et al., 2022).

3. Yüksek Basınç Destekli Dondurma

Yüksek Basınç Destekli Dondurma gıdalara uygulanan yüksek basınç ile karakterilize edilmektedir. Yöntemin avantajları aşağıda verilmiştir.

- Kalitenin iyileşmesi : Küçük buz kristalleri, gıdanın dokusunu, lezzetini ve besin değerini korumaya yardımcı olur.
- Dondurma işleminin daha hızlı yapılması: Yüksek basınç, dondurma işlemi önemli ölçüde hızlandırarak büyük buz kristallerinin oluşumunu azaltır.
- Raf ömrünün uzatılması: Hızlı dondurma işlemi, tazeliği koruyarak ürünlerin raf ömrünü uzatır.

Gıdalarda uygulanan bu tekniğin mekanizması aşağıda özetlenmiştir.

Yüksek basınç, gıdaya uygulandığında donma noktasını düşürür ve çekirdeklenme ve kristal büyüme süreçlerini hızlandırmaktadır. Kontrollü bir ortamda, gıdanın hücre yapısına zarar vermeyen homojen bir dondurma sağlamaktadır. Bu teknikte gıdaya etki eden basınç sudan buza geçişte önemli bir role sahip olmasından dolayı dondurma işleminde basınç kullanımı büyük bir potansiyele sahiptir. Bu yöntem, işlem sırasında oluşan buz kristallerinin

özelliklerini (boyutunu, miktarı, homojenliği), donma ve çözülme kinetiğini iyileştirebilmektedir (Li et al., 2018).

Bu teknoloji, geleneksel dondurma işleminde sıklıkla görülen donma çatlaması veya büyük buz kristallerinin oluşması sorunlarını önemli ölçüde azaltmaktadır (Otero et al., 2000).

Et ve deniz ürünlerinde yüksek basınçlı dondurma, et ve deniz ürünlerinin kalitesini ve dokusunu iyileştirebilir. Meyve ve sebzelerde ise besin değeri ve dokusunu korumaya yardımcı olur. Bu teknolojinin havuç ve çin lahanasında kullanılabilirliği potansiyeli yüksektir (Fuchigami et al., 1997; Fuchigami et al., 1998).

Şeftalide de aynı teknik kullanıldığında homojen bir çekirdeklenmeye yol açmış ve ürünün yapısal kalitesi korunmuştur (Otero et al., 2000).

4. Mikrodalga Destekli Dondurma

Mikrodalga tekniği, su moleküllerinin dönme hareketi yoluyla termal enerji üreten alternatif bir elektromanyetik alana dayanan bir yöntemdir. Mikrodalgaların frekansı tipik olarak 300 ila 3000 MHz arasında değiştiğinden, bu alan su ve iyonik/polar moleküllerde hızlı dipol hareketine neden olmaktadır (Xin et al., 2015). Su moleküllerinin sürtünme ve deformasyonu ortamın sıcaklığı artarken, mikrodalgalar tarafından dağıtılan enerji oluşan buz kristallerinin kısmen erimesini teşvik etmektedir (Curet, 2008).

Mikrodalga fırın kullanarak yapılan mikrodalga destekli dondurma daha hızlı ve daha verimli bir dondurma tekniğidir. Mikrodalga fırınlar, gıdaları çok kısa sürede dondurarak büyük buz kristallerinin oluşumunu önlemektedir. Bu metotla dondurulmuş gıdalar, daha iyi kaliteye ve daha uzun bir raf ömrüne sahip olmaktadır. Bu yöntemin avantajları aşağıda verilmiştir.

- Dondurma İşleminin Daha Hızlı Gerçekleşmesi: Mikrodalga fırınlar, gıdaları sadece birkaç dakika içinde dondurabilmektedir.
- Kalitenin korunması: Küçük buz kristalleri, gıdanın dokusunu ve lezzetini korumaktadır.
- Süre Kısalarak Enerji Tasarrufunun Sağlanması: Mikrodalga fırınlar, gıdaları hızlı bir şekilde dondurarak enerji tüketimini azaltır.

Dondurma işlemi; küçük partili ürünlerin dondurulmasında daha etkili bir şekilde yapılabilir. Bu yöntemle dondurulmuş gıdalar, daha hızlı ve verimli bir şekilde üretilebilir. Yöntem ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir. Patateste yapılan çalışmada patatesin hücresel, dokusal ve organoleptik yapısının kalitesi korunmuş, lahanada ürünün histolojik yapısını ve havuçta besin değerini korumuştur (Duan et al., 2007; Yan et al., 2010; Jha et al., 2020).

5. Osmotik Dehidrasyon Destekli Dondurma

Osmotik dehidrasyon destekli dondurma, gıdaların dondurulmasında yararlanılan diğer bir yöntemdir. Yöntemde amaç, düşük nem seviyesine (aw 0,70'in altında) veya orta nem seviyesine (aw 0,70 ila 0,85 arasında) sahip gıdalar üretmektir. Osmotik dehidrasyon, osmotik bir mekanizma ile gıdadan suyu uzaklaştırmak için gıda ürününün hipertonic bir çözelti (düşük aw 'ne sahip sukroz, bal, glukoz, fruktoz, sorbitol, mısır şurubu gibi şeker ve gliserol, sorbitol, eritritol gibi polioller, laktat ve askorbik asit gibi organik asitler) ile muamele edilmesinden oluşmaktadır (González-Pérez et al., 2021).

Bu teknik, gıdaların su içeriğini kontrol altında azaltarak, daha hızlı ve verimli bir şekilde dondurulmasını sağlar. Bu yöntemin avantajları aşağıda verilmiştir. Dondurma süresinin kısalması, daha iyi kalitede ürün eldesi, enerji tasarrufunun sağlanmasıdır. Yöntemin mekanizması ise osmotik çözeltiler kullanılarak, bu çözeltilerin, gıdaların su içeriğini çekerek suyun difüzyon yoluyla gıdadan çıkmasını sağlamaktadırlar. Meyve ve sebzelerde, et ve deniz ürünlerinde su içeriğini azaltarak daha hızlı dondurma sağlamaktadır. Böylece gıdaların daha hızlı ve verimli bir şekilde dondurulmasını sağlayarak kaliteyi koruyarak enerji tasarrufu sağlar. Yöntemin çileğe uygulandığı bir çalışmada, dondurma işleminden önce osmotik ön işlemin kullanılmasının, meyvede önemli aroma bileşiklerinin üretimini artırdığı ve böylece kalite kaybını önlediği için avantajlı olduğu belirlenmiştir (Talens et al., 2002).

Kivide yapılan çalışmada ise uçucu fraksiyonunda, osmotik dehidrasyon esterlerin oluşmasına neden olurken aldehit ve alkol varlığını azalttığı bildirilmiştir (Talens et al., 2003).

Arazá meyvesine uygulanan bu teknolojinin dondurma oranını iyileştirdiğini, damlama kaybını önlediğini ve bunun da daha yüksek antioksidan kapasiteye sahip polifenollerin biyoerişilebilirliğinin artmasıyla sonuçlandığını göstermiştir (Reyes ve Lanari, 2023).

TARTIŞMA VE SONUÇ

Gıda teknolojisinin gelişmesine paralel olarak dondurma yöntemlerinde de yenilikler meydana gelmektedir. Gıdaların dondurulmasında başlangıçta gıdalarda duyusal kalite ve depolama üzerinde durulmuştur. Günümüzde ise hızlı dondurma yöntemlerinin ortaya çıkması, gıdanın besin değerinin korunması, mikro yapı, gıdalarda antioksidan aktivite ve/veya kapasite, enzimatik değişiklikler ile ilgili sürecin optimizasyonu üzerinde durulmaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışmalar dondurma sürecinin optimizasyonu ve gıdanın besin değerinin korunmasını kapsamaktadır. Depolama sürecinin optimizasyonunu belirlenmesini etkileyen en önemli parametreler enzim aktivitesi, mikrobiyal yük ve buz kristallerinin oluşumu,

büyüklüğü ve homojenliğidir. Bu parametreleri en iyi şekilde yönetebilmek için mikrodalga, yüksek basınç, magnetik alan, osmatik dehidrasyon gibi novel tekniklerin kullanılması gereklidir. Bu tekniklerin kullanımını sınırlayan en önemli faktör maliyettir. Özellikle alet ve ekipman, soğutucu akışkan ve soğutma ortamı maliyeti arttıran unsurlardır. Geleneksel dondurma yöntemlerine alternatif olarak izokorik dondurma yöntemi gibi yöntemlerin kullanımı gıdaların dondurulmasında kullanıldığında gıdanın bünyesindeki suyun %45'ini sıvı halde tutarak buz kristallerinin genişlemesinden kaynaklanan doku hasarını önler ve bir gıda ürününü dondurmak için gereken enerjiyi geleneksel izobarik dondurmaya kıyasla %65-70'e kadar azaltabilir. Bunun yanı sıra novel teknolojilerin geleneksel dondurma yöntemiyle kombinasyonu ile geleneksel yöntemlerde oluşan dezavantajları azaltabilme potansiyeli bulunmaktadır. Özellikle geleneksel dondurma yöntemleriyle yapılan dondurma işlemlerinde büyük buz kristalleri oluşmakta oluşan bu buz kristalleri doku zararına neden olmakta, çözdürme aşamasında sızıntı suyu kaybı belirginleşmekte ve besin değerlerinde önemli kayıplar meydana gelmektedir. Bu nedenle novel gıda işleme yöntemleri önem kazanmaktadır. Söz konusu olumsuzlukları engellemek için sözü edilen novel yöntemler kombine olarak kullanıldığında meydana gelen buz kristallerinin boyutları küçülmekte, homojen bir dağılım sergilemekte, doku hasarı ve besin kayıpları azalmaktadır.

Tüm bunların gerçekleşmesi kombine yöntemlerle geleneksel yöntem arasında sinerji oluşmasına bağlıdır. Bu nedenle her gıda için farklı kombine yöntemler gereklidir. Yeni kombine teknolojiler dondurulmuş gıda endüstrisinde önemli bir ilerleme anlamına gelmektedir, ancak bu yöntemlerin etki mekanizmalarını ve gıdalarda dondurma sürecinin optimizasyonu ile ilişkilerini daha iyi anlamak için bu teknolojiler üzerinde araştırmaların yoğunlaşması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Cao X, Wang Z, Bai G, Zhu D, & Lü C (2021) Effect of ultrasound on freezing characteristics of fruits with different porosities. *Food Sci* 42(7):128–133. <https://www.spkx.net.cn/EN/10.7506/spkx1002-6630-20200327-394>
- Cheng X-F, Zhang M, Adhikari B, Islam MN, & Xu B-G (2014) Effect of ultrasound irradiation on some freezing parameters of ultrasound-assisted immersion freezing of strawberries. *Int J Refrig* 44:49–55. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.04.017>
- Curet S (2008) Traitements micro-ondes et transferts de chaleur en milieu multiphasique. Doctoral dissertation, Nantes
- Delgado AE, Zheng L, & Sun D-W (2009) Influence of ultrasound on freezing rate of immersion-frozen apples. *Food Bioprocess Technol* 2(3):263–270. <https://doi.org/10.1007/s11947-008-0111-9>
- Duan X, Zhang M, & Mujumdar AS (2007) Studies on the microwave freeze drying technique and sterilization characteristics of cabbage. *Dry Technol* 25(10):1725–1731. <https://doi.org/10.1080/07373930701591044>
- Fuchigami M, Kato N, & Teramoto AI (1997) high-pressure-freezing effects on textural quality of carrots. *J Food Sci* 62(4):804–808. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1997.tb15459.x>
- Fuchigami M, Kato N, & Teramoto AI (1998) High-pressure-freezing effects on textural quality of chinese cabbage. *J Food Sci* 63(1):122–125. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1998.tb15690.x>
- González-Pérez JE, Ramírez-Corona N, & López-Malo A (2021) Mass transfer during osmotic dehydration of fruits and vegetables: process factors and non-thermal methods. *Food Eng Rev* 13(2):344–374. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09276-3>
- Jha PK, Chevallier S, Xanthakis E, Jury V, & Le-Bail A (2020) Effect of innovative microwave assisted freezing (MAF) on the quality attributes of apples and potatoes. *Food Chem* 309:125594. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125594>
- Kaur, M., & Kumar, M. (2019). An Innovation in Magnetic Field Assisted Freezing of Perishable Fruits and Vegetables: A Review. *Food Reviews International*, 1-20.
- Kaur, M., & Kumar, M. (2020). An innovation in magnetic field assisted freezing of perishable fruits and vegetables: A review. *Food Reviews International*, 36(8), 761-780.
- Leng D, Zhang H, Tian C, Li P, Kong F, & Zhan B (2022) Static magnetic field assisted freezing of four kinds of fruits and vegetables: Micro and macro effects: Congélation assistée par champ magnétique statique de quatre types

- de fruits et légumes: micro et macro effets. *Int J Refrig.* <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.10.018>
- Li D, Zhu Z, & Sun D-W (2018) Effects of freezing on cell structure of fresh cellular food materials: A review. *Trends Food Sci Technol* 75:46–55. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.02.019>
- Li, J., Sun, C., Ma, W., Wen, K., Wang, Y., Yue, X., & Bai, Y. (2024). The Effects of Assisted Freezing with Different Ultrasound Power Rates on the Quality and Flavor of Braised Beef. *Foods*, 13(10), 1566.
- Loayza-Salazar, S., Siche, R., Vegas, C., Chávez-Llerena, R. T., Encina-Zelada, C. R., Calla-Florez, M., & Comettant-Rabanal, R. (2024). Novel Technologies in the Freezing Process and Their Impact on the Quality of Fruits and Vegetables. *Food Engineering Reviews*, 1-25.
- Nowak KW, Zielinska M, & Waszkielis KM (2019) The effect of ultrasound and freezing/thawing treatment on the physical properties of blueberries. *Food Sci Biotechnol* 28(3):741–749. <https://doi.org/10.1007/s10068-018-0528-5>
- Otero L, Martino M, Zaritzky N, Solas M, & Sanz PD (2000) Preservation of microstructure in peach and mango during highpressure-shift freezing. *J Food Sci* 65(3):466–470. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2000.tb16029.x>
- Otero L, Pérez-Mateos M, Rodríguez AC, & Sanz PD (2017) Electromagnetic freezing: Effects of weak oscillating magnetic fields on crab sticks. *J Food Eng* 200:87–94. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.12.018>
- Panayampadan AS, Shafiq Alam M, Aslam R, Kumar Gupta S, & Kaur Sidhu G (2022) Effects of alternating magnetic field on freezing of minimally processed guava. *LWT* 163:113544. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113544>
- Reyes-Alvarez CA, & Lanari MC (2023) Effect of freezing, osmodehydro-freezing, freeze-drying and osmodehydro-freeze-drying on the physicochemical and nutritional properties of arazá (*Eugenia stipitata* McVaugh). *Food Chemistry Advances* 3:100496. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100496>
- Talens P, Escriche I, Martínez-Navarrete N, & Chiralt A (2003) Influence of osmotic dehydration and freezing on the volatile profile of kiwi fruit. *Food Res Int* 36(6):635–642. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(03\)00016-4](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(03)00016-4)
- Talens P, Escriche I, Martínez-Navarrete N, & Chiralt A (2002) Study of the influence of osmotic dehydration and freezing on the volatile profile of strawberries. *J Food Sci* 67(5):1648–1653. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb08699.x>
- Tang J, Shao S, & Tian C (2020) Effects of the magnetic field on the freezing process of blueberry. *Int J Refrig* 113:288–295. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.12.022>

- Tang J, Zhang H, Tian C, & Shao S (2020) Effects of different magnetic fields on the freezing parameters of cherry. *J Food Eng* 278:109949. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.109949>
- Tian, Y., Chen, Z., Zhu, Z., & Sun, D. W. (2020). Effects of tissue pre-degassing followed by ultrasound-assisted freezing on freezing efficiency and quality attributes of radishes. *Ultrasonics Sonochemistry*, 67, 105162.
- Xin Y, Zhang M, Xu B, Adhikari B, & Sun J (2015) Research trends in selected blanching pretreatments and quick freezing technologies as applied in fruits and vegetables: A review. *Int J Refrig* 57:11–25. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.04.015>
- Yan W-Q, Zhang M, Huang L-L, Tang J, Mujumdar AS, & Sun J-C (2010) Studies on different combined microwave drying of carrot pieces. *Int J Food Sci Technol* 45(10):2141–2148. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02380.x>
- Yang Z, Zhang L, Zhao S, Luo N, & Deng Q (2020) Comparison study of static and alternating magnetic field treatments on the quality preservation effect of cherry tomato at low temperature. *J Food Process Eng* 43(9):e13453. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13453>
- Zhang P, Zhu Z, & Sun D-W (2018) Using power ultrasound to accelerate food freezing processes: Effects on freezing efficiency and food microstructure. *Crit Rev Food Sci Nutr* 58(16):2842–2853. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1482528>