

Makine Teknolojileri ve Taşıt Enerji Sektörleri için Malzeme ve Tasarım Metodları II

Editör
MURAT MAKARACI

BİDGE Yayınları

Makine Teknolojileri ve Taşıt Enerji Sektörleri İçin Malzeme ve
Tasarım Metodları II

Editör: Doç. Dr. Murat MAKARACI

ISBN: 978-625-6707-40-5

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 25.12.2023

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için
yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni
olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



ÖNSÖZ

Mühendislik ve teknolojik gelişmelerin temelini üretici ve tüketiciye uygun standartlarda, yüksek performanslı, verimliliği kabul edilebilir ve maliyet etkin çözümler oluşturmaktadır. Bu bağlamda, en temel ihtiyaçlar olan su, buğday (gıda) ve petrol (enerji) eksenli döngülerinin yanında talep edilen hız, dayanıklılık ve kalite faktörlerini içeren inovatif yaklaşımlar teknolojiye yön verebilmektedir.

Makine Teknolojileri Taşıt ve Enerji Sektörlerine Yönelik Malzeme ve Tasarım Metodları II isimli bu esere 8 adet çalışma grubu katkı sağlamıştır.

Kitapda akışkanların kullanımı ve analizleri 4 bölümde ele alınmıştır. Bölüm-4 de hayvan ve bitkilerin biyomekaniksel davranışlarını modelleyen biyomimetik tabanlı yapıların analizi ile helisel borunun CFD analizi bulunmaktadır. Bölüm-5 nanoakışkanlar ve 3D yazıcılarda kullanılan FDM eriyik modelleme, Bölüm-6 biyodizel yakıt kullanımı ve motor yağlamada Borik Asit katkısını ve Bölüm-7 absorpsiyonlu-buhar sıkıştırırmalı soğutma sisteminin ekserji analizi ile tekerlek göbek ve fren diskinin CFD ile ısı transfer etkilerini incelemektedir.

Katkı sunan yazarlarımıza teşekkür ederken, sonuçların ülkemize ve dünyaya faydalı olması temennilerimi arz eder, saygılarımı sunarım.

Editör

Doç.Dr. Murat MAKARACI

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	3
İÇİNDEKİLER	4
Elektrikli İnsansız Hava Aracı İtki Sistemi Tasarımında Kullanılabilecek Biyomimetik Tabanlı Yapılar	6
Hüdayim BAŞAK.....	6
Ahmet TAVŞAN.....	6
Helisel Tip Isı Borusunda Akışkan Davranışının Debi İle Değişim Etkisi	62
Mehmet Akif KARTAL	62

Eriyik Yığılma Modelleme (Fdm) Tipi 3d Yazıcılarda Kullanılan Filament Türleri	75
Kubilay HAN	75
Muhammed Asım KESERCİOĞLU	75
Adem TÜYLÜ.....	75
Nanoakışkan Kavramı Ve Mikrokanallarda Kullanımı	95
Hakan TÜRKER.....	95
Elif ÖĞÜT	95
Gıda Kaynaklı Alternatif Yakıtlar: Biyodizel	111
Aslı ABDULVAHİTOĞLU	111
İki Zamanlı Motorların Yağlama Yağında Katkı Olarak Borik Asit Kullanımı	175
Emre ARABACI	175
Bayram KILIÇ.....	175
Gözde KİLÖREN	175
Absorbsiyonlu-Buhar Sıkıştırılmalı Kaskad Soğutma Sisteminin Enerji, Ekserji ve Çevresel Analizi	204
Ali Haydar GÜNDÜZ	204
Canan CİMŞİT	204
Standart Bir Tekerlek Göbeği Ve Fren Disk Mekanizmasında Ortaya Çıkan Isının Termal Davranışına Genel Bir Bakış	231
M.C. KÜÇÜK.....	231
L. YÜNLÜ.....	231

BÖLÜM I

Elektrikli İnsansız Hava Aracı İtke Sistemi Tasarımında Kullanılabilecek Biyomimetik Tabanlı Yapılar

Hüdayim BAŞAK¹
Ahmet TAVŞAN²

Giriş

Aerodinamik verimin artışı amaçlayan pervanelerin tasarımıyla ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaları genel olarak değerlendirdiğimizde aslında hemen hemen hepsinin doğadan esinlenilmiş birer tasarımlar veya buluşlar olduğu görülür. Bu genellemeyi süpersonik hızlarda uçan hava araçları için yapmamız pek mümkün olmasa da havacılığın geneli itibariyle tasarımlar biyomimetik disiplini ışığında açıklanabilir. Pervanelerin

¹ Prof. Dr., Gazi Üniversitesi

² Y. Lisans Öğrenci, Gazi Üniversitesi

Not: Bu kitap bölümü, Danışman Hüdayim Başak ve Öğrenci Ahmet Tavşan'ın "Elektrikli İHA Sistemleri İçin Biyomimetik Pervane Tasarımı" isimli Yüksek Lisans tezinden faydalanılarak oluşturulmuştur.

tasarımında pek çok numerik yöntem mevcuttur ancak bu yöntemler bazı kabul ve özel varsayımlar ışığında sonuca sadece yaklaşmaktadırlar. Kanat kaldırma kuvvetinin kesin doğru veya nasıl bir fiziği olduğuna dair günümüzde hala kesin bir modelleme mevcut değildir. Bu nedenle pek çok CFD yazılımında deneysel veriler ışığında kalibrasyon paketleri mevcuttur. Çalışılan akışkanın hızına, viskozitesine veya sıcaklığına bağlı olarak en doğru sonuçları veren modeller ayn aynadır. Sonlu elemanlar analizi yöntemiyle gerçekleştirilen CFD uygulamaları bu modelleri analiz koşullarına uygun olarak otomatik şekilde seçer. Dolayısıyla geçmiş çalışmaları incelerken öncelikle doğadaki canlıların uçuşu üzerinde yapılmış ve onları aerodinamik anlamda inceleyen araştırmalar incelenmiştir. Bu araştırmalar ışığında, bu çalışma sonucunda elde edilen pervane tasarımında başvurulması amacıyla biyomimetik tasarım fikirleri veri tabanı oluşturulmuştur. Kaldırma kuvvetinin neden ve nasıl olduğuna dair literatürdeki açıklamalar incelenerek biyomimetik yaklaşımın neden önemli olduğuna değinilmiştir. Pervane tasarımlarıyla ilgili daha önce yapılmış akademik çalışmalar içerisinde biyomimetik esinlenmelerin ağır bastığı çalışmalar incelenerek bu alanda elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

Doğadaki Canlıların Kanat Yapılarının Araştırılması

Detaylandırılan sorunlara çözüm sunabilecek canlılar ve özellikleri bu kısımda listelenerek bir veri tabanı oluşturulacaktır. Bu veri tabanı daha sonra biyolojik çözümlerin değerlendirilmesi başlığı altında sorunlara göre ilişkilendirilecek ve sonraki aşamada tasarım hipotezlerine dönüştürülecektir.

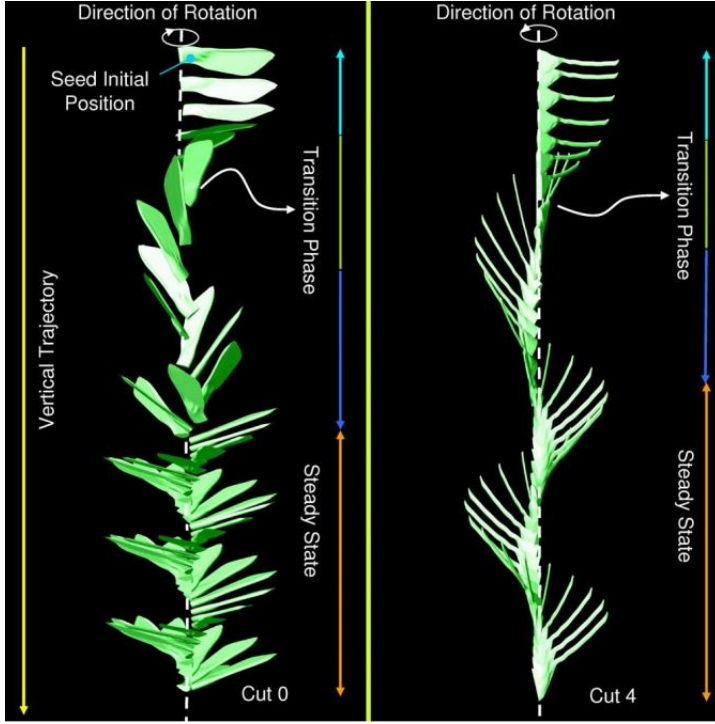
Akçaağaç Tohumu (Maple seed)

Kanatlı tohumlardan biri olan Akçaağaç tohumu; otodönerkanatlı bir tohumdur. Tohum dönerek yavaşça alçalır ve rüzgâr bu süre içerisinde onları çok geniş alanlara yayacak şekilde savurur. Bu sayede uzun mesafeleri aşarak uzak arazilerde olası tenha ortamlara ulaşarak başarılı bir şekilde toprağa yerleşebilirler.



Şekil 1. Akçaağaç tohumunun görseli (dalında solda, düşmüş tohum sağda)

Dönerek girdap yaratan akçaağaç tohumu; hücum kenarının üst yüzeyinde bir girdap oluşturur bu üst kısımdaki basıncı düşürür ve bir kaldırma kuvveti oluşturur. Kanat üzerinde oluşan kaldırma kuvveti yaprağın aerodinamik merkezine etkiyerek ağırlığın yoğunlaştığı tohumu döndürmeye çalışır. Bu dönüşle birlikte kanat yere paralel konuma gelmeye çalışır. Yere paralellik arttıkça kaldırma kuvveti artar irtifa kaybı hızı azalır ancak döndüren aerodinamik kuvvet tohumu kaldırmaya çalıştığı için tohumun dönüş hızı azalır. Dönüş hızı azaldığı için kanadın yere paralelliği azalır, düşme hızı artar bu sayede tohumu çeviren kuvvet artar. Bu şekilde bir denge oluşur ve düşüş hızı sabitlenir (Spicer & Niklas, 1993). Bu geçişin incelenmiş olduğu çalışmadan aşamalar rahatlıkla görülebilir.



Şekil 2. Hızlı kamera kullanılarak modellenmiş akçağacı tohumunun düşüşü (Varshney, 2011)

Otorotasyonel akçağacı tohumu üzerinde yapılan detaylı çalışmalarda bu tohumun düşük hızı ve küçük boyutuna rağmen beklenmedik bir kanat kaldırma kuvveti oluşturabildiği gözlemlenmiştir. Hücum kenarı vorteksi (LEV) olarak adlandırılan bu fenomen kanat profilinin çok yüksek hücum açılarında dahi stall olmadan kaldırma kuvveti üretebildiğini göstermiştir (Lentink, 2009). Ticari ürünler arasında Powercone ürünü bu tohumdan esinlenilerek geliştirilmiştir.

Javan Salatalık Tohumu (*Alsomitra macrocarpa*)

Javan salatalığı tropik ormanlarda diğer ağaçlara sarılarak yükselen bir tür asmadır. En yüksek tepeye ulaştığında yüzlerce kanatlı tohumunu içeren bir koza oluşturur. Samara adı verilen bu

tohumlar kâğıt inceliğindeki kanatlarıyla stabil bir uçuş gerçekleştirerek uzak mesafelere erişebilir. Tohumun tasarımı 12 derecelik bir alçalma açısını koruyarak saniyede 0,4 metre alçalma sağlayacak kadar verimlidir. Bu değer otodönerkanatlı tohumlarda (Akça ağaç tohumu gibi) 1 metredir. Javan salatalık tohumunun bu yeteneği havadaki termali yakalayabilen bir yapıya sahip olmasından kaynaklanır. Tohum kozadan ayrıldığı anda havada daireler çizerek alçalma eğilimindedir. Bu daireler olası bir termal akımla kesişirse bu termalden azami düzeyde faydalanır. Düşüş süresi boyunca rüzgâr vasıtasıyla da mesafe kat eder. Tohum kozadan çıkmak için belirli bir rüzgâr şiddetine ihtiyaç duyar bu sayede rüzgârsız bir havada yol almasının önüne geçilmiş olur (Azuma & Okuno, 1987:274).



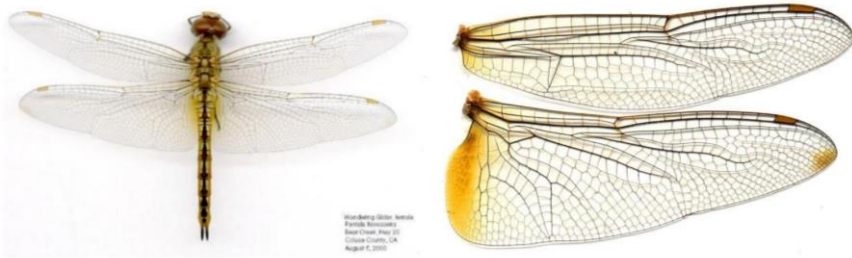
Şekil 3. Javan Salatalık Tohumunun gösterimi

Göçebe Yusufçuk (Dragonfly)

Yusufçuk böceği, odonata takımında bulunan ve kanatlarını dinlenme esnasında yanlara açık olarak yatay konumlandırmalarından dolayı kızıböceklerinden ayrılan bir alt takımdır. Büyük ve birleşik gözleri vardır. Güçlü ve saydam kanatlarıyla göz alıcı renkleri sahiptir. Uzun vücutlarıyla bilinirler. Gövdeleri kuvvetli yapıdadır ve düz değildir. Hareketleri hızlı ve sürekli. Bağırsak solunumu yaparlar, göller ve durgun sularda yaşarlar. Pantala flavescens olarak adlandırılan türü globe skimmer, globe wanderer veya wandering glider olarak da bilinir. Bu kısımda

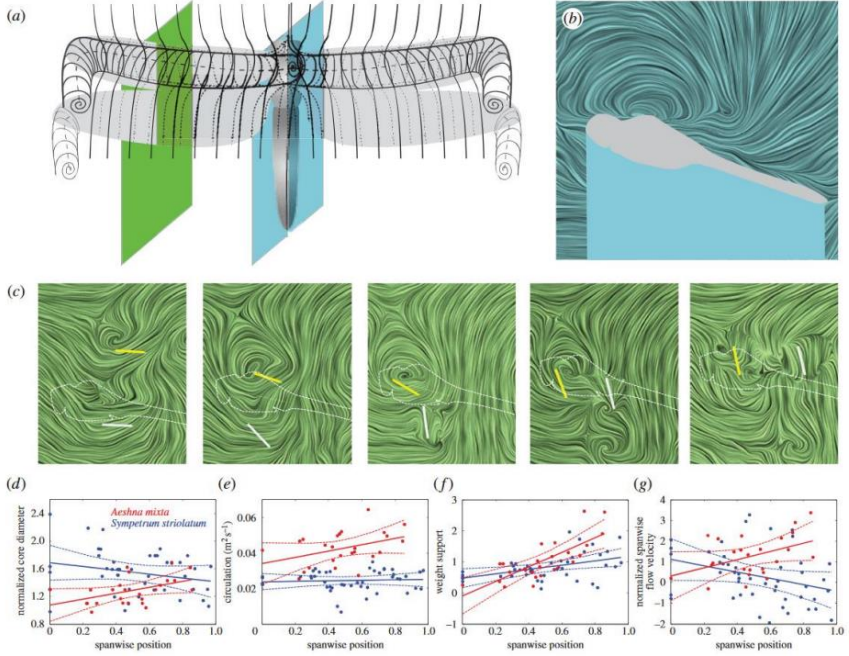
bu türden bahsedilecektir ve göçebe yusufçuk olarak adlandırılacaktır.

Göçebe yusufçuk böceği 18,000 km menzili aşan yıllık göçler gerçekleştirerek böcek dünyasındaki bilinen en uzun menzil göç rekorunu da elinde tutmaktadır (Anderson, 2009). Göçebe yusufçuk böcekleri 5m/s uçuş hızlarına çıkarken aynı zamanda termalleri kullanarak süzülebilir ve yüksek verimle uçabilmektedirler. Bu yetenekleri şüphesiz uzun yıllar süren adaptasyon sürecinin bir sonucudur. Göçebe yusufçuğun kanatları çeşitli geometrik ağlarla kaplıdır bu sayede mukavemet artar ve karmaşık aerodinamik kanat şekli oluşturulur (Vogel, 2013, p. 439).



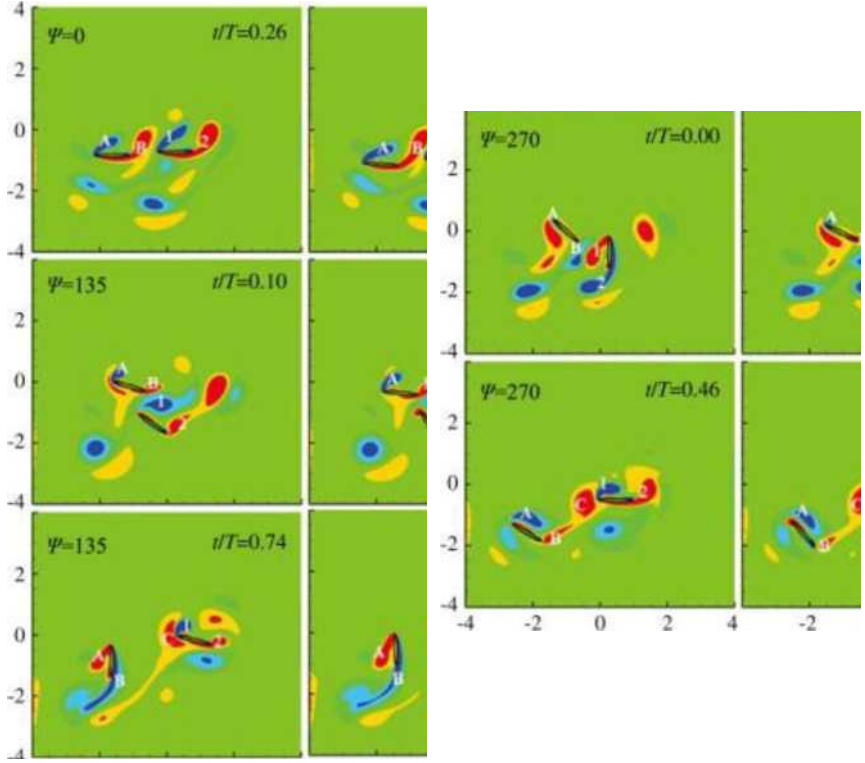
Şekil 4. Yusufçuk böceğinin kanatları

Göçebe yusufçuklar kanatlarını ortalama 40Hz hızında çırparak uçuşlarını stabil olarak sürdürürler. Havadaki küçük böcekleri yakalayabilmek için yusufçuk böcekleri çık hızlı manevralar yapabilmelidirler. Bu hızı yakalayabilmek için yusufçuk böcekleri kanatlarını belirli bir faz açısıyla çırpırlar. Ön ve arka kanatlar farklı kaslar tarafından kontrol edildiği için farklı uçuş konumları için farklı uçuş profilleri oluşturabilirler. Faz açısı ve kanat çırpma genliği havada askıda kalma ve ileri uçuş arasındaki geçişleri ayarlar. Kanatların birbirlerine zıt yönlü çırpılması kanatların birbirlerine indüklenmiş havayı yönlendirmelerini sağlar bu sayede yusufçuk böceği aynı kaldırma kuvvetini üretirken aerodinamik verimliliğini artırır (Wang, 2005).



Şekil 5. Bir yusufçuğun kanat çırpma aerodinamiği, ön kanatları ve göğüs kafesi üzerinde kanat hücum kenan vorteksleri ve arka kanatlar üzerine devam eden akışın gösterimi (a) (Bomphrey, 2016)

Yusufçuk böceği düşük reynold sayılarında bir uçuş gerçekleştirir aynı zamanda çok yüksek hücum açılarında çıkmasından dolayı hücum kenan girdapları oluşturur (leading edge vortex) LEV. LEV hücum kenanında akışkanın kanat yüzeyinden ayrılması ve yine kanat üzerinde kalacak şekilde tekrar birleşmesiyle oluşur. Aynılmanın başladığı yerden itibaren birleşmenin olduğu noktaya kadar bir girdap oluşur ve bu girdap vakum açığa çıkar. Açığa çıkan vakum akışkanı kanat yüzeyinde ilerlemeye zorlarken düz kanat profilinin sanki bir bombeli kanat profili gibi etki etmesini sağlar. Dolayısıyla ilave kaldırma kuvvetiyle uçuş verimi artmış olur (Sane, 2003).

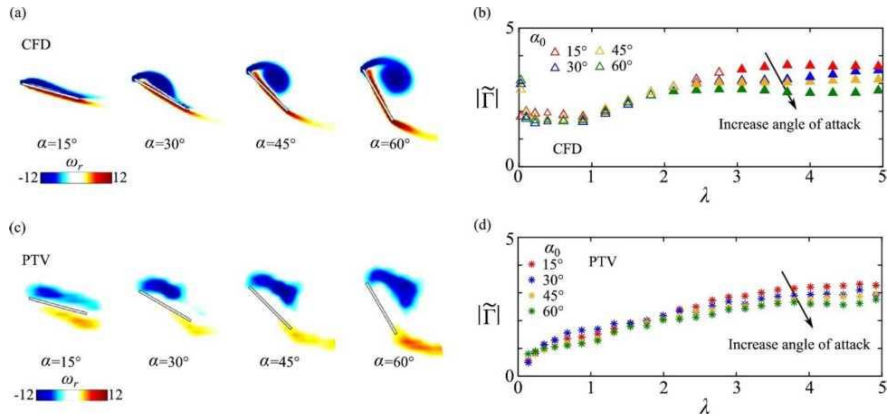


Şekil 6. Kanat faz açılarına göre oluşan vorteksin gösterimi (a) arka kanatlar faz: 0 , (b) ön kanatlar faz: 0, (c) arka kanatlar faz: 135 , ve (d) ön kanatlar faz: 270 (Xie & Huang, 2015)

Xie ve Huang, (2015) çalışmasında ikili çırpın kanadın aerodinamiği, immersed boundary yöntemi kullanılarak, havada asılı uçuşta 2 boyutlu bir yusufçuk modeli olarak simüle edilmiştir. Ön kanat ve arka kanat arasındaki etkileşim, kanat hareketlerinin faz farkı ve iki kanat arasındaki mesafe değiştirilerek incelenmiştir. Sonuçlar, belirli kinematik koşullar altında iki kanadın etkileşiminin önemli olduğunu göstermiştir. Ara mesafe arttıkça, ön ve arka kanadın kaldırma katsayıları yani dolayısıyla toplam kaldırma kuvvetinin, faz farkıyla daha az ilişkili olduğu görülmüştür. Çırpınan kanatların etrafındaki girdap alanları incelenerek, girdap-girdap

veya girdap-kanat etkileşimi ile kaldırma artışının açıklanması için çeşitli mekanizmalar açıklanmıştır. İlk etkileşim modu, ön kanadın firar kenan girdabını etkileyerek kaldırma kuvvetini ortaya çıkarması olarak tanımlanmıştır. Daha sonra, ikinci etkileşim modunun daha karmaşık olduğu ve ön kanadın firar kenarı girdabı ile arka kanadın hücum ve firar kenan girdaplarının etkileşiminden kaynaklandığı ve bunun da arka kanadın kaldırma kuvvetini önemli ölçüde artırabildiği gösterilmiştir. İki kanadın birbirleri üzerine indükleyerek etki ettirdikleri bu fenomenin, aerodinamik performansları bakımından ön kanattan daha çok arka kanatların verimini artırdığı gösterilmiştir (Xie & Huang, 2015).

Chen (2020) çalışmasında dönen ve çırpan kanatların düşük reynold sayılarında oluşturdukları kanat hücum kenarı girdaplarını nümerik ve deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada hücum kenan girdaplarının yüksek hücum açılarında ortaya çıktığı sonuçları elde edilmiştir. Ayrıca HAD ve PTV sonuçlarındaki farklılıkların PTV ölçümlerindeki yüzeye yakın akış parçacıklarının takip edilememesinden dolayı meydana geldiği belirtilmiştir (Chen, 2020).



Şekil 7. Hücum kenan girdaplarının görselleştirilmesi (a)HAD (b)PTV sonuçları

Arılar

Arılar, zar kanatlılar takımında bulunan ve Apoidea familyası içerisinde bulunan tüm böceklerle verilen isimdir. Zar kanatlılar; vücutlarında enine ve boyuna damarlara sahip olan ve iki çift saydam zardan kanatlarının olmasıyla bilinirler. Arıların gövdesi baş, göğüs ve karın olarak üç bölümden oluşur. Gövdeleri yumuşak yapıda olan bir kıl örtüsüyle kaplıdır. Tüylerin rengi türe göre değişkendir. Bir bal arısı kovanı yıllık 15-75 kg düzeyinde polen tüketir ayrıca günlük yaşamlarını sürdürmek adına 1 kg bal üretmek için 8 kg bal tüketirler. Ayrıca günlük 200 gram suya ihtiyaç duyabilirler. Arılar böcek yiyen bir familyanın üyesidirler ve zamanla böcek yemeyi bırakmışlardır. Aynı familya üyeleri arasında diğer arı çeşitleri eşek arısı, yaban arısı, marangoz arı ve bombus gibi türler de bulunur.

Bal arıları işçi arılar, erkek arılar ve ana arı olmak üzere üç görevdedir. Yavru arıları ana arı meydana getirir. Dölllenmiş yumurtalar işçi ve ana arıların, döllenmemiş yumurtalar ise erkek arıların üretimi için gereklidir. Ana arı ve işçi arının farklılaşması larva dönemindeki beslenmelerine göre meydana gelir. Arılardaki kanat yapısı yusufçuk böceklerine benzerdir. Yusufçuklara göre daha hızlı kanat çırpırlar ve kanatları daha küçüktür. Böceklerin çoğunluğu görsel etkileşimlerle uçuşlarını gerçekleştirebilirler. Bu etkileşime optomotor reaksiyon adı verilir. Bu reaksiyon böceğin istenmeyen uçuş doğrultusu ve konum değişimlerini engelleyici uçuş manevralarıdır (Götz, 1964). Bal arıları görüş yeteneklerini; uçuş hızlarını korumak, tehlikeli objelerden uzak durmak (Srinivasan, 1993) güvenli inişlerini sağlamak (Srinivasan, 2000) ve doğrusal bir hat üzerinde uçuşlarını ortalamak için kullanırlar (Kirchner & Srinivasan, 1989).

Kambur Balina (humpback whale)

Kambur balina, oluklu balina familyasından bir türdür. Kambur balinalar genellikle yaklaşık 15m uzunluğunda olabilirler ve yaklaşık 35 ton ağırlığındadırlar. Dişi balinalar erkeklerden daha

büyüktür ve bu özellikte olan az sayıdaki memelilerden biridirler. İyi gelişmiş bir balina 18m uzunluğa ve 48 ton ağırlığa ulaşabilir. Kayıtlara geçmiş en uzun mesafeli memeli göçü 8300km ile kambur balinalara aittir (Rasmussen, 2007). Kambur balinaların bir yılda 25,000 km göç ettikleri de bilinir (Miklosovic, 2004). Bu uzun göçlerin sonucunda aerodinamik yapılarını asgari enerjiyi harcayabilmek adına geliştirmişlerdir. Bu gelişim kanat ve kuyruk yüzgeçlerine yansımıştır.



Şekil 8. Kambur balinanın yüzgeçlerinin gösterimi

Bu geometrik optimizasyon ‘tubercle effect’ açığa çıkarır ve bu fenomen kanat hücum kenarındaki çıkıntı veya yumrunun kanadın aerodinamik verimini artırması anlamına gelir. Rüzgâr tüneli testlerinde %32 oranında sürtünmede azalış, %8 oranında kaldırma kuvveti veriminde artış ve %40 oranında hücum açısında artış tespit edilmiştir. Bu değerler kambur balinanın bu modifikasyonlara sahip olmadığı kanat yapılarına kıyasla elde edilmiştir (Miklosovic, 2004).

Kambur balinanın kuyruk yüzgecinin firar kenarındaki tırtıklı yapı da verimliliği artıran bir modifikasyondur ancak bu modifikasyon daha çok kuşlar üzerinde daha etkili olduğundan dolayı bu kısımda üzerinde durulmayacaktır. Benzer yüzgeç yapılan büyük beyaz köpek balıklarının yüzgeçlerinde de vardır ancak bu yapılar biyolojik çözümlerin değerlendirildiği bölümde incelenecektir.

Kahverengi pelikan (brown pelicans)

Kahverengi pelikan, pelikangiller familyasında bulunan 8 pelikan türü arasında en küçüğü olan türdür. Bu kuş türü Amerika'da yaşar ve Amerika'nın batı ve güney sahillerinde yaşayan kuş türlerinden biridir. Batı yarımkürede yaşayan üç pelikan türünden biri olan kahverengi pelikanlar balıkları denize dalarak avlayan iki pelikan türünden birisidir.

Uçuşu esnasında daha az enerji harcamak adına kahverengi pelikanlar dalgalara paralel uçarak kayan hava akımıyla uçuşlarına yardımcı olurlar. Pelikanlar aynı zamanda deniz yüzeyine yakın uçarak ‘‘ground effect’’ yeryüzü etkisi adı verilen bir aerodinamik olguyla daha az güç harcayarak uçabilirler.

Yeryüzü etkisi kanat ve yüzey arasındaki havanın sıkışması ve pelikanın bu sıkışan hava üzerinde kayması olarak da açıklanabilir.



Şekil 9. Kahverengi pelikanın uçuş tekniğinin gösterimi

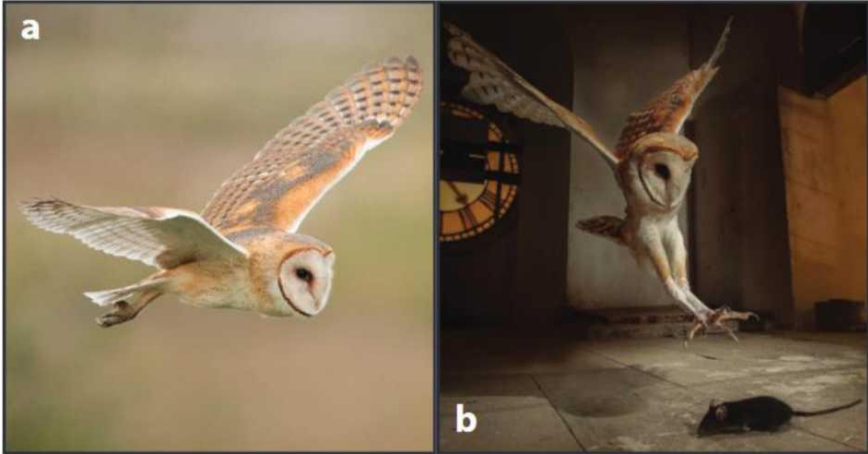


Şekil 10. Kahverengi pelikanın dalgadaki akımı yakalamasının gösterimi

Dalganın yarattığı hava akımı da avlarını ararken daha az güç harcamalarına olanak tanır.

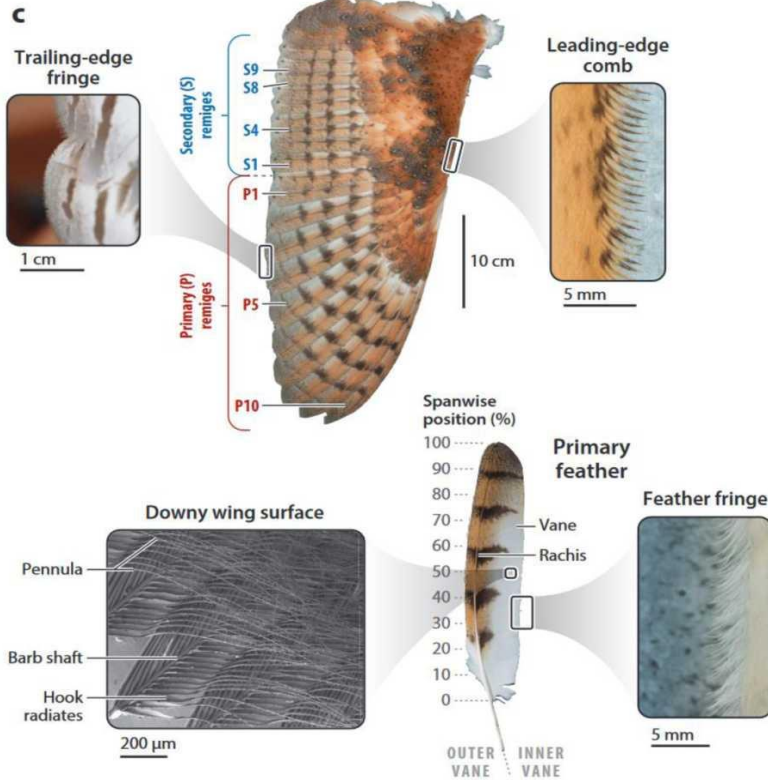
Baykuş (owl)

Baykuş kuşlar (Aves) sınıfının, karinalılar (Carinatae) bölümünde, gök kuzgunumsular takımına giren yırtıcı kuşlar alt takımında yer alan türlere verilen isimdir. Başları büyüktür ve tüylüdür. Kuyrukları kısa olan baykuşların kanatları enli ve uzundur. Kanat açıklığı bir insan boyuna ulaşan türleri olduğu gibi küçük olanları da vardır. Gagaları kıvrımlı, döner parmaklı, pençeleri keskin ve kanca tırnaklıdır. Kuvvetli pençeleriyle avına kenetlenir.



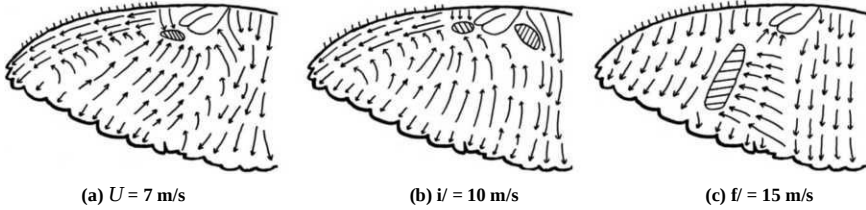
Şekil 11. Sessiz ve verimli uçuşuyla bilinen baykuş (Jaworski & Peake, 2020)

Baykuşlar çok sessiz avlanır. Baykuşların vücudu yumuşak ve ince tüylerle kaplıdır. Tüyler, uçuş esnasında bir susturucu gibi çalışır. Uçuş esnasında kanat çırpma sesi duyulmaz. İri gözleri vardır ve gözleri başlarının yanında olan kuşlara kıyasla başlarının önündedir. Gözleri aşırı büyük olduğundan göz oyuğunda hareket edemez. Dolayısıyla gözleri yuvalarında sabittir. Baykuşlar boyunlarını 270 derece çevirebilir ve panoramik bir görüş elde edebilirler. Bu sayede çevreleriyle etkileşimleri hızlıdır (Clark, 2020). Bu çalışmada baykuşların sessiz uçuş özelliği üzerinde durulacaktır. Sessizlik baykuşun tüylerinden ve kanat çırpma tekniğiyle sağlanır.



Şekil 12. Baykuşun kanat yapısı ve elamanları (Jaworski & Peake, 2020)

Hücum kenarında akışkanı bölmelere ayıran yumrular daha küçük akışkan hatları oluşturarak aerodinamik verimi artırır. Firar kenarındaki yumuşak tüyler ise yüksek frekanslı akışkan kaynaklı sesleri engeller böylelikle yırtıcı baykuş avına sessiz bir şekilde yaklaşabilir (Sarradj, 2011). Baykuşlar diğer yırtıcılara kıyasla yavaş uçuculardır bu nedenle sessiz uçuş özelliğinin düşük hızda uçmalarından kaynaklandığı düşünülebilir ancak Geyer, (2012) çalışmasında bunun baykuşun evrimleşmiş tüy yapısıyla mümkün olduğunu göstermiştir.



Şekil 13. Farklı uçuş hızlarında kanatta oluşan hava akışlarının gösterimi (Geyer, 2016)

Geyer (2016) çalışmasını yaparken rüzgar türbininde deneysel çalışmıştır, kanat ucu deformasyonunu uçuş hızına bağlı olarak elde etmiştir. Ayrıca Geyer (2009) çalışmasında baykuşların kanat hücum kenarı kamburluğunun da yüksek uçuş verimine olan katkısını deneysel olarak doğrulamıştır (Geyer, 2017). Baykuşların uçuş verimiyle alakalı diğer bir çalışmada ise kanat ucu tüylerinin 10db'ye kadar gürültüyü azalttığı sonucuna ulaşılmıştır (Jaworski & Peake, 2020).

Kıyı Çamur Çulluğu (Bar-Tailed Godwit)

Kıyı çamur çulluğu çullukgiller familyasından bir çulluktur. Diğer kuşlara kıyasla kısa bacaklı bir türdür. Gagadan kuyruğa uzunluğu yaklaşık 40cm, kanat açıklığı ise 80cm'yi bulabilir. Erkekler dişilere kıyasla daha küçüktür ve erkekler 400g ağırlığa kadar ulaşırken, dişiler 630 grama kadar ulaşabilir. Kıyı çamur çulluğunun boyutları bazı bölgesel değişimler gösterir. Mavi ve gri

bacakları vardır ve çok uzun koyu, hafif, kıvrılmış ve pembe gaga ucuna sahip bir gagası vardır (Hoyo, 2021).



Şekil 14. Kıyı çamur çulluğunun kanat yapısı

Kıyı çamur çulluğu bilenen duraksız en uzun göçü gerçekleştiren bir kuş türüdür (Gill, 2008).



Şekil 15. Kıyı çamur çulluğunun kanat ucu yapısı

Kıyı çamur çulluğunun kanat yapısını incelediğimizde baykuşlara benzer yapısal gelişmeler görülebilir ancak tüm bunların yanında canlının süzülme ve termal yakalama kabiliyetiyle uzun göçler sergileyebildiği görülmektedir. Bu bağlamda amaçladığımız döner pervane tasarımı için çok da uygun bir esinlenme kaynağı olmayacaktır.

Kuzey sumrusu (Arctic tern)

Kuzey sumrusu sumrugiller familyasına ait bir deniz kuşudur. Boyu 39cm'yi ve kanat genişliği ise 85cm'yi bulabilir.

Genellikle beyaz ve gri tüylere vardır. Kırmızı gagalara ve ayaklara sahip olan kuzey sumrularının beyaz alınları ve siyah bir ense bölgeleri vardır.



Şekil 16. Kuzey sumrusunun kanat ucu yapısı

Kuyruklarında derin, çatallı, beyazımsı ve üzerinde gri tüylerde vardır. Etçil bir kuş türüdürler. En uzun göç uçuşunu gerçekleştiren türdür. İki kutup; kuzey ve güney kutbu arasında göç ederler ve kuzey kutbuna yumurtalarını bırakırlar (Egevang, 2010).

Kuzey sumrusu ince ve uzun kanatlarıyla yüksek aspect ratio kanat değerine sahip bir kuştur. Uzun menzillerde göç edebilme kabiliyetinin termalleri yakalayabilme kabiliyetinden kaynaklandığı görülebilir. Kanat çırpma esnasındaki kaldırma kuvveti verimliliğinin ölçen bir akademik çalışma da mevcut değildir. Bu nedenle amaçlanan pervane tasarımı için çok da uygun bir esinlenme kaynağı değildir.

KANAT KALDIRMA KUVVETİNİ OLUŞTURAN ETKENLER

Hava aracı, taşıma kabiliyeti bulunan tüm insanlı veya insansız uçan araçtır. Helikopter, uçak, insansız hava aracı (İHA), balon, zeplin, planör ve yelken kanat gibi pek çok uçabilen araçlar türü vardır. Eski çağlardan beri uçma yeteneği insanoğlunun en büyük hayallerinden biridir. İnsanlar ilk olarak uçurtmayı insan veya malzeme taşıma için kullanmayı denediler. İlk işe yarar hava aracı ise, 1783'te üretilen sıcak hava hidrojen balonu oldu (Mercado, 2019). 1853'te ilk insan taşıyan planör uçuşu kayıtlara geçti. İtki ve taşıma kuvvetlerinin anlaşılması çabası kanat çırpma düşüncesinden sıyrılmayı sağladı. 1890 tarihinde Alman Otto Lilienthal, yelken kanat bir uçurtma ile süzülen ilk insan oldu (Björn Kiefer & Books On Demand GmbH, 2021).

Başarısız denemelerin ardından ilk başarılı zeplin uçuşu 1852 yılında Henri Giffard tarafından yapıldı (Agte, 2010). Başarılı pek çok uçuşa rağmen zeplinler masraflı, yavaş ve hava şartlarından aşırı etkilenen bir araç olmaları nedeniyle 1930 yılında terk edildiler. 1937 yılında Hindenburg faciasından sonra ticari kullanımı 1940 yılında tamamıyla durduruldu (Agte, 2010). 17 Aralık 1903 yılında Wilbur ve Orville Wright kardeşler, ilk defa motorlu ve kontrol edilebilir bir uçakla uçuş gerçekleştirdiler.

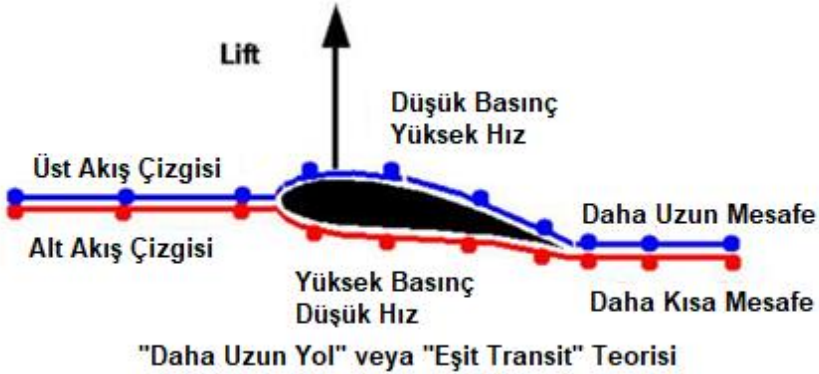
Aralık 2003'te, Wright kardeşlerin ilk uçuşunun 100. yıldönümünde hala uçakları havada neyin tuttuğu bir bilinmezlik içindeydi. Buna cevap vermek için Ulusal Hava ve Uzay Müzesi'nde aerodinamik uzmanı ve bu alanda birkaç ders kitabının yazarı olan John D. Anderson; kaldırma olarak bilinen aerodinamik kuvveti neyin oluşturduğu konusunda aslında bir anlaşmaya varılan bir açıklama henüz mevcut değildir demiştir. “Bunun tek satırlık basit bir cevabı yok” diyen Anderson, İnsanlar bu soruya farklı cevaplar veriyor, kaldırmayı ve uçuşu neyin yarattığına dair hala farklı hesaplar var. Uçuş tarihinin bu noktasında bu durum biraz kafa karıştırıcıdır cevabını vermiştir (Anderson, 2007).

Bu kafa karışıklığına ek olarak kaldırmayı iki soyut başlıkta inceleyebiliriz: teknik ve teknik olmayan olarak. Bu iki başlık çelişkili olmaktan ziyade tamamlayıcıdır, ancak amaçları bakımından farklılık gösterirler. Biri kesinlikle matematiksel bir teoridir. Analiz ortamının; denklemlerden, sembollerden, bilgisayar simülasyonlarından ve sayılardan oluştuğu bir alandır. Bu başlıkta ele alınan uygun denklemlerin veya çözümlerinin ne olduğu konusunda ciddi bir anlaşmazlık varsa da çok azdır. Teknik/matematik teorisinin amacı, doğru tahminler yapmak ve karmaşık uçak tasarımı işiyle uğraşan havacılık mühendisleri için faydalı olan sonuçları gruplayarak listelemektir ancak denklemler veya çözümleri kendi başlarına bir açıklama değildir. Bize kaldırma kuvvetinin fiziksel ve sağduyulu bir açıklamasını sağlamayı amaçlayan, teknik olmayan ikinci bir analiz düzeyi de vardır. Teknik olmayan yaklaşımın amacı, bir uçağı havada tutarken iş başında olan gerçek kuvvetler ve etkenler hakkında bize sezgisel bir anlayış vermektir. Bu yaklaşım, sayılar ve denklemler düzeyinde değil, daha çok akışkanlar dinamiği uzmanı olmayanlar için tanıdık ve anlaşılır olan kavram ve ilkeler düzeyinde mevcuttur. Tartışmaların olduğu alan bu ikinci, teknik olmayan yaklaşımdadır. Kaldırma kuvvetini açıklamak için yaygın olarak iki farklı teori öneriliyor ve her iki taraftaki savunucular makalelerde, kitaplarda ve çevrimiçi olarak kendi bakış açılarını bu teoriler çerçevesinde tartışıyorlar.

Sorun, bu iki teknik olmayan teorisinin her birinin kendi içinde doğru olmasıdır. Ancak hiçbirisi, aerodinamik kaldırma yöneten tüm temel kuvvetlerin, faktörlerin ve fiziksel koşulların tam bir muhasebesini tutan bir kaldırma kuvveti açıklamasını yapamaz veya bilemez. Peki böyle kapsayıcı bir teori gerçekten var mıdır?

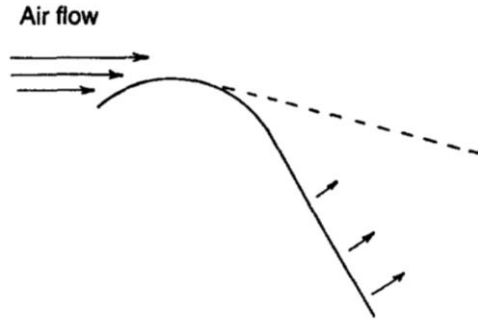
Kaldırmanın açık ara en popüler açıklaması, İsviçreli matematikçi Daniel Bernoulli tarafından 1738 tarihli incelemesinde tanımlanan bir ilke olan Bernoulli teoremidir. Bernoulli, matematikçi bir aileden geliyordu. Babası Johann, kalkülüse katkılarda bulundu ve amcası Jakob “integral” terimini icat etti. Daniel Bernoulli'nin katkılarının çoğu akışkan akışıyla ilgiliydi: Hava bir akışkandır ve onun adıyla ilişkilendirilen teorem genellikle

akışkanlar dinamiği cinsinden ifade edilir. Basitçe ifade edilirse, Bernoulli yasası, bir sıvının basıncının hızı arttıkça azaldığını veya hızı azaldıkça basıncının azaldığını söyler. Bernoulli'nin teoremi, uçak kanatlarının teknik adı olan kanat profilinin (Airfoil) kavisli üst yüzeyinin bir sonucu olarak kaldırmayı açıklamaya çalışır. Bu eğrilik nedeniyle, fıkren, kanadın üst kısmından geçen havanın, kanadın düz olan alt yüzeyi boyunca hareket eden havadan daha hızlı hareket etmesidir. Bernoulli teoremi, kanadın üstündeki artan hızın, oradaki düşük basınç bölgesini yarattığını, yani dolayısıyla kaldırma kuvvetinin b şekilde oluştuğunu söylemiştir. Rüzgar tüneli testlerindeki akış çizgilerinden (dumanla oluşturulan akışkan çizgileri) elde edilen ampirik veriler, nozüller ve Venturi tüpleri üzerindeki laboratuvar deneyleri Bernoulli'nin savının büyük oranda doğru olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, Bernoulli teoreminin tek başına kaldırmanın tam bir açıklamasını oluşturamamasının birkaç nedeni vardır. Havanın kavisli bir yüzey boyunca daha hızlı hareket ettiği bir deneyim gerçeği olsa da Bernoulli teoremi tek başına bunun neden böyle olduğunu açıklamaz. Başka bir deyişle, teorem, kanadın üzerindeki yüksek hızın nasıl başladığını söylemez.



Şekil 17. Yanlış bir kabul olan eşit transit süreleri varsayımı
(Center, G. R., 2017)

Bernoulli'nin açıklamasıyla anlatılan kaldırma kuvvetinde pek çok akademik kitle tarafından da yapılan bu yanlış kabulün doğru olmadığı aslında düşük basınç tarafındaki akışkanın yüksek basınç tasarındaki akışkandan çok daha kısa bir sürede profilin firar kenarına ulaştığı görülmüştür (Eastlake, 2002). Dolayısıyla düşük basınç alanındaki akışkanın hızı eşit transit süreleri kabulündeki hızdan çok daha fazladır. Buradaki yanlış, iki parselin aynı anda firar kenarına ulaşması için fiziksel bir neden olmamasıdır. Ayrıca Bernoulli ilkesinin pek çok popüler anlatımda tekrarlanan kötü şöhretli bir "gösterisi" vardır. YouTube videoları ve hatta bazı ders kitaplarında bile. Bir kağıt yaprağını yatay olarak tutmayı ve kıvrımlı üst kısmından üflemeyi içeren bu deneyde sayfa yükselir ve sözde Bernoulli etkisi gösterilir.



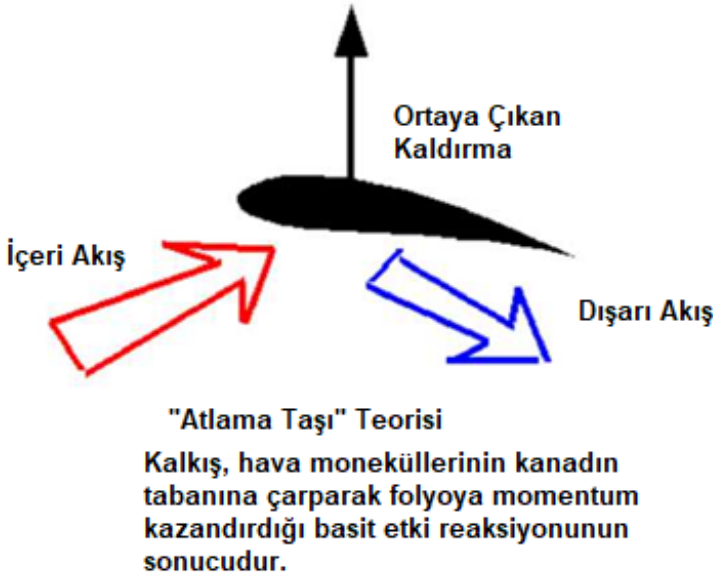
Şekil 18. Bernoulli etkisinin açıklandığı kağıt deneyi (Bauman & Schwaneberg, 1994)

Sayfanın altına üflediğinizde tam tersi bir sonuç ortaya çıkmalıdır: altta hareket eden havanın yüksek hızı sayfayı aşağı çekmelidir. Bunun yerine, beklenilenin aksine sayfa yine yükselir. Bir tarafa akış uygulandığında kavisli kağıdın yükselmesi onun her iki yüzeyindeki akış hızı farkından değildir (Babinsky, 2003). Babinsky (2003) çalışmasında bir kağıdı dikey konumdayken bir tarafına daha hızlı akış uygulamış ve kağıdın hızlı akış uygulanan tarafa doğru hareket etmediğini gözlemlemiştir. Farklı hızlara rağmen kağıdın her iki yanında da basınçların eşit olduğunu açıklamıştır.

Bernoulli teoreminin ikinci kusuru, kanadın tepesindeki daha yüksek hızın nasıl veya neden daha düşük basınç getirdiğini söylememesidir. Bir kanadın eğriliği havayı yukarı doğru kaydırıldığında, bu havanın sıkıştırıldığını ve bunun sonucunda kanadın üzerindeki basıncın arttığını düşünmek doğal olarak mümkündür. Bu tür bir "darboğaz" tipik olarak sıradan yaşamda işleri hızlandırmak yerine yavaşlatır. Örneğin bir otoyolda, iki veya daha fazla trafik şeridi birleştiğinde, ilgili arabalar daha hızlı gitmez; bunun yerine kitlesel bir yavaşlama ve hatta muhtemelen bir trafik sıkışıklığı oluşur ancak bir kanadın üzerinde akan hava molekülleri böyle davranmaz ve Bernoulli teoremi de bu sıra dışı davranışı açıklamaz. Üçüncü problem, Bernoulli teoremini kaldırmanın tam bir açıklaması olarak kabul etmeye karşı en kesin argümanı sağlar. Kanat üst yüzeyi kavisli olan bir uçak ters uçuşa yeteneğine de sahiptir. Ters uçuşta, kavisli kanat yüzeyi alt yüzeyde olur ve Bernoulli teoremine göre kanadın altında azaltılmış basınç oluşturur. Yerçekimi kuvvetine eklenen bu düşük basınç, uçağı yukarıda tutmak yerine aşağı doğru çekme etkisine sahip olmalıdır. Ayrıca, simetrik kanatlara sahip, üstte ve altta eşit eğriliğe sahip uçaklar-hatta düz üst ve alt yüzeylere sahip uçaklarda kanat profili uygun bir hücum açısında karşılaştığı sürece ters uçabilirler. Bu, Bernoulli teoreminin tek başına kanat kaldırma kuvvetini açıklamak için yetersiz olduğu anlamına gelir.

Diğer kaldırma kuvveti teorisi ise Newton'un üçüncü hareket yasası olan etki ve tepki ilkesine dayanmaktadır. Teori, bir kanadın havayı aşağı doğru iterek uçağı yukarıda tuttuğunu belirtir. Havanın kütlesi vardır ve Newton'un üçüncü yasasından, kanadın aşağı doğru itilmesinin, yukarı doğru eşit ve zıt bir itme ile sonuçlandığı sonucu çıkar, bu da kaldırma kuvvetidir. Newtoncu teorem, herhangi bir şekle sahip kanatlar için de geçerlidir, kavisli veya düz, simetrik veya değil. Ters veya yan uçan uçaklar için de geçerlidir. Kaldırmaya etkiyen kuvvetler de aşına olduğumuz olgulardır. Örneğin, hareket halindeki bir arabadan elinizi uzatıp yukarı doğru eğdiğinizde, hava aşağı doğru sapar ve eliniz yükselir. Bu nedenlerle

Newton'un üçüncü yasası, Bernoulli'nin teoreminden daha evrensel ve kapsamlı bir kaldırma açıklamasıdır.



Şekil 19. Newtoncu teoremin gösterimi (Center, G. R., 2017)

Ancak tek başına ele alındığında, etki ve tepki ilkesi, kanat profilinin bombeli olup olmadığına bakılmaksızın, o bölgede var olan kanat üzerindeki düşük basıncı da açıklamakta başarısız olur. Bir uçak ancak inip durağan hale geldiğinde, kanadın üstündeki alçak basınç bölgesi kaybolur, ortam basıncına döner ve hem üstte hem de altta basınç aynı olur. Bir uçak uçtuğu sürece, bu düşük basınç bölgesi, aerodinamik kaldırmanın kaçınılmaz bir unsurudur ve açıklanmalıdır.

Ne Bernoulli ne de Newton, elbette, uçakları neyin ayakta tuttuğunu bilinçli olarak açıklamaya çalışmıyorlardı, çünkü mekanik uçuşun gerçekleşmesinden çok önce yaşadılar. İlgili yasalar ve teorileri, yalnızca Wright kardeşler uçtuktan sonra yeniden tasarlandı ve bilim adamlarının aerodinamik kaldırmayı anlamasını ciddi ve acil bir iş haline getirdi.

Bu teorik hesapların çoğu Avrupa'da yapıldı. 20. yüzyılın ilk yıllarında, birkaç İngiliz bilim adamı, havayı mükemmel bir akışkan olarak ele alan, yani sıkıştırılmaz ve sıfır viskoziteye sahip olacak şekilde, kaldırmanın teknik ve matematiksel hesaplarını geliştirdi. Bunlar gerçekçi olmayan varsayımlardı ancak kontrollü ve motorlu mekanik uçuş gibi ye ni bir fenomenle karşı karşıya kalan bilim adamları için anlaşılabilir varsayımlardı. Bu varsayımlar aynı zamanda matematiği daha basit ve anlaşılır hale getirdi ancak bu basitliğin bir bedeli vardı: ideal gazlarda hareket eden kanat profillerinin hesapları matematiksel olarak ne kadar başarılı olursa olsun, ampirik olarak kusurlu kaldılar.

Uçak tasarımına yönelik çağdaş bilimsel yaklaşımlarda, gerçek havanın gerçek viskozitesini tam olarak hesaba katan, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyonlardır. Bunlar meşhur Navier-Stokes denklemleri olarak adlandırılırlar. Bu denklemlerin çözümleri ve HAD simülasyonlarının çıktıları, günümüzün oldukça gelişmiş uçak tasarımlarının temeli olan kanat basınç dağılımı grafikleri, hava akışı çizgileri gibi nicel sonuçlar verir. Yine de kendi başlarına kaldırmanın fiziksel ve niteliksel bir açıklamasını vermezler.

Ancak son yıllarda, önde gelen aerodinamikçi Doug McLean, saf matematiksel formalizmin ötesine geçmeye ve kaldırma kuvvetini açıklayan fiziksel neden-sonuç ilişkilerini açıklamaya çalıştı. Profesyonel kariyerinin çoğunu CFD kod geliştirme konusunda uzmanlaşan ve Boeing Ticari Uçakların üretiminde mühendis olarak çalışan McLean, 2012'de yaptığı yayınla fikirlerini Understanding Aerodynamics: Arguing from the Real Physics başlığı altında yayınladı. McLean'ın kaldırmaya ilişkin karmaşık açıklaması, tüm bilindik aerodinamiğin temel varsayımıyla başlar: Bir kanadın etrafındaki hava, “kanat profiline hatlarını takip etmek için deforme olan sürekli bir malzeme” gibi davranır. Bu deformasyon, kanadın hem üstünde hem de altında derin bir sıvı akışı şeridi şeklinde bulunur. Kanat profili, basınç alanı olarak adlandırılan geniş bir alandaki basıncı etkiler. Kaldırma kuvveti oluşturulduğunda, kanat profiline üzerinde her zaman dağınık bir

alçak basınç bulutu oluşur ve genellikle profilin altına yayılmış bir yüksek basınç bulutu oluşur. Bu bulutların kanat profiline değdiği yerlerde, kanat profiline kaldırma uygulayan basınç farkı oluşur. Kanat havayı aşağı doğru iter ve bu da hava akışının aşağı doğru dönmesine neden olur. Kanadın üstündeki hava, Bernoulli ilkesine göre hızlanır. Ayrıca kanadın altında bir yüksek basınç alanı ve yukarıda bir alçak basınç bölgesi vardır. Dolayısıyla McLean'in kaldırma açıklamasında dört gerekli bileşen olduğu anlamına gelir: hava akışının aşağı doğru dönmesi, hava akışının hızında bir artış, bir alçak basınç alanı ve bir yüksek basınç alanıdır. Ancak McLean'ın açıklamasının en özgün ve ayırt edici yönü bu dört unsur arasındaki karşılıklı ilişkidir. McLean çalışmasında; karşılıklı bir sebep- sonuç ilişkisi içinde bu dört unsurun birbirlerini desteklediğini ve hiçbirinin bir diğeri olmadan var olamayacağını belirtmiştir (McLean, 2012). Etkileşimin her bir unsurunun diğerlerini sürdürmesi ve güçlendirmesi nasıl mümkün olabilir? Ve bu karşılıklı, dinamik etkileşime ne sebep olur? Gibi sorulara McLean'ın cevabı: Newton'un ikinci hareket yasasıdır. Newton'un ikinci yasası, bir cismin veya bir sıvı parselinin ivmesinin, üzerine uygulanan kuvvetle orantılı olduğunu belirtir. McLean; Newton'un ikinci yasasının bize, akışkan bir maddeye uygulanan basınç farkı net bir kuvvet açığa çıkardığında, maddenin hareketinin hızında veya yönünde (veya her ikisinde) bir değişikliğe neden olması gerektiğini belirtiyor ancak karşılıklı olarak, basınç farkı maddenin ivmesine bağlıdır ve bu ivme nedeniyle bu basınç farkı meydana gelmiştir.

McLean'ın çalışmasında kanadın hareketsiz olması durumunda, bu karşılıklı birbirini pekiştiren faaliyet kümesinin hiçbir parçasının var olmayacağı ve ancak kanadın havada hareket etmesiyle her bir parselin diğerlerini etkilemesinin mümkün olduğunu ve uçuş boyunca onların birbirlerini besleyebileceği belirtmiştir. McLean, aerodinamik kaldırmanın tüm unsurlarını tam olarak hesaba katmadığını fark etmiştir, çünkü kanattaki basınçların dış ortamdan farklı olarak değişmesine neyin neden olduğuna dair ikna edici bir şekilde açıklama yapmamıştır. Bu doğrultuda McLean

(2018), The Physics Teacher'da aerodinamik kaldırmanın "kapsamlı bir fiziksel açıklamasını" önerdiği iki bölümden oluşan bir makale yayınladı. Makalede, McLean'ın önceki çizgisini büyük ölçüde yeniden ifade etse de aynı zamanda basınç alanının uniform olmamasına ve aldığı özel şekle neyin neden olduğuna dair daha iyi bir açıklama yapmaya çalıştı. Özellikle, yeni argümanı, akışkanlar seviyesinde karşılıklı bir etkileşimi ortaya çıkardı. Böylece nonuniform basınç alanının, uygulanan bir kuvvetin yani kanat profili tarafından havaya uygulanan aşağı yönlü kuvvetin bir sonucu olduğuna Mclean ulaşmış oldu (McLean, 2018).

Kaldırma kuvveti, bahsedildiği üzere, bir kanat profilinin üst ve alt kısımları arasındaki basınç farklarının sonucudur. Bir kanat profilinin alt kısmında ne olduğuna dair zaten kabul edilebilir bir açıklamamız var: karşıdan gelen hava, kanadı hem dikey olarak (kaldırma üreterek) hem de yatay olarak (sürtünme üreterek) iter. Yukarıya doğru itme, kanadın altında daha yüksek bir basınç alanını oluşturur ve bu yüksek basınç, basitçe Newton'un etki ve tepki ilkesinin bir sonucudur. Bunun yanı sıra kanat profilinin üstünde işler oldukça farklıdır. Aerodinamik kaldırma kuvvetinin kanat profili üzerine ait özel ve ilave bir parçası olan düşük bir basınç bölgesi vardır. Ancak ne Bernoulli ilkesi ne de Newton'un üçüncü yasası bunu açıklamaz.

Bu noktada Mark Drela; Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde akışkanlar dinamiği profesörü, bir cevap sundu: akışkan parçacıkları bir an için kanat profilinin üst yüzeyine teğet uçarsa, altlarında tam anlamıyla bir boşluk ve vakum oluşur, bu vakum, daha sonra, etki ettiği boşluğu akışkan parçacıkları doldurana kadar, yani akışkan tekrar kanat profiline teğet hareket edene kadar akışkan parçacıklarını emer. Bu, parçacıkları kanat profili şekli boyunca hareket etmeye zorlayan fiziksel mekanizmadır. Parçacıkları kavimli bir yolda tutmak için hafif bir boşluk yani vakum kalmaya devam etmektedir. Bu hava akışının yukarıdaki komşu akış çizgilerine çekilmesi veya aşağı itilmesi, kanadın üzerinde daha düşük basınç alanını yaratan şeydir. Dolayısıyla, kaldırma kuvvetinin etkilediği kanat üzerindeki artan hız,

oradaki azaltılmış basıncın bir yan etkisi olarak görülebilir (Drela, 2014).

Ancak her zaman olduğu gibi, kaldırma kuvvetini teknik olmayan bir düzeyde açıklamaya gelince, başka bir uzmanın başka bir cevabı olacaktır. Cambridge üniversitesinden Babinsky Drela 2014'ün açıklamasında kanat yüzeyinden ayrılan akışkan çizgilerinin varlığının çelişki yarattığını öne sürmüş ve 2003 yılında sunduğu çalışmasına daha kapsayıcı açıklamalar yapması gerektiğinden bahsetmiştir (Babinsky, 2003). Bu durumda tabi ki Drela (2014), açıklamasının bazı yönlerden yetersiz olduğunu da kabul etmiştir.

Tüm bu çalışmalar ışığında kaldırma kuvvetini tek bir yaklaşımla özetlemek; tasarlamak istediğimiz biyomimetik pervanenin başansı için önemlidir. Kanat kaldırması bir kuvvettir. Newton'un ikinci hareket yasasından, bir m kütlesi bir a ivmesi ile hızlandırıldığında bir F kuvveti üretilir. Bu kuvvetin bir tanımıdır ve $F = m * a$ şeklinde gösterilir. İvme, t zamanının değişimde gerçekleşen V hızındaki bir değişiktir. $F = m * (V1 - V0) / (t1 - t0)$ yani kısaca $F = m * dV/dt$ 'dir. Önemli olan, kuvvetin hızda bir değişikliğe neden olmasıdır ve aynı şekilde, hızdaki bir değişiklik de bir kuvvet oluşturur. Denklem her iki yönde de çalışır. Hız hem yönü hem de büyüklüğü olan bir vektördür. Dolayısıyla basitçe kaldırma kuvveti: yönü değiştirilen akışkan parçacıklarından dolayı oluşur.



Şekil 20. Nasa Glenn araştırma merkezince gösterilen doğruya en yakın kaldırma kuvvet i tanımı (Center, G. R., 2017), doğru teori.

Pervane Tasarımında Deneysel Çalışmalar

Pervane, önünde hava veya su gibi çok miktarda sıvıyı arkaya doğru hızlandırarak itme kuvveti üreten ve böylece mekanik enerji yardımıyla sıvıyı zıt yönde iterken aracın ileri hareket etmesini sağlayan bir sistemdir. Pervaneler iki özelliğe göre tanımlanırlar. Bunlardan birincisi çaplan, ikincisi ise hatveleridir. Hatve; pervanenin bir turunda elde edebildiği ilerleme olarak tanımlanır. Her iki ölçü de inç cinsindendir.

Halihazırda, bir pervaneden elde edilen itkiyi tespit edebilmek için üç temel yöntem vardır: analitik yöntemler, deneysel ölçümler ve sayısal simülasyonlar. Analitik yöntemler, deneysel veya sayısal yöntemlerden daha hızlı ve daha basit olsa da itme tahminlerinde yüksek derecede hata yapma eğilimindedir ve doğru bir şekilde tahmin edebilme kabiliyetleri temel varsayımlardan dolayı sınırlıdır. Bunlar genellikle pervanelerin tüm operasyonel alanlarını tanımlamaktan ziyade ön tasarım çalışmalarında kullanılır.

Rüzgar tünellerini ve kuvvet ölçüm cihazlarını kullanan deneysel yöntemler, bir pervanenin itişini ölçmek için yüksek doğrulukta çalışan ölçüm araçları sağlar. Zaman, kaynak ve gerekli altyapı açısından genellikle pahalı olmalarının yanında ayrıca ölçüm belirsizlikleri ve test kurulumunun etkilerine maruz kalmalarına rağmen, deneysel çalışmalar genellikle pervane performans testinde kullanılan yöntemler arasında güvenilirliği en yüksek olanıdır. Sayısal simülasyonlar veya hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyonları, akışkan akışı alanındaki hız ve basıncı çözmek için akışkan hareketi denklemlerinin fizik tabanlı modellerini kullanır. Genellikle deneysel ölçümleme yöntemlerini kullanarak HAD tahminlerini doğrulamak gibi çalışma formatı vardır ancak toplam maliyeti etkileyeceğinden, CFD çalışmasının hesaplama yoğunluğuna da dikkat edilmelidir. Doğru sonuçlar elde etmek için CPU ve bellek kullanımı gibi değişkenler göz önüne alınmalıdır.

Pervane, merkezi bir göbek ve göbeğe eşit açılı aralıklarında bağlanan kanatlardan oluşur. Günümüzün uçak pervaneleri hala turboprop motorlarda ve içten yanmalı motorlarda yaygın olarak

kullanılmaktadır (Greatrix, 2012). Dolayısıyla pervanelerin verimlerinin artırılması konusunda pek çok araştırma geliştirme yapılmıştır. Bu çalışmalarda deneysel ve nümerik olarak yaklaşımlar yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir.

Rossow (1985) çalışmasında 0.325 m çapında bir helikopter rotorunun ürettiği itme kuvveti üzerindeki zemin ve tavan düzlemlerinin yakınlığının etkisi üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirdi. Ek olarak, zemin ve tavan düzlemlerinin etkisini analitik olarak incelemek için iki teorik model önerilmiş ve deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen itme verileri, itme kuvvetinin rotor diskinin zeminden veya tavan düzleminde normalize edilmiş zemin mesafesinin logaritması ile neredeyse lineer olarak arttığını göstermiştir. Veriler, normalize edilmiş zemin mesafesi 0,5 rotor çapına düşürüldüğünde rotor itmesindeki artışın ortaya çıkmaya başladığını göstermiştir (Rossow, 1985).

Brandt (2005) çalışmasında hem dinamik hem de statik koşullarda düşük Reynold sayısında küçük ölçekli pervanelerin performansını detaylandıran bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirdi. Deneyler, Illinois-Urbana Champaign Üniversitesi'ndeki (UIUC) düşük hızlı rüzgar tüneline yapıldı. Tünel dışında bir ağırlık ölçme sensörü kullanılarak itme ve tork ölçümleri yapılmıştır. Her bir pervane için bir dizi dönüş hızında (2.500 ila 7.000 arasında) değişen çaptaki (7 inç ila 14 inç) pervaneler için statik itme ve tork ölçümleri yapıldı ve her pervane farklı ilerleme faktörleri üzerinden rüzgar tüneli açıkken tekrar ölçüldü. çalışmada statik durumda, pervane itme katsayısının genellikle yaklaşık 30.000 olan Reynold sayısının altında 1.000 RPM başına yüzde beşten fazla düştüğünü ve pervane itme katsayısının doğrusal bir şekilde yavaş yavaş arttığını (1.000 RPM'de yüzde 0.5 ile yüzde üç arasında) kaydedildi. Pervane seçiminden bağımsız olarak dönme hızı aralığının çoğunda bu etki gözlemlendi. Ayrıca, artan ilerleme faktörü ile kanatlar üzerindeki aerodinamik hücum açısının azalması nedeniyle, pervane itişinin 0,5 ile 1 arasındaki ilerleme faktörlerinde genellikle sıfıra düştüğünü gözlemlendi (Brandt, 2005).

Lee (2010) alışmasında denge uçuşunda (hover) olan bir pervanenin zemin yakınlılığının etkisini akış görselleştirme ve paracak görüntülemeli akış ölçüm cihazı (PIV) ile gözlemlemiştir. Çalışmada maksimum 42.170 Re'ye karşılık gelen, 2.100 RPM ile 3.600 RPM arasındaki dönme hızlarında döndürülen 86 mm çapında iki kanatlı bir rotor kullandılar. Rotor tarafından yerden belirli mesafede uygulanan itme ve gücü ölçmeye ek olarak, yere yakınlılığın pervane üzerindeki etkilerini incelemek için hem akış görselleştirme hem de PIV'yi kullandılar. Çalışmada rotorun aşağı akımını, yer düzleminde radyal olarak dışa doğru saptırıldıkları için pervane üzerinde güçlü gerilmelere neden olduğu görülmüştür. Çalışmada, yüksek hızlı kameralar, itme ve torku sensörleri, rotorun hız alanının hassas çizimlerini üretmek için PIV kullanarak akış görselleştirilmiş ve fotoğraflarının bir kombinasyonu aracılığıyla zeminin rotor performansı üzerindeki etkileri belgelenmiştir. Çalışmada, akış alanında gzlemelenen değişikliklerin sabit bir itki değerindeki itki katsayısında değişikliklere neden olduğu gzlemelenmiştir (Lee, 2010). Deters (2015) alışmasında düşük reynold sayısında çalışmanın etkisini ölçmek için 27 adet hazır pervanenin ve dört adet 3D baskılanmış pervanenin performansını deneysel olarak değerlendirdi. Pervanelerin çapları 2,25 in ile 9 in arasında değişiyordu. Testler UIUC düşük hızlı rüzgar tünelinde yapıldı. Statik itme ve torkun yanı sıra dinamik itme ve tork, tünel dışındaki yk hücreleri kullanılarak 5.000 ile 27.000 RPM aralığında her pervane için kaydedildi. Brandt (2005) tarafından daha önce belirtildiği gibi, statik itme katsayısı, artan RPM (ve buna bağlı olarak Reynold sayısı) ile doğrusal olarak, genellikle RPM'de yüzde iki ile dört oranında arttığı gzlemelendi. İlerleme oranının sıfır olmadığı dinamik koşullarda, aynı ilerleme oranında test edildiğinde, pervane verimliliği, test edilen en düşük ve test edilen en yüksek RPM'ler (ve dolayısıyla Reynold sayısı) arasında yüzde 10'a varan artışlar görülmüştür. Çalışmada, test edilen pervaneler için maksimum hesaplanan verimlilik değerlerinin yüzde 60 ile 65 arasında olduğu görüldü. Bu değerlerin bazı pervanelerin daha yüksek Reynold sayılarında elde ettiği yüzde 85'lik verimliliğin

oldukça altında olduğu görüldü. Bu verimlilik açığının, düşük Reynold sayılarında pervaneler üzerindeki artan sürtünmeye bağladılar, bu da artan güç tüketimine yol açtı (Deters, 2015). Daha yüksek Reynold sayılarında türbülanslı sınır tabakalarında yüzey sürtünmesi azaldığı için bu deneysel sonuçların elde edilmesi şaşırtıcı değildir.

Gamble ve Arena (2010) çalışmalarında reynold sayısının pervanelerin performansına etkisi araştırılmıştır. Pervanenin şekil, burulma açısı ve veter uzunluğu gibi geometrik özelliklerinin reynold sayısına güçlü bir şekilde bağlı olduğu bulunmuştur. Rüzgar tüneli testlerinde Advanced Precision Composit es (APC) tarafından yüksek burulma mukavemetiyle üretilmiş cam elyafı-epoksi kompozit pervaneler kullanılmıştır. APC 18x12 ve APC 18x8 pervaneler 7 farklı devirde test edilmiştir. 400.000 ile 502.000 ve ila 1.213.000 arasında değişen farklı Reynold sayıları için test edilmiştir. Reynold sayısı arttıkça verimin, itme katsayısının, güç katsayısının ve hatvenin arttığı bulunmuştur. APC 18x12 pervanesinin Reynold sayısı 400.000'den (1.700 dev/dak) 1.155.000'e (4850 dev/dak) çıkarıldığında veriminin %5 oranında arttığı tespit edilmiştir. Çap sabit tutulurken hatve küçüldükçe aynı itmenin daha düşük hızlarda üretildiği görülmüştür. Başka bir deyişle, hatve veya hatve-çap oranı arttıkça verim artar ve pervane daha yüksek uçuş hızlarında da (yüksek advance ratio) itme üretir. Sonuç olarak, deneysel sonuçlar, Reynolds sayısının küçük pervaneler üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, bir tasarımcı kanat profili seçerken Reynolds numarasını dikkate almalıdır, çünkü kanat burma dağılımı ve kanadın veter uzunluğu Reynolds sayısına büyük ölçüde bağlıdır (Gamble & Arena, 2010).

Heinzen (2010) çalışmasında gelen akışa göre kendi kendini 15 derecelik bir açı içerisinde ayarlayan değişken açılı bir pervane sistemi yapıldı. Bu özelliğin, 5 bıçaklı pervanenin yunuslama açılarının akış şartlarına göre aerodinamik olarak değiştiği bir sistem ile sağlandığı belirtiliyor. İlk olarak, Massachusetts Institute of Technology'de (MIT) geliştirilen QPROP adlı bir yazılım

kullanılarak ve Hava Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarlarında (AFRL) geliştirilen ikinci bir yazılım kullanılarak hesaplama ve analizler yapıldı. Bu yazılımların doğruluğu AFRL'den elde edilen verilerin, Nasa'ya ait rüzgar tüneli laboratuvarında (BART) elde edilen sonuçlarla kıyaslanarak gösterilmiştir. Bu kodlardan elde edilen sonuçların deneysel verilerle oldukça uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada, North Carolina State Üniversitesi'nde (NCSU) ağırlık ölçer, veri toplama sistemi, hız kontrol sistemi, fırçasız motor ve güç analizörünü içeren bir test kurulumu yapılmıştır. Prototip kanatçıklar SLS yöntemiyle 3B yazıcıyla üretilerek rüzgar tüneline test edilmiş ve APC 18x8 pervaneye ait rüzgar tüneli ölçüm sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Sonuç olarak, değişken hatveli pervanelerin; hesaplamalı, rüzgar tüneli ve uçuş test sonuçlarındaki etkin pervane çalışma aralığını sabit hatveli pervanelere göre genişletebileceği gösterilmiştir (Heinzen, 2010).

Tracy (2012) çalışmasında bir İnsansız Hava Aracı (İHA) için ses altı kanat profili analiz programı XFOIL ve sayısal optimizasyon programları QMIL ve QPROP kullanılarak bir pervane tasarladı ve analiz etti. İtke ve verimliliğin teorik olarak doğrulanmasından sonra bu pervanenin bir modeli üretildi. Daha sonra pervanenin güç tüketimini elde etmek için 1 fit x 1 fit rüzgar tüneline test edildi. Dört farklı pervane tasarımı iki farklı düzende karşılaştırılmıştır. İlk düzende, pervane bir gövdenin arkasında çalışıyordu. Diğer deney düzeninde ise pervane serbest akışta doğrudan ve engelsiz çalışıyordu. Test sonuçlarında, gövde arkası çalışan pervanenin serbest hava akımında olana kıyasla daha yüksek güç tüketimine sahip olduğunu görüldü. Ayrıca deneysel ve simülasyon sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür (Tracy, 2012).

Bettinger (2012) çalışmasında analiz etmek ve deneysel testler için Mini İHA (SUAS) pervanelerinin üretimi yapılmıştır. Bir mini İHA için çok kanatlı bir pervane, azaltılmış bir dönüş hızında aracın itme gereksinimlerine göre optimize edilmiştir. Pervanelerin performans doğrulaması için pervaneler ayrıca Oklahoma Eyalet Üniversitesi'nin (OSU) rüzgar tüneline test edildi. Pervanelerin

imalatının başıyla gerçekleştirildiği değerlendirilmiş ve pervane kanatlarının test analizinin hem mukavemet hem de performans açısından karşılaştırılabilir olduğu tespit edilmiştir. Testlerin sonuçları, teorik tahminlerle ile karşılaştırılmıştır. Teorik ve deneysel veriler arasında 1.1 ile 1.5 arasında değişen bir oranda hata mevcut olduğu görülmüştür. Sapmanın muhtemelen tasarımılanan pervanenin üretiminde meydana gelen kusurlardan dolayı olduğu not edilmiştir (Bettinger, 2012).

Merchant ve Miller (2006) çalışmasında reynold sayısı 30,000 ile 300,000 arasında olacak şekilde pervaneleri test edebilmek için tümleşik bir itki test sistemi inşa etti. Genellikle İnsansız Hava Aracı (İHA) ve Mikro Hava Araçlarında (MAV) kullanılan bu pervaneler, iki fitten (6 inçten 22 inç'e kadar) küçüktür ve genellikle radyo kontrollü İHA sistemlerinde kullanılır. Testler, Wichita Eyalet Üniversitesi'ndeki (WSU) 3 ft x 3 ft düşük hızlı rüzgar tüneline gerçekleştirildi. Sistemin ve test aparatının minimum saçılma ile yüksek oranda tekrarlanabilir sonuçlar elde ettiği değerlendirilmiştir.



Şekil 21. Test edilen pervaneler (Merchant & Miller, 2006)

Aynı geometriye sahip ve aynı üretici tarafından üretilen iki pervaneye ait performanslarda, özellikle verimlilik ve itme

katsayısında belirgin farklılıklar görülmüştür (Merchant & Miller, 2006).

Khalid (2012) çalışmasında değişken hatveli pervaneler için bir itki ölçüm cihazını, Southern Polytechnic University'deki Havacılık ve Uzay Laboratuvarı'nda tasarlanmış ve üretmiştir. Pervane şaftı üzerinde bulunan bir kumanda koluna bağlı olan kumanda düğmesi ile operatörün hatveyi kontrol ettiği hatve kontrol mekanizması geliştirilmiştir. İtme ölçümleri, pervanenin hızı, çapı, veter uzunluğu, burma açısı, hatvesi ve koniklik oranından etkilendiği görülmüştür (Khalid, 2012).

Baranski (2011) çalışmasında 17 ila 24 inç çap aralığında 28 ticari pervanenin dikey rüzgar tüneli itme, tork ve dönme hızı ölçümlerini yaptı. Çalışma, uçuş süresini artırmak amacıyla mevcut bir motor için en uygun pervaneyi belirlemeyi amaçladı. Motor ve pervaneyi eşleştirmek için küçük motor üreticilerinin güvenilir verilerinin olmaması nedeniyle deneysel verilerin zorunlu olduğunu öne sürdüler. Farklı üreticilerin aynı çaptaki 9 pervanesi arasında bile, uygun motor ve pervane kombinasyonu ile menzilin 100 mile (%20 artış) kadar artırılabilceği keşfedildi (Baranski, 2011). Bu çalışmayla pervane verimi ve elektrik motorlarına göre özelleşen pervane tasarımıyla birlikte çok etkili bir verim artışı sağlanabileceği görülmüştür.

Cai (2019) çalışmasında küçük İHA'larda kullanım amaçlı ticari olarak temin edilebilen birkaç pervanenin performansı üzerindeki yer etkisini (Ground effect) deneysel olarak inceledi. Yazarlar, düşük Reynold sayılarının etkilerinden kaçınacak kadar büyük olan ve aynı zamanda geleneksel elektrikli hobi tipi motorlarla da kullanılabilen pervaneleri kullanmayı amaçladılar. Kullanılan pervanelerin çapları 11 inç, 14 inç ve 17 inç idi. İncelenen pervaneler aşağıdaki çap ve hatve (inç olarak) kombinasyonlarına sahipti: 11x5.5, 11x7, 14x7, 17x7, 17x10 ve 17x12. Çalışma, pervaneler yere daha yakinken itme gücü iyileştirme ve/veya güç azaltma eğilimlerini incelemek için çeşitli kombinasyonlarda pervane çapını ve hatvesini inceledi. İtme ve tork ile ilgili veriler,

deney düzeneğinin bir duvara yaklaştırılmasıyla elde edilen zemin yakınlığında değişiklikler yapılarak toplandı. Yazarlar, zemin etkisi dışındaki itme katsayısı ile karşılaştırıldığında, 0.25 pervane çapının normalize edilmiş bir yer mesafesinde sabit bir güç seviyesinde elde edilen itme katsayısında yüzde 15'e varan bir artışla gözlemledi. (Kıyaslanan itki katsayısı 1,5 pervane çapı kadarlık zemin mesafesinde elde edilmiştir.) Sabit bir itkide elde edilen itme katsayısı 0,25 pervane çapı kadar zemine yaklaşıldığında zeminde 1,5 pervane çapı kasdar uzaklıkta elde edilen pervane çapına göre %18 düştü. Yazarlar ayrıca, hatvenin çapa oranı ne kadar düşükse, yere yakınlığın itme ve güç üretimi üzerindeki etkilerinin o kadar büyük olduğunu ve yer düzleminin pervanenin arkasında veya önünde olmasına bakılmaksızın simetrik sonuçlar verdiğini bulmuşlardır. Yazarlar, bu etkilerin, yer düzleminden et kilenen kanatlar üzerindeki aerodinamik hücum açısından kaynaklanabileceğini öne sürdüler, ancak itme ve güçteki değişikliklerden sorumlu fiziksel fenomeni tespit etmek için akış görselleştirmesinin gerekli olduğunu belirttiler. Yazarlar, normalleştirilmiş zemin mesafesine kıyasla tek bir güç azalması eğrisi ile sonuçlanan zemin yakınlığı, pervane çapı ve hatvesi etkilerini birleştiren ilişkiyi belirtmişlerdir (Cai, 2019).

Pervane Tasarımında Nümerik Çalışmalar

Tasarımı yapılan biyomimetik pervanenin analizleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği HAD (CFD) kullanılarak yapılmıştır. HAD akışkanlar mekaniği problemlerinin analizi ve çözümlenmesi için sayısal yöntem ve algoritmaların kullanıldığı bir akışkanlar mekaniği bilimi dalıdır. Sıvı ve gazların katı yüzeyler ile etkileşimleri bilgisayar yardımı ile simüle edilir. Sonuçların gerçek etkileşime göre durumları, kullanılan bilgisayar ya da bilgisayarların performansına bağlıdır. Dolayısıyla durum ve sınır şartlarının belirlenmesi veya fiziksel olayın modeli gibi önemli analiz kararlarının alınması gerekmektedir. HAD, aerodinamik ve havacılık analizi, hava simülasyonu, doğa bilimleri ve çevre mühendisliği, endüstriyel sistem tasarımı ve analizi, biyolojik

mühendislik, motor ve yanma analizi, akışkan akışları ve ısı transferi dahil olmak üzere birçok çalışma ve endüstri alanında çok çeşitli araştırma ve mühendislik problemlerine uygulanır. Hemen hemen tüm HAD problemlerinin temelinde tek fazlı akış tanciklerini ifade eden Navier-Stokes denklemleri vardır. Bu denklemler, Euler denklemlerini elde etmek için viskoz bileşenleri tanımlayan terimler kaldırılarak basitleştirilebilir. Daha fazla sadeleştirme, girdaplılığı tanımlayan terimleri kaldırarak tam potansiyel (potential flow) denklemlerini verir. Hesaplama sürelerini kısaltmak amacıyla yapılan bu varsayımlar sonuçların doğruluğunu analizi yapan kişinin tecrübesiyle paralel olarak az etkiler ya da seçilen analiz yönteminin probleme uygun seçilmesi sonuçların doğruluğunu artırır.

Moffitt (2008) çalışmasında İHA tasarımı için Vorteks Pervane Teorisini belirsizlik analizi kullanarak doğruladılar, girdap teorisi formülasyonlarını ve pervanelerin rüzgar tüneli test sonucu karşılaştırmalarını sundular. Kanat profili modellemesi için ses altı hızı için tasarlanmış kanatların tasarımı ve analizi için kullanılan XFOIL Subsonic Airfoil Development System yazılımını kullandılar. Bu çalışma sonucunda, düşük ilerleme faktörü (advance ratio) oranlarında hem itme hem de güç fazla tahmin edilirken, modelin geniş bir aralıktaki koşullarda pervane performansını doğru tahmin edebildiği görülmüştür (Moffitt, 2008).

Stajuda (2016) çalışmasında pervane tasarımı alanında teorik gelişim için deneysel araştırma ihtiyacını vurguladı. Pervanelerin aerodinamik performansını değerlendirmek için BET ve BEMT'nin kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Ancak, bu yöntemler doğrulama amacıyla deneysel verilere ihtiyaç duyuyorlardı (Stajuda, 2016).

Yüksek doğruluğa sahip sayısal akışkanlar analizlerinde akış özelliklerini belirlemek için genellikle Reynolds-average Navier-Stokes (RANS) denklemlerinden yararlanan HAD simülasyonu kullanır. Bu doğrultuda literatürde pek çok çalışma vardır.

Rumsey ve Ying (2002) çalışmalarında çeşitli CFD araçlarını kullanarak çeşitli konfigürasyonlarda iki boyutlu kanat profillerinin ve üç boyutlu sonlu kanatların aerodinamik özelliklerini tahmin

etmede CFD yöntemlerinin mevcut yeteneklerini gözden geçirdi. Genel olarak, ızgara aralığı, türbülans modellemesi ve laminar-türbülans geçişi için en uygun seçimler yapılsa durma noktasının altındaki hücum açılarında kaldırma ve sürüklemenin makul bir doğrulukla tahmin edilebileceğini bilgisi elde edildi. Bu sonuçlar, öncelikle $Re < 1 \times 10^7$ için ve ses altı Mach sayılarında yürütülen araştırmalar için geçerlidir, bu nedenle diğer koşullarda geçerlilikleri olmadığı belirtildi. Reynold sayısı etkileri iki boyutlu durumlarda doğru bir şekilde tahmin edilebildi ancak üç boyutlu konfigürasyonlarda Reynold sayı etkileri tutarsızdı. Stall ile ilgili olarak, maksimum kaldırma genellikle aşırı tahmin edildiğinden, iki boyutlu HAD'nin Stall durumunu tahmin etmede güvenilmez olduğu gösterildi. Ayrıca, üç boyutlu HAD'nin de durmayı tahmin etmede güvenilmez olduğu bulunmuştur. Yazarlar ayrıca, sıkıştırılabilir RANS kodlarının, iki boyutlu kanat profillerinin maksimum kaldırma ve sürüklenmesini tahmin etmede en iyi performansı gösterdiğini belirtiyor. Yazarlar, CFD kullanıcılarının önümüzdeki yıllarda karşılaşacakları zorlukları özetleyerek şu sonuca varıyorlar: durağan olmayan etkilerin doğru bir şekilde modellenmesi, mevcut türbülans modellerinin yetersizliği ve simülasyonlarda kullanım için yüksek doğruluklu geometrilerin bulunmaması (Rumsey ve Ying, 2002).

Zeune (2008) çalışmasında çapı 6 ila 20 inç arasında değişen pervanelerin sayısal analizleriyle rüzgar tüneli test sonuçlarını kapsamlı bir şekilde karşılaştırdı. Daha büyük pervaneler dikey bir rüzgar tüneline test edildi ve küçük pervaneler Basic Aerodynamics Research Tunnel (BART) kullanılarak test edildi. Graupner 10x8 ve Aeronaut 12x8 pervanelerin kanat geometrileri dijital taramalarla elde edilirken, APC 18x14 pervanesinin geometrisi fiziksel olarak dilimlenmiş pervane kanat bölümlerinden boyutlandırılmıştır. Pervanelerin sayısal ve deneysel karşılaştırmaları BEMT kodu ile yapıldı ve BEMT sonuçlarının pervanesinin burulumu, veter dağılımları, kanat profili tipi ve Reynold sayısı değişkenlerine karşı çok hassas olduğu bulundu (Zeune, 2008).

Zhang (2016) çalışmasında İlerleyen akışta ve yan rüzgar koşullarında pervane performansındaki değişiklikleri analiz etmek için Ansys FLUENT'i kullandı. Yazarlar multi reference frame yaklaşımı (MRF) kullanmışlardır. İncelenen pervanenin çapı 10'du ve maksimum RPM'si 7.000'di ve maksimum Reynold sayısı yüzde 75'lik aralıkta yaklaşık 100.000'e tekabül ediyordu. Dışarıdaki durağan alanın sınırları hem yan rüzgarların hem de ilerleyen akışın simüle edilmesine izin verecek hız girişleri olarak belirlendi. İç dönen bölge (rotating zone) ile dış sabit bölge arasındaki arayüze izin veren sliding mesh teknolojisi kullanıldı. Simülasyonlar, türbülans modeli olarak Detached -Eddy-Simulation ile sıkıştırılmaz, kararsız RANS denklemleri kullanılarak yürütülmüştür. Hata yakınsama hassasiyeti 10^{-3} 'e ayarlandı. Pervanenin ilerleyen durumlarında test edilen tüm RPM'ler için 0,6 ve 0,8 ilerleme oranları arasında itme kuvvetinin sıfıra düştüğü gösterilmiştir. Yan rüzgar durumları için yapılan simülasyonda, itme değeri 8,0 m/s'ye kadar olan yan rüzgar hızında tüm RPM'lerde neredeyse sabitti. Yazarlar, artan ilerleme oranı ile üretilen itme gücündeki düşüş için bir açıklama sunmadılar. Analitik hesaplamalar veya deneysel ölçümlerle karşılaştırma yaparak HAD'nin herhangi bir doğrulamasını yapmadılar (Zhang, 2016).

Kutty ve Rajendran (2017) çalışmalarında APC Slow Flyer pervanesinin performansını incelemek için Ansys FLUENT'i kullandılar ve sonuçları mevcut deneysel verilerle karşılaştırdılar. Pervane 10 inç çapında ve 7 inç hatveliydi. Dijital pervane geome trisi, 3D tarama kullanmak yerine pervane açıklığı boyunca her yanın inçte bir kanat bölümlerinin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Yazarlar, Zhang (2015) ve diğerleri tarafından kullanılan yöntemle benzer MRF yaklaşımını kullanmışlardır. Pervane, pervane çapının(D) 0,28 katı (0,28D) olacak şekilde yüksekliği olan ve pervane çapının 1,2 katı(1,2D) büyüklüğünde çapı olan silindirik bir bölgeye yerleştirildi. Dış sabit akışkan bölge, yan çapı 20D yüksekliği 8D olan bir silindirdi. Kullanılan mesh, FLUENT arayüzünde hiçbir değişiklik yapılmadan oluşturuldu ve 4×10^6 hücre içeriyordu. Sınır koşulları şu şekilde belirlendi: sabit bölgenin giriş

yüzü türbülans yoğunluğu yüzde 0,1 olan bir hız girişi olarak ve çıkış yüzü serbest akış olarak ayarlandı. Simülasyonlar, yüzde 75 aralıkta 50,804 Reynold sayısına karşılık gelen 3,008 sabit pervane RPM'sinde gerçekleştirildi. İlerleyen akışı simüle etmek için 2,44 m/s ile 10,15 m/s arasındaki giriş hızları kullanıldı ve her durum için itme katsayıları, güç katsayıları ve verimlilik hesaplandı. Çalışmalar standart k- ro türbülans modeli kullanılarak yürütülmüştür. Deneysel ölçümlerle karşılaştırıldığında, itme katsayısındaki yüzde hata, yüksek ilerleme oranlarına ($J > 0.7$) kadar yüzde beşin altında kalmıştır. Hem güç katsayıları hem de verimlilikler, ilerleme oranı 0,7'yi geçene kadar yaklaşık yüzde beş oranında sürekli olarak fazla tahmin edilmiştir (Kutty ve Rajendran, 2017).

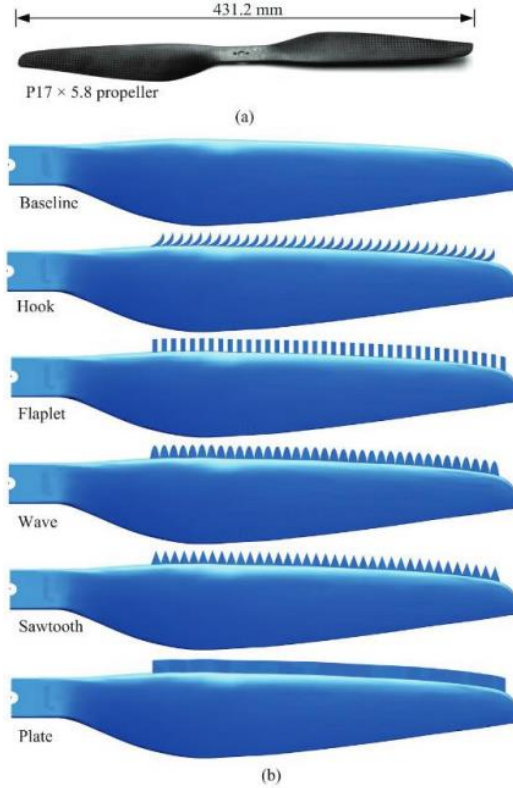
H. Kutty ve Rajendran (2017) çalışmalarında hem geleneksel hem de geleneksel olmayan pervane tasarımlarının performansı üzerine deneysel ve sayısal araştırmaların bir incelemesini yaptılar. İnceleme, sabit kanatlı insanlı uçaklar, İHA'lar, deniz araçları ve rüzgar türbinleri için kullanılan pervane kanatlarını kapsamaktadır. Yazar, Brandt (2005) ve Deters (2014) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmaları tartıştı ve ayrıca düşük Reynolds sayılarında pervane performansının diğer birkaç rüzgar tüneli testini inceledi. Bu deneysel çalışmalardan birinden elde edilen veriler, XFOIL kullanılarak hesaplanan sonuçlarla karşılaştırıldı. İtki tahminlerinde yüzde 20'nin üzerinde önemli hata mevcuttu ve bu da yazarların deneysel ölçümün XFOIL veya XFLR5 gibi panel kodlarına tercih edildiği sonucuna varmalarına yol açtı. Yazarlar, aynı amaçlar için gerçekleştirilen bir dizi hesaplamalı çalışma hakkında yorum yapmaya devam ettiler. HAD kullanarak pervane performansını incelemek için en popüler ve başarılı yöntem, daha önce tartışılan mutiple reference frame (MRF) yaklaşımıdır. Bu çalışmalar, sadece pervane geometrisinin $1/4$ (dört kanattan biri) ve dolayısıyla çalışma alanının $1/4$ ü kullanılarak hem deniz hem de havadaki pervaneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar hem statik hem de ilerleyen durumlar için itme ve torku tahmin etmek için kullanıldı ve sonuçlar çoğu durumda deneysel verilerle iyi bir şekilde karşılaştırıldı. Standart k-s türbülans modelini kullanan RANS

modellemesi, düşük Reynolds sayısı rejiminde yapılan çoğu çalışma için en popüler türbülans modeliydi, ancak birkaç çalışmada geçiş modelleri de kullanıldı. Çalışmalarda kullanılan alanların boyutu çok çeşitliydi. Çalışma alanlarının uzunlukları 30 pervane çapı ve alanın çapı 20 pervane çapı olan çalışmalar incelendi. Bu çalışmaların hiçbirinde gözlemlenen simülasyonların doğruluğu üzerinde bu boyut farklılıklarından kaynaklı önemli bir etki görülmemiştir. Makale ayrıca, kanat profili bölümlerinin ön kenarında tırtıklı pervaneler, oluklu kanat tasarımları ve değişken çaplı tasarımlar gibi geleneksel olmayan pervane tasarımlarının performansını da tartışmıştır. Bu alışılmadık tasarımların performansı genellikle düşük hızlı rüzgar tünellerinde deneysel ölçüm kullanılarak test edilmiştir. Yazar, deneysel analizin hala en doğru ve saygın test şekli olmasına rağmen, pervane performansını incelemek için mevcut HAD yeteneklerinin çoğu durumda pervane tasarımında daha hızlı geri dönüş süresi için kullanılacak kadar doğru olduğunu belirterek sonuca varmıştır (H. Kutty & Rajendran, 2017).

Gur ve Rosen (2009) çalışmalarında mini İHA sistemlerinde kullanılan pervanelerin ses izinin düşürülmesi üzerinde durmuşlardır. Çalışmada çok disiplinli bir yaklaşımla sessiz bir İHA için gerekli pervane şartları listelenmiştir. Yazarlar çalışmalarında sessiz bir pervanenin tasarımıyla, verimli bir pervanenin tasarımı konusundaki yanılgılara değinmiştir ve pratik bir tasarıma ulaşmak için bir ödünleşim (tradeoff) gerektiğinden bahsetmişlerdir. İtki sisteminin verimliliğinin yalnızca pervaneye bağlı olmadığını, motor verimliliğinden ve İHA özelliklerinden önemli ölçüde etkilendiğinden bahsetmişlerdir. Bu nedenle, motor özelliklerinin tasarım sürecine dahil edilmesinin önemi vurgulanmıştır. Yazarlar çalışmalarında pervane bıçaklarının sayısının artmasının gürültüyü azalttığı sonucuna ulaşarak bunu düşen motor devrine bağlamışlardır. Gürültünün azaltılması için temel yöntemin motor devrini düşürmek olduğu görülmüştür. (Gur & Rosen, 2009)

Biyomimetik Tasarım Kullanılarak Gerçekleştirilen Çalışmalar

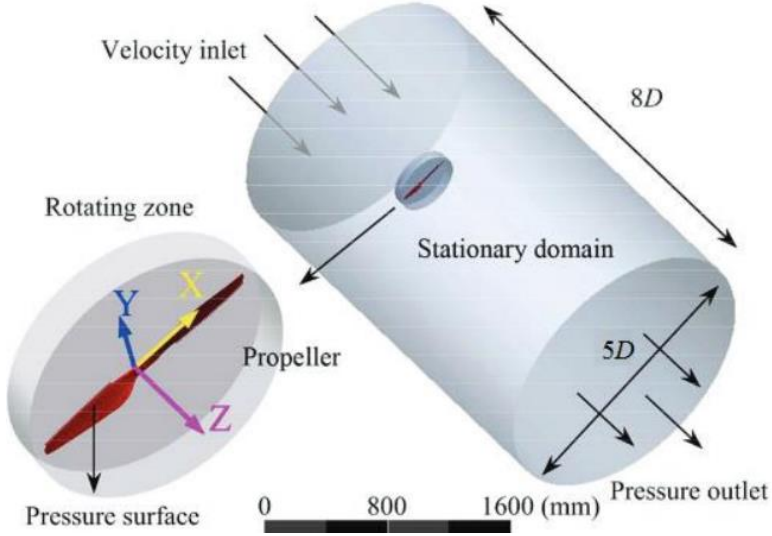
Wei (2020) çalışmalarında baykuşların kanatlarından ilham alarak farklı kanat hücum kenarı çentiklerine sahip pervanelerin aerodinamik verimliliklerini ve oluşturdukları gürültüyü kıyaslayan deneysel ve nümerik bir çalışma yaptılar.



Şekil 22. Test edilen çentikli pervane tasarımları (Wei, 2020)

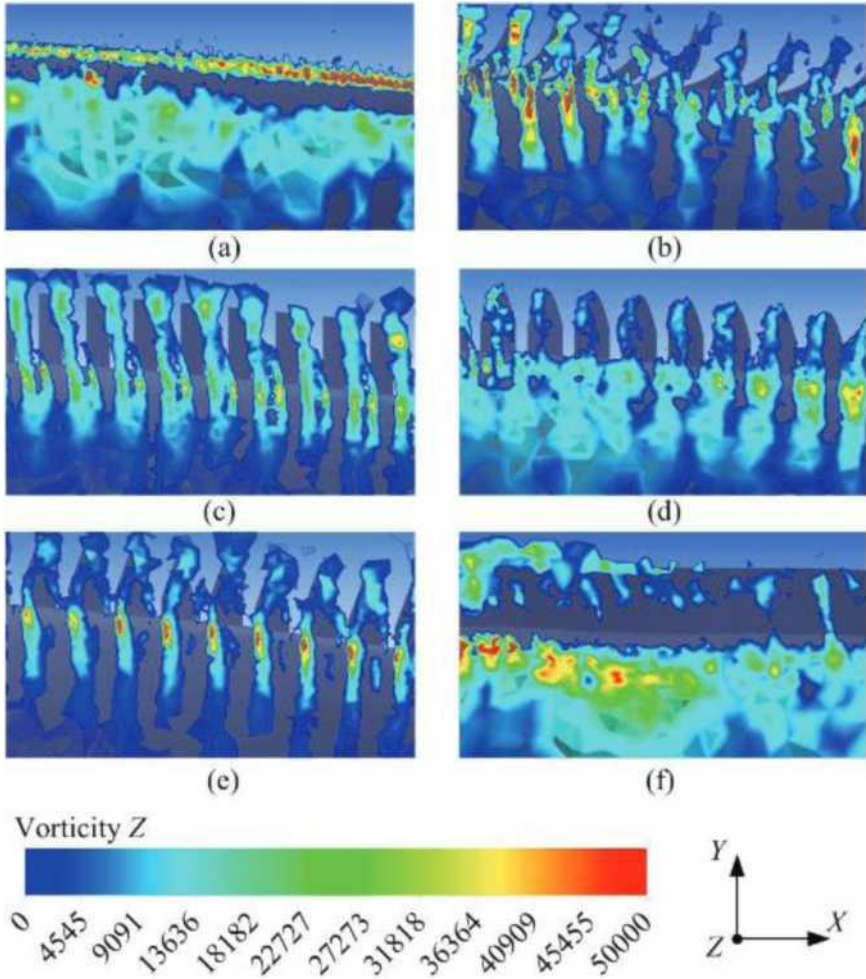
HAD simülasyonları, tekil pervane yer testleri ve bir quadrotor İHA ile gerçek uçuş yaparak plaka, testere dişi, kanatçık, dalga ve kanca şekillerindeki hücum kenarlarının etkilerini incelediler. Hücum kenan tırtıklarının aerodinamik performans üzerindeki iyileştirmeleri, farklı tırtıklı pervanelerde değişiklik gösterdi: plaka, testere dişi, kanatçık, dalga ve kanca şekilli

tasarımlardan üretilen itme kuvveti kıyaslanan sade pervane türüne göre sırasıyla %4,88, %3,53, %3,27, %3,06 ve -%3,51 daha yüksek itki üretti.



Şekil 23. Yapılan HAD simülasyonlarının değişkenleri (Wei, 2020)

Testere dişli pervanedeki gürültü azalımı (maksimum 4,18 dB ve ortalama 2,43 dB) diğer tırtıklı pervanelere göre daha yüksek olduğu görüldü. Yazarlar bunu tırtıklı pervanelerin vakum yüzeyindeki hız dalgalanmalarını azaltabilmesine, laminant - türbülent akış geçişini sağlamasına ve türbülent akışın dağılımını mümkün kılmasına bağladılar. Kısacası tırtıkların bir mikro girdap üretici gibi çalıştıkları gözlemlendi. Biyomimetik pervanelerin (testere dişli pervane), gerçek bir dört rotorlu İHA'da sırasıyla 5m ve 8m yükseklikte uçarken 4,73 dB ve 3,79 dB'ye kadar gürültü azaltması sağladığı gözlemlendi.

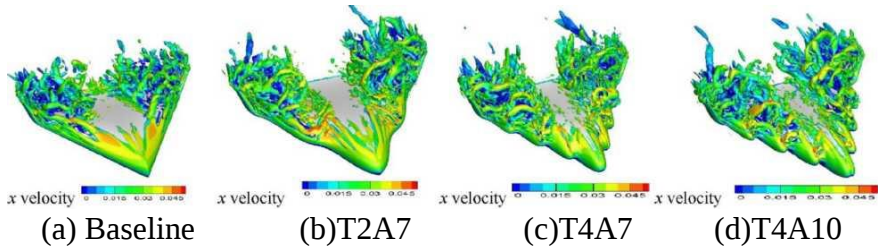


Şekil 24. Tırtıkların oluşturdukları girdapların gösterimi (Wei, 2020)

Çalışmada, pervanelerdeki biyomimetik tabanlı çentiklerin gürültüyü azaltabildiği ve aynı anda İHA ve rotor tabanlı uçakların pervanelerinden elde ettikleri itme kuvvetini artırabildiği sonucuna ulaşılmıştır (Wei, 2020).

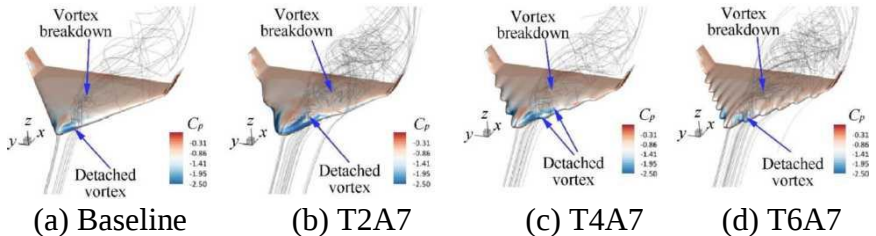
Zhang (2021) çalışmasında kambur balinaların yumrulu yüzgeçlerinden esinlenerek bir delta kanat tasarlamıştır. Bu

çalışmada, hücum kenarında sinüzoidal yumruları olan ve olmayan NACA0012 kanat profilini kullanan delta kanat üzerindeki akış alanı hesaplandı. Kaldırma kuvveti, sürüklenme kuvveti ve yüzey basınç dağılımı detaylı olarak incelendi. Çalışmada yumrulu hücum kenarlarında makul bir oranda yumru bulunması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Yumruların çok fazla olması kaldırma kuvvetini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Biyomimetik yumrulu kanatların sağladığı fayda olarak, stall durumunu geciktirdiği gözlemlenmiştir. Girdap belirlemede λ_{22} girdap belirleme yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 25. Yumrulu kanat üzerindeki akışın görselleştirilmesi (ZHANG, 2021)

Küçük boyutlu yumruların düşük hücum açılarında yüksek kaldırma/sürüklenme oranı sağladığı gözlemlenmiştir. Örneğin T4A7 kanadıyla elde edilen maksimum %9,6 kaldırma/sürüklenme oranının yanında T4A4 tasarımında sadece %5,2 artış elde edilmiştir. Yumrunun büyüklüğüyle sayısı arasındaki olası dengeyle kaldırma/sürüklenme oranının eniyilenebileceği not edilmiştir.

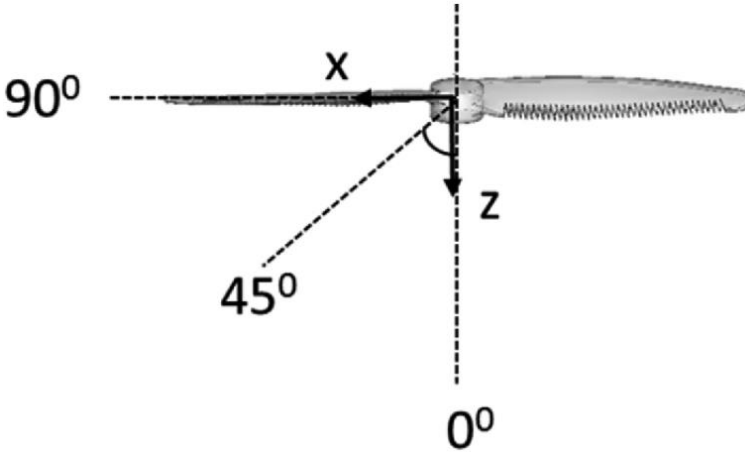


Şekil 26. Yumrulu kanat üzerindeki girdap bölünmeleri (ZHANG, 2021)

Delta kanatlar üzerindeki girdapların yumrular tarafından daha küçük girdaplara bölündüğü gözlemlenmiş ve bunun sınır tabakası ayrılmasına karşı bir direnç uygulayan pozitif etkisinden bahsedilmiştir (ZHANG, 2021).

Tay (2020) çalışmasında, quadrotor İHAlarda kullanılan bir pervanenin kanatlarındaki dişlerin gürültü azaltma üzerindeki etkisini sayısal simülasyonlar ve deneysel yollarla araştırmıştır. 5 inç çapında 5030 ölçüsündeki pervanelerin standart, modifiyeli ve tırtıklı gibi farklı tipleri test edilmiştir.

Çalışmada deney sonuçlarının birbirleriyle kıyaslanmasını mümkün kılabilmek adına tırtıklı pervanenin yüzey alanıyla referans pervanenin yüzey alanı eşit tutulmuş tur. Daha önceki akademik çalışmalarda bu detayın atlanılmış olmasından bahseden yazar bunun önemli bir etken olduğundan bahsetmiştir.

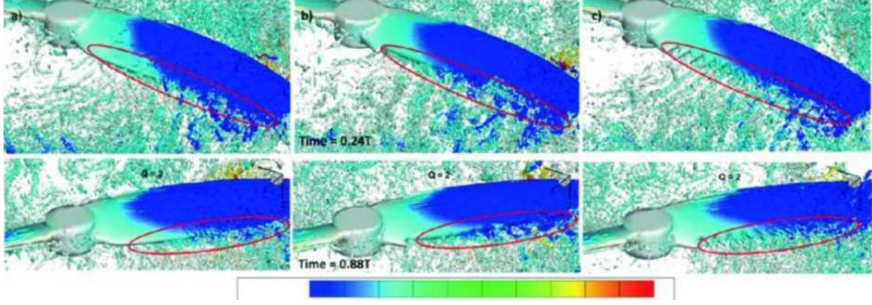


Şekil 27. Tırtıklı firar kenarının biomimetik pervane üzerinde gösterimi (Tay, 2020)



Şekil 28 Referans pervane tasarımı (Tay, 2020).

Yazar aynı zamanda testleri eşit pervane devirlerinde ve eşit itki değerleri elde ederken yapmaya özen göstererek deney sonuçlarının anlamlılığını artırmıştır. Yazarın çalışmasında bu noktaların göz ardı edildiği çalışmalara atıflar da yapılmıştır.



Şekil 29 Tırtıklı biyometrik pervanenin akış görselleştirmesi (Tay, 2020).

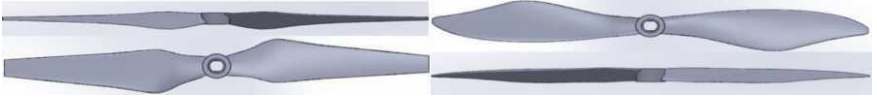
Yazar çalışmasında pervane yüzey alanları her ne kadar eşit tutmuş da olsa itki değerlerinin yüzey alanına göre doğrusal oranda olmadığından bahsetmiştir. Tırtıksız pervaneden kesilen parçanın aerodinamiğe etkisi ve yüzey alan dağılımının aerodinamik kaldırma kuvveti merkezine göre konumunun değişmesinden kaynaklı olarak tırtıksız pervanede %2,71'lik ve tırtıklı pervanede ise %11,7'lik bir itki kaybı referans pervaneye kıyasla gözlemlenmiştir. Eşit devirlerde elde edilen bu itki farklılıklarında ise tırtıklı pervane 5dB değerinde bir gürültü azalımı göstermiştir (Tay, 2020). Yazarın çalışmasında bahsedilen biyometrik esinlenmenin ticari ürünlerde Simens DinoTail gibi örnekleri vardır.

Ning & Hu, (2017) çalışmalarında akçaağacı tohumundan ve ağustoböceği kanatlarından esinlenilerek tasarlanmış bir pervanenin referans pervane tasarımıyla olan kıyaslamasını deneysel olarak yapmışlardır.



Şekil 30 Esin kaynağı; ağustosböceği kanadı ve akçaağacı tohumu (Ning & Hu, 2017)

Yazarlar çalışmalarında esinlenilmiş pervaneyle daha düşük pervane devirlerinde eşit miktarda itki elde etmişlerdir. Düşük devirde elde edilen eşit itki biyomimetik pervanenin 4db d aha sessiz çalışmasını sağlamıştır.



Şekil 31 Esinlenilmiş pervane(sağ) ve referans pervanenin(sol) gösterimi (Ning & Hu, 2017)

Kaynaklar

Zari, M. P. (2007). Biomimetic Approaches To Architectural Design For Increased, Sustainability, Yeni Zelanda, 33.

Axe, D. (2009, June 17). Strategist: Killer drones level extremists' advantage. Wired. Retrieved September 27, 2021, from <https://www.wired.com/2009/06/strategist-killer-drones-level-extremists-advantage/>

Teran, H. C., Torres, G. R., Arteaga, O., Morales, J. J., Leon, B. P., & Morales, D. A. (2019). Parametric Analytical-experimental Modeling in BLDC Engines Applied to Propulsion Systems on Chopper Motorcycles. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 8(4), 600-606. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.8.4.600-606>

Varshney, K., Chang, S., & Wang, Z. J. (2011). The kinematics of falling maple seeds and the initial transition to a helical motion. *Nonlinearity*, 25(1), C1-C8. <https://doi.org/10.1088/0951-7715/25A/c1>

Spicer, R. A., & Niklas, K. J. (1993). Plant Biomechanics: An Engineering Approach to Plant Form and Function. *The Journal of Ecology*, 81(3), 592. <https://doi.org/10.2307/2261541>

Lentink, D., Dickson, W. B., Leeuwen, J. L. van, & Dickinson, M. H. (2009). Leading-Edge Vortices Elevate Lift of Autorotating Plant Seeds. *Science*, 324(5933), 1438-1440. <https://doi.org/10.1126/science.1174196>

Anderson, R. C. (2009). Do dragonflies migrate across the western Indian Ocean? *Journal of Tropical Ecology*, 25(4), 347-358. <https://doi.org/10.1017/s0266467409006087>

Vogel, S. (2013). *Comparative biomechanics : life's physical world* (p. 439). Princeton University Press.

Wang, Z. J. (2005). DISSECTING INSECT FLIGHT. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 37(1), 183-210.
<https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.121940>

Sane, S. P. (2003). The aerodynamics of insect flight. *Journal of Experimental Biology*, 206(23), 4191-4208.
<https://doi.org/10.1242/jeb.006663>

Bomphrey, R. J., Nakata, T., Henningsson, P., & Lin, H.-T. (2016). Flight of the dragonflies and damselflies. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 371(1704), 20150389. <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0389>

Xie, C.-M., & Huang, W.-X. (2015). Vortex interactions between forewing and hindwing of dragonfly in hovering flight. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 5(1), 24-29.
<https://doi.org/10.1016/j.taml.2015.01.007>

Götz, K. G. (1964). Optomotorische Untersuchung des visuellen systems einiger

Augenmutanten der Fruchtfliege Drosophila. *Kybernetik*, 2(2), 77-92. <https://doi.org/10.1007/bf00288561>

Srinivasan, M. V., Zhang, S. W., & Chandrashekara, K. (1993). Evidence for two distinct movement-detecting mechanisms in insect vision. *Naturwissenschaften*, 50(1), 38-41.
<https://doi.org/10.1007/bf01139758>

Srinivasan, M. V., Zhang, S. W., Chahl, J. S., Barth, E., & Venkatesh, S. (2000). How honeybees make grazing landings on flat surfaces. *Biological Cybernetics*, 53(3), 171-183.
<https://doi.org/10.1007/s004220000162>

Kirchner, W. H., & Srinivasan, M. V. (1989). Freely flying honeybees use image motion to estimate object distance. *Naturwissenschaften*, 76(6), 281-282.
<https://doi.org/10.1007/bf00368643>

Rasmussen, K., Palacios, D. M., Calambokidis, J., Saborio, M. T., Dalla Rosa, L., Secchi, E. R., Steiger, G. H., Allen, J. M., &

Stone, G. S. (2007). Southern Hemisphere humpback whales wintering off Central America: insights from water temperature into the longest mammalian migration. *Biology Letters*, 3(3), 302-305. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2007.0067>

Miklosovic, D. S., Schultz, M. P., & Esquivel, C. (2004). Effects of Surface Finish on Aerodynamic Performance of a Sailboat Centerboard. *Journal of Aircraft*, 41(5), 1073-1081. <https://doi.org/10.2514/L777>

Clark, C. J., LePiane, K., & Liu, L. (2020). Evolution and Ecology of Silent Flight in Owls and Other Flying Vertebrates. *Integrative Organismal Biology*, 2(1). <https://doi.org/10.1093/iob/obaa001>

Sarradj, E., Fritzsche, C., & Geyer, T. (2011). Silent Owl Flight: Bird Flyover Noise Measurements. *AIAA Journal*, 49(4), 769-779. <https://doi.org/10.2514/Li050703>

Geyer, T., Sarradj, E., & Fritzsche, C. (2012). Silent Owl Flight: Acoustic Wind Tunnel Measurements on Prepared Wings. *18th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (33rd AIAA Aeroacoustics Conference)*. <https://doi.org/10.2514/6.2012-2230>

Geyer, T. F., Claus, V. T., & Sarradj, E. (2016). Silent Owl Flight: The Effect of the Leading Edge Comb on the Gliding Flight Noise. *22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. <https://doi.org/10.2514/6.2016-3017>

Geyer, T. F., Claus, V. T., Hall, P. M., & Sarradj, E. (2017). Silent owl flight: The effect of the leading edge comb. *International Journal of Aeroacoustics*, 16(3), 115-134. <https://doi.org/10.1177/1475472x17706131>

Jaworski, J. W., & Peake, N. (2020). Aeroacoustics of Silent Owl Flight. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 52(1), 395-420. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010518-040436>

Gill, R. E., Tibbitts, T. L., Douglas, D. C., Handel, C. M., Mulcahy, D. M., Gottschalck, J. C., Warnock, N., McCaffery, B. J., Battley, P. F., & Piersma, T. (2008). Extreme endurance flights by landbirds crossing the Pacific Ocean: ecological corridor rather than barrier? *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 276(1656), 447-457. <https://doi.org/10.1098/rspb.2008.1142>

Hoyo, Josep & Elliott, Andrew & Sargatal, Jordi & Cabot, Jose. (2021). *Handbook of the birds of the world* / [edited by] Josep del Hoyo, Andrew Elliott, Jordi Sargatal. SERBIULA (sistema Librum 2.0).

Egevang, C., Stenhouse, I. J., Phillips, R. A., Petersen, A., Fox, J. W., & Silk, J. R. D. (2010). Tracking of Arctic terns *Sterna paradisaea* reveals longest animal migration. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(5), 2078-2081. <https://doi.org/10.1073/pnas.0909493107>

Mercado, M. (2019). The Rise and Fall of Lighter-Than-Air Aircraft, 1783 - 1937. *Legacy*, 17(1). <https://opensiuc.lib.siu.edu/legacy/vol17/iss1/7>

Björn Kiefer, & Books On Demand Gmbh. (2021). *Die Segelflugschule Rhinow Pilotenschmiede am Absturzort von Otto Lilienthal*. Norderstedt Bod - Books On Demand.

Agte, J., Gan, T., Kunzi, F., March, A., Sato, S., Suarez, B., & Yutko, B. (2010). Conceptual Design of a Hybrid Lift Airship for Intra-Regional Flexible Access Transport. *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. <https://doi.org/10.2514/6.2010-1391>

Anderson, J. D. (2007). A history of aerodynamics and its impact on flying machines. *Cambridge Univ. Press*.

Center, G. R., 2017, Incorrect theory: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/wrong1.html>. (Accessed : 2021-10-24).

Eastlake, C. N. (2002). An aerodynamicist's view of Lift, Bernoulli, and Newton. *The Physics Teacher*, 40(3), 166-173. <https://doi.org/10.1119/1.1466553>

Bauman, R. P., & Schwaneberg, R. (1994). Interpretation of Bernoulli's equation. *The Physics Teacher*, 32(8), 478-488. <https://doi.org/10.1119/L2344087>

Babinsky, H. (2003). How do wings work? *Physics Education*, 38(6), 497-503. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/38A5/001>

Center, G. R., 2017, Incorrect theory: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/wrong2.html>. (Accessed : 2021-10-25).

McLean, D. (2012). Understanding Aerodynamics: Arguing from the Real Physics. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118454190>

McLean, D. (2018). Aerodynamic Lift, Part 2: A Comprehensive Physical Explanation. *The Physics Teacher*, 56(8), 521-524. <https://doi.org/10.1119/L5064559>

Drela, M. (2014). Flight vehicle aerodynamics. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.

Babinsky, H. (2016). Correct explanation for lift takes off. *Physics Education*, 51(3), 030108. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/51/3/030108>

Center, G. R., 2017, correct theory: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/right2.html>. (Accessed : 2021-10-25).

Greatrix, David. (2012). Powered Flight: The Engineering of Aerospace Propulsion. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2485-6>

Gamble, D., & Arena, A. (2010). Automated Dynamic Propeller Testing at Low Reynolds Numbers. *48th AIAA Aerospace*

Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. <https://doi.org/10.2514/6.2010-853>

Heinzen, S., Hall, C., & Gopalarathnam, A. (2010). Passively Varying Pitch Propeller for Small UAS. *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition.* <https://doi.org/10.2514/6.2010-62>

Tracy, Ian. (2012). Propeller design and analysis for a small, autonomous UAV.

Bettinger, Ben. (2012). Manufacturing, analysis and experimental testing of multi- bladed propellers for SUAS.

Merchant, M., & Miller, L. S. (2006). Propeller Performance Measurement for Low Reynolds Number UAV Applications. *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.* <https://doi.org/10.2514/6.2006-1127>

Khalid, A. (2012). Freshmen Research Project: Design, Development, and Testing of Variable Pitch Propeller Thrust Measurement Apparatus - A Case Study. *2012 ASEE Annual Conference & Exposition Proceedings.* <https://doi.org/10.18260A-2-21410>

Baranski, J., Fernelius, M., Hoke, J., Wilson, C., & Litke, P. (2011). Characterization of Propeller Performance and Engine Mission Matching for Small Remotely Piloted Aircraft. *47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit.* <https://doi.org/10.2514/6.2011-6058>

Moffitt, B., Bradley, T., Parekh, D., & Mavris, D. (2008). Validation of Vortex Propeller Theory for UAV Design with Uncertainty Analysis. *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.* <https://doi.org/10.2514/6.2008-406>

Stajuda, M., Karczewski, M., Obidowski, D., & Jozwik, K. (2016). Development of a CFD model for propeller simulation.

Zeune, C., Ol, M., & Logan, M. (2008). Analytical/Experimental Comparison for Small Electric Unmanned

Air Vehicle Propellers. *26th AIAA Applied Aerodynamics Conference*. <https://doi.org/10.2514/6.2008-7345>

Rossow, V. J. (1985). Technical Notes: Thrust Changes Induced by Ground and Ceiling Planes on a Rotor in Hover. *Journal of the American Helicopter Society*, 30(3), 53-55. <https://doi.org/10.4050/jahs.30.53>

Brandt, J. B., "Small-Scale Propeller Performance at Low Speeds," M.S. Thesis, Department of Aerospace Engineering, University of Illinois at Urbana- Champaign, Illinois, 2005.

Lee, T. E., Leishman, J. G., & Ramasamy, M. (2010). Fluid Dynamics of Interacting Blade Tip Vortices with a Ground Plane. *Journal of the American Helicopter Society*, 55(2), 22005-2200516. <https://doi.org/10.4050/jahs.55.022005>

Deters, R. W., Ananda, G. K., & Selig, M. S. (2015). Slipstream Measurements of Small-Scale Propellers at Low Reynolds Numbers. *33rd AIAA Applied Aerodynamics Conference*. <https://doi.org/10.2514/6.2015-2265>

Zhang, C., Xie, S., & Qin, T. (2016). Aerodynamic Analysis of Small Propeller in Wind Field Using CFD. *Proceedings of the 2015 4th International Conference on Sustainable Energy and Environmental Engineering*. <https://doi.org/10.2991/icseee-15.2016.148>

Kutty, H. A., & Rajendran, P. (2017). Review on Numerical and Experimental Research on Conventional and Unconventional Propeller Blade Design. *International Review of Aerospace Engineering (IREASE)*, 10(2), 61. <https://doi.org/10.15866/irease.v10i2.11547>

Kutty, H., & Rajendran, P. (2017). 3D CFD Simulation and Experimental Validation of Small APC Slow Flyer Propeller Blade. *Aerospace*, 4(1), 10. <https://doi.org/10.3390/aerospace4010010>

Wei, Y., Xu, F., Bian, S., & Kong, D. (2020). Noise Reduction of UAV Using Biomimetic Propellers with Varied

Morphologies Leading-edge Serration. *Journal of Bionic Engineering*, 17(4), 767-779. <https://doi.org/10.1007/s42235-020-0054-z>

Chen, L., Wu, J., & Cheng, B. (2020). Leading-edge vortex formation and transient lift generation on a revolving wing at low Reynolds number. *Aerospace Science and Technology*, 97, 105589. <https://doi.org/10.1016/i.ast.2019.105589>

Tay, W., Lu, Z., Ramesh, S. S., & Khoo, B. (2020). Numerical Simulations of Serrated Propellers to Reduce Noise. *Supercomputing Frontiers*, 87-103. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48842-0_6

Gur, O., & Rosen, A. (2009). Design of Quiet Propeller for an Electric Mini Unmanned Air Vehicle. *Journal of Propulsion and Power*, 25(3), 717-728. <https://doi.org/10.2514/1.38814>

Ning, Z., & Hu, H. (2017). An Experimental Study on the Aerodynamic and Aeroacoustic Performances of a Bio-Inspired UAV Propeller. *35th AIAA Applied Aerodynamics Conference*. <https://doi.org/10.2514/6.2017-3747>

Hintz, C., Khanbolouki, P., Perez, A. M., Tehrani, M., & Poroseva, S. (2018). Experimental study of the effects of bio-inspired blades and 3D printing on the performance of a small propeller. 2018 Applied Aerodynamics Conference. <https://doi.org/10.2514/6.2018-3645>

Pourrajabian, A., Dehghan, M., & Rahgozar, S. (2021). Genetic algorithms for the design and optimization of horizontal axis wind turbine (HAWT) blades: A continuous approach or a binary one? *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 44, 101022. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101022>

İnternet: Wind turbine blade and blades of propellers. (n.d.). [Www.heliciel.com](http://www.heliciel.com). URL: <https://www.heliciel.com/en/helice/pale-helice-eolienne-hydrolienne.htm>

Son Erişim Tarihi:09.05.2022.

Koehler, C., Liang, Z., Gaston, Z., Wan, H., & Dong, H. (2012). 3D reconstruction and analysis of wing deformation in free-flying dragonflies. *Journal of Experimental Biology*. <https://doi.org/10.1242/jeb.069005>

Garinis, Dimitrios & Dinulovic, Mirko & Rasuo, Bosko. (2012). Dynamic Analysis of Modified Composite Helicopter Blade. FME Transactions. 40.

P15*5 Prop-2PCS/PAIR Polish Carbon Fiber Propellers Multirotor T-MOTOR Store-Official Store for T-motor drone motor,ESC,Propeller. (n.d.). Store.tmotor.com. <https://store.tmotor.com/goods.php?id=351> Son Erişim Tarihi:09.05.2022.

Antigravity MN4006 KV350 - 2PCS/SET_Antigravity Type_Motors_Multirotor_T- MOTOR Store-Official Store for T-motor drone motor,ESC,Propeller. (n.d.). Store.tmotor.com. <https://store.tmotor.com/goods.php?id=440> Son Erişim Tarihi:09.05.2022.

BÖLÜM II

Helisel Tip Isı Borusunda Akışkan Davranışının Debi İle Değişim Etkisi

Mehmet Akif KARTAL¹

Giriş

Kabuk tarafındaki sıvının istenen düzen ve hızda hareketini düzenlemek için en yaygın olarak kullanılan saptırma plakaları, türbülansın ve karışımın arttırılması yoluyla ısı transferini yoğunlaştırmak için kıvrımlı ve zikzak bir akış rejimi oluşturan bölümsel olanlardır. Ek olarak durgun akış bölgeleri, geri akışlar ve girdapların vesilesiyle büyük basınç düşüşüne ve boru demetinde yüksek kirlenme ve titreşim arızası risklerine neden olur [1]. Helisel tipteki ısı eşanjörleri genel olarak mükemmel avantajları nedeniyle kabul edilmektedir; örneğin termal özelliklerin arttırılması, basınç düşüşünün azaltılması, kabuk tarafındaki kirlenmenin hafifletilmesi

¹ Öğretim Görevlisi Doktor, Bandırma Onyedİ Eylöl Üniversitesi, mkartal@bandirma.edu.tr

ve akış kaynaklı titreşimin önlenmesi olarak ifade edilebilmektedir [2]. Günümüzde ileri imalatların ve hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin gelişmesiyle birlikte, helisel tipteki ısı boruları ve eşanjörler üzerine araştırmalar çoğalmaktadır.

Isı eşanjörlerinin termohidrolik özelliklerini helisel, segmental ve yonca delikli saptırma plakalarıyla sayısal olarak karşılaştırılması sonucu, helisel yapının kullanımının en yüksek entegre performansı sunabileceğini gösterdi [3]. Diğer bir çalışmada ise, çeşitli helis açılarının kapsamlı karakteristik üzerindeki etkisi araştırılmış ve en avantajlı helis açısının yaklaşık 45° olduğu gözlemlenirken [4], 40° sarmal açılı ısı elemanının en iyi kapsamlı performansı sergilediği gözlemlenmiştir [5].

Du ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, değişen eliptik boru yerleşimlerine sahip ısı elemanları araştırılmış ve optimize edilerek boru dizisi açısı kombinasyonlarının, pompalama tüketiminde küçük bir artışla ısı transferini iyileştirme hedefine ulaşabileceği sonucuna ulaşmışlardır [6].

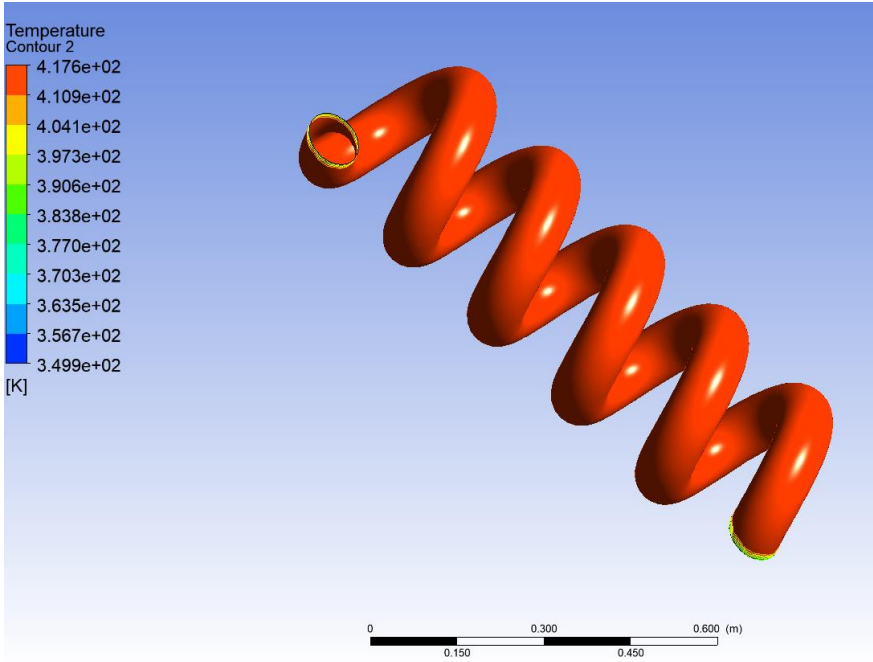
Kabuk tarafındaki sıvı akışı, artan saptırma plakası sayıları nedeniyle daha çok bir spiral akışa benzer; ilgili araştırmalar [7-8] yapılmış ve yapısal iyileştirmelerin, sızıntı alanındaki kısa yol akışlarını kısıtlayabildiği ve ısı değiştirici performansını artırabildiği gözlemlenebilmektedir.

Son zamanlarda, ısı elemanlarına ilişkin araştırmalar genellikle, termodinamiğin birinci yasası analizinin yardımıyla ısı transferi ve direnç performanslarına odaklanmaktadır. Birinci yasayla karşılaştırıldığında termodinamiğin ikinci yasası enerjinin niceliğinden çok niteliğiyle ilgilidir. İkinci yasa analizine dayanan ısı eşanjörü performansı için bir dizi değerlendirme kriteri de açıklanmıştır [9-11].

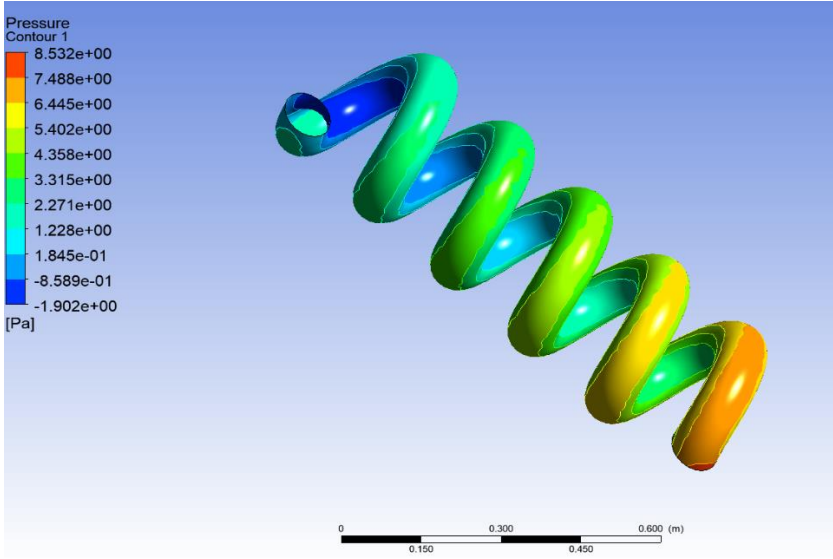
HELİSEL TİP ISI BORUSUNDA DEBİNİN AKIŞKAN DAVRANIŞINA ETKİSİ

Helisel tip ısı borusunda kullanılan akışkan olan suyun birbirinden farklı akışkan debilerinde 0.5 kg/h, 0.8 kg/h, 1.1 kg/h ve

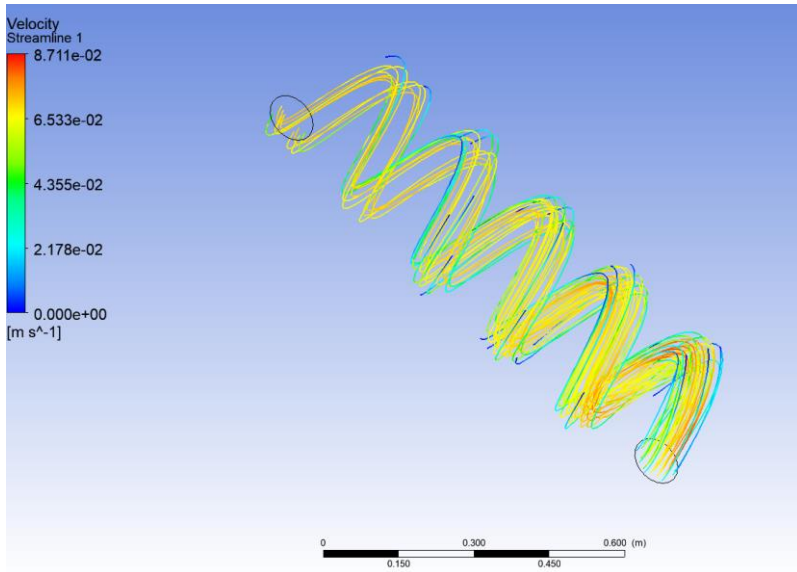
1.5 kg/h 'taki değişimleri olması halinde akış davranışında modifikasyonların olduğu gözlenmektedir. Bu değişimleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği metoduyla kullandığımız program sayesinde simüle ettiğimizde aşağıdaki verilerin elde edildiği gözlemlenebilmektedir.



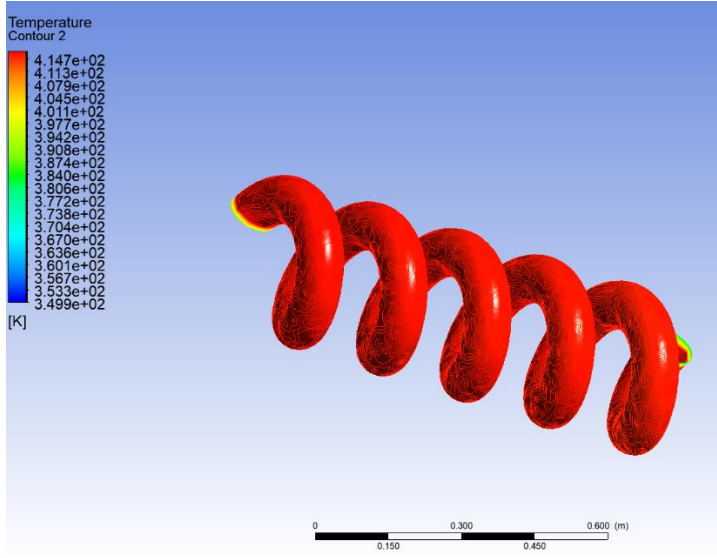
şekil 1. Helisel tip ısı borusu debinin 0.5 kg/h olması durumundaki sıcaklık değişimi



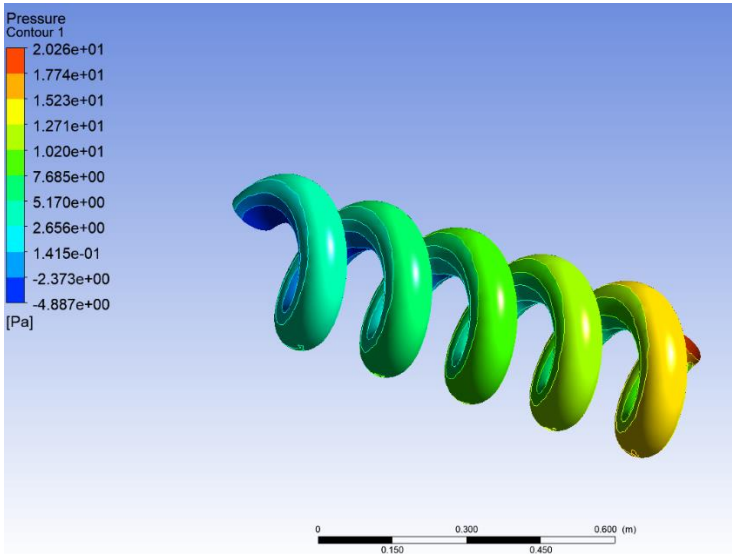
Şekil 2. Helisel tip ısı borusu debinin 0.5 kg/h olması durumundaki basınç değişimi



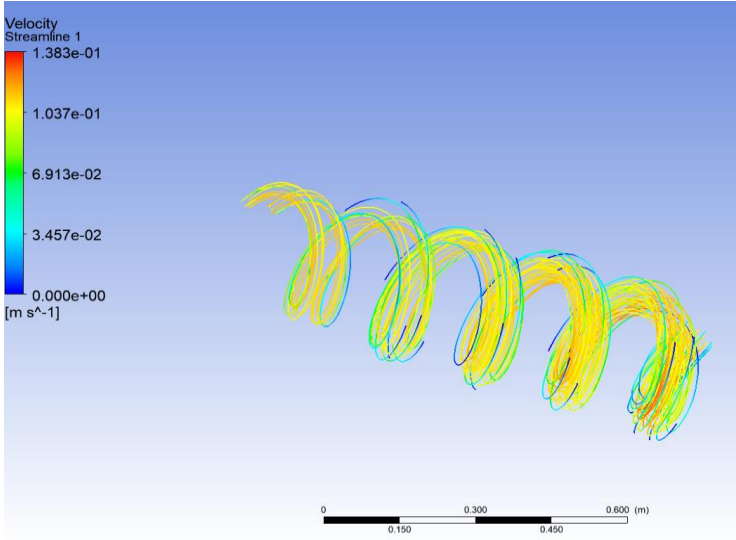
Şekil 3. Helisel tip ısı borusu debinin 0.5 kg/h olması durumundaki hız akış çizgileri



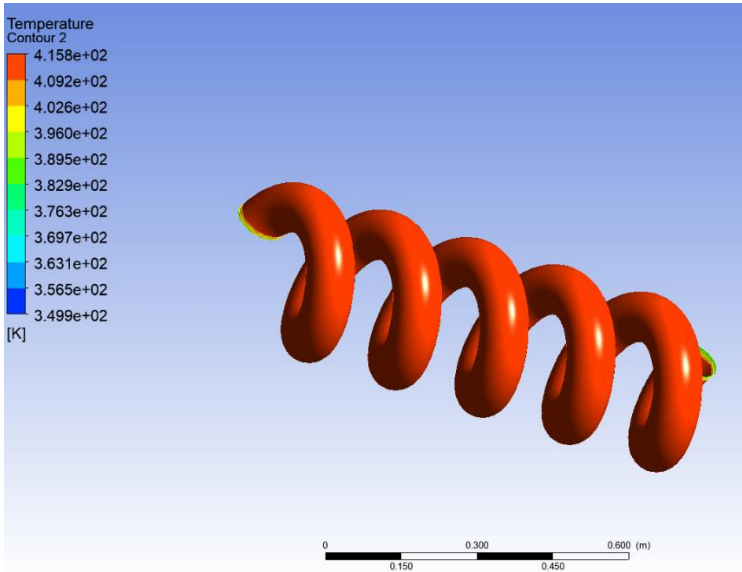
Şekil 4. Helisel tip ısı borusu debinin 0.8 kg/h olması durumundaki sıcaklık değişimi



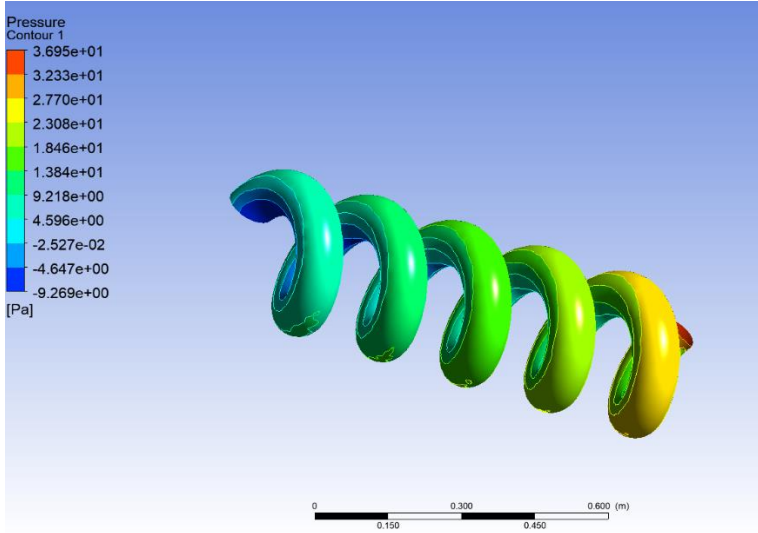
Şekil 5. Helisel tip ısı borusu debinin 0.8 kg/h olması durumundaki basınç değişimi



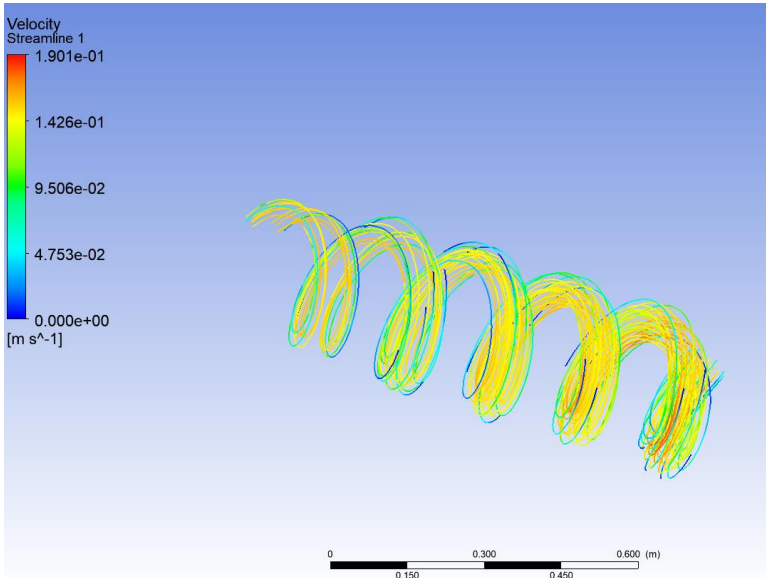
Şekil 6. Helisel tip ısı borusu debinin 0.8 kg/h olması durumundaki hız akış çizgileri



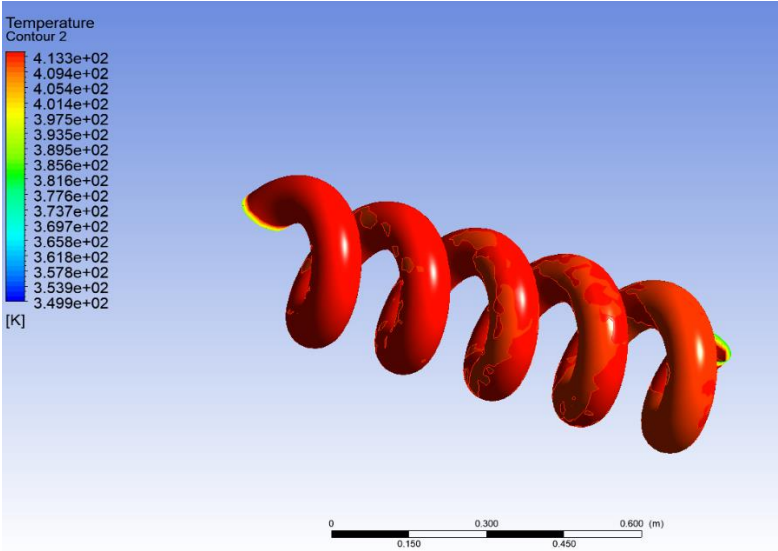
Şekil 7. Helisel tip ısı borusu debinin 1.1 kg/h olması durumundaki sıcaklık değişimi



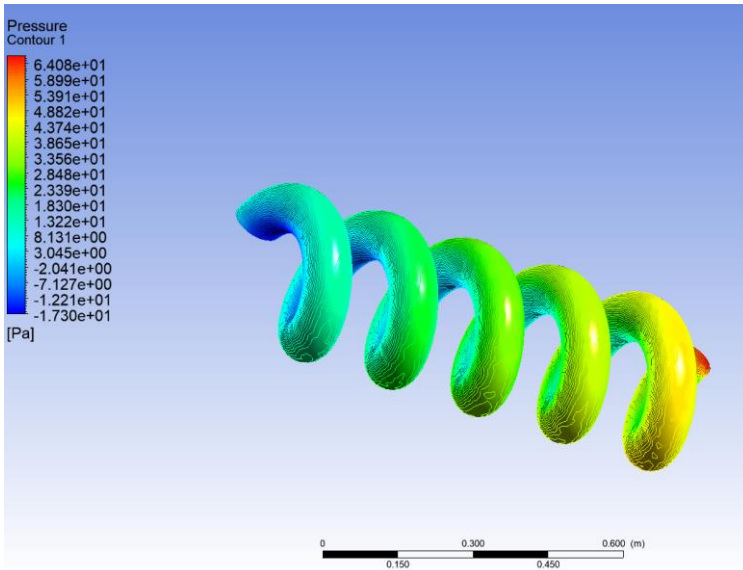
Şekil 8. Helisel tip ısı borusu debinin 1.1 kg/h olması durumundaki basınç değişimi



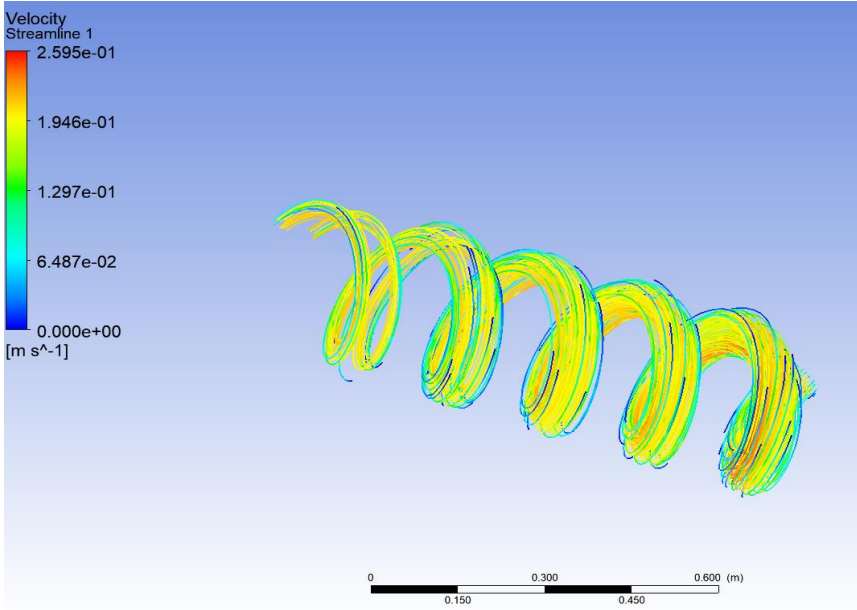
Şekil 9. Helisel tip ısı borusu debinin 1.1 kg/h olması durumundaki hız çizgileri dağılımı



Şekil 10. Helisel tip ısı borusu debinin 1.5 kg/h olması durumundaki sıcaklık değişimi



Şekil 11. Helisel tip ısı borusu debinin 1.5 kg/h olması durumundaki basınç değişimi



Şekil 12. Helisel tip ısı borusu debinin 1.5 kg/h olması durumunda hız çizgileri dağılımı

Helisel tip ısı borusunda 0.5 kg/h, 0.8 kg/h, 1.1 kg/h ve 1.5 kg/h 'deki birbirinden farklı dört kütleli debide gerçekleşen analizlerde akışkan davranışının değişimleri analizlere tabii tutulmuştur. Şekil 1'e göre 0.5 kg/h olan debide gerçekleşen analizde boru sıcaklığı 420K ve et kalınlığı 0.03 m olarak tanımlanmıştır. Buna göre kullanılan akışkan suyun homojen bir sıcaklık dağılımı olmakla birlikte Helisel tip ısı borusunda sıcaklığın kırmızı bölgede seyrettiği gözlemlenebilmiştir. Şekil 4, Şekil 7 ve Şekil 10'da kütleli debinin artmasıyla birlikte maksimum sıcaklık değerlerinin de azalarak kırmızı bölgede durduğu tespit edilmiştir.

Şekil 2'ye göre basınç dağılımının 0.5 kg/h debi değerinde olduğu durumda analizler gerçekleştirilmiştir. Buna göre, basınç değerinin yer yer değiştiği gözlemlenirken helisel tip ısı borusunda kütleli debinin 0.5 kg/h olduğu durumda maksimum basıncın 8.532 Pa olurken, kütleli debinin 1.5 kg/h olduğu maksimum debi

durumunda ise, ulaşılan maksimum basınç değeri 64.08 Pa değerlerine ulaşabilmektiştir. Dięer basınç dūřuřu analizleri şekil 5, şekil 8 ve şekil 11’de gōsterilmektiřtir. Dięer debi durumlarında da artışlar yaşanmış fakat maksimum ile minimum basınç değerlerinde elde edilmiş ve doğru orantılı artışlarda tespit edilmiştir. Hız dağılım çizgileri ise, şekil 3, şekil 6, şekil 9 ve kütlesel debinin maksimum olduğu 1.5 kg/h durumu şekil 12’de simüle edilmiştir. En yoğun girdap bōlgesinin debinin maksimum olduğu durumda 1.5 kg/h değerinde gōzlemlenebilmektiřtir.

SONUÇLAR

Bu alışmada, Helisel tip ısı borusundaki basınç dūřuřu ve ısı transferine etkileri analiz edilerek sonuçları çalışmaya aktarılmıştır. Kullanılan sıvının kütlesel debisinin artmasıyla girdap bōlgesinin artarak 1.5 kg/h olduğu durumda yoğunlaştığı gōzlemlenebilmektiřtir. 0.5 kg/h olan debide gerçekleşen analizde boru sıcaklığı 420K ve et kalınlığı 0.03 m olarak tanımlanmıştır. Buna gōre kullanılan akışkan suyun homojen bir sıcaklık dağılımı olmakla birlikte Helisel tip ısı borusunda sıcaklığın kırmızı bōlgede seyrettiği gōrōlebilmektiřtir. Kütlesel debinin artmasıyla birlikte maksimum sıcaklık değerlerinin de azalarak kırmızı bōlgede durduğu tespit edilmiştir.

Basınç değerinin yer yer değiştiği gōzlemlenirken helisel tip ısı borusunda kütlesel debinin 0.5 kg/h olduğu durumda maksimum basının 8.532 Pa olurken, kütlesel debinin 1.5 kg/h olduğu maksimum debi durumunda ise, ulaşılan maksimum basınç değeri 64.08 Pa değerlerine ulaşabilmektiştir. Diğer debi durumlarında da artışlar yaşanmış fakat maksimum ile minimum basınç değerlerinde elde edilmiş ve doğru orantılı artışlarda tespit edilmiştir. En bōyōk basınç değerinin maksimum kütlesel debinin 1.5 kg/h olduğu durumda ulaşılabilmektiştir.

KAYNAKÇA

[1] K.J. Bell, Heat exchanger design for the process industries, *J. Heat Transf.* 126 (6) (2004) 877–885.

[2] T.T. Du, W.J. Du , K. Che , L. Cheng , Parametric optimization of overlapped helical baffled heat exchangers by Taguchi method, *Appl. Therm. Eng.* 85 (2015) 334–339.

[3] A .E.I Maakoul , A . Laknizi , S. Saadeddine , M.E.I Metoui , A. Zaite , M. Meziane , A. Ben Abdellah , Numerical comparison of shell-side performance for shell and tube heat exchangers with trefoil-hole, helical and segmental baffles, *Appl. Therm. Eng.* 109 (Part A) (2016) 175–185.

[4] Y.G. Lei, Y.L. He , R. Li , Y.F. Gao , Effects of baffle inclination angle on flow and heat transfer of a heat exchanger with helical baffles, *Chem. Eng. Process.* 47 (12) (2008) 2336–2345.

[5] J.F. Zhang, B. Li , W.J. Huang , Y.G. Lei , Y.L. He , W.Q. Tao , Experimental performance comparison of shell-side heat transfer for shell-and-tube heat exchangers with middle-overlapped helical baffles and segmental baffles, *Chem. Eng. Sci.* 64 (8) (2009) 1643–1653.

[6] T.T. Du, Q. Chen , W.J. Du , L. Cheng , Performance of continuous helical baffled heat exchanger with varying elliptical tube layouts, *Int. J. Heat Mass Transf.* 133 (2019) 1165–1175.

[7] X. Cao, T.T. Du , Z. Liu , H.Y. Zhai , Z.Y. Duan , Experimental and numerical investigation on heat transfer and fluid flow performance of sextant helical baffle heat exchangers, *Int. J. Heat Mass Transf.* 142 (2019) 118437.

[8] W.J. Du, H.F. Wang , L. Cheng , Effects of shape and quantity of helical baffle on the shell-side heat transfer and flow performance of heat exchangers, *Chin. J. Chem. Eng.* 22 (3) (2014) 243–251.

[9] K. Manjunath, S.C. Kaushik , Second law thermodynamic study of heat exchangers: a review, *Renew. Sust. Energy Rev.* 40 (2014) 348–374.

[10] A. Bejan, *Entropy Generation Through Heat and Fluid Flow*, Wiley, New York, 1982.

[11] A. Bejan, *Entropy Generation Minimization*, CRC Press, Boca Raton, 1995.

BÖLÜM III

Eriyik Yığma Modelleme (Fdm) Tipi 3d Yazıcılarda Kullanılan Filament Türleri

Kubilay HAN¹
Muhammed Asım KESERCİOĞLU²
Adem TÜYLÜ³

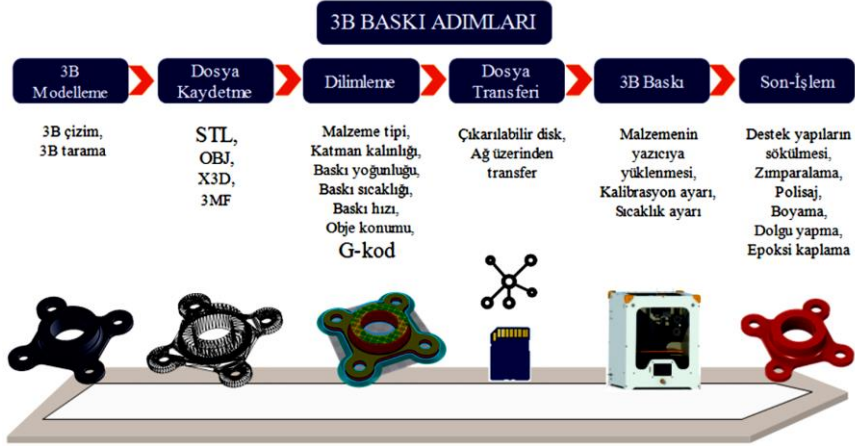
Üç Boyutlu (3D) yazıcılar, günümüz mühendislik teknolojisinin önemli bir bileşeni olarak öne çıkmaktadır. Bu teknoloji, ilk defa 1984 yılında Dr. Charless Hull tarafından geliştirilmiş olup, başnolangıçta sadece hızlı prototipleme alanında kullanılmıştır (Gao vd., 2015). Ancak, 2006 yılında Reprap ve Fab@home projeleri ile tekrar gündeme gelmiş ve endüstri 4.0, bilgisayar destekli tasarım programları ve malzeme bilimindeki ilerlemelerle birlikte kullanım açısından daha geniş kitlelere ulaşmıştır (Bulut ve Akçacı, 2017; Şenol vd., 2015). 3D yazıcılara

¹ Araştırma Görevlisi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

² Araştırma Görevlisi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

³ Araştırma Görevlisi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

olan ilgi, baskı kolaylığı, özgün tasarım imkanları ve ekonomik avantajları göz önüne alındığında giderek artmaktadır (Conner ve diğerleri, 2014). 3D üretimde kalıp ve hat kurulumuna gerek olmaksızın, istenilen geometrinin doğrudan üretilebilmesi için Şekil 1'deki adımlar izlenir (Sürmen, 2019).



Şekil 1. 3D üretimin aşamaları (Sürmen, 2019)

Sıralı olarak bu adımlar şunlardır: İstenilen parçanın üç boyutlu modelinin dijital olarak oluşturulması, model dosyasının uygun bir dosya formatına dönüştürülüp yazılıma aktarılması, modelin katmanlara ayrılması, G kodlarının üretilmesi, elde edilen G kodlarının taşınabilir bir diske yüklenmesi, cihaza yüklenen G kodlarıyla üretimin başlatılması ve katı modelin elde edilmesi, son olarak parçadaki destek yapılarının uzaklaştırılması (Sürmen, 2019).

3D yazıcıların avantajları;

- Dijital veriden türemiş tasarımın kolayca transfer edilebilir/paylaşılabilir olması.
- Değişiklik ve düzeltmelerin hızlı bir şekilde uygulanabilir olması.
- Kolayca üretilebilen kişiselleştirilmiş ürünlerin varlığı.

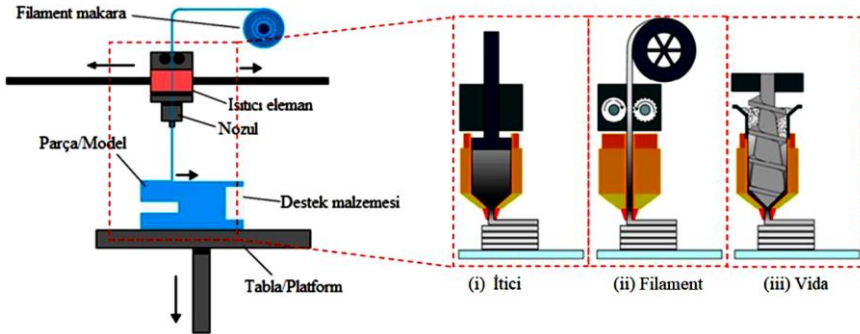
- Yatırım ve üretim açısından etkili ve verimli olma özelliği.
- Başlangıç yatırım maliyetinin göreceli olarak düşük olması.
- Ürün fiyatının üretim öncesinde hesaplanabilir olması.
- Dönüştürülebilir malzemenin kullanılabilir olması.
- Malzeme kullanımında minimum atık oluşturulması.

Dezavantajları;

- Malzeme, renk ve yüzey özellikleri bakımından sınırlı çeşitliliğe sahip olmaları,
- Üretilen nesnelerin sıcaklık, nem ve kırılabilirlik konularında düşük dayanıklılığa sahip olmaları,
- Yazdırılacak ürün boyutu arttıkça maliyetin katlanarak yükselmesi,
- Diğer üretim/fabrikasyon tekniklerine kıyasla daha düşük hassasiyet gösterme

Scott Crump, Stratasys şirketinin kurucu ortağı olarak, 1998'de erimiş termoplastik malzemeyi mekanik olarak bir alt katmana ekstrüde ederek katmanlar oluşturan Eriyik Yığma Modelleme (FDM) olarak adlandırılan bir eklemeli imalat yöntemi geliştirdi (Gao vd., 2015). FDM, üç boyutlu parçanın modeline uygun olarak termoplastik polimerleri biriktirerek katman katman üç boyutlu geometriler oluşturan bir eklemeli imalat yöntemidir. Bu teknoloji, genellikle Fused Filament Fabrication (FFF) olarak adlandırılır ve PLA, ABS, ve karbon fiber gibi malzemelerden üretilmiş filamentlerin kullanıldığı bir ekstrüzyon tabanlı süreçtir. Yarı erimiş termoplastik malzemenin biriktirilmesi, sıcaklık kontrollü bir ekstrüzyon başlığı aracılığıyla gerçekleştirilir (Boschetto vd. 2013; Chua vd. 2010; Tseng vd. 2018). FDM teknolojisi, desteklerin kolayca ayrılabilmesi, minimum malzeme kaybı ve basit uygulama prosedürü sayesinde karmaşık geometrilerin üretilmesine olanak tanır. Bu teknoloji, özellikle havacılık, otomotiv ve biyomedikal alanlarında prototip ve kalıp

üretimi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, nadiren nihai ürün imalatında kullanılır, çünkü FDM ile üretilen parçaların boyutsal doğruluğu ve yüzey kalitesi hala tartışmalı bir konudur ve üzerinde devam eden çalışmalar bulunmaktadır. Sürecin geliştirilmesi, nihai ürün olarak kullanılabilecek fonksiyonel parçaların oluşturulmasını amaçlamaktadır (Ivanova vd. 2013; Sağbaş, 2016; Singh vd. 2017). Şekil 2’de bu yöntemin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2. FDM yöntemi şematik gösterim (Guitierrez vd., 2018)

Eriyik modellemeli (Fused Deposition Modeling - FDM), 3D baskı teknolojisinin en popüler ve yaygın olarak kullanılan yöntemlerinden biridir. İşte eriyik modellemeli yazıcıların tarihçesi:

1980'lerin Sonları: Eriyik modellemeli 3D baskı tekniği, ilk olarak 1980'lerin sonlarına doğru Scott Crump tarafından geliştirildi. Stratasys adlı şirketin kurucusu olan Crump, bu teknolojiyi geliştirmeye yönelik çalışmalarını sürdürdü.

1988: Scott Crump, FDM teknolojisinin ilk patentini aldı ve aynı yıl Stratasys'i kurarak ticari olarak bu teknolojiyi kullanmaya başladı.

1990'lar: Stratasys, eriyik modellemeli teknolojiyi ticarileştirmeye devam etti ve 1992'de FDM 1650 modelini piyasaya sürdü. Bu dönemde, 3D baskı teknolojisi henüz geniş kitlelere ulaşmamış olsa da, endüstriyel uygulamalarda kullanılmaya başlandı.

2000'ler: FDM teknolojisi, 2000'lerin başlarında özellikle prototipleme ve tasarım süreçlerinde kullanımının artmasıyla daha geniş bir kabul görmeye başladı. Bu dönemde birçok şirket, FDM tabanlı 3D yazıcılarını pazara sundu.

2010'lar: 2010'lu yıllarda 3D baskı teknolojisi genişledikçe, FDM yazıcılarının fiyatları düştü ve kişisel kullanım için daha erişilebilir hale geldi. MakerBot ve Prusa gibi şirketler, FDM tabanlı masaüstü 3D yazıcılarını tanıttı.

Günümüz: Eriyik modellemeli yazıcılar günümüzde endüstriyel uygulamalardan, eğitim amaçlı kullanıma kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Hem profesyonel hem de hobi kullanıcıları tarafından tercih edilmekte ve sürekli olarak geliştirilmektedir.

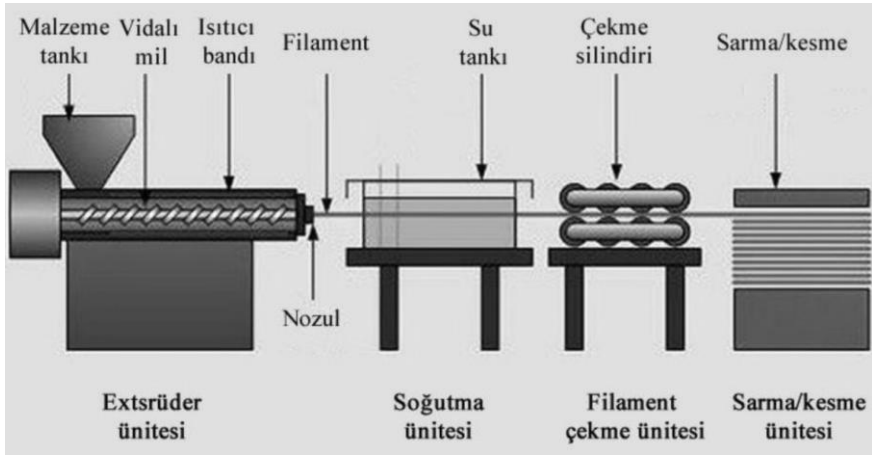
Eriyik modellemeli 3D baskı, basit tasarımı, kullanım kolaylığı ve geniş malzeme seçenekleri nedeniyle endüstride ve bireysel kullanımda popülerliğini sürdürmektedir.

(FDM) Yazıcılarda Ürün Kalitesini Etkileyen Faktörler

(FDM) yazıcılarında ürün kalitesini belirleyen bir dizi faktör bulunmaktadır. Elde edilen ürünün fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde etkili olan bu faktörler arasında kullanılan filamentin kalitesi, yazıcının parametreleri, nozul sıcaklığı, doluluk oranı, yazıcı sisteminin açık veya kapalı oluşu, yazdırma hızı ve nozul uç çapı gibi detaylar bulunmaktadır (Kaygusuz ve Özerinç, 2018; Evlen vd., 2019; Evlen vd., 2018). Ayrıca, yazdırma sırasında kullanılan katman kalınlıkları ve yazdırma şekilleri de elde edilen malzemenin mukavemeti üzerinde etkili olabilir (Vigneshwaran ve Venkateshwaran, 2019). Yüksek mukavemet özelliklerine sahip ürünler elde etmek için doluluk oranını artırmak gerekebilir; ancak, bu durumda doluluk oranının artması yazdırma süresini uzatabilir (Maurya vd., 2022).

Kullanılan Filament Türleri

FDM teknolojisi kullanılan 3D yazıcılar, baskı işlemleri için filament adı verilen özel bir hammadde kullanır. Bu filamentler, genellikle polimer tabanlı malzemelerden oluşur. Temel prensip, granül halindeki polimer (termoplastik) ve çeşitli katkı malzemelerinin, Şekil 3'de gösterilen yöntemle eritilip çapı 1.7 ile 3 mm arasında değişen nozullar aracılığıyla yeniden şekillendirilmesine dayanmaktadır. Monomer adı verilen, düzenli bir şekilde birleşen tekrarlanan birimlerden oluşan büyük moleküller, polimer olarak tanımlanır (Sağlam, 2023).



Şekil 3. Filament üretim aşaması (Sağlam, 2023)

Özellikle son yıllarda, ABS, PLA, PETG, HIP, PVA gibi filament türleri, 3D yazıcılarda geniş bir kullanım bulmaktadır. Aynı zamanda, bu filament türlerinin kombinasyonları da artan bir şekilde üç boyutlu yazıcılarda tercih edilmektedir. ABS, HIP, PVA ve PLA filamanları, diğer türlerle karşılaştırıldığında daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu filament türlerinin temel özellikleri Tablo 1'de ayrıntılı olarak sunulmuştur (Sağlam, 2023).

Tablo 1. FDM tipi 3D yazıcılarda kullanılan filament türleri ve temel özellikleri

Filament	Güçlü Yanı	Uygunluk	Baskı Sıcaklığı (°C)	Yatak Sıcaklığı (°C)	Baskı Kolaylığı
PLA	Tamamen doğal ve doğada çözünür.	Prototipleme ve diğer ürünler	200-235	50-65	Çok iyi
ABS	Güçlü ve Dayanıklı	Son kullanım parçaları ve koruyucu kutular	240-260	80-100	Orta
PETG	Son derece dayanıklı ve esnek	Yüksek darbe ve yüksek gerilimli parçalar	245-265	70-80	İyi
AHŞAP	Ahşap dokusu	Moda, dekor ve aksesuar	195-220	40-50	Orta
KARBON FİBER	ABS'den daha güçlü ve sert	Fonksiyonel parçalar	255-275	100-110	Zor
HIPS	Yüksek darbe direnci ve çözünebilir destek	ABS'ye alternatif ve limonen ile çözünebilir destek yapısı	230-240	80-100	Orta
PVA	Suda çözünen destek	Suda kolayca çözünür	190-210	50-65	Zor

Polilaktik Asit (PLA) Filamentleri

PLA (Polylactic Acid), biyobozunabilir bir termoplastik polimerdir ve çoğunlukla 3D yazıcı filamentlerinde kullanılır. PLA'nın hammaddesi genellikle mısır nişastası veya şeker kamışı gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen laktik asit monomerlerinin polimerleştirilmesi yoluyla üretilir. Bu malzeme, çevre dostu ve biyobozunur özelliklere sahiptir (Çetin, 2022). PLA çevre dostu bir malzeme olarak petrol bazlı polimerlerin en iyi alternatifi olarak kabul edilmektedir (Balla vd., 2021). Çevreci bir malzeme olan PLA'nın doğadaki döngüsü Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. PLA' nın doğadaki döngüsü (Xiao vd., 2012)

PLA'nın avantajları arasında düşük çekme, kaliteli bir yüzey bitişi, düşük ısıl genleşme katsayısı ve kolay baskı yapılabilirlik bulunmaktadır. Ancak, termal direnci bazı diğer filament türlerine kıyasla daha düşük olabilir, bu nedenle yüksek sıcaklık uygulamalarında bazı sınırlamalara neden olabilir. PLA, genellikle konsept modeller, prototipler ve ev kullanıcıları için 3D baskı projelerinde tercih edilen bir malzeme olarak bilinir.

PLA, çevre dostu özelliklere ek olarak mükemmel optik, bariyer ve yüksek mekanik özelliklere sahip bir polimerdir (Bhattacharjee vd., 2016; Afrose vd., 2016). Bu özellikleri, PLA'nın geleneksel petrol bazlı polimerlerin, örneğin düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), poliamid (PA), polipropilen (PP) ve polistiren (PS), yerine geçme potansiyeli nedeniyle hem akademik hem de endüstriyel alanda ilgi görmesine yol açmıştır (Rasal vd., 2010; Virk vd., 2003). PLA, plastik çatal-bıçak takımlarında, market poşetlerinde, uzun kullanımlı suluklarda ve hesap makinelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 5'te günümüzde kullanılan PLA filament örneği verilmiştir.



Şekil 5. PLA filamentler

Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) Filamentleri

ABS filamentleri, genellikle 3D yazıcılarla kullanılan bir malzeme türüdür. "ABS" kısaltması, akrilonitril bütadien stiren terimlerinin birleşiminden gelir ve bu malzeme termoplastik bir polimerdir. ABS filamentleri, dayanıklılık, yüksek ısıl dayanım, mekanik mukavemet ve kimyasal direnç gibi özelliklere sahiptir. Bu özellikleri sayesinde ABS, prototip üretimi, endüstriyel parçalar ve dayanıklı nesnelerin 3D baskısı için yaygın olarak kullanılır (Izdebska-Podsiadły., 2022). Şekil 6'da ABS filamentlerine örnek verilmiştir.



Şekil 6. ABS filamentler

Ayrıca, ABS filamentleri genellikle Fused Deposition Modeling (FDM) teknolojisine dayanan 3D yazıcılarla uyumlu olup, katman katman nesne oluştururken sıcaklık kontrollerine ihtiyaç duyarlar. ABS'nin birkaç dezavantajı arasında çekme eğilimi, belirgin bir kokuya sahip olması ve çevre dostu olmayan bir malzeme olması bulunmaktadır. Asansör bileşenleri, LEGO elemanları, paneller, atık su boruları ve çekme dayanımı yüksek olmayan bazı otomobil parçaları gibi alanlarda genellikle ABS filament türü tercih edilmektedir (Çömez, 2019).

Polietilen Tereftalat Glikol (PETG) Filamentleri

PETG filamentleri, 3D baskı dünyasında öne çıkan bir termoplastik polimer malzeme türüdür. Bu filamentler genellikle yüksek dayanıklılık, mükemmel mekanik mukavemet ve şeffaf veya yarı şeffaf özellikleri ile bilinir (Seçgin ve Kahraman, 2023). Şeffaflık, doğal bir estetik sunarken, dayanıklılık ve kimyasal dirençleri sayesinde endüstriyel uygulamalarda tercih edilirler. Ayrıca, gıda güvenliği standartlarına uymaları, PETG filamentlerini gıda ile temas eden uygulamalarda güvenle kullanılabilir kılar. Isıl

dayanımı, yüksek sıcaklık koşullarına karşı direncini artırırken, düşük nem emilimi malzemenin performansını olumlu yönde etkiler. FDM 3D yazıcılarla uyumlu olan PETG filamentleri, geniş bir uygulama yelpazesi sunarak şeffaf kaplamalar, koruyucu kılıflar, gıda konteynerleri, prototipler ve endüstriyel parçalar gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Subbarao vd., 2021). Şekil 7’de şeffaf bir PETG filamenti ve bu filamentle üretilen bir parça örneği verilmiştir



Şekil 7. PETG filamenti ve üretilen parça örneği

Ahşap Filamentler

Ahşap filamentler (Şekil 8.), 3D baskı dünyasında öne çıkan ilginç bir malzeme türüdür. Genellikle PLA veya ABS temelli olan bu filamentler, içlerinde ahşap lifleri veya öğütülmüş ahşap partikülleri içerir, böylece basılan nesnelerin doğal ahşap benzeri bir görünüm ve dokuya sahip olmalarını sağlar. Ayrıca, ahşap filamentlerin hafif ve dayanıklı olması, geniş bir uygulama yelpazesi sunmalarına olanak tanır. Bu filamentlerin baskı sırasında yaydığı hoş odun kokusu, kullanıcı deneyimini artırırken, düşük termal genleşme katsayıları da daha hassas baskılar elde etmeyi mümkün kılar. Mobilya tasarımı, dekoratif nesneler, heykeller ve prototipler gibi birçok alanda kullanılan ahşap filamentler, doğal ahşabın estetik ve dokusal özelliklerini 3D baskı projelerine başarıyla taşır, böylece kullanıcılara yaratıcılıklarını daha geniş bir şekilde ifade etme imkanı sunar (Cengiz ve Aktepe, 2022).



Şekil 8. Ahşap filamentler ve örnek parçalar

Karbon Fiber Filamentler

Karbon fiber filamentleri, 3D baskı dünyasında kullanılan özel bir malzeme olarak öne çıkar. Bu filamentler, temelde PLA, ABS veya PETG gibi yaygın polimerlere karbon fiber ilavesi içerir. Karbon fiber filamentlerinin belirgin özellikleri, yüksek mukavemet ve hafiflik kombinasyonu, katmanlar arası bağlantı gücünün artışı, yüksek ısıl dayanım, elektriksel iletkenlik ve estetik bir karbon dokusu sunmasıdır (Akın vd., 2023). Bu özellikler, endüstriyel parçalar, hava ve uzay uygulamaları, otomotiv sektörü ve prototip projeler gibi birçok alanda kullanılmalarını sağlar (Seçgin vd. 2023). FDM 3D yazıcılarla uyumlu olan karbon fiber filamentleri, özellikle dayanıklılık ve performans gerektiren projelerde tercih edilmekte ve çeşitli sektörlerde geniş bir uygulama yelpazesi bulmaktadır (Ning vd. 2015). Şekil 9’da karbon fiber filament örneği verilmiştir.



Şekil 9. Karbon fiber filament

Yüksek Etkili Polistiren (HIPS) Filamentleri

HIPS (High Impact Polystyrene), 3D baskı dünyasında destek malzemesi olarak kullanılan özel bir polimer malzemedir. Bu malzeme, çift ekstruderli 3D yazıcılarda, genellikle PLA veya ABS ile birlikte kullanılır. HIPS'in önemli özelliği, çözünebilir olmasıdır. Baskı işlemi tamamlandıktan sonra, HIPS destek malzemesi içeren nesne, limonen çözeltisi içinde çözündüğünde destek malzemesi temizlenir. Bu, özellikle karmaşık tasarımların 3D baskısında destek malzemesini kolayca kaldırmayı sağlar, çünkü çözünebilirlik özelliği mekanik temizlik işlemlerini ortadan kaldırır. HIPS filamentleri, özellikle detaylı ve zorlu tasarımları olan nesnelerin üretiminde kullanılarak daha temiz ve pürüzsüz sonuçlar elde edilmesine olanak tanır (Hanitio vd., 2023). Şekil 10'da HIPS filamenti verilmiş ve destek malzemesi olarak bu filament kullanıp daha sonrasında çözünmesi örneklendirilmiştir.

HIPS



Şekil 10. HIPS filamenti ve kullanımı

Polivinil Alkol (PVA) Filamentleri

PVA filamentleri (Şekil 11), 3D baskı dünyasında kullanılan çözünebilir bir destek malzemesi türüdür. Genellikle su içinde çözünebilir özelliği sayesinde, karmaşık ve detaylı tasarımlarda destek malzemesini kolayca temizleme avantajı sunar. FDM tipi 3D yazıcılar ile uyumlu olan PVA filamentleri, genellikle PLA veya ABS gibi diğer filament türleriyle birlikte kullanılır. Çift ekstruderli 3D yazıcılarla entegre edildiğinde, PVA destek malzemesi ile birincil filament (örneğin, PLA) aynı anda basılabilir. Baskı tamamlandığında, nesne bir su banyosuna yerleştirilerek PVA destek malzemesi çözünür ve temizlenir. Bu özellik, hassas detaylara sahip nesnelerin üretiminde ve iç içe geçmiş yapıları olan tasarımlarda destek malzemesinin etkili bir şekilde temizlenmesini sağlar (Duran vd. 2015).



Şekil 11. PVA filament ve kullanımı

SONUÇ

PLA, ABS, PETG, ahşap, karbon fiber, HIPS ve PVA filamentleri, 3D baskı dünyasında farklı özelliklere sahip malzeme seçeneklerini temsil eder. PLA, biyobozunabilir olması ve düşük sıcaklıkta baskı yapabilmesi nedeniyle genellikle çevre dostu ve kullanıcı dostu bir seçenek olarak tercih edilir. ABS, yüksek mukavemet ve dayanıklılık sunan bir malzemedir ancak baskı sırasında belirgin bir koku yayabilir. PETG, dayanıklılığı, kimyasal direnci ve şeffaf olma özelliği ile dikkat çeker. Ahşap filamentleri, doğal ahşap görünümü ve dokusunu taklit ederek estetik açıdan zengin sonuçlar elde etmeyi sağlar. Karbon fiber filamentleri, yüksek mukavemet ve hafiflik özellikleri ile endüstriyel

uygulamalarda tercih edilir. HIPS, çözünebilir destek malzemesi olarak kullanılarak kompleks tasarımlarda temizleme işlemini kolaylaştırır. PVA filamentleri ise çözünebilir destek malzemesi olarak karmaşık iç yapıları temizleme konusunda etkilidir. Her bir filament türü, belirli uygulamalara uygun avantajlar sunar, bu da kullanıcıların ihtiyaçlarına ve projelerine göre tercih yapmalarını sağlar.

KAYNAKLAR

Afroze, M. F., Masood, S. H., Iovenitti, P., Nikzad, M., & Sbarski, I. (2016). Effects of part build orientations on fatigue behaviour of FDM-processed PLA material. *Progress In Additive Manufacturing*, 1(2), 21–28.

Akin, Y., Kahraman, H., & Özsert, İbrahim. (2023). Proton Değişim Membranlı (PEM) Yakıt Hücrelerinde Bipolar Plakaların Malzeme Seçimi. *MÜHENDİSLİKTE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR*, 503–519. <https://doi.org/10.59287/mgy.1009>

Bhattacharjee, N., Urrios, A., Kang, S., & Folch, A. (2016). The upcoming 3D-printing revolution in microfluidics. *Lab On A Chip*, 16(10), 1720–1742.

Boschetto, A., Giordano, V., & Veniali, F. (2013). 3D roughness profile model in fused deposition modelling. *Rapid Prototyping Journal*, 19(4), 240–252.

Bulut, E., & Akçacı, T. (2017). Endüstri 4.0 ve inovasyon göstergeleri kapsamında Türkiye analizi. *ASSAM Uluslararası Hakemli Dergi*, 7(1), 50–72.

Çetin, M. (2022). Granül Termoplastik Malzemelerin Ekstrüzyon Esaslı Eklemeli İmalat Şartlarının İncelenmesi ve Optimizasyonu. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Çömez, M. (2019). Yalın Üretim Teknikleriyle İmal Edilen Malzemelerin Artıkları İle Üretilen Granüllerden Elde Edilen Yeni Pla Filamentinin Özelliklerinin İncelenmesi. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya.

Conner, B. P., Manogharan, G. P., Martof, A. N., Rodomsky, L. M., Rodomsky, C. M., Jordan, D. C., & Limperos, J. W. (2014). Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services. *Additive manufacturing*, 1, 64–76.

Duran, C., Subbian, V., Giovanetti, M. T., Simkins, J. R., & Beyette Jr, F. R. (2015). Experimental desktop 3D printing using dual extrusion and water-soluble polyvinyl alcohol. *Rapid Prototyping Journal*, 21(5), 528-534.

Evlen, H., Erel, G., & Yılmaz, E. (2018). Açık ve kapalı sistemlerde doluluk oranının parça mukavemetine etkisinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 21(3), 651–662.

Evlen, H., Özdemir, M. A., & Çalışkan, A. (2019). Doluluk oranlarının pla ve pet malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkileri. *Politeknik Dergisi*, 22(4), 1031–1037.

Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., ... & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65-89.

Guterrez, J. G., Cano, S., Schuschnigg, S., Kukla, C., Sapkota, J., & Holzer, C. (2018). Additive manufacturing of metallic and ceramic components by the material extrusion of highly-filled polymers: A review and future perspectives. *Materials*, 11(5), 840.

Hanitio EW, Lutfhyansyah NR, Efendi BM, Mardiyati Y, Steven S. (2023). From Electronic Waste to 3D-Printed Product, How Multiple Recycling Affects High-Impact Polystyrene (HIPS) Filament Performances. *Materials*, 16(9), 3412.* <https://doi.org/10.3390/ma16093412>

Izdebska-Podsiadły, J. (2022). *Polymers For 3d Printing Methods, Properties, and Characteristics* 1st ed. William Andrew, Oxford.

Ivanova, O., Williams, C., & Campbell, T. (2013). Additive manufacturing (AM) and nanotechnology: promises and challenges. *Rapid Prototyping Journal*, 19(5), 353–364.

Kaygusuz, B., & Özerinç, S. (2018). 3 boyutlu yazıcı ile üretilen pla bazlı yapıların mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 16(1), 1–6.

Maurya, S., Malik, B., Sharma, P., Singh, A., & Chalisgaonkar, R. (2022). Investigation of different parameters of cube printed using pla by fdm 3d printer. *Materials Today: Proceedings*, (64), 1217-1222.

Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J., & Wang, S. (2015). Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering*, 80, 369-378.

Rasal, R. M., Janorkar, A. V., & Hirt, D. E. (2010). Poly(lactic acid) modifications. *Progress In Polymer Science*, 35(3), 338–356.

Sağbaşı, B. (2018). Surface texture characterization and parameter optimization of fused deposition modelling process. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(4), 1028–1037.

Sağlam, O. (2023). Atık plastik maddeden 3D yazıcılar için filament üretimi ve mekanik analiz. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Singh, R., Singh, S., Singh, I. P., Fabbrocino, F., & Fraternali, F. (2017). Investigation for surface finish improvement of FDM parts by vapor smoothing process. *Composites Part B: Engineering*, 111, 228-234.

Subbarao, C. V., Reddy, Y. S., Inturi, V., & Reddy, M. I. (2021, February). Dynamic mechanical analysis of 3D printed PETG material. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1057(1), 012031. IOP Publishing.

Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli İmalat (3B Baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 373–392.

SEÇGİN, Ö., & Kahraman, H. (2023, April). PETG Materyali Kullanılarak FDM Yöntemiyle Eklemeli İmalat İşleminde Yüzey Pürüzlülüğünün Parametrik Optimizasyonu. In *International*

Conference on Engineering, Natural and Social Sciences, 1, 623–626.

SEÇGİN, Ö., KAHRAMAN, H., & CESUR, İ. (2023, May). Karbon Fiber Filament Kullanılan Eklemeli İmalat İşleminde Yüzey Pürüzlülüğü Optimizasyonu. In International Conference on Recent Academic Studies, 1, 121–123.

Şenol, E., Yolcu, M. B., & Celayir, S. (2015). Üç boyutlu yazıcılar ve çocuk cerrahisi. Çocuk Cerrahisi Dergisi, 29(3), 77–82.

Tseng, J. W., Liu, C. Y., Yen, Y. K., Belkner, J., Bremicker, T., Liu, B. H., & Wang, A. B. (2018). Screw extrusion-based additive manufacturing of PEEK. Materials Design, 140, 209-221.

Vigneshwaran, K., & Venkateshwaran, N. (2019). Statistical analysis of mechanical properties of wood-pla composites prepared via additive manufacturing. International Journal of Polymer Analysis and Characterization, 7(24), 584–596.

Xiao, L., Wang, B., Yang, G., & Gauthier, M. (2012). Poly(lactic acid)-based biomaterials: synthesis, modification and applications. Biomedical Science, Engineering and Technology. InTech, 247-282.

G. Guitierrez, J., Cano, S., Schuschnigg, S., Kukla, C., Sapkota, J., & Holzer, C. (2018). Additive manufacturing of metallic and ceramic components by the material extrusion of highly-filled polymers: A review and future perspectives. Materials, 11(5), 840.

W. Gao, Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y. Chen, C.B. Williams, C.C.L. Wang, Y.C. Shin, S. Zhang, & P.D. Zavattieri. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. Computer-Aided Design, 69, 65-89.

Y. Duran, C. Subbian, M. T. Giovanetti, J. R. Simkins, & F. R. Beyette Jr. (2015). Experimental desktop 3D printing using dual extrusion and water-soluble polyvinyl alcohol. Rapid Prototyping Journal, 21(5), 528-534.

BÖLÜM IV

Nanoakışkan Kavramı Ve Mikrokanallarda Kullanımı

Hakan TÜRKER¹
Elif ÖĞÜT²

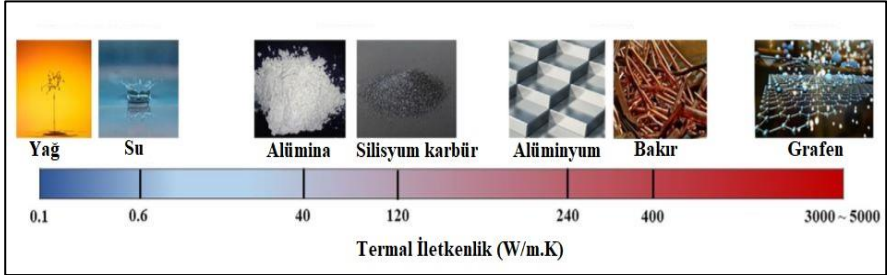
Nanoakışkan Kavramı

Nanoakışkanlar, nanopartiküllerin bir baz akışkana nüfuz ettirilmesi ile elde edilen ve bu sayede iş akışkanının ısı iletim katsayısının arttırılması ile sonuçlanan ve son yıllarda üzerine yapılan deneysel ve sayısal çalışmaların yoğunluk kazandığı spesifik bir alandır. Geleneksel sıvılara kıyasla eklenen nanopartiküllerin yüksek termal iletkenliği nedeniyle nanoakışkanlar, termofiziksel özellikleri arttırmada ve ısı transfer hızını geleneksel ısı transfer

¹ Makine Yüksek Mühendisi, Türbosan Türbomakineler Sanayi ve Ticaret A.Ş., Dilovası, Kocaeli, hakan-turker_@hotmail.com

² Prof. Dr., Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Umutepe, Kocaeli

akışkanlarına oranla bariz bir şekilde yükselttikleri için kullanımında avantajlar görülmüştür. Metalik katıların ısı iletkenliği sıvılara kıyasla oldukça fazladır. Nanoakışkan kavramı da zaten bu bağlamda ortaya çıkmaktadır. Yani ısı iletkenliği fazla olan metalleri sıvıya karıştırmaya ilkesine dayanmaktadır. Şekil 1’de çeşitli metaliklerin ve sıvıların ısı iletkenlik değeri kıyaslanmıştır.



Şekil 1. Yaygın olarak kullanılan katıların ve sıvıların ısı iletkenlik katsayıları (Mahian ve diğ., 2019)

Çapları milimetre veya mikrometre aralığında olan partiküllerin kullanılması, partiküller tamamen nötr olarak yüzer olmadıkça, aslı partiküllerin nihai çökelmesine neden olmaktadır. Nano ölçekli boyut aralığında, mümkün olan en küçük boyuta sahip katı parçacıkların kullanılmasıyla yerçekimi etkileri en aza indirilir. Nanopartikül bazlı sıvıların kararlılığı, mikroparçacık bazlı sıvılardan çok daha fazladır. Ayrıca, belirli bir katı partikül kütleğinde, nanopartiküller arasındaki temas yüzey alanı mikropartiküllerinkinden daha büyüktür, bu da nanopartikül içeren akışlarda partiküllerin sıvı sıcaklığındaki değişimde baskın rol oynayacağını göstermektedir.(Mahian ve diğ., 2019)

Bu bağlamda literatürde kayda geçen önemli bir çalışmayı 1993 yılında Masuda ve ark. yayınlamışlardır (Masuda ve diğ., 1993). Al_2O_3 , TiO_2 ve SiO_2 nanopartikülleri içeren üç farklı su bazlı sıvıda ölçtükleri termal iletkenlik ve viskozite değerlerinin, nanopartikül olmayan geleneksel sıvıya kıyasla arttığını bildirmişlerdir. Daha sonra Choi 1995 yılında nanoakışkan kavramını ortaya atmıştır (Choi ve diğ., 1995).

Nanoakışkan Kullanım Alanları

Soğutma veya ısıtmanın olduğu geleneksel baz akışkanların kullanıldığı hemen hemen bütün uygulamalarda, tek fazlı baz akışkanın yerine nanoakışkanlar kullanılabilir. Nanoakışkanlar güneş kollektörlerinde ve fotovoltaiik sistemlerde, araba radyatörlerinde, buzdolaplarında, kazanlarda, elektronik ekipmanların soğutulmasında, bileşenlerin yağlanması, binaların ısıtılmasında ve soğutulmasında, tuzdan arındırmada, CO₂, gözenekli ortam, havacılıkta, petrol geri kazanımında ve her türlü ısı eşanjöründe kullanılabilir.

Nanoakışkanların Dezavantajları

Nanoakışkan kullanılarak, sistemlerdeki ısı transfer miktarı, nanoakışkan kullanılmadan önceki aynı sisteme kıyasla artış meydana getirilmektedir. Bu bağlamdan yola çıkarak sistemdeki verimi ve ısı transferini artırmak için nanoakışkanlar kullanılarak ele alınacak sistemin boyutlarında iyileştirmelere yani küçültmelere gidilebilir, bu da daha kullanışlı ve ekonomik bir sistem ifade etmekle birlikte, malzeme ağırlığından da tasarruf sağlamamızı sağlar. Nanoakışkanların dezavantajlarına değinmek gerekirse;

- Geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla maliyetleri yüksektir.

- Nanopartiküllerin toplanması ve tortulaşma problemi söz konusudur, uzun süreli kullanımlarda sistemde tıkanma ve verim düşmesine sebebiyet verebilir.

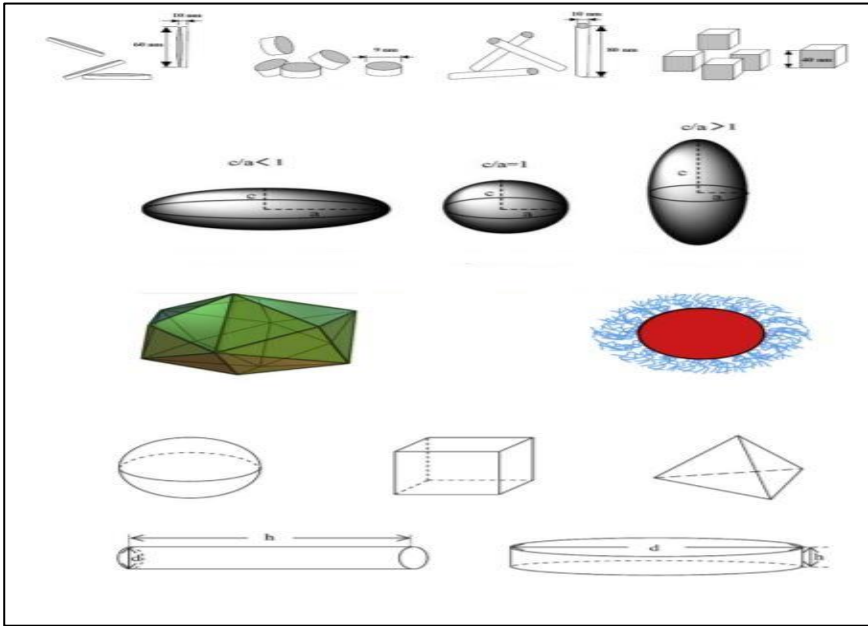
- Nanoakışkanların baz akışkanlara göre daha yüksek viskozite değerleri, gerekli pompalama gücünde yükselmeye neden olur ve sürtünmelerin meydana gelmesi nedeniyle ısınmalar oluşur.

- Nanoakışkanların kullanılması neticesinde, nanoakışkanlarla temas halinde bulunan sistem elemanlarında korozyon ve yıpranma oranları artabilir (Mahian ve diğ., 2019).

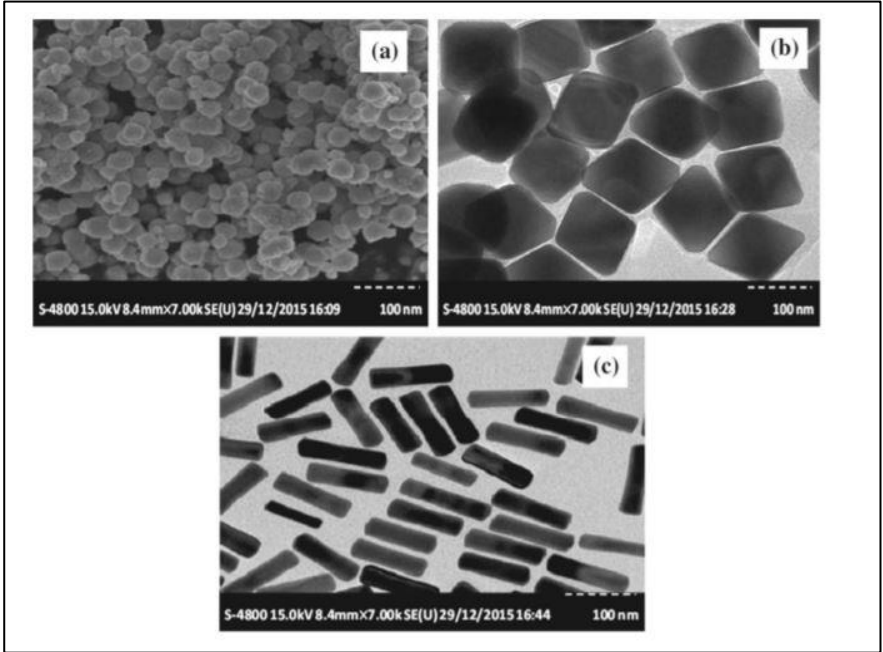
Nanopartikül Şekilleri

Literatürde yer alan çalışmalarda araştırmacılar farklı geometrilere sahip nanopartikülleri kullanarak Şekil 2’de görüldüğü gibi çalışmalarına devam etmişlerdir. Bu geometrilere örnek vermek gerekirse tuğla, bıçak, trombosit, silindirik, küresel, yassı geometriler olarak ele alınmışlardır (Mahian ve diğ., 2019).

Taramalı Elektron mikroskobu (SEM) ile nanopartiküllerin örnek gösterimi Şekil 3’te sunulmuştur. Literatürde nanoakışkanlarda kullanılan nanopartiküllerin şekillerinin sistem verimleri üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalar mevcuttur.



Şekil 2. Çeşitli araştırmacıların kullandıkları nanopartiküllerin şematik gösterimi (Zatmatkesh ve diğ., 2019)



Şekil 3. Nanopartiküllerin SEM ile gösterimi a) Küresel, b) Kübik, c) Silindirik (Zahmatkesh ve diğ., 2019)

Nanoakışkanlarda kullanılan kübik yapılı nanopartiküllerin, aynı nanoakışkanda çubuk ve küresel şekilli partiküllere göre daha yüksek viskoziteye ve ısı iletkenliğe sahip olduğu ortaya konulmuştur (Maheshwary ve diğ., 2020).

Nanoakışkanlarda Isıl İletkenlik

Isıl iletkenlik, malzemenin ısı iletim kabiliyetini anlatan bir özelliktir. Isı transferinde nanoakışkanın termal veriminin artırılmasındaki en önemli etkenlerdendir ve literatürde bunun üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Katılarda ısı geçiş oranı, sıvı ve gazlara kıyasla oldukça yüksektir. Bu sebepten ötürü nanoakışkanlar baz sıvılarına göre daha yüksek “k” değerlerine sahiptir (Gül İ., 2019).

Farklı şartlar altında nanoakışkanların ısı iletkenlik değerlerini ifade eden sayısal bir eşitlik elde etmek için çok sayıda bağıntı e sürülmüştür. Sürekli lık denklemlerini ve parçacık-sıvı karışımlarını kullanarak, bilim insanları korelasyonlar türetmişlerdir. Elde edilen eşitliklerden bir tanesine aşağıdaki örnek verilebilir (Gl İ., 2019).

İlk olarak, Maxwell (1881) milimetre-mikrometre seviyelerinde küresel parçacıklar için katı-sıvı karışımlı modeli geliştirmişlerdir. Maxwell eşitliği, baz sıvıdaki katı süspansiyonların ısı iletkenliğini ve bütün iş akışkanına ilişkin hacimsel oranı bünyesinde barındırır ve yalnızca düşük yoğunluklu süspansiyonlar için uygulanabilir (Gl İ., 2019).

Deneyssel verilerde ağırlıklı olarak sonuçlardan elde edilen bilgilere göre, nanoakışkanların bünyesinde barındırdığı nanopartiküllerinin çapının azalması ile ısı iletkenliğin artması eğiliminde olduğu ifade edilebilir. Bu durum termal anlamda iki farklı olayın “Nanopartiküllerin Brownian davranışı” ve “Nanopartiküller ile baz akışkan ara yüzeyinde tabakalaşma” tarafından desteklenmektedir. Nanoakışkanların mevcut termal iletkenliğin belirlenmesine yönelik çeşitli metotlar olmasına karşın bunların arasında ciddi farklılıklar da mevcuttur. zerinde çokça çalışma yapılmasına rağmen günümüzde nanoakışkanların termal iletkenliğini kesin olarak tatbik eden ve sunan herhangi bir modelleme veya eşitlik bulunmamaktadır (Gl İ., 2019).

Nanoakışkanlarda Viskozite

Son 15-20 yılda nanoakışkan alanında birçok yönden ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu akışkanların ısı iletimi üzerinde çokça durulmuştur ve hem deneyssel hem de sayısal çalışma sayısı oldukça fazladır. Ayrıca viskozite de, nanoakışkanlarda ısı iletkenlik kadar hesaplanması mühim olan bir özelliktir.

Sonuçlar, partiküllerin hacim fraksiyonları arttıķa viskozitenin arttığını ve nanoakışkanların düşük partikül hacim konsantrasyonları için Newtoniyen tarzında davrandığını

göstermektedir. Mevcut hiçbir model veya korelasyon, hacim fraksiyonlarına göre viskozite artışının kesin tahminini yapamamaktadır. Sıcaklığın viskozite üzerindeki etkisi ile ilgili çelişkili sonuçlar olmasına rağmen, genel olarak araştırmacılar, viskozitenin sıcaklığın artmasıyla azaldığını çıkarımına varmaktadırlar. Viskozite üzerindeki sıcaklığın etkisi için, yeterince kapsamlı olmayan bazı korelasyonlar mevcuttur ve partikül boyutunun viskozite üzerindeki etkisi hakkında hala net bir çıkarım bulunmamaktadır. Fakat partikül boyutunun nanoakışkanların viskozitesi üzerinde bazı etkileri olduğu sonucuna varılabilir. Parçacık boyutu etkileri hakkındaki yapılan çalışmaların sonucunda elde edilen çıkarımların birbiriyle uyumlu olmamasının nedeni, bu yeni akışkan sınıflarının viskozitesinin sadece parçacık boyutuna değil, diğer faktörlere de bağlı olması ile açıklanabilir (Mahbubul ve diğ., 2012).

Nanoakışkanlarda Hacim Fraksiyonları

Hacim fraksiyonu ve sıcaklığın, nanoakışkanların termal iletkenliği ve viskozitesi üzerinde baskın etkileri mevcuttur. Nanoakışkanın termal iletkenliği, hacim konsantrasyonundaki artışla artar. Nanoakışkanın ısı iletkenliği ve ısı iletkenlik oranı sıcaklıkla artar. Nanoakışkanın viskozitesi, hacim fraksiyonundaki artışla artar ve sıcaklığın artmasıyla azalır (Krishnakumar ve diğ., 2018).

Hibrit Nanoakışkan Kavramı

Hibrit nanoakışkanlar, ısı transferini iyileştirmek amacıyla iki veya daha fazla nanopartikülün karıştırılmasıyla elde edilen ve hazırlanan yeni nanoakışkanlardır (Humunic ve Humunic, 2020).

Hibrit nanoakışkanlarda tek tip nanopartikül kullanımına kıyasla daha verimli bir sistem elde edinilmesi ana hedeftir. Hibrit nanoakışkanlar çeşitli parametreler kullanılarak incelenmiş ve ısı transferindeki iyileştirmeleri etkileyen faktörler açıklanmaya çalışılmıştır. Bunlardan temel olanları nanopartikül sentezi, termal

iletkenlik, nanoakışkan hazırlama yöntemi, parçacık boyutu, nanopartikül uyumluluğu, sıvılar içinde şekil ve uygun termal ağ oluşumudur (Salman ve diğ., 2020).

Mikrokanal Kavramı

Hidrolik çapı 0-100 µm arasındaki kanallara literatürde mikrokanal ismi verilmektedir. Literatürde bu konuyu içeren birçok deneysel ve sayısal çalışma mevcuttur (Manay ve diğ., 2012).

Elektronik cihazların sağlıklı ve güvenli çalışabilmesi için üzerlerinde meydana gelen ısıyı hızlı bir şekilde atmaları gerekmektedir. Bunun için ya geleneksel ısı transferi yöntemleri kullanılmalı ya da yeni metotlar geliştirilmelidir. Mikrokanal kavramı da tam bu konuya istinaden ortaya çıkmaktadır. Yüksek ısı atması gereken sistemlerin soğutma sistemlerinde ısı akısını artırma yöntemlerinden birisi de ısı değiştiricide alan hacim oranını büyütmektir. Elektronik cihazların soğutulması için çiplerin uygun yüzeylerine çok sayıda mikrokanal yerleştirilmesi ile verimli bir sistem elde edilmiş olmaktadır. Bu kanallardan iş akışkanı olarak nitelendirilen ve sistemi soğutma görevini üstlenen bir akışkan akmaktadır.

Mikro Sistemlerde Isı Transferi ve Akışkanlar Mekaniği Yaklaşımları

Mikro boyutlu sistemlerde birim alan başına yüksek ısı transferi gerçekleştirilmesi, hafif olması, düşük hacim kaplaması, kullanılan iş akışkanının düşük miktarlarda olması gibi temel sebeplerden ötürü kullanımı cazip gelmektedir. Mikro boyutlu sistemlerinin artı yönleri üzerinde bu çalışmanın diğer bölümlerinde kapsamlı bir şekilde durulmuştur. Bunun yanı sıra mikro ölçekte akışkan akışı ve ısı transferi makro ölçekteki akışta ihmal edilebilen seyrelme, elektro viskoz etkiler, viskoz yayılım, eksenel iletim etkileri gibi sebeplerden ötürü makro sistemlerden ayrılmaktadırlar. Elde edilen sayısal ve deneysel çalışmalarda şimdiye kadar net bir şekilde ortak noktada buluşulmamasına rağmen, makro sistemlerde

geçerli olan cidar kaymama koşulunun mikro ölçekteki akışta geçerliliğini yitirmesi ve mikro ölçeklerde akışın geleneksel akışkanlar mekaniği teorik denklemlerinden farklılaşarak cidarda kayma hızı ve sıcaklık sıçraması meydana getirmesidir. Mikro ölçekte meydana gelen kayma hızı ve sıcaklık sıçraması enerji geçişi açısından irdelenmesi gereken bir olgudur.

Fakat mikro sistemlerde çalışırken geleneksel ısı transferi mekanizmaları her zaman tam anlamıyla geçerli olmamaktadır. Bu yöntemler tamamen kullanılabilir, kısmen kullanılabilir ya da kullanılamazlar. Bu farkı kavrayabilmek adına mikro sistemler ile makro sistemler arasında mühendislik yönünden farklılıklar ve hangi yaklaşımların etkili olduğu konusunda fikir verebilmesi açısından bu bölümün eklenmesi zaruri görülmüştür.

Hidrolik çapın küçülmesi ile birlikte makro sistemlerde kullanılan denklemlerin geçerliliğini koruyup koruyamadığı üzerine literatürde birçok çalışma mevcuttur ve halen bu konu güncelliğini korumaktadır. Mikron seviyelerine düştüğünde “ölçek etkisi” veya “mikro etkiler” şeklinde isimlendirilen etkilerin ortaya çıktığı yapılan çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. Navier-Stokes denklemlerinin geçersiz kalacağı ya da sınır şartları ile beraber denklemlerin yenilenmesini zorunlu kılan etkiler mikro etkiler olarak adlandırılmaktadır. Akışın sürekli olduğu durumda makro ölçekte ihmal edilebilen fakat mikron boyutlarında önemli hale gelen etkilere de ölçek etkileri denilmektedir. Makro ölçekli kanallarda akış ve ısı geçişi hesaplamalarında akışkanın sürekli rejimde olduğu varsayılmaktadır. Fakat, akışkanın aktığı kanalın hidrolik çapı daraldıkça, sürekli rejim varsayımı geçerliliğini yitirmeye başlar. Akışın süreklilik koşuluna uyup uymadığını netleştirmek için Knudsen sayısı kullanılmaktadır (Parlak N., 2010).

Yukarıda bahsedilen tüm bu sebeplerden ötürü, mikro ölçekli sistemlerdeki akışkan analizi ve ısı transferi yapısı ortaya konurken, kullanılan denklemlerin ve ihmal edilen etkilerin dikkatle seçilmesi, verilen sınır şartlarının ve takip edilmesi gereken çözüm yöntemlerinin bu parametrelere bağlı olarak en uygun biçimde

seçilmesi gerekmektedir. Mikro ölçekli sistemlerde akış rejimini bize ifade eden önemli bir parametre boyutsuz Knudsen sayısıdır. Kn olarak ifade edilen bu sayı bize sistemde sürekli ortam yaklaşımının geçerli olup olmayacağı hakkında önemli fikir vermektedir.

Knudsen sayısı, ortalama yolun karakteristik uzunluğa oranı olarak ifade edilmektedir. Yani Kn sayısı moleküler ortalama serbest yolunun, akışın karakteristik uzunluğunun oranı olarak tanımlanır. Kn sayısı Denklem 1 ile ifade edilmiştir. Burada λ ortalama serbest yol, L akışın karakteristik uzunluğudur. Kn sayısına bağlı olarak akış rejimi ve kabuller şu şekilde yapılabilmektedir.

$$Kn = \frac{\lambda}{L} \quad (1)$$

$Kn < 10^{-3}$ sınırları içerisinde, sürekli akış rejimi geçerli olmaktadır. Kn sayıları arasında, akışkan hareketi kayma sınır koşulları ihmal edilerek Navier-Stokes denklemleri kullanılabilir.

$10^{-3} < Kn < 10^{-1}$ sınırlarında akışkan hareketi cidarlarda kayma sınır şartları hesaba katılarak Navier-Stokes denklemleri ile ifade edilebilir. Kayma sınır şartları, seyrelme etkisinin ilk olarak cidarlarda hissedileceğini göstermektedir.

$10^{-1} < Kn < 10$ sınırlarında, akış geçiş akışı olarak isimlendirilir. Burada sürekli ortam yaklaşımı etkisini yitirmeye başlar ve akış Navier-Stokes eşitliklerinden daha yüksek mertebeli olan Burnett denklemi veya moleküler yaklaşıma dayalı DSMC (Direct Simulation Monte Carlo) yöntemi kullanılarak ifade edilebilir. Moleküller arası çarpışmalar burada hesaba katılması gerekmektedir.

$Kn > 10$ sınırlarında, akış serbest moleküler akış olarak isimlendirilir, akışkan hareketi Boltzmann denklemi gibi moleküler modeller kullanılarak ifade edilir. Burada sürekli ortam yaklaşımı etkisini tümüyle yitirmektedir. Moleküller arası çarpışma molekül-

cidar arası çarpışmaya kıyasla ihmal edilebilir düzeye ulaşmaktadır (Avcı M., 2008).

Bu bölümü özetlemek gerekirse makro ölçeğe sahip geometrileredeki akışın olduğu sistemlerde yönetici denklemler olan kütle, momentum ve enerji denklemleri, akışın sürekli olduğu varsayılarak ve duvarda kaymama hız sınır şartı varsayılarak çözülür. Mikro ölçekteki sistemlerde ise süreklilik varsayımı, karakteristik uzunluk moleküllerin birbirine çarpmadan aldığı ortalama mesafeye yaklaştıkça geçersiz olmaktadır. Bu noktada Kn sayısını baz almaktayız. Kn sayısının değeri bize akıştaki seyrelme ölçütünü ve süreklilik kabulünün ne denli kabul edilebilir olduğunu ifade etmektedir. Kn sayısının yükselmesiyle, seyrelme etkisi baskın bir hal almakta, moleküllerin çarpışması azalarak termodinamik olarak kararsız bir sistem haline gelmekte ve sistem süreklilik kabulünden uzaklaşmaktadır. Cidarda meydana gelen düzensizlikler ve sıçramalardan ötürü akışta kaymama sınır şartı da varlığını kaybetmektedir. Geleneksel akışkanlar mekaniği ve ısı transferi kabullerinde olduğu gibi, kaymama sınır şartında duvar ile akışkan sıcaklığının eşit olmadığı bu durumda sıcaklık sıçramaları meydana gelmektedir.

Viskoz Isınma

Makro modellerden mikro modellere geçişte hidrolik çap değerinin küçülmesi ile basınç düşümü büyümekte ve akışkan hızı önemli ölçüde artmaktadır. Bu nedenle viskoz akış deformasyonu ihmal edilebilir seviyeleri aşmakla beraber akışkan sıcaklığını arttırmaktadır. Bu artış özellikle viskozite gibi akışkanın önemli termofiziksel özelliklerini değiştirmektedir.

Bu durumu örneklemek gerekirse viskoz ısınmanın etkileri ile birlikte, akışkan sıcaklığının 300 K' den 310 K' ne çıktığı düşünülün, akışkanın viskozite değerinde %20 gibi bir düşüş meydana gelecek bu durumda Reynolds sayısını %25 arttıracaktır. Bu verilen örnekten de anlaşılacağı üzere, akışkanın termofiziksel özelliklerinde önemli bir ölçüde değişme vuku

bulacağı için mikrokanallarda viskoz ısınma konusu akış ve ısı transferi mekanizmasının ihmal edilmediği yani hesaba katıldığı durumlarda çok önemli bir faktördür (Parlak N., 2010).

Manyetohidrodinamik (MHD) Akış

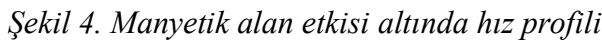
Isı transferini artırma yöntemi olarak önceki bölümlerde aktif ve pasif yöntemlerden bahsedilmişti. İş akışkanına nanopartikül nüfuziyeti ile ısı transferinde iyileştirmeye gidilmesi pasif yöntem olarak sağlanmış olunmaktadır. İş akışkanına manyetik alan etki ettirilmesi ile de ısı transferinde iyileştirilmeye gidilmesi de aktif yöntem kullanılmış olunmaktadır. MHD elektriksel iletkenliğe sahip akışkanları irdelleyen akışkanlar mekaniğinin bir kolu olarak sınıflandırılabilir. Şöyle ki MHD elektriksel iletkenliğe sahip akışkanların manyetik alan etkisi altındaki akışıdır. Navier-Stokes denklemleri ve elektrik alan için Maxwell denklemleri arasında bir bağlantı kurulması ile yönetici denklemler ortaya çıkmaktadır.

MHD Akışlarda Isı Transferi ve Akışkanlar Mekaniğine Genel Bakış

Literatürde yer alan birçok deneysel ve sayısal araştırma göstermektedir ki ısı iletkenlik ve viskozite gibi sıvıların önemli termofiziksel özellikleri, uygulanan bir harici manyetik alan altında değiştirilebilmektedir. Manyetik alan; akışta sürüklenmeleri azaltır, türbülansa geçmede gecikmeleri meydana getirmektedir. Doğal taşınım etkilerini bastırdığı ve zorlanmış taşınım etkilerini hızlandırdığı bilinmektedir.

Hareket halindeki elektriksel olarak iletken sıvıya sabit enine dışarıdan manyetik alan uygulandığında, sıvıda elektrik akımları indüklenmektedir. Bu indüklenen akımlar ve uygulanan manyetik alan arasındaki etkileşim, Lorentz kuvveti olarak bilinen, iletken ve ısının taşınım karakteristiğini değiştiren bir kuvvet üretir. MHD basınç düşüşünün azaltılmasında da önemli etkilerinin olduğu bilinmektedir (Kabeel ve diğ., 2015).

Manyetik alan uygulanan iletken bir akışkanda, akışkanlar mekanîği için önemli bir husus olan hız profilinin değişimi söz konusu olmaktadır. Burada önemli bir değişken Hartmann Sayısıdır. Hartmann değeri büyürse, hız profili giderek daha düzleşir. Bu etki “Hartmann etkisi” olarak ifade edilir. Akış hızının sıfırdan maksimuma kadar değiştiği duvara yakın olan ince tabaka 'Hartmann tabakası' olarak isimlendirilir. Bu ifadeler Şekil 4'te şematik olarak gösterilmiştir. Hartmann etkisine, Hartmann katmanlarındaki akışkanı hızlandıran ve yığın halinde yavaşlatan mekanizma Lorentz kuvvetidir.

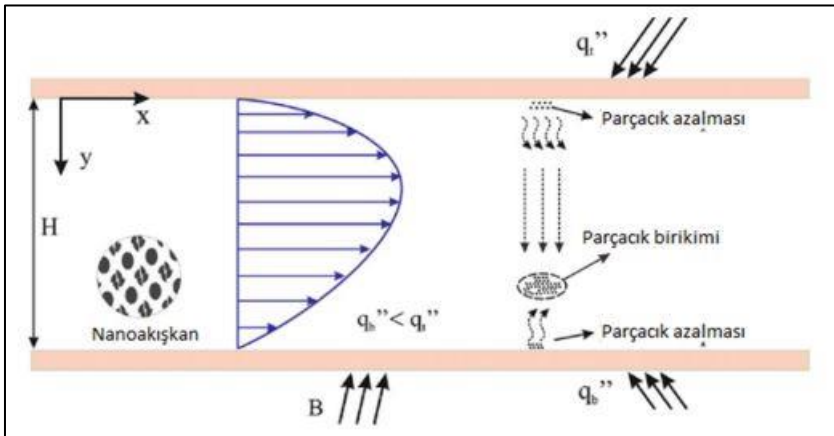


Nanopartikül ilavesi ile elde edilen ve manyetik alan uygulaması ile hem aktif hem pasif verim artırma yöntemlerinin kullanıldığı bu tür sistemlerde sonuçları değiştirecek birden fazla parametre mevcuttur. Bu konu literatürde son yıllarda giderek artan bir çalışma alanı kendine oluşturmıştır. Bu etkenlere değinmek

konunun anlam bütünlüğünü korumasında önemli bir rol oynayacaktır.

Hem hacim fraksiyonundaki hem de sıcaklıktaki artışla elektriksel iletkenliğin önemli ölçüde arttığı bildirilmiştir. Bununla birlikte, etkin elektriksel iletkenliğin sıcaklığa bağımlılığı, hacim fraksiyonundan çok daha azdır (Ganguly ve diğ., 2009).

Baz akışkana kıyasla daha yüksek elektrik iletkenliğinin meydana getirildiği nanoakışkanlar, manyetik alanın tesiri ile farklı akış davranışları ortaya koymaktadırlar. Buna sebebiyet veren ise, iletken parçacıklar üzerindeki Lorentz kuvvetinin mevcudiyetidir. Bu durum Şekil 5’te şematik olarak gösterilmiştir. Nanoakışkanların ısı iletkenliklerinin yüksek olması, elektrik iletkenliklerinin de aynı doğrultuda yüksek olacağını göstermektedir. Bundan ötürü akış kontrolünün sağlanmasının istendiği geometrilerde nanoakışkanların kullanımının yanında manyetik alana da maruz bırakılmaktadırlar (Çoban S. Ö., 2018).



Şekil 5. Manyetik alanın nanopartiküllere etkisi (Çoban S. Ö., 2018)

KAYNAKLAR

Avcı, M. (2008). Mikrokanallarda Akış ve Isı Transferi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 238479.

Choi, S. Us; Eastman, Jeffrey A. (1995). Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States).

Çoban, S. Ö. (2018). Manyetik Alanda Nanoakışkanın Geri Basamak Geometrisinde Karışık Taşınım Isı Transferine Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 494734.

Ganguly, S., Sikdar, S., & Basu, S. (2009). Experimental investigation of the effective electrical conductivity of aluminum oxide nanofluids. Powder Technology, 196(3), 326-330.

Gül, İ. (2019). Nanoakışkanların Kare Kanal İçerisindeki Laminer Akışı ve Isı Transferinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Sayısal Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 569752.

Huminic, G., & Huminic, A. (2020). Entropy generation of nanofluid and hybrid nanofluid flow in thermal systems: a review. Journal of Molecular Liquids, 302, 112533.

Kabeel, A. E., El-Said, E. M., & Dafea, S. A. (2015). A review of magnetic field effects on flow and heat transfer in liquids: present status and future potential for studies and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45, 830-837.

Krishnakumar, T. S., Viswanath, S. P., & Varghese, S. M. (2018). Experimental studies on thermal and rheological properties of Al₂O₃-ethylene glycol nanofluid. International Journal of Refrigeration, 89, 122-130.

Mahbubul, I. M., Saidur, R., & Amalina, M. A. (2012). Latest developments on the viscosity of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(4), 874-885.

Maheshwary, P. B., Handa, C. C., Nemade, K. R., & Chaudhary, S. R. (2020). Role of nanoparticle shape in enhancing the thermal conductivity of nanofluids. *Materials Today: Proceedings*, 28, 873-878.

Mahian, O., Kolsi, L., Amani, M., Estellé, P., Ahmadi, G., Kleinstreuer, C., ... & Pop, I. (2019). Recent advances in modeling and simulation of nanofluid flows-Part I: Fundamentals and theory. *Physics reports*, 790, 1-48.

Manay, E., Şahin, B., Akyürek, E. F., & Çomaklı, Ö. (2012). Mikrokanallarda Nanoakışkanların Kullanımı. *Engineer & the Machinery Magazine*, (627).

Parlak, N., (2010). Mikrokanallarda Akış ve Isı Geçişinin Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 258579.

Salman, S., Talib, A. A., Saadon, S., & Sultan, M. H. (2020). Hybrid nanofluid flow and heat transfer over backward and forward steps: A review. *Powder Technology*, 363, 448-472.

Zahmatkesh, I., Sheremet, M., Yang, L., Heris, S. Z., Sharifpur, M., Meyer, J. P., ... & Mahian, O. (2021). Effect of nanoparticle shape on the performance of thermal systems utilizing nanofluids: A critical review. *Journal of Molecular Liquids*, 321, 114430.

BÖLÜM V

Gıda Kaynaklı Alternatif Yakıtlar: Biyodizel

Ash ABDULVAHİTOĞLU¹

Giriş

Enerji, insanlığın en önemli ve vazgeçilmez ihtiyaçlarından biridir. Şu anda yaşadığımız dönem, enerji kaynaklarının tükenme riskinin farkına varıldığı bir sürecin başlangıcını temsil etmektedir. Fosil kökenli enerji kaynaklarının sınırlı bir rezervi vardır ve tükenmeleri beklenmektedir. Bu kaynaklar, petrol, doğal gaz ve kömür gibi fosil yakıtları içerir. Artan enerji ihtiyacı ve sürekli gelişen teknolojiler, fosil yakıtların sınırlı rezervlerinin ötesine geçmektedir. Bu durum, gelecekte enerji arzında ciddi bir sorun yaratma potansiyeline sahiptir.

Fosil yakıtların tükenmesi, enerji arzında önemli bir boşluk yaratırken, aynı zamanda çevresel sorunlara da yol açmaktadır. Fosil yakıtların yanması, sera gazı emisyonlarının artmasına ve iklim

¹ Doç.Dr. Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, aabdulvahitoglu@atu.edu.tr

değişikliğine katkıda bulunmaktadır. Enerji çeşitliliğini artırmak ve yaymak için araştırmacılar, yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde çalışmaktadır. Bu çalışmalar, gelecekte enerji arzının sürdürülebilir ve çevre dostu bir şekilde karşılanabilmesini hedeflemektedir. Biyodizel de bu yenilenebilir kaynaklardan biridir.

Konvansiyonel olarak bilinen enerji kaynaklarının tükenme risklerinin arttığı bir sürece girmiş bulunmaktayız. Bu riskleri dört ana grupta özetleyebiliriz. Primer dediğimiz klasik enerji kaynaklarının birçoğu belirli bir süre sonunda tükenme riski ile karşı karşıyadır. Bu kaynaklar çevre için büyük ve geri dönüşü olmayan tehlikeler oluşturmaktadır. Primer enerji kaynakları artan enerji ihtiyacı ve hızla gelişen teknoloji gereksinimlerini karşılama konusunda yetersiz kalmaktadır.

Enerji kaynaklarının sadece dünyanın belirli bölgelerinde bulunması ve bazı ülkelerin bu kaynaklara tek başına erişiminin olması, birçok ülkeyi enerji konusunda dışa bağımlı hale getirmektedir.

Enerji ihtiyacımızın büyük çoğunluğunu karşılayan fosil yakıt kaynakları üzerine birçok öngöründe bulunmaktadır. Geleceğe yönelik projeksiyonlar fosil yakıt kaynaklarının tükenmekte olduğunu göstermektedir. 20. Yüzyılın son çeyreğinden bu güne yaklaşık 50 yıldır dünyanın genel enerji arzı 2,6 kat artmasına rağmen, fosil yakıtlar, özellikle petrol kullanımı, enerji kaynakları içinde baskın olmaya devam etmektedir (World Energy Balance, 2020). Bunun başlıca nedenleri aşağıda açıklanmıştır.

Mevcut Altyapı: Fosil yakıtlara dayalı enerji altyapısı, yıllar içinde büyük ölçüde geliştirilmiş ve büyük yatırımlar yapılmıştır. Petrol rafinerileri, kömür santralleri ve doğalgaz tesisleri gibi altyapılar, enerji üretimi ve dağıtımı için mevcut olanakları temsil etmektedir. Bu nedenle, bu altyapının hâlâ kullanılması, fosil yakıtların enerji ihtiyacının karşılanmasında baskın olmasına yol açmaktadır.

Enerji Yoğunluğu: Fosil yakıtlar, yüksek enerji yoğunluğuna sahip oldukları için enerji üretiminde etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle taşımacılık sektöründe, petrolün yüksek enerji yoğunluğu ve kolay depolanabilmesi, alternatif enerji kaynaklarına göre tercih edilmesine neden olmaktadır.

Ekonomik Faktörler: Fosil yakıtlar, dünya ekonomisinde önemli bir sektördür ve büyük bir endüstriyi desteklemektedir. Petrol, gaz ve kömür gibi fosil yakıtlar, enerji ihracatı yoluyla ekonomik büyümeyi destekleyen gelir kaynaklarıdır. Bu nedenle, bazı ülkeler ekonomik çıkarlarını gözeterek fosil yakıtlara olan bağımlılığını sürdürmeye devam etmektedirler.

Bu bağlamda Türkiye’de motorlu kara taşıt sayısı her geçen gün daha fazla artmaktadır. 2022 yılında trafiğe kayıtlı 26.482.847 araç bulunmaktadır. Bu araçların 14.269.352 si otomobil, 487.381’i minibüs, 208.442’si otobüs, 4.277.424’ü kamyonet, 919.125’i kamyon, 4.141.914’ü motosiklet, 85.276’sı özel amaçlı taşıt ve 2.093.933’ü traktör olarak kayıt altına alınmıştır. Bu araçların 7.969.926’sı benzinli araç (yaklaşık %30,1), 13.070.762’si dizel araç (yaklaşık %49,4), 5.115.423’si LPG li araç (%19,3), 264.329’u elektrikli ve hibrit araç (%1 civarı) ve %0,2 gibi bir rakama tekabül eden ve yakıt türü bilinmeyenlerden oluşmaktadır. Ruhsat işlemlerinde yakıt türü boş bırakılan veya sehven hatalı veri girişi yapılan 62.407 adet araç vardır. 2023 yılına gelindiğinde trafiğe kayıtlı araç sayısı 27.334.424 e ulaşmıştır (TÜİK, 2023a).

Dünyanın enerji ihtiyacı sadece sanayileşmeden değil, aynı zamanda insan nüfusundan da kaynaklanmaktadır. BP (British Petrol) istatistiksel raporundan alınan verilere göre 2021 yılına ait kullanılan yakıt miktarı dağılımı ve hangi ülke tarafından kullanıldığı Çizelge 1.’de gösterilmiştir. Buna göre tüm dünya tüketimi göz önüne alındığında en fazla kullanılan yakıt cinsi petrol olup onu doğal gaz takip etmektedir (BP, 2022).

Cizelge 1. Dünyada yakıt olarak kullanılan enerji 2021 yılı (BP, 2022)

KITALAR	Petrol	Doğal gaz	Kömür	Nükleer enerji	Hidroelektrik enerjisi	Yenilenebilir enerji
Kuzey Amerika	42.06	37.23	11.28	8.34	6.34	8.44
Güney-Orta Amerika	11.31	5.88	1.46	0.23	6.22	3.35
Avrupa	27.57	20.56	10.01	7.98	6.12	10.14
Bağımsız Devletler Topluluğu	8.47	21.99	5.17	2.08	2.51	0.10
Ortadoğu	16.30	20.72	0.34	0.13	0.18	0.18
Afrika	7.86	5.92	4.21	0.09	1.45	0.47
Asya Pasifik	70.65	33.06	127.63	6.46	17.44	17.22
Toplam	184.21	145.35	160.1	25.31	40.26	39.91
*Türkiye	1.89	2.06	1.74	-	0.52	0.61

Bu koşullar altında, ülkemiz gibi geçmişte petrol bağımlısı olan ve günümüzde hem petrol hem de doğalgaz bağımlılığına sahip olan bir ülke için alternatif enerji kaynakları bugün ve gelecek açısından büyük önem kazanmaktadır. Teknik açıdan değerlendirildiğinde ise biyokütle enerjisi potansiyeli en büyük olan yeni enerji kaynaklarından birisidir.

Enerji ve Enerji Kaynakları

Enerji, cisimlerin iş yapabilme kabiliyetini ifade eder. Bu iş yapma yeteneği, hareket, ısı, ışık, elektrik, kimyasal reaksiyonlar gibi farklı formlarda ortaya çıkabilir. Güneş enerjisi, dünyadaki bütün enerjinin kaynağı olarak kabul edilir. Güneş, devasa bir füzyon reaktörüdür ve sürekli olarak enerji üretir. Güneşten yayılan elektromanyetik ışınlar, Dünya'ya ulaşır ve bu ışınlar, çeşitli dönüşüm süreçleriyle farklı enerji formlarına dönüştürülür. Termal ve ışık enerjisi olarak yaydığı enerjiyle yaşamımızı destekler ve diğer enerji türlerinin kaynağı olarak hizmet verir.

Örneğin, güneş enerjisi fotosentez süreciyle bitkilerde kimyasal enerjiye dönüşür. Bitkiler, güneş enerjisini kullanarak karbondioksit ve suyu kullanarak organik bileşikler üretirler. Bu organik bileşikler, bitkilerin büyümesi ve metabolizması için kullanılan kimyasal enerjiyi temsil eder. Dolayısıyla, bitkilerin enerji kaynağı güneş enerjisidir. Aynı şekilde, fosil yakıtların oluşumu da güneş enerjisine dayanır. Bitki ve hayvan kalıntıları milyonlarca yıl boyunca güneş enerjisinin etkisiyle yer altında biriktikçe, bu kalıntılar yüksek basınç ve sıcaklık altında dönüşerek fosil yakıtları oluşturur. Bu nedenle, petrol, doğal gaz ve kömür gibi fosil yakıtlar, güneş enerjisinin yıllarca süren dönüşüm sürecinin sonucudur. Rüzgar enerjisi, güneşin atmosferdeki sıcaklık farklarını yaratması ve dünya yüzeyindeki topografik özelliklerle etkileşimi sonucunda oluşur. Rüzgar türbinleri, bu rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştürerek kullanır. Hidroelektrik enerji, güneş enerjisiyle su döngüsü arasındaki etkileşim sonucu oluşur. Güneş, su buharının oluşmasına ve yağışların gerçekleşmesine neden olur. Bu yağışlar, akarsuların ve barajların su potansiyelini artırarak hidroelektrik enerji üretimine olanak sağlar. Jeotermal enerji, güneşin yer altında depolanan termal enerjisiyle ilişkilidir. Yer altındaki sıcak kayalar ve magma, güneşin ısı enerjisinin bir sonucudur. Jeotermal enerji, bu ısyı kullanarak elektrik ve ısı enerjisi üretmek için kullanılır.

Enerji kaynakları, fosil, yenilenebilir ve nükleer olmak üzere üç ana başlık altında sınıflandırılabilir. Fosil yakıtlar daha erken bir jeolojik dönemde oluşmuştur ve yenilenemez. Fosil enerji kaynakları arasında petrol, kömür, bitümler, doğal gaz, petrol şist ve katran kumları bulunur. Yenilenebilir enerji kaynakları ise biyokütle, hidro, rüzgar, güneş (hem termal hem de fotovoltaiik), jeotermal ve deniz enerji kaynaklarını içerir (Demirbaş, 2009). 2021 yılı verilerine göre dünyanın enerji ihtiyacı 595,15Ej (egzajoule) olarak kayda geçmiş olup, enerji kaynaklarının dağılımı aşağıda Çizelge 2.'de yer almaktadır (BP, 2022).

Çizelge 2. 2021 yılı verilerine göre enerji ihtiyacı dağılımı (BP, 2022)

Kaynak Türü	Petrol	Doğalgaz	Kömür	Nükleer	Hidroelektrik	Yenilenebilir
Egzajolue	184,21	145,35	160,1	25,31	40,26	39,91
Oran	%30,95	%24,42	%26,90	%4,25	%6,76	%6,71

Halen dünyada kullanılan enerjinin %83'e yakını fosil kaynaklıdır. Ancak fosil kaynaklı enerjinin özellikle emisyon değerlerinin ve çevreye etkilerinin uygun olmayışı, yapılan projeksiyonlarla hesaplanan zamanlarda tükenecek olduğunun görülmesi gelecek için yeni enerji kaynakları aramayı gerekli kılmaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda birinci grupta yer alan biyokütle enerjisi ön plana çıkmaktadır. Bu noktada taşımacılıktan tarıma kadar kullanılan motorin yerine biyodizel kullanımı giderek daha çok ilgi çekmektedir.

Enerji Kaynakları İle İlgili Sorunlar

Son 150 yılda petrol kaynaklı enerji yoğun bir şekilde kullanılmış ve bu nedenle tüm araçlar ve gereçler buna uygun olarak tasarlanmıştır. Hayatın her aşamasında, sadece yakıt olarak değil aynı zamanda diğer kullanım alanlarında da petrol kaynaklı maddelere olan ihtiyaç, petrol kaynaklı yakıt ve ürünleri vazgeçilmez hale getirmiştir. Bu talep her geçen gün artarak devam etmektedir. Arz miktarı belli olan fosil yakıtların artan talep doğrultusunda fiyatlarının yükselmesi kaçınılmazdır.

Özellikle bu koşullardan en çok etkilenen otomotiv sektörü, kendi durumunu koruyabilmek ve belirsizliklerden en az düzeyde etkilenmek için alternatif arayışlarına girmiştir. Bu bağlamda, doğalgaz (CNG) gibi diğer fosil kaynaklı bir yakıt yıllarca geleceğin yakıtı olarak tanımlanmıştır.

Fosil yakıtların ekonomi üzerindeki etkilerinin yanı sıra, aşırı kullanımdan kaynaklanan karbondioksit (CO₂) salınımı ve küresel ısınma önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Bu sorun artık yerel sınırları aşarak küresel bir boyuta ulaşmıştır. CO₂ seviyesindeki artış ve sera etkisinin etkisiyle, Rio Sözleşmesi, Kyoto Protokolü ve yakın tarihte imzalanan Paris İklim Anlaşması gibi uluslararası anlaşmalar hayata geçirilmiştir.

Çevre felaketini önlemenin ilk adımı, fosil kaynaklı yakıt tüketimini azaltmak olmuştur. Bu da yeni nesil enerji kaynaklarını kullanacak hibrit motorlar ve araçlar üreterek veya fosil yakıtlarla aynı performansı sağlayacak biyokütle enerjisinin (biyodizel, etanol, metanol vb.) kullanımını artırarak mümkündür. Aynı zamanda elektrik, hidrojen, güneş enerjisi gibi çeşitli alternatif enerji kaynaklarını da kullanarak bu hedefe ulaşmak mümkündür.

Yenilenebilir Enerjiler

Yenilenebilir enerji kaynakları sonsuz potansiyele sahiptir. Bu enerji kaynakları çeşitlilik gösterir. Örneğin, etil alkol ve biyoetanol (Abdulahitoğlu, 2019b), (biyolojik ve tarımsal ürünlerden elde edilen) gibi yakıtlar, benzinli motorlarda kullanılabilir (Yeni vd, 2005). Güneş enerjisinden elektrik üretip depolayan fotovoltaiik piller, rüzgar çarkları ve bitkisel yağlar da diğer örneklerdir. Bu yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemli özelliği, karbon dengesinin pozitif olmasıdır. Yani, CO₂ emisyonunda doğal bir denge sağlanmasıdır. Bu kaynaklar çevre dostu olup, fosil yakıtların aksine atmosfere zararlı karbon salınımına neden olmazlar. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynakları küresel ısınma ve çevre kirliliği gibi ciddi sorunlara karşı mücadelede önemli bir role sahiptir.

Biokütle Enerjisi

Biyokütle enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında büyük bir potansiyele sahiptir. Biyokütle, orman ürünleri, tarım ürünleri ve sanayi atıkları gibi organik malzemelerden elde edilen

enerji kaynağıdır. Biyokütle kaynaklı yakıtlar, hem katı hem de sıvı formda bulunabilir. Katı biyokütle örnekleri arasında odun, odun kömürü, zeytin çekirdeği ve benzerleri yer alır. Bu yakıtlar, yanma işlemiyle ısı ve enerji üretmek için kullanılabilir. Sıvı biyokütle örnekleri arasında biyoetanol bulunur. Biyoetanol, bitkilerin nişasta veya şeker içeriğinden fermantasyon yoluyla elde edilen bir biyokütle yakıtıdır. Genellikle biyokimya veya termokimya işlemleri kullanılarak üretilir. Biyoetanol, benzin yerine yakıt olarak kullanılabilir ve taşıtlarda kullanımı yaygınlaşmaktadır. Biyokütle enerjisi, organik atıkların ve yan ürünlerin değerlendirilmesiyle enerji üretme potansiyeline sahiptir. Bu, hem enerji kaynaklarının çeşitliliğini artırırken hem de atıkların geri dönüşümü ve enerji üretimi için kullanılmasını sağlar (Yılmaz ve Abdulvahitoğlu, 2019). Bu şekilde, biyokütle enerjisi sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak önemli bir rol oynar.

Bitkisel ve hayvansal kaynaklı maddelerin ana bileşeni olan karbonhidratlar, 'biyokütle enerji kaynağı' olarak adlandırılır ve bu kaynaklardan elde edilen enerji 'biyokütle enerjisi' olarak tanımlanır. Bitkisel biyokütle, yeşil bitkilerin güneş enerjisini fotosentez yoluyla kimyasal enerjiye dönüştürüp depolaması sonucu oluşur. Fotosentez, yılda yaklaşık 3×10^{21} J enerji içeren organik madde oluşmasına yol açar, bu da dünya enerji tüketiminin 10 katı enerjiye eşdeğerdir. Biyokütle enerji kaynakları (Karaosmanoğlu, 2008);

1. Enerji ormanları ve çeşitli ağaçlar gibi odun kaynakları,
2. Kanola, ayçiçeği, soya vb. yağlı tohum bitkileri,
3. Mısır, patates, buğday, pancar vb. karbonhidrat bitkileri,
4. Keteni, keneviri, sorgumu vb. elyaf bitkileri,
5. Bezelye, fasulye vb. protein bitkileri,
6. Dal, sap, saman vb. bitkisel atıklar,
7. Hayvansal atıklar ile
8. Endüstriyel ve evsel atıklardan oluşmaktadır.

21. yüzyılın sonuna doğru, fosil yakıtların tükenmesi beklenmektedir. Petrolün yaklaşık 50 yıl, doğal gazın 53 yıl ve kömürün ise 114 yıl kadar dayanabileceği değerlendirilmektedir. Bazı kaynaklarda ise fosil yakıtların çok daha erken, örneğin, petrol yataklarının 2052'de tükeneceği öngörülmektedir.

Bu yüzden bir an önce fosil yakıt tüketiminin azaltılması ve yeşil enerjiye geçilmesi bir zaruret haline gelmiştir. Çünkü sadece kaynakların tükenmesi değil, aynı zamanda kömür ve petrolün çevreye büyük zararların ortadan kaldırılması da bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Fosil yakıtların kullanımının yol açtığı çevresel etkiler, çevreyi olumsuz etkilemektedir. Yeşil enerji kaynaklarına geçiş yapılarak, hem enerji kaynakları sürdürülebilir şekilde kullanılabilir hem de çevreye daha az zarar veren bir enerji sistemi oluşturulabilir.

Türkiye'nin doğalgazda 2020 yılı verisine göre %99,09 ve Petrol ürünleri grubunda ise 2021 yılı için TPAO raporundan elde edilen verilere göre %92,8'lik bir dışa bağımlılık söz konusudur (Yalçın ve Doğan, 2023). Dünya petrol rezervlerinin azalması, petrol fiyatlarında dalgalanmalara ve arz sıkıntılarına yol açmaktadır. Bu durum, enerji tedarik güvenliği açısından önemli bir sorun teşkil etmektedir. Aynı zamanda, çevreye zararlı emisyonların sınırlandırılması ve iklim değişikliğiyle mücadele amacıyla çalışmalar, yenilenebilir alternatif yakıtlar üzerinde yapılan araştırmaların büyük bir hız kazanmasına neden olmuştur.

Ülkeler, enerji ithalatına bağımlılığın azaltılması ve enerji arz güvenliğinin sağlanması amacıyla yenilenebilir alternatif yakıtlara yönelmektedir. Bu alternatif yakıtlar, sürdürülebilir ve yerli kaynaklardan elde edilebilme potansiyeline sahip olmaları nedeniyle stratejik bir öneme sahiptir. Türkiye gibi büyük bir petrol ve doğal gaz ithalatçısı ülke için ise alternatif yakıtlar hakkında çalışmaları hızlandırmak çok büyük önem arz etmektedir.

Türkiye'de büyük bir tarım potansiyeli bulunması, biyokütle enerjisinin öncelikli bir seçenek olmasını sağlamaktadır. Bu durum, kırsal kesimin ekonomik yapısının güçlenmesine ve iş imkanlarının

artmasına katkı sağlayacak ve yan sanayinin gelişimine olumlu etkileri olacaktır. Ancak, biyokütle enerjisinin maliyetinin yüksek olması, biyokütle üretiminin önündeki en büyük engellerden biridir. Biyokütle enerjisinin maliyetinin yüksek olmasının başlıca nedeni, üretim, işleme ve dağıtım süreçlerinin karmaşıklığıdır. Biyokütle yakıtları için özel tesisler ve ekipmanlar gerekmektedir ve bu da yatırım maliyetini artırmaktadır. Ayrıca, biyokütle kaynaklarının toplanması, işlenmesi ve depolanması için daha fazla emek ve kaynak harcanması gerekmektedir.

Bu maliyet sorunuyla başa çıkmak için, biyokütle enerjisi alanında teknolojik gelişmeler ve yenilikçi çözümler araştırılmaktadır. Araştırma ve geliştirme çalışmalarıyla verimlilik artırılabilir, işleme maliyetleri düşürülebilir ve daha ekonomik bir biyokütle enerjisi üretimi sağlanabilir. Aynı zamanda, devlet teşvikleri ve destek programlarıyla da biyokütle enerjisi sektörünün büyümesi ve maliyetlerin düşürülmesi hedeflenebilir.

Fosil yakıtların kullanımı, atmosfere zararlı emisyonlar salınmasına ve iklim değişikliğine katkıda bulunmaktadır. Fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan hava kirliliği, insan sağlığını olumsuz etkileyebilmektedir. Çevresel ve sağlık sorunları göz önünde bulundurulduğunda, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelme ve biyoyakıtlar gibi daha sürdürülebilir enerji seçeneklerine odaklanma önem kazanmaktadır.

Çok geniş bir seçenek yelpazesi sunan biyolojik kaynakların (bitkisel, hayvansal ve atık yağlar, bitkisel kalıntılar, odun, tarımsal atıklar ve mikroalgler) işlenmesi ile biyoyakıtlar üretilir. Dolayısı ile halihazırda bulunan fosil yakıtlara ek olarak diğer seçeneklerde değerlendirilmelidir. Ancak, biyoyakıtların üretimi ve kullanımıyla ilgili bazı tartışmalar ve zorluklar da bulunmaktadır. Biyokütle üretimi için büyük arazi kullanımı gerekir, bu da gıda üretimine veya doğal alanlara olan olumsuz etkileri artırır. Ayrıca, biyoyakıtların enerji dengesi, üretim süreçleri ve sosyoekonomik etkileri de dikkate alınmalıdır.

Halihazırda, dizel motorlar için biyokütleden üretilen en önemli yakıt alternatiflerinden biri biyodizeldir. Biyodizel, biyokütleden elde edilen ve doğrudan motorlu taşıtlarda kullanılabilen bir biyoyakıt türüdür. Genellikle bitkisel yağlar veya atık yağlar kullanılarak üretilir (Keskin, 2005b). Biyodizel, içten yanmalı motorlarda, özellikle dizel motorlarında, kullanılan geleneksel fosil dizel yakıtın bir alternatifidir. Biyodizel, düşük emisyon değerlerine sahiptir ve çevresel etkileri daha azdır. Ayrıca, mevcut dizel motor sistemlerinde doğrudan kullanılabilir, bu da bir geçiş aşaması için uygun bir seçenek olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte, biyodizel üretimi ve kullanımıyla ilgili bazı zorluklar ve tartışmalar da bulunmaktadır. Örneğin, biyodizel üretimi için büyük arazi kullanımı gerekmekte ve bu durum gıda üretimiyle veya doğal alanların kullanımıyla rekabet edebilmektedir. Ayrıca, biyodizel üretim süreçlerinin enerji dengesi, su kullanımı ve diğer çevresel etkileri de göz önünde bulundurulmalıdır. Biyodizel üretimi için farklı yöntemler kullanılmaktadır, örneğin, bitkisel yağların veya atık yağların alkil esterlere dönüştürülmesi için transesterifikasyon adı verilen bir kimyasal dönüşüm süreci kullanılır. Biyodizel, enerji güvenliği, sürdürülebilirlik ve çevresel etkilerin azaltılması gibi faktörler nedeniyle önem kazanmıştır. Yapılan araştırmalar, biyodizel kullanımının sera gazı emisyonlarını azalttığını ve fosil yakıtların tükenmesiyle ilgili sorunlara alternatif bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Biyodizel, farklı kaynaklardan elde edilen yağların metil esterleri olarak üretilen bir biyoyakıttır. Biyodizel, uzun zincirli yağ asitlerinin metil esterleri olan yağlarla üretilir ve genellikle içten yanmalı motorlarda herhangi bir değişiklik yapmadan veya karışım halinde dizel yakıtı olarak kullanılır (Sakthivel vd, 2018; Shuit vd, 2009; Sugebo vd, 2021). Biyodizel, fosil dizel yakıtına benzer özelliklere sahiptir ve içten yanmalı motorlarda kullanılabilir. Ayrıca, biyodizel biyolojik olarak parçalanabilen ve toksik olmayan bir yakıttır (Abdulahitoğlu ve Tüccar, 2017).

Biyodizel ve Biyodizel Üretimi

Biyodizel, geleneksel fosil yakıtların alternatifi olarak kullanılan bir enerji kaynağıdır. Biyolojik kaynaklardan elde edildiği için çevre dostu bir seçenek olarak kabul edilir ve sera gazı emisyonlarını azaltma potansiyeline sahiptir. Ayrıca, biyodizel genellikle daha iyi bir yanma özelliğine sahip olduğu için daha az hava kirliliği oluşturur. Bu nedenlerle, biyodizel sürdürülebilirlik, enerji güvenliği ve çevresel etkilerin azaltılması gibi avantajları nedeniyle tercih edilen bir alternatif yakıt haline gelmiştir. Araştırmalar ve teknolojik gelişmeler, biyodizel üretimi için daha verimli ve sürdürülebilir yöntemlerin geliştirilmesi üzerine devam etmektedir.

Biyodizel üretimi için kullanılan ham madde yağı, genel yakıt kalitesi üzerinde etkili olur (Aderibigbe vd.,2002). Yağlar farklı kaynaklardan elde edilir ve farklı kategorilere ayrılır. Bunlar arasında yenilebilir yağlar (örneğin soya fasulyesi, mısır, susam, hurma), yenilmeyen yağlar (örneğin kauçuk tohumu, pongamia, defne, kiraz), atık kızartma/geri dönüştürülmüş yağlar, hayvansal yağlar ve mikroalgler bulunur (Abdulvahitoğlu, 2018a; Abdulvahitoğlu, 2018b; Abdulvahitoğlu, 2019a; Abdulvahitoğlu ve Kılıç, 2022; Verma ve Sharma, 2016; Latinas vd., 2020; Avinash vd, 2021; Cijil vd., 2022). Bu çeşitlilik, biyodizel üretiminde kullanılabilecek farklı hammaddelerin olduğunu gösterir.

Biyodizel, çeşitli biyokütle kaynaklarından elde edilen bir alternatif yakıttır. Üretim süreci genellikle transesterifikasyon adı verilen kimyasal bir reaksiyonla gerçekleştirilir. Ancak, ham veya rafine edilmemiş bitkisel yağlar veya işlenmemiş geri dönüştürülmüş greslerin doğrudan kullanılması önerilmez. Bu tür yağlar viskozite sorunlarına neden olabilir ve araç motorlarında performans sorunlarına yol açabilir. Düşük kaliteli bitkisel yağ karışımları ise motor birikintilerine, segman yapışmasına, yağlama yağının jelleşmesine ve motor ömrünün azalmasına neden olabilir.

Algler, biyodizel üretimi için umut vadeden bir alternatif hammaddedir. Alglerin kullanılması, daha az arazi kullanımıyla

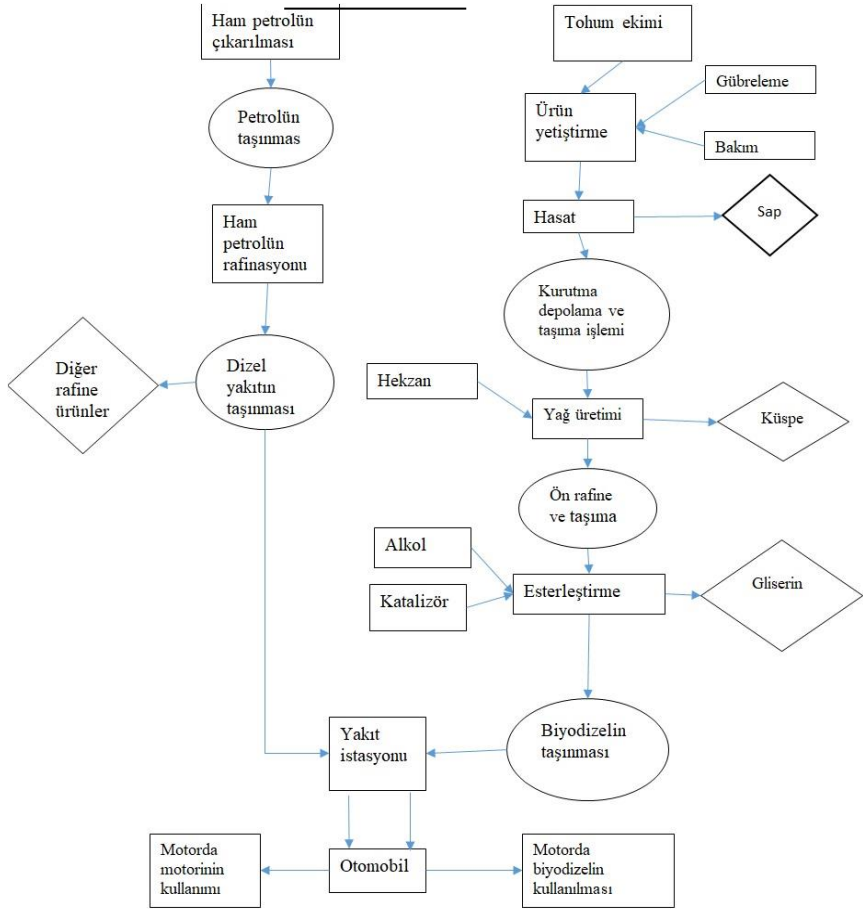
yüksek verim elde edilmesini ve sürdürülebilir bir biyodizel kaynağı oluşturulmasını hedeflemektedir. Alglerin biyodizel üretimindeki potansiyeli üzerinde yapılan araştırmalar devam etmektedir. Bunun yanı sıra, bitkisel yağlar veya hayvansal yağlar gibi yağlı maddelerin hidrojenasyon veya Fischer-Tropsch süreçleriyle elde edilen "yenilenebilir dizel" adı verilen başka bir yakıt türü de mevcuttur. Bu yakıt, fosil yakıtların yerine geçebilecek bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

Ülkemizde değişen ve gelişen ekonomik şartlar ve teknoloji ile birlikte taşıt sayısı da hızla artmaktadır. Bu artış her geçen gün katlanarak devam etmektedir. 2017 yılına kadar enerji de ithalat oranı %50 civarında iken 2017 yılına gelindiğinde bu oran %70'lerin üzerine çıkmıştır (Yalçın ve Doğan, 2023). Bu durum stratejik bir sorun olarak önümüze çıkmıştır. Son TÜİK verilerinde görüldüğü üzere ülkemizde dizel yakıtla çalışan araç sayısı oranı %49 ile çok yüksek bir sayıya ulaşmıştır. Günümüzde petrolde %93, doğal gazda %99 olan dışa bağımlılık oranının önümüzdeki yıllarda da yaklaşık aynı düzeylerde süreceği tahmin edilmektedir (Ayдын vd, 2020).

Bu rakamlar göz önüne alındığında biyodizel üretiminin ülkemiz için hayati önem taşıdığı açıkça görülebilir. Bununla birlikte, biyodizel üretimi aşamasında karşılaşılan en büyük sorunlardan biri maliyettir (Yaman ve Çanakçı, 2003). Biyodizel üretiminde dikkate alınması bazı hususlar bulunmaktadır. Bunlar;

1. Hammadde tipi (ham yağ, atık yağ, hayvansal yağ vb gibi),
2. Hammaddenin ithal olup olmaması,
3. Hammaddenin serbest yağ asidi oranı,
4. Yıllık üretim miktarı ve altyapının yeterlilik durumu,
5. Kullanılan enerjinin birim fiyatı,
6. Kullanılan alkol ve katalizörün birim fiyatı,
7. Su birim fiyatı,
8. Motorinin serbest piyasa satış fiyatı,

9. Biyodizelin muhtemel birim fiyatı,
10. Vergi, teşvik vb. hususlar olarak sıralanabilir.



Şekil 1. Biyodizel ve motorin için yaşam döngü analizi (Öğüt, 2005)

Hammaddeler

Biyodizel üretimi için çeşitli kaynaklar kullanılabilir. Bu kaynaklar aşağıda belirtilmiştir.

- i. **Bitkisel yağlar:** Ayçiçeği, kanola, aspir, pamuk, palmye gibi bitkilerden elde edilen yağlar, biyodizel üretimi için sıklıkla kullanılan kaynaklardır. Bu bitkilerin tohumlarından veya meyvelerinden elde edilen yağlar biyodizel üretiminde kullanılabilir.
- ii. **Geri kazanım yağları:** Bitkisel yağ endüstrisi yan ürünleri (soap stock, hurda yağı), şehrsel ve endüstriyel atık kökenli geri kazanım yağları (kahverengi gres, siyah gres), atık bitkisel yağlar (kullanılmış yemeklik yağlar, sarı gres) gibi geri kazanım yağları da biyodizel üretimi için potansiyel kaynaklardır. Bu atık yağlar, geri dönüşüm ve değerlendirme süreçleriyle biyodizel üretiminde kullanılabilir.
- iii. **Hayvansal yağlar:** Hayvanlardan elde edilen yağlar da biyodizel üretimi için kullanılan kaynaklardan biridir. Don yağları, balık yağları ve kanatlı yağları gibi hayvansal kaynaklar, biyodizel üretiminde değerlendirilebilir.
- iv. **Mikroalgler:** Mikroalgler, biyodizel üretimi için gelecekte büyük potansiyele sahip olabilecek bir kaynaktır. Mikroalglerden elde edilen yağlar, biyokütleye dönüştürülerek biyodizel üretimi için kullanılabilir. Mikroalglerin hızlı büyüme yetenekleri ve yüksek yağ içerikleri, biyodizel üretimi açısından avantaj sağlar.

Bu çeşitli kaynaklar, biyodizel üretiminde kullanılarak karayolu taşımacılığında kullanılan motorinin alternatifini oluşturabilir. Bu sayede hem fosil yakıtlara olan bağımlılık azaltılabilir hem de çevresel etkileri daha düşük olan bir enerji kaynağı kullanılabilir.

Bu kaynaklardan özellikle bitkisel yağlar önemlidir; ancak dizel motorlarda kullanılamayacak kadar pahalı olabilirler. Gıda olarak kullanılabilecek yemeklik bitkisel yağların yakıt üretiminde kullanılması, hammaddesi çoğunlukla yurtdışından gelen yemeklik yağlara olan talebi artıracak ve dolayısıyla fiyatları da yükseltecektir. Bu nedenle, daha acil ihtiyaç duyulan durumlarda

yani petrolün bulunmadığı ya da yeterli olmadığı zamanlarda kullanılması daha uygun olabilir.

Atık yağların veya yeniden işlenemeyen yağların kullanılması, biyodizel üretimi açısından maliyet açısından avantajlı bir seçenektir. Atık yağların imha edilmesi, çevre problemlerine yol açabilir. Atık yağlar, su kaynaklarını, toprakları ve canlıları olumsuz etkileyebilir. Bununla birlikte, atık yağların biyodizel üretimi için kullanılmasıyla, bu atıkların zararlı etkileri en aza indirgenir ve ekonomik bir değere dönüşür. Atık yağların geri kazanılması ve biyodizel üretimi için kullanılması, atık yönetimi maliyetlerini azaltır. Atık yağların imha edilmesi için harcanan maliyetler, geri dönüşüm ve biyodizel üretimiyle geri kazanılan değerle karşılaştırıldığında daha yüksek olabilir. Bu nedenle, atık yağların biyodizel üretimi için kullanılması, çevresel açıdan sürdürülebilir bir çözüm sunarken aynı zamanda ekonomik olarak da avantaj sağlar.

Bitkisel Yağların Yakıt Olarak Kullanılabilmesinin Sağlanması

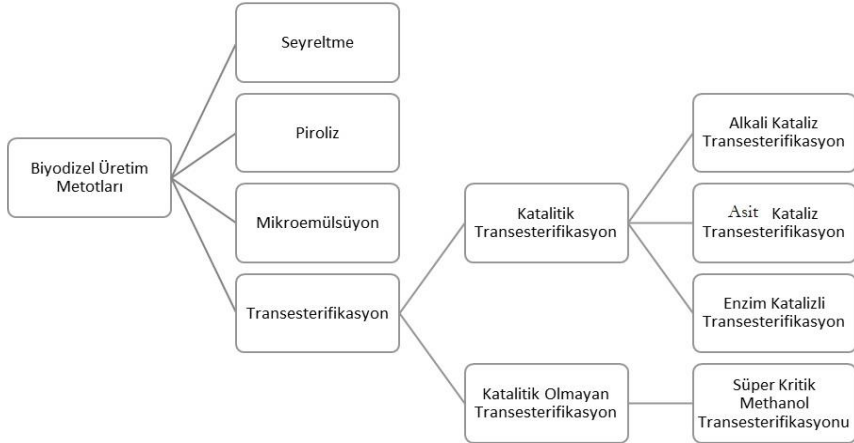
Bitkisel yağların enerji içeriği, fosil kökenli dizel yakıtlarla neredeyse aynıdır. Ancak, viskozite değerleri dizel yakıtlara kıyasla 10-20 kat daha yüksektir. Bu durum, enjektör tıkanmaları, soğuk havalarda motorun başlangıçta sorun yaşaması ve motor ömrünün kısılması gibi bir dizi soruna yol açar. Kötü atomizasyon, yağlama yağının kalınlaşması, yetersiz yanma ve güç kaybı gibi sorunlar da bu durumdan kaynaklanır. Bu sorunların üstesinden gelmek için çeşitli teknikler geliştirilmiştir.



Şekil 2. Bitkisel yağların yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi

3.3.3. Biyodizel Üretim Metotları

Biyodizel temiz, yenilenebilir ve güçlü bir alternatif yakıt olarak ortaya çıkmıştır. Biyodizel üretimi için genellikle dört farklı yöntem kullanılır. Bunlar; piroliz (termal kraking), seyreltme (harmanlama), mikroemülsiyonlar ve transesterifikasyon (alkoliz)'dir (Azam vd, 2005). Şekil 7.'de biyodizel üretim metotları şematik olarak aşağıda belirtilmiştir.



Şekil 3. Biyodizel üretim metotları

İnceltme (Seyreltme Yöntemi)

Seyreltme olarak da ifade edilen bu yönetime basitçe karışım oluşturma da diyebiliriz. Bu yöntem en eski ve en kolay yöntemlerden birisidir. Bitkisel yağların uygun bir seyrelticiyle viskozitelerinin düşürülmesidir. Bu yöntemde, yapılan çalışmalar incelendiğinde kullanılacak bitkisel yağa herhangi bir kimyasal işlem yapılmadan doğrudan belirli oranlarda dizel yakıt katılmasıdır.

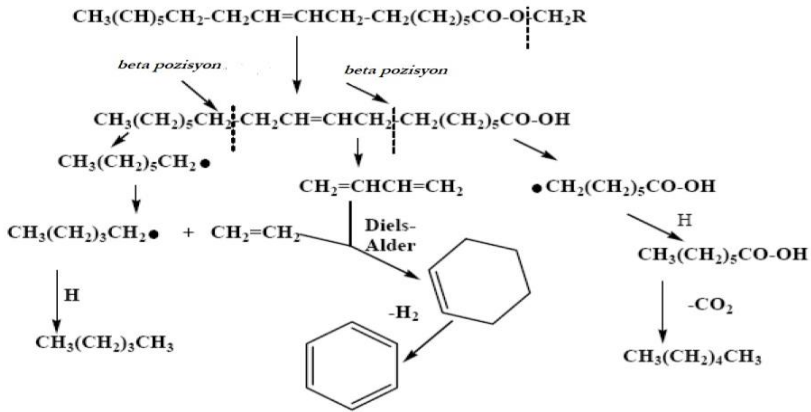
Bitkisel yağlar yapıları itibarı ile saf halde kullanıldıkları takdirde enjektörlerde tıkanmaya neden olacağından doğrudan kullanıma müsait değildir. Bitkisel yağların seyreltilmesi, dizel yakıtlar, bir çözücü veya etanol gibi maddelerle gerçekleştirilebilir (Srivastava ve Prasad, 2000). Seyreltme, bitkisel yağların viskozite sorununa olası ek bir çözümdür. Bitkisel yağların viskozitesi saf etanol ile karıştırılarak düşürülebilmektedir (Balat ve Balat, 2008). Bu nedenle dizel yakıtla karıştırarak seyreltme işlemi gerçekleştirilir ve yağın viskozitesi düşürülür. Seyreltme işlemi; bitkisel ve atık yağların belirli oranlarda bir çözücü veya bir dizel yakıtla karıştırılarak inceltilmesi işlemidir. Bu işlemlerden en yaygın olanı yağların dizel yakıt ile karıştırılması işlemidir. Böylelikle yağın viskozitesi düşürülür ve dizel yakıt kullanım oranı azaltılır. Diğer yandan dizel yakıtının yanı sıra organik bileşikler (bütanol, aseton, etanol veya metanol) karıştırılarak seyreltme işlemi gerçekleştirilebilir (Özdemir ve Mutlubaş, 2016; Sayın vd., 2019). Bu üretim yönteminin avantajı Doğal, sıvı, yenilenebilir özellik, kullanıma hazır olup dezavantajı ise yüksek derecede viskozite, düşük miktarda uçuculuk, doymamış hidrokarbonların aktifliğidir.

Piroliz Yöntemi

Piroliz veya kraking; yüksek sıcaklıklara sahip yüksek moleküllerin, daha düşük seviyeli moleküllere dönüşmesi işlemidir. Bitkisel yağların Piroliz ürünlerini elde etmek için iki yöntem vardır. Birinci yöntemde, bitkisel yağlar kapalı bir kap içerisinde ısı etkisiyle parçalanır. İkinci yöntemde ise, Biyodizel Üretim Yöntemleri ve Çevresel Etkileri 137 standarttı temel alınarak

hazırlanan maddeler kullanılarak yapılan damıtma işlemiyle bitkisel ve atık yağlar ısı olarak parçalanır. İkinci metot ile elde edilen biyodizel, dizel yakıtlara daha yakın özellikler gösterir (Özdemir ve Mutlubaş, 2016).

Trigliseritlerin termal ayrışması, alkanlar, alkenler, alkadienler, aromatikler ve karboksilik asitler dahil yağ asidi sınıflarının bileşiklerini üretir. Farklı bitkisel yağ türleri, termal olarak ayrılan yağın bileşiminde büyük farklılıklar oluşturur. Trigliseritlerin pirolizinden alkanların, alkenlerin, alkadienlerin, aromatiklerin ve karboksilik asitlerin oluşumunu açıklayan bir şema Şekil 4.'de özetlenmiştir. Bu şemadan da anlaşıldığı gibi karışık trigliseritlerin olası reaksiyonlarının çok çeşitliliği ve değişik yapıları nedeniyle, trigliseritlerin termal ayrışma mekanizmaları karmaşık bir görünüm sergilemektedir.



Şekil 4. Trigliseridlerin termal parçalanma mekanizması (Adebanjo, 2005)

Genel olarak, bu yapıların termal ayrışması, bir serbest radikal veya karbonyum iyon mekanizması yoluyla ilerler. Bitkisel yağların pirolizi sırasında oluşan karboksilik asitler gliserit kısmının parçalanmasından kaynaklanır (Srivastava ve Prasad, 2000). Bu metodun avantajı, Petrol kökenli olan dizel ve benzine kimyasal

yönden benzerlik gösterirken dezavantajı ise maliyetinin yüksek oluşudur (Sayın vd., 2019).

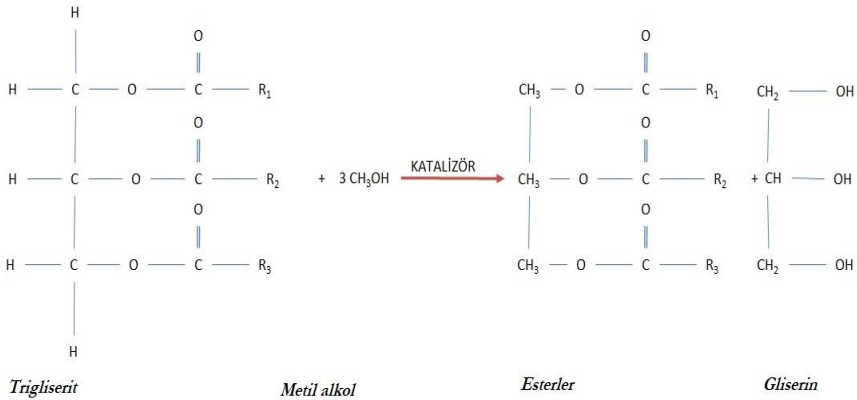
Mikroemülsiyon Yöntemi

Bitkisel yağlar, metanol, etanol veya bütanol gibi kısa zincirli alkoller ile mikro emülsiyon oluşturur. Mikro emülsiyon, boyutları 1–150 nm arasında olan optikçe izotropik sıvı mikro yapılarının denge dağılımı olup normalde karışmayan iki sıvı ve bir ya da daha fazla aktif maddenin bir araya gelmesi ile oluşur. Bu yöntemle elde edilen yakıtların viskozitelerinde azalma ve püskürtme karakteristiklerinde iyileşmeler gibi olumlu sonuçlar elde edilmesine rağmen, bu yakıtların bünyesindeki alkol nedeniyle setan sayıları ve ısı değerlerinde düşüşler dolayısıyla motor performans değerlerinde olumsuz etkiler tespit edilmiştir. Mikroemülsiyonlar, dağılmış faz parçacıklarının çapının görünür ışığın dalga boyunun dörtte birinden daha az olduğu şeffaf, termodinamik olarak kararlı koloidal dispersiyonlar olarak tanımlanır. Mikroemülsiyon bazlı yakıtlar bazen "hibrit yakıtlar" olarak da adlandırılır, ancak geleneksel dizel yakıtı ile bitkisel yağların karışımları da hibrit yakıtlar olarak adlandırılır.

Mikroemülsiyonlardaki damlacık çapları 100 ila 1000 Å arasında değişir. Bir ester ve dağıtıcı (birlikte çözücü) içeren bitkisel yağlardan veya dizel yakıtlı veya dizel yakıtsız bitkisel yağlardan, alkol ve yüzey aktif maddeden bir mikroemülsiyon yapılabilir. Mikroemülsiyonlar, alkol içerikleri nedeniyle dizel yakıtlardan daha düşük hacimsel ısıtma değerlerine sahiptir, ancak alkoller yüksek gizli buharlaşma ısısına sahiptir ve yanma odasını soğutma eğilimindedir, bu da meme koklaşmasını azaltacaktır. Bitkisel yağlarla bir metanol mikroemülsiyonu, neredeyse dizel yakıtlar kadar iyi performans gösterebilir (Srivastava ve Prasad, 2000). Bu yöntemin avantajı yanma esnasında iyi derecede spreyleme, düşük viskozite iken dezavantajı düşük miktarda enerji içeriği ve düşük setan sayısıdır (Sayın vd., 2019).

Transesterifikasyon (Alkoliz)

En önemli ve en çok uygulanan yöntemdir. O yüzden bu yöntemi ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Transesterifikasyon, bir başka deyişle alkoliz, bir bitkisel yağın küçük molekül ağırlıklı bir alkol katalizörlüğünde gliserin ve yağ esteri oluşturmak üzere reaksiyona girmesi olarak tanımlanır. Bu reaksiyon, bitkisel yağ moleküllerinin bir katalizör yardımı ile belirli bir sıcaklıkta belirli bir süre kimyasal tepkimeye sokulmasıdır. Bu kimyasal tepkime ile bitkisel yağ asitleri bağlı bulundukları trigliseridlerden ayrılıp alkoller ile yeni esterler oluştururlar. Reaksiyon sonunda üç mol ester ve bir mol gliserin elde edilir. Transesterifikasyon yöntemi, hayvansal ve bitkisel yağların kısa zincirli alkollerle reaksiyona girmesi sonucu biyodizel oluşturmasıdır. Genel olarak, Metil alkol ve etil alkol kullanılır. Şekil 5.'te transesterifikasyon reaksiyonu (iç ester değişimi) teorik olarak gösterilmektedir.



**R1,R2,R3 yağ asitlerine ait karbon zincirlerini ifade etmektedir*

Şekil 5. İç ester değişimi kimyasal işlemi (Abdulvahitoğlu, 2009).

İç ester değişimi olarak ifade ettiğimiz yöntem en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde bitkisel ve hayvansal yağları oluşturan trigliseridlerdeki glioksi grubu ile mono alkoksi grupları yer değiştirmektedir. Meydana gelen bu iç dönüşüm ile gliserin esaslı triesterler alkil esaslı monoesterlere dönüşmektedir. Teorik bir

iç ester değişiminde bir mol yağ için üç mol alkol kullanılır ve üç mol ester ile bir mol gliserin elde edilir (Abdulvahitoglu, 2009).

Transesterifikasyon işleminde genellikle metil veya etil alkol kullanılır. Reaksiyon sonunda elde edilen esterler, modifiye edilmemiş dizel motorlarında, dizel yakıtı ile değişik oranlarda karıştırılarak ya da %100 biyodizel olarak kullanılabilir. Transesterifikasyon işlemini daha iyi anlayabilmek için bu işlem esnasında kullanılan ve verimi etkileyen alkol, katalizör, reaksiyon sıcaklığı, su ve nem gibi faktörleri incelemek gerekir.

Trigliseritlerin transesterifikasyonu, yağ asidi alkil esterleri ve gliserol oluşturur. Reaksiyon sırasında gliserol, reaksiyon kabının dibine yerleşen bir tabaka oluşturur. Digliseritler ve monogliseritler ise bu süreçte ara ürünler olarak ortaya çıkar (Meher vd., 2006).

Transesterifikasyon reaksiyonu geri dönüşümlüdür, yani reaksiyonlar tersine çevrilebilir. Bu nedenle, reaksiyon denge durumunda olur ve hem yağ asidi esterleri hem de gliserol üretimi gerçekleşir. Alkali katalizli transesterifikasyon için reaksiyon mekanizması genellikle üç adımda açıklanır.

Aşamalı reaksiyonlar tersine çevrilebilir ve dengeyi esterlerin oluşumuna doğru kaydırmak için biraz fazla alkol kullanılır. Aşırı alkol varlığında, önsöz reaksiyonu pseudo birinci dereceden ve ters reaksiyon ikinci dereceden olarak bulunur. Alkali ile katalize edildiğinde transesterifikasyonun daha hızlı gerçekleştiği de gözlenmiştir. Bu işlemlerin (Meher vd., 2006);

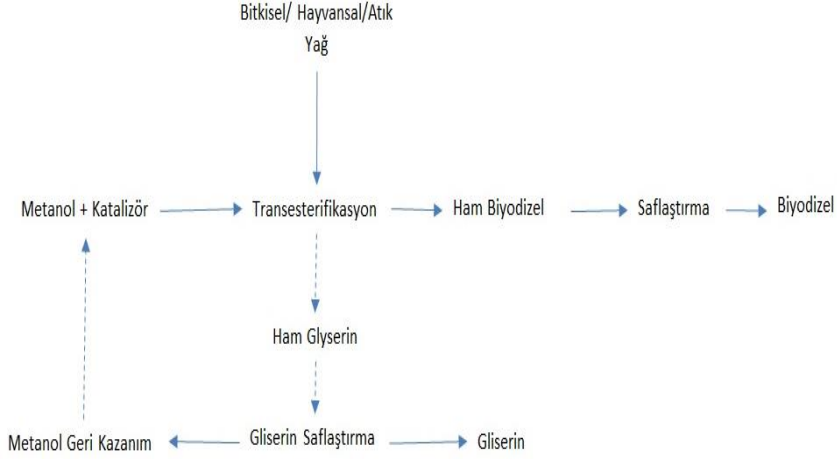
- i. **İlk adımında;** trigliserit molekülünde bulunan karbonil karbon atomuna alkolün anyonu (metoksit iyonu) saldırır ve tetrahedral bir ara madde oluşturulur.
- ii. **İkinci adımında;** bu tetrahedral ara madde, bir alkol (genellikle metanol) ile reaksiyona girerek alkolün anyonunu (metoksit iyonu) yeniden oluşturur.
- iii. **Son adımında;** tetrahedral ara ürünün yeniden düzenlenmesi gerçekleşir ve bir yağ asidi esteri ile bir digliserid oluşur.

Transesterifikasyon reaksiyonları, tercihen sülfonik ve sülfürik asitler gibi Brownsted asitleri tarafından kataliz edilebilir. Bu katalizörler, alkil esterlerin yüksek verimle oluşmasını sağlar, ancak reaksiyonlar yavaş ilerler ve genellikle 100 °C'nin üzerinde ve 3 saatten uzun süreli yüksek sıcaklık gerektirir (Meher vd., 2006).

Transesterifikasyon reaksiyonlarında genellikle alkali katalizörler olarak NaOH (sodyum hidroksit), KOH (potasyum hidroksit), K₂CO₃ (potasyum karbonat) gibi maddeler veya benzer diğer katalizörler kullanılır. Bu katalizörler, alkollerle karıştığında alkoksit gruplarını oluşturarak asıl katalizör olarak işlev görürler. Bu reaksiyon sırasında az miktarda su da oluşabilir. Su, transesterifikasyon sürecinde sabun oluşumuna neden olabilir. Bu nedenle, reaksiyonun verimliliğini artırmak için suyun uzaklaştırılması veya süreçteki su miktarının kontrol edilmesi önemlidir.

Transesterifikasyon süreci, biyodizel üretimi gibi birçok uygulamada kullanılan bir yöntemdir. Bu süreç, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen yağların biyoyakıtlara dönüştürülmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bu işlem esnasında ortaya çıkan artık maddelerin temizlenmesi maksadıyla da su kullanılır. Kullanılan bu su ve işlem esnasında ortaya çıkan su kurutma işlemi ile biyodizelden uzaklaştırılır.

Aşağıda Şekil 6.'da transesterifikasyon yöntemi ile biyodizel üretimi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6. Biyodizelin şematik olarak transesterifikasyon yöntemi ile üretilmesi

Transesterifikasyonda Alkolün Etkisi

Transesterifikasyon esnasında en çok tercih edilen alkoller metil alkol (metanol) ve etil alkol (etanol)'dür. Bununla beraber propanol ve bütanol da kullanılabilir. Bu alkollerden etanol, propanol ve bütanol kullanıldığında alkali katalizörlerle 48 saatten fazla reaksiyonda kaldıkları halde faz ayrışımı gerçekleşmemektedir. Aynı alkoller asit katalizörler ile denendiğinde ise 48 saatlik süre ve yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca propanol ve bütanol yıkama suyunu tutma eğilimindedir. Bu da suyun yakıttan uzaklaştırılması gerektiğinden, ekstra maliyet ve zaman kaybına sebebiyet vermektedir.

Transesterifikasyon reaksiyonunda yağ(trigliserid) ve alkol oranı 3:1'dir. Fakat uygulamada reaksiyon hızını ve verimini artırmak için daha fazla alkolde kullanılmaktadır. Alkali katalizör kullanıldığında %60–100 arasında daha fazla alkol kullanılabilir. Asit katalizör kullanıldığında bu oran %500 e kadar çıkabilir. Biyodizel üretiminde alkol kullanımı litre olarak Çizelge 3.'te gösterilmiştir.

Çizelge 3. Biyodizel üretiminde alkol kullanımı (Tickell, 2000)

Bitkisel Yağ(litre)	Metil Alkol(litre)	Etil Alkol(litre)
20	4	6
40	8	12
80	16	24
120	24	36
180	32	48
200	40	60

Yapılan çalışmalar aynı şartlar altında etil alkol kullanıldığında daha yüksek verim elde edildiğini göstermiştir. Ancak metil alkol ile elde edilen ester, dizel yakıt özelliklerine daha uygundur. Biyodizel tesislerinde metil alkolün etil alkole göre daha iyi sonuç vermesi, daha ekonomik olması ve temini daha kolay olmasından dolayı metil alkol tercih edilmektedir.

Biyodizel üretiminde metanol, pratiklik ve maliyet açısından en uygun alkoldür. Araştırmalar, metanolün %1 KOH (potasyum hidroksit) katalizörüyle 6:1 oranında kullanıldığı ve en az 1 saat süren 60 °C sıcaklıkta yapılan reaksiyonun, yakıt kalitesinde biyodizel üretimi için uygun olduğunu göstermektedir. Bu koşullarda biyodizel üretimi pratik ve ekonomik bir şekilde gerçekleştirilebilir.

Transesterifikasyon sonucu elde edilen esterde az da olsa alkol kalması, yakıt pompası, conta ve plastik aksamla olumsuz etkileri olduğu gibi, parlama noktasını ve setan sayısını düşürmekte, sonuçta kötü yanmaya neden olmaktadır.

Katalizörün Etkisi

Transesterifikasyon işleminde üç çeşit katalizör kullanılır. Bunlar,

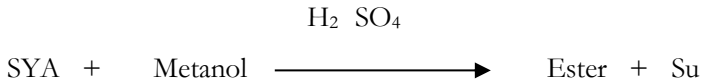
- i. **Alkali(baz) katalizörler:** sodyum hidroksit, sodyum metoksit, potasyum hidroksit, potasyum metoksit, sodyum amit, sodyum hidrür, potasyum amit ve potasyum hidrürdür.
- ii. **Asit katalizörler:** sülfürik asit, fosforik asit, hidroklorik asit ve organik sulfonik asittir.
- iii. **Enzim katalizörlerdir.**

Biyodizel ile ilgili çalışmalar incelendiğinde en yaygın kullanılan katalizörler NaOH ve KOH yani baz katalizörler olduğu görülmüştür.

Tranesterifikasyon işleminde hangi tür katalizör kullanılacağıın belirlenmesi için hammaddenin serbest yağ asidi (SYA) oranına bakmak gerekir. SYA oranı %1'den daha fazla ise alkali katalizör kullanılamaz. Çünkü SYA'lar baz katalizör ile reaksiyona girdiğinde, katalizörü tüketip ester dönüşümünü azaltan ve ester, gliserol ve yıkama suyunun ayrışmasını engelleyen sabun oluşumuna neden olurlar (Abdulvahitoğlu, 2018a).



Şekil 7. SYA'ların sabun oluşturmaları



Şekil 8. SYA'ların esterleşmesi

Alkali (baz) katalizör kullanabilmek için SYA oranını %1 in altına indirmemiz gerekir. Bu da asit katalizörlerin kullanımı ile mümkün olabilir. Çünkü asit katalizörler SYA'lara karşı daha toleranslıdır. Meydana gelen sabunlaşma reaksiyonun olumsuz etkiler. elde edilen biyodizel kalitesini de önemli ölçüde düşürür. Çünkü sabunlaşma üretim esnasında gliserinin esterden ayrışmasını engeller (Keskin vd., 2005a). SYA oranı uygun ise daha yüksek reaksiyon hızı sağlamak için alkali katalizör kullanımı tercih edilir.

Genellikle yağlı tohumdan elde edilen hammaddelerin SYA oranı üretim, taşınma veya paketleme esnasında etkileşime maruz kalmamış ise alkali asit ile birlikte kullanım için uygundur. Ama biyodizel üretimine başlamadan önce SYA oranının kontrol edilmesi gerekir.

Serbest yağ asitleri (SYA) yüksek olan hammadde asit katalizör ile esterleştirilir. Bu şekilde nötrleştirilen ürün alkali katalizör kullanımı için uygun hale gelir. Kullanılmış yağlar ve hayvansal yağlar genellikle yüksek serbest yağ asidi içerir. Bu nedenle, bu tür yağlardan biyodizel üretiminde asit katalizörü ile ön reaksiyon ve nötrleştirme işlemleri uygulanır. Asit katalizörü, serbest yağ asitlerini esterleşme reaksiyonuna hazırlamak ve yağ asitlerini alkil esterlere dönüştürmek için kullanılır. Bu işlem, yağların uygun bir şekilde transesterifikasyon işlemine tabi tutulabilmesi için önemlidir. Nötrleştirme ise asit katalizörünün etkisini ortadan kaldırmak ve ürünlerdeki asit içeriğini azaltmak amacıyla gerçekleştirilir.

Çizelge 4. Katalizör olarak kullanılan NaOH miktarı

Yağ miktarı (l)	Yağın her litresi için kullanılan NaOH miktarı(g)				
1	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5
20	70	90	110	130	150

Çizelge 5. Katalizör olarak kullanılan KOH miktarı

Yağ miktarı (l)	Yağın her litresi için kullanılan KOH miktarı(g)				
1	9	10	11	12	13
20	180	200	220	240	260

Biyodizel üretiminde kullanılan katalizörlerin daha sonra elde edilen esterden uzaklaştırılamaması kül oranının artmasına sebebiyet verir. Bu katalizörler, motorda kullanım esnasında enjektörde depozit oluşumuna ve filtre tıkanmamalarına sebebiyet verirler.

Reaksiyon Sıcaklığın Etkisi

Sıcaklık kullanılan yağa göre değişiklik arz etse de genellikle 50–65 °C tercih edilir. Çünkü daha düşük sıcaklıklarda verim düşüp, reaksiyon süresi de azalabilir. Daha yüksek sıcaklıklarda da reaksiyona giren alkol buharlaşabilir.

Reaksiyon Süresinin Etkisi

Reaksiyon verimi zamana bağlı olarak artış gösterir. Reaksiyon hızı ilk dakikalarda daha fazla olmakla birlikte, zaman ilerledikçe azalır. Transesterifikasyon reaksiyon süresi alkali katalizör kullanıldığında genellikle daha kısa olurken, asit katalizörlerde daha uzun süre gerekmektedir. Bu durum, asit katalizörlerin transesterifikasyon reaksiyonunun hızını etkileyen faktörlerden biridir. Asit katalizörleri, esterleşme reaksiyonunun hızını artırmak için daha uzun sürelerde çalışma gerektirebilir. Bunun nedeni, asit katalizörlerin etkisiyle gerçekleşen esterleşme reaksiyonunun kinetiğinin alkali katalizörlerden farklı olmasıdır. Asit katalizörler, serbest yağ asitlerinin alkollere dönüşmesini sağlamak için daha fazla zamana ihtiyaç duyabilir. Bu nedenle, asit

katalizör kullanılan transesterifikasyon işlemleri genellikle alkali katalizör kullanılanlara göre daha uzun sürebilir.

Su ve Nemin Etkisi

Yağın bünyesinde bulunan su reaksiyon esnasında sabun oluşumuna neden olduğundan kullanılan katalizör miktarının azalmasına, dolayısıyla katalizörün etkisizleşmesine neden olur. Oluşan sabun gliserinin ayrışmasını güçleştirdiği gibi, viskoziteyi ve jelleşmeyi de artırır. Ayrıca sabunun biyodizel bünyesinden ayrıştırılması biyodizelin sıcak su ile birçok defa yıkanmasını gerektirdiğinden üretim maliyetlerini arttırıcı etkiye de sahiptir.

Yakıt Olarak Biyodizel

Yakıt olarak biyodizel kullanımında motor momentini ve gücünü fazla etkilemedikleri fakat özgül yakıt tüketiminde büyük artış olduğu görülmüştür. Bunun sebebi olarak da ısıl değeri motorine göre düşük olan biyodizelin aynı enerjiyi verebilmesi için daha fazla tüketilmesidir. Bu konular biyodizelin avantaj ve dezavantajları başlığı altında incelenecektir.

Biyodizelin Avantaj ve Dezavantajları

Konunun anlatımı içinde birçok yerde biyodizel faydalarını ve olumsuzluklarından bahsettik. Ancak bütün bunları toparlayıp tekrar hepsini bir arada görmek biyodizel üretimi ve kullanımının değerlendirilmesini kolaylaştıracaktır.

Biyodizelin Avantajları

Biyodizelin dizel motorlarda yakıt olarak kullanılmasının avantajların olduğu tespiti biyodizel üzerine yapılan çalışmalara her geçen gün daha fazla popülerlik kazandırmaktadır. Elektrikli araçların söz konusu olmasıyla (Abdulvahitoğlu vd., 2022) bu popülerlerdik her ne kadar azalmaya başlamış olsa da biyodizel kullanımın sağladığı avantajlar hala devam etmektedir. Bunlar;

- i. Biyodizel, yenilebilir bir enerji kaynağı olup, yerel imkanlarla herhangi bir yerde üretilebilir. Gelişmişlik seviyesi düşük ülkelerde bile üretimi mümkündür, çünkü karmaşık bir teknoloji gerektirmez.
- ii. Biyodizel, biyolojik olarak ayrışabilen ve çevreye zarar vermeyen bir yakıttır. Özellikle deniz araçlarında kullanılması, çevreye zarar verme riskini en aza indirir ve herhangi bir sızıntı hızla çözülerek çevreye adapte olur. Bu nedenle taşınması da daha güvenli bir şekilde yapılabilir.
- iii. Biyodizel, emisyonlarında karbon monoksit, partikül madde, yanmamış hidrokarbon ve aromatik bileşikler gibi kirletici maddelerin miktarını azaltır. Ayrıca kükürt içeriği neredeyse yoktur. Bu özellikleriyle çevre dostudur.
- iv. Biyodizel, sera etkisine neden olmaz. Kullanımıyla ortaya çıkan karbondioksitten daha fazlası, biyodizel için yetiştirilen bitkilerde tüketilir. Bu sayede karbondioksit döngüsü sağlanır.
- v. Parlama noktası motorine göre daha yüksek olan biyodizel, depolama ve taşıma işlemlerini daha güvenli hale getirir.
- vi. Biyodizel, motorlarda kullanıldığında herhangi bir değişiklik gerektirmez ve motorun yağlanması iyileştirir. Yağlama yağı kullanımında tasarruf sağlar.
- vii. Biyodizel üretimi sırasında ortaya çıkan yan ürünler, örneğin küspe kullanılabilir. Özellikle küspe, hayvancılığa destek sağlar.
- viii. Biyodizel üretimi, ekonomiye katkı sağlar. Çiftçiler, yağlı tohum üretimi yaparak gelir elde eder ve tarıma destek olur.

Biyodizelin Dezavantajları

Biyodizelin dizel motorlarda yakıt olarak kullanılmasının getirdiği bazı dezavantajlar bulunmaktadır. Bular;

- i. Biyodizel üretimi maliyetli olabilir. Normal motorine kıyasla daha pahalıdır ve sübvansiyonlarla desteklenmesi gerekebilir.

Ancak atık yağların kullanılması ve geri dönüşümü gibi faktörler düşünüldüğünde maliyetler düşebilir. Atıkların çevreye zarar vermesini önlemek için gereken ek işlemlerin maliyeti hesaba katıldığında neredeyse biyodizel üretimi bedavaya gelebilir.

- ii. Biyodizel, depolama aşamasında içinde bulunan bakteriler nedeniyle sorunlar yaşatabilir ve çevresel etkileşime neden olabilir. Bu sorunu engellemek için bir miktar motorin ilave edilerek çözüm bulunabilir, çünkü motorindeki katkılar bakteri oluşumunu engelleyebilir.
- iii. Biyodizel'in viskozitesi yüksektir. Bu, işlemlerin maliyetini artıran bir dezavantajdır. Ayrıca düşük donma noktaları, soğuk iklimlerde kullanımını zorlaştırır. B20 gibi daha yüksek biodizel karışımları, yeni proseslerle soğuk iklimlerde sorunsuz bir şekilde kullanılabilir. Ancak B20'nin üzerindeki oranlarda (B100 gibi), sorunlar devam edebilir.
- iv. Biyodizelin belirli bir kullanım ömrü vardır. Üretimden altı ay sonra etkileşim başlar ve en geç bir yıl içinde kullanılmalıdır. Bu sorunu çözmek için kimyasal katkılar kullanılabilir. Ancak bir yıldan sonra bozulma başlar.
- v. Biyodizelin ısı değeri düşüktür, bu da motorin kıyasla güç kaybına yol açabilir. Bu durumu telafi etmek için daha fazla yakıt tüketimi gerekebilir.
- vi. Azot oksit (NO) emisyonu motorine kıyasla daha yüksek olabilir. Ancak bu sorun, yanma sıcaklığının 1-3 °C geciktirilmesi veya katalitik konvertör kullanılmasıyla giderilebilir.

Biyodizel Standartları

Biyodizel ve motorin karışımlarının içerdikleri biyodizel oranına göre isimlendirme yapılmaktadır. Bu isimlendirmeler uluslararası standartlara ve belirli ülke standartlarına uygun olarak gerçekleştirilir (Bozbaş, 2008). Örneğin:

B5: %5 Biyodizel + %95 Motorin

B20: %20 Biyodizel + %80 Motorin

B100: %100 Biyodizel

Avrupa Birliği'nde EN 14214 ve EN 14213 standartları, ABD'de ise ASTM D 6751 standartları biyodizel için kabul edilen standartlardır. Ülkemizde ise EN standartları temel alınmıştır. Bu standartlar, biyodizelin kalite ve performans özelliklerini belirlemek ve kullanımını yönlendirmek amacıyla oluşturulmuştur. Standartlara uygunluk, biyodizelin güvenli ve etkili bir şekilde kullanılmasını sağlamak için önemlidir.

Biyodizel saf veya motorin ile belli oranlarda karıştırılarak yakıt olarak kullanılmaktadır. Yakıtların içindeki biyodizel oranına göre isimlendirme yapılır (Tüccar vd., 2019; Abdulvahitoğlu vd., 2008).

B5 : %5 Biyodizel + %95 Motorin

B20 : %20 Biyodizel + %80 Motorin

B20 : %20 Biyodizel + %80 Motorin

B100: %100 Biyodizel

Biyodizel için EN 14214 ve EN 14213 Avrupa birliği standartları ile ASTM D 6751 ABD standartları yürürlükte dir. Ülkemizde ise EN standartları temel alınmıştır. Bunlar;

- i. TS EN 14214: Oto biyodizel standartıdır. Bu standart, biyodizelin otomotiv sektöründe kullanımına yönelik kalite ve performans gereksinimlerini belirler. Oto biyodizel olarak adlandırılan biyodizel, dizel motorlu araçlarda kullanılmak üzere üretilir.
- ii. TS EN 14213: Yakıt biyodizel standartıdır. Bu standart, genel yakıt kullanımı için biyodizel kalite gereksinimlerini belirler. Yakıt biyodizel olarak adlandırılan biyodizel, çeşitli yakıt uygulamalarında kullanılmak üzere üretilir.

- iii. Her iki standart da biyodizelin üretiminde, kalitesinde ve kullanımında uyulması gereken spesifikasyonları belirler. Bu standartlara uygun biyodizel üretimi, yakıtın güvenli ve etkili bir şekilde kullanılmasını sağlar ve endüstri standartlarını karşılamaya yönelik bir güvence sunar.

Biyodizelin Özellikleri

Doğru, yağların yapısındaki yağ asitlerinin cinsi ve yüzde oranları, üretilen biyodizelin fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkiler. Özellikle doymamış yağ asidi oranı fazla olan yağlardan üretilen biyodizellerin bulutlanma noktası, akma noktası gibi yakıt özellikleri daha iyi olabilir.

Biyodizel yakıtların ısı değeri, yoğunluk ve viskozite gibi özellikleri genellikle dizel yakıtlarına çok yakındır. Bununla birlikte, biyodizel yakıtların yağlama özelliği genellikle daha iyidir ve Setan Sayısı (Cetane Number) ve parlama noktası değerleri daha yüksek olabilir. Ayrıca, biyodizel yakıtların daha az toksik olması da önemli bir avantajdır.

Ancak, biyodizel yakıtların dizel yakıtına göre daha yüksek bulutlanma ve akma noktalarına sahip olması bir dezavantaj olarak kabul edilir. Bu, düşük sıcaklıklarda biyodizelin katılaşabileceği ve yakıt akışının zorlaşabileceği anlamına gelir. Bu durum, soğuk iklim bölgelerinde biyodizel kullanımını kısıtlayabilir ve önlem alınmasını gerektirebilir.

Biyodizelin özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- i. Çevre dostudur: Biyodizel, daha az sera gazı emisyonu ve çevresel etkiye sahip olan bir yakıttır. Fosil yakıtlara kıyasla daha az karbondioksit ve kirletici madde salınımı sağlar.
- ii. Yenilenebilir hammaddelerden elde edilir: Biyodizel, bitkisel yağlar, hayvansal yağlar veya diğer biyokütle kaynaklarından elde edilen yenilenebilir bir yakıttır. Bu, sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelik bir alternatif oluşturur.

- iii. Atık bitkisel ve hayvansal yaşlardan elde edilebilir: Biyodizel üretimi için kullanılan ham maddeler arasında atık bitkisel yağlar, kullanılmış yağlar veya hayvansal yağlar gibi geri dönüştürülebilen atıklar da bulunur. Bu, atık yönetimi ve geri dönüşüm açısından önemli bir avantajdır.
- iv. Anti-toksik etkilidir: Biyodizel, düşük toksisiteye sahip bir yakıttır. Yanma sırasında toksik gaz emisyonu oluşturma riski düşüktür, bu da kullanıcılar ve çevre için daha güvenli bir seçenek sunar.
- v. Biyolojik olarak hızlı ve kolay bozulabilir: Biyodizel, biyolojik olarak hızlı bir şekilde parçalanabilir ve doğada çabucak bozunabilir. Bu, sızıntı veya atık durumunda çevresel etkilerinin daha az olmasını sağlar.
- vi. Kanserojen madde ve kükürt içermez: Biyodizel, kanserojen madde içermez ve düşük kükürt içeriği nedeniyle daha temiz bir yakıt seçeneğidir. Bu, hava kalitesinin iyileştirilmesine katkıda bulunur.
- vii. Yüksek alevlenme noktası ile kolayca depolanabilir, taşınabilir ve kullanılabilir: Biyodizel, yüksek alevlenme noktasına sahiptir, bu da daha güvenli bir şekilde depolanmasını, taşınmasını ve kullanılmasını sağlar.
- viii. Yağlayıcılık özelliği iyi seviyededir: Biyodizel, motorlarda iyi bir yağlayıcılık özelliğine sahiptir. Bu, motor parçalarının daha iyi korunmasına ve motor performansının iyileşmesine katkıda bulunur.
- ix. Motor ömrünü uzatır: Biyodizel, içerdiei yağ asitleri nedeniyle motorlarda daha az aşınma ve korozyona neden olur. Bu da motor ömrünü uzatabilir.
- x. Motor karakteristik değerlerinde iyileşme sağlar: Biyodizel, düşük kükürt içeriği ve daha yüksek yağlayıcılık özelliği sayesinde motorların çalışma verimliliğini artırabilir, daha düşük hava kirliliği sağlar ve daha az egzoz emisyonu üretir.

- xi. Kara ve deniz taşımacılığında kullanılabilir: Biyodizel, hem kara taşımacılığında (otomobiller, kamyonlar) hem de deniz taşımacılığında (gemiler) kullanılabilir.
- xii. Isıtma sistemleri ve jeneratörlerde kullanılabilir: Biyodizel, ısıtma sistemlerinde ve jeneratörlerde kullanılabilecek bir alternatif yakıt olarak da tercih edilebilir

Biyodizelin Motor Yakıtı Özellikleri

Biyodizel yakıtların özellikleri aşağıdaki maddeler halinde belirtilmiştir (Abdulvahitoğlu ve Aydın, 2012).

Isıl değer: Biyodizel yakıtların ısı değeri, dizel yakıtların ısı değerine çok yakındır. Bu, biyodizelin verimli bir enerji kaynağı olduğunu gösterir.

Yoğunluk: Biyodizel yakıtların yoğunluğu, dizel yakıtların yoğunluğuna benzerdir. Bu da biyodizelin depolanması, taşınması ve kullanılması açısından kolaylık sağlar.

Viskozite: Biyodizel yakıtların viskozite değerleri, dizel yakıtların viskozite değerlerine yakındır. Ancak, bazı biyodizel türlerinin viskozitesi daha yüksek olabilir. Bu, bazı durumlarda yakıtın akışkanlığını etkileyebilir.

Yağlama özelliği: Biyodizel yakıtların yağlama özelliği dizel yakıtlarına kıyasla daha iyidir. Bu, motor parçalarının daha iyi korunmasını ve aşınmanın azalmasını sağlar.

Setan Sayısı: Biyodizel yakıtların Setan Sayısı, dizel yakıtlarına göre genellikle daha yüksektir. Bu, biyodizelin daha kolay yanma özelliği olduğunu gösterir.

Parlama noktası: Biyodizel yakıtların parlama noktası, dizel yakıtlarına göre genellikle daha yüksektir. Bu, biyodizelin daha güvenli bir yakıt olduğunu ve daha yüksek bir yanma noktasına sahip olduğunu gösterir.

Toksisite: Biyodizel yakıtların toksisite düzeyi düşüktür. Dizel yakıtlarına kıyasla daha az toksik maddeler içerirler, bu da kullanıcılar ve çevre için daha güvenli bir seçenek olduğunu gösterir.

Bulutlanma ve akma noktası: Biyodizel yakıtların bulutlanma ve akma noktaları, dizel yakıtlarına göre genellikle daha yüksektir. Bu, biyodizelin düşük sıcaklıklarda donma veya akışkanlık sorunlarına neden olabileceğini gösterir.

Doymamış yağ asidi oranı: Biyodizel, doymamış yağ asidi oranı fazla olan yağlardan üretildiğinde bulutlanma ve akma noktası gibi yakıt özelliklerinde iyileşme sağlar. Bu, bazı biyodizel türlerinin daha iyi performans sergilediği anlamına gelir.

Biyodizel yakıtların genel olarak dizel yakıtlarla benzer özelliklere sahip olmasına rağmen, bazı avantajlara ve dezavantajlara sahiptir. Daha önceki bölümlerde açıklanmış olan bu avantaj ve dezavantajları, biyodizelin kullanım alanlarını belirlemede ve yakıt seçiminde dikkate alınmalıdır. Bu yüzden biyodizel yakıt özellikleri aşağıda başlıklar altında ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Akma Noktası

Akma noktası (Pour Point), bir yağ örneğinin hareket ettirilebildiği en düşük sıcaklığı ifade eder. Bu nokta, yağın viskozitesinin düşük olduğu ve akışkanlığının sağlandığı sıcaklığı gösterir. Akma noktası, yakıtların soğuk hava koşullarında filtrelene ve akışkanlık özelliklerini değerlendirmek için önemlidir.

Bulutlanma Noktası

Bulutlanma Noktası (CP), yakıtın soğutulduğunda içerisindeki mumun veya parafinin görsel olarak görünür hale geldiği sıcaklığı ifade eder. Bu nokta, yakıtın içerdiği parafin veya mum kristallerinin oluşmaya başladığı ve bulutlanma görüntüsünün oluştuğu sıcaklık olarak tanımlanabilir.

Biyodizel, geleneksel dizel yakıtlara kıyasla genellikle daha yüksek CP ve PP değerlerine sahiptir. Bu, biyodizelin daha düşük sıcaklıkta parafin kristallerinin oluşmaya başladığı ve jelleşme eğiliminin daha belirgin olduğu anlamına gelir. Bu nedenle, biyodizelin düşük sıcaklık performansı, özellikle soğuk iklimlerde, geleneksel dizel yakıtlardan farklı olabilir. Biyodizel, geleneksel dizele kıyasla daha yüksek CP ve PP'ye sahiptir. Esterler, dizel yakıtlardan 15–25 °C daha yüksek CP ve PP'ye sahiptir (Mendez, 2006).

Soğuk Filtre Tıkanma Noktası

Bir yakıtın Soğuk Filtre Tıkanma Noktası (CFPP), soğuk hava performansını yansıtır. Düşük çalışma sıcaklığında yakıt kalınlaşabilir ve yakıt hatlarının, yakıt pompalarının ve enjektörlerin performansını etkileyerek düzgün şekilde akmayabilir. CFPP, biyodizel ve motorin için bulutlanma noktasından daha iyi bir korelasyona sahip olan yakıtın filtrelenebilirlik sınırını tanımlar. normalde akma noktası veya CFFP olarak belirtilir.

Soğuk Filtre Tıkanma Noktası (CFPP), bir yakıtın soğuk hava koşullarında filtrelene yeteneğini tanımlayan bir parametredir (Mendez, 2006). Düşük sıcaklıklarda, bazı yakıtlar kalınlaşabilir ve bu da yakıtın akışını engelleyebilir. Bu durum, yakıt hatlarının, yakıt pompalarının ve enjektörlerin performansını olumsuz etkileyerek motorun düzgün şekilde çalışmasını engelleyebilir.

CFPP değeri, yakıtın belirli bir sıcaklıkta filtrelenebilirliğini gösterir. CFPP değeri ne kadar düşükse, yakıtın daha düşük sıcaklıklarda filtrelene yeteneği o kadar iyidir. Bu değer, biyodizel ve motorin gibi yakıtlar için bulutlanma noktasından daha güvenilir bir gösterge olarak kabul edilir. Akış noktası (Flow Point) veya CFFP (Cold Filter Plugging Point) olarak da adlandırılabilir.

CFPP değeri, yakıtın düşük sıcaklık performansını değerlendirmek ve motorun soğuk hava koşullarında sorunsuz çalışmasını sağlamak için önemlidir. Bu parametre, yakıtın filtrelene ve akış özelliklerini belirleyerek yakıt sistemlerinin

tıkanmasını önlemeye yardımcı olur. Biyodizel ve motorin için belirli CFPP değerleri genellikle üretici veya standartlara bağlı olarak belirlenir ve bu değerler, yakıtın soğuk hava performansını değerlendirmek için önemlidir.

Parlama Noktası

Sıvı yakıtın üst kısmında yanabilir karışımın oluştuğu en düşük sıcaklıktır. Parlama noktası yakıtın tutuşma özelliğine bağlı olduğu kadar, yakıtın buhar basıncına da bağlıdır. Parlama noktası kapalı bir kap içerisinde karıştırılan yakıtın yüzeyinde belirli sıcaklık aralıklarında alev gezdirilerek tespit edilir. Geçici bir alevlenmenin görüldüğü sıcaklık parlama noktasıdır.

Parlama noktası, yakıt buharlarının dışarıdan sağlanan ateşleme ile tutuşabileceği sıcaklıktır. Depolama ve dağıtım sistemlerinde yangın tehlikesinin belirlenmesi ve sonrasında alınacak güvenlik önlemleri açısından önemlidir. Bu amaca yönelik tehlike sınıflandırmasında dizel yakıt, daha az tehlikeli olan AIII- olarak derecelendirilmiştir ve bu nedenle parlama noktası 55°C'nin üzerinde olmalıdır. Dizel yakıtı üretilirken, parlama noktası aynı zamanda oldukça uçucu bileşenlerin kullanımını da kısıtlar (Van Basshuysen ve Schäfer, 2004).

Parlama noktası parametresi, bitmiş yakıtta kalan reaksiyona girmemiş alkol seviyesini sınırlamak için kullanılır. Parlama noktasının, yakıt taşıma ve depolama ile ilgili yasal gereklilikler ve güvenlik önlemleri ile de önemli bir bağlantısı vardır. Normalde sigorta ve yangın düzenlemelerini karşılamak için belirtilir. Biyodizel için parlama noktası spesifikasyonunun minimum 100°C olması amaçlanmıştır. Tipik değerler 160°C'nin üzerindedir (Mendez, 2006).

Isıl Değer

Yanma sonucu oluşan ürünlerin, yanma öncesi referans bir sıcaklığa göre toplam entalpilerinin yakıt kütlesine bölünmesi ile

elde edilen değere ısııl değeri denir. Yakıtların ısııl değeri genellikle birim kütleinin enerji ile verilmektedir (kJ/kg veya kcal/kg).

Viskozite

Viskozite, bir sıvının akışkanlığını ve akmaya karşı direncini ifade eder. Bir sıvının viskozitesi ne kadar yüksekse, akması için daha fazla kuvvet uygulanması gerekecektir. Viskozite, özellikle viskozitedeki artışın yakıtın akışkanlığını etkilediği düşük sıcaklıklarda, yakıt enjeksiyon ekipmanının çalışmasını etkilediği için biyodizelin en önemli özelliğidir. Biyodizel, dizel yakıtlara yakın bir viskoziteye sahiptir. Biyodizelin daha yüksek viskozite aralığı, namlu/piston sızıntısını azaltmaya ve motorlarda enjektör verimliliğini artırmaya yardımcı olur. Farklı biyodizel ile No.2 dizel yakıt karışımları için 20–100 °C sıcaklık aralığında viskozite ölçümleri yapılmıştır. Distilatın viskozitesi, 38 °C'de 10,2 mm²/s idi; bu, No. 2 Dizel yakıtı için ASTM spesifikasyonundan (1,9–4,1 mm²/s) daha yüksek, ancak soya fasulyesi yağının (32,6 mm²/s) oldukça altında.

Dizel yakıtın viskozitesi veya iç sürtünmesi genellikle yoğunlukla birlikte artar. Yakıt enjeksiyon sisteminin kayar parçaları arasında yeterli yağlama olmasını sağlamak için ayarlanan minimum değerin altına düşmesi engellenmelidir. Çok yüksekse, sağlanan enjeksiyon basıncında damlacık boyutu yükselir. Bu, daha zayıf karışım oluşumuna ve dolayısıyla enerji tüketimine, daha düşük performansa ve daha yüksek kurum emisyonlarına neden olur. Viskozite, sıcaklık arttıkça başlangıçta hızlı bir şekilde artar ve ardından daha yavaş bir oranda kademeli olarak azalır (Van Basshuysen ve Schäfer, 2004).

Bazı motorlar için enjeksiyon pompası ve enjektör sızıntısından kaynaklanan güç kaybı ve ayrıca kükürt emisyonları nedeniyle minimum bir viskozite belirtmek avantajlıdır olabilir. Öte yandan izin verilen maksimum viskozite, motor tasarımı ve boyutu ve enjeksiyon sisteminin özellikleri ile ilgili hususlarla sınırlıdır.

Biyodizelin viskozitesi için üst sınır 40 °C'de 5,0 mm²/s ve minimum 40 °C'de 3,5 mm²/s'dir (Mendez, 2006).

Su ve Çökelti (Sediment)

Yakıt içerisindeki su ve nem filtrelerde tıkanmaya, enjektör ve yakıt pompası parçalarının zarar görmesine neden olmaktadır. Ayrıca yakıt içerisindeki yabancı maddeler filtrelerde ve enjektörlerde tıkanmaya sebep olur. Bunu önlemek amacıyla yakıtın küçük gözenekli filtrelerde bir veya iki kademedede süzöldükten sonra pompa ve enjektörlere gönderilmesi gerekir.

Distilasyon Eğrisi

Distilasyon eğrisi yakıt örneğinin ısıtılıp buharlaştırmak suretiyle kademeli (fraksiyonlu) olarak distile edilmesi ile elde edilir. Yakıtın distilasyon eğrisi belirlenirken soğutucudan ilk damlanın elde edildiği sıcaklık, yakıtın her bir %10'luk kısmının elde edildiği sıcaklıklar ve en son sıcaklık değerleri önemlidir. Dizel yakıtı yüzlerce değişik bileşikten oluştuğu için distilasyon eğrisi yakıtın kompozisyonu hakkında önemli bilgi vermektedir.

Buharlaşıma özelliği iyi olan yakıt ile motor ilk hareke daha kolay geçer ve daha az is emisyonları oluşur. Dizel yakıtından istenen buharlaşma özellikleri, motorun büyüklüğüne, istenen güce, atmosferik koşullara, motor devrine ve ilk harekete geçiş durumuna göre değişim gösterir. Ağır dizel yakıtları ısıl değerlerinin yüksek olmasından dolayı en iyi yakıt ekonomisini, daha iyi buharlaşan, hafif dizel yakıtları ise daha iyi motor performansı sağlar.

Kül

Dizel yakıtı içerisinde bulunan katı parçacıklar ve çözünmüş haldeki metalik sabunlar, kül oluşumuna neden olabilir. Katı parçacıklar, yakıtın içerisinde bulunan aşındırıcı katı maddelerdir. Bunlar, yakıtın pompalanması ve enjektörlerin çalışması sırasında

mekanik aşınmaya neden olabilir. Bu aşınma, motor parçalarının zamanla zarar görmesine ve aşınmaya bağlı sorunlara yol açabilir. Ayrıca, katı parçacıkların birikmesiyle motor içinde depozitler oluşabilir, bu da performansı ve verimliliği olumsuz etkileyebilir.

Çözünmüş haldeki metalik sabunlar ise yakıtın içindeki metal tuzlarıdır. Bu tuzlar, yakıtın yanması sırasında yanma ürünleriyle birleşerek motor parçaları üzerinde birikintilere neden olabilir. Bu birikintiler, özellikle yanma odasında ve egzoz sistemlerinde oluşabilir. Kül birikintileri, motor parçalarının performansını etkileyebilir, yakıtın yanma verimliliğini düşürebilir ve egzoz emisyonlarını artırabilir. Kül oluşumu, yakıtın kalitesine, kullanım koşullarına ve motorun bakım durumuna bağlı olarak değişebilir. Yakıtın içerdiği katı parçacıkların ve metalik sabunların miktarını düşürmek için yakıtın uygun şekilde filtrelenmesi ve artırılması önemlidir. Ayrıca, düzenli bakım ve temizlik işlemleriyle birlikte kaliteli yakıt kullanımı, kül oluşumunu azaltabilir ve motorun daha sağlıklı çalışmasını sağlayabilir.

Kükürt

Dizel yakıtı içerisindeki kükürt miktarı egzoz emisyonlarını olumsuz yönde etkiler. Kükürt miktarı, partikül ve SO_x emisyonlarını artırır. Ayrıca yakıt içerisindeki kükürt yanma esnasında sülfürük aside dönüşebilmektedir. Sülfürik asit, motor parçaları için aşındırıcı etkiye sahip olabilen ve korozyona neden olabilen zararlı bir maddedir. Sülfürik asit, dizel yakıtlarında bulunan sülfür bileşiklerinin yanmasıyla oluşabilir. Dikkate alınması gereken önemli bir değer olan kükürt, esasen dizel motorlarda temel bir özellik olduğu ve ayrıca asit yağmuru ölçümleriyle çevre üzerindeki olumsuz etkisi nedeniyle kükürt içeriğidir. Bu nedenle, ABD ve Avrupa'da mevzuat, motorin kükürt içeriğini sıfıra yakın seviyelerde almaya çalışmaktadır.

Biyodizel kullanımı ile kükürt emisyonu üretilmez. Kükürt içeriğinin azaltılması yakıtın yağlama özelliğini de azaltır. Bu nedenle, petrol şirketleri motorine bazı kimyasal ve sentetik katkıları

eklemek zorundadır. Sülfür içermediği ve kayganlığı artırmaya yardımcı olduğu için biyodizelin karıştırılması yağlayıcılığa yardımcı olabilir.

Kükürt, sera etkisini azaltmak ve diğer çevresel nedenlerle uluslararası standartlar tarafından son derece ciddi olarak kontrol edilmektedir. Bu nedenle, kükürtlü yakıt, emisyon kontrol sistemlerinin performansını da etkileyebilir. Öte yandan, kükürt içeriğinin motor aşınması ve birikintileri üzerindeki etkisinin önemi oldukça değişken görünmektedir ve büyük ölçüde çalışma koşullarına bağlıdır (Mendez,2006).

Bakır Şerit Korozyon Testi

Bu test dizel yakıtının, yakıt sisteminin bakır, bronz ve pirinçten oluşan parçaları üzerindeki etkisini araştırmak için yapılmaktadır. ASTM D 130'e göre yakıtın korozyon etkisini belirlemek için parlatılmış bakır şerit, 3 saat süreyle 50 °C sıcaklıktaki yakıt içerisinde bekletilir. Daha sonra çözücü (solvent) ile yıkandıktan sonra yüzeydeki kararma ve korozyon miktarı karşılaştırma yöntemi ile belirlenir. Bakır şerit korozyon testi, pirinç ve bronz gibi bakır alaşımlarından yapılmış yakıt sistemi bileşenleriyle olası uyumluluk sorunlarını gösterir. Belirtilen sınır, motorin ile aynıdır (Abdulahitoğlu, 2009). B 100 için, bir test başarısızlığının en muhtemel kaynağı, ek bir spesifikasyona göre belirlenen aşırı serbest yağ asitleri olacaktır (Van Gerpen, 2004).

Bakır şerit korozyon testi, yakıt sistemlerinde kullanılan bakır alaşımlı bileşenlerin yakıtla uyumluluğunu değerlendirmek için kullanılan bir test yöntemidir. Bu test, yakıtın bakır yüzeylerle teması sonucunda oluşabilecek korozyonun derecesini belirlemek amacıyla yapılır.

Belirtilen sınıra göre, biyodizel (B100) için bakır şerit korozyon testi, motorin ile aynı sınırlar ve kriterlere tabidir. Bu, biyodizel yakıtının, bakır alaşımlı bileşenlerle kullanıldığında belirli bir korozyon düzeyini aşmaması gerektiği anlamına gelir. B100 için bir bakır şerit korozyon testinin başarısız olması durumunda, en

muhtemel kaynak aşırı serbest yağ asitleridir. Serbest yağ asitleri, biyodizel üretimi sırasında kullanılan yağlardaki trigliseritlerin hidrolizi sonucu oluşabilir. Bu serbest yağ asitleri, bakır bileşenlerle temas ettiğinde korozyona neden olabilir. Bu nedenle, biyodizel üretimi sürecinde serbest yağ asitlerinin düşük seviyelerde kontrol edilmesi önemlidir. Böylece bakır şerit korozyon testi başarılı olabilir ve uyumluluk sorunları önlenmiş olur.

Setan Sayısı

Dizel yakıtının tutuşma meylinin ölçüsü olarak Setan Sayısı kullanılmaktadır. Setan Sayısı, bir yakıtın yanma özelliklerini belirleyen önemli bir parametredir. Setan Sayısı, yakıtın tutuşma özelliğini ve yanma hızını etkiler. Setan Sayısı yükseldikçe, yakıtın tutuşma gecikmesi süresi kısalır. Bu da motor silindirindeki yakıtın daha erken alev almasına ve yanma sürecinin hızlanmasına neden olur. Tutuşma gecikmesi süresinin kısalmasıyla birlikte, yanma odasında biriken yakıt miktarı da azalır.

Yakıt miktarının azalması, ani yanma safhasında daha kontrollü bir yanma gerçekleşmesini sağlar. Bu da basınç artış hızının daha düşük olmasına ve yanma odasındaki ani basınç artışının azalmasına yol açar. Bu durum, motorun daha stabil bir şekilde çalışmasına ve yanma işleminin daha düzenli ve etkin olmasına katkı sağlar.

Dolayısıyla, yüksek Setan Sayısı, yanma sürecinin daha iyi kontrol edilmesine yardımcı olur ve motor performansını olumlu yönde etkiler. Setan sayısı, yakıtın tutuşma ve yanma kalitesi özelliklerinin bir ölçüsüdür (Anonim, 2023a; Abdulvahitoğlu, 2009). Setan sayısı, tutuşmanın ne kadar kolay gerçekleştiğini ve yanmanın pürüzsüzlüğünü ölçer. Setan sayısı ne kadar yüksek olursa tutuşma özellikleri de o kadar iyi olur. Setan sayısı; Yanma, stabilite, sürülebilirlik, beyaz duman, gürültü ve CO ve HC emisyonları gibi bir dizi motor performansını etkiler. Biyodizel, geleneksel dizel yakıttan daha yüksek Setan sayısına sahiptir. Bu da daha yüksek yanma verimliliği ile sonuçlanır. Setan sayısı gereklilikleri motor

tasarımına, boyutuna, hızın doğasına, yük değişimlerine, çalıştırma ve atmosferik koşullara bağlı olarak değişir (Mendez, 2006).

Yoğunluk

Yoğunluk yakıtların önemli bir özelliğidir. Yoğunluk, birim hacim başına düşen kütleyi ifade eder ve enerji içeriğiyle ilişkilidir. Değişmeyen bir enjekte edilen yakıt miktarı göz önüne alındığında, motora sağlanan enerji yoğunlukla birlikte artar ve bu da motor performansını artırır. Ancak egzoz emisyonları ve özellikle partiküller, daha zengin karışım nedeniyle tam yük altında artar. Öte yandan, hacimsel yakıt yoğunluğu azaldıkça tüketim artar (Van Basshuysen ve Schäfer, 2004). Yoğunluk, biyodizelin bir diğer önemli özelliğidir. Birim hacim sıvının ağırlığıdır. Özgül ağırlık, bir sıvının yoğunluğunun suyun yoğunluğuna oranıdır. Biyodizellerin özgül ağırlığı 0,87 ile 0,89 arasında değişmektedir. Yakıt enjeksiyon ekipmanı bir hacim ölçüm sistemi üzerinde çalışır, bu nedenle biyodizel için daha yüksek bir yoğunluk, biraz daha büyük bir yakıt kütlesinin verilmesiyle sonuçlanır (Mendez, 2006). Biyodizel, özgül ağırlığı (yoğunluğu), suyun yoğunluğuna oranla 0,87 ile 0,89 arasında değişen birim hacim sıvı ağırlığını ifade eder. Biyodizelin yoğunluğu, EN14214 spesifikasyonlarına uygun olduğunda genellikle 0,86 ile 0,90 g/cm³ arasında değişir. Bu değerler biyodizelin tipik yoğunluk aralığıdır.

Karbon Kalıntısı

Karbon kalıntısı, yanmadan sonra ne kadar artık karbon kaldığını gösteren bir ölçüdür. Test temel olarak yakıtın oksijen yokluğunda yüksek bir sıcaklığa ısıtılmasını içerir. Yakıtın çoğu buharlaşacak ve dışarı atılacaktır, ancak bir kısmı ayrışabilir ve sert karbonlu tortulara pirolize olabilir. Bu, dizel motorlarda karbon kalıntılarının tıkanma olasılığı nedeniyle özellikle önemlidir. Karbon kalıntısının yakıt enjektörleri tıkanma olasılığı vardır (Van Gerpen, 2004).

Fosfor İçeriği

Fosforun, son arıtma sistemlerinin amaçlandığı gibi egzoz emisyonlarını azaltma kabiliyetine zarar verdiği gösterilmiştir. Fosforun etkisi kümülatiftir. Bu nedenle, bir motor tarafından tüketilen önemli miktardaki yakıt üzerinde çok düşük kirlilik seviyeleri, son işlem sisteminin beklenmedik bir şekilde bozulmasına neden olabilir (Abdolvahitoğlu, 2009). Fosfor, egzoz emisyonlarını kontrol etmek için kullanılan son arıtma sistemlerinin etkinliğini azaltabilen bir elementtir. Bu nedenle, fosfor içeriği yüksek yakıtların kullanılması durumunda, egzoz emisyonlarının kontrolünde sorunlar ortaya çıkabilir.

Fosforun etkisi kümülatiftir, yani zamanla birikebilir. Bir motor tarafından tüketilen yakıtın düşük kirlilik seviyelerine sahip olması, başlangıçta sorun yaratmayabilir, ancak zamanla fosfor birikimi son arıtma sistemini bozabilir.

Son arıtma sistemleri, genellikle egzoz gazlarında bulunan zararlı bileşikleri (rneğin azot oksitlerini) azaltmak için kullanılır. Bu sistemlerde, egzoz gazlarına özel katalitik malzemeler ve filtreler kullanılır. Fosfor, bu katalitik malzemelerin etkinliğini azaltabilir veya zarar verebilir. Fosfor, katalizör yüzeylerine tutunabilir ve reaksiyonlarda engelleyici bir etki gösterebilir. Bu nedenle, fosfor içeriği yüksek yakıtların kullanılması durumunda, son arıtma sistemleri bozulabilir ve egzoz emisyonlarının kontrolünde başarısızlık yaşanabilir. Yakıt kalitesi standartları, fosfor içeriğini sınırlayarak bu tür sorunları önlemeye çalışır. Fosforun etkisi egzoz emisyonlarının azaltılması için kullanılan son arıtma sistemlerini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, yakıt üreticileri ve kullanıcıları, düşük fosfor içeriğine sahip yakıtları tercih etmeli ve yakıt kalitesi standartlarına uyum sağlamalıdır. TS EN 14214 biyodizel standardı aşağıda izelge6.'da, bitkisel yağların yakıt özellikleri ise izelge 7.'de gösterilmiştir.

Çizelge 6. Biyodizel standartları (Abdolvahitoğlu, 2009)

Özellik	Birim	Maks.	Min.	Test Metodu
Ester muhtevası	% (kütle)	-	96,5	EN 14103
Yoğunluk (15 C de)	Kg/m ³	900	860	EN ISO 12185
Viskozite (40 C de)	mm ² /s	5,00	3,50	EN ISO 3104
Parlama Noktası	C de	-	120	EN ISO 3679
Kükürt muhtevası	mg/kg	10,0	-	EN ISO 20846
Karbon Kalıntısı (%10 damıtma kalıntısında)	%(m/m)	0,3		EN ISO 10370
Setan Sayısı		-	51	EN ISO 5165
Sülfatlanmış Kül Muhtevası	mg/kg	0,02		ISO 3987
Su Muhtevası	mg/kg	500		EN ISO 12937
Toplam Kirlilik	mg/kg	24		EN 12662
Bakır Şerit Korozyon (50 C de 3 saat)	derece	1		EN ISO 2160
Oksidasyon Kararlılığı, 110 C de	h	6		EN 14112
Asit Sayısı	mg KOH/g	0,5		EN 14104
İyot Sayısı	gr iyot/100 g	120		EN 14111
Linolenik Asit Metil Ester	% (kütle)	12		EN 14103
Çoklu Doymamış (>=çift bağ) metil ester	% (kütle)	1		
Metanol muhtevası	% (kütle)	0,2		EN 14110
Monoglisericit muhtevası	% (kütle)	0,8		EN 14105
Diglisericit muhtevası	% (kütle)	0,2		EN 14105
Triglisericit muhtevası	% (kütle)	0,2		EN 14105
Serbest gliserol	% (kütle)	0,02		EN 14105
Toplam gliserol	% (kütle)	0,25		EN 14105
Grup I metaller (Na+K)	mg/kg	5		EN 14108
Grup II metaller (Ca+Mg)	mg/kg	5		EN 14109
Fosfor muhtevası	mg/kg	10		EN 14107

Çizelge 7. bitkisel yağların yakıt özellikleri (Murugesan vd., 2008)

<i>Bitkisel Yağ</i>	<i>Kinematik Viskozite 38°C (mm²/s)</i>	<i>Setan Sayısı</i>	<i>Isıl Değer (Mj/kg)</i>	<i>Bulutlanma Noktası °C</i>	<i>Akma Noktası °C</i>	<i>Parlama Noktası °C</i>	<i>Yoğunluk (kg/l)</i>
<i>Mısır</i>	34,9	37,6	39,5	-1,1	-40	277	0,9095
<i>Pamuk</i>	33,5	41,8	39,5	1,7	-15	234	0,9148
<i>Keten</i>	27,2	34,6	39,3	1,7	-15	241	0,9236
<i>Fıstık</i>	39,6	41,8	39,8	12,8	-6,7	271	0,9026
<i>Kanola</i>	37	37,6	39,7	-3,9	-31,7	246	0,9115
<i>Aspir</i>	31,3	41,3	39,5	18,3	-6,7	260	0,9144
<i>Susam</i>	35,5	40,2	39,3	-3,9	-9,4	260	0,9133
<i>Soya</i>	32,6	37,9	39,6	-3,9	-12,2	254	0,9138
<i>Ayçiçeği</i>	33,9	37,1	39,6	7,2	-15,0	274	0,9161
<i>Palm</i>	39,6	42	-	31	-	267	0,918

Biyodizel Emisyonları

Biyodizel dizel motorlarda kullanıldığı zaman motorinden göre daha temiz egzoz çıktısı vermektedir. Değişik yöntemler ile viskozitesi azaltan yağların egzoz gazı kirlilik değerleri farklıdır. Ama bu değerlerin genelde olumlu olduğu görülmüştür. Motorin ile karıştırılarak kullanımları esnasında da is emisyonların da azalma olmaktadır.

Emisyon Türleri: Emisyon etki analizinin kapsamı beş tür emisyon olarak oluşmaktadır. Bunlar;

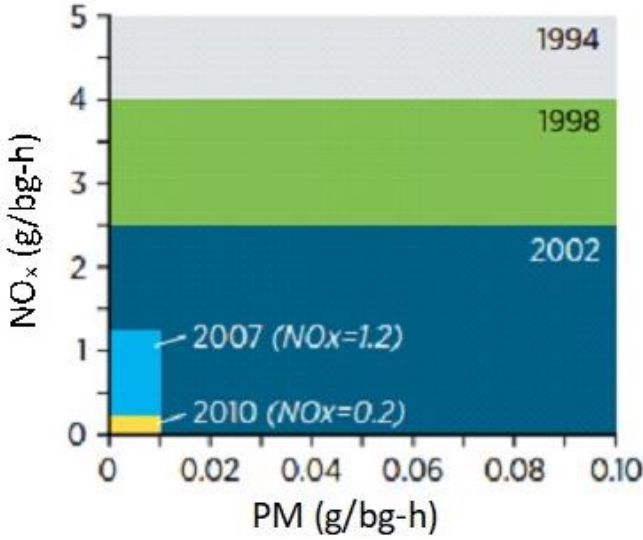
- i. NO_x (azot oksitler),
- ii. PM (parçacıklı madde),
- iii. HC (hidrokarbonlar),
- iv. CO (karbon monoksit) ve
- v. CO₂ (karbon dioksit)'tir. CO₂ tehlikeli bir hava toksini olmasa da, küresel ısınmaya neden olan bir sera gazı emisyonu olarak kabul edilir (Strong vd., 2009). Bunlar aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Nitrojen oksitler (NO_x)

Nitrojen oksitler (NO_x), nitrik oksit (NO), nitroz oksit (N₂O), nitratlar (NO₃ –) ve nitrojen dioksit (NO₂) dahil olmak üzere değişen miktarlarda nitrojen ve oksijen içeren bir grup yüksek oranda reaktif gazın genel adıdır. Sıcak, durgun hava ve güneş ışığı varlığında NO_x ve uçucu organik bileşikler ozona dönüşür. NO_x, zararlı sağlık ve çevresel etkileri nedeniyle havadaki tehlikeli toksinler olarak sınıflandırılır. ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA), NO_x'in yer seviyesinde ozon, asit yağmuru, solunum yolu hastalığı ve küresel ısınmanın ana nedeni olduğunu kaydetmiştir (Strong vd., 2009)).

Bazı araştırmalar B20 karışımlarının nitrojen oksit (NO_x) emisyonları üzerinde çelişkili sonuçlar gösterebileceğini ortaya

koymuştur. Ancak, yeni emisyon kontrol teknolojileri ve ilerlemelerle birlikte, dizel yakıtların 2010 modelinden itibaren temiz yanması sağlanmıştır. Bu nedenle, 2010 model ve daha yeni araçlarda B20 ve üzeri biyodizel karışımlarıyla ilgili nitrojen oksit emisyonlarıyla ilgili bir sorun artık bulunmamaktadır Azot oksit ve partikül madde emisyon değerlerinin yıllar içinde değişimi şekil 9.'da gösterilmiştir (Anonimb, 2023).



şekil 9. Azot oksit ve partikül madde emisyon değerlerinin yıllar içinde değişimi.

Partikül Madde (PM)

Partikül madde (PM), çeşitli boyutlardaki partiküllerden oluşan bir tür hava kirliliği için kullanılan genel bir terimdir. PM problemlidir çünkü astım gibi solunum problemlerini yol açabilir. Sağlık otoriterleri, yüksek konsantrasyonların ve/veya spesifik partikül türlerinin insan sağlığı için ciddi bir tehlike oluşturduğunu bildirmektedir.

İki tür düzenlenmiş PM vardır: PM2.5 ve PM10. PM2.5, çapı 2,5 mikrometre veya daha küçük ve PM10 ise, çapı 10 mikrometre veya daha küçük olan parçacıklı bir maddedir. Hem PM2.5 hem de PM10, içten yanmalı motorların yan ürünleridir. PM2.5 ve PM10 arasında iki büyük fark vardır. İlk olarak, boyutu daha büyük olan PM10 daha büyük sağlık risklerine katkıda bulunur çünkü daha büyük parçacıklar da solunabilir ve solunum sisteminde birikebilir. İkincisi, PM2.5'in aksine PM10, SO₂, NO_x ve uçucu organik bileşikler (VOC'ler) gibi kimyasallarla kolayca reaksiyona girer. Bu kimyasal reaksiyonların tümü dumanla sonuçlanabilir (Strong vd., 2009).

Hidrokarbonlar (HC)

Hidrokarbonlar (HC) "havaya yoğunlukla volkanlardan, orman yangınlarından, yanan kömürden ve otomobil egzozundan salınan maddeler olarak girer". 1999'da yapılan bir EPA çalışması, karayolu taşıtı kaynaklarının toplam HC emisyonunun yüzde 29'undan sorumlu olduğunu tahmin ediyor.

Özel hidrokarbonlar (C1-C22) olarak ölçülen iki tür düzenlenmiş HC ve aromatik hidrokarbonlar (PAH) olarak adlandırılabilen veya şüphelenilen kanserojen bileşiklerin bir alt kümesini serbest bırakır. "Biyodizel Kademe I Sağlık Etkileri" başlıklı bir sunumda, C1 ile C12 emisyon oranı ile ozonun potansiyel azalması arasında bir korelasyon kurulmuş ve ayrıca HC'nin kanserojen olduğunu belirtilmiştir.

Karbonmonoksit (CO)

Karbon monoksit (CO), gaz, yağ, kerosen, odun veya odun kömürü gibi herhangi bir karbon yakıtı yandığında eksik yanmadan üretilir. Birçok gazın aksine CO'nun kokusu, rengi veya tadı yoktur ve ciltte tahrişe neden olmaz. Ancak, kırmızı kan hücreleri kendilerini CO'ya oksijenden daha hızlı bir şekilde bağlayabilir. Havada çok miktarda CO varsa, kırmızı kan hücresi oksijeni CO ile değiştirebilir ve olası doku hasarına, karbon monoksit

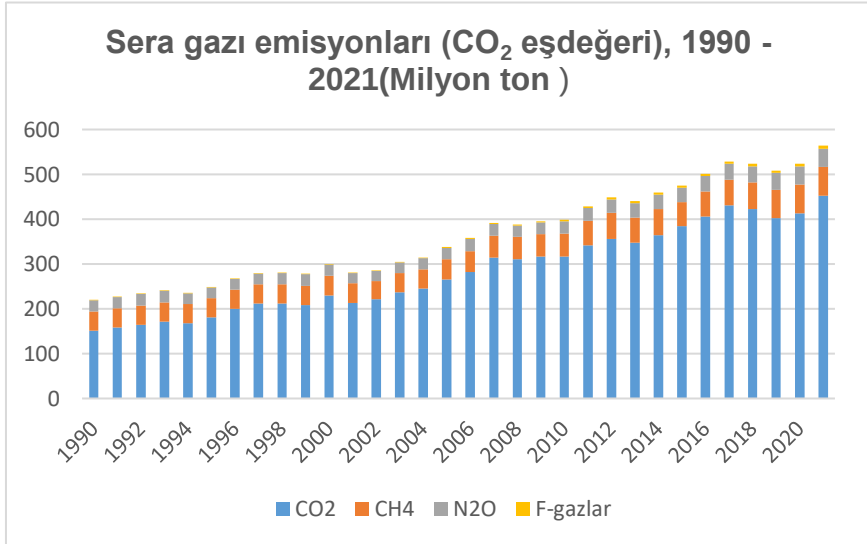
zehirlenmesine veya ölüme yol açabilir. CO seviyeleri yükseldikçe ve milyonda 70 parçanın (ppm) üzerinde kaldıkça semptomlar daha belirgin hale gelebilir (baş ağrısı, yorgunluk, mide bulantısı). CO seviyeleri 150 ila 200 ppm'nin üzerine çıktıkça yönelim bozukluğu, bilinç kaybı ve ölüm mümkündür (Strong vd., 2009).

Karbondioksit (CO₂)

Karbondioksit, küresel ısınmayla bağlantılı doğal olarak oluşan bir gazdır.

Ayrıca katı atık, fosil yakıtlar (petrol, doğal gaz ve kömür) ve odun ve odun ürünlerinin yakılması gibi insan faaliyetleriyle atmosfere salınır. Karbon dioksit kendi başına bir toksin olarak kabul edilmez. Ancak, küresel iklim üzerindeki herhangi bir etki sağlık sorunlarına neden olabilir (Strong vd., 2009).

TÜİK verilerine göre Türkiye'nin sera gazı salınım emisyonları 1990-2021 yılları arası baz alınarak grafik şeklinde aşağıda ifade edilmiştir. Bu noktada görünen veriler sera gazı salınım emisyonlarını düşürmek için alternatif yakıtlara geçmemiz gerektirir.



Şekil 10. Türkiye sera gazı emisyonları CO2 eşdeğeri (TÜİK, 2023b)

Dünyada ve Türkiye’de Biyodizel

Rudolf Diesel (1858-1913), dizel motorun mucidi olarak tanınır. 10 Ağustos 1893 tarihinde Ausburg, Almanya’da dizel motorun denemesini gerçekleştirmiştir. Daha sonra 1898 yılında Paris Dünya Fuarı’nda, yerfıstığı yağını yakıt olarak kullanan motorunu sergilemiştir. Rudolf Diesel, 1911 yılında bitkisel yağların motor yakıtı olarak kullanılmasının ülkelerin tarımının gelişimine büyük bir katkı sağlayabileceğini belirtmiştir. Bu tarihten itibaren özellikle dünya ekonomik buhranları, savaş dönemleri ve petrol krizi gibi zamanlarda biyodizel üretimi daha fazla gündeme gelmiş ve günümüze kadar gelinmiştir.

Dünyada Biyodizel

Dünyada biyodizelin gerçek anlamda yakıt olarak düşünülmesi, 1937 den sonra İkinci Dünya Savaşı yıllarına rastlamaktadır. İkinci Dünya Savaşı sonrasında çevresel faktörlerin ve biyodizelin çevreye olan katkısının önemi anlaşıldıkça, biyodizel popülerlik kazanmıştır. Örneğin İsveç, otomobil ve motor fabrikalarına biyoyakıt kullanımıyla ilgili zamana yayılmış yaptırımlar getiren öncü bir ülkedir. Brezilya, akaryakıt ihtiyacının %80’ini biyoyakıtlardan karşılayabilme başarısı göstermiş ve hatta ABD ile biyoetanol ihracatı için anlaşma yapmıştır. Çin ve Hindistan, biyoyakıtlar konusunda tesisleşmeye başlamış ve bu alanda önemli adımlar atmıştır.

Tüm bu gelişmeler, biyodizelin ve diğer biyoyakıtların çevresel avantajları ve enerji bağımsızlığı sağlama potansiyeli nedeniyle dünya genelinde önemli bir ilgi ve popülerlik kazanmasına katkıda bulunmuştur.

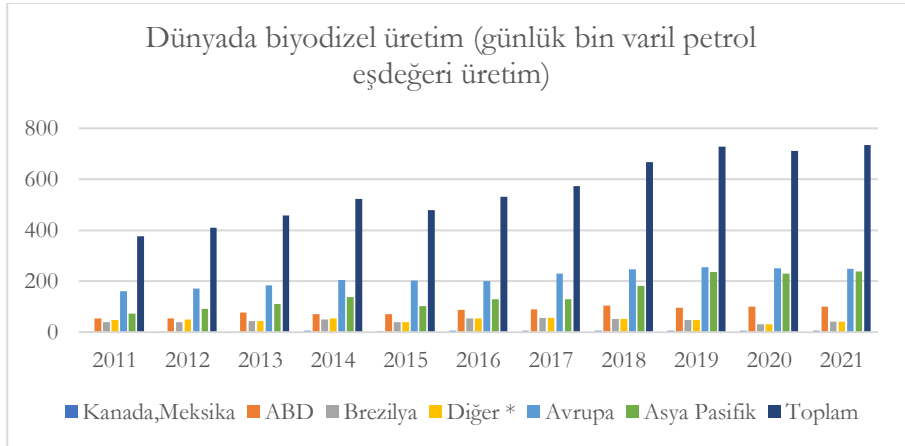
Birçok ülke uyguladıkları çeşitli düzenlemelerle biyodizel kullanımına geçmiştir. Avrupa, Asya ve Pasifik’te biyodizel en popüler yakıtken, etanol ise Kuzey ve Güney Amerika’da en

popüler yakıt gibi olmuş, Orta Amerika’da da yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. İstatistiklere göre, 2021 yılında küresel toplam biyodizel üretimi günde 734 bin varil petrol eşdeğeri, tüketim ise günde 787 bin varil petrol eşdeğeri olarak gerçekleşmiştir (BP, 2022). Dünyada günlük biyodizel üretiminin petrol eşdeğer miktarı aşağıda Çizelge 8. ve Şekil 11.’de, tüketimi ise Çizelge 9. ve Şekil 12.’de gösterilmiştir.

Çizelge 8. Dünyada biyodizel üretim (günlük bin varil petrol eşdeğeri üretim) (BP, 2022)

Ülke	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Kanada, Meksika ABD	2	1	2	5	4	6	6	6	5	6	5
Brezilya	54	55	76	71	70	87	89	104	96	101	101
Diğer *	39	40	43	50	40	54	57	52	48	31	42
Avrupa	48	49	43	53	40	54	57	52	48	31	42
Asya Pasifik	160	171	183	205	203	200	230	247	255	250	248
Toplam	72	91	111	138	102	129	129	181	237	230	239
Toplam	377	409	459	523	478	532	574	668	729	712	734

* Güney ve Orta Amerika Ülkeleri

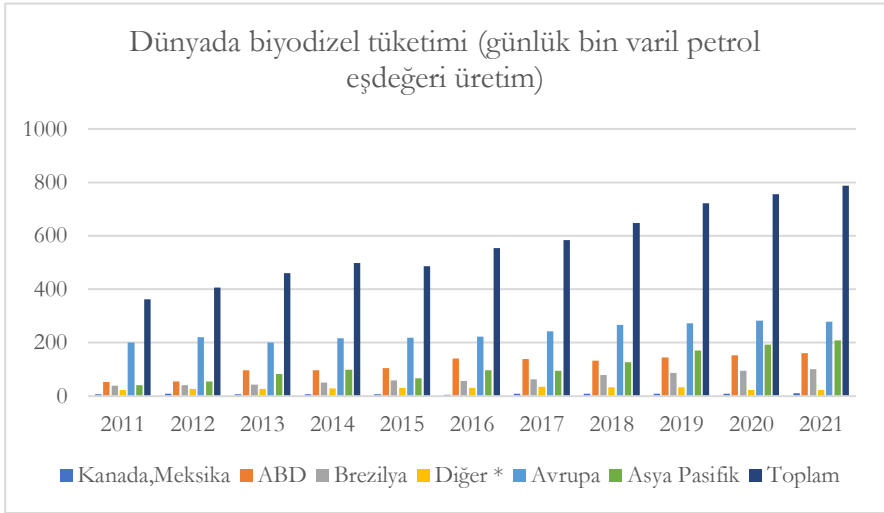


Şekil 11. Dünyada biyodizel üretim (günlük bin varil petrol eşdeğeri üretim) (BP, 2022).

Çizelge 9. Dünyada biyodizel tüketimi (günde bin varil petrol eşdeğeri) (BP, 2022)

Ülke	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Kanada, Meksika	7	9	8	8	7	6	9	10	10	10	11
ABD	53	54	96	96	105	141	138	132	145	152	161
Brezilya	38	40	43	50	58	56	63	79	87	95	101
Diğer *	24	28	28	30	31	32	35	34	34	23	24
Avrupa	201	221	201	217	219	223	243	266	273	282	278
Asya Pasifik	40	54	82	98	66	97	94	126	170	192	209
Toplam	362	407	460	499	486	555	584	648	722	756	787

* Güney ve Orta Amerika Ülkeleri



Şekil 12. Dünyada biyodizel tüketimi (günde bin varil petrol eşdeğeri)(BP, 2022)

Türkiye’de Biyodizel

Ülkemizde, 1934 yılında Ulu Önder Mustafa Kemal Atatürk’ün teşvikiyle Atatürk Orman Çiftliği’nde bitkisel yağların tarım traktörlerinde kullanımıyla ilgili bir çalışma başlatılmıştır (Hatunoğlu, 2010). Bu çalışma, dünyadaki ikinci çalışma olarak kayıtlara geçmiştir. Avrupa ise benzer bir çalışmayı 1937 yılında gerçekleştirmiştir. 1934 yılında ülkemizde yapılan bu çalışmanın temel gerekçesi, ülkenin olağanüstü şartlarda yakıt ithal edememe riskiyle karşı karşıya kalabileceği durumunda kendi kaynaklarını kullanma gerekliliğidir.

Türkiye’de 2000 yılından itibaren biyodizel konusunda ticari girişimcilerin, medyanın ve devlet kurumlarının ilgisi her geçen gün artmıştır. Bu artan ilgi ve önem üzerine, devlet desteğiyle Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİEİ) bünyesinde 'Biyoenjerji Proje Grubu' kurulmuştur. Ekim 2003’te, pilot ölçekte biyodizel üretim sistemi ve laboratuvar hizmete alınmıştır ve aspir-kanola enerji tarımı deneme

üretimi de başlamıştır. Bu adımlarla birlikte biyodizel üretimine yönelik araştırma ve uygulamalara önemli bir destek sağlanmıştır.

Nihayetinde konuyla ilgili bakanlıkların yaptığı çalışmalar sonucu konu bakanlar kurulu gündemine alınmış ve biyodizel 5015 sayılı ‘Petrol Piyasası Kanunu’ kapsamında tanımlanmıştır. Bu kanun, 20 Aralık 2003 tarihli 25322 sayılı resmi gazetede yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Devamında yapılan yasa çalışmaları, yönetmenlikler ve ilgili kararnamelerle 25.12.2021 tarihinde son versiyon (EPDK, 2022) yayınlanmıştır. Bu yönetmeliğe göre biyodizel, akaryakıt sektöründe kullanılan üçüncü bir motor yakıtıdır ve benzin ve motorin için geçerli olan tüm yasal tanımlar ve denetlemeler biyodizel için de geçerlidir. Isıtma yakıtı olarak da kullanılan biyodizel, fuel oil ve kalyak gibi mevcut yakıtlarla aynı yasal düzenlemelere tabi tutulur ve pazarda denetlenir. Biyodizel üreticileri, işletme lisansı almak için Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'ndan (EPDK) izin almak zorundadır. Biyodizel üretimi, 'Bitkisel Atık Yağların Kontrolü Yönetmeliği' gerekliliklerine uygun geri kazanım tesislerinde gerçekleştirilebilir. Oto biyodizel için Özel Tüketim Vergisi (ÖTV) kanunla belirlenmiştir. Yerli tarım ürünlerinden veya bitkisel atık yağlardan üretilen biyodizelin motorine hacimce %0,5 oranında eklenmesi zorunludur. Harmanlama amaçlı kullanılacak biyodizelin ise standartlara uygun olması gerekmektedir. Ayrıca İşleme lisans sahipleri ayrı kalemler halinde “Biodizel (Yerli Tarım Ürününden Üretilen)/Biodizel (Bitkisel Atık Yağdan Üretilen)” şeklinde faturalarda belirtmek zorundadır.

Sonuç

Günümüz dünyasında ülkeler arası sorunların temelinde enerji kaynaklarının paylaşımı bulunmaktadır. Halen en çok fosil kaynaklı yakıtlar kullanıldığından ve bunlar yenilenemez olduğu için, bu kaynaklardan özellikle petrol açısından zengin olan bölgeler, istikrarsızlığa sürüklenmektedir. Dünyada istikrar ve barışı sağlayabilmenin bir yöntemi de enerji kaynakları üzerindeki bu çekişmenin ortadan kaldırılabilmesidir. Yenilenebilir enerji

kaynaklarının kullanımı buna destek verecektir. Biyodizel üretimi gelişme aşamasında olmasına rağmen uygulanabilirliği ileri teknoloji gerektirmediği için önem arz etmektedir.

Ancak hızla artan dünya nüfusunun gıda ihtiyaçları karşılanamazken, gıda kaynaklarının yakıt olarak kullanılması tartışmalara sebep olmaktadır. Bu sebeple biyodizel üretimi, için yan ürün ve atıkların kullanımı hem maliyeti azaltmakta hem de bu sorunu ortadan kaldırmaktadır.

Bu yüzden araştırmalar biyodizelin ekonomikliği ve dünya gıda üretimine olumsuz etkilerini ortadan kaldıracak şekilde gelişme göstermektedir.. Fakir ülkelerin fakirleşmelerinin en büyük sebeplerinden biri olan enerjide dışa bağımlılık, biyodizel üretimi şeklinde ortadan kalkacak, ekonomilerine olumlu etki yapacaktır. İşte bu sebeplerden dolayı biyodizele geleceğin yakıtlarından biri olarak bakılmaktadır. Her ne kadar elektrikli otomobillerin yaygınlaşması ile birlikte içten yanmalı motorların geri planda kalacağı düşünülüyor olsa da elektrik enerjisi üretimi için halen çoğunlukla fosil yakıtların kullanıldığı göz ardı edilmemelidir.

Türkiye’de kendi gıda ihtiyacını karşılama gibi bir sorun görünmemektedir. Ve hemen, hemen her tür yağlı tohum bitkisi yetişmektedir. Ancak halen ihtiyacının %30 kadarını yerli üretim ile karşılayabilmektedir. Bu konuda hükümet desteği başta olmak üzere kapsamlı şekilde yapılacak çalışmalar ile bu rakam artırılabilir ve ihtiyaç fazlası kısmı da biyodizel üretiminde kullanılabilir.

Mevcut araştırmaların birçoğunda bitkisel yağların direk motorlarda kullanımı ile birtakım sıkıntılar çıkardığını ortaya koymuştur. Bu yüzden bitkisel yağların yakıt özellikleri iyileştirilmelidir. Bu çalışmada yağlı tohum ekiminden, bitkisel yağ elde edilerek bunun iyileştirilmesi ve motorlarda kullanılmasına ilişkin ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

Bitkisel yağların pahalı olması, kısa vadede dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılmasını engellemektedir. Ama belli oranlarda motorine katılarak yavaş, yavaş kullanımı artırılmaya

başlamıştır. Çünkü çevreci bir yakıttır. Ve dünya büyük bir çevre felaketi ile karşı karşıyadır. Bir an önce önlem alınmalı, çevreci yakıtlar kullanılmalıdır.

Çevresel kaygılar günümüzde maliyet hesaplarını bir kenara atmaktadır. Öyle ki atıkların depolanması, muhafaza edilmesi veya yok edilmesi hatırı sayılır bir maliyet gerektirmektedir. İşte bu maliyet hesaplandığında ve bu atıkların tekrar kullanımı ile elde edilecek katkı da eklendiği zaman bunun üstüne değeri ölçülemeyecek kadar büyük olan çevre korunması, maliyeti ne olursa olsun biyokütle yakıtlarının üretiminin hızla artmasına sebebiyet vermektedir.

Sonuç olarak, daha yaşanılabilir ve temiz bir dünya için bütün gelişmiş ülkelerde olduğu gibi Türkiye’de de;

- i. Bitkisel yağlardan başarılı bir şekilde biyodizel yakıtı üretebilmesi ve kullanılabilmesi,
- ii. Yakıt kalitesini artırıcı yönde ve belli standartlarda üretim yapacak tesislerin tasarımlarının yapılması,
- iii. Bu konudaki çalışmaların gerçekleştirilmesi ve hız kesmeden devam etmesi yerli ve milli ekonomi için zaruretin ötesine geçmektedir.

Kaynaklar

Abdulahitoğlu A., Demiray A., Aydın K., 2008. Motorin ve Biyodizel Farklı Hidrokarbon Karışımlarının Yakıt Özelliklerinin İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi 30.Yıl Kongresi, Adana 16-17 Ekim 2008.

Abdulahitoğlu A., 2009. Performance and Exhaust Emission Characteristics Of A CI Engine Fueled with Synthesized Fuel Blends, Çukurova University Institute Of Natural And Applied Sciences, Doktora tezi, 220 sayfa, Adana.

Abdulahitoglu A., Aydın K., 2012. Performance and Exhaust Emission Characteristics of a CI Engine Fueled With Synthesized Fuel Blends. Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science, 699-710.

Abdulahitoğlu, A. ve Tüccar G., 2017. Evaluation of Watermelon Seed Biodiesel as an Alternative Fuel in Diesel Engines. J Fac Eng Archit Gazi. 32(1):189-194.

Abdulahitoglu A., 2018a. Evaluation of the Fuel Quality Values of Bay Laurel (*Laurus nobilis* L.) Oil as a Biodiesel Feedstock, *Biofuels* 9(1):95–100.

Abdulahitoğlu A., 2018b, Using Analytic Hierarchy Process for Evaluating Different Biodiesels as an Alternative Fuel. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33(3):177-186.

Abdulahitoglu A., 2019a. Predicted Fuel Characteristics of Prunus Avium Seed Oil as a Candidate For Biodiesel Production. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 8(4):165-171.

Abdulahitoğlu A., 2019b. Alternatif Yakıt Olarak Lignoselülozik Etanol Üretimi: İplikhane Pamuk Telefleri Üzerine Bir Çalışma. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34(2):35-44.

Abdulahitoglu A., Kilic M., 2022. A New Approach for Selecting The Most Suitable Oilseed For Biodiesel Production; The Integrated AHP-TOPSIS Method, Ain Shams Engineering Journal, 13,101604.

Abdulahitoğlu A., Abdulvahitoğlu A. ve Kilic M., 2022 Elektrikli Araç Bataryalarının Bütünleşik SWARA –TOPSİS Metodu ile Değerlendirilmesi Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi 37(4) , 1061-1076.

Adebanjo A., 2005. Production of Fuels and Chemicals from Biomass Derived Oil and Lard. A Thesis Submitted to the College of Graduate Studies and Research in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in the Department of Chemical Engineering University of Saskatchewan Saskatoon, Saskatchewan, January 2005.

Aderibigbe F.A., Mustapha S.I., Adewoye T.L., Mohammed I.A., Gbadegesin A.B., Niyi F.E., Olowu O.I., Soretire A.G. ve Saka H.B., 2002. Qualitative Role of Heterogenous Catalysts in Biodiesel Production from Jatropha Curcas Oil. Biofuel Research Journal. 26:1159-1169.

Anonim 2023a,
https://www.palmoil extraction machine.com/FAQ/oil_content_of_different_oil_seeds_506.html. ERT: 15 Mayıs 2023.

Anonim 2023b,
https://afdc.energy.gov/files/u/publication/biodiesel_basics.pdf?642b65deb7. ERT: 15 Mayıs 2023.

Avinash A., Mahian O., Hollmann F. ve Zhang W., 2021. Environmentally Being Solid Catalysts for Sustainable Biodiesel Production: A Critical Review. Sci Total Environ, 768:144856.

Aydın, Ü., Peker, H. ve Peker, A.U.G., 2020. <https://www.mmo.org.tr/sites/default/files>. ERT:7 Temmuz 2023.

Azam M. M., Waris A. ve Nahar N. M., 2005. Prospects and Potential of Fatty Acid Methyl Esters of Some Non-Traditional Seed Oils for Use as Biodiesel in India. Biomass Bioenergy 29:293–302.

Balat, M. ve Balat, H., 2008. A Critical Review of Bio-Diesel as a Vehicular Fuel. Energy Conversion and Management, 49(10):2727-2741.

Van Gerpen J., 2004. Basics of Diesel Engines and Diesel Fuels. Knothe, G., Gerpen J.V., Krahl J. as Editors the Biodiesel Handbook Chapter 3 Pages 17-25, ISBN 1-893997-79-0, 2004.

BP, 2022. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf> ERT: 15 Mayıs 2023.

Bozbaş K., 2005. Biodiesel as an Alternative Motor Fuel: Production and Policies in the European Union. Science Direct, 12:542-552.

Cijil B. John, S. Antony Raja, B. Deepanraj, H. C., 2022. Ong. Palm Stear in Biodiesel: Preparation, Characterization Using Spectrometric Techniques and the Assessment of Fuel Properties Biomass Conv. Bioref. 12: 1679–1693 <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01265-0>

Demirbas A., 2009. Biofuels: Securing the Planet's Future Energy Needs. Springer 978-1-84882-011-1.

EPDK, 2021. Motorin Türlerine Biodizel Harmanlanması Hakkında Tebliğ. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-0-137/tebligler>, ERT:15 Mayıs 2023.

Hatunoğlu E. E., 2016. http://www.surdurulebilirlikalkinma.gov.tr/wp-content/uploads/2016/06/Biyoyakit_Politikalarinin_Tarim_Sektorune_Etkileri.pdf. ERT:15 Mayıs 2023.

Keskin A., Özcanlı M., Yeni U., Abdulvahitoğlu A., Aydın K., Altıparmak D., 2005a. Ham Gliserinin Saflaştırılma Prosesi

Esnasında Elde Edilen Serbest Yağ Asitlerinin Esterleştirilmesi. Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Eneji Yönetimi Sempozyumu, Kayseri 3-4 Haziran 2005.

Keskin A., Özcanlı M., Yeni U., Abdulvahitoğlu A., Aydın K., Altıparmak D., 2005b. Ülkemizdeki Kullanılmış Atık Yağların Potansiyeli Çevreye Olan Etkileri ve Biyodizel Üretiminde Kullanılması. Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Eneji Yönetimi Sempozyumu, Kayseri 3-4 Haziran 2005.

Latinas A., Geivanidis S., Faliakis A., Courouclis Y., Samaras Z., Keder A., Krasnoholovets V., Gandzha I., Zabulonov Y., Puhach O. ve Dmytriyuk M., 2020. Biodiesel Production from high FFA Feedstocks with a Novel Chemical Multifunctional Process Intensifier. *Biofuel Research Journal*. 26:1170-1177.

Meher L.C., Sagar D. V. ve Naik S.N., 2006. Technical Aspects of Biodiesel Production by Transesterification-a Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10:248–268.

Méndez M. C., 2006. Feasibility Study of a Biodiesel Production Plant from Oilseed. Master Thesis University of Strathclyde Glasgow.

Murugesan, A.C., Umarani Subramanian R. ve Nedunchezian N., 2008. Bio-Diesel as an Alternative Fuel for Diesel Engines—A Review, *Renewable Sustain Energy Rev.*, doi:10.1016/j.rser.2007.10.007

Öğüt H., 2005. Üçüncü Milenyum Yakıtı Biyodizel. Nobel Yayın No:745, Ankara.

Özdemir Z.Ö. ve Mutlubaş H., 2016. Biyodizel Üretim Yöntemleri ve Çevresel Etkileri *Kırklareli University Journal of Engineering and Science* 2:129-143.

Sakthivel R., Ramesh K., Purnachandran R. ve Mohamed Shameer P., 20158. A Review on the Properties, Performance and Emission Aspects of the Third Generation Biodiesels. *Renew Sust Energ Rev.* 82:2970–2992.

Sayın C., Erdoğan S. ve Balki M. K., 2019. Alternatif Yakıtlar: Çevresel Atıkların İçten Yanmalı Motor Yakıtı Olarak Değerlendirilmesi. Nobel Akademik Yayıncılık

Shuit S.H., Tan K. T., Lee K. T. ve Kamaruddin A. H., 2009. Oil Palm Biomass as a Sustainable Energy Source: A Malaysian Case Study. Energy. 34(9):1225-1235.

Srivastava A., Prasad R., 2000. Triglycerides-Based Diesel Fuels. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 4:111-133.

Strong C., Erickson C. ve Shukla D., 2009. http://www.mdt.mt.gov/research/docs/research_proj. ERT: 15 Mayıs 2023.

Sugebo, B., Demrew, Z., Feleke, S. ve Biazen M., 2021. Evaluation and Characterization of Rubber Seed Oil for Biodiesel Production. Biomass Conv. Bioref. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01900-4>

Tickell J. 2000 From the Fryer to the Fuel Tank: The Complete Guide to Using Vegetable Oil as an Alternative Fuel, Florida, US: Tickell Energy Consulting.

Tüccar G., Güngör C., Demiray A., Özgür T., Aydın K., 2019. Kanola Biyodizeli, Diizopropil Eter ve Motorin Karışımlarının Yakıt Özelliklerinin ve Motor Performans Değerlerinin İncelenmesi V. Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 16-17 Ekim 2019, Kayseri.

TÜİK 2023a. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Nisan> ERT:8 Temmuz 2023.

TÜİK 2023b. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Bitkisel-Uretim-Istatistikleri-2022-45504> ERT: 8 Temmuz 2023.

Van Basshuysen R. and Schäfer F., 2004. Internal Combustion Engine Handbook: Basics, Components, Systems, and

Perspectives. SAE International and Professional Engineering Publishing ISBN: 978-0-7680-1139-5, pp.629-634.

Verma P. ve Sharma M.P., 2016. Review of Process Parameters for Biodiesel Production from Different Feedstocks. Renew Sust Energ Rev. 62:1063–1071.

World Energy Balance, 2020. https://iea.blob.core.windows.net/assets/23f096ab-5872-4eb0-91c4-418625c2c9d7/World_Energy_Balances_Overview_2020_edition.pdf. ERT: 3 Haziran 2021.

Yalçın A. Z., Doğan M., 2023. Enerjide Dışa Bağımlılık Sorunu: Türkiye İçin Ampirik Bir Analiz. Yönetim ve Ekonomi, 30(2), Doi: 10.18657/yonveek.1206158.

Yaman G. ve Çanakçı M., 2003. İzmit Sınırları İçerisinde Bulunan Restaurant ve Lokantaların Atık Kızartma Yağlarının Potansiyel ve Biyodizel Üretimi Açısından İncelenmesi. BAPB-Proje No: 2003/079, Kocaeli Ü. Yeniköy MYO. Otomotiv Prog. Kocaeli Ü. Tek. Eğt. Fak. Otomotiv ABD.

Yılmaz İ.H., Abdulvahitoğlu A. (2019). Evaluation of Municipal Solid Waste Options in Turkey: Scenarios for Energy Recovery, Carbon Mitigation and Consequent Financial Strategies Resources, Conservation & Recycling 14795–110.

Yeni, U., Özcanlı M., Abdulvahitoğlu A., Şeker A. ve Aydın K., 2005. Dünyada Yakıt Etanolü Kullanımı, Üretim Teknolojileri ve Bu Teknolojilerin Ülkemizde Uygulanabilirliğinin İncelenmesi, Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Enerji Yönetimi Semp. Kayseri 3-4 Haziran 2005.

BÖLÜM VI

İki Zamanlı Motorların Yağlama Yağında Katkı Olarak Borik Asit Kullanımı

Emre ARABACI¹
Bayram KILIÇ²
Gözde KİLÖREN³

Giriş

İçten yanmalı motorlar 1670’li yıllardan günümüze kadar önemli bir teknolojik gelişim sergilemiştir. Bu teknolojik gelişmelerin en önemlileri ise son 50 yılda gerçekleşmiştir. Hollandalı bilim insanı Christiaan Huygens’in 1673 tarihli “*ağırlıkları kaldırabilen barut ateşlemeli bir silindir*” fikri içten yanmalı motorlar için bir başlangıç noktası olarak kabul edilmektedir (Arcoumanis, 2012). 1850’li yıllara kadar Huygens’in

¹ Doç. Dr., Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü

² Doç. Dr., Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü

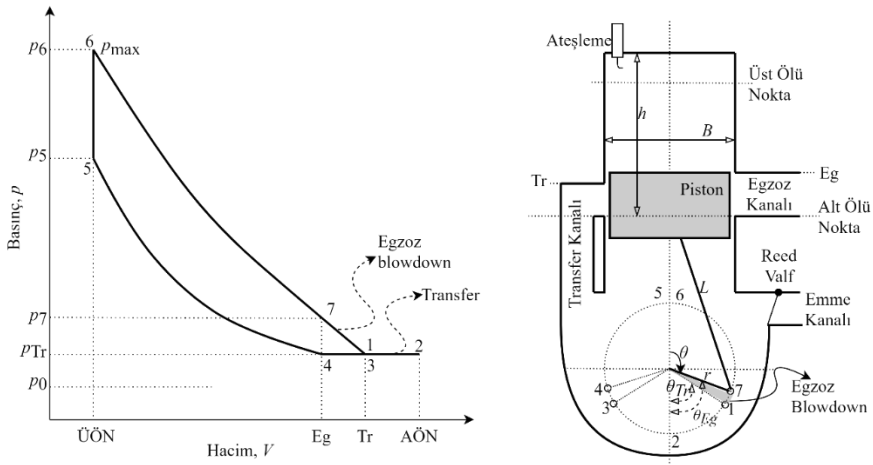
³ Lisans Öğrencisi, Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü

bu düşüncesi “*dıştan yanmalı motorlar*” olarak adlandırılan güç makinelerinin gelişiminde kullanılmıştır. 1860 yılında Belçikalı-Fransız bilim insanı Étienne Lenoir ticari olarak kullanılabilecek nitelikteki ilk içten yanmalı motoru tanıtmıştır (Ferguson ve Kirkpatrick, 2015). Lenoir’in bu motoru günümüz modern motorlarına göre oldukça kötü bir performansla sahip olsa da günümüz motorlarının gelişimi sürecinde önemli bir gelişme olarak görülmektedir. 1870’li yıllarda Amerikalı mühendis George Brayton sabit basınçlı içten yanmalı motor için patent almıştır. Her ne kadar günümüzde Brayton çevrimi denildiğinde ilk akla gelen gaz türbinleri olsa da, bu konudaki ilk çalışmalar pistonlu motorlar üzerine olmuştur (Pulkrabek, 2004; Ferguson ve Kirkpatrick, 2015). Alman Mühendis Nikolaus Otto, 1870’li yılların sonlarına doğru kendi adını taşıyan içten yanmalı motorun patentini alarak ticari hale getirmiştir. Otto’nun yapmış olduğu motorun performansı günümüz motorlarla kıyaslanamayacak kadar düşük bir değerde olmasına rağmen günümüz buji ateşlemeli motorların temel yapısının halen Otto’nun sunmuş olduğu motordan ilham alındığı bilinmektedir. Bu yüzden Otto içten yanmalı motor endüstrisinin öncüsü olarak kabul edilmektedir (Ferguson ve Kirkpatrick, 2015, Arcoumanis, 2012, Pulkrabek, 2004).

İki zamanlı motorların da dört zamanlı motorlar kadar eski bir tarihi vardır. İlk olarak 1870’li yılların sonunda İskoç makine mühendisi Sir Dugald Clerk tarafından icat edildiği bilinmektedir ve iki zamanlı motorlar ile ilgili ilk patent yine Clerk tarafından 1881 tarihinde tescillenmiştir (Blair, 1996; Heywood ve Sher, 2017). İki zamanlı motorlar hafiflik ve yüksek özgül güç performansı arzu edildiği durumlarda tercih edilmektedir. Yapısal basitliği, bakım kolaylığı ve yüksek güç-ağırlık oranı gibi üstün özellikleri nedeniyle testereler, motorlu tırpanlar, çim biçme makineleri, zirai ilaçlama makineleri, mobiletler ve jeneratörlerdeki kullanım oldukça yaygındır (Blair, 1996). İki zamanlı motorların çok küçük hacimlerde kullanımı yaygın olmasına rağmen gemilerde büyük hacimli iki zamanlı motorları görmek mümkündür (Orman, 2022).

İki zamanlı motorlarda gelişmiş bir yağlama sistemi yoktur ve yağlayıcı olarak kullanılan yağ, kullanılacak yakıt içerisine önceden belirlenmiş oranda ilave edilir. Bu durumda yağlama yağı, yakıt gibi motorun çalışması esnasında tüketilmektedir. İki zamanlı motorlarda yakıt-hava karışımı öncelikle kartere (yani pistonun yanma olmayan alt tarafına) sevk edilir. Daha sonra bir geçiş kanalı vasıtasıyla silindire sevk edilir (Blair, 1996; Orman, 2022).

Basit iki zamanlı motor için basınç-hacim diyagramı ve şematik gösterimi Şekil 1’de sunulmuştur. Dört zamanlı motorlarda bir çevrimin tamamlanması için iki tam krank turuna ihtiyaç duyulurken, iki zamanlı motorlarda bir çevrimin tamamlanması için yalnızca bir tam krank turu yeterli olmaktadır (Heywood ve Sher, 2017).



Şekil 1. İki zamanlı motora ait basınç-hacim diyagramı ve şematik gösterim (Orman, 2022)

Basit iki zamanlı motorlarda gaz değişim süreci valfler ile değil “portlar” ile yapılmaktadır. Bununla birlikte çok yaygın olmasa da gaz değişim sürecinin valfler ile yapıldığı iki zamanlı motor örneklerine de rastlanabilmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan iki zamanlı motorlarda piston üst ölü noktaya doğru hareket ederken dolgu (hava veya hava-yakıt karışımı) öncelikle

kartere doğru yönlendirilir ve piston alt ölü noktaya doğru hareket ederken karterdeki dolgu bir miktar (1,3–15 atm) sıkıştırılır. Sıkıştırılan dolgu, transfer portu yardımıyla silindire doğru yönlendirilir ve burada sıkıştırılır. Sıkıştırma sürecinin ardından yanma olayı meydana gelir. Piston alt ölü noktaya doğru yaklaşırken egzoz portu açılarak “*blowdown*” (ani olarak gaz salımı) süreci meydana gelerek silindir basıncı düşürülür ve ardından egzoz portu açık haldeyken transfer portu açılarak dolgu içeriye alınır ve kalan egzoz gazlarının çıkması sağlanır. İki zamanlı motorlarda gerçek sıkıştırma (veya genişleme) oranı geometrik sıkıştırma oranından yaklaşık %30 daha düşüktür. Bununla birlikte gaz değişim sürecinde dört zamanlı motorlara kıyasla daha fazla hacimsel verim kaybının yaşanması kaçınılmazdır (Orman, 2022; Orman, 2023; Heywood ve Sher, 2017).

İki zamanlı motorlarda herhangi bir yağ deposuna ihtiyaç yoktur. Bununla birlikte gaz değişim süreçleri (emme ve egzoz) için herhangi bir supap mekanizmasına da ihtiyaç yoktur. Günümüzde supaplı iki zamanlı motorlar olsa da çok yaygın değildir. Gaz değişimi motorun kendi karakteristik yapısı kullanılarak piston hareketiyle birlikte sağlanabilmektedir. Bu durum iki zamanlı motorların yapısının basit olmasına olanak sağlamaktadır. Ancak yağlama yağının yakıt ile birlikte karıştırılması mekanik arızalar ve aşırı emisyon gibi bazı problemleri de beraberinde getirebilmektedir. Çünkü yağ, yakıt ile birlikte yanma sürecine dahil olmaktadır. Bu nedenle iki zamanlı motorlarda kullanılan yağın yakıt ile birlikte karışması, yanma sürecine dahil olması beklenmektedir. Bu yağlayıcının miktarının az olması motorda mekanik arızaların artmasına neden olurken fazla olması egzoz emisyonlarını aşırı şekilde artırmaktadır. Ancak iki zamanlı motorlarda yağlama sisteminin olmaması bazı avantajları da beraberinde getirmektedir. Örneğin dört zamanlı motorlardaki yağlama sistemi için bir yağ haznesi (karter) kullanılmak zorundadır ve motor yalnızca tasarım haliyle (dikey) çalıştırılmalıdır. Ancak iki zamanlı motorlarda yağlama işi yakıtın içerisine ilave edilen yağ ile yapıldığından dolayı iki zamanlı motorlar herhangi bir konumda (dikey veya yatay veya

ters) çalıştırılabilir. Bu nedenle küçük çapa makineleri, çim biçme makineleri, ilaçlama makineleri gibi sistemlerde iki zamanlı motorlar sıklıkla tercih edilmektedir (Orman, 2022; Orman 2023; Blair, 1996).

İki zamanlı motorlarda yağ/yakıt hacimsel oranı %1-%4 aralığında değişmektedir. Bu durum kullanılacak yağın mineral veya sentetik olmasına bağlı olarak da değişiklik gösterebilmektedir. Yağ miktarının gereğinden az olması durumunda yağlamanın yeterince yapılamamasından dolayı sürtünmenin artması ve bu nedenle motor deformasyonları meydana gelir. Yağlamanın gereğinden fazla yapılması durumunda ise bujide yağlanma, egzozdan aşırı duman gibi performansı olumsuz etkileyici sonuçlar meydana gelebilmektedir. İki zamanlı motor yağları genel olarak; mineral, sentetik ve yarı sentetik olarak sınıflandırılmaktadır. Sentetik yağların karakteristiği mineral yağlara göre daha iyidir ve bu nedenle yakıtı karıştırılacak yağlayıcı miktarı yağın sentetik veya mineral olmasına göre farklılık göstermektedir. Örneğin mineral yağ kullanımında yağ/yakıt hacimsel oranı %4 iken sentetik yağ kullanımında bu değer %2 olmaktadır. Ancak sentetik yağın satış fiyatının yüksek olması nedeniyle ülkemizde mineral yağlar veya yarı sentetik yağlar sıklıkla tercih edilmektedir. Günümüzde hint yağı esaslı yağlama yağları da kullanılmaktadır (Blair, 1996; Orman, 2022; Millers Oils, 2023).

Literatürde iki zamanlı motorlar için farklı yağlayıcı alternatifleri de araştırılmıştır. Örneğin mineral yağ yerine Hindistan cevizi yağı kullanımı (Jayadas ve ark., 2007), tütün tohumu, ayçiçek yağı metil esteri kullanımı, palm yağı metil esteri kullanımı (Masjuki ve ark.,1996), soya yağı kullanımı (Fernando ve Hanna, 2001) gibi. Normal yağlama yağının iki zamanlı yağ ile karşılaştırılmasıyla ilgili fark, iki zamanlı yağın çok daha düşük kül içeriğine sahip olması gerektiğidir. Bu, motorun yanma odasında yanan yağda kül varsa oluşma eğiliminde olan tortuları en aza indirmek için gereklidir. Bununla birlikte, iki zamanlı motora özgü olmayan bir yağ, benzinle karıştırıldığında ve hemen tüketilmediği takdirde birkaç gün içinde sakıza dönüşebilir. Bir diğer önemli faktör, dört zamanlı motorların

iki zamanlı motorlardan farklı bir yapışkanlık gereksinimine sahip olmasıdır.

Günümüz motor yağlarına alternatif olarak kolza (Arumugam ve ark., 2014), jatropha (Farfan ve ark., 2019), palm (Cheenkachorn ve Fungtammasan, 2010), yabani hardal (Öğüt ve ark., 2019) yenmeyen ve/veya çevre dostu bitki bazlı biyo-yaglayıcılar üretilmektedir. Bununla birlikte kirlenme (Zulfattah, 2019), emisyon (Arumugam ve ark., 2014; Zulfattah, 2019; Cheenkachorn ve Fungtammasan, 2010), termal yaşlanma (Farfan ve ark., 2019), sürtünme (Farfan ve ark., 2019), aşınma (Farfan ve ark., 2019; Cheenkachorn ve Fungtammasan, 2010), viskozite (Cheenkachorn ve Fungtammasan, 2010, köpüklenme özelliği (Cheenkachorn ve Fungtammasan, 2010), motor performansı (Arumugam ve ark., 2014; Cheenkachorn ve Fungtammasan, 2010), tribolojik davranışları (Farfan ve ark., 2019) gibi parametreleri ve özellikleri geliştirmek için çaba sarf edilmektedir. Ancak mevcut motor yağlarının özelliklerini iyileştirmek için Al_2O_3 (Alüminyum oksit), TiO_2 (Titanyum oksit), MoS_2 (Molibden disülfid), WS_2 (Tungsten disülfid), Cr_2AlC (Krom alüminyum karbür), $La(OH)_3$ (Lanthanum(III) hidroksit), Grafen Oksit, ZnO (Çinko Oksit), CuO (Bakır oksit), BN (Bor nitrid) gibi nano katkı maddelerinin kullanımı da yaygınlaşmaktadır (Öğüt ve ark., 2019; Ali ve ark., 2016-1; Ali ve ark., 2016-2; Ali ve ark., 2018; Sgroi ve ark., 2017; Davis ve ark., 2019; Wu ve ark., 2020; Dinesh ve ark., 2016; Abdullah ve ark., 2013; Abdullah ve ark., 2016; Ay ve ark., 2016). Bu nano katkı maddeleri sayesinde yağın aşınma önleyici performans, ısı iletkenliği ve viskozite gibi tribolojik özelliklerinin iyileştirildiği bildirilmiştir. Öte yandan nano katkılı yağın toplam sürtünme güç kayıplarında azalma, mekanik verimde artış, yakıt ekonomisinde iyileşme, içten yanmalı bir motorun motor torkunda artış gibi etkileri olduğu belirtilmektedir. Bu nano katkıların boyutları 2-120 nm aralığında olup, yağa hacimce %0,2–3 oranında eklenmiştir (Öğüt ve ark., 2019; Ali ve ark., 2016-1; Ali ve ark., 2016-2; Ali ve ark., 2018; Sgroi ve ark., 2017; Davis ve ark., 2019; Wu ve ark., 2020; Dinesh

ve ark., 2016; Abdullah ve ark., 2013; Abdullah ve ark., 2016; Ay ve ark., 2016).

Daha önceki çalışmalardan da görölüyor ki iki zamanlı motorlarda yağlama yağının geliştirilmesi önemli bir konudur. Ayrıca yağlama yağlarının geliştirilmesinde çeşitli katkıların kullanımı da oldukça yaygın bir uygulamadır. Bununla birlikte iki zamanlı motorların yağlama yağının katkılarla geliştirilmesi konusunda literatürdeki güncel bilgimiz dahilinde herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Her ne kadar son yıllarda karbon salınımı nedeniyle petrol motorlarının kullanımından uzaklaşılsa da iki zamanlı motorların kullanım alanı göz önünde bulundurulduğunda iki zamanlı motorlarla rekabet edecek bir teknoloji de henüz bulunmamaktadır. Bununla birlikte yaygın kullanımı ve etkin bir alternatifi olmaması nedeniyle iki zamanlı motorlardan kaynaklanan emisyonun azaltılmasının önemli bir yolu yağlama yağının karakteristiğinin geliştirilmesidir. Çünkü iki zamanlı motorlarda yağlama yağı aynı zamanda yanma sürecinde kullanılan bir malzemedir. Bu nedenle yakıt karakteristiği sayesinde yağlamanın geliştirilmesi ve mümkün olan en az yağ miktarının kullanımı sayesinde iki zamanlı motorların hem performansı artırılabilir hem de kirleticisi emisyonları azaltılabilir.

Bu çalışma kapsamında iki zamanlı motor yağına belirli oranlarda borik asit ilavesi yapılmıştır. Motor sabit hız ve değişken yük koşullarında çalıştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışma motor gövde sıcaklığı ve egzoz gazı sıcaklığı değişimi gözlenmesi olarak sınırlandırılmıştır. Bununla birlikte motorun uzun süre çalıştırılması sonrasındaki buji ve silindir içi gözlemi yapılmıştır.

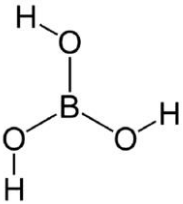
Borik Asit

Bor elementinin atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81 ve simgesi B'dir. Periyodik cetvelde 3A grubunda yer alan bor, yarı metal ve yarı iletken özelliğe sahiptir. Doğada hiçbir zaman serbest halde bulunmayan bor elementi, çeşitli metal veya ametallik elementlerle farklı özellikler gösteren bileşikler oluşturmaktadır.;

Böylelikle, birçok bor bileşiği, endüstrinin farklı dallarında kullanılmaktadır. Bor, bileşiklerinde metal dışı bileşikler gibi davranır. Saf bor ise karbon gibi elektrik iletkenliği özelliğine sahiptir. Kristalize bor, görünüm ve optik özellikleri açısından elmasa benzer ve neredeyse elmas kadar serttir (Kurt ve ark, 2023; Yenmez, 2009).

Borik asit, (borasis asit ya da ortoborik asit olarak da adlandırılır) borun zayıf bir asididir. Kimyasal formülü H_3BO_3 (ya da $B(OH)_3$) şeklinde yazılır ve beyaz toz halinde suda çözünebilir formda bulunur. Borik asit kolemanit, üleksit, boraks (tinkal), kernit (razorit), pantermit, propertit ve borast gibi minerallerden üretilmekte olsa da borik asit üretimi için genellikle kolemanit tercih edilmektedir. Genel olarak borik asitin temel fiziksel özellikleri Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Borik asitin temel fiziksel özellikleri (Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2019)

Fiziksel Özellik	Değer	Yapısı
Özgül Ağırlık	1,51 g/cm ³ (20°C)	
Yığın yoğunluğu	0,892 g/cm ³ (granül)	
Molekül ağırlığı	61,83 g/mol	
Erime noktası	450°C	
Isı kapasitesi	24,7 J/g°C	
Isıl iletkenlik	0,407 W/mK	

Borik asitin kullanım alanları oldukça fazladır. Borik asit özel tip camların üretiminde kullanılmaktadır. Cam üretiminde, devitrifikasyonu önlemektedir. Camın; ısıya, kimyasallara, mekanik etkilere karşı dayanım özelliklerini artırmaktadır. Borik asit, seramiklerde bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Borik asidin ilavesi sonucunda, ergime ve yapışma daha düşük sıcaklıkta olmaktadır. Seramik ürünlerinin fiziksel darbeler karşısında kırılma ve çizilme direncini arttırmakta, kimyasal direnci güçlendirmektedir. Ayrıca borik asit mikrop öldürücü ve ağartıcı olarak kullanılmaktadır. Sabun ve deterjanlara su yumuşatma ve mikrop öldürücü özelliğinden dolayı eklenebilmektedir. Yıkama süresini ve

sıcaklığını düşürücü etki göstermektedir. Bununla birlikte borik asit yanmaya neden olan maddelerin tutuşma derecesini azaltmak için kullanılan borat bazlı alev geciktiricilerin temel formudur. Son yıllarda reçine bazlı ahşap kompozit levhalara alev geciktirici özellik kazandırmasından, kereste ve katı ahşap ürünlerde koruyucu madde olarak kullanılmasından dolayı önem kazanmaktadır. Nükleer santrallerde nötron fisyon oluşum hızını düşürmek için nötron tutumu amacıyla kullanılmaktadır. Reaktör soğutucusuna daha fazla borik asit ekleyerek reaktörde dolaşımı gerçekleştirildiğinde nötronların fisyonla uğrama olasılığı azalmaktadır. Dolayısıyla borik asit etkili bir şekilde reaktör içerisinde fisyon hızını kontrol etmektedir. Borik asit aynı zamanda bir antiseptik olarak kullanılabilir. Borik asidin seyreltik çözeltileri göz yıkama solüsyonu olarak kullanılmaktadır. Seyreltik borik asit çözeltisi anti-bakteriyel ajan olarak kullanılmaktadır. Endüstride metal kaplama işlemlerinde korozyon önleyici ve anti-bakteriyel madde olarak borik asit kullanılmaktadır (Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2019).

Tüm bu özelliklerinin yanında borik asidin kolloidal süspansiyonları petrolde ve bitkisel yağlara eklendiğinde seramik ve metal yüzeyler için iyi bir kayganlaştırıcı oluşturmakta ve sürtünme katsayısını önemli miktarda düşürmektedir (Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2019).

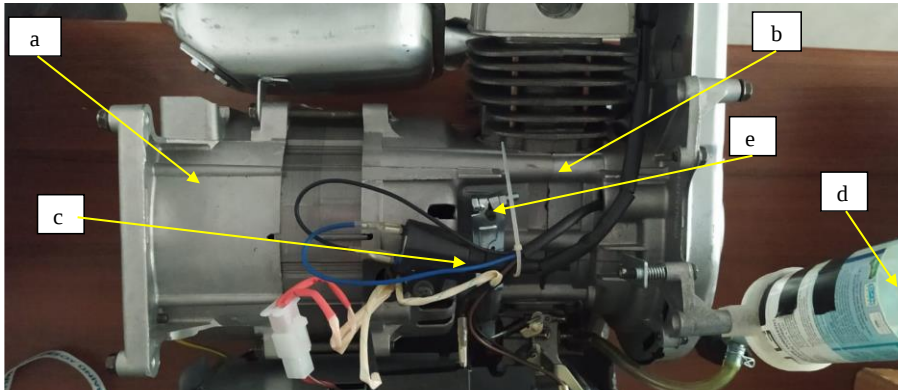
Deney Ekipmanları

İki zamanlı motorlar genel olarak düşük kapasiteli sistemlerde tercih edilmektedir ve en yaygın kullanım alanı tarımsal aletler ve küçük güç jeneratörleridir. Bu çalışmada iki zamanlı bir motora sahip bir güç jeneratörü tercih edilmiştir. Genel olarak güç jeneratörleri sabit hız, değişken yük koşullarında çalışan cihazlardır. Bu nedenle yapılan çalışma bu koşullar için sınırlandırılmıştır. Deneyde kullanılan güç jeneratörünün ve özellikleri Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Güç jeneratörünün temel özellikleri (Orman, 2023)

Özellik	Değer/Açıklama
Jeneratör Çıkışı	220 VAC, 50 Hz, Tek faz 750 W (0,8 kVA) Sürekli 800 W (1,0 kVA) Maksimum
Güç Faktörü (Cos ϕ)	1,00
Motor Kurs Hacmi	63 cc
Motor Çıkış Gücü	1490 W Maximum
Motor Dönüş Yönü	Saat yönü Tersine
Motor Tipi	Dikey, tek silindir, 2 zamanlı doğal emişli
Motor Soğutma Şekli	Zorlanmış hava
Yakıt	87+ Oktan benzin ve yağ karışımı
Yağlama Sistemi	Yakıt ile karıştırarak
Yağlayıcı	Yakıt/yağ hacimsel 100:2 (tam sentetik yağ için) 100:4 (mineral yağ için)
Ses seviyesi	56 dB (7 m uzaktan)

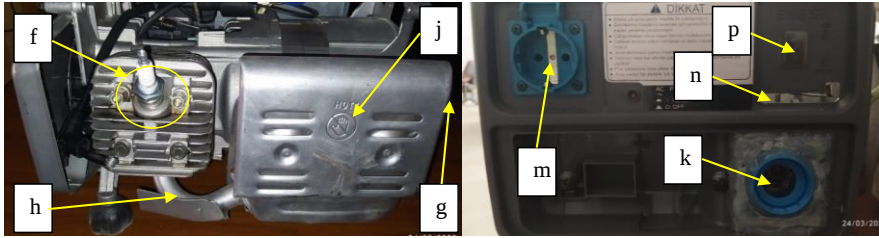
Güç jeneratörünün genel yapısı incelendiğinde tek faz alternatör (kısaca alternatör) ve iki zamanlı benzinli motor (kısaca motor) direkt olarak birbirine bağlanmıştır. Bununla birlikte alternatörün sürekli olarak sabit hızda çalışabilmesi için motor üzerinde hız sabitleyici bir mekanizma konumlandırılmıştır (Resim 1).



Resim 1. Jeneratörün genel yapısı (üstten görünüm) (a) alternatör, (b) motor, (c) ateşleme sistemi, (d) yakıt haznesi, (e) hız sabitleyici mekanizma

Bu jeneratörde motor üzerinde ölçümler yapılabilmesi için bir dizi değişiklik yapılmıştır. Jeneratörde yakıt deposu üst kısımda konumlandırılmıştır. Bu kısım sökülerek iptal edilmiştir. Çünkü her deney seti için yakıt-yağ karışımı değiştirildiğinden dolayı bu orijinal yakıt deposu deneyler için uygun değildir. Bunun yerine karbüratöre yakın bir yere makul büyüklükte (yaklaşık 400 cc) şeffaf bir yakıt kabı takılmıştır. Böylelikle deney seti için gerekli yakıt-yağ karışımı değişimi pratik bir şekilde yapılabilmiştir. Bununla birlikte yakıt deposu söküldüğünden dolayı hem alternatör hem de motor tüm deneyler boyunca sürekli gözlemlenebilir nitelikte olmuştur.

Bu çalışmadaki temel amaç doğrultusunda gövde sıcaklığı ve egzoz sıcaklığı ölçümü yapılabilmesi için uygun referans noktaları belirlenmiştir. Gövde sıcaklığı buji yakınında bir bölgeden lazer termometre ile, egzoz sıcaklığı ise egzoz susturucu sonrasındaki çıkış kısmından K-tipi termokupl ile ölçülmüştür. Ayrıca hava tüketimi ölçümü için hava filtresi sökülerek yerine hava tüketimi ölçümünün yapılabilceği bir modifikasyon yapılmıştır (Resim 2).



Resim 2. Jeneratörün ön ve arka görünümü (f) gövde sıcaklığı ölçüm bölgesi, (g) egzoz sıcaklığı ölçüm noktası, (h) egzoz hattı, (j) egzoz susturucusu (k) hava girişi modifikasyonu, (m) elektrik çıkışı, (n) jikle kolu, (p) ateşleme kesici anahtar

Gövde ve egzoz sıcaklığı için lazer termometre kullanılmıştır. Kullanılan lazer termometre lazer sıcaklık ölçümü yaparken aynı zamanda K-tipi termokupl da bağlanabilmektedir. Bu cihaz 1000°C sıcaklığa kadar ölçüm yapabilmektedir. Ayrıca lazer sıcaklık hedeflemesi için 8 noktalı dairesel hedefleme kullanmakta ve böylelikle ölçüm noktası daha hassas ayarlanabilmektedir. Cihaz

bünyesinde 1370°C sıcaklığa kadar ölçüm yapabilen K-tipi termokupl bulunmaktadır. Hava tüketimi ölçümü için mini anemometre kullanılmıştır. Bunun için airbox yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem için literatürde motor kurs hacminin 50 ila 200 katı arasında bir kaba ihtiyaç duyulmaktadır (Martyr ve Plint, 2011). Bu çalışmada kullanılan motor hacmi 63 cc olduğu için 5000 cc'lik (kurs hacminin yaklaşık 80 katı) bir hazne airbox olarak tercih edilmiştir. Kullanılan mini anemometre 0.1 m/s çözünürlükte 0-30 m/s aralığında hız ölçümü yapabilmektedir. Ayrıca 50°C'ye kadar ortam sıcaklığı ölçümü de yapmaktadır.

Uzun çalıştırma deneylerinin ardından silindir içinin kolaylıkla görüntülenerek incelenebilmesi için endüstriyel boroskobik kamera kullanılmıştır. Kameranın dış çapı 8 mm'dir ve buji söküldüğünde kamera buji yuvasına rahatlıkla sığabilmekte ve silindir içi görüntülenebilmektedir. Ayrıca kamerada 8 adet aydınlatma ışığı bulunmaktadır. Kamera görüntülerinin aktarımı ve kayıt edilmesi için bir modüle sahiptir. Kamera görüntüleri fotoğraf veya video olarak harici bir ortama kayıt edilebilmektedir.

Deneylerde alternatörün ürettiği güç ve frekans bir wattmetre cihaz ile yapılmıştır. Bu cihaz güç jeneratörünün güç çıkışına takılmıştır. Ayrıca motor verileri yüklü koşullarda alınacağı için basit bir yük bankası oluşturulmuştur. Bunun için halojen ampuller, anahtarlı duylar ve çoklu priz kullanılmıştır. Bu yük bankası wattmetreye takılmıştır.

Deney Yakıtının Hazırlanması

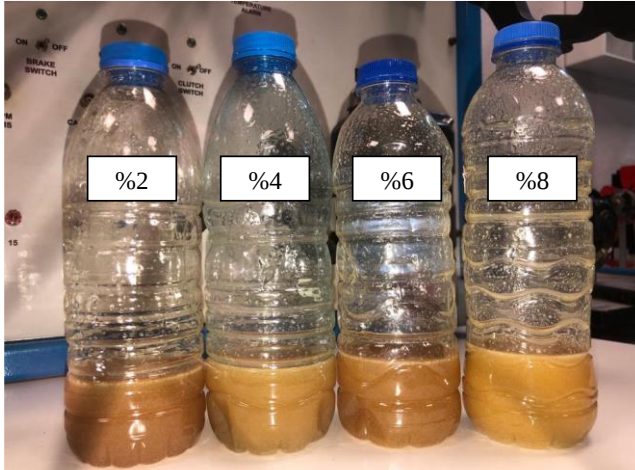
Deneyde kullanılan güç jeneratöründeki motor için sentetik yağ kullanımında yakıt/yağ oranının 100:2 olduğu hatırlanmalıdır. Buna bağlı olarak motor yağına %2, %4, %6 ve %8 kütleli oranda borik asit ilave edilmiştir. Bunun için aşağıdaki adımlar uygulanmıştır. Bu işlemler "Motor Test Laboratuvarı"nda hassas terazi kullanılarak gerçekleştirilmiştir:

- 100 g motor yağı tartılmıştır (Aslında nihai karışım toplam 100 g olarak belirlenebilirdi ancak burada motor yağı miktarını

sabit tutarak bu motor yağına katkıyı ilave edilmesi tercih edilmiştir).

- Belirlenen/arzu edilen oranda borik asit ilave edilmiştir (%2 için 2 g, %4 için 4 g gibi)
- Borik asitin çökmesinin (sedimentasyon) gecikmesi ve topaklanmanın (aglomerasyon) engellenmesi için aynı oranda oleik asit ilave edilmiştir (%2 için 2 g, %4 için 4 g gibi). Bu uygulama homojenliğin sağlanması, çökmenin geciktirilmesi ve topaklanmanın engellenmesi için sıklıkla tercih edilen yöntemlerden birisidir. Oleik asit $C_{18}H_{34}O_2$ kimyasal formülüne sahip bir doymamış yağ asidi olarak bilinmektedir.
- Elde edilen karışım öncelikle mekanik olarak karıştırılmış ve ardından 30 dakika boyunca ultrases banyosunda karıştırılmıştır. Deneylerde kullanım öncesinde çökme kontrol edilmiştir. Eğer çökme varsa deney öncesinde ultrases işlemi tekrar edilmiştir.

Deneyler için hazırlanan borik asit ilaveli motor yağlarının görselleri Resim 3'te gösterilmektedir. Burada ultrases süreci sonrasındaki görseller görülmektedir.

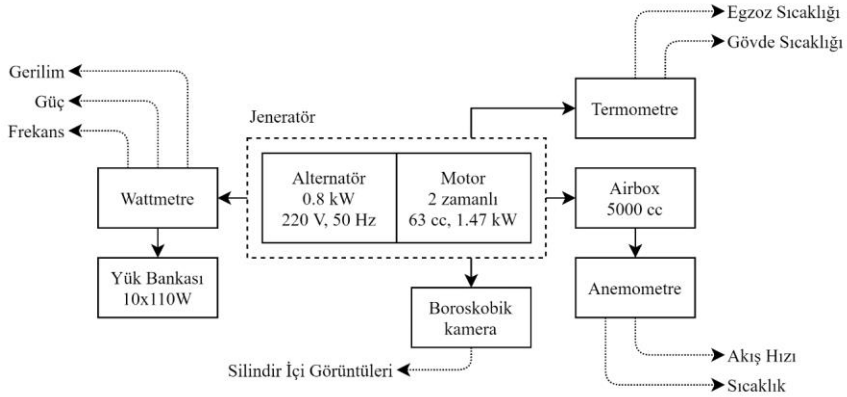


Resim 3. Borik asit ilaveli motor yağları (ultrases süreci sonrası)

Bu örnekler 48 saat boyunca bekletilmiş olup belirli aralıklarda çökme olup olmadığı gözlenmiştir. 12 saat sonrasında çökmenin başladığı, 24 saat sonunda çökmenin belirginleştiği ve 48 saat sonunda ise borik asitin yağ içerisinde tamamen çöktüğü gözlenmiştir. Borik asit ilavesi sonrasında bulanık bir karışım elde edilmiştir. Burada hazırlanan yağlar ile birlikte sabit 100:2 oranında yakıt-yag karışımları hazırlanmış ve deneylerde kullanılmıştır. Elde edilen yakıtlarda herhangi bir görüntü değişikliği meydana gelmemiştir ve bu nedenle burada görseline yer verilmemiştir. Hazırlanan yakıt-yag karışımları 48 saat boyunca bekletilmiş olup belirli aralıklarda çökme olup olmadığı gözlenmiştir. 48 saat sonunda kısmen çökmeye (çok dikkatli bakıldığında görülebilmektedir) rastlanmıştır. Bununla birlikte normal şartlarda iki zamanlı motorlar çalıştırılmadan önce yakıtın bir miktar karıştırılması tavsiye edilmektedir. Bu nedenle bu kısmen çökme durumu basit mekanik karıştırma ile bertaraf edilebilecek düzeyde olduğu kabul edilmiştir. Deneylerde kullanılan yakıtlar kullanım öncesinde makul bir süre mekanik karıştırma süreci uygulanmıştır.

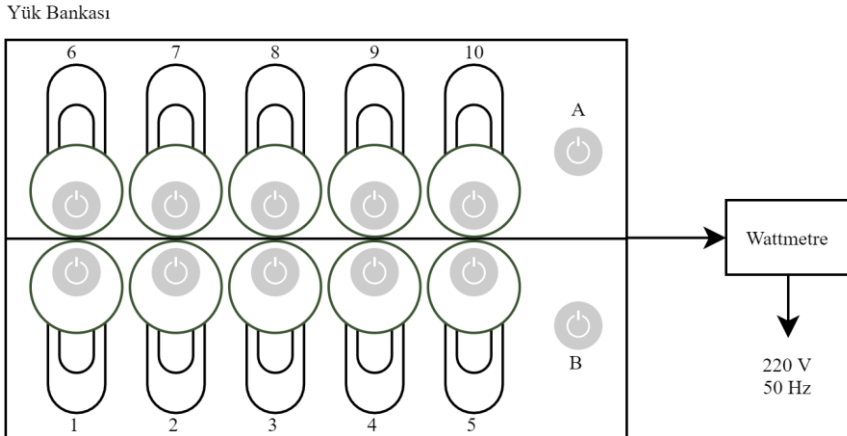
Deney Düzeneği ve Deneysel Prosedür

Deneyler için oluşturulan deney düzeneği Şekil 2’de şematik olarak gösterilmiştir. Burada elde edilen parametreler noktali çizgiler ile gösterilmiştir. Egzoz sıcaklığı için K-tipi termokupl kullanılırken gövde sıcaklığı için lazer termometre kullanılmıştır. Burada motor yükü bir wattmetre ile sürekli olarak ölçülmüştür ve güç, gerilim ve frekans verileri sürekli olarak kaydedilmiştir. Bununla birlikte anemometre ile hava akış hızı ile sıcaklık verileri de sürekli olarak kaydedilmiştir. Boroskopik kamera görüntüleri ise belirli bir yük koşulu için tüm ölçümler bittikten sonra aynı yük koşulunda uzun süre çalıştırma sonrasında elde edilmiştir.



Şekil 2. Deney düzeneği şematiği

Deney düzeneğinde kullanılan yük bankası için bir ön test gerçekleştirilmiştir. Bunun için Wattmetre şebeke prizine (220 V, 50 Hz) takılmış ve halojen ampuller (anma gücü 100 W) anahtarlı duylar yardımıyla çoklu prize takılmıştır. Yapılan ölçümlerde 100 W anma gücüne sahip bir halojen ampulün gerçek gücünün 110 W olduğu belirlenmiştir. Oluşturulan yük bankasının detaylı şematiği Şekil 3'teki gibidir.



Şekil 3. Yük bankası şematiği

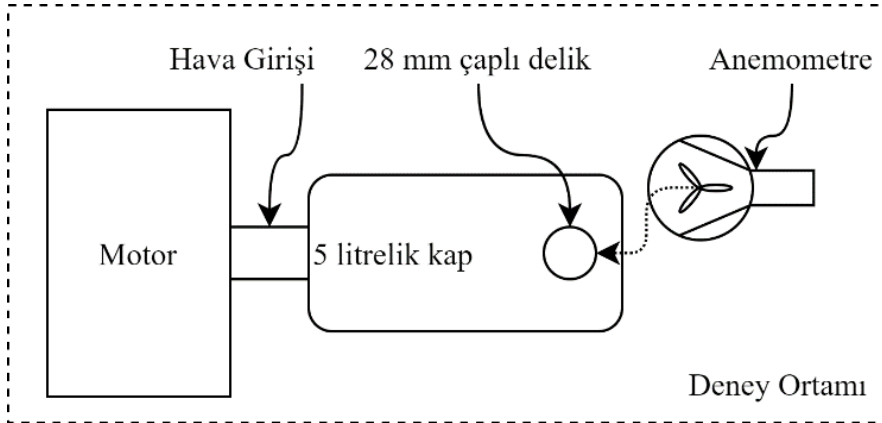
Burada oluşturulan yük bankası yalnızca resisif özellikte (yani yalnızca direnç yükünden meydana geliyor) olduğu için alternatörden sürekli alınabilecek maksimum güç 800W olmaktadır. Buna göre 5 farklı yük durumu belirlenmiştir. Böylelikle yapılan 5 farklı yük, 5 farklı katkı oranı ve sabit yakıt/yağ oranı için 25 farklı deney durumu oluşmaktadır. Bunun için oluşturulan deney matrisi Şekil 4'teki gibi olmaktadır. Deney matrisi hangi koşullarda deney yapılacağını göstermek için kolaylık sağlanmaktadır. Ayrıca bu çalışmada yakıt-yağ oranı sabit bir değer olarak kabul edilmiştir. Örneğin 3 farklı yakıt/yağ oranı belirlenmiş olsaydı deney sayısı 75 olacaktı. Bu durumda Taguchi gibi bir deney tasarımı yöntemi kullanılarak deney sayısı azaltılabilir. Ancak bu çalışma kapsamında belirlenen koşullar için makul bir deney sayısı ortaya çıktığı için herhangi bir deney tasarımı yönteminin kullanılmasına ihtiyaç yoktur. Burada yüksüz durum ve katkısız durum da deney matrisinde yer almaktadır. Şekil 4'te gri olarak gösterilen deneyler aslında motorun standart çalışma durumudur ve bu deney koşullarına göre karşılaştırma yapılması öngörülmektedir. Bu nedenle deney matrisinin gri bölgesi referans durum olarak ifade edilmiştir.

		Yük (W)				
		0	110	330	550	770
Katkı Miktarı (%)	0	✓	✓	✓	✓	✓
	2	✓	✓	✓	✓	✓
	4	✓	✓	✓	✓	✓
	6	✓	✓	✓	✓	✓
	8	✓	✓	✓	✓	✓

Referans
Durum

Şekil 4. Deney matrisi

Airbox yöntemi için 5 litrelik bir plastik şişe kullanılmıştır. Bu şişenin üzerinde hava akışının sağlanması için belirli bir çapta delik oluşturulmuştur. Pratik olarak bu delikten akan havanın hızı, delik alanı ile çarpılarak hacimsel debi belirlenmiştir. Bunun için bu delik çapının yaklaşık olarak belirlenmesi gerekmektedir. 3000 rpm hızda çalışan 63 cc hacmindeki iki zamanlı motor her bir krank turunda 63 cc teorik havaya ihtiyaç duymaktadır. Buna göre bu şartlar için teorik hava tüketimi $3,15 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca hesaplanan teorik hava tüketimi koşulunda anemometreden okunacak değerin keyfi olarak 5 m/s olacağı varsayımı ile delik çapı $28,322 \text{ mm} \approx 28 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir (Şekil 5). Ölçümlere motorun çalışması esnasında şişenin gerek titreşim gerekse hava akışı nedeniyle anlık şekil değişiklikleri meydana gelmesi nedeniyle kesin bir ölçüm yapmak oldukça zordur. Ancak yapılan ölçümler hava tüketimindeki eğilimi belirlemek için kullanılabilir niteliktedir. Bu veri bu çalışma için motordaki yakıt tüketiminin bir göstergesi olarak kullanılmıştır. Sabit bir motor hızı için giren hava miktarı gaz keleşi konumuna bağı olarak değışmektedir. Bu nedenle kısmen hatalı bir yaklaşım olsa da az hava tüketiminde az yakıt tüketimi ve tam tersi olarak çok hava tüketiminde çok yakıt tüketimi olarak yorumlanarak yakıt tüketimi hakkında yaklaşık bir fikir elde edilebilir.



Şekil 5. Airbox yöntemi

Deneylerin deney matrisine göre belirlenen koşullarda yapılması için belirli bir deneysel prosedürün uygulanması gerekmektedir. Bu nedenle deneyler esnasında uygulanan prosedür aşağıdaki gibi kurgulanmıştır:

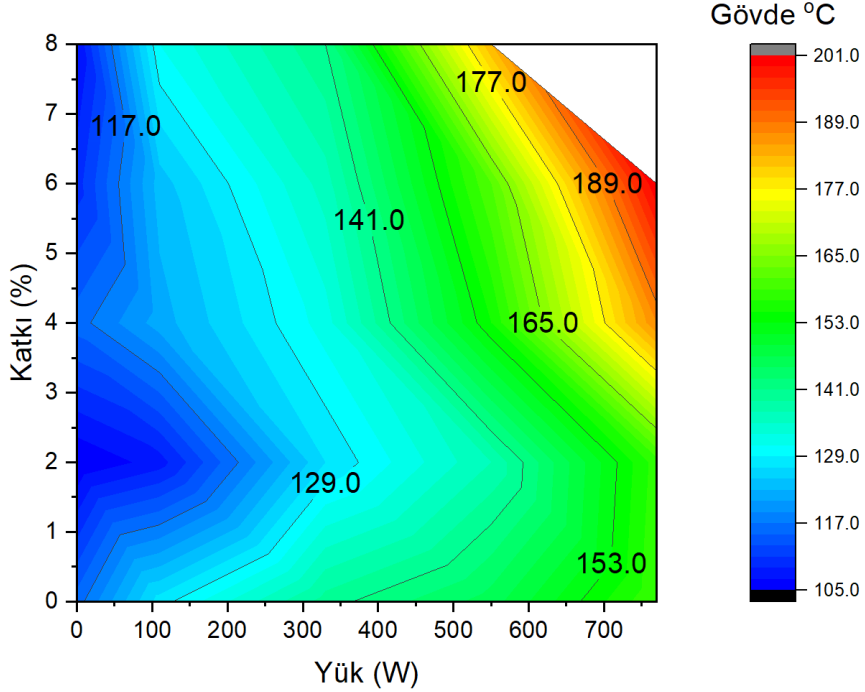
- Yakıt kabına katkısız yağı ile hazırlanan yakıttan bir miktar koyulmuştur ve ardından yüksüz olarak motorun kararlı çalışma durumuna gelmesi beklenmiştir. Burada motor ilk çalıştırmada soğıuk olduğıundan dolayı jikle açıkken çalıştırılmıştır. Birkaç dakika sonra jikle kapatılmıştır. Yapılan gözlemlerde gövde sıcaklığı 105–107°C'ye ulaştığıında motor kararlı durumda olmaktadır ve bu sabit sıcaklıkta motor çalışmaktadır.
- Isınan motor durdurularak yakıt kabındaki yakıt boşaltılmış ve ardından deney yapılacak olan yakıt eklenmiştir. Bu işlem çok hızlı yapılmıştır ve motor henüz çok soğıumadan yakıt değışimi tamamlanmıştır.
- Motor, yük bankası yardımı ile arzu edilen yüke getirilmış ve gövde sıcaklığı kararlı hale gelinceye kadar beklenmiştir.
- Wattmetre ile frekans kontrol edilmiştir ve 50 Hz değıerine ulaşıncaya kadar motor üzerindeki hız sabitleme mekanizmasından ayar yapılmıştır.
- Gövde sıcaklığı, egzoz sıcaklığı ve hava akış hızı kayıt edilmiştir.
- Deney güvenilirliğı için deneyler art arda üçer kez tekrar edilmiş ve verilerde bir uyumsuzluk olması durumunda deney baştan tekrar edilmiştir.
- Tüm yükler için deneyler tamamlanınca motorun soğıuması beklenmiş ve motor soğıuduktan sonra buji sökülmüş ve fotoğraflanmıştır.
- Boroskobik kamera yardımıyla silindir içi görüntülenmiştir.

Burada ifade edilen maddeler deney matrisinde yer alan yük ve katkı miktarı şartları için uygulanmıştır. Ayrıca motorun bujisi her deney yakıtı için yenisi ile değiştirilmiştir.

Bulgular

Bu çalışmanın amacının yağlama yağına borik asit ilavesinin gövde ve egzoz sıcaklığının etkilerinin incelenmesiyle sınırlandırıldığı hatırlanmalıdır. Ayrıca deneylerde bir güç jeneratörü kullanıldığından dolayı elektriksel yükün motor yüküne eşdeğer olarak kullanılmıştır. Bunun için yük ve katkı miktarının değişimine bağlı olarak gövde sıcaklığı, egzoz sıcaklığı ve hava akış hızı verilerinin “kontur” grafikleri çizilmiştir. Bu çalışma kapsamında tasarlanan 25 deneyin 24 tanesi başarı ile tamamlanmış olup %8 katkı oranı ve 770 W yük altındaki deneylerde motorun zarar görmesi riskine karşı yapılmamıştır. Çünkü bu koşullarda gövde sıcaklığı aşırı yükselmektedir.

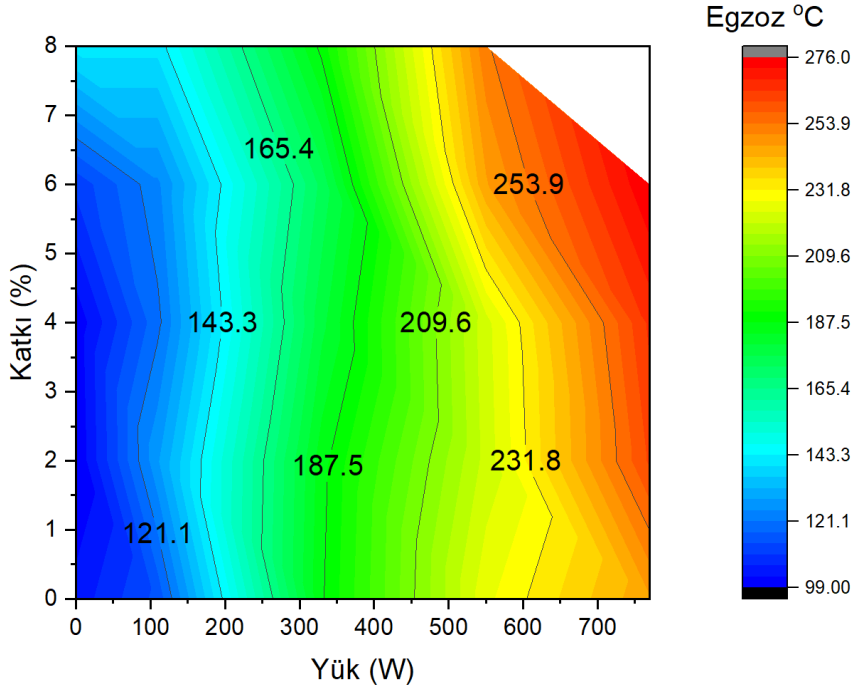
Yük ve katkı oranına bağlı olarak gövde sıcaklığının değişimi Grafik 1’de sunulmuştur. Grafikte sağ üst köşedeki beyaz alan %8 borik asit katkılı durumda 770 W yük altında yapılamayan deneyi temsil etmektedir. Herhangi bir sabit yük durumu için gövde sıcaklığı değişimi incelendiğinde katkı miktarının artması gövde sıcaklığının artmasına neden olduğu görülmektedir. Yük miktarı arttıkça katkı miktarına bağlı olarak gövde sıcaklığındaki artış da artma eğilimindedir. Düşük yüklerde belli olmasa da özellikle yüksek yüklerde katkı miktarının gövde sıcaklığını yükseltecek şekilde etki ettiği net olarak görülmektedir. Örneğin %2 katkı oranında 770 W yük altındaki gövde sıcaklığı yaklaşık 150°C iken aynı koşullar için %6 katkı oranında gövde sıcaklığı yaklaşık 190°C’ye kadar ulaşmaktadır.



Grafik 1. Yük ve katkı oranına bağlı olarak gövde sıcaklığının değişimi

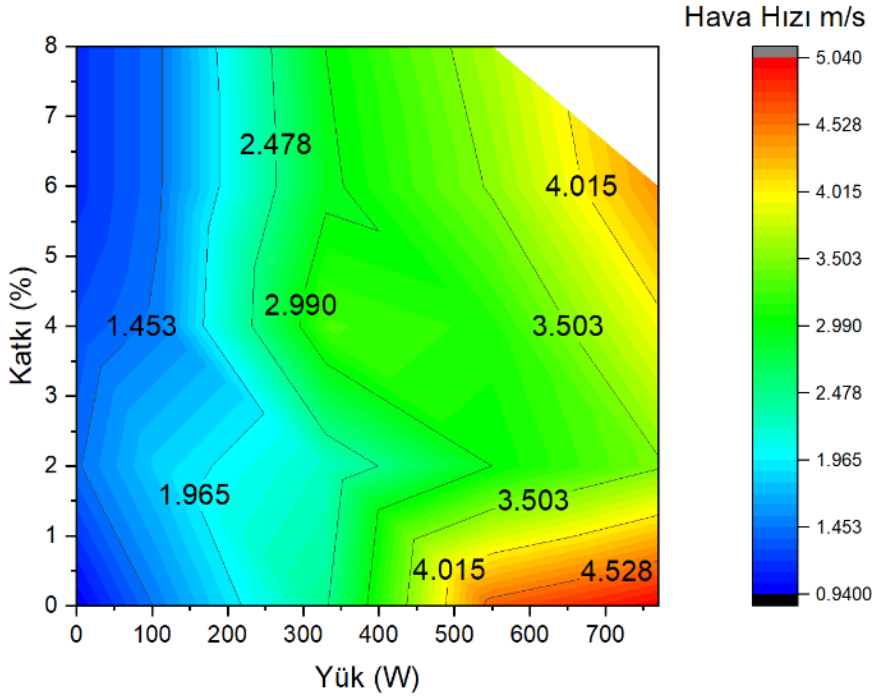
Yük ve katkı oranına bağlı olarak egzoz sıcaklığının değişimi Grafik 2’de sunulmuştur. Egzoz sıcaklığındaki eğilim de gövde sıcaklığındaki eğilimle kısmen benzerlik göstermektedir. Gövde sıcaklığında olduğu gibi katkı miktarı arttıkça egzoz sıcaklığı artış eğilimindedir. Egzoz sıcaklığındaki bu sıcaklık artış eğilimi gövde sıcaklığı artış eğilimi kadar belirgin değildir. Örneğin %2 katkı oranında 550 W yük altındaki egzoz sıcaklığı yaklaşık 200°C iken aynı koşullar için %6 katkı oranında gövde sıcaklığı yaklaşık 230°C’ye kadar ulaşmaktadır. Burada egzoz sıcaklığının daha yüksek değerlerde olması beklenir ancak egzoz gazları deneyler yapılırken belirlenen ölçüm noktasına ulaşmaya kadar soğumaktadır. Çünkü motorun egzoz portundan çıkan gazlar egzoz borusu yardımıyla susturucuya ulaşmaktadır. Gazlar susturucudan

geçerken öncelikle rezonator kabına dolmakta ve ardından perforasyon kanallarından geçerek çıkmaktadır. Bu esnada enerjilerinin (ısı yüklerinin) büyük bir kısmı gazdan susturucuya aktarılmış olmaktadır.



Grafik 2. Yük ve katkı oranına bağlı olarak egzoz sıcaklığının değişimi

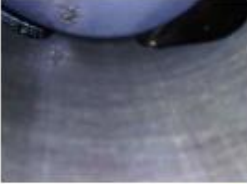
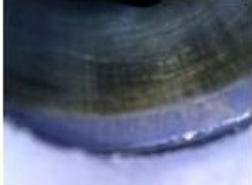
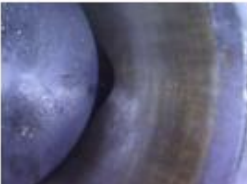
Yük ve katkı oranına bağlı olarak hava akış hızının değişimi Grafik 3'te sunulmuştur. Hava hızı gaz keleşği açıklığının bir göstergesidir. Yük artışına bağlı olarak beklendiği gibi hava hızının arttığı görülmektedir. Bununla birlikte katkı oranı artışına bağlı olarak hava hızının azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Dikkat edilirse düşük katkı oranlarının bile hava hızına etkisi net olarak görülebilmektedir.



Grafik 3. Yük ve katkı oranına bağlı olarak egzoz sıcaklığının değişimi

Yukarıdaki grafikler deney matrisine göre yapılan deneylerin sonuçlarını göstermektedir. Deney matrisine göre deneyler öncelikle yük sabit tutularak tüm katkı oranları için yapılmıştır. Sabit yük için yapılan deneylerin ardından motor uzun süreli çalıştırılmış ve ardından buji sökülerek boroskopik kamera ile incelenmiştir. Bu uzun süreli çalıştırma sonucunda elde edilen görüntüler bir tablo halinde sunulmuştur (Tablo 3).

Tablo 3. Buji ve silindir içi görüntüleri

Katkı Oranı	Buji Görüntüsü	Silindir İçi Genel Görüntüsü	Silindir İçi Detay Görüntüsü
%0			
%2			
%4			
%6			
%8			

Daha önce de ifade edildiği gibi her deney seti için yeni buji kullanılmıştır. Bu görsellerin elde edilmesi için jeneratör farklı yüklerde bir süre çalıştırılmıştır. Buji görselleri incelendiğinde borik asit ilavesiyle birlikte bujinin daha temiz kaldığı gözlenmiştir. Bununla birlikte sıcaklık etkisiyle bujideki renk değişimi

incelendiğinde katkı oranı arttıkça renk değişiminin de fazlaştığı gözlenmiştir. Silindir içi için genel ve detay olmak üzere ikişer görsel sunulmuştur. Burada piston hareketi doğrultusundaki çizilmeler ve kurum oluşumu incelenmiştir. Borik asit ilavesi ile birlikte silindir yüzeyinde herhangi bir çizilme veya kurum oluşumuna rastlanmamıştır.

Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada borik asitin iki zamanlı motor yağına %2-%8 aralığında ilave edilmesiyle egzoz ve gövde sıcaklığının değişimi deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmada iki zamanlı motor yağına borik asit ilave edildiğinde motor daha yüksek sıcaklıklarda çalışmakta ve bu nedenle motor parçaları daha fazla termal yüke maruz kalmaktadır. Yapılan deneylerde katkı oranı arttıkça hem gövde sıcaklığı hem de egzoz sıcaklığı artmıştır. Çalışma kapsamında olmamasına rağmen üçüncü parametre olarak hava akış hızı da bir anemometre yardımıyla ölçülmüştür. İlginç olarak motor yağına borik asit ilavesi ile birlikte hava akış hızı da azalmıştır. Bu durum yakıt tüketiminin azalması olarak da yorumlanabilir. Kaba bir hesaplama olarak motor yağına %4 oranında borik asit ilavesi, esasen yakıt-yag karışımında %0,08 (onbinde sekiz) oranında borik asit olduğu anlamına gelmektedir. Az miktarlardaki borik asit bile motor performansını ve çalışma karakteristiğini önemli ölçüde değiştirmektedir. Basit bir değerlendirme olarak borik asit katkısı ile birlikte yanmanın da iyileştiği söylenebilir. Gövde sıcaklığının artması yanmanın da iyileştiği olarak yorumlanabilir. Ayrıca uzun çalışma sonucundaki buji görselleri de yanmanın iyileştiğinin basit bir göstergesidir.

Öneriler

Bu çalışmada lisans öğretimi düzeyinde temel bir motor test düzeneği oluşturulmuş ve veriler elde edilmiştir. Bununla birlikte bu çalışma yakıt tüketimi ölçümü ve emisyon ölçümü yapılarak geliştirilebilir. Bununla birlikte optimum yağ miktarının belirlenmesi için deneysel bir çalışma yapılabilir. Ayrıca yakıt-yag

oranı bu çalışmada sabit tutulmuştur. Yakıt-yağ oranı da değiştirilerek elde edilen veriler detaylandırılabilir. Ancak bu durumda örneğin 4 farklı yakıt-yağ oranı belirlenmesi durumunda 100 deney yapılması gerekmektedir. Bu 100 deneyi yapmak yerine istatistiki analiz programları kullanılarak deneysel tasarım (design of experiment) yapılarak deney sayısı azaltılabilir ve sonuçlar istatistiki olarak karşılaştırılabilir. Ayrıca bu çalışmada yalnızca borik asitin etkileri incelenmiştir. Literatürden de faydalanarak bor türevi veya bor türevi olmayan başka malzemelerin etkileri de deneysel olarak incelenebilir ve buradaki sonuçlarla karşılaştırılabilir.

Bilgilendirme

Bu deneysel çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu,'nun (Tübitak) 2209-A “*Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı*” kapsamında 2021-2 döneminde mali destek almış olan “*İki Zamanlı Motorların Yağlama Yağına Borik Asit İlavesinin Gövde ve Egzoz Sıcaklığına Etkisinin İncelenmesi*” adlı projenin öngörülen/hedeflenen yaygın etkisinin oluşturulması doğrultusunda hazırlanmıştır. Yazarlar deneysel çalışma için sağlamış olduğu mali destekten dolayı Tübitak’a teşekkür eder.

KAYNAKÇA

Abdullah, M. I. H. C., Abdollah, M. F. B., Amiruddin, H., Tamaldin, N., & Nuri, N. R. M. (2013). Optimization of Tribological Performance of hBN/AL₂O₃Nanoparticles as Engine Oil Additives. *Procedia Engineering*, 68, 313-319. Doi: 10.1016/j.proeng.2013.12.185

Abdullah, M. I. H. C., Abdollah, M. F. B., Amiruddin, H., Tamaldin, N., & Nuri, N. R. M. (2016). The potential of hBN nanoparticles as friction modifier and antiwear additive in engine oil. *Mechanics & Industry*, 17(1), 104. Doi: 10.1051/meca/2015037

Ali, M. K. A., Fuming, P., Younus, H. A., Abdelkareem, M. A., Essa, F. A., Elagouz, A., & Xianjun, H. (2018). Fuel economy in gasoline engines using Al₂O₃/TiO₂ nanomaterials as nanolubricant additives. *Applied energy*, 211, 461-478. Doi: 10.1016/j.apenergy.2017.11.013

Ali, M. K. A., Xianjun, H., Mai, L., Bicheng, C., Turkson, R. F., & Qingping, C. (2016-1). Reducing frictional power losses and improving the scuffing resistance in automotive engines using hybrid nanomaterials as nano-lubricant additives. *Wear*, 364, 270-281. Doi: 10.1016/j.wear.2016.08.005

Ali, M. K. A., Xianjun, H., Mai, L., Qingping, C., Turkson, R. F., & Bicheng, C. (2016-2). Improving the tribological characteristics of piston ring assembly in automotive engines using Al₂O₃ and TiO₂ nanomaterials as nano-lubricant additives. *Tribology International*, 103, 540-554. Doi: 10.1016/j.triboint.2016.08.011

Arcoumanis, C. (Ed.). (2012). *Internal combustion engines*. Elsevier.

Arumugam, S., Sriram, G., & Ellappan, R. (2014). Bio-lubricant-biodiesel combination of rapeseed oil: An experimental investigation on engine oil tribology, performance, and emissions of

variable compression engine. *Energy*, 72, 618-627. Doi: 10.1016/j.energy.2014.05.087

Ay, N., Ay, G. M., & Göncü, Y. (2016). Environmentally friendly material: Hexagonal boron nitride. *Bor Dergisi*, 1(2), 66-73.

Blair, G. P. (1996). *Design and simulation of two-stroke engines*. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.

Cheenkachorn, K., & Fungtammasan, B. (2010). Development of engine oil using palm oil as a base stock for four-stroke engines. *Energy*, 35(6), 2552-2556. Doi: 10.1016/j.energy.2010.03.002

Davis, D., Shah, A. F., Panigrahi, B. B., & Singh, S. (2019). Effect of Cr₂AlC nanolamella addition on tribological properties of 5W-30 engine oil. *Applied Surface Science*, 493, 1098-1105. Doi: 10.1016/j.apsusc.2019.07.097

Dinesh, R., Prasad, M. G., Kumar, R. R., Santharaj, N. J., Santhip, J., & Raaj, A. A. (2016). Investigation of tribological and thermophysical properties of engine oil containing nano additives. *Materials Today: Proceedings*, 3(1), 45-53. Doi: 10.1016/j.matpr.2016.01.120

Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü. (2019). Borik Asit Kullanımı. <https://www.etimaden.gov.tr/storage/pages/March2019/1-borik-asit1.pdf> (Erişim Tarihi: 17.10.2023).

Ferguson, C. R., & Kirkpatrick, A. T. (2015). *Internal combustion engines: applied thermosciences*. John Wiley & Sons.

Fernando, S., & Hanna, M. (2001). Comparison of viscosity characteristics of soybean oils with a mineral oil two-stroke engine lubricant. *Transactions of the ASAE*, 44(6), 1403.

Hampden-Thompson, G. & Galindo, C. (2017) School-family relationships, school satisfaction and the academic achievement of young people. *Educational Review*, 69 (2), 248-265. Doi: 10.1080/00131911.2016.1207613

Heywood, J. B., & Sher, E. (2017). *The two-stroke cycle engine: its development, operation, and design*. Routledge.

Jayadas, N. H., Nair, K. P., & Ajithkumar, G. (2007). Tribological evaluation of coconut oil as an environment-friendly lubricant. *Tribology international*, 40(2), 350-354. Doi: 10.1016/j.triboint.2005.09.021

Kline, B. R. (2005). *Principles and practice of structural equation modeling* (Second edit). NY: The Guilford Press.

Kurt, Ümit, Can, M., Yahşi, M., Adıgüzel, N., Özkul, H., Turhan, A., Doğan, M. B., & Üzer, S. (2023). Bor madenleri nedir? Nerelerde kullanılır? Türkiye ekonomisine etkileri ve dünyadaki yeri. *International Journal of Social and Humanities Sciences Research (JSHSR)*, 10(94), 937–946. Doi: 10.26450/jshsr.3618

Martyr, A. J., & Plint, M. A. (2011). *Engine testing: theory and practice*. Elsevier.

Masjuki, H. H., & Maleque, M. A. (1996). Wear, performance and emissions of a two-stroke engine running on palm oil methyl ester blended lubricant. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 210(4), 213-219. Doi: 10.1243/PIME_PROC_1996_210_503_02

Millers Oils <https://www.millersoils.fr/en/do-you-have-a-2-stroke-oil-suitable-for-older-2-stroke-engines/> (Erişim tarihi: 14.10.2023).

Öğüt, H., Oğuz, H., Aydın, F., Ciniviz, M., & Deveci, H. (2019). The investigation of the use of plant-based wild mustard and boron doped oil as engine lubrication oil in diesel engines. *Renewable energy*, 136, 79-83. Doi: 10.1016/j.renene.2018.12.117

Orman, R. Ç. (2022). İki Zamanlı Benzinli Motorların Teorik Çevrimlerinin Parametrik İncelenmesi . *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 10 (3) , 641-649. Doi: 10.29109/gujsc.115563

Orman, R. Ç. (2023). Effect of Adding Hexagonal Boron Nitride (hBN) Nano-Powder to Lubricant on Performance and Emissions in a Two-Stroke Gasoline Engine. *Sustainability*, 15(19), 14605. Doi: 10.3390/su151914605

Pulkrabek, W. W. (2004). *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*. Pearson.

Wu, B., Song, H., Li, C., Song, R., Zhang, T., & Hu, X. (2020). Enhanced tribological properties of diesel engine oil with Nano-Lanthanum hydroxide/reduced graphene oxide composites. *Tribology International*, 141, 105951. Doi: 10.1016/j.triboint.2019.105951

Yenmez, N. (2009). Stratejik Bir Maden Olarak Bor Minerallerin Türkiye İçin Önemi . *Coğrafya Dergisi* , 0 (19) , 59-94

Zulfattah, Z. M., Zulkifli, N. W. M., Masjuki, H. H., Harith, M. H., Syahir, A. Z., Norain, I., Arslan, A. (2019). Effect of bio-based lubricant towards emissions and engine breakdown due to spark plug fouling in a two-stroke engine. *Journal of Cleaner Production*, 221, 215-223. Doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.224

BÖLÜM VIII

Absorbsiyonlu-Buhar Sıkıştırırmalı Kaskad Soğutma Sisteminin Enerji, Ekserji ve Çevresel Analizi

Ali Haydar GÜNDÜZ¹
Canan CİMSİT²

Giriş

Absorbsiyonlu soğutma sistemlerinde günümüzde güneş enerjisi, jeotermal enerji, atık ısılar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılabilir olması ve bu sistemlerde kullanılan soğutucu akışkanların ozon tabakasına zarar vermemesi nedeniyle bu soğutma sistemlerine olan ilgiyi artırmaktadır. Absorbsiyonlu soğutma sistemleri ile ilgili olarak literatürde teorik ve deneysel olarak birçok çalışma yapılmıştır. LiBr-H₂O çifti ile çalışan tek etkili absorbsiyonlu soğutma sisteminin ekserji analizini ısıtma ve soğutma uygulamaları için yapılmış olup, çalışmada değişen çalışma koşullarında (evaporatör soğutma suyu ve ısıl kaynak sıcaklığı)

¹ Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Umuttepe-Kocaeli, alihaydargunduz41@gmail.com

² Kocaeli Üniversitesi, Gölcük MYO, Gölcük-Kocaeli, ccimsit@kocaeli.edu.tr

sistemin birinci ve ikinci yasa verimlilikleri hesaplanıp karşılaştırılmıştır. Analiz sonucunda sistemdeki en yüksek ekserji yıkımları sırasıyla absorber ve kaynatıcıda çözeltideki karıştırma ısısından kaynaklı ortaya çıktığı saptanmış ayrıca ısı kaynağı ve evaporatör soğutma suyu sıcaklığı arttırıldığında COP ve ITK da artış olduğu ancak ekserji verimliğinde azalma olduğu gözlemlenmiştir (Şencan vd, 2005). LiBr-H₂O ve NH₃-H₂O kullanılarak güneş enerjisi destekli absorbsiyon soğutma sisteminin ekserji analizi yapılmıştır. Çalışmada kaynatıcı ısıtma suyunun değişimiyle sistemdeki ekserji yıkımı incelenmiştir. Belirli kaynatıcı sıcaklığı aralığında NH₃-H₂O çözeltisinin toplam ekserji yıkımının LiBr-H₂O çiftinden önemli ölçüde yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Khaliq ve Kumar 2007). LiBr-H₂O çifti ile çalışan tek etkili ve seri akışlı çift etkili absorbsiyonlu soğutma sisteminin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Çalışmada evaporatör, absorber ve kaynatıcı sıcaklıklarının sistemin enerji ve ekserji performansına etkisi gözlemlenmiştir (Kaushik ve Arora, 2009). Güneş enerjisi ile çalışan absorbsiyonlu soğutma sisteminde geleneksel akışkan LiBr-H₂O çiftine alternatif LiCl-H₂O çiftinin kullanımını araştırılmış ve iki akışkan çiftinin ekserji ve enerji analizi sonuçları karşılaştırılmıştır (Bellos vd, 2016). Konutlar için güneş enerjisi destekli NH₃-H₂O çifti ile çalışan tek etkili absorbsiyonlu soğutma sisteminin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. 10 kW soğutma kapasitesine sahip çalışma parametreleri ($T_J=80^{\circ}\text{C}$, $T_A=30^{\circ}\text{C}$, $T_C=30^{\circ}\text{C}$, $T_E=2^{\circ}\text{C}$ ve $\epsilon=0,8$) olan sistem üzerinde çeşitli sistem parametrelerinin değişimine göre sistemin değişiminin üzerine çalışılmıştır. Analiz sonucunda sistemin COP'u 0,60, ekserji verimi ise %32,01 saptanmıştır (Aman vd, 2014).

Literatür incelendiğinde iklimlendirmede çalışmalarında en fazla kullanılan absorbsiyonlu soğutma sistemi olan LiBr- H₂O çiftinin verimini arttırmak için birçok çalışma görülmüştür. Çalışma akışkanları olarak LiBr-H₂O, LiSSC ve LiCl-H₂O çifti kullanılan tek etkili absorbsiyonlu soğutma sisteminde enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Çalışma sonucunda LiCl-H₂O çiftinin farklı çalışma sıcaklıklarında en yüksek COP ve ekserjetik verimi verdiği

gözlemlenmiştir (Altınkaymak ve Şahin,2020). Absorbsiyonlu soğutma sisteminde LiBr sulu çözeltisinin çözünürlüğünü iyileştirmek için (LiBr+LiI+LiNO₃ +LiCl) oluşan tuz çözeltisinin deneysel analizi yapılmıştır ve aynı LiBr-H₂O ile çalışan sistemin deneysel sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda çok bileşenli tuz çözeltisinin daha yüksek çözünürlüğünün absorberde geleneksel tuz çözeltisine göre daha yüksek konsantrasyonda çalışmasını mümkün kıldığı görülmüştür (Bourouis vd, 2005).

Güneş enerji destekli absorbsiyonlu soğutma sisteminde LiBr-H₂O ile çalışan sisteme alternatif olarak CaCl₂-LiBr-LiNO₃(8.72:1:1)/H₂O oluşan tuz çözeltisinin karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırma sonucunda çok bileşenli çözelti için gerekli olan kolektör sıcaklığının LiBr/H₂O ile çalışan sisteme göre 7,7 °C düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca çok bileşenli çözeltinin COP'si yaklaşık olarak 0,04 fazla olduğu saptanmıştır (Li vd, 2018). H₂O-(LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl) çok bileşenli tuz çözeltisiyle LiBr/H₂O ile çalışan tek etkili absorbsiyonlu soğutma sistemini çeşitli çalışma koşullarında karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda çok bileşenli çözeltinin geleneksel çözeltiye göre %9 daha fazla COP değeri verdiği saptanmıştır (Banu vd, 2020). Çok bileşenli tuz çözeltilerinin ticari anlamda kullanılabilirliği büyük önem arz etmektedir. Yüksek birim maliyetine sahip tuzlar tercih edilmemektedir. Örneğin, H₂O-(LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl) çalışma akışkanında LiI tuzunun birim maliyeti çok yüksek olduğu için tercih edilmesi söz konusu değildir.

Literatürde derin soğutma yapmak için tek etkili absorbsiyon sistemlerinin yerine buhar sıkıştırırmalı soğutma sistemi ile çalışan kaskad sistemler görülmüştür. Buhar sıkıştırırmalı ve absorbsiyonlu soğutma sisteminin birlikte çalıştığı kaskad soğutma sisteminin enerji analizi yapılmıştır. Yapılan çalışmada absorbsiyonlu kısımda LiBr/H₂O ve NH₃/H₂O buhar sıkıştırırmalı kısımda ise R134a, R-410A ve NH₃ soğutucu akışkanları kullanılmıştır. Yapılan analiz doğrultusunda kaskad çevrimin aynı çalışma koşullarında çalışan buhar sıkıştırırmalı çevrime göre %48-51 daha az enerji tüketiminin

olduğunu saptamıştır (Cimşit ve Öztürk, 2012). Üst çevrimde LiBr-H₂O alt çevrimde R22 akışkanları ile çalışan kaskad soğutma çevriminin analizi yapılmış ve tek etkili buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimiyle karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmada kaskad sistem kullanıldığında elektrik gücü tüketiminin aynı çalışma şartlarındaki buhar sıkıştırırmalı sisteme göre %61 azaldığı gözlemlenmiştir (Jain vd, 2013). Güneş enerjisi ile çalışan kaskad soğutma sisteminin enerji, ekserji, ekonomik ve çevre analizi yapılmıştır. Çalışmada üst çevrimde LiBr/H₂O alt çevrimde ise R134a kullanmıştır. Analizler sonucunda düşük soğutma sıcaklıklarında sistemin daha ekonomik olduğu saptamıştır. Ekonomik analizde ise geri ödeme süresinin 14 yıla yakın olduğu belirtilmiştir (Bellos vd, 2017). Jeotermal enerji ile çalışan kaskad sisteminin analizi yapılmıştır. Yapılan analizde absorpsiyonlu kısımda LiBr-H₂O LiCl-H₂O buhar sıkıştırırmalı kısımda ise düşük küresel ısınma potansiyeline sahip HFO klasmanındaki R1234yf, R1234ze (E) ve R1233zd (E) akışkanları kullanılmıştır. Tüm sistemin COP değerleri (0.432- 0.659) arasında değişiklik göstermiştir. Belirlenen koşullarda en iyi performansı LiBr-H₂O/R1234yf çiftinin verdiği gözlemlenmiştir. Kaskad soğutma sisteminin ileri ekserji analizi yapılmıştır. Çalışmada üst çevrimde NH₃/H₂O alt çevrimde ise R134A, R152a, R717, R290, R407C ve R507A akışkanlarını kullanmıştır. Analiz sonucunda ise en yüksek tersinmezliğin azeotropik akışkanlarda olduğu gözlemlenmiştir (Ustaoglu, 2020).

Kyoto ve Montreal protokolleri ile bazı soğutucu akışkanların çevreye ve ozon tabakasına zarar vermesinden dolayı yasaklanması ve zamanla kaldırılması sonucuna varılmıştır. Yapılan bu protokoller doğrultusunda buhar sıkıştırırmalı kısımda kullanılacak soğutucu akışkan seçimi konusunda termodinamiksel verimin yanında çevresel etkilerde önemli bir parametre haline gelmiştir. Son zamanlarda yapılan çalışmalara bakıldığında soğutma sektöründe en fazla kullanılan akışkanlara rakip bulunması için birçok çalışma mevcuttur. İç ısı değiştiricili buhar sıkıştırırmalı soğutma çevriminde R22 ve R134a yerine HC soğutucu akışkanlar olan R290 ,R600, R600a R1270'in enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Çalışma

sonucunda R1270 ve R600'ün enerjetik ve ekserjetik verimlerinin R290 ve R600A'ya göre yüksek çıktığı gözlemlenmiştir (Bayrakçı ve Özgür, 2009). R134a yerine geçebilecek daha ekolojik R290, R600a, R1234yf soğutucu akışkanlarını enerji, ekserji, çevre ve termoekonomik analiz yaparak karşılaştırmıştır. Yapılan analizler sonucunda R134a yerine geçebilecek en uygun akışkanın R290 olduğu belirtmiştir (De Paula vd, 2020). R134a yerine benzer termofiziksel özellik gösteren R513A ile enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda kapasite, COP ve ekserji veriminde R513A düşük sonuçlar verirken geniş çalışma koşullarında daha düşük tersinmezlik olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda ise R513a'lı sistemin enerji ekserji veriminin artırılması için kompresörün yeniden dizayn veya tekrar seçilmesi gerektiği belirtilmiştir (Sun vd, 2020). R22 R134a akışkanlarına alternatif olarak düşük çevresel etki, yüksek enerji verimliliğine sahip (HC,HFO,HFC) akışkanların 1 etkili ve 2 etkili buhar sıkıştırmalı soğutma sistemlerinde enerji analizi yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda siklopentanın 2 çevrimdede en yüksek COP'ye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Enerji analizi göz önüne alındığında siklopentanın en uygun akışkan olduğu sonucuna varılmış ancak yanıcı olduğu için ekstra önlem alınması gerektiği belirtilmiştir (Saleh vd, 2020). İç ısı değiştiricisine sahip kaskad buhar sıkıştırmalı soğutma çevriminin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Yapılan çalışmada alt çevrimde R41 üst çevrimde ise R601,R602a ve siklopentan kullanılmıştır. Yapılan analiz sonucunda R41/R601 ikilisinin diğer çiftlere göre daha iyi performans verdiği gözlemlenmiştir (Aktemur ve Öztürk, 2021). Yaptıkları deneysel çalışmada iç ısı değiştiricisine sahip buhar sıkıştırmalı soğutma çevriminde, R513a ile R134a'yı karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda optimum akışkan kütlelerinde R513a'nın daha düşük olduğunu ve soğutucu akışkan şarj miktarının %6,25 daha az olduğu gözlemlenmiştir (Garcia vd, 2022). LiBr+LiCl/H₂O ile çalışan güneş enerji destekli tek etkili absorpsiyonlu soğutma sisteminin enerji ve ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda incelenen sistem

LiBr-H₂O ile çalışan sisteme göre, %48,93 daha düşük sirkülasyon oranına, %8,81 daha yüksek performans katsayısına (COP), %8,88 daha yüksek güneş enerjisi COP'sine, %8,96 daha yüksek ekserji verimliliğine, %8,90 daha yüksek ekserji verimliliğine sahip olduğu saptanmıştır (Aktemur ve Öztürk, 2022).

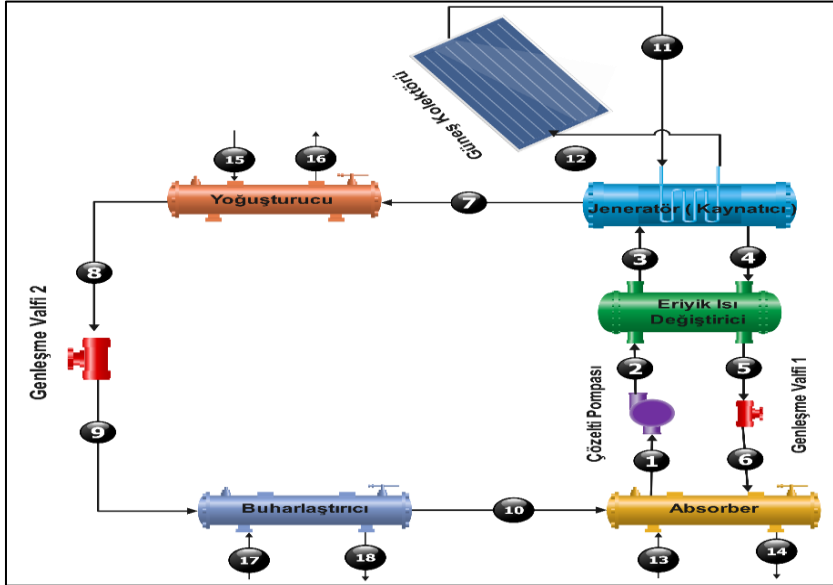
Bu çalışmada absorbsiyonlu soğutma çevriminde LiCl-H₂O soğutucu akışkan çiftinin kullanılması durumunda enerji ve ekserjiye dayalı termodinamik analizi yapılmıştır. LiCl-H₂O absorbent çifti seçildikten sonra derin soğutma yapmak amacıyla tek etkili absorbsiyonlu soğutma sistemi ile birlikte çalışan buhar sıkıştırırmalı kaskad soğutma sistemi düşünülmüştür. Buhar sıkıştırırmalı soğutma çevriminde uygun soğutucu akışkan çiftlerini belirlemek için düşük ODP ve GWP değerlerine sahip HC, HFO, HFC, zeotropik tip akışkanlar aynı çalışma koşullarında enerjiye ve ekserjiye dayalı karşılaştırılmalı analizi yapılmıştır. Buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimi ile birlikte absorbsiyonlu soğutma çevriminin birleştirilmesi ile oluşturulan kaskad soğutma sistem için enerji ve ekserji analizi yapılmış ve aynı çalışma koşullarındaki buhar sıkıştırırmalı soğutma sistemine göre harcadığı elektrik enerjisi karşılaştırılmıştır.

TERMODİNAMİK ANALİZ MODELİ

Bu bölümde analiz edilecek çevrimler tanıtilarak, enerji, ekserji ve çevresel analizlerinde kullanılan bağıntılar açıklanacaktır.

Tek Kademeli Absorbsiyonlu Soğutma Çevrimi

LiCl-H₂O akışkan çifti kullanıldığı kabul edilerek oluşturulan absorbsiyonlu soğutma çevrimi Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Absorbsiyonlu soğutma çevrimi

Absorbsiyonlu soğutma sisteminin birinci kanun kapsamındaki analizi için Süreklilik denklemi ve Termodinamiğin 1. Kanunu aşağıda verilmiştir (Çengel ve Boles 2007).

Süreklilik denklemi

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \quad (1)$$

Termodinamiğin 1. Kanunu:

$$\dot{Q}_{KH} + \sum_g \dot{m}_g \left(h_g + \frac{v_g^2}{2} + gz_g \right) = \sum_ç \dot{m}_ç \left(h_ç + \frac{v_ç^2}{2} + gz_ç \right) + \dot{W}_{KH} \quad (2)$$

Analiz edilen absorpsiyonlu soğutma sistemine ait enerji denklemleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Analiz edilen absorbsiyonlu soğutma sisteminin enerji denklikleri.

Bileşen	Enerji Denklemi	Denklem No
Kaynatıcı	$\dot{Q}_J = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_3 h_3$	(3)
Yoğuşturucu	$\dot{Q}_K = \dot{m}_7 (h_7 - h_8)$	(4)
Absorber	$\dot{Q}_A = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{10} h_{10} - \dot{m}_1 h_1$	(5)
Buharlaştırıcı	$\dot{Q}_E = \dot{m}_{10} (h_{10} - h_9)$	(6)
Eriyik Isı Değiştiricisi (EID)	$\dot{Q}_{EID} = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_5 h_5$	(7)
Eriyik Pompası	$\dot{W}_P = \dot{m}_1 (h_2 - h_1)$	(8)
Soğutma Tesir Katsayısı (COP)	$COP = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{Q}_J + \dot{W}_P}$	(9)

Ekserji analizi birinci yasa analizinin yanı sıra döngü performansına alternatif bir bakış açısı sunar. Mühendislik bakış açısından sistemdeki tüm ısı değişim bileşenleri maksimum verimlilikle tasarlanmalıdır bunu sağlamak için ekserji analizi farklı bileşenlerdeki kayıpların birbirine nasıl bağlı olduğunu ve belirli bir tasarımın en iyi performans için hangi bileşenin geliştirilebileceği hakkında bilgi verir (Aprhornratana ve Eames, 1995; Kotas 2012; Bejan vd 1995). Absorbsiyonlu soğutma sistemlerinde ekserji verimliliğini düşüren tersinmezlikler üç ana faktörden kaynaklanmaktadır. Bunlar sistem elemanlarında eksik ısı ve kütle transferi, karışım kayıpları ve dolaşım kayıplarıdır (Şencan vd, 2005)

Saf maddenin akış ekserjisi şu şekilde yazılabilir (Çengel ve Boles 2007).

$$e = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{v^2}{2} + gz \quad (10)$$

kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilirse,

$$e = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (11)$$

Sistemi oluşturan her bir eleman kontrol hacmi olarak ele alınırsa,

$$\Delta \dot{E} = \sum \dot{m}_g \dot{e}_g - \sum \dot{m}_\varphi \dot{e}_\varphi - \left[\sum \dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)_g - \sum \dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)_\varphi \right] + \sum \dot{W} \quad (12)$$

eşitliğin sağ tarafındaki ilk iki terim giren ve çıkan toplam ekserjileri ifade etmektedir, üçüncü ve dördüncü terimler ise sabit bir T sıcaklığında transfer edilen ısıнын ekserjisini ifade eder, son terim ise giren veya çıkan mekanik enerjiyi temsil eder (Talbi ve Agnew, 2000). Analiz edilen absorpsiyonlu soğutma sistemine ait ekserji denklemleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Analiz edilen absorpsiyonlu soğutma sisteminin ekserji analizi denklikleri.

Sistem Bileşenleri	Ekserji Analizi Denklikleri	Denklem No
Kaynatıcı	$\dot{E}_J = \dot{E}_3 + \dot{E}_{11} - \dot{E}_4 - \dot{E}_7 - \dot{E}_{12}$	(13)
Yoğuşturucu	$\dot{E}_K = \dot{E}_7 + \dot{E}_{15} - \dot{E}_8 - \dot{E}_{16}$	(14)
Absorber	$\dot{E}_A = \dot{E}_{10} + \dot{E}_6 + \dot{E}_{13} - \dot{E}_1 - \dot{E}_{14}$	(15)
Buharlaştırıcı	$\dot{E}_E = \dot{E}_9 + \dot{E}_{17} - \dot{E}_{10} - \dot{E}_{18}$	(16)
Eriyik Isı Değiştiricisi (EID)	$\dot{E}_{EID} = \dot{E}_2 + \dot{E}_4 - \dot{E}_3 - \dot{E}_5$	(17)
Eriyik Pompası	$\dot{E}_P = \dot{E}_1 + \dot{W}_P - \dot{E}_2$	(18)
Ekserji Verimi	$\eta_{II} = \frac{\dot{E}_{18} - \dot{E}_{17}}{\dot{E}_{11} - \dot{E}_{12}}$	(19)

Termodinamik Analiz Sonuçları

Absorbsiyonlu soğutma sisteminde kullanılması $\text{LiCl-H}_2\text{O}$ akışkan çifti için termodinamik özellikleri tablolar halinde verilmiştir. Bulunan termodinamik özellikler $Q_E=50 \text{ kW}$, $T_J=85^\circ\text{C}$, $T_A=T_K=40^\circ\text{C}$, $T_E=10^\circ\text{C}$, $\epsilon_{\text{EID}}=0,6$, $\eta_P=0,8$ kabulü yapılarak her bir sistem komponentini bir kontrol hacmi olduğu düşünülerek hesaplanmıştır. Yukarıda yapılan kabuller doğrultusunda Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5'te elde edilen sonuçlar Eş.1-19 vasıtasıyla hesaplanmıştır (Gündüz ve Cimşit, 2022).

Tablo 3. Analiz edilen absorbsiyonlu soğutma çevrim için termodinamik özellikler

LiCl-H ₂ O							
TA	NOK	T (°C)	P (kPa)	X (%)	m (kg/s)	h (kJ/kg)	s(kJ/k gK)
1		40	8	1,22 42, 33	0,131 3	177,1	0,3483
2		40	1	7,38 42, 33	0,131 3	177,1	0,3484
3		60, 58	1	7,38 42, 33	0,131 3	230,8	0,5143
4		85	1	7,38 50, 51	0,110 1	351,7	0,6484
5		58	1	7,38 50, 51	0,110 1	287,7	0,4625
6		58	8	1,22 50, 51	0,110 1	287,7	0,4625
7		85	1	7,38	0,021 26	2659	8,51
8		40	1	7,38	0,021 26	167,5	0,5723
9		10	8	1,22	0,021 26	167,5	0,5942
10		10	8	1,22	0,021 26	2519	8,899

Tablo 4. Analiz edilen absorpsiyonlu soğutma çevriminin birinci kanun analiz sonuçları

Sistem Bileşenleri	Isıl Kapasiteler (kW)
	LiCl-H ₂ O
Kaynatıcı	64,94
Kondenser (Yoğuşturucu)	52,97
Evaporatör (Buharlaştırıcı)	50
Absorber	61,96
Pompa	0,0008
Eriyik Isı Değiştirgeci	7,047
COP	0,770
f	5,716

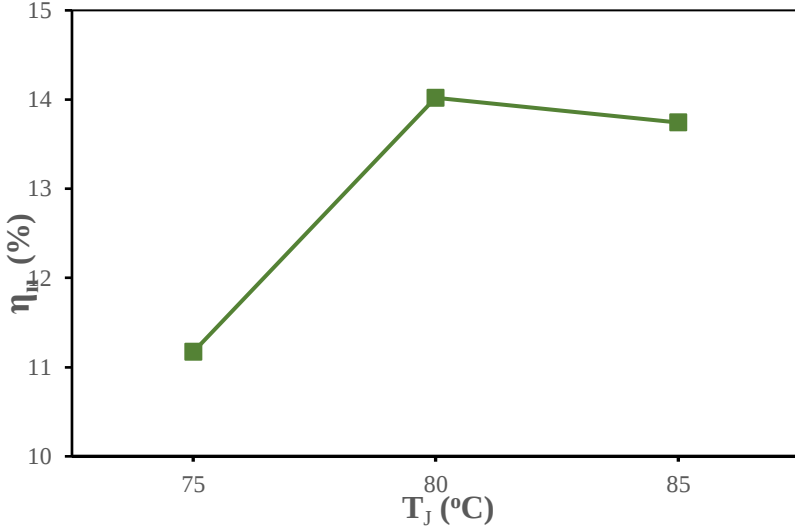
İncelemeler doğrultusunda evaporatör ve kondenserin ısı yüklerinin kaynatıcı ve absorbere göre düşük olduğu görülmüştür. Bu farklılığın nedeninin ise saf sıvılarda bulunmayan çözelti karışım sıcaklığından olduğu sonucuna varılmıştır (Talbi ve Agnew, 2000).

Tablo 3'te ekserji veriminin %13,740 olduğu görülmektedir. Ayrıca yapılan ikinci kanun analiz sonucunda en yüksek tersinmezliklerin kaynatıcı ve absorberde olduğu saptanmıştır.

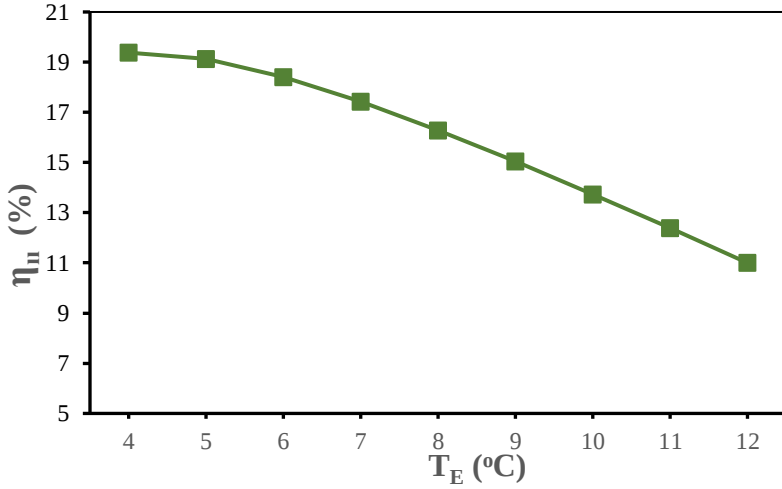
Tablo 5. Analiz edilen absorpsiyonlu soğutma çevriminin ikinci kanun analiz sonuçları

Sistem Bileşenleri	Ekserji Yıkımları (kW)
	LiCl-H ₂ O
Kaynatıcı	2,14
Kondenser	1,016
Soğutucu Akışkan Kısma Valfi	0,1393
Evaporatör	1,002
Absorber	2,097
Pompa	0,0007571
Eriyik Isı Değiştirgeci	0,3994
Çözelti Kısma Valfi	0
TOPLAM	6,794
Ekserji verimi (%)	13,74

LiCl-H₂O akışkan çifti ile çalışan absorpsiyonlu soğutma sisteminin en önemli komponentleri olan evaporatör ve kaynatıcı için sıcaklığa bağlı ekserji verimlerinin parametrik analizleri yapılmış ve grafik halinde Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 2. Kaynatıcı sıcaklığı ile Ekserji veriminin değişimi



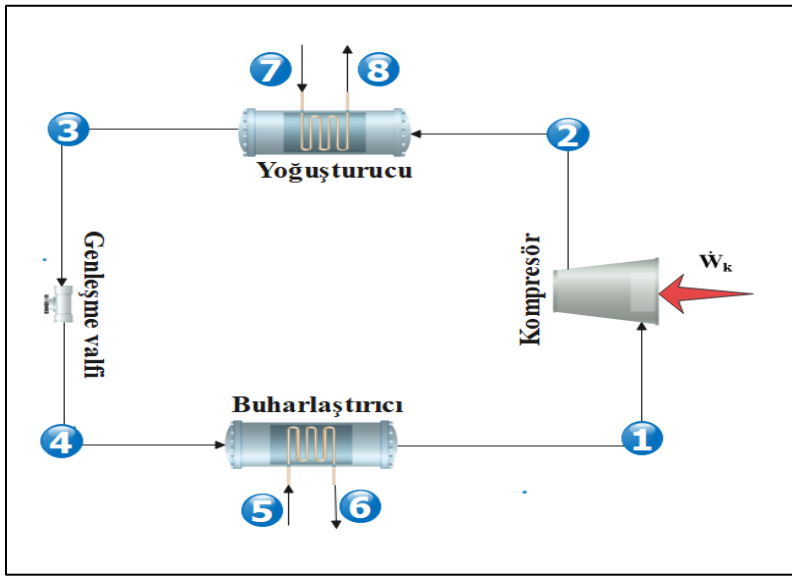
Şekil 3. Evaporatör sıcaklığı değişimi ile Ekserji veriminin değişimi

Şekiller incelendiğinde LiCl-H₂O çiftinin kaynatıcı sıcaklığı ile verimin 80°C 'ye kadar veriminin arttığı ardından düştüğü

gözlemlenmiştir. Evaporatör sıcaklığı ile değişim incelendiğinde ise evaporatör sıcaklığı artışı ile beraber ekserji veriminin düştüğü gözlemlenmiştir.

Buhar Sıkıştırılmalı Mekanik Soğutma Çevrimi (BSMS)

Buhar sıkıştırılmalı mekanik soğutma sistemi (BSMS) Şekil 4'te gösterilmiştir. Sistemin analizinde kullanılacak denklemler Tablo 6'da verilmiştir. Ayrıca BSMS'de karşılaştırılacak akışkanların termodinamik ve çevresel özellikleri Tablo 7'de verilmiştir (Saleh vd, 2020), (Garcia vd, 2022), (Gill vd, 2019).



Şekil 4. Buhar sıkıştırılmalı mekanik soğutma çevrimi

Tablo 6. Analiz edilen BSMS enerji, ekserji analizi denklikleri.

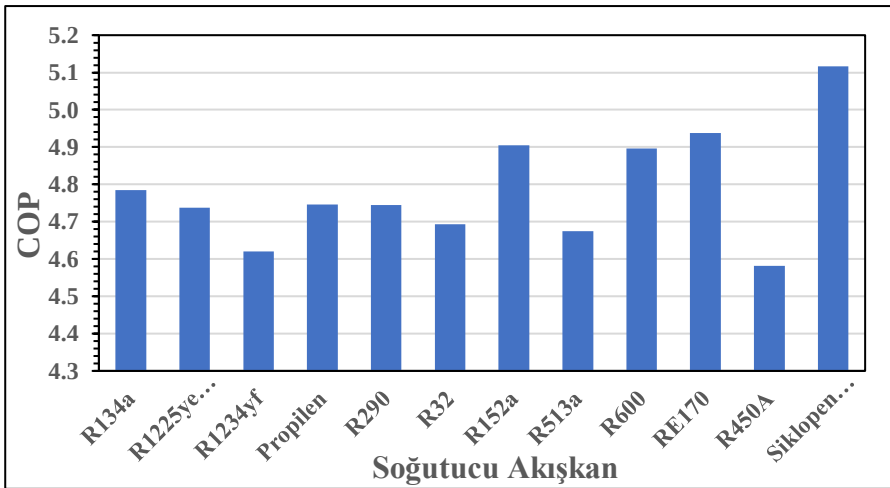
Sistem Bileşenleri	Enerji Denklği	Ekserji Denklği
Evaporatör	$\dot{Q}_E = \dot{m}_1(h_1 - h_4)$	$\dot{E}_E = \dot{E}_4 + \dot{E}_5 - \dot{E}_1 - \dot{E}_6$
Kompresör	$\dot{W}_K = \dot{m}_1(h_2 - h_1)$	$\dot{E}_K = \dot{E}_1 + \dot{W}_K - \dot{E}_2$
Kondenser (Yoğuşturucu)	$\dot{Q}_K = \dot{m}_2(h_2 - h_3)$	$\dot{E}_Y = \dot{E}_2 + \dot{E}_7 - \dot{E}_3 - \dot{E}_8$
Genleşme Valfi	$h_3 = h_4$	$\dot{E}_{GV} = \dot{E}_3 - \dot{E}_4$
COP / Ekserji Verimi	$COP = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{W}_K}$	$\eta_{II} = \frac{\dot{E}_6 - \dot{E}_5}{\dot{W}_K}$

Tablo 7. Buhar sıkıştırmalı mekanik soğutma sisteminde kullanılan soğutucu akışkanların termodinamik ve çevresel özellikleri

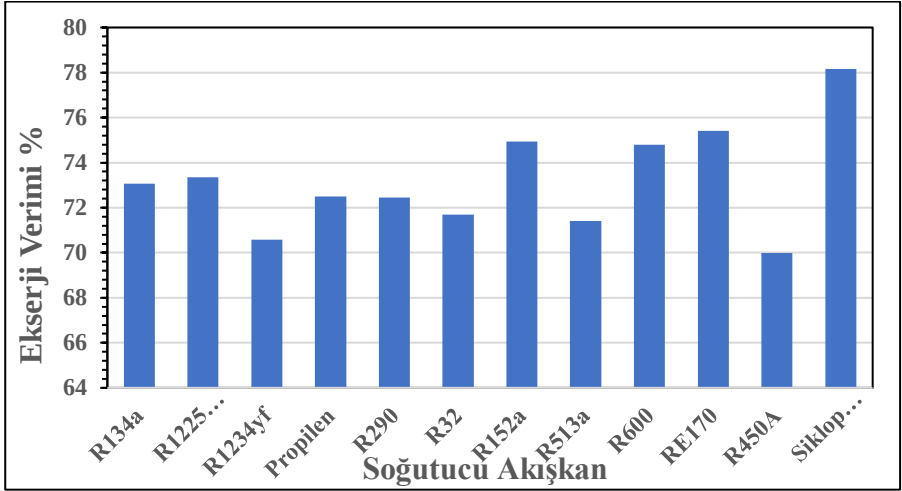
Soğutucu Akışkan	Sıvı	Moleküler Kütle kg/kmol	Kritik Sıcaklık (°C)	Kritik Basınç (MPa)	NBP (°C)	Ölçüm DP	Ölçüm WP	Güvenlik Sınıfı
R134A	HFC	102	101	4,06	-26,1	0	370	A1
R1225ye(z)	FO	132	106,9	3,528	-19,54	-	1	-
R1234yf	FO	144	94,7	3,38	-29,4	0	4	A2L
Propilen	HC	42,08	92,4	4,67	-47,7	0	20	A3
R290	HC	44,1	96,7	4,25	-42,1	0	20	A3
R32	FC	52,02	78,1	5,78	-51,7	0	16	A2L
R152a	FC	66,05	133,1	4,52	-24	0	33	A2
R513a	FO	84,08	77,7	3,7	-28,3	0	73	A1

R600	H C	5 8,12	1 52	3 ,8	- 0,5	0	2 0	A3
RE170	H C	4 6,1	1 27,2	5 ,34	- 24,8	0	1	A3
R450A	Z eotropi k	1 08,69	1 04,47	3 ,814	- 23,26	0	5 47	A1
Siklopentan	H C	7 0,1	2 38,6	4 ,57	4 9,3	0	1 0,1	A3

BSMS sisteminin analizi yapılırken, absorpsiyonlu soğutma sistemindeki kabuller ile aynı olup, ayrıca evaporatör ve kondenser giriş çıkış sıcaklıkları aynı şekildedir. Evaporatörde soğutulan akışkan havadır. Sistemin analizi yapılırken evaporatör çıkış sıcaklığı $T_1 = -20^\circ\text{C}$, kondenser çıkış sıcaklığı $T_3 = 18^\circ\text{C}$ kompresörün izantropik verimi 0,85 alınmıştır. Yapılan karşılaştırılmalı analizlerin sonuçları Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda grafiklerde görüldüğü üzere verilen çalışma koşullarında en uygun soğutucu akışkanın siklopentan olduğu görülmüştür.



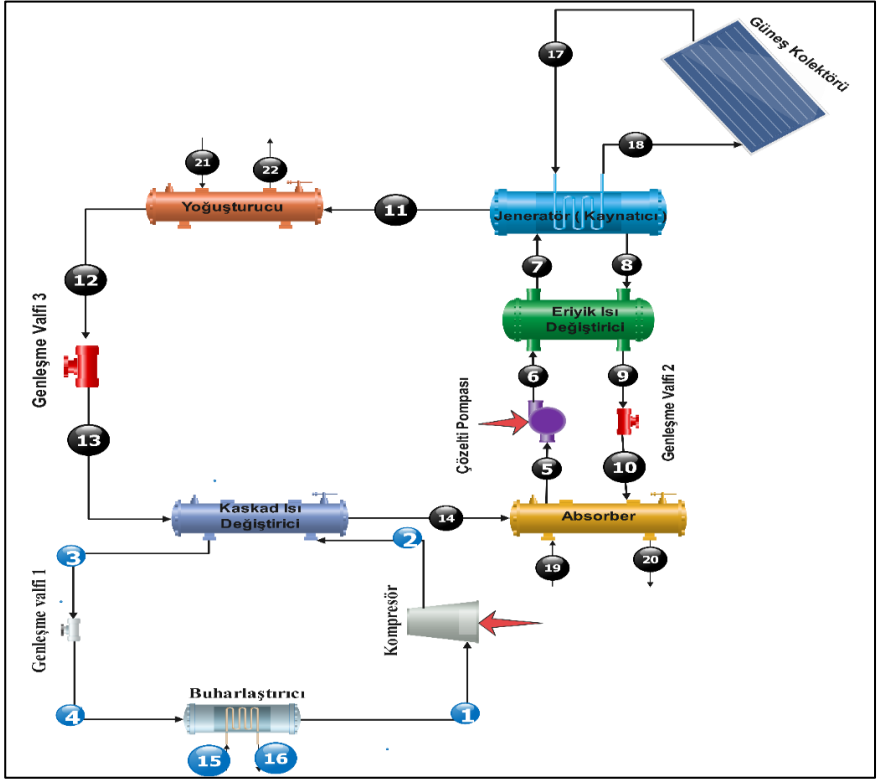
Şekil 5. Soğutucu Akışkanların COP karşılaştırılması



Şekil 6. Soğutucu Akışkanların Ekserji verimi karşılaştırılması

Kaskad Soğutma Çevrimi

Bölüm 2.1 ve 2.2’de kaskad soğutma çevriminde üst çevrim ve alt çevrimde istenilen çalışma koşullarındaki uygun akışkan seçimi için karşılaştırılmalı analizler yapılmıştır. Üst çevrimde LiCl-H₂O alt çevrimde ise siklopentanin uygun akışkan olduğu saptanmıştır. Kaskad soğutma çevriminin (Şekil 7) enerji ekserji analizi yapılırken diğer 2 sistemdeki kabuller ve komponentlerin soğutma ve besleme akışkan sıcaklıkları yukarıda belirtildiği gibidir. Ayrıca kaynatıcı çıkış sıcaklığı 80°C ve buharlaştırıcının soğutma yükü 12,55 kW alınmış buna göre kaskad sistemin enerji ekserji analizi yapılmıştır. Analizin sonuçları Tablo 8-9’da verilmiştir.



Şekil 7. Kaskad soğutma çevrimi

Tablo 8. $\text{LiCl-H}_2\text{O}$ /siklopentan kaskad çevrimi için termodinamik özellikler

	T (°C)	P (kPa)	X (%)	$\dot{m}$ (kg/s)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	e (kJ/kg)	$\dot{E}$ (kW)
0 (Su)	2 5	1 01,3			10 4,9	0,3 672		
1	- 20	4 ,949		0, 03375	31 4,2	1,2 99	- 71,42	- 2,411
2	4 5,2	3 1,88		0, 03375	38 6,9	1,3 34	- 9,118	- 0,3078
3	1 8	3 1,88		0, 03375	- 57,52	- 0,1871	0, 04292	0, 00145

4	- 20	4 ,949		0, 03375	- 57,52	- 0,1691	- 5,339	- 0,1802
5	4 0	1 ,228	4 2,33	0, 06771	17 7,1	0,3 483	7 7,82	5, 269
6	4 0	7 ,385	4 2,33	0, 06771	17 7,1	0,3 484	7 7,82	5, 269
7	6 0,64	7 ,385	4 2,33	0, 06771	23 0,9	0,5 148	8 2,02	5, 553
8	8 0	7 ,385	4 6,74	0, 06133	31 1,2	0,6 374	1 25,7	7, 709
9	5 6	7 ,385	4 6,74	0, 06133	25 1,7	0,4 631	1 18,2	7, 251
10	5 6	1 ,228	4 6,74	0, 06133	25 1,7	0,4 631	1 18,2	7, 251
11	8 0	7 ,385		0, 00638	26 50	8,4 85	1 24,6	0, 7948
12	4 0	7 ,385		0, 00638	16 7,5	0,5 724	1, 432	0, 00913
13	1 0	1 ,228		0, 00638	16 7,5	0,5 944	- 5,114	- 0,0326
14	1 0	1 ,228		0, 00638	25 19	8,9 129,7	- 129,7	- 0,8273
15	- 12	1 01,3		2, 496	26 1,2	6,7 25	2, 52	6, 289
16	- 17	1 01,3		2, 496	25 6,1	6,7 06	3, 288	8, 205
17	9 0	1 01,3		0, 9683	37 7,1	1,1 93	2 5,98	2 5,15
18	8 5	1 01,3		0, 9683	35 6	1,1 35	2 2,34	2 1,63
19	3 2	1 01,3		0, 9339	13 4,2	0,4 642	0, 3382	0, 3158
20	3 7	1 01,3		0, 9339	15 5,1	0,5 321	0, 983	0, 9181
21	3 2	1 01,3		0, 7577	13 4,2	0,4 642	0, 3382	0, 2562
22	3 7	1 01,3		0, 7577	15 5,1	0,5 321	0, 983	0, 7448
23 (S.A.)	2 5	1 01,3			- 45,47	- 0,1465		
24 (Hava)	2 5	1 01,3			29 8,4	6,8 59		

S.A. soğutucu akışkan 23 ve 24 noktaları soğutucu akışkan ve hava için ölü hal özellikleridir.

Tablo 9. Kaskad soğutma sisteminin enerji ve ekserji analizi sonuçları

	Enerji Analizi	Ekserji Analizi	
Sistem Bileşenleri	Isıl Kapasiteler (kW)	Ekserji Yıkımları (kW)	Ekserji Yıkım Oranları (%)
Evaporatör	12,55	0,314	10,56
Kompresör	2,452	0,349	11,75
KID	15	0,486	16,34
Kısmi Valfi -1	-	0,182	6,115
Absorber	19,52	0,552	18,58
Pompa	0,0004	0,0003	0,01
EID	3,645	0,174	5,869
Kaynatıcı	20,35	0,576	19,38
Kondensör	15,83	0,297	10
Kısmi Valfi -2	-	0	0
Kısmi Valfi-3	-	0,041	1,4
TOPLAM	-	2,971	100
COP_{ABS}	0,7372	-	-
COP_{BSMS}	5,117	-	-
$COP_{KASKAD\ SİSTEM}$	0,55	-	-
Ekserji Verimi (%)	-	32,06	-

Enerji ve ekserji analizi sonucunda sistemin kaskad sistemin COP'si 0,55 hesaplanmıştır. Ekserji verimi %32,06, sistemin toplam ekserji yıkımın 2,971 kW olduğu görülmüştür. Kaskad çevrim aynı koşullarında (evaporatör, kondenser sıcaklığı, kompresör izantropik verimi) siklopentan ile çalışan BSMS sistemiyle (sonuçlar Tablo 10) karşılaştırıldığında %41 elektrik enerjisi tasarrufu yapıldığı görülmüştür.

Tablo 10. BSMS soğutma sisteminin enerji ekserji analizi sonuçları

Siklopentan	Enerji Analizi	Ekserji Analizi	
Sistem Bileşenleri	Isıl Kapasiteler (kW)	Ekserji Yıkımları (kW)	Ekserji Yıkım Oranları (%)
Evaporatör	12,55	0,3137	18,17
Kompresör	4,159	0,5457	31,61
Kondensör	16,71	0,3684	21,34
Kısmi Valfi	0	0,4985	28,88
TOPLAM	-	1,726	100
COP	3,018	-	-
Ekserji Verimi (%)	-	46,09	-

Çevresel Değerlendirme

Fosil yakıtlar en yaygın kullanılan enerji kaynaklarından biri olup, yakıldığında CO₂ ve diğer sera gazlarını açığa çıkarmaktadırlar. Bu gazlar küresel ısınmaya neden olmaktadır. Fosil yakıtların sınırlı bulunması ve çevreye olumsuz etkileri nedeniyle alternatif enerji kaynaklarının (güneş, rüzgâr, jeotermal enerji, yer, kaya, yeraltı suyu) önemi her geçen gün artmaktadır. Günümüzde alternatif enerji kaynaklarının kullanıldığı alternatif soğutma sistemlerinden olan absorpsiyonlu soğutma sistemlerinin

önemi artmıştır. Bu sistemler fosil yakıtlardan tamamen bağımsız olarak çalışması durumunda (güneş, jeotermal enerji ve atık ısı enerjisi) zararlı emisyon oluşturmadığı için çevreye uygundur. Ekolojik ve ekonomiktir. Absorbsiyonlu soğutma sistemleri yüksek verimle soğutma sağlayan ekonomik ve çevreci sistemlerdir. Bu sistemlerin verimini artırmak için alternatif olarak düşünülen absorbsiyonlu-buhar sıkıştırımlı kaskad soğutma sistemlerinde çevreci akışkanların (düşük ODP ve GWP değerlerine sahip) kullanımıyla klasik buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimine göre hem daha ekonomik hem de daha çevre dostu sistemler olmaktadır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada absorbsiyonlu- buhar sıkıştırımlı kaskad soğutma sisteminin enerji ve ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. Absorbsiyonlu soğutma çevriminde $\text{LiCl-H}_2\text{O}$ çalışma akışkanını kullanarak çevrimin enerji ve ekserjiye dayalı termodinamik analizi yapılmıştır. Yeni nesil ve hidrokarbon sınıfındaki soğutucu akışkanlar kullanılarak en performanslı soğutucu akışkanı seçmek için buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminin enerji ve ekserjiye dayalı karşılaştırmalı termodinamik analizi yapılmıştır. İki çevrimde de en performanslı akışkanlar kullanılarak iki çevrim birleştirilerek kaskad soğutma sistemi oluşturulmuş ve termodinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Kaskad soğutma sisteminin buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminde en yüksek termodinamik performans (COP=5.11 ve ekserji verimi=%78,17) sahip soğutucu akışkan siklopentan iken kaskad soğutma sisteminin absorbsiyonlu soğutma çevriminde ise $\text{LiCl-H}_2\text{O}$ (COP=0,77 ve ekserji verimi=%13,74) olduğu sonucuna varılmıştır. En yüksek ekserji yıkımları ise kaynatıcı ve absorberde meydana geldiği görülmüştür. Nihai sonuçlar, tasarlanan kaskad soğutma sisteminin COP ve ekserji verimliliğinin sırasıyla %0,55 ve %32,06 olduğunu göstermiştir ve sistemin toplam ekserji yıkımın 2,971 kW olduğu görülmüştür. Kaskad çevrim aynı koşullarında (evaporatör, kondenser sıcaklığı kompresör izantropik verimi) siklopentan ile çalışan BSMS

sistemiyle karşılaştırıldığında %41 elektrik enerjisi tasarrufu yapıldığı görülmüştür.

SEMBOLLER

COP	:Soğutma tesir katsayısı
$\dot{q}$	:Çevre
$\dot{E}$	:Ekserji, (kW)
e	:Ekserji akısı, (kJ/kg)
f	:Dolaşım oranı
h	:Entalpi, (kJ/kg)
$\dot{m}$	:Kütleli debi, (kg/s)
P	:Basınç, (kPa)
s	:Entropi, (kJ/kgK)
T	:Sıcaklık, (°C)
X	:Eriyik konsantrasyonu
$\dot{Q}$	:Isıl güç, (kW)
$\dot{W}$	:Güç, (kW)

Yunan Alfabesi

η	:Verim
--------	--------

Alt indisler

A	:Absorber
$\dot{c}$	:Çıkan
E	:Evaporatör
g	:Giren
J	:Kaynatıcı
K	:Kondenser
KID	:Kaskad ısı değiştirici
o	: ölü durum
p	: Pompa

Kaynaklar

Aktemur, C., Ozturk, I. T. 2021, Energy and Exergy Analysis of a Subcritical Cascade Refrigeration System with Internal Heat Exchangers Using Environmentally Friendly Refrigerants, *Journal of Energy Resources Technology*, 143(10).

Aktemur, C., Öztürk, I. T. 2022, Energetic and exergetic analysis of a solar-driven single-effect absorption refrigeration system using LiBr+ LiCl/H₂O solution mixture. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1-21.

Altınkaynak, M., Şahin, A. Ş. 2020, Comparative analysis of the performance and exergy efficiency of absorption cooling system for different working fluids. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 12(3), 101-107.

Aman, J., Ting, D. K., & Henshaw, P., 2014, Residential solar air conditioning: Energy and exergy analyses of an ammonia–water absorption cooling system. *Applied Thermal Engineering*, 62(2), 424-432.

Aprhornratana, S., Eames, I. W., 1995, Thermodynamic analysis of absorption refrigeration cycles using the second law of thermodynamics method. *International journal of refrigeration*, 18(4), 244-252.

1277-1293.

Banu, P. A., Sivamani, S., Premkumar, T. M., Solomon, G. R. 2020, Feasibility studies on alternative aqueous salt mixture in vapour absorption cooling, *Materials Today: Proceedings*, 33, 1121-1127.

Bayrakçı, H. C., Özgür, A. E. 2009, Energy and exergy analysis of vapor compression refrigeration system using pure hydrocarbon refrigerants, *International Journal of Energy Research*, 33(12), 1070-1075.

Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M. J. 1995 Thermal design and optimization. *John Wiley Son*.

Bellos, E., Tzivanidis, C., Tsifis, G. 2017, Energetic, Exergetic, Economic and Environmental (4E) analysis of a solar assisted refrigeration system for various operating scenarios, *Energy Conversion and Management*, 148, 1055-1069.

Bellos, E., Tzivanidis, C., Antonopoulos, K. A. , 2016, Exergetic and energetic comparison of LiCl-H₂O and LiBr-H₂O working pairs in a solar absorption cooling system. *Energy Conversion and Management*, 2123, 453-461.

Bourouis, M., Vallès, M., Medrano, M., Coronas, A. 2005, Absorption of water vapour in the falling film of water-(LiBr+ LiI+ LiNO₃+ LiCl) in a vertical tube at air-cooling thermal conditions. *International journal of thermal sciences*, 44(5), 491-498.

Cengel, Y. A., Boles, M. A. 2007, *Thermodynamics: An Engineering Approach 6th Editon (SI Units)*. The McGraw-Hill Companies, Inc., New York.

Cimsit, C., Ozturk, I. T. 2012, Analysis of compression-absorption cascade refrigeration cycles. *Applied Thermal Engineering*, 40, 311-317.

De Paula, C. H., Duarte, W. M., Rocha, T. T. M., de Oliveira, R. N., Maia, A. A. T. 2020, Optimal design and environmental, energy and exergy analysis of a vapor compression refrigeration system using R290, R1234yf, and R744 as alternatives to replace R134a, *International Journal of Refrigeration*, 113, 10-20.

Gill, J., Singh, J., Ohunakin, O. S., Adelekan, D. S. 2019, Exergy analysis of vapor compression refrigeration system using R450A as a replacement of R134a, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 136(2), 857-872.

Gündüz, A. H, Cimsit, C.2022, Güneş Enerjisi Kaynaklı Absorbsiyonlu Soğutma Sisteminin Farklı Eriyik Çiftleri İle

Termodinamik Analizi, *Mühendis ve Makine*, Cilt 63, sayı 707, s. 201-221.

Jain, V., Kachhwaha, S. S., Sachdeva, G. 2013, Thermodynamic performance analysis of a vapor compression–absorption cascaded refrigeration system, *Energy Conversion And Management*, 75, 685-700.

Kaushik, S. C., Arora, A., 2009, Energy and exergy analysis of single effect and series flow double effect water–lithium bromide absorption refrigeration systems. *International journal of Refrigeration*, 32(6), 1247-1258.

Khaliq, A., Kumar, R., 2007, Exergetic analysis of solar powered absorption refrigeration system using LiBr-H₂O and NH₃-H₂O as working fluids. *International Journal of Exergy*, 4(1), 1-18.

Kotas, T. J. 2012 *The exergy method of thermal plant analysis*. Paragon Publishing

Li, N., Luo, C., Su, Q. 2018, A working pair of CaCl₂–LiBr–LiNO₃/H₂O and its application in a single-stage solar-driven absorption refrigeration cycle, *International Journal of Refrigeration*, 86, 1-13.

Pérez-García, V., Méndez-Méndez, D., Belman-Flores, J. M., Rodríguez-Muñoz, J. L., Montes-Rodríguez, J. J., Ramírez-Minguela, J. J. 2022, Experimental study of influence of internal heat exchanger in a chest freezer using r-513a as replacement of r-134a, *Applied Thermal Engineering*, 204, 117969.

Saleh, B., Aly, A. A., Alsehli, M., Elfakhany, A., Bassuoni, M. M. 2020, Performance analysis and working fluid selection for single and two stages vapor compression refrigeration cycles. *Processes*, 8(9), 1017.

Sun, J., Li, W., Cui, B. 2020, Energy and exergy analyses of R513a as a R134a drop-in replacement in a vapor compression refrigeration system, *International Journal of Refrigeration*, 112, 348-356.

Şencan A., Yakut, K. A., Kalogirou, S. A., 2005, Exergy analysis of lithium bromide/water absorption systems. *Renewable energy*, 30(5), 645-657.

Talbi, M. M., & Agnew, B., 2000, Exergy analysis: an absorption refrigerator using lithium bromide and water as the working fluids. *Applied Thermal Engineering*, **20**(7), 619-630.

Ustaoglu, A. 2020, Parametric study of absorption refrigeration with vapor compression refrigeration cycle using wet, isentropic and azeotropic working fluids, Conventional and advanced exergy approach, *Energy*, 201, 117491.

BÖLÜM IX

Standart Bir Tekerlek Göbeği Ve Fren Disk Mekanizmasında Ortaya Çıkan Isının Termal Davranışına Genel Bir Bakış

**M.C. KÜÇÜK
L. YÜNLÜ**

Giriş

Gelişen otomotiv endüstrisinde, fren sistemlerinin performansı ve güvenilirliği büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, teker göbeği ve fren disklerinin ısı transfer performansının etkili bir şekilde analiz edilmesi kritik bir konudur. Bu makalede, teker göbeği ve fren disklerindeki ısı transferinin incelenmesi için Bilgisayarlı Akışkanlar Dinamiği (CFD) yönteminin kullanılmasına dair yapılan çalışmalar incelenmiş ve bu çalışmalardan çıkarılan sonuçlara dair faydalı bilgiler verilmesi amaçlanmıştır.

CFD, karmaşık akış ve ısı transferi problemlerini analiz etmek için matematiksel modeller ve sayısal yöntemler kullanır. Bu alışmada, CFD yöntemiyle teker göbeği ve fren disklerindeki ısı transferi performansı detaylı bir şekilde inceleyen araştırmacıların makaleleri kullanılmıştır. Sayısal modelleme ve simülasyon teknikleri kullanılarak, teker göbeği ve fren disklerinde oluşan ısı dağılımı, akışkan akışı ve termal etkileşimlerin analizlerinden örnekler verilmektedir. Makalenin amacı, farklı tasarım parametrelerinin (rneğin, kanal geometrisi, malzeme seçimi, akışkan hızı) teker göbeği ve fren disklerinin ısı transfer performansı üzerindeki etkisini değerlendirmektir. CFD analizleri sayesinde, ısı transfer katsayıları, sıcaklık dağılımları ve termal performans metrikleri detaylı bir şekilde incelenebilmektedir. Bu alışma, otomotiv endüstrisinde fren sistemleri tasarımında kullanılabilecek önemli bilgiler sunmaktadır. Teker göbeği ve fren disklerinin ısı transfer performansının doğru bir şekilde anlaşılması, frenleme performansının iyileştirilmesi ve sistem güvenliğinin artırılması için önemlidir. Bu makale, teker göbeği ve fren disklerindeki ısı transfer performansının CFD ile etkili bir şekilde analiz edilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Yapılan Araştırmaların İncelenmesi

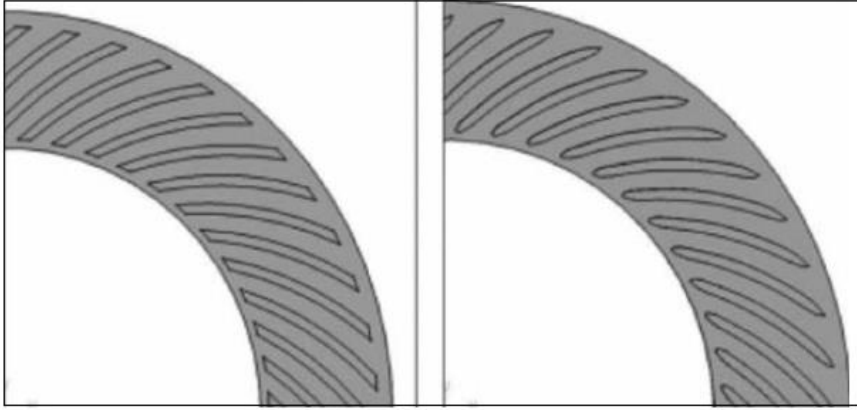
Yapılan bir çalışmada, araç fren soğutma performansı simlasyonları için birleştirilmiş bir yaklaşımın kullanımını tartışılmaktadır. Araştırmacılar, otomobil fren sisteminin doğru bir şekilde çalışabilmesi için, fren disklerinin optimum sıcaklıklarda kalması gerektiğini belirtmektedir. Bu nedenle, fren diskleri doğru şekilde soğutulması gerektiği görülmektedir. Fren soğutma performansını analiz etmek için, sıcaklık, hava akışı, fren diski yüzeyi ve kalınlığı gibi faktörlerin tümü dikkate alınması gerektiğinden bahsedilmektedir. Bu amaçla, ısı transferi ve akışkan dinamiği simülasyonlarının birleştirilmiş bir yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, hem sıcaklık hem de hava akışını hesaba katan bir ısı transferi modeli ve araç dinamiği simülasyonunu birleştirir. Makalede sunulan sonuçlar, birleştirilmiş yaklaşımın fren

soğutma performansı simülasyonları için daha doğru sonuçlar sağladığını göstermektedir. (Vdovin & ark., 2018)

Bir başka çalışmada, radyal olarak havalandırmalı bir fren diskinin optimize edilmesi ve termal analizi konusunda odaklanılmaktadır. Çalışmada, fren disklerinin soğutma performansını artırmak için farklı tasarım değişkenleri dikkate alınmıştır. Hava kanallarının boyutu, şekli, açısı ve sayısı gibi faktörlerde yapılan değişikliklerle, bu değişkenlerin fren disklerinin soğutma performansına olan etkileri gözlemlenmiştir. Çalışmada, öncelikle radyal havalandırmalı fren disklerinin termodinamik modellenmesi ve sonrasında disk yüzeyindeki ısı transferi katsayısının deneysel olarak belirlenmesi bilimsel yöntemler ile açıklanmaktadır. Sonrasında, disk soğutmasını optimize etmek için tasarım değişkenleri kullanılarak bir dizi simülasyon yapılmıştır. Yapılan simülasyon sonuçları, hava kanallarının belirli bir şekil ve açıyla donatılmış olmasının, disk yüzeyindeki sıcaklığı azalttığını ve soğutma performansını artırdığını göstermiştir. Yapılan çalışma, daha iyi frenleme performansı için radyal havalandırmalı fren disklerinin tasarımında dikkat edilmesi gereken önemli tasarım faktörlerini ortaya koymaktadır. (Jafari & Akyüz, 2022)

Diğer bir çalışmada, CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yöntemi kullanarak radyal havalandırmalı fren disklerinin soğutma performansını artırmak için akış düzenlemesi yapılmasını ele alınmaktadır. Makalede, öncelikle radyal havalandırmalı fren disklerinin tasarım özellikleri ve ısı özellikleri açıklanmaktadır. Daha sonra, CFD yöntemi kullanılarak yapılan simülasyonlar ile disk içindeki hava akışı ve sıcaklık dağılımı analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçları, disk içindeki hava akışının ve sıcaklık dağılımının, disk yüzeyindeki sıcaklık değişimleri ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, yapılan çalışmada, disk içindeki hava akışını optimize etmek için tasarım değişkenleri belirlenmiştir. Optimize edilmiş tasarımların simülasyon sonuçlarına göre, disk içindeki hava akışının belirli bir şekilde düzenlenmesinin, disk yüzeyindeki sıcaklık değişimlerini azaltarak soğutma performansını artırdığını göstermiştir. Şekil 1 de geleneksel

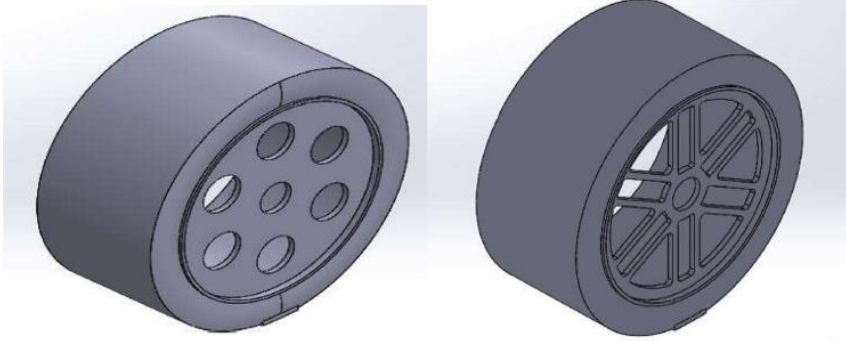
radyal havalandırmalı fren diski ile aerodinamik geliştirmeli radyal havalandırmalı fren diskinin 2 boyutlu gösterimleri bulunmaktadır. Sonuç olarak, yapılan çalışma, CFD yönteminin radyal havalandırmalı fren disklerinin tasarımında kullanılabileceğini ve akış düzenlemesi yaparak disklerin soğutma performansını artırmak için etkili bir analiz yöntemi olduğu ortaya konulmuştur. (Munisamy & ark., 2011)



şekil 1. Geleneksel radyal havalandırmalı fren disk ile aerodinamik geliştirmeli radyal havalandırmalı fren diskinin 2 boyutlu gösterimde karşılaştırılması

CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yöntemi kullanılarak, tekerlek merkezi geometrisinin fren soğutması üzerindeki aerodinamik etkisinin incelendiği diğer bir makalede, tekerlek merkezi geometrisinin değişikliklerinin, hava akışı ve fren soğutması üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İlk olarak, aracın modeli ve tekerlek merkezi geometrisi tanıtılmıştır. Daha sonra, CFD simölasyonları kullanılarak, farklı tekerlek merkezi geometrilerinin fren soğutması üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Simölasyon sonuçlarına göre, tekerlek merkezi geometrisinin belirli bir şekilde değiştirilmesi, hava akışını fren diskinin yüzeyine yönlendirerek fren soğutmasını artırabilmektedir. Yapılan çalışmada, özellikle tekerlek merkezi bölgesindeki boşlukların ve kanalların, hava akışını fren diskinin yüzeyine yönlendirerek fren soğutmasını artırabileceği

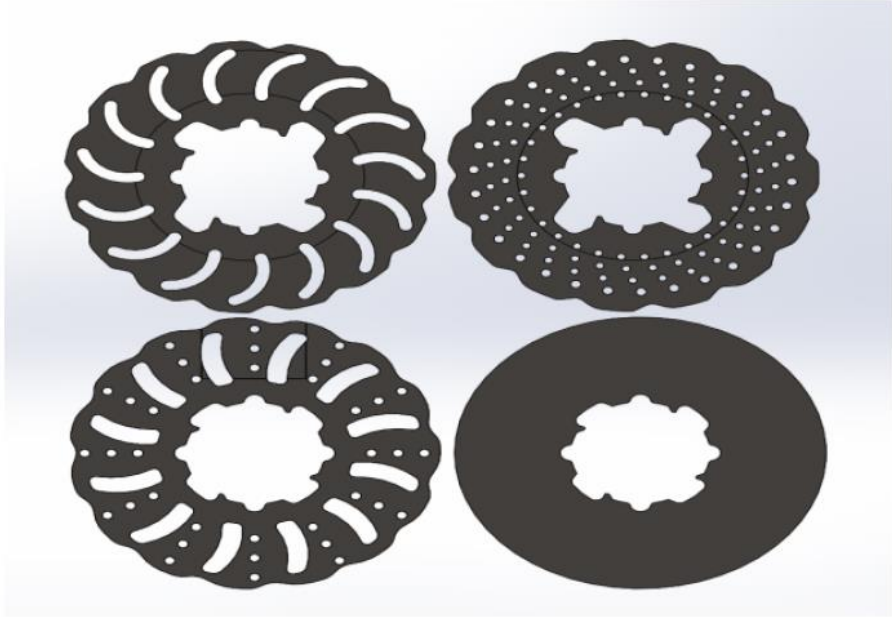
tespit edilmiştir. Şekil 2 de farklı teker göbeği modelleri gösterilmektedir. Sonuç olarak, yapılan çalışma, tekerlek merkezi geometrisinin, fren soğutması üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceğini ve tekerlek merkezi bölgesindeki boşluklar veya kanallar gibi tasarım özellikleri ile fren soğutmasının artırılabilirliğini ortaya koymaktadır. (Bhardwaj, 2017)



Şekil 2. Farklı teker göbeği geometrilerine örnekler

Yapılan diğer bir çalışmada, farklı fren diskleri için farklı havalandırma geometrilerinin bilgisayar destekli akışkanlar dinamiği (CFD) analizleri ile bu tasarımların frenleme ve soğuma performansları karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar bir araba fren diskine yönelik farklı havalandırma geometrileri tasarlamış ve CFD analiz yöntemi kullanarak performanslarını karşılaştırmıştır. Bu analizler, havalandırma geometrilerinin fren disklerinin ısınmasını etkileyen hava akışını nasıl etkilediğini göstermiştir. Yapılan analizler sonucunda, bazı havalandırma geometrilerinin diğerlerine göre daha iyi performans gösterdiği ve daha iyi soğutma sağladığı görülmüştür. Alınan sonuçlar, fren sistemlerinin tasarımında ve optimizasyonunda karşılaştırılan tasarımlar arasında belirlenen geometrilerin kullanılabilir olduğunu ve bu tasarımlar ile daha iyi bir fren performansı sağlanabileceğini göstermektedir. Şekil 3 te farklı tipte havalandırma tasarımlarına sahip fren diskleri gösterilmektedir (Guatam & ark., 2017).

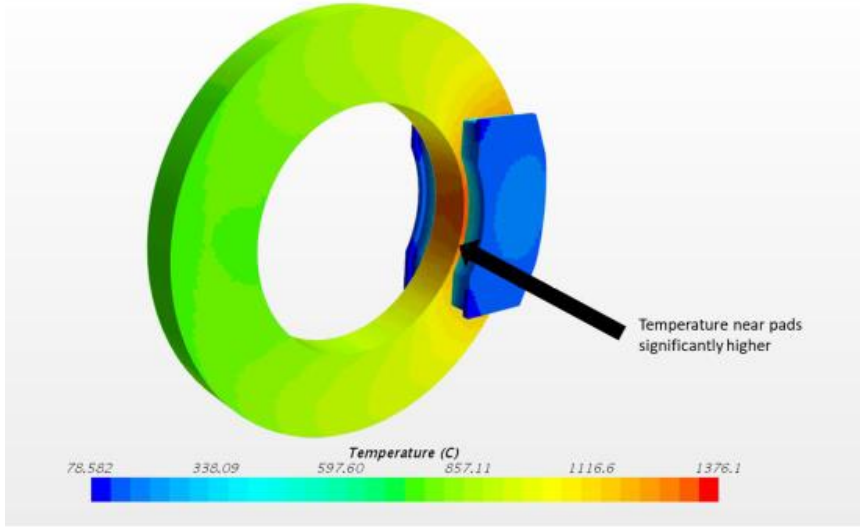
Başka bir çalışma ise, fren soğutma testlerinin CAE simülasyonları kullanılarak tekrarlanabilmesi üzerine odaklanmaktadır. Fren sisteminin doğru bir şekilde çalışabilmesi için fren diskleri optimum sıcaklıklarda tutulmalıdır. Bunun için, fren disklerinin etkin bir şekilde soğutulması gerekmektedir. Fren soğutma performansını ölçmek için, genellikle saha testleri yapılır. Ancak, saha testleri zaman alıcı, maliyetli ve sınırlıdır. Bu nedenle, yapılan çalışma, CAE simülasyonları kullanarak fren soğutma testlerinin tekrarlanabilirliğini arttırmayı amaçlamaktadır. Makalede, simülasyonların doğruluğunun artırılması için sıcaklık, hava akışı ve fren diski malzemesi gibi faktörlerin dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır. Çalışmada sunulan yöntem, ısı transferi ve akışkan dinamiği simülasyonlarının birleştirilmiş bir yaklaşımını kullanmaktadır. Bu yaklaşım, fren soğutma performansının daha doğru bir şekilde değerlendirilmesini sağlamak için kullanılan sıcaklık ve hava akışı değerlerinin birbirleriyle etkileşimini hesaba katar. Çalışmanın sonuçları, CAE simülasyonlarının fren soğutma testlerinin tekrarlanabilirliğini artırmada etkili bir araç olabileceğini göstermektedir. Bu yaklaşım, fren sistemi tasarımı ve optimizasyonunda kullanılarak daha verimli, güvenilir ve maliyet etkili fren sistemleri geliştirilmesine yardımcı olabilir. Sonuç olarak, bu makale, fren sistemi tasarımı ve geliştirilmesi alanında çalışan araştırmacılar ve mühendisler için faydalı bir kaynak olabileceğini ortaya koymuştur. (Vdovin, 2019)



Şekil 3. Farklı tipte havalandırma tasarımlarına sahip fren diskleri

Yapılan bir tez çalışmasında yarı römork disk fren tekerlek uç bileşenlerine frenleme olayı sırasında ısı transferinin FEA/CFD çalışmasıyla incelenmesini konu alınmaktadır. Tezde, fren sistemlerinin doğru bir şekilde çalışabilmesi için, fren disklerinin optimum sıcaklıklarda tutulması gerektiği belirtilmektedir. Bunun için fren diskleri ve tekerlek bileşenlerinin ısı transferi ve akışkan dinamiği özellikleri analiz edilmelidir. Bu amaçla, tez, FEA/CFD simülasyonları kullanarak frenleme olayı sırasında tekerlek bileşenlerine aktarılan ısıyı analiz etmektedir. Simülasyonlar, sıcaklık, hava akışı ve tekerlek bileşenlerinin malzeme özellikleri gibi faktörleri dikkate almaktadır. Tezde sunulan sonuçlar, FEA/CFD simülasyonlarının yarı römork disk fren tekerlek uç bileşenlerindeki ısı transferi ve akışkan dinamiğini doğru bir şekilde modellendiğini ve fren sistemi tasarımı ve optimizasyonunda kullanılabilecek veriler sağladığını göstermektedir. Şekil 4 te frenleme durumunda oluşan sıcaklık dağılımı ve simülasyonu

gösterilmiştir. Sonuç olarak, bu tez çalışması, yarı römork disk fren tekerlek bileşenlerinin ısı transferi ve akışkan dinamiğini analiz etmek için FEA/CFD simülasyonlarının kullanılması hakkında bir kaynak olabilir. (Fisher, 2019)



Şekil 4. Frenleme durumunda oluşan sıcaklık dağılımı ve simülasyonu

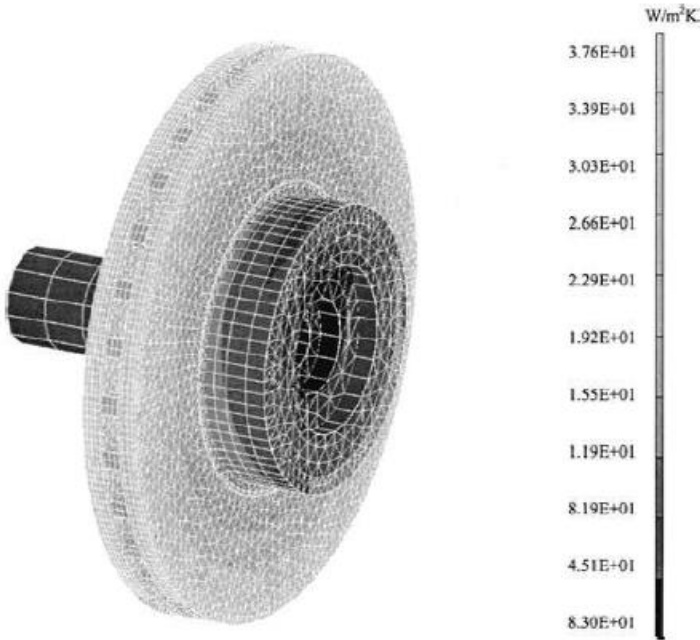
İncelenen bir diğer makalede fren soğutma sistemlerinin aerodinamik faktörlerin de dikkate alındığı şekilde optimize edilmesi üzerine çalışma yapılmıştır. Çalışmada, otomobillerin yüksek hızlarda seyretmesi durumunda fren sisteminin aşırı ısınması ve performans kaybına neden olması sorunu ele alınmaktadır. Bu sorunun çözümü için fren soğutma sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu önemli bir rol oynamaktadır. Sunulan çalışmada, fren soğutma sisteminin aerodinamik performansının iyileştirilmesi için, birkaç farklı tasarım alternatifi simüle edilerek performansları karşılaştırılmıştır. Bu simülasyonlar, CFD (Computational Fluid Dynamics) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Makalede elde edilen sonuçlar, fren soğutma sisteminin tasarımında aerodinamik

faktörlerin dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır. Ayrıca, makalede sunulan optimizasyon çalışması, fren soğutma sistemi tasarımında aerodinamiğin optimize edilmesiyle fren performansının artırılabilceğini göstermektedir. Fren sistemi tasarımında aerodinamik faktörlerin önemini vurgulanmakta ve fren soğutma sistemi tasarımı ve optimizasyonunda aerodinamik faktörlere bağı yapılan tasarımların CFD ile incelenmesi ile daha iyi fren performansı elde edilebileceğı sonucuna ulaşılmaktadır. (Kim & ark., 2018)

Bir diğerk çalışmada, disk frenlerin aerodinamik ve termal modellenmesi ile ilgili zorlukları ve sınırlamaları ele alınmaktadır. Makalede, disk frenlerin aerodinamik ve termal modellenmesi için kullanılan yöntemler ve bu yöntemlerin doğruluğı tartışılmaktadır. Aerodinamik modellenme için, CFD (Computational Fluid Dynamics) yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak, disk frenlerin karmaşık geometrisi ve yüksek sıcaklıkları, doğru bir CFD modeli oluşturmayı zorlaştırmaktadır. Termal modellenme için ise, FEA (Finite Element Analysis) yöntemi kullanılmaktadır. Ancak, termal modellenme de karmaşık bir süreçtir ve gerçek sıcaklık dağılımını doğru bir şekilde tahmin etmek zorluğundan bahsedilmektedir. Makalede ayrıca, disk frenlerin aerodinamik ve termal modellenmesinin tasarım ve optimizasyonu açısından önemine değinilmektedir. Disk frenlerin doğru bir şekilde modellenmesi, fren sistemi performansının artırılması ve aşınmanın azaltılması için gerekli olduğundan bahsedilmektedir. Çalışmada disk frenlerin aerodinamik ve termal modellenmesi konusundaki zorlukları ve sınırlamaları ele alınarak, disk fren tasarımı ve optimizasyonu için gerekli koşullar ortaya konulmaktadır. (Vdovin & Gigan, 2020)

Disk frenlerin aşırı ısınması ve bu nedenle performans kaybına uğraması sorununu incelenen bir başka çalışmada, bu sorunun çözümü için fren sistemi soğutma özellikleri önemli bir rol oynadığı belirtilmektedir. Çalışmada, disk frenlerin soğutma özellikleri, deneysel ve simülasyon yöntemleri kullanılarak analiz edilmektedir. Disk frenlerin soğutma özellikleri, hava akış hızı, sıcaklık ve disk fren geometrisi gibi faktörlerin etkisi altında

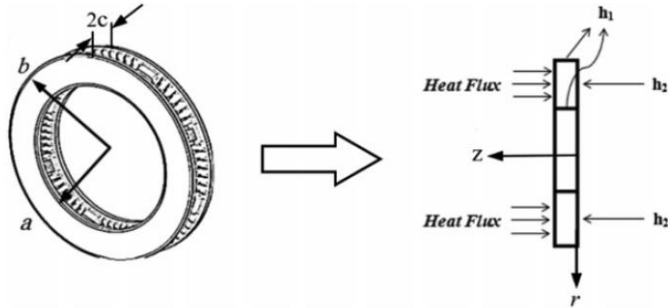
incelenmektedir. Şekil 5 te örnek bir fren diskinin ısı taşınım katsayısı ve dağılım grafiği gösterilmiştir. Deneysel çalışmalar, fren diskinin yüzey sıcaklığı, hava akış hızı ve diğer parametreleri ölçerek gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar ise, CFD (Computational Fluid Dynamics) yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, fren sistemi soğutma özelliklerinin, hava akış hızı ve fren diski geometrisi gibi faktörlerin etkisi altında önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Ayrıca, disk frenin sıcaklığı ve soğutma özellikleri arasında doğrudan bir ilişki olduğu da gözlemlenmiştir. (Voller & ark., 2003)



Şekil 5. Örnek bir fren diskinin ısı taşınım katsayısı ve dağılım grafiği (450 dev/dk, 600 °C)

Yapılan bir başka çalışmada ise, yüksek hızlı araçlarda kullanılan gelişmiş disk frenlerin analitik ısı analizini ele alınmaktadır. Makalede, disk frenlerin aşırı ısınması ve buna bağlı olarak performans kaybı sorunu incelenmektedir. Bu sorun, yüksek

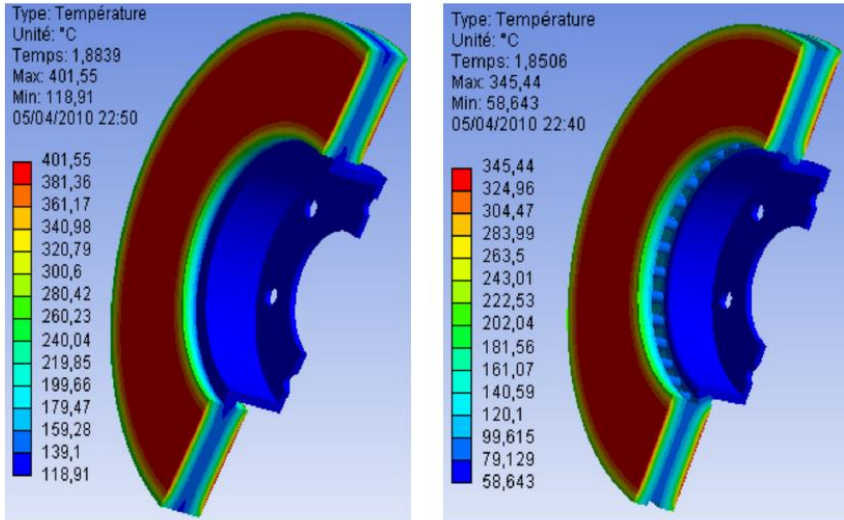
hızlı araçlarda daha ciddi bir sorun haline gelmektedir. Bu nedenle, makalede disk frenlerin ısı analizi, analitik yöntemler kullanılarak yapılmaktadır. Makalede sunulan çalışmada, disk frenlerin ısı analizi, matematiksel modeller ve termodinamik prensipler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu analiz, disk frenin yüzey sıcaklığı, çevre sıcaklığı, malzeme özellikleri ve disk fren geometrisi gibi faktörlerin etkisi altında incelenmiştir. Makalede elde edilen sonuçlar, disk frenlerin yüzey sıcaklığı, hızı ve çevre sıcaklığı gibi faktörlerin artmasıyla birlikte önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Ayrıca, disk frenin malzeme özellikleri, geometrisi ve soğutma özellikleri de disk frenin ısı davranışını etkileyen önemli faktörlerdir. Şekil 6 da kullanılan fren diskinin şeması ve belirlenen sınır koşulları gösterilmektedir. Sonuç olarak, yüksek hızlı araçlarda kullanılan disk frenlerin ısı analizinin analitik yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebileceğini göstermektedir. Bu analiz, disk fren sistemi tasarımının optimize edilmesi ve disk frenlerin aşırı ısınmasına karşı önlemler alınması için önemli bir araç olarak değerlendirilebilir. (Madanloo & Talaee, 2020)



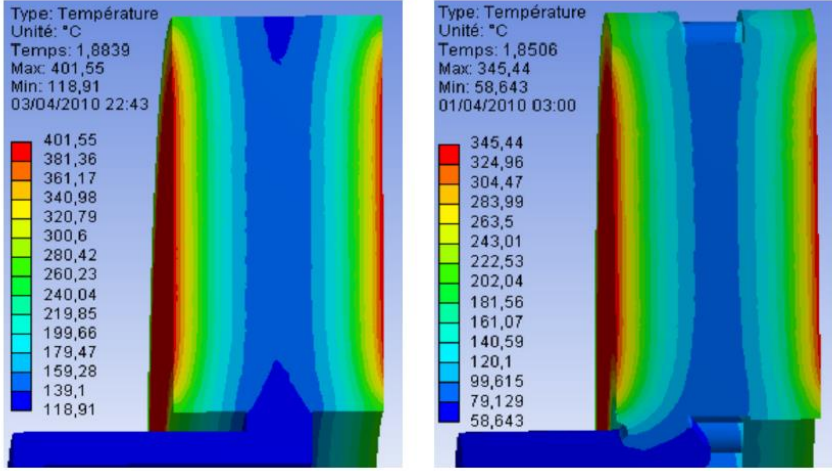
Şekil 6. Yüksek hızlı bir aracın fren disk şeması ve sayısal ısı transfer hesaplarında kullanılmak üzere belirlenen sınır şartları

Başka bir çalışmada, disk frenlerin ısı davranışlarının, özellikle de sürtünme ısısı nedeniyle oluşan ısının etkisi altında ventilasyonlu ve tam disk fren rotorları için analiz edilmesini ele alınmaktadır. Makalede, disk frenlerin sürtünme nedeniyle ısınması ve buna bağlı olarak performans kaybı sorunu incelenmektedir. Bu

sorun, özellikle yüksek hızlı araçlarda daha ciddi bir sorun haline gelmektedir. Bu nedenle, makalede disk frenlerin ısı analizi, matematiksel modeller ve termodinamik prensipler kullanılarak yapılmaktadır. Makalede sunulan çalışmada, hem ventilasyonlu hem de tam disk fren rotorları için ısı analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analiz, disk fren rotorunun yüzey sıcaklığı, çevre sıcaklığı, malzeme özellikleri ve disk fren rotoru geometrisi gibi faktörlerin etkisi altında incelenmiştir. Örnek olarak, Şekil 7 ve Şekil 8 de dökme demir malzemeli tam ve ventilasyonlu disk fren rotorlarının sıcaklık dağılımları gösterilmektedir. Makalede elde edilen sonuçlar, ventilasyonlu disk fren rotorlarının, tam disk fren rotorlarına göre daha iyi ısı dağılımına sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, disk fren rotorunun malzeme özellikleri, geometrisi ve soğutma özellikleri de disk fren rotorunun ısıl davranışını etkileyen önemli faktörler olduğu açıklanmaktadır. Bu analiz, disk fren sistemlerinin performansının iyileştirilmesi ve disk frenlerin aşırı ısınmasına karşı önlemler alınması için yapılabilecek tasarım optimizasyonları için yol gösterici bir çalışmadır. (Belhocine & ark., 2014)



Şekil 7. Dökme demir malzemeli tam ve ventilasyonlu disk fren rotorlarının sıcaklık dağılımları



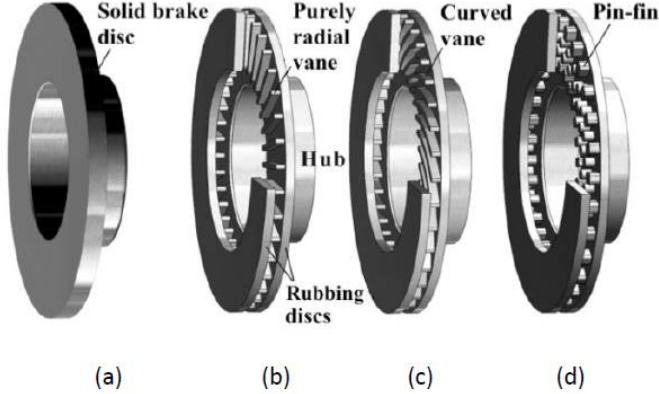
Şekil 8. Döküm demir malzemeli tam ve ventilasyonlu disk fren rotorlarına ait sıcaklık dağılımı

Başka bir çalışmada fren diski ve teker göbeği arasındaki hava akımı üzerinden yapılan CFD analizleri ile frenleme işlemi sırasında yüzey ısı transfer katsayılarının (STHC) tahminlerini ele alınmaktadır. Makalede, disk frenlerin ısınması ve buna bağlı olarak performans kaybı sorunu incelenmektedir. Bu sorun, özellikle yüksek hızlı araçlarda daha ciddi bir sorun haline gelmektedir. Bu nedenle, makalede disk frenlerin ısıl davranışları, matematiksel modeller ve CFD analizi kullanılarak incelenmektedir. Makalede sunulan çalışmada, disk fren rotorunun yüzey sıcaklığı, çevre sıcaklığı, hava akım hızı, frenleme kuvveti gibi faktörlerin etkisi altında yüzey ısı transfer katsayıları incelenmiştir. Bu incelenme, CFD analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Makalede elde edilen sonuçlar, frenleme işlemi sırasında yüzey ısı transfer katsayılarının çevre sıcaklığı, hava akım hızı ve frenleme kuvveti gibi faktörlere bağlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, fren diski ve tekerlek kutusu arasındaki hava akımının frenleme sırasında yüzey ısı transfer katsayıları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. (Belhocine & Omar, 2018a)

Aynı araştırmacıların yaptıkları diğer bir çalışmada, otomotiv disk fren rotorlarının aerodinamik özelliklerinin sayısal olarak incelenmesini konu almaktadır. Bu çalışmada, bilgisayar destekli akışkanlar dinamiği (CFD) analizi kullanılarak, disk fren rotorlarının aerodinamik davranışları modellenmiştir. Makalede, disk fren rotorlarının aerodinamik özellikleri ve hava akışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Disk fren rotorlarının aerodinamik performansı, hava akış hızı, rotorun dönme hızı ve rotorun geometrisi gibi faktörler tarafından etkilenir. Makalede sunulan çalışmada, CFD analizi kullanılarak, farklı hava akış hızlarında disk fren rotorlarının aerodinamik davranışları incelenmiştir. Analiz sonuçları, disk fren rotorlarının aerodinamik performansının hava akış hızına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Ayrıca, makalede disk fren rotorlarının geometrisinde yapılan değişikliklerin aerodinamik performansı nasıl etkilediği de incelenmiştir. Bu analizler, disk fren rotorlarının aerodinamik özelliklerinin iyileştirilmesi için yapısal tasarım değişiklikleri yapılmasına olanak tanımaktadır. Çalışma, otomotiv endüstrisinde disk fren rotorlarının aerodinamik davranışlarının sayısal olarak incelenmesine yönelik bir yaklaşım sunmaktadır. Bu çalışma, disk fren rotorlarının aerodinamik özelliklerinin geliştirilmesi ve disk frenlerin performansının artırılması için tasarım optimizasyonu için bir araç olarak kullanılabilir. (Belhocine & Omar, 2018b)

Radyal kanatlı disk fren rotorlarının akış davranışı incelendiği bir diğer çalışmada, düşük dönme hızlarında radyal kanatlı disk fren rotorlarının akış davranışı üzerinde durulmaktadır. Bu çalışmanın amacı, düşük dönme hızlarında radyal kanatlı disk fren rotorlarının akış davranışını anlamaktır. Radyal kanatlı disk fren rotorlarının akış davranışı, deneysel ve sayısal yöntemler kullanılarak incelenmiştir. radyal kanatlı disk fren rotorlarının akış davranışını anlamak için yapılmıştır. Şekil 9 da farklı fren rotoru konfigürasyonları belirtilmektedir. Çalışmanın sonucunda, belirli bir dönme hızı için kanat sayısındaki artış aynı anda havalandırmalı geçitlerden pompalanan havanın kütle akış hızında artışa içeri akışın daha yakın hizalandığı yerde akış açısının azalmasına neden olduğu

görülmüştür. Rosby sayısının arttığı ve bu sayının havanın kütle akışının gradyanı ile doğrudan orantılı olduğu sonucu verilmiştir. (Atkins & ark.,2019)



Şekil 9. Fren rotoru konfigürasyonları (a) Katı disk; (b) Radyal kanatlı rotor (disk); (c) Kavisli kanatlı rotor (disk); (d) Pim kanatlı rotor (disk).

Yapılan bir diğer çalışmada, ticari araçlarda elektrikli park freninin geliştirilmesi hususunda gerekli frenleme kuvveti ile oluşan sıcaklıkları ve hava akış modelleri ile fren disklerinin soğuma performansını incelenmiştir. Araştırma iki bölümde sunulmaktadır; birinci bölümde uzun soğutma periyodları boyunca tahmin edilen disk sıcaklıklarının deneysel doğrulaması yapılmaktadır, ikincide hesaplamalı akışkanlar dinamiği modellenmesi kullanılarak akış, hızlar ve konvektif ısı transferi katsayıları hesaplanarak ardından deneysel doğrulamalar yapılmaktadır. İlk çalışmada, temel prensiplerden başlayarak, birinci dereceden diferansiyel denklemler kullanılarak disk sıcaklığının genel tahmini yapılmıştır. Soğutma dönemi boyunca konvektif ve radyatif ısı dağılımının değişkenliği dikkate alınarak, ölçülen değerlerle iyi bir uyum sağlandı ve hata oranı yaklaşık %10'a kadar düşürülmüştür. 15 kW indüksiyon ısıtıcısının kullanıldığı özel tasarımı bir termal düzlem üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Sayısız deney sonucunda soğutma

dönemi boyunca sonuçların tekrarlanabilir olduğu kanıtlandı. Tamamen oksitlenmiş bir yüzeye sahip gri dökme demir fren diski için, yayma katsayısı değerinin neredeyse sabit olduğu tespit edilmiş ve değeri $\varepsilon = 0.92$ olarak belirlenmiştir. Araştırma fren diski üzerinde yapılsa da, elde edilen sonuçların uygulamanın türüne bağlı olmaksızın herhangi bir disk geometrisine genel olarak uygulanabileceği ortaya konmuştur. (Stevens & Tirovic, 2018a).

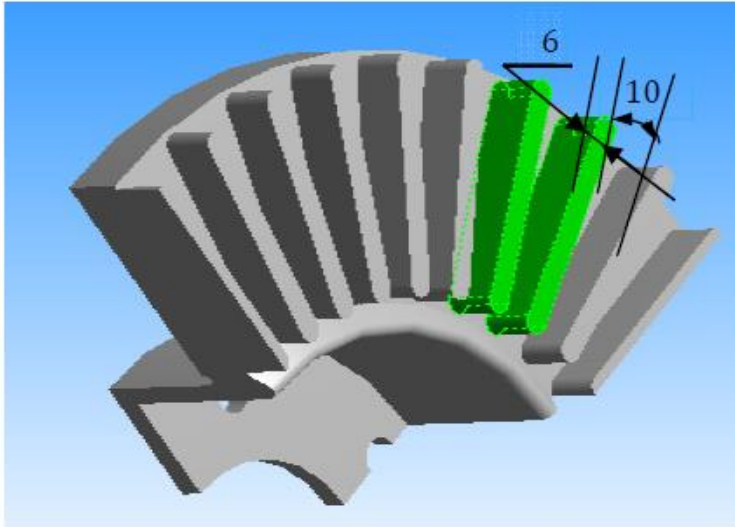
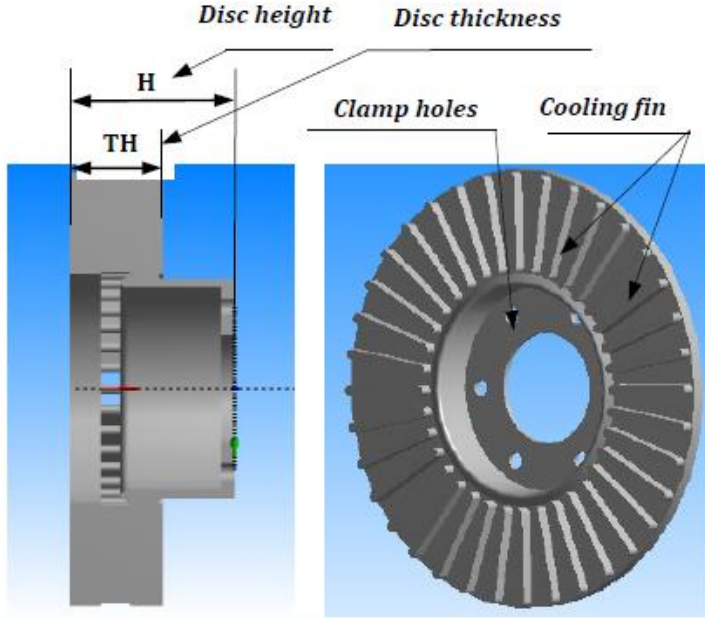
Aynı araştırmacıların yaptıkları çalışmanın ikinci kısmında, sabit bir fren diskinin etrafındaki üç boyutlu akış alanını ve ısı dağılımını kapsamlı bir şekilde hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) modellemesi ile detaylandırılmaktadır. Dört yaygın kullanılan türbülans modeli karşılaştırılmış ve kayma stresi türbülans modelinin bu çalışmalar için en uygun olduğu bulunmuştur. İç rotor çapındaki alt kanal çıkışlarından çıkan hava akışı yönünü değiştirir ve başlık bölgesinin üzerinden aksiyel olarak akar. Bu aksiyel akış, yüksek kanal girişlerine bir engel olarak hareket eder ve diskin üst yarısından gelen konvektif soğutmayı büyük ölçüde azaltır. Fren diskinin sabit soğutmasının karmaşıklığı, diskin soğuması sırasında akış desenlerinin değişmesinden kaynaklanır. Yukarıdaki aksiyel akış etkileri, diskin sıcaklıkları azaldıkça yavaşça ortadan kalkar. Sonuç olarak, konvektif ısı transferi katsayıları, akış desenindeki değişiklikler ve diskin soğumasıyla birlikte hava tükenmesi nedeniyle azalan hava hızlarından etkilenir. Birinci bölümde olduğu gibi, hesaplamalı akışkanlar dinamiği sonuçlarını nicel ve nitel olarak doğrulamak için özel termal düzenek kullanılmıştır. Fren diski etrafına stratejik olarak yerleştirilmiş sayısız termokupl kullanılmıştır. Hesaplanan ortalama ısı transferi katsayıları, deneysel değerlerle iyi bir şekilde uyum göstermekte ve hatta iki boyutlu analitik değerler (birinci bölümde sunulanlar) yaklaşık olarak trendleri takip etmektedir. Sonuçlar, ticari araçlardaki elektrikli park freni uygulamasıyla ilgili soğutma özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir adım atmaktadır ve gelecekte yayımlanacak yayınlarda tam fren montajından ısı transferini detaylandırmaktadır (Stevens & Tirovic, 2018b).

Yapılan başka bir çalışmada, ventileli fren diskinin frenleme yeteneğinin zorlanmış konveksiyon yoluyla ısı transfer hızı tarafından etkilenmesini araştırılmıştır. Fren diskinin sıcaklığının hızlı bir şekilde artıp azalması, yüksek termal gerilmeye bağlı olarak fren diskinin felaketle sonuçlanabilen bir şekilde başarısız olmasına neden olabileceği belirtilmektedir. Bu çalışmanın amacı, akış kanalı içindeki bıçakların geometrik parametrelerini değiştirerek ventileli fren diskinde potansiyel ısı transferi geliştirmelerini araştırmaktır. Bu, ventileli fren diskinin farklı bıçak yapılandırmalarında akış ve ısı transferi için boyutsuz özelliklerin karşılaştırılması yoluyla gerçekleştirilir. Düz bıçak yapılandırması, eğimli bıçaklara karşı bir referans olarak kullanılmıştır. Araştırmalar, deneysel ve hesaplamalı yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılıp tartışılmıştır. Analiz, ventileli bıçak açısının görece basit değişikliklerle önemli ölçüde frenleme performansının artırılabilceğini göstermektedir. Sonuçlar, geleneksel düz bıçaklara göre bıçak eğim açısı yapılandırmalarında ısı transfer hızında büyük bir artış olduğunu göstermektedir. Nusselt sayısı, Reynolds sayısı ile güç ilişkisi içindedir. Laminar ve türbülanslı koşullar arasında belirgin bir ilişki tahmin edilmektedir. Saat yönünde 45° eğimli bıçak açısıyla toplam konvektif ısı transfer katsayısında %51'lik bir iyileşme elde edilmiştir. (Munisamy & ark., 2013)

Sabit bir hızda tekrarlayan frenleme süreci sırasında disk fren sisteminin termal davranışı üzerinde konvektif ısı transferinin etkisini değerlendirildiği başka bir çalışmada tam üç boyutlu sonlu eleman modeli kullanılarak disk frenin temas yüzeyindeki sıcaklık dağılımlarını belirlemek için geçici termal analiz yapılmıştır. Sabit pedler üzerinde dönen bir diskin karşılıklı kaymasının oluşturduğu homojen olmayan sürtünme ısınma etkisi, otomotiv uygulamalarında olası olan birkaç ısı transfer katsayısı kullanılarak FE modelleriyle test edilmiştir. Her analiz edilen frenleme sürecinin zamanı boyunca enerji dönüşümünün ve ardından serbest bırakma sürelerinin eşit olduğu bir karşılaştırma olasılığına sahip olmak için, dönemsel fren uygulaması sırasında diskin sıcaklık dağılımlarının karşılaştırılabilir olması sağlanmış, adımli zaman yöntemi,

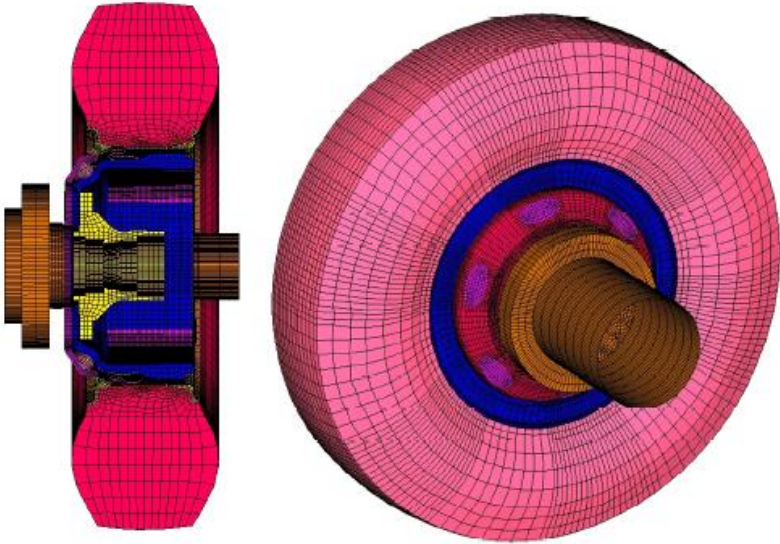
konvektif soğutma terimleriyle birlikte etkileşimli olarak çalışan sınırlama ısı akısı olan hareketli bir ısı kaynağı geliştirmek için kullanılmıştır. Rotorun dönme sırasında ısıtmanın doğru simülasyonu için karşılaşılan zorluklar, zamanın ilerleyen anlarında diske giren termal akıyı şekillendirebilen bir kod kullanılarak aşılmıştır. Tek bir frenleme süreci sırasında konvektif soğutmanın disk frenin sıcaklık dağılımları üzerinde önemsiz bir etkisi olduğu ve dolayısıyla aşırı ısınma sorununu önleyemediği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, frenleme işleminden sonra araç hızının aynı seviyede kalması durumunda gerçekleşen fren bırakma süresi, sıcaklığın önemli ölçüde azalmasına neden olduğu sonucuna varılmıştır (Adamowicz & Grzes, 2013).

Bir diğer çalışmada, ANSYS Multiphysics kullanarak frenleme işlemi sırasında rotor diskin sıcaklık dağılımı araştırılmış ve analiz edilmiştir. Çalışma, sonlu eleman analizi tekniklerini kullanarak tam ve ventilasyonlu fren disklerinde sıcaklık dağılımını tahmin etmekte ve rotorda kritik sıcaklığı belirlemektedir. Bunun için malzeme kullanımı, diskin geometrik tasarımı ve frenleme modu gibi belirli parametreleri dikkate almaktadır. Analiz ayrıca iki diskin ısı akısı dağılımını da sunmaktadır. Şekil 10 da havalandırma lamelli diskin geometrik özellikleri gösterilmektedir (Belhocine & ark., 2014).

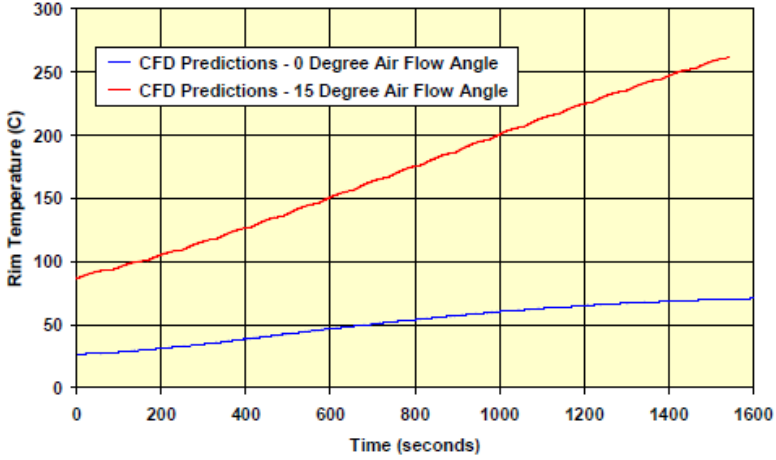


Şekil 10. Havalandırma lamelli diskin geometrik özellikleri

Yapılan başka bir çalışmada, ağır bir kamyon için tambur fren montajının fren soğutma performansı, üç boyutlu zamanla değişen bir CFD modeli kullanılarak simüle edilmiştir. Tahmin edilen fren tamburu sıcaklıkları, kapalı alanda yapılan dinamometre test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Tahminlerle test verileri arasındaki uyum, analiz edilen fren döngüsü için 8°C içinde olduğu görülmüştür. Doğrulan model, hava akışı saldırı açısının fren tamburu ve jant sıcaklıklarına etkisini değerlendirmek için kullanılmıştır. Şekil 11 de teker göbeğine ait tasarımın sonlu elemanlar mesh modeli gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 12 de hava akış hücum açısının öngörülen fren kampana sıcaklıkları üzerindeki etkisine ait grafiklerle değerler belirtilmektedir. (Kumar & ark. 2006).



Şekil 11. Teker göbeğine ait tasarımın sonlu elemanlar mesh modeli



Şekil 12. Hava akış hücum açısının öngörülen fren kampana sıcaklıkları üzerindeki etkisi

Farklı geometrilere sahip dökme demir malzemesi kullanılarak otomobil fren rotorunda yapılan termal analizin detaylandırıldığı bir diğer çalışmada, disklerin termal performansını etkileyen geometrik faktörlerin incelenmesine odaklanılmaktadır. Çeşitli rotor geometrileri üzerinde termal analizler yapılmış ve sıcaklık dağılımı, termal iletkenlik ve soğutma etkisi gibi faktörler değerlendirilmiştir. Farklı rotor geometrilerinin ısı transferi özellikleri üzerindeki etkileri karşılaştırılmış ve performans açısından en iyisini sağlayacak geometri belirlenmeye çalışılmıştır. Makalede sunulan sonuçlar, farklı rotor geometrilerinin termal davranışını anlamak ve fren sistemi performansını geliştirmek için değerli bir kaynak sağlamaktadır (Shirivastava & ark., 2021).

Yapılan bir diğer çalışmada, ANSYS yazılımıyla uyarlanmış olan sonlu eleman yöntemine dayanan sayısal modelleme kullanarak fren senaryosu sırasında iki tip fren diskli olan tam ve havalandırılmalı disklerin genel sıcaklıklarının gelişimini karşılaştırılmıştır. Geçici termal ve statik yapısal analizlerin sayısal simülasyonu, bağlı termo-yapısal yöntemle ardışık olarak gerçekleştirilmiştir. Hesaplama

süreci, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ve termal analizin 3D olarak iyi bir şekilde gösterildiği adımlara dayandırılmış ve bu adımlar, fren diski üzerindeki ısı dağılımının etkilerini göstermiştir. Bu CFD yaklaşımı, ısı transfer katsayılarının (h) değerlerinin hesaplanmasına yardımcı olmuş ve fren diski sıcaklıklarının 3D geçici evriminde kullanılmıştır. Üç farklı fren diski malzemesi test edilmiş ve sonuçların karşılaştırmalı analizi, en iyi termal davranışa sahip olanı belirlemek için yapılmıştır. Son olarak, eşlenik termomekanik modelin çözülmesi ile bu araştırmanın önemli diğer sonuçlarını, diskin şekil değiştirmelerini, eşdeğer Von Mises gerilmelerini ve fren balatalarının temas basıncını görselleştirmemize olanak sağlanmıştır. Elde edilen sonuçların analizi sonucunda, araçların iyi fren performansını garanti etmek için mükemmel rotor tasarımının geliştirilmesine olanak sağlanmıştır (Belhocine & Abdullah, 2020).

Sonuç

Bu çalışmada, teker göbeği ve fren disklerindeki ısı transfer performansının CFD kullanılarak inceleyen makalelerden alınan sonuçlar incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ve analizler, önemli bulguları ortaya koymuştur. CFD analizleri sayesinde farklı tasarım parametrelerinin (kanal geometrisi, malzeme seçimi, akışkan hızı vb.) teker göbeği ve fren disklerinin ısı transfer performansı üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, optimum tasarım parametrelerinin belirlenmesine katkı sağlamaktadır.

İnceleme sonuçları, teker göbeği ve fren disklerindeki ısı dağılımının homojen olmadığını göstermektedir. Yüksek sıcaklık bölgeleri, özellikle frenleme işlemi sırasında belirgin hale gelmektedir. Bu durum, termal stresin artmasına ve disklerin dayanıklılığını etkileyebilecek potansiyel problemlerin ortaya çıkmasına neden olabildiği görülmektedir.

Ayrıca, CFD analizleriyle belirlenen ısı transfer katsayıları ve sıcaklık dağılımları, fren sistemi performansının ve soğutma etkinliğinin değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Optimize edilmiş bir teker göbeği ve fren diski tasarımı, daha etkili bir ısı transferi sağlayarak frenleme performansını artırabilir ve fren sistemlerinin güvenilirliğini artırabilir.

Sonuç olarak, teker göbeği ve fren disklerindeki ısı transfer performansının CFD ile etkili bir şekilde analiz edilmesi, otomotiv endüstrisinde fren sistemlerinin geliştirilmesinde önemli bir adımdır. Bu çalışma, daha güvenli ve daha verimli fren sistemleri tasarlanması için temel bir kılavuz sağlamaktadır. Gelecekteki araştırmalar, frenleme performansını ve ısı transferini optimize etmek için daha fazla tasarım parametresinin incelenmesine odaklanabilir.

KAYNAKÇA

1. Vdovin, A., Gustafsson, M., & Sebben, S. (2018). A coupled approach for vehicle brake cooling performance simulations. *International Journal of Thermal Sciences*, 132, 257-266.
2. Jafari, R., & Akyüz, R. (2022). Optimization and thermal analysis of radial ventilated brake disc to enhance the cooling performance. *Case Studies in Thermal Engineering*, 30, 101731.
3. Munisamy, K. M., Shuaib, N. H., Yusoff, M. Z., & Thangaraju, S. K. (2011). Flow streamlining for cooling improvement in ventilated brake disc using CFD as design tool. *The Journal of The Institution of Engineers, Malaysia*, 72(3).
4. Bhardwaj, A. (2017). A CFD Investigation of Aerodynamic Effects of Wheel Center Geometry on Brake Cooling (No. 2017-01-1537). SAE technical paper.
5. Gautam, V., Bhardwaj, A., & Sharma, R. (2017) CFD Analysis and Comparison of Different Ventilation Geometries for Brake Discs.
6. Vdovin, A. (2019) Replicating Brake Cooling Tests by using Coupled CAE Simulations.
7. Fisher, J. P. (2019). A FEA/CFD study of heat transfer to Semi-Trailer disc brake Wheel-End components during a braking event.
8. Kim, G., Park, J., Lee, B., and Hwang, H., (2018) “A Study on Optimization of Brake Cooling System Considering Aerodynamics,” SAE Technical Paper 2018-01-1875, 2018, doi:10.4271/2018-01-1875.
9. Vdovin, A., & Le Gigan, G. (2020). Aerodynamic and Thermal Modelling of Disc Brakes—challenges and limitations. *Energies*, 13(1), 203.
10. Voller, G. P., Tirovic, M., Morris, R., & Gibbens, P. (2003). Analysis of automotive disc brake cooling characteristics.

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 217(8), 657-666.

11. Modanloo, A., & Talaei, M. R. (2020). Analytical thermal analysis of advanced disk brake in high speed vehicles. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 27(3), 209-217.
12. Belhocine, A., Cho, C. D., Nouby, M., Yi, Y. B., & Abu Bakar, A. R. (2014). Thermal analysis of both ventilated and full disc brake rotors with frictional heat generation.
13. Belhocine, A., & Omar, W. Z. W. (2018). CFD analysis of the brake disc and the wheel house through air flow: Predictions of Surface heat transfer coefficients (STHC) during braking operation. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32, 481-490.
14. Belhocine, A., & Wan Omar, W. Z. (2018). Computational fluid dynamics (CFD) analysis and numerical aerodynamic investigations of automotive disc brake rotor. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 16(3), 188-205.
15. Atkins, M. D., Kienhöfer, F. W., & Kim, T. (2019). Flow behavior in radial vane disk brake rotors at low rotational speeds. *Journal of Fluids Engineering*, 141(8).
16. Stevens, K., & Tirovic, M. (2018). Heat dissipation from a stationary brake disc, Part 1: Analytical modelling and experimental investigations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 232(9), 1707-1733.
17. Tirovic, M., & Stevens, K. (2018). Heat dissipation from a stationary brake disc, Part 2: CFD modelling and experimental validations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 232(10), 1898-1924.

18. Munisamy, K. M., Shuaib, N. H., Yusoff, M. Z., & Thangaraju, S. K. (2013). Heat transfer enhancement on ventilated brake disk with blade inclination angle variation. *international journal of automotive technology*, 14, 569-577.
19. Adamowicz, A., & Grzes, P. (2011). Influence of convective cooling on a disc brake temperature distribution during repetitive braking. *Applied thermal engineering*, 31(14-15), 2177-2185.
20. Belhocine, A., Bakar, A. A., & Bouchetara, M. (2014). Numerical modeling of disc brake system in frictional contact. *Tribology in Industry*, 36(1), 49.
21. Kumar, V., Chacko, S., Paluskar, V., & Shridhare, M. (2006). Numerical Simulation of Drum Brake Cooling for Heavy Trucks."
22. Shrivastava, A. K., Pandey, R., Gedam, R. K., Kumar, N., & Kiran, T. R. (2021). Thermal analysis on car brake rotor using cast iron material with different geometries. *Materials Today: Proceedings*, 47, 7019-7024.
23. Belhocine, A., & Abdullah, O. I. (2020). Thermomechanical model for the analysis of disc brake using the finite element method in frictional contact. *Multiscale Science and Engineering*, 2,

