MAKİNE MÜHENDİSLİĞİNDE GÜNCEL EĞİLİMLER VE İLERİ MÜHENDİSLİK UYGULAMALARI

Editör:
Prof. Dr. Hasan KÖTEN



BİDGE Yayınları

BİDGE Yayınları

Makine Mühendisliğinde Güncel Eğilimler ve İleri Mühendislik Uygulamaları

Editör: HASAN KÖTEN

ISBN: 978-625-5474-92-6

1. Baskı
Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL
Yayınlama Tarihi: 2026-10-25
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

Makine mühendisliği, mühendislik bilimlerinin en köklü ve en geniş uygulama alanlarından biri olarak, teknolojik gelişmelerin yön verdiği dinamik bir dönüşüm süreci yaşamaktadır. Dijitalleşme, sürdürülebilirlik, akıllı üretim sistemleri ve disiplinler arası mühendislik yaklaşımları, makine mühendisliğinin geleneksel sınırlarını genişleterek tasarım, analiz, üretim ve bakım süreçlerinde yenilikçi çözümlerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Enerji sistemleri, ileri imalat teknolojileri, robotik ve otomasyon, mekatronik sistemler, hesaplamalı mühendislik, yapay zekâ destekli mühendislik uygulamaları, akıllı malzemeler, termal sistemler, akışkanlar mekaniği, makine elemanları ve sürdürülebilir mühendislik yaklaşımları, günümüz makine mühendisliği araştırmalarının temel odak alanlarını oluşturmaktadır. Endüstri 4.0 ve dijital dönüşümün etkisiyle birlikte akademi ile sanayi arasındaki iş birlikleri her zamankinden daha büyük önem kazanmış; bilimsel araştırmaların yenilikçi mühendislik çözümlerine dönüştürülmesi ve endüstriyel uygulamalara aktarılması, teknolojik gelişimin temel unsurlarından biri hâline gelmiştir. Bu kapsamda hazırlanan Makine Mühendisliğinde Güncel Eğilimler ve İleri Mühendislik Uygulamaları adlı eser, makine mühendisliği alanındaki güncel bilimsel araştırmaları ve teknolojik gelişmeleri bir araya getirerek araştırmacılar, akademisyenler, lisansüstü öğrenciler, mühendisler ve sektör profesyonelleri için kapsamlı bir başvuru kaynağı sunmayı amaçlamaktadır. Kitapta makine tasarımı, üretim teknolojileri, bilgisayar destekli mühendislik uygulamaları, enerji sistemleri,

termodinamik, akışkanlar mekaniği, ısı transferi, robotik sistemler, otomasyon teknolojileri, mekatronik, yapay zekâ destekli mühendislik çözümleri, ileri malzemeler ve sürdürülebilir mühendislik uygulamalarına ilişkin güncel araştırmalar geniş bir perspektifle ele alınmaktadır. Alanında uzman araştırmacılar tarafından hazırlanan bölümler, mevcut bilimsel bilgi birikimini ortaya koymanın yanı sıra gelecekte gerçekleştirilecek akademik araştırmalara ve endüstriyel yeniliklere yön verecek bilimsel bakış açıları sunmaktadır. Bu kitabın, bilimsel bilginin yaygınlaştırılmasına katkı sağlayacağına, disiplinler arası iş birliklerini güçlendireceğine ve makine mühendisliği alanında çalışan araştırmacılar ile uygulayıcılar için değerli bir kaynak oluşturacağına inanıyoruz. Değerli katkılarıyla bu eserin hazırlanmasına destek veren tüm bölüm yazarlarına, bilimsel değerlendirme sürecinde görev alan hakemlere, editörlere ve yayın sürecinde emeği geçen teknik ekibe içten teşekkürlerimizi sunarız. Ayrıca bilimsel araştırmaları ve teknolojik gelişmeleri destekleyen kurum ve kuruluşlara katkılarından dolayı teşekkür ederiz. Bu eserin, makine mühendisliği alanında güncel ve güvenilir bir başvuru kaynağı olmasının yanı sıra genç araştırmacılara ilham vermesini, yenilikçi araştırmaların geliştirilmesine katkı sağlamasını, akademi ile sanayi arasındaki bilgi paylaşımını güçlendirmesini ve geleceğin sürdürülebilir, verimli ve akıllı mühendislik sistemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalara ışık tutmasını temenni ediyoruz.

Prof. Dr. Hasan KÖTEN

Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı İ

stanbul Medeniyet Üniversitesi

İÇİNDEKİLER

TALAŞLI İMALATTA TORNALAMA PARAMETRELERİNİN ENERJİ TÜKETİMİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN PARAMETRİK OLARAK İNCELENMESİ 1

HARUN AKKUŞ, MEHMET BALTA, HARUN YAKA

DÖNEL KANATÇIKLI SİSTEMLERDE SAYISAL BENZETİM TEKNİKLERİ: STATİK YÜKLEME VE MOD ŞEKİLLERİNİN KAPSAMLI ANALİZİ 12

BEYZA ARSLAN

GEOMETRİNİN ÇARPIŞMA KUTULARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ 24

BARAN ERKEK

TEK SİLİNDİRLİ BENZİN MOTORU MODİFİKASYONU VE MOTOR ELEMANLARINA GENEL BİR BAKIŞ 40

ZAFER KAYA, DİNÇER BURAN

SENTETİK YAKITLARIN (E-FUEL) MEVCUT DURUMU VE GELECEĞİ 66

RASİM BEHÇET

BÖLÜM 1

Talaşlı İmalatta Tornalama Parametrelerinin Enerji Tüketimi Üzerindeki Etkilerinin Parametrik Olarak İncelenmesi

Harun AKKUŞ[1]
Mehmet BALTA[2]
Harun YAKA[3]

1. Introduction

Akademik çalışmalar ve firma harcamalarına bakıldığında hammadde ve malzeme alımları, enerji tüketimi (elektrik, doğalgaz, yakıt), işçilik maliyetleri (ücretler, sigorta primleri), bakım ve onarım giderleri, amortisman (makine ve bina gibi sabit varlıkların değer kaybı), lojistik ve nakliye harcamaları, finansman giderleri (faiz, kur farkı), genel yönetim masrafları, pazarlama/satış faaliyetleri, halkla ilişkiler, araştırma geliştirme gibi birçok kalemde ödeme yaptıkları görülmektedir (Öztürk & Dülgeroğlu, 2016). İşletmelerin rekabet şartlarında avantajlı durumda olabilmenin

[1] Doç. Dr, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Otomotiv Teknolojisi Programı, Niğde, Türkiye, ORCID:0000-0002-9033-309X, hakkus@ohu.edu.tr
[2] Öğr. Gör., Amasya Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine Programı, Amasya, Türkiye, ORCID:0000-0002-7074-9258, mehmet.balta@amasya.edu.tr
[3] Doç. Dr, Amasya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Amasya/Türkiye, Orcid: 0000-0003-4859-9609, harun.yaka@amasya.edu.tr

yollarından biri de yıllık bazda giderlerini düşürecek şekilde bu kalemlerde tasarrufa gitmeleridir (Belgin, 2019). Bu tasarruf miktarı işletmenin faaliyet alanı, üretim teknolojisi ve ölçeğine göre değişmekle birlikte, genelde enerji ve işçilik maliyetleri, üretim süreçlerinin verimliliği üzerinde ve ürün fiyatına doğrudan etki eden unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Ülkelerin politikaları gereği hazırlanan kalkınma planları incelendiğinde üretimde enerji ile ilgili düzenlemeler sunduğu görülmektedir. Bu düzenlemeler arasında işçi desteği, vergi muafiyeti, çeşitli hibe destekleri, alternatif enerji kaynakları yatırım desteklerini içermektedir.

İmalat sanayisinde ham malzemenin cevherden çıkarılıp nihai ürün haline getirilmesi sürecinde ekonomik, sosyal ve çevresel açıdan sürdürülebilir olması son derece önemlidir. Enerji tüketiminin azaltılması, sürdürülebilir üretim ve çevresel etkilerin en aza indirilmesi açısından günümüzde önemli bir araştırma konusudur. Örneğin çevresel faktörler dikkate alınarak yapılan üretim planı, ıskarta malzemenin azaltılması ve işlem sürecinin kısaltılması girdi maliyetlerini düşürürken aynı zamanda enerji tasarrufu sağlamaktadır (Çakır, Kavak & Şeker, 2017).

Talaşlı imalat işlemleri arasında çokça tercih edilen ve kullanılan yöntemlerden bir taneside tornalama işlemidir. Enerji verimliliğini artırmak, karbon ayak izini azaltmak, atık malzeme miktarını azaltmak, işleme maliyetini düşürmek gibi amaçlarla tornalama işlemlerinde enerji tüketimini etkileyen parametrelerin belirlenmesi, anlaşılması ve optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır.

2024-2028 yıllarını kapsayan 12. Kalkınma Planına bakıldığında katma değeri yüksek ürünler üretme hedefi için imalat sanayisinde yapılması gerekenlere yer verildiği görülmektedir. Yeşil ve dijital dönüşümle rekabetçi, sürdürülebilir üretim, enerji verimliliği öncelikli alanlar olarak belirlenmiş, enerji tüketiminin fazla olduğu sektörlerde gerekli teşviklerin yapılacağı vurgulanmıştır. Talaşlı imalat yöntemlerinde dijital ve otomasyon sistemlerinin arttırılacağı, üretim kalitesinin yükseltilmesi hem de enerji tüketiminin azaltılması amaçlanmaktadır. Aynı zamanda yerli ve milli üretim teknolojilerinin desteklenmesi ile dışa bağımlılığın

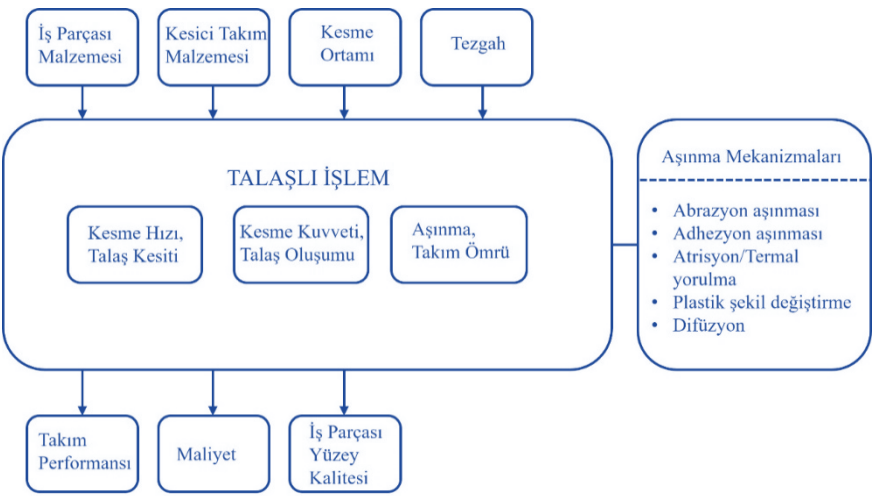
--2--

azaltılması hedeflemektedir (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023).

Bu çalışmada, tornalama işlemlerinde enerji tüketimini etkileyen parametreler ele alınmakta; malzeme, sertlik, kesme hızı, ilerleme miktarı, talaş derinliği, takım geometrisi, malzeme türü, soğutma şekli, işlem süresi, işleme yöntemi gibi faktörlerin enerji üzerindeki etkilerinin akademik çalışmalar ışığında sunulması amaçlanmıştır.

2. Tornalama İşlemleri ve Temel Kavramlar

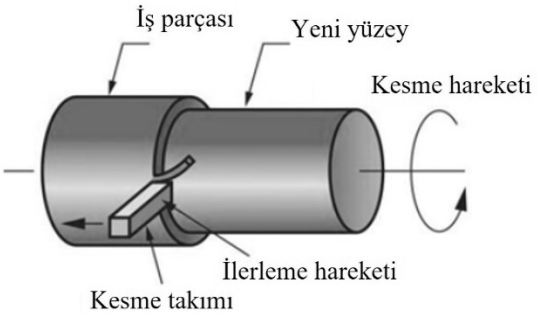
Talaş kaldırma işlemi incelendiğinde kompleks bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bu karmaşıklığın anlaşılabilmesi için araştırmalarda birkaç faktör sabit tutulmak suretiyle yapılan işleme etkileri araştırılmaktadır. Diğer bir değişle bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenlere olan etkileri araştırılarak optimum işleme parametreleri belirlenmektedir. Kesici takım performansı ve maliyet önemli ölçüde etkileyen takım ömrü en çok dikkat edilen unsurlardandır. Şekil 1'de talaş kaldırmaya etki eden faktörler gösterilmiştir (Rao, Sreeamulu & Mathew, 2014).



Şekil 1: Talaş kaldırmaya etki eden faktörler

--3--

Tornalama, dairesel kesitli bir iş parçasının sabitlenerek döndürülmesi ve sabit bir kesici takım yardımıyla üzerinden talaş kaldırılması esasına dayanan talaşlı imalat yöntemidir. CNC (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol) torna tezgâhlarının yaygınlaşması, yüksek hassasiyetli üretimi mümkün kılmış ve üretim sürecinin dijital kontrolünü kolaylaştırmıştır. Şekil 2'de tornalama işlemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2: Tornalama işlemi şematik gösterimi (Choubey, Gupta & Choubey, 2022)

3. Literatürdeki Akademik Çalışmalar

Literatürde tornalama işlemi ile ilgili birçok çalışma bulunmakla birlikte burada farklılık oluşturması adına konuyla bağlantı kurulabilecek kaynaklara yer verilmiştir. Akademik makalelere bakılınca bu alanda yapılan farklı çalışmalara ulaşılabilir.

Tornalama işlemi ile ilgili kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, titreşim, kesme kuvvetleri, aşınma, talaş şekli, ses şiddeti, akustik emisyon gibi birçok parametreye etkisi araştırılmıştır (Asiltürk, Akkuş & Demirci, 2012; Akkuş, 2018; Akkuş, 2021). Son yıllarda gelişen teknoloji ve artan enerji tüketimine bağlı olarak tornalama işlemlerinde enerji analizine yönelik çalışmalar artarak devam etmektedir. Bu çalışmaların bazıları aşağıda özetlenmiştir:

Serin vd. (2019) yapmış oldukları çalışmada tornalama işlemi ile Ti6Al4V malzemenin yüzey pürüzlülüğü ve işleme sırasında meydana gelen özgül kesme enerjisini değerlerini talaş derinliği, kesme hızı ve ilerlemeye bağlı olarak tespit etmişlerdir. Çalışmalar

--4--

sonucunda minimum yüzey pürüzlülüğü ve minimum özgül kesme enerjisi için gerekli optimum girdi parametre değerlerini belirlemişledir.

Akkuş (2021) yapmış olduğu çalışmada CNC torna tezgahında titanyum alaşımlı TC4 malzemeyi tornalamış tornalama sonucunda kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliğinin malzeme kaldırma oranı (MRR), ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra), ses yoğunluğu, enerji tüketimi ve titreşim üzerine etkilerini deneysel ve istatistiksel olarak araştırmıştır. Oluşturulan tahmin modeli sonucunda enerji tüketimini %92,70 doğrulukta elde etmiştir.

Bu çalışmalar, enerji tüketiminin sadece işlem parametrelerine değil, aynı zamanda üretim stratejisine ve kullanılan tezgâh teknolojisine de bağlı olduğunu göstermektedir.

4. Tornalama işlemlerinde enerji tüketimi

Yapılan literatür taraması sonucunda tornalama işlemlerinde enerji tüketimini kesme enerjisi, yardımcı enerji ve boşta çalışma enerjisi olarak üç kısma ayırabiliriz.

Boşta çalışma enerjisi: Tezgah çalışır haldeyken, ancak kesme işlemi gerçekleşmezken tüketilen enerjidir. Otomobillerde nasıl rölantide uzun süre çalışma yakıt tüketimini arttırıyorsa talaşlı imalattada tezgahın uzun süre boşta çalışması enerji tüketimini arttırır.

Kesme enerjisi: Takımın iş parçası üzerinden talaş kaldırmak için harcadığı enerjidir. Yine otomobillerde dikkate alındığında devir artması yada tezgahın yüksek devirde çalışması enerji tüketimini arttırır.

Yardımcı enerji: Soğutma, otomasyon, kontrol ve diğer yardımcı sistemler tarafından tüketilen enerjidir. Yine otomobillerde olduğu gibi sistemden ekstra güç çeken her ünite/özellik açıldığında veya tezgahların diğer özellikleri açıldığında enerji tüketimini artar.

Enerji tüketimini optimize etmek için özellikle kesme enerjisinin ve boşta çalışma süresinin minimize edilmesi önemlidir.

--5--

4.1. Tornalamada Enerji Tüketimini Etkileyen Başlıca Parametreler

Tornalamada tezgah motor gücü, tezgah tipi, tezgah yaşı ve durumu, kesme parametreleri, malzeme özellikleri, çevresel şartlar, operatör bilgi ve becerisi, işin karmaşıklığı enerji tüketimini etkileyen parametreler olarak sayılabilir.

4.1.1. Motor Gücü ve Tipi

Torna makinelerinin motor gücü, enerji tüketiminin temel belirleyicilerindendir. Küçük masaüstü tornalar genellikle 0.5 kW ila 2 kW arasında motor gücüne sahipken, büyük endüstriyel tornalar 5 kW ila 50 kW veya daha yüksek motor gücüne sahip olabilir. CNC torna makineleri, daha karmaşık elektronik kontrol sistemleri ve genellikle daha yüksek güçlü motorlar kullandığından, manuel torna makinelerine göre daha fazla enerji tüketebilir (Velchev, Kolev, Ivanov & Gechevski, 2014).

4.1.2. Makine Yaşı ve Durumu

Eski ve bakımsız makineler, daha fazla enerji tüketebilir. Düzenli bakım ve zamanında yapılan yükseltmeler, enerji verimliliğini artırabilir. Ayrıca, eski makinelerdeki verimsiz motorlar ve kontrol sistemleri, enerji kayıplarına yol açar (Cahyati, Triyono, Annas & Sumpena, 2016). Bu sebeplerden dolayı eski makinelere teknolojik yeni makinelerle güncellenmelidir.

4.1.3. Kesme Parametreleri

Kesme hızı, ilerleme hızı ve talaş derinliği gibi işleme parametreleri, enerji tüketimini doğrudan etkiler. Yüksek kesme hızları ve derin kesimler, motorun daha fazla güç harcamasına neden olur.

Kesme hızı, takım ile iş parçası arasındaki bağıl hızı ifade eder. Kesme hızındaki artış, işlem süresini azaltarak üretkenliği artırsa da genellikle enerji tüketimini de artırır. Çünkü yüksek hızlarda daha

--6--

fazla motor gücü gerekir ve sürtünme kaynaklı ısı artışı söz konusudur. Kesme hızı ve enerji tüketimi doğru orantılıdır. Kesme hızının optimum aralıkta tutulması önemlidir.

İlerleme miktarı, takımın bir devirde iş parçası boyunca ne kadar ilerlediğini belirtir. İlerleme oranı artırıldığında daha fazla talaş kaldırılır, bu da enerji yoğunluğunu (birim parça başına tüketilen enerji) azaltabilir. İlerleme artarsa işlem süresi kısalır ve enerji tüketimi azalır. Ancak yüzey kalitesi ve takım aşınması dikkate alınmalıdır.

Talaş derinliği, iş parçasının üzerinden kaldırılan talaş kalınlığını belirtir. Derinliğin artması, işlem süresini azaltabilir ancak takım üzerinde yüksek yük oluşturur. Talaş derinliği artarsa enerji tüketimi de artar ancak enerji yoğunluğu genelde azalır. Aşırı artış takım ömrünü azaltabilir.

4.1.4. Malzeme Özellikleri

İşlenen malzemenin sertliği ve bileşimi, enerji tüketimini etkileyen önemli bir faktördür. Daha sert malzemelerin işlenmesi, daha fazla enerji gerektirir. Alüminyum gibi yumuşak malzemeler, çelik gibi sert malzemelere göre daha az enerji tüketir (Bilga, Singh & Kumar, 2016).

İş parçası malzemesinin sertliği, tokluğu ve termal iletkenliği enerji tüketimini doğrudan etkiler. Örneğin, paslanmaz çelik gibi zor işlenebilir malzemeler daha fazla enerji tüketir.

4.1.5. Çevresel Koşullar

Makine ortamının sıcaklık ve nem seviyeleri, enerji tüketimini etkileyebilir. Yüksek sıcaklıklar, motorların daha fazla enerji harcamasına neden olabilir. Uygun havalandırma ve sıcaklık kontrolü, enerji tüketimini azaltabilir (Bilga, Singh & Kumar, 2016).

4.1.6. Operatör Becerileri ve Eğitim

İyi eğitim almış operatörler, makinenin ayarlarını ve işleme parametrelerini optimize ederek enerji tüketimini azaltabilir.

--7--

Operatörlerin deneyimi ve bilgi düzeyi, enerji verimliliği üzerinde doğrudan etkiye sahiptir (Bilga, Singh & Kumar, 2016).

4.1.7. Enerji Verimli Teknolojiler

Değişken frekanslı sürücüler (VFD) ve enerji verimli motorlar gibi teknolojiler, enerji tüketimini azaltabilir. Bu teknolojiler, motor hızını ve torkunu kontrol ederek, düşük yüklü işlemler sırasında enerji tüketimini azaltır.

4.1.8. Takım Malzemesi ve Kaplaması

Karbür, seramik veya kübik bor nitrür (CBN) gibi farklı takım malzemeleri, farklı kesme dirençlerine ve ısı iletkenliklerine sahiptir. Kaplama teknolojileri (TiN, Al_2O_3 vb.) enerji verimliliğini artırabilir. Yüksek kaliteli ve uygun kaplamalı takımlar enerji tüketimini azaltır. Uygun takım seçimi daha az kesme kuvveti anlamına geleceğinden enerji tüketimi azalır.

4.1.9. Soğutma ve Yağlama Yöntemleri

Soğutma sıvıları, kesme bölgesindeki ısıyı azaltarak takım ömrünü uzatır ve enerji tüketimini azaltabilir. Ancak soğutma sistemleri de enerji tüketen yardımcı sistemlerdir. Geleneksel soğutma yöntemleri ek yardımcı sistemler kullandığı için enerji tüketimini arttırır. Minimum yağlama veya kuru işleme enerji tüketimini arttırır ama dikkatli uygulanmalıdır.

5. Sonuç ve Değerlendirme

Tornalama işlemlerinde enerji tüketimi, çok sayıda değişkene bağlı olarak değişkenlik gösterir. Kesme parametreleri, takım ve iş parçası malzemesi, soğutma stratejileri gibi faktörlerin birlikte optimize edilmesi hem üretim verimliliği hem de sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşır. Yapılan literatür taraması ve parametre analizleri, enerji verimliliği için aşağıdaki önerileri öne çıkarmaktadır:

--8--

- İşlem parametreleri dikkatle seçilmeli.
- Uygun malzeme seçimi, gerekli işlemlerle işlenebilirliğe uygun hale getirilmeli.
- Enerji izleme sistemleri kurulmalı.
- Yenilikçi soğutma stratejileri uygulanmalı.
- Makine teknolojileri güncellenmeli.
- İşlem basamakları güncellenmeli, Bilgisayar Destekli İmalat programları ile işleme simülasyonu yapılabilir.
- Deneyimli ve tecrübeli elemanlar çalıştırılmalı.

Sonuç olarak, tornalama işlemlerinde enerji tüketiminin düşürülmesi hem ekonomik hem de çevresel faydalar sağlayarak imalat sanayinin sürdürülebilirliğine katkıda bulunur.

Kaynakça

Akkuş, H. (2018). Optimising the effect of cutting parameters on the average surface roughness in a turning process with the Taguchi method. *Materiali in tehnologije, 52* (6), 781-785.

Akkuş, H. (2021). Multiple optimization analysis of MRR, surface roughness, sound intensity, energy consumption, and vibration values in machinability of TC4 titanium alloy. *Surface Review and Letters, 28* (9), 2150072.

Asiltürk, İ., Akkuş, H. & Demirci, M. T. (2012). Regresyonla titreşim, akustik emisyon ve kesme parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğünün modellenmesi. *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi, 53* (632), 55-62.

Belgin, Ö. (2019). Bir elektromekanik işletmesinde faaliyet tabanlı maliyet yöntemi uygulaması. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, (62), 125-140.

--9--

Bilga, P. S., Singh, S., & Kumar, R. (2016). Optimization of energy consumption response parameters for turning operation using Taguchi method. *Journal of cleaner production, 137,* 1406-1417.

Cahyati, S., Triyono, T., Annas, M. S., & Sumpena, A. (2016). The influence of eco maintenance on power consumption of the lathe machines. *Applied Mechanics and Materials, 842*, 381-387.

Choubey, A., Gupta, B., & Choubey, N. (2022). Operational Aspects of Turning Process by Lathe Machine: A Review. *International Journal of Mechanical Handling and Automation, 8* (2), 37-40.

Çakır, A., Kavak, N. & Şeker, U. (2017). Sürdürülebilir üretim için talaşlı imalatta kullanılan kesme sıvılarının geri dönüşümü. *Mühendis ve Makina*, *58* (684), 15-30.

Öztürk, E., Dülgeroğlu, İ. (2016). Pazarlama ve genel yönetim giderlerinin firma performansı üzerindeki etkisi. *Niğde Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 9* (3), 137-146.

Rao, C. J., Sreeamulu, D., & Mathew, A. T. (2014). Analysis of tool life during turning operation by determining optimal process parameters. *Procedia Engineering, 97,* 241-250.

Serin, G., Kahya, M., Özbayoğlu, M. & Ünver, H. Ö. (2019). TI6AL4V malzemesinin tornalama işleminde özgül kesme enerjisi ve yüzey pürüzlüğünün incelenmesi ve yapay sinir ağları temelli tahmin modeli geliştirilmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 24* (2), 517-536.

--10--

T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı (2023). *On İkinci Kalkınma Planı (2024-2028)*. (27.10.2026 tarihinde https://www.sbb.gov.tr/kalkinma-planlari/ adresinden ulaşılmıştır).

Velchev, S., Kolev, I., Ivanov, K., & Gechevski, S. (2014). Empirical models for specific energy consumption and optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption during turning. *Journal of cleaner production, 80*, 139-149.

--11--

BÖLÜM 2

DÖNEL KANATÇIKLI SİSTEMLERDE SAYISAL BENZETİM TEKNİKLERİ: STATİK YÜKLEME VE MOD ŞEKİLLERİNİN KAPSAMLI ANALİZİ

BEYZA ARSLAN[1]

Giriş

Sonlu elemanlar analizi (FEA), sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak değerlendirilebilmesi için belirli koşullar altında bir parçanın veya montajın davranışını simüle etme sürecidir. FEA, mühendisler tarafından fiziksel olayların simüle edilmesine yardımcı olmak ve böylece fiziksel prototiplere olan ihtiyacı azaltmak için kullanılırken, bir projenin tasarım sürecinin bir parçası olarak bileşenlerin optimizasyonuna izin verir.

FEA, gerçek dünya koşullarının bir parça veya montaj üzerindeki etkilerini anlamak ve ölçmek için matematiksel modeller kullanır. Özel yazılımlar aracılığıyla gerçekleştirilen bu simülasyonlar, mühendislerin gerilim alanları ve zayıf noktalar da dahil olmak üzere bir tasarımdaki potansiyel sorunları tespit etmelerini sağlar. Matematik kullanımı ile yapısal veya akışkan davranışını, dalga yayılımını, termal taşınımı ve diğer olayları anlamak ve ölçmek mümkündür. Süreçlerin çoğu kısmi diferansiyel denklemler (PDE'ler) kullanılarak tanımlanabilir, ancak gerilme ve gerinim oranları gibi parametrelerin tahmin edilebilmesi için bu karmaşık denklemlerin çözülmesi gerekir. FEA bu problemlere yaklaşık bir çözüm sağlar.

FEA, modern yazılım simülasyon yazılımlarının temelini oluşturur ve sonuçlar genellikle bilgisayar tarafından oluşturulan bir renk skalasında gösterilir.

Bu çalışmada, karmaşık geometriye sahip turbomakine elemanlarında statik ve modal analiz süreçlerini incelemek amacıyla bir kanatçıklı disk (bladed disk) modeli oluşturulmuştur. Çalışmanın temel amacı, belirli bir ticari ürünün performansını ölçmekten ziyade, dönel yapılarda ön gerilme (pre-stress) etkisini, mod şekillerini ve doğal frekans yanıtlarını belirlemeye yönelik adım adım bir analiz metodolojisi sunmaktır. Bu kapsamda, titanyum alaşımlı model üzerinde ANSYS 2024 R1 yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, 7500 RPM dönme hızındaki yapının ilk 6 doğal frekansı ve mod şekilleri elde edilerek hareketsiz (durgun) durumdaki frekans değerleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, merkezkaç kuvvetlerin oluşturduğu ön gerilme durumunun ve

[1] Müh.,Havacılık ve Uzay, Orcid: 0009-0007-9281-6478

dönel dinamiklerin doğal frekanslar üzerindeki etkisini metodolojik olarak ortaya koymaktadır.

Sonlu Elemanlar Analizinin Çalışma Mekanizması

Sonlu Elemanlar Analizi (FEA), sürekli bir ortama ve sonsuz serbestlik derecesine sahip karmaşık mühendislik yapılarını, "eleman" (element) olarak adlandırılan sonlu sayıdaki basit alt bölgelere bölerek analiz eder. Geometriyi oluşturan bu eleman topluluğuna ağ yapısı (mesh) adı verilir.

Analiz sürecinde, sürekli ortamdaki bilinmeyen alan değişkenleri (örneğin yer değiştirmeler veya gerilmeler), elemanların köşe ve kenarlarında yer alan düğüm noktalarındaki (nodes) değerler cinsinden tanımlanır. Her bir eleman içindeki sürekli alanın hesaplanması için genellikle polinomsal şekil fonksiyonları (shape functions) kullanılarak interpolasyon yapılır. Bu sayede sonsuz serbestlik dereceli diferansiyel denklemler, düğüm noktalarındaki yer değiştirmeleri esas alan ve matris cebiri ile çözülebilen lineer denklem takımlarına dönüştürülür:

$$[K]\,\{u\} = \{F\}$$

Burada $[K]$ yapının global rijitlik matrisini, $\{u\}$ düğüm noktalarının yer değiştirme vektörünü ve $\{F\}$ yapıya uygulanan dış kuvvetler vektörünü temsil eder.

Sonlu Elemanlar Analizinde Ayrıklaştırma ve Yaklaşım Fonksiyonları

Gerçek mühendislik yapıları sonsuz serbestlik derecesine (Degree of Freedom - DoF) sahip sürekli sistemlerdir (continuous systems). Ancak bu tür sistemlerin analitik yöntemlerle çözülmesi yalnızca çok basit geometriler ve sınır şartları için mümkündür. Sonlu Elemanlar Analizi (FEA), sürekli ortamı sonlu sayıda düğüm noktası ve elemandan oluşan ayrık bir sisteme (discrete system) dönüştürerek çözülebilir hale getirir.

- **Ayrıklaştırma ve Hata Formülasyonu :** Ayrıklaştırılmış bir yapıda herhangi bir $u(x)$ alan değişkeni (örneğin yer değiştirme veya sıcaklık dağılımı), gerçek sürekli çözüm $u(x)$ ve bu çözüme yapılan yaklaşım $u^h(x)$ cinsinden ifade edilebilir:

$$u(x) = u^h(x) + e(x)$$

Burada $u^h(x)$ ayrıklaştırılmış alt uzaydaki yaklaşık çözümü, $e(x)$ ise ayrıklaştırmadan kaynaklanan hata terimini (discretization error) temsil eder. FEA'da temel hedef, uygun düğüm noktası dağılımı ve yaklaşım fonksiyonları seçerek bu $e(x)$ hata terimini kabul edilebilir bir minimum seviyeye indirmektir.

- **Şekil Fonksiyonları ve İnterpolasyon :** Yaklaşık çözüm $u^h(x)$, düğüm noktalarındaki bilinmeyen değerler (a_i) ve eleman geometrisi üzerinden tanımlanan şekil fonksiyonları (shape functions / basis functions - $\phi_i(x)$) cinsinden bir seri toplamı olarak parametrize edilir:

$$u^h(x) = \sum_{i=1}^{n} a_i \phi_i(x)$$

Burada n, elemanın sahip olduğu toplam düğüm sayısı veya serbestlik derecesidir. Şekil fonksiyonları genellikle polinomsal fonksiyonlardır (doğrusal, ikinci dereceden/quadratic veya kübik). Polinomun derecesi yükseldikçe eleman içi alan değişkeninin değişimi daha yüksek hassasiyetle temsil edilir.

- **Yerel Mesh Yoğunlaştırılması ve Adaptasyon (h- ve p-Refinement) :** FEA'nın en büyük avantajlarından biri, eleman boyutlarının ve serbestlik derecelerinin alan değişkeninin gradyanına bağlı olarak bölgesel olarak ayarlanabilmesidir:
    i. **h-Refinement (Eleman Boyutu Yaklaşımı):** Alan değişkeninin dik değişim gösterdiği (yüksek gerilme gradyanlarının veya geometrik süreksizliklerin bulunduğu) bölgelerde daha küçük elemanlar kullanılarak mesh sıklaştırılır.
    ii. **p-Refinement (Polinom Derecesi Yaklaşımı):** Eleman boyutları sabit tutularak şekil fonksiyonlarının polinom derecesi ($\phi_i(x)$) artırılır.

Yapacağımız bladed disk örneğinde, kanat kökleri (blade roots) gibi merkezkaç kuvvetlerinin gerilme yığılmalarına yol açtığı kritik geçiş bölgelerinde daha küçük eleman boyutu (h-refinement) ve ikinci dereceden (p-refinement) elemanlar kullanılması, hata terimi $e(x)$'in minimize edilmesi açısından kritik metodolojik bir gerekliliktir.

ANSYS Ortamında Modal Analiz

Modal analiz, bir yapının dinamik karakteristiklerini ve titreşim davranışını belirlemek amacıyla kullanılan temel bir sayısal yöntemdir. Mühendislik tasarımlarında, yapının çalışma esnasında maruz kalacağı dinamik yüklere karşı tepkisini öngörmek ve en kritik yapısal risklerden biri olan rezonans (dış tahrik frekansı ile doğal frekansın çakışması) durumunu önlemek için kritik rol oynar.

Modal analiz sonucunda yapının doğal frekansları ve bu frekanslardaki deformasyon biçimleri olan mod şekilleri (mode shapes) elde edilir. Bunlara ek olarak ANSYS yazılımı; belirli bir yöndeki kuvvetlerin hangi modları ne derece etkileyeceğini gösteren katılım faktörlerini (participation factors) ve etkin kütle (effective mass) değerlerini hesaplar. Bu veriler, harmonik, yanıt spektrumu (response spectrum) veya rastgele titreşim (random vibration) gibi ileri düzey dinamik analizler için yeterli sayıda modun çözüme dahil edilip edilmediğini kontrol etmede kullanılır.

Teorik Altyapı ve Terminoloji

Serbest ve sönümsüz bir sistemin doğrusal dinamik hareket denklemi matris formunda şu şekilde ifade edilir:

$$[M]\{\ddot{u}\}\,[K]\{u\} \;=\; \{0\}$$

Burada $[M]$ yapının kütle matrisini, $[K]$ rijitlik matrisini, $\{u\}$ düğüm noktalarının yer değiştirme vektörünü ve $\{\ddot{u}\}$ ivme vektörünü temsil eder.

Sistemin serbest titreşimde harmonik hareket yaptığı varsayılırsa, yer değiştirme ve ivme ifadeleri şu şekilde yazılabilir:

$$\{u\} = \{\phi\}_i \sin(\omega_i t + \theta_i)$$

ANSYS Workbench Analiz Akışı ve Modül Kurulumu

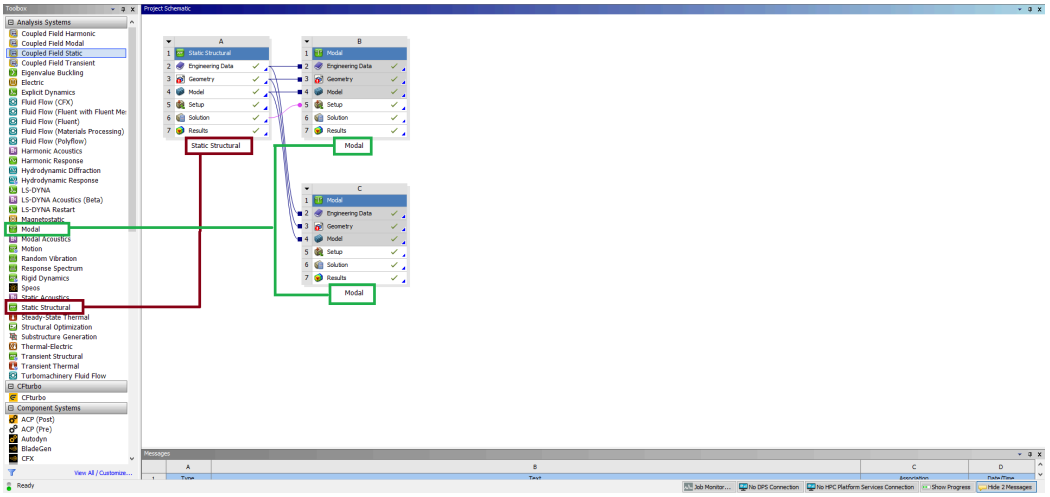
Sayısal simülasyon süreçleri ANSYS Workbench 2024 R1 ortamında kurgulanmıştır. Tasarlanan bladed disk geometrisinin iç aktarımı (import) tamamlandıktan sonra, merkezkaç kuvvetlerin yapının dinamik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla çoklu bir analiz şeması (Project Schematic) oluşturulmuştur.

İlk aşamada, Workbench bileşen sistemlerinden Static Structural modülü (Şekil 1, Sistem A) çalışma alanına eklenmiştir. Bu sistem bünyesinde yapının iç yüzeyine sabit mesnet (Fixed Support) sınırı tanımlanmış ve 7500 RPM dönme hızı (Rotational Velocity) uygulanmıştır. Statik çözümleme sonucunda yapıda meydana gelen toplam deformasyon (Total Deformation) ve von Mises eşdeğer gerilme (Equivalent Von-Mises Stress) dağılımları elde edilmiştir.

İkinci aşamada, yapının ön gerilmeli dinamik karakteristiklerini belirlemek üzere Modal analiz modülü (Şekil 1, Sistem B) şemaya dahil edilmiştir. Static Structural sisteminin **Solution** hücresi, Modal sisteminin **Setup** hücresine doğrudan bağlanmıştır. Bu veri aktarımı sayesinde merkezkaç kuvvetlerinden kaynaklanan gerilme alanı (stress stiffness) modal analize aktarılmış ve yapının ilk 6 doğal frekansı ile mod şekilleri ön gerilmeli (pre-stressed) olarak çözdürülmüştür.

Son aşamada ise, ön gerilme etkisini kıyaslamalı olarak ortaya koyabilmek adına, statik yüklerden bağımsız ikincil bir Modal analiz modülü (Şekil 1, Sistem C) eklenmiştir. Bu sistemde yalnızca geometri ve malzeme tanımları kullanılarak yapının durgun durumdaki (0 RPM) serbest titreşim davranışları hesaplanmıştır.

Şekil 1: Workbench Arayüzü.



Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

Analizde kullanılacak malzeme özelliklerini tanımlamak amacıyla **Engineering Data** hücresinden malzeme kütüphanesine erişilmiş ve "General Materials" kategorisi altında yer

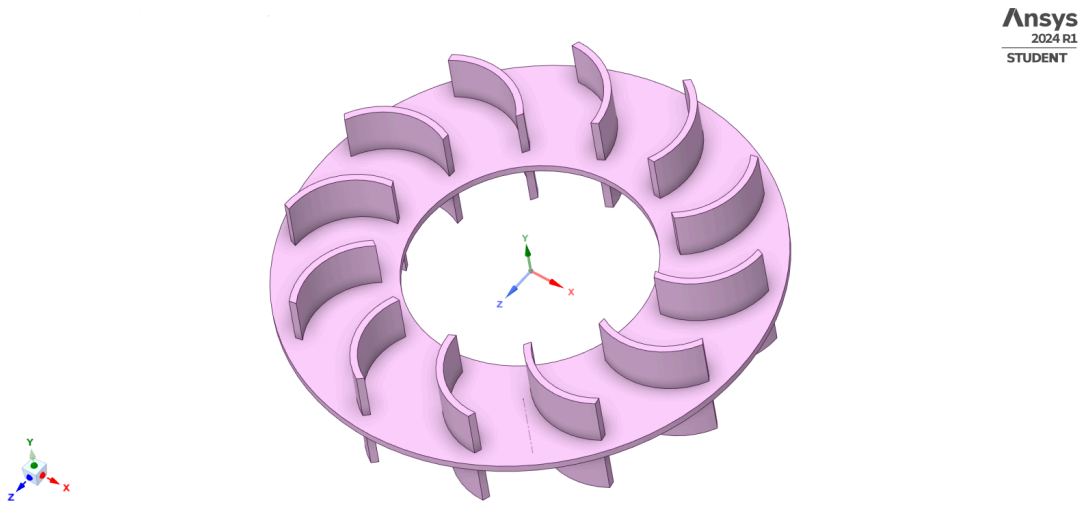
alan **Titanyum Alaşımı (Titanium Alloy / Ti-6Al-4V)** seçilerek sisteme dahil edilmiştir. Ardından hazırlanan bladed disk geometrisi **Geometry** hücresine iç aktarılmıştır (import).

ANSYS Workbench Analiz Akışı ve Modül Kurulumu

Analizlerde kullanılan bladed disk geometrisi, turbomakine çarklarının temel yapısal özelliklerini yansıtacak şekilde parametrik olarak modellenmiştir. Yapıyı oluşturan disk (hub) ve kanatçık (blade) bileşenlerine ait temel geometrik boyutlar ve parametreler aşağıda detaylandırılmıştır:

- **Disk Geometrisi Parametreleri :** FEA'nın en büyük avantajlarından biri, eleman boyutlarının ve serbestlik derecelerinin alan değişkeninin gradyanına bağlı olarak bölgesel olarak ayarlanabilmesidir:
    a. **İç Yarıçap (r_i):** 101,6 mm (İç çevre: 319,1858 mm)
    b. **Dış Yarıçapı (r_0):** 203,2 mm (Dış çevre: 638,3716 m)
    c. **Yüzey İlişkisi:** Bitişik (adjacent) yüzeyler arasındaki açı 90°'dir
- **Kanatçık (Blade) Geometrisi Parametreleri :** Diskin üzerine dizilmeli olarak yerleştirilen kanatçıkların kavisli (arc) yapısına ait geometrik ölçütler iç ve dış kenar bölgeleri için şu şekildedir:
    a. **İç Kısım (Blade Root/Inner Edge Arc):**
        i. **Yay Yarıçapı (Arc Radius):** 28,8305 mm
        ii. **Yay Açısı (Arc Angle):** 89,98°
        iii. **Yay Uzunluğu (Arc Length):** 45,2751 mm
    b. **Dış Kızım (Blade Tip/Outer Edge Arc):**
        i. **Yay Yarıçapı (Arc Radius):** 31,7419 mm
        ii. **Yay Açısı (Arc Angle):** 85,42°
        iii. **Yay Uzunluğu (Arc Length):** 47,3245 mm

Şekil 2: SpaceClaim Üzerinde Geometrinin Tanımı.



Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

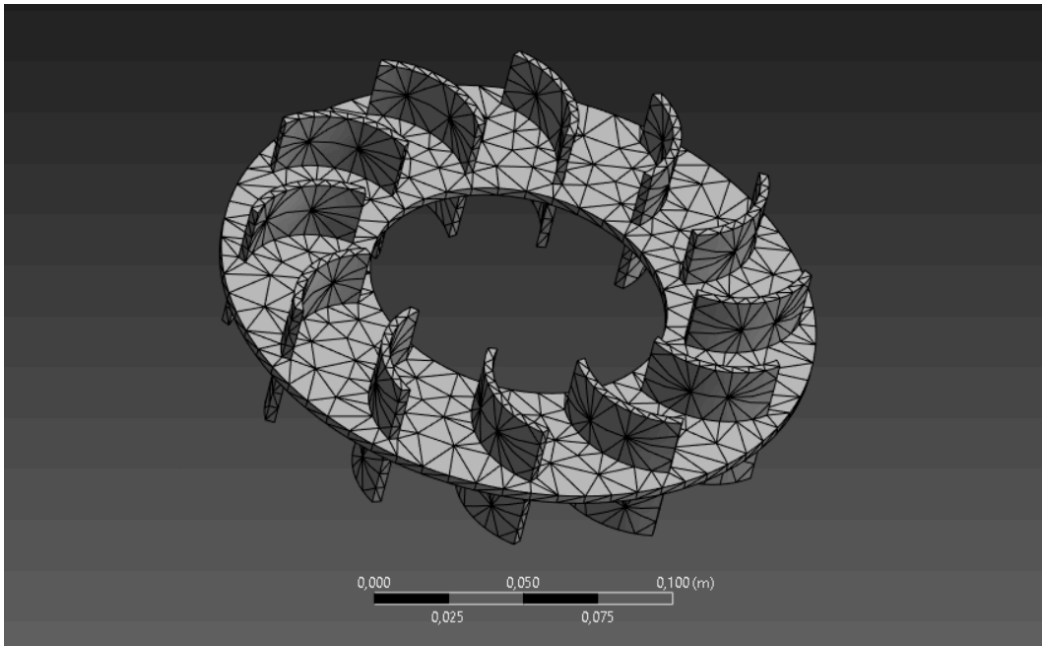
ANSYS Workbench Analiz Akışı ve Modül Kurulumu

Sayısal analizin doğruluğu ve çözüm süresi arasındaki dengeyi sağlamak amacıyla, oluşturulan 3B katı modele ANSYS Meshing modülü üzerinden ağ (mesh) yapısı uygulanmıştır.

Eleman tipi ve mertebesi (Element Order), yapının karmaşık geometrik eğriliklerine uyum sağlayabilmesi adına yazılımın otomatik kontrolüne ("Program Controlled") bırakılmıştır. Bu sayede, eğrisel kanat yüzeylerinde ikinci dereceden (quadratic) tetrahedron elemanlar tercih edilmiştir. Ağ kalitesini ve eleman geçişlerini iyileştirmek amacıyla Düzleştirme (Smoothing) seçeneği "Orta" (Medium) seviyede tutulmuştur.

Oluşturulan nihai ağ yapısı sonucunda bladed disk modeli toplam 4.132 eleman (elements) ve 9.116 düğüm noktasına (nodes) ayrıklaştırılmıştır. Modelin 3B ağ yapısı ve eleman dağılımı Şekil 3'te gösterilmektedir.

Şekil 3: Bladed disk modeline ait sonlu elemanlar ağ yapısı (mesh) ve eleman dağılımı. .



Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

Sınır Şartları ve Yükleme Koşulları

Statik yapısal analiz aşamasında, bladed disk modelinin gerçek çalışma ortamındaki mesnetlenme ve yüklenme koşullarını yansıtmak amacıyla iki temel sınır şartı tanımlanmıştır:

- **Sabit Mesnet (Fixed Support):** Diskin iç göbek (shaft interface) yüzeyine sabit mesnet sınırı uygulanarak yapının uzaysal serbestlik dereceleri kısıtlanmıştır.
- **Dönme Hızı (Rotational Velocity):** Turbomakine çalışma koşullarını simüle etmek amacıyla yapıya eksenel bir dönme hızı atanmıştır. Bu kapsamda, hız bileşeninin

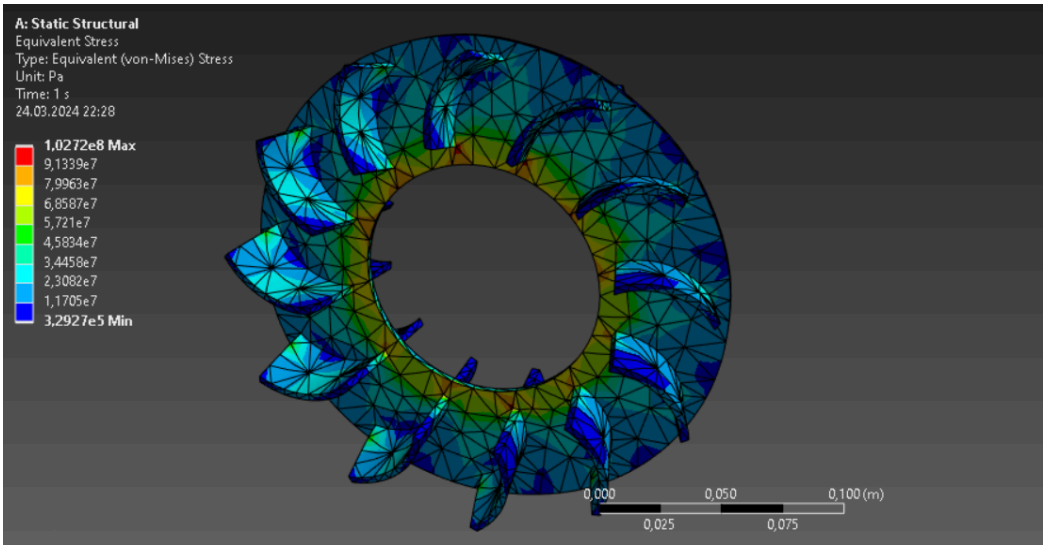
büyüklüğü $7500\ RPM$ $(785,4\ rad/s)$ olarak ayarlanmış ve merkezkaç (centrifugal) kuvvet yüklemesi sisteme dahil edilmiştir.

Statik Analiz Sonuçları

7500 RPM dönme hızı ve sabit mesnet sınır şartları altında gerçekleştirilen Static Structural analiz sonucunda, bladed disk yapısındaki eşdeğer (von-Mises) gerilim ve toplam deformasyon dağılımları elde edilmiştir. Görsellerdeki deformasyon ve şekil değişimleri, incelemenin kolaylaştırılması amacıyla ANSYS yazılımının otomatik ölçeklendirme (*Auto Scale*) algoritmasıyla görsel olarak belirginleştirilerek sunulmuştur.

- **Eşdeğer Gerilim (Equivalent Stress) Dağılımı:** Şekil 3'te verilen analiz sonuçlarına göre, yapıda oluşan eşdeğer gerilim değerleri minimum $3,29 \times 10^{5} Pa$ ile maksimum $1,03 \times 10^{8} Pa$ arasında değişmektedir. Maksimum gerilim yığılmalarının, beklenildiği üzere disk gövdesi ile kanatçıkların birleşim bölgelerinde (kanat köklerinde) yoğunlaştığı net bir şekilde görülmektedir. Bu durum, dönel eksende oluşan merkezkaç atalet kuvvetlerinin kök bölgelerinde yüksek rijitlik talebi yarattığını doğrulamaktadır.

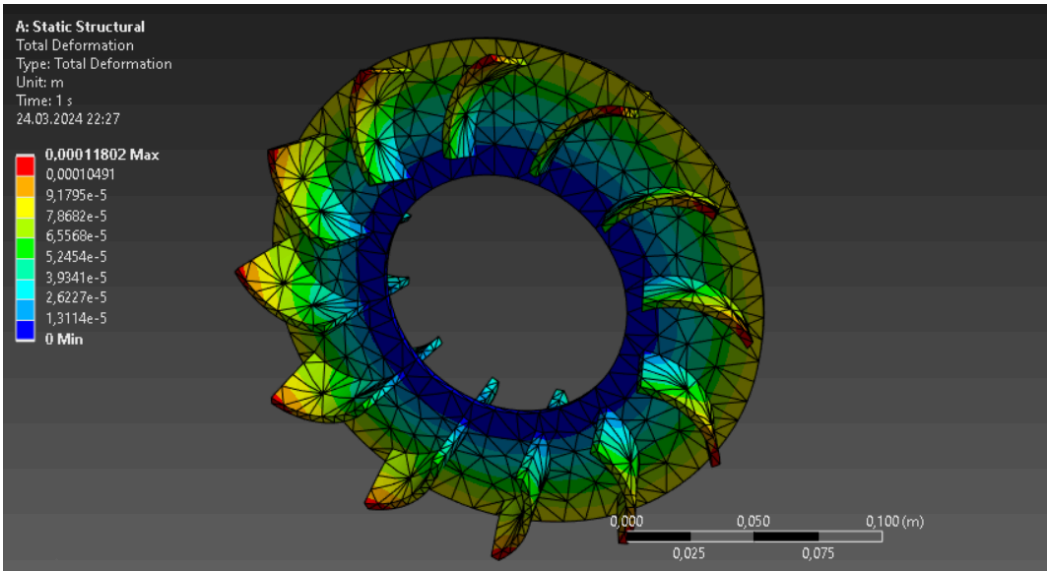
Şekil 4: Bladed disk modeline ait eşdeğer von-Mises gerilim dağılımı (Statik Analiz).



Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

- **Toplam Deformasyon (Total Deformation) Dağılımı:** Yapının maruz kaldığı merkezkaç kuvvetler neticesinde hesaplanan maksimum toplam deformasyon Şekil 4'te görüldüğü üzere $1,18 \times 10^{-4} m$ $(0,118mm)$ seviyesindedir. Deformasyonun en yüksek değerleri kanat uçlarında (blade tips) gözlemlenmiş olup, bu büyüklükteki elastik yer değiştirmeler yapı için herhangi bir mekanik risk teşkil etmemektedir.

Şekil 5: Bladed disk modeline ait toplam deformasyon dağılımı (Statik Analiz).



Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

Statik Analiz Sonuçları

Yapının dinamik karakteristiklerini belirlemek ve dönel hareketin frekans yanıtı üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla ön gerilmeli (7500 RPM) ve durgun (0 RPM) durumlar için modal analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz ayarlarında her iki durum için de incelenen maksimum mod sayısı **6** olarak belirlenmiştir.

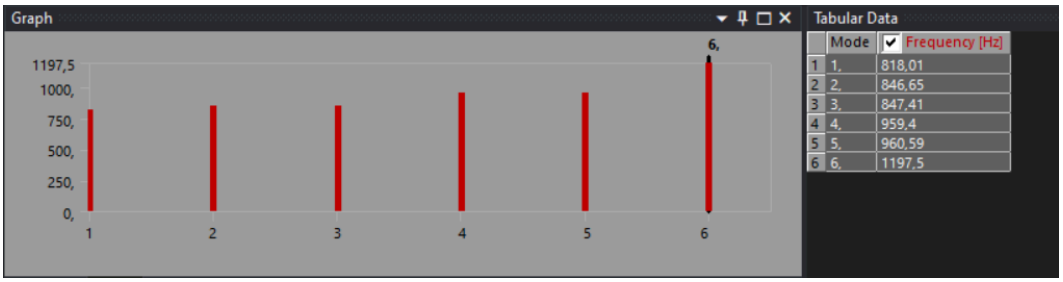
Ön gerilmeli modal analizde, statik analiz aşamasında elde edilen merkezkaç kuvvet kaynaklı gerilme matrisi ($[K_g]$) sisteme aktarılmıştır. Durgun durum analizi için ise proje şemasına eklenen ikincil modal modülde yalnızca geometri ve ağ yapısı paylaştırılmış, herhangi bir ön gerilme veya dönme hızı tanımlanmaksızın iç çemberden sabit mesnetlenerek çözüm koşturulmuştur.

Doğal Frekansların Karşılaştırması

Çözüm sonrasında elde edilen tabular veri ve grafik sonuçlarına göre (Şekil 6), bladed disk modelinin ilk 6 doğal frekans değerleri hesaplanmıştır.

- Tablodaki verilere göre yapının ilk doğal frekansı $818,01Hz$ olarak başlar ve mod sırasına göre artarak $1197,5Hz$ değerine ulaşır.
- Özellikle 2. ve 3. modlar ($846,65Hz$ ve $847,41Hz$) ile 4. ve 5. modlar ($959,4Hz$ ve $960,59Hz$) birbirine oldukça yakın frekans değerlerine (çift mod / double modes) sahiptir. Bu durum, bladed disk yapıların simetrik geometrisinden kaynaklanan karakteristiktir.

Şekil 6: ANSYS Modal analiz sonucuna ait ilk 6 moda ilişkin frekans grafiği (Graph) ve Tablo Verileri (Tabular Data).



Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

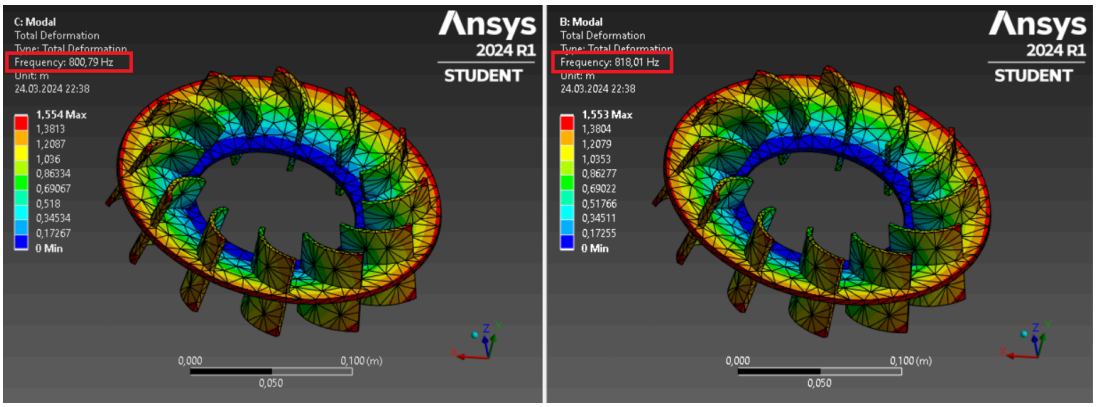
Sonuçların Karşılaştırılması ve Ön Gerilme Etkisinin Değerlendirilmesi

Döner sistemlerde merkezkaç kuvvetlerinin oluşturduğu ön gerilme (pre-stress) alanı, yapısal rijitliği artırarak doğal frekansların yukarı yönlü ötelemesine neden olur. Bu fiziksel durumu ve deformasyonlar üzerindeki etkisini detaylıca incelemek amacıyla, durgun durum ($0RPM$) ile $7500RPM$ çalışma koşulundaki ön gerilmeli modal analiz sonuçları bölünmüş ekran (split-view) formatında karşılaştırılmıştır.

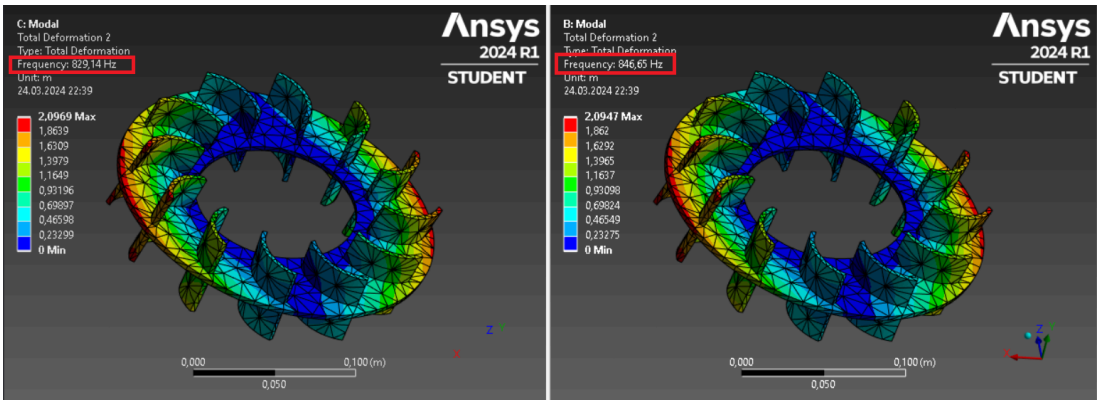
- **Doğal Frekans ve Rijitlik Değişimi:** Yapılan karşılaştırmalı analizler sonucunda, dönme hareketinden kaynaklanan atalet kuvvetlerinin tüm modlardaki doğal frekansları artırdığı doğrulanmıştır. Örneğin, yapının ilk doğal frekansı durgun durumda $800,79Hz$ iken, $7500RPM$ dönme hızı altında $818,01Hz$ seviyesine çıkmıştır. Bu frekans kayması, dönel dinamiklerin ve ön gerilme matrisinin ($[K_g]$) yapıya kazandırdığı ek rijitliğin doğrudan bir sonucudur.
- **Mod Şekilleri ve Deformasyon Dağılımları:** Ön gerilmenin mod şekilleri üzerindeki yansıması incelendiğinde, dönel yüklemenin yapı üzerindeki şekil değiştirme karakteristiğini koruduğu, ancak frekans değerlerini değiştirdiği görülmektedir. Aşağıdaki şekillerde verilen split-view karşılaştırmasında, her iki durum için de mod şekline ait deformasyon dağılımlarının benzer formda olduğu, ancak merkezkaç etkisinden ötürü dinamik davranışın frekans bazında farklılaştığı net bir şekilde izlenmektedir.

Şekil 7: Durgun durum (0RPM) ile ön gerilmeli durum (7500RPM) arasında ilk 6 moda ait frekans ve deformasyon karşılaştırmaları.

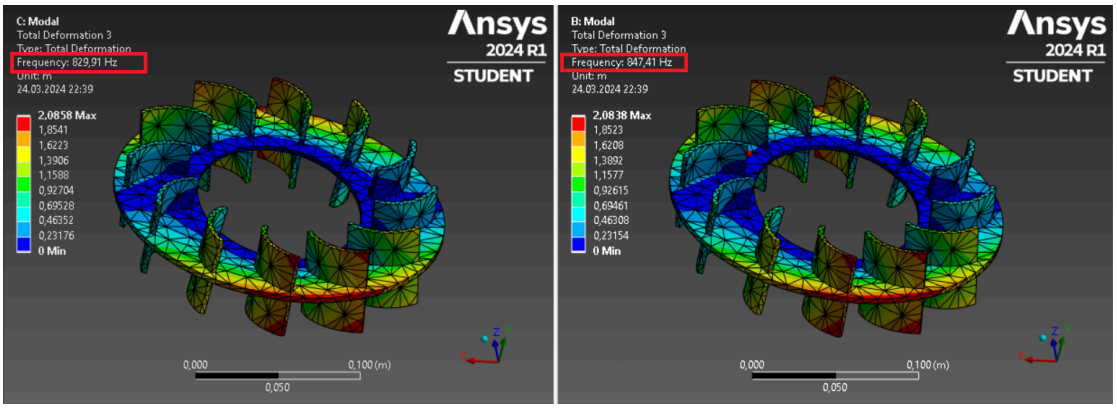
Şekil 7.1: Durgun durum ile ön gerilmeli durum için 1. modal frekans ve deformasyon dağılımının karşılaştırılması.



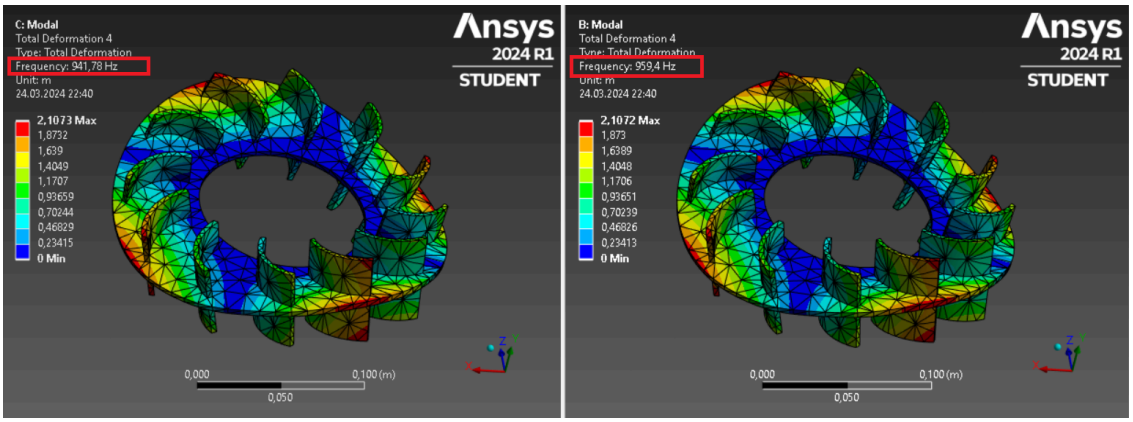
Şekil 7.2: Durgun durum ile ön gerilmeli durum için 2. modal frekans ve deformasyon dağılımının karşılaştırılması.



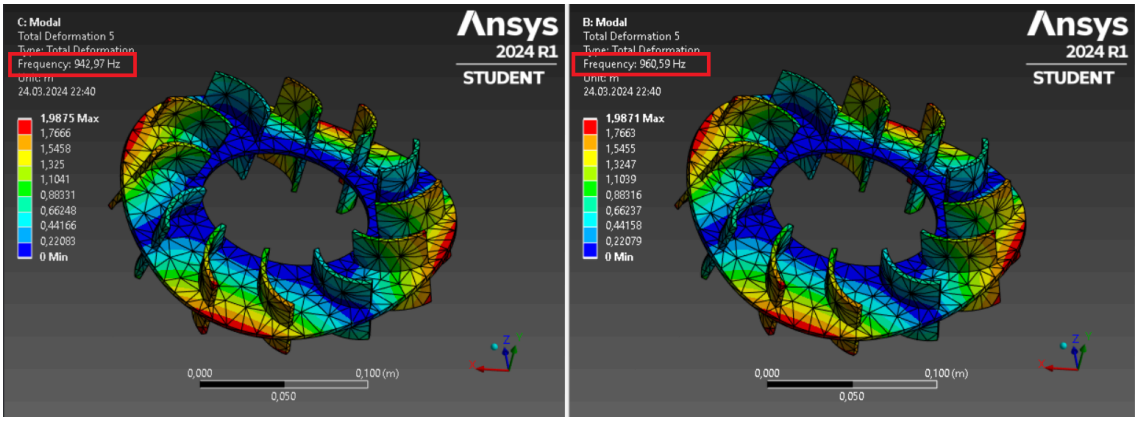
Şekil 7.3: Durgun durum ile ön gerilmeli durum için 3. modal frekans ve deformasyon dağılımının karşılaştırılması.



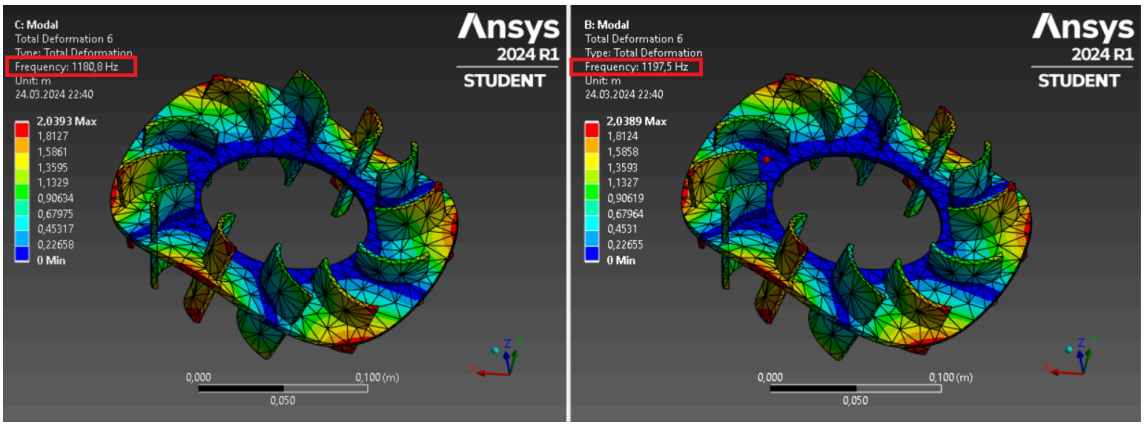
Şekil 7.4: Durgun durum ile ön gerilmeli durum için 4. modal frekans ve deformasyon dağılımının karşılaştırılması.



Şekil 7.5: Durgun durum ile ön gerilmeli durum için 5. modal frekans ve deformasyon dağılımının karşılaştırılması.



Şekil 7.6: Durgun durum ile ön gerilmeli durum için 6. modal frekans ve deformasyon dağılımının karşılaştırılması.



Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

Sonuç

Bu çalışmada, turbomakine uygulamalarında yaygın olarak karşılaşılan bir bladed disk (kanatçıklı disk) modelinin statik yapısal ve ön gerilmeli modal analizleri ANSYS Workbench 2024 R1 ortamında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen temel sonuçlar şu başlıklar altında özetlenebilir:

- **Statik Davranış ve Gerilim Yığılmaları:** 7500 RPM dönme hızı altında gerçekleştirilen statik analizde, maksimum von-Mises eşdeğer gerilimi $1,03 \times 10^{8} Pa$ olarak hesaplanmış olup, bu gerilimin beklendiği gibi disk gövdesi ile kanatçıkların birleşim köklerinde yoğunlaştığı görülmüştür. Maksimum toplam deformasyon ise $1,18 \times 10^{-4} m$ seviyesinde kalmış ve yapısal bütünlük açısından herhangi bir risk oluşturmadığı kanıtlanmıştır.
- **Ön Gerilme ve Merkezkaç Sertleşmesi:** Statik analizden elde edilen gerilme matrisinin modal analize aktarılmasıyla, merkezkaç kuvvetlerinin yapının dinamik rijitliğini artırdığı (centrifugal stiffening) ve tüm doğal frekansları yukarı yönlü ötelediği nicel olarak ortaya konmuştur.
- **Mod Şekilleri ve Çift Modlar:** Diskin simetrik geometrisi sayesinde 2-3 ve 4-5 numaralı modların birbirine çok yakın frekans değerlerine (çift mod karakteristiğine) sahip olduğu tespit edilmiştir.

References

ANSYS Inc. (2024). (n.d.). *ANSYS Mechanical User's Guide (Release 2024 R1)*. ANSYS Documentation.

Bathe, K.-J. (2014). *Finite Element Procedures*. K. J. Bathe.

Cook, R. D. (2001). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. Wiley.

Fish, J., & Belytschko, T. (2007). *A first course in finite elements*. Wiley.

Hughes, T. J. R. (2000). *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*. Dover Publications.

Reddy, J. N. (2018). *Introduction to the Finite Element Method 4E*. McGraw-Hill Education.

Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J.Z. (2013). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Elsevier Science.

BÖLÜM 3

GEOMETRİNİN ÇARPIŞMA KUTULARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

BARAN ERKEK[1]

Öz

Araç çarpışma kutuları herhangi bir kaza sırasında araçta meydana gelen enerjiyi sönümlemek için kullanılan güvenlik elemanlarından biridir. Olası kaza durumunda rijitlik çok istenilen bir durum değildir. Önemli olan ortaya çıkan enerjiyi emebilecek ve bunu aracın diğer kısımları ile araç içerinde bulunan kişileri koruyacak uygun ekipman kullanmaktır. Bu yüzden araçların şase ön kısımlarına takılan araç çarpışma kutuları bulunmaktadır. Bu çarpışma kutuları sayesinde enerji sönümlemesi yapılarak olumsuz durumlar engellenmeye çalışılmaktadır. Bu çarpışma kutuları birçok

[1] Dr. Öğretim görevlisi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi,Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü Orcid: 0000-0003-0756-0513

geometrik şekilde olabilmektedir. Genellikle metalik malzemelerden üretimleri gerçekleştirilmektedir. Literatürde bu çarpışma kutularının hem malzeme tipi hem de geometrik şekilleri ile birçok inceleme bulunmaktadır. Bu çalışmada ise çarpışma kutularının geometrik şekillerinin enerji emme absorbsiyonu üzerine etkileri incelenmiştir. Kullanılan geometrik şekillerin performansları birbirleriyle kıyaslanmıştır. Karşılaştırılan şekiller arasında araç çarpışma kutularının geometrisini belirleme için daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulduğu sonucuna varılmıştır. Karşılaştırmalar yapılırken numune boyutu ve uygulanan testlerin önem arz ettiği ve test standartlarının da aynı olması gerektiği sonucu ortaya çıkmıştır.

Anahtar kelimeler: Çarpışma kutuları, enerji absorbsiyonu, geometrik tasarım

ABSTRACT

Vehicle crash boxes are safety elements used to absorb the energy generated in a vehicle during an accident. Rigidity is not desirable in a potential accident. The important thing is to use appropriate equipment that can absorb the resulting energy and protect the other parts of the vehicle and the people inside. Therefore, vehicle crash boxes are installed on the front of the chassis. These crash boxes help prevent negative consequences by absorbing energy. These crash boxes can come in many geometric shapes. They are generally manufactured from metallic materials. The literature contains many studies on both the material type and geometric shapes of these crash boxes. This study, however, investigates the

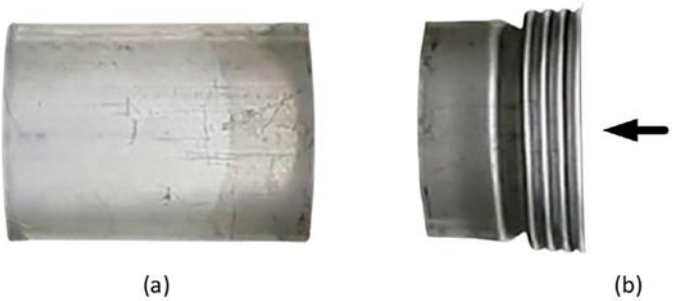
effects of the geometric shapes of crash boxes on energy absorption. The performance of the geometric shapes used was compared. The comparison revealed that further research is needed to determine the geometry of vehicle crash boxes. The comparisons showed that sample size and the tests applied are important, and that the test standards should be consistent.

Keywords: Crash boxes, energy absorption, geometric design

GİRİŞ

Araçlarda olası kaza durumlarında araç bütünlüğünü sağlamak, sürücü ve yolcuların güvenliğini sağlamak için birçok güvenlik elemanı bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi de enerji sönümleme özelliği ile bilinen araç çarpışma kutularıdır. Araç çarpışma kutuları araç şasesinin uç kısımlarına monte edilerek çarpışma sırasında sönümlemeyi gerçekleştirmektedir. Bunu çarpışma sırasında şekil değiştirerek gerçekleştirmektedir. Bu güvenlik elemanları pasif güvenlik elemanlarıdır (Ateş et al., 2022; Erkek et al., 2024; Hussain et al., 2021; Kosedag et al., 2025). Araç çarpışma kutusunun araç içindeki yeri Şekil 2'de verilmiştir. Çarpışma kutuları enerji emilimi 3 aşamada gerçekleşir. Bunlar sürtünme dağılımı, kayma ve kırılma mekanizması ve plastik deformasyon şeklindedir.

Şekil 1. Çarpışma kutusu enerji emerken ki şekil değişimi, a) test öncesi, b) test sonrası



Kaynak: Saber et al., 2025

Şekil 2. Araç çarpışma kutusunun araç üzerindeki yeri



Kaynak: Saber et al., 2025

Çarpışma kutularının rijit olması enerji emme performansı üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilir. Asıl amacı olan enerji sönümleme yeteneği rijit olduğunda çok azalarak herhangi bir darbeyi aracın diğer parçalarına aktararak araç bütünlüğü ve yolcu

güvenliği üzerinde etkisiz kalacaktır(Erkek et al., 2025; Kosedag et al., 2025). Çarpışma kutularında diğer bir önemli nota ise sürdürülebilirlik açısından günümüzde halen fosil yakıtlar ile çalışan araçların yakıt tüketimine yaptığı olumsuz katkı. Ağırlıklarından dolayı araç yakıt tüketimini artırmaktadırlar. Bunun yerine daha hafif olan kompozit çarpışma kutuları araştırmacıların dikkatini çekmekte ve onları bu alana doğru araştırma yapmaya yönlendirmektedir(Bai et al., 2022; Ciampaglia et al., 2024).

Enerji emme performansının hesaplanmasında en büyük rol deney sonrası elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileridir. Bu eğri sayesinde malzemenin deney sırasında ulaştığı maksimum kuvvet hesaplanırken, eğrinin altında kalan alan yardımıyla da absorbe ettiği enerjiler hesaplanabilmektedir. Hesaplamak için;

$$EA = \int_0^{d_{\max}} F(x)dx$$

EA= Absorbe edilen toplam enerji (Joule, J)

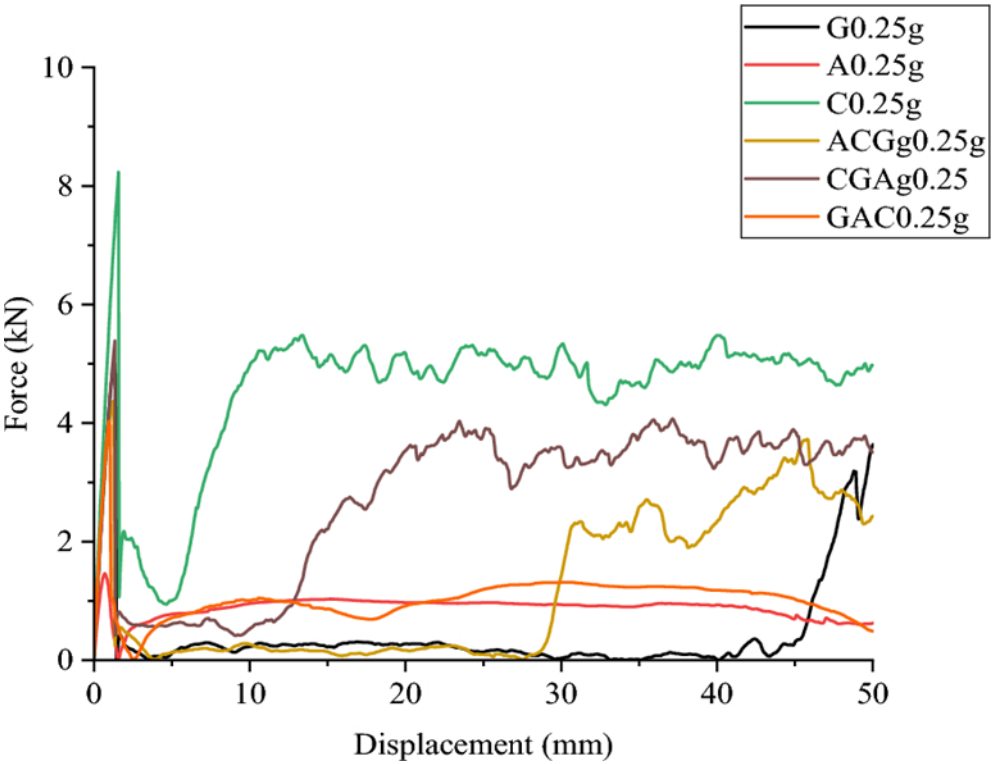
F: Malzemeye uygulanan kuvvet (Newton, N)

X: Malzemenin ezilme miktarı veya deformasyonu (metre, m) (Erkek & Kosedag, 2026)

kullanılır.

Deney sonrasında elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri Şekil 3'te verilmiştir.

Şekil 3. Deney sonrası elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri.



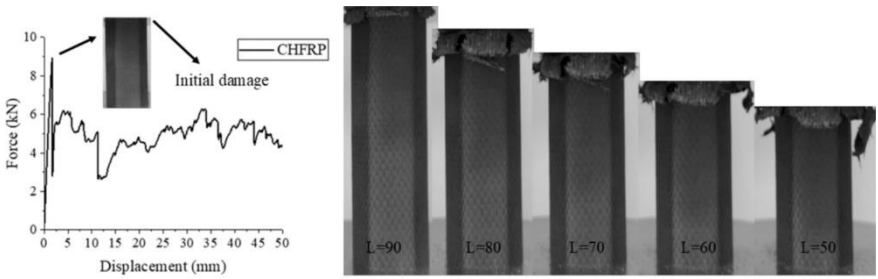
Kaynak: Erkek et al., 2025

GEOMETRİNİN ARAÇ ÇARPIŞMA KUTUSUNA ETKİLERİ

Genel olarak araç çarpışma kutuları metalik malzemelerden yapılmış olsa da son zamanlarda araştırmacılar bu çarpışma kutularında kompozit malzemeleri tercih etmektedir. Aynı zamanda geometrik şekillerini de değiştirerek performans artırmaya yönelik çalışmalar literatürde mevcuttur (Alavi Nia & Haddad Hamedani, 2010; Kösedağ & İşler, n.d.). Kösedağ vd., (2025) hem geometrinin hem de elyaf tipinin araç çarpışma kutuları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. 3 farklı takviye elemanı kullanmışlardır. Bunlar aramid, karbon ve cam fiberdir. Aynı zamanda silindirik, altıgen ve

kare şeklinde çarpışma kutularını birbirleriyle kıyaslamışlardır. Şekil 4'te test sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrisi ile basma testi sonucunda elde ettikleri görüntüler verilmiştir. Çalışmalarında sonuç olarak karbon fiber takviyeli kare çarpışma kutusunun en yüksek enerji emme absorbsiyonu gösterdiğini belirtmişlerdir.

Şekil 4. Basma test sonrası numuneden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrisi ve numunenin şekil değiştirmesi



a) b)

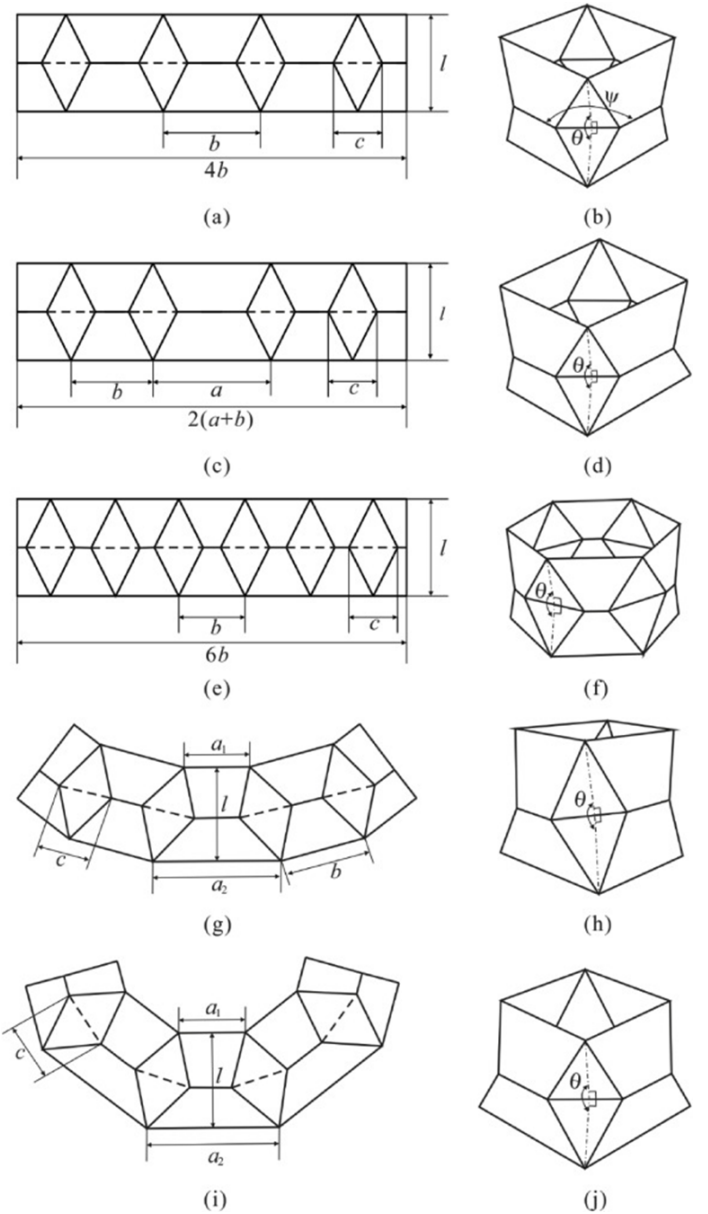
Kaynak: Kosedag et al.

Saenz-Dominguez ve arkadaşları (2018), çalışmalarında çarpışma kutuları için ultraviyole kürlemeli pultrüzyon yöntemiyle üretilen hücresel kompozit yapıların tasarımı ve karakterizasyonunu araştırmışlardır. Yarı statik yüklemelerde kırık lif yüzeyinin fazla olduğunu ve test hızına dikkat edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Diğer bir çalışmada ise Alavi Nia ve Haddad Hamedani (2010) yaptıkları çalışmalarında çeşitli geometrilere sahip ince cidarlı Al boruların performanslarını incelemişlerdir. Dairesel, kare, dikdörtgen, altıgen, üçgen, piramidal ve konik biçimindeki boruları birbirleriyle kıyaslamışlardır. Silindirik borularda birim kütle başına emilen enerjinin en yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Saber ve arkadaşları (2025) çalışmalarında eklemeli imalat yöntemiyle

üretilen çarpışma kutularında geometrik tasarım yenilikleri ve malzeme davranışı üzerine çalışma yapmışlardır. Malzeme olarak polimerler, fiber takviyeli polimerler, metaller ve çok malzemeli yapıları birbirleriyle kıyaslamışlardır. Bununla birlikte boru, origami, kafes yapılı ve biyolojik esintili yapıları kendi aralarında kıyaslayarak en uygun performansı gösteren çarpışma kutusunu belirlemeye çalışmışlardır. Biyolojik olarak esinlenmiş yapıların en iyi performansı gösterdiğini belirtmişlerdir.

Yuan vd., (2019) çeşitli profillere sahip Al origami çarpışma kutuları üzerine araştırma yapmışlardır. Kare, dikdörtgen, altıgen ve konik olacak şekilde aynı zamanda bunların origami şeklinde çarpışma kutularını tasarlamışlardır. Origami şeklinde olanların daha iyi performans gösterdiklerini belirlemişlerdir. Kopar (2026) çalışmasında farklı hücre geometrilerine sahip ince duvarlı Al çarpışma kutularının dayanıklılığı üzerine araştırma yapmıştır. Araştırmasında kare, beşgen, altıgen, yedigen yapıları kullanarak ideal olan geometrik yapıyı belirlemeye çalışmıştır. Sonuç olarak yedigen yapıların daha iyi çarpışma verimliliği gösterdiğini belirtmiştir.

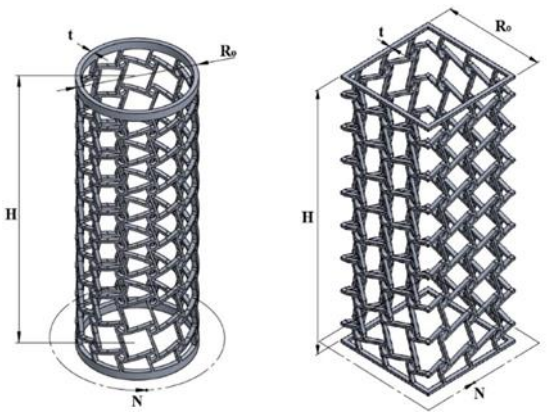
Şekil 5. Origami çarpışma kutularının gösterimi



Kaynak: *Yuan et al., 2019*

Çarpışma kutularında şekil değişikliği araştırmacıların ilgisini çekmiş olsa da bazen çarpışma kutularının içine yerleştirilen dolgu malzemeleri de araştırma konusu olmaktadır. Aynı zamanda içine yerleştirilen dolgu malzemesinin şekli ve kullanılan malzeme türünün de çarpışma kutularının enerji emme performansı üzerinde etkili olduğu araştırmacılar tarafından bildirilmiştir (Altin et al., 2017; Awd Allah et al., 2025; Bader et al., 2025). Aktaş ve arkadaşları (2023) çalışmalarında tetra-kiral ve reentrant hücre yapılarına sahip çarpışma kutularını incelemişlerdir. Aynı boyutlara sahip silindirik çarpışma kutularının daha iyi sonuçlar gösterdiği belirtilmiştir.

Şekil 6. Tetra-kiral ve reentrant hücre yapılarına sahip çarpışma kutularının gösterimi



Kaynak: Aktaş et al.

Kulkarni vd., (2022)çarpışma kutusu imalatı sırasında oluşan düzensiz geometrik yapılar üzerine çalışma yapmışlardır. Herhangi bir bileşenin geometrik özellikleri ile ilgili kusurlar işlevselliğini etkileyebildiğini ve üretim sırasında oluşabilecek bu kusurların da bileşenlerin mekanik özelliklerini etkileyeceğini belirtmişlerdir. Bu nedenle çarpışma kutularının daha sıkı geometrik boyut ve toleranslar ile üretilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Jadhav ve Pawar (2020) optimum şekilli çarpışma kutusunu bulmak için çalışma yapmışlardır. Daire, kare ve dikdörtgen çarpışma kutularını birbirleriyle kıyaslamışlardır. 100 m/s hızla yaptıkları testlerinde en uygun numunenin kare numune olduğunu belirtmişlerdir.

TARTIŞMA

Literatürde yer alan çalışmalar derlendiğinde geometrinin çarpışma kutuları üzerindeki etkilerinin daha karmaşık bir ilişki içerisinde olduğu görülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda birbirleriyle çelişen sonuçlar da bu durumu açıklamaktadır. Bir çalışmada silindirik çarpışma kutusu daha iyi sonuç gösterirken, başka bir çalışmada kare veya daha başka bir çalışmada biyolojik esintili çarpışma kutusu daha yüksek enerji performansı göstermektedir (Aktaş et al., 2023; Alavi Nia & Haddad Hamedani, 2010; Kosedag et al., 2025; Saber et al., 2025). Bu sonuçlar malzemenin üretim yönteminden test hızlarının farklılığına bağlı olabilmektedir. Test koşullarının heterojen olması sonuçların farklı çıkmasında etkili olabilmektedir. Malzemelerin enerji sönümleme yetenekleri yükleme hızına duyarlıdır. Yani kuvvet-yer değiştirme tepkisini doğru bir şekilde yakalamak için gerinim hızı duyarlılığına dikkat edilmelidir. Bu sebepten yarı statik basma testinden elde edilen bir sonuç ile yüksek hızlı darbe testinden elde edilen sonuçların kıyaslanması pek olası değildir. Ayrıca çalışmalarda malzeme değişkenliğinin farklı olması da geometri tipine odaklanmaya çalışırken kompozit malzemelerde değişken fiber tipi gibi etkenler de çarpışma kutularının enerji emme performanslarında

önemli etken olmuştur. Ayrıca kıyaslama farklı çalışmalar birbirleriyle kıyaslanacak olursa numuneler arasındaki boyut farklılığı da enerji emme performansları üzerinde etkili olacaktır. Yarı statik basma testi sırasında numunenin ne kadar uzunluğa kadar basıldığı gibi etkenler kuvvet-yer değiştirme eğrisi altında kalan alanı etkileyeceğinden enerji performansını doğal olarak değiştirecektir.

SONUÇ

Araçlar için vazgeçilmez güvenlik elemanlarından olan çarpışma kutularının enerji emme absorbsiyonu araç bütünlüğü ve yolcu güvenliği için önem arz etmektedir. Bu sebepten dolayı enerji emme performansı yüksek olan araç çarpışma kutularının araçlarda kullanılması güvenliği artırarak koruyuculuğu ön plana çıkaracaktır. Araç çarpışma kutularında kullanılan malzeme ile birlikte geometrik şeklin de önemi çoğu araştırmada vurgulanmıştır. Fakat bütün numunelerin tam olarak aynı boyutlarda veya aynı testlere tabi tutulmamasından dolayı bütün geometrik yapıları birbirleriyle kıyaslamak mümkün olmamaktadır. Bazı çalışmalarda dairesel, kare, dikdörtgen birbirleriyle kıyaslanırken bazı çalışmalarda dairesel ile farklı geometriler kıyaslanmıştır. Ayrıca araştırmacılar bazen yarı statik testi yaparken bazen de darbe testi uygulayarak enerji emme performanslarını belirlemeye çalışmışlardır. Aynı zamanda kompozit çarpışma kutularında fiber tiplerinin de etkileri bildirilmektedir. Sonuç olarak geometrik şekil konusunda literatürde daha fazla çalışma olması gerektiği ve bu kıyaslamaları yaparken de boyutsal hassasiyete dikkat edilerek aynı test ortamlarının uygulanmasından sonra çarpışma kutularında en uygun geometrinin seçilmesinin uygun olacağı görüşüne varılmıştır.

KAYNAKÇA

Aktaş, C., Acar, E., Güler, M. A., & Altın, M.. An investigation of the crashworthiness performance and optimization

of tetra-chiral and reentrant crash boxes. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 51, 6881–6904. https://doi.org/10.1080/15397734.2022.2075382

Alavi Nia, A., & Haddad Hamedani, J.. Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries. Thin-Walled Structures, 48, 946–954. https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.07.003

Altin, M., Güler, M. A., & Mert, S. K.. The effect of percent foam fill ratio on the energy absorption capacity of axially compressed thin-walled multi-cell square and circular tubes. International Journal of Mechanical Sciences, 131–132, 368–379. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.07.003

Ateş, F., Bakirci, A., Günaydin, A. C., EnsariOglu, C., & Çakir, M. C.. Otomobil çarpışma kutularında performans artırıcı yaklaşımların incelenmesi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 24, 830–856. https://doi.org/10.25092/baunfbed.1025311

Awd Allah, M. M., Hegazy, D. A., Almuflih, A. S., & Abd El-baky, M. A.. Experimental optimization of energy absorption in foam-filled square multicell composite tubes under quasi-static loading. Polymer Composites. https://doi.org/10.1002/pc.70127

Bader, S. T., Hamzah, M. N., & Atiyah, Q. A.. Numerical investigation of energy absorption in graded honeycomb-filled

composite crash box structures. International Journal of Automotive Technology. https://doi.org/10.1007/s12239-025-00330-9

Bai, C., Zhou, T., Ma, Q., & Gan, X.. Multi-objective crashworthiness optimization of CFRP/Al hybrid tube under transverse loading. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 41(9–10), 364–382. https://doi.org/10.1177/07316844211051747

Ciampaglia, A., Patruno, L., & Ciardiello, R.. Design of a lightweight origami composite crash box: Experimental and numerical study on the absorbed energy in frontal impacts. Journal of Composites Science, 8, 224. https://doi.org/10.3390/jcs8060224

Erkek, B., & Kosedag, E.. Investigation of powder mixing methods on the energy absorption performance of graphene-reinforced cylindrical composite tubes. International Journal of Crashworthiness, 31, 327–335. https://doi.org/10.1080/13588265.2026.2661920

Erkek, B., Kosedag, E., & Adin, H. (2025a). Hybridization effect on energy absorption capacity of composite crash boxes. Polymer Composites. https://doi.org/10.1002/pc.28640

Erkek, B., Kosedag, E., & Adin, H. (2025b). The impact of graphene filler on the energy absorption of hybrid composite crash boxes. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 21, 339–355. https://doi.org/10.1007/s10999-024-09739-z

Hussain, N. N., Regalla, S. P., Rao, Y. V. D., Dirgantara, T., Gunawan, L., & Jusuf, A.. Drop-weight impact testing for the study of energy absorption in automobile crash boxes made of composite material. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 235, 114–130. https://doi.org/10.1177/1464420720952813

Jadhav, S., [Scholar, P. — doğrulanmalı], & Pawar, A. R. (n.d.). Experimental and non-linear analysis to investigate optimum shape crash box. Journal of Interdisciplinary Cycle Research.

Kopar, M.. Crashworthiness analysis and multi-objective optimization of multi-cell thin-walled crash boxes with different cell geometries. Engineering Optimization. https://doi.org/10.1080/0305215X.2026.2707508

Kosedag, E., Araz, Z., & Erkek, B.. Effect of geometry and fiber type on energy absorption in polymer based composite crash boxes: An experimental study. Polymer Composites. https://doi.org/10.1002/pc.70311

Kösedağ, E., & İşler, D. (n.d.). Effect of section geometry and material type on energy absorption capabilities of crash boxes. [Yayın bilgisi eksik]

Kulkarni, S. M., Vemu, P., Mali, K. D., & Kulkarni, D. M.. Effect of geometric irregularities induced during manufacturing of a crash-box on its crashworthiness performance. Third International

Conference on Aspects of Materials Science and Engineering, 57, 715–721. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.179

Olabi, A. G., Morris, E., & Hashmi, M. S. J.. Metallic tube type energy absorbers: A synopsis. Thin-Walled Structures, 45, 706–726. https://doi.org/10.1016/j.tws.2007.05.003

Saber, A., Amer, A. M., Shehata, A. I., El-Gamal, H. A., & Abd_Elsalam, A.. Recent developments in additively manufactured crash boxes: Geometric design innovations, material behavior, and manufacturing techniques. Applied Sciences, 15. https://doi.org/10.3390/app15137080

Saenz-Dominguez, I., Tena, I., Esnaola, A., Sarrionandia, M., Torre, J., & Aurrekoetxea, J.. Design and characterisation of cellular composite structures for automotive crash-boxes manufactured by out of die ultraviolet cured pultrusion. Composites Part B: Engineering, 160, 217–224. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.10.046

Yuan, L., Shi, H., Ma, J., & You, Z.. Quasi-static impact of origami crash boxes with various profiles. Thin-Walled Structures, 141, 435–446. https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.04.028

BÖLÜM 4

TEK SİLİNDİRLİ BENZİN MOTORU MODİFİKASYONU VE MOTOR ELEMANLARINA GENEL BİR BAKIŞ

ZAFER KAYA[1]
DİNÇER BURAN[2]

Giriş

İçten yanmalı motorlar taşımacılık için halen mevcut olan en pratik güç kaynaklarıdır. Artan hava kirliliği ve enerji kaynaklarının giderek azalması bu güç kaynaklarının en etkili ve verimli kullanımını gerektirmektedir. Motorlardaki yanma verimi silindirdeki karışım türbülansının şiddeti artırıldıkça artar. Öte yandan aşırı türbülans alevin kısmen veya tamamen sönmesine sebep olabilir (Bradley et al., 1988). Bu nedenle türbülansın yanma üzerindeki etkilerinin ve farklı yakıtların türbülans karakteristiklerinin, deneysel olarak tespit edilmesi gerekir. Bu tür deneysel çalışmalar aynı zamanda yanma modellerinin geliştirilmesi için kaçınılmazdır. Bu konuda bugüne kadar pek çok araştırma

[1] Doktor Öğretim Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Simav Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Mekatronik Programı, Orcid: 0000-0002-5489-3997
[2] Doçent Doktor, Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-5079-7191

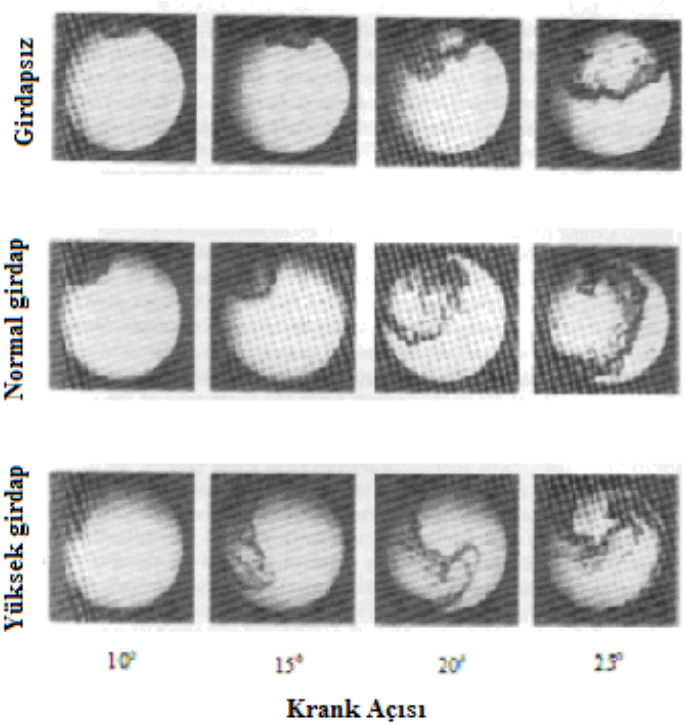
yapılmış olmasına rağmen yanma ve silindir içi hava hareketleri arasındaki ilişkiler net olarak açıklanamamıştır. Türbülansın yanma üzerindeki etkilerini ortaya çıkarabilmek ancak yanma olayının her aşamasının görüntülenmesi ve bu görüntülerin silindir içi basınç verileriyle birlikte analiz edilmesiyle mümkün olabilir.

Buji ile Ateşlenen Motorlarda Yanma ve Türbülans Özellikleri

Buji ile ateşlenen motorda buji tırnak aralığında başlayan en uzak mesafedeki silindir duvarında sonlanan alev gelişimi ve gelişen alev yapısındaki değişiklikler araştırmaların konusudur. Alev buji kıvılcımı ile gelişmeye başlar. Tutuşma başlangıcında, buji tırnak aralığında silindirik bir kıvılcımın oluşur (Namazian et al., 1980). Kıvılcım elektrik enerjisiyle beslendikçe, elektrik arkı genişler ve egzotermik kimyasal reaksiyon sonucu alev gelişimi başlar. Alev çekirdeğinin gelişimini gösteren fotoğraflardan (Beretta et al., 1983; Gatowski et al., 1984), alev çekirdeği dış yüzeyinin yaklaşık olarak küresel ve küçük kıvrımlarla birlikte yüzeyinin düzgün olduğu görülmektedir. Alev tabakası büyüdükçe, buji tırnak aralığındaki türbülanslı akışla etkileşime dolayısıyla alev dış yüzeyi artan bir şekilde bükümlü olmaya başlar. Ayrıca alev merkezi, çevrimler arası değişime bağlı olarak akış hızı yönünde bujiden uzaklaşabilir (Heywood, 1989). Yanma odası boyunca tutuşma devam ettikçe alev yapısı da gelişmesine devam eder. Alev yapısı ile ilgili yapılan çalışmalarda çekilen schlieren fotoğraflarından (Heywood, 1989), yanma olayının erken safhalarında, alevin yanmış ve yanmamış gaz arasındaki reaksiyon bölgesinde ince fakat kısmen kıvrımlanmış bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Laminer alevin kalınlığına yakın olan alev cephesi (yaklaşık 0,1 mm), motor hızına bağlı olarak 2 mm'ye varan kıvrımlar oluştursa da, yanma odası boyunca ilerlerken bu reaksiyon bölgesinin kalınlığı neredeyse sabit kalır. Zamanla alev cephesinin kıvrımlı yapısı daha da artarken, bu kıvrımların boyutları küçülme eğilimi gösterir (Heywood, 1989).

Sözü edilen alev gelişimi ve yayılımına ait özellikler tüm motor geometrilerinde ve çalışma şartlarında aşağı yukarı benzerlik gösterir. Şekil 1'de kenardan ateşlemeli ve farklı akış biçimlerine sahip, optik silindir kafalı bir motordan sabit krank açısı aralıklarında çekilmiş alev fotoğrafları görülmektedir (Witze, 1982).

Şekil 1. Farklı girdap derecelerinde krank açısının konumuna göre silindir içi alev oluşumu



(Heywood, 1989)

Normal eksenel girdap durumunda alev, dönen akışla sürüklenmesine rağmen küresel yayılımını büyük ölçüde sürdürür. Buna karşın yüksek şiddetli girdap, buji civarındaki alevi zayıflatarak küresel yapısını ciddi biçimde bozar. Seçilen bir alev yarıçapında, yanma odası geometrisi ve buji konumu alev cephesinin yüzey alanını belirleyici rol oynar. Daha büyük yüzey alanı, daha

fazla taze karışımın bu yüzeyle temasını ve alev bölgesine girişini sağlar. Şekil 1'deki fotoğraflar alev cephesi yüzey alnının ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Sabit motor devrinde, yüksek dereceli girdapla birlikte silindir içindeki akışkan hızı artışı yanma oranını artırır. Girdaplı akış halindeki alev boyutunun aynı şartlar altındaki girdapsız durum alev boyutuna göre daha büyük olduğu şekil 1'deki fotoğraflardan açıkça görülmektedir. Türbülans artışı motor alevinin tutuşma ve yayılma oranını hızlandırmaktadır (Heywood, 1989).

Ortalama Hız ve Türbülans Karakteristikleri

Motor silindirinde genel olarak, silindir ekseni etrafındaki dönme hareketi olan girdap ile bu eksene dik yöndeki dönme hareketi olan tumble olmak üzere iki farklı hava hacim hareketi görülür (Arcoumans & Whıtelaw, 1987; Heywood, 1989; Hill & Zhang, 1994; Reynolds, 1980).

Emme periyodunda içeri alınan akışın parametreleri; silindir duvarları ve piston temasının yanı sıra giriş portu ile silindir kafası geometrisine bağlı olarak değişmekte ve çevrimler arası akış değişimlerinden etkilenmektedir (Heywood, 1989). Akış alanındaki lokal dalgalanmalardan doğan türbülans; ortalama hız, çalkantı hızı ile çeşitli uzunluk ve zaman ölçekleri gibi parametrelerle tanımlanır. Sürekli bir türbülanslı akışta, belirli bir yöndeki herhangi bir t anına ait lokal akışkan hızı ise U ile ifade edilir (Denklem 1) (Şekil 2).

$$U(t) = \overline{U} + u(t) \qquad (1)$$

Sürekli akış için ortalama hız ($\overline{U}$) ise U(t)'nin zamana göre ortalaması alınarak bulunur ve aşağıdaki gibi ifade edilir (Denklem 2).

$$\overline{U} = \lim_{\tau \to \infty} \frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} U(t)dt \qquad (2)$$

Çalkantı hızının standart sapma değeri yani sapmaların karelerinin karekökü olan türbülans şiddeti u' (Denklem 3 ve Denklem 4);

$$u' = \lim_{\tau \to \infty} \left(\frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} u^2 dt \right)^{1/2} \quad (3)$$

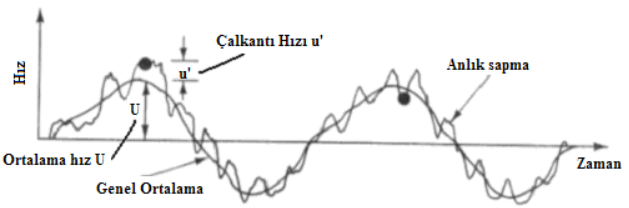
Veya

$$u' = \lim_{\tau \to \infty} \left(\frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} (U^2 - \overline{U}^2) dt \right)^{1/2} \quad (4)$$

şeklinde tanımlanır.

Bu terim türbülans yoğunluğunu ifade etse de daha doğru olarak $u'/\overline{U}$ olarak tanımlanmalıdır. Günümüz çalışmalarında yaygın kabul gördüğü üzere, bu çalışmada da "türbülans şiddeti" terimi rms (root mean square) hızını (u') hızını ifade etmek için kullanılmıştır.

Şekil 2.Türbülans parametreleri



(Heywood, 1989).

Türbülans Ölçekleri (L,η, λ)

Toplam uzunluk ölçeği (L): Akış alanı içindeki büyük ölçekli girdapların bir ölçüsüdür (Buran, 1998). L, noktalar arasındaki değişken uzaklığa bağlı kalarak akış içerisinde ölçülen iki

noktadaki çalkantı hızının oto korelasyon katsayısının integrali olarak tanımlanır (Denklem5 ve Denklem 6).

$$L = \int_0^{\infty} R_x \, dx \tag{5}$$

Burada

$$R_x = \frac{1}{N_m - 1} \sum_{i=1}^{N_m} \frac{u(x_o).u(x_o + x)}{\sigma_u(x_o).\sigma_u(x_o + x)} \tag{6}$$

olarak verilmektedir (Buran, 1998).

Benzer şekilde zaman örneklemli hız verilerinin oto korelasyonu toplam zaman ölçeğini (τ_a) verir. Toplam uzunluk ve zaman ölçekleri arasındaki ilişki $L=\overline{U}\,\tau_a$ şeklinde tanımlanır.

Kolmogrov mikro ölçeği (η): Moleküler viskozite yoluyla enerjisi ısıya dönüşen en küçük "eddy"leri karakterize eder. Eğer ε birim kütle için ısıya dönüşen enerji oranı ve ($\nu=\mu / \rho$) kinematik viskozite olarak tanımlanırsa Kolmogrov uzunluk *(η)* ve zaman *(τ_K)* ölçekleri aşağıdaki gibidir (Denklem 7) (Heywood, 1989).

$$\eta = \left(\frac{\upsilon^3}{\varepsilon} \right)^{1/4}, \qquad \tau_K = \left(\frac{\upsilon}{\varepsilon} \right)^{1/2} \tag{7}$$

Taylor mikro ölçeği (λ): Orta büyüklükteki girdapla ilişkilidir. λ, türbülanslı akışa ait ortalama çalkantı gerilim oranının türbülans şiddetine oranı şeklinde tanımlanır (Denklem 8 ve Denklem 9).

$$\sqrt{\left(\frac{\overline{\partial u}}{\partial x}\right)^2} \approx \frac{u'}{\lambda} \tag{8}$$

Veya

$$\lambda = u' \sqrt{\left(\frac{\overline{\partial u^2}}{\partial x}\right)} \tag{9}$$

Enerji Tayf Yoğunluğu (Power sepectral density = PSD): Türbülansı karakterize etmek için alternatif bir yöntemdir. PSD fonksiyonu *S(f)* hız-zaman verileri filtrelenerek oluşturulabilir, yani her bir frekanstaki *(f)* türbülans kinetik enerjisini alternatif olarak bulmak suretiyle tespit edilir. PSD eğrisinin altında kalan toplam alan orijinal sinyalin karesine, (u'^2)'ye eşittir (Denklem 10) (Arcoumans & Whıtelaw, 1987);

$$\int_0^\infty S(f)df = u'^2 \tag{10}$$

Bir boyutlu PSD fonksiyonu, *S(f),* rms hızı ve oto korelasyon zamanı ile normalleştirilebilir (Denklem 11).

$$\bar{S}(\bar{f}_L) = \frac{S(f)}{(u')^2 \tau_a} \tag{11}$$

Bu durumda denklem aşağıdaki gibi ifade edilir (Denklem 12);

$$\int_0^\infty \bar{S}(\bar{f}_L)d\bar{f}_L = 1 \tag{12}$$

PSD fonksiyonu deneysel tayfı ile klasik türbülans teorilerinin enerji tayfı karşılaştırılarak verilerin yorumlanmasında yardımcı olarak kullanılabilir (Tennekes, 2018). PSD fonksiyonu,

türbülanslı akış alanında ilerleyen belirli bir büyüklükteki alev için geçerli olan etkin rms türbülans hızının belirlenmesinde de kullanılır (Bradley et al., 1992).

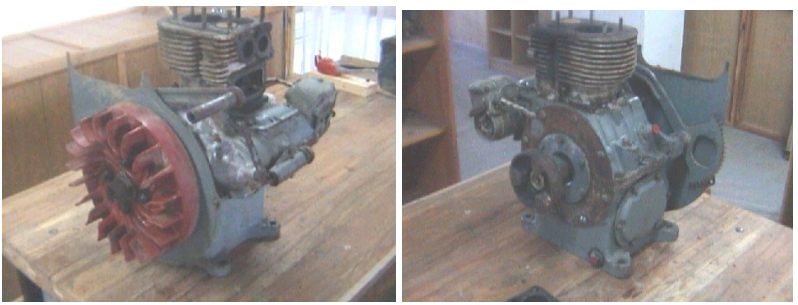
Eksenel Girdap

Motor silindiri çevresinde gerçekleşen dönme hareketi eksenel girdap olarak adlandırılır; uygun girdap koşullarında yanma hızının yükselmesi ise türbülans şiddetinin artmasından kaynaklanır (Hill & Zhang, 1994). Girdap şiddeti yükseldikçe, beklenenin ötesinde ortalamanın üzerinde hız dalgalanmaları meydana gelir (Glover et al., 1988). Buji ateşlemeli motorlarda yanma odasındaki akışkana dönme hareketi verilmesinin temel amacı, hız dalgalanmalarını artırarak yanma oranını ve tutuşabilirlik sınırını yükseltmektir. Bu sayede daha kısa yanma periyoduyla ısı enerjisi mekanik enerjiye daha verimli dönüştürülür ve doğal gaz gibi yavaş yanan yakıtlar etkili biçimde kullanılabilir. Ayrıca çevrimler arası değişkenliğin azalmasıyla hidrokarbon ve karbonmonoksit emisyonlarında düşüş sağlanır. Girdap olayının dezavantajları; muhtemel yüksek ısı kayıpları ve dönüş hareketinin oluşturulduğu metoda bağlı olarak daha düşük volümetrik verimdir. Dönen akış, helisel port (Arcoumanis & Whitelaw, 1987; Arcoumans & Whıtelaw, 1987; Kajiyama et al., 1984), yönlendirilmiş portlar ve bunların değişik uygulamaları (Fansler, 1985), değişken olarak yöneltilmiş (Mikulec et al., 1988), girdap kontrol valfleri (Inoue et al., 1980; Urushihara et al., 1995), girdap vanaları (Arcoumanis et al., 1982, 1983) ve yönlendirilmiş supaplar (Aydın & Walker, 1993; Kuwahara & Ando, 1993; Lancaster, 1976), gibi farklı metotlar kullanılarak oluşturulabilir. Bu çalışmada optik, silindir içi hava akışlarının kontrol edilebileceği bir deney motorunun imalatı hedeflenmiştir. Bu amaçla Rus Ulyanovetz firması tarafından 1970 yılında üretilen UD IT model 4 zamanlı, iki valfli, L tipi bir motora ait silindir iki zamanlı ve döngülü süpürmeli olarak modifiye edilmiştir.

DENEY MOTORU

Giriş bölümünde belirtildiği üzere, motor dizaynı ve silindir içi hava hareketleri motor içerisindeki yanmayı önemli ölçüde etkilemektedir. Günümüzde bu faktörlerin yanmayı nasıl etkilediği tam olarak izah edilememektedir. Belirtilen faktörlerin etkisini ortaya koyabilmek ancak, her faktörün tek tek kontrol altında tutulabildiği ve motor çevrimlerine ait yanma/akış görüntüleri ile basınç verilerinin ölçülerek analiz edilebileceği bir motorda yapılacak deneylerle mümkün olabilecektir. Bu maksatla görüntüsü şekil 3'te verilen 1970 yılında imal edilmiş, tek silindirli, hava soğutmalı, iki valfli ve dört zamanlı motorun, döngülü süpürmeli ve iki zamanlı olarak modifiye edilmesi planlanmıştır.

Şekil 3. Modifiye edilen motora ait fotoğraflar.



Modifiye edilen motor, bir önceki çevrimden kalan yanmış gazları dışarı atılmasına yardımcı olması için yüksek basınçta taze karışımla beslenen döngülü süpürme sistemine göre düzenlenmiştir. Hava-yakıt karışımı, iki zamanlı kranktan süpürmeli motorlardakinden farklı olarak, silindir kenarına açılan emme portundan direkt olarak silindire alınmaktadır. Bunun nedeni hem silindire alınan karışımın başlangıçtaki termodinamik durumu hakkında bilgi sahibi olabilmek, hem de girdap ya da tumble akışının oluşturulmasını mümkün kılabilmektir. Ancak basınçlı karışımın sürekli olarak emme portundan silindire gönderilmesi, karışımın piston ile silindir arasından kartere inmesine ve özellikle genişleme

periyodunda pistonun alt ölü noktaya hareketinden dolayı karterde basınç artışına neden olacaktır. Basınç artışı nedeniyle yağın yanma odasına ve motor dışına taşmasını engellemek için, kartere delik açılmış ve karter havalandırma hortumu vasıtasıyla karter havalandırılmıştır.

Modifiye Öncesi Motora Ait Teknik Özellikler

Şekil 3'te görülen motorun modifiye öncesi teknik özellikleri çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Modifiye öncesi motora ait teknik özellikler.

Teknik Özellikler	Motora Ait Özellikler
Silindir çapı	71,50 mm
Motor stroğu	75 mm
Toplam silindir hacmi	300,98 cm^3
Toplam Pistonun Süpürdüğü Hacim (V_P)	V_P = 300,73 cm^3
Yanma odası hacmi (V_T)	V_T = 99,32 cm^3
Sıkıştırma oranı r	r = 4,026
Motor zamanı	4
Ateşleme şekli	Manyetolu ateşleme
Yağlama şekli	Çarpma yağlama
Yakıt sistemi	Karbüratörlü, emme valfi ile
Soğutma şekli	Hava soğutmalı
Yakıt türü	Benzin
Piston Çapı (Sekmanların üzerindeki çap)	71,21 mm
Sekman sayısı	İki komperasyon Bir yağ
Motor devri	3000 dev/dak
Silindir sayısı	1
Silindir kafasının boşluklarının hacmi	V_s= 95 cm^3
Supap Ayarları Emme Egzoz	 0,73 mm 0,86 mm

Modifiye Sonrası Motora Ait Teknik Özellikler

Modifiye sonrası durumu şekil 4'te verilen motora ait teknik özellikler çizelge 2'de verilmiştir.

Şekil 4. Modifiye sonrası motorun görünüşü.




Çizelge 2. Modifiye sonrası motorun teknik özellikleri.

Teknik Özellikler	Motora Ait Özellikler
Silindir çapı	71,50 mm
Motor stroğu	75 mm
Toplam silindir hacmi	300,98 cm^3
Toplam Pistonun Süpürdüğü Hacim (V_P)	V_P = 220,72 cm^3
Yanma odası hacmi (V_T)	V_T = 40,13- 36,11 cm^3
Sıkıştırma oranı r	r = 6,5/1 – 7,11/1
Motor zamanı	2
Ateşleme şekli	Manyetolu ateşleme
Yağlama şekli	Çarpma yağlama
Yakıt sistemi	Karbüratörlü emme manifoldları ile
Soğutma şekli	Yok
Yakıt türü	Benzin
Piston Çapı (Sekmanların üzerindeki çap)	71,21 mm
Sekman sayısı	İki komperasyon Bir yağ (Modifiye sonrası komperasyon kaçaklarını önlemek maksadıyla yenilenerek kalınlıkları artırıldı)
Silindir sayısı	1

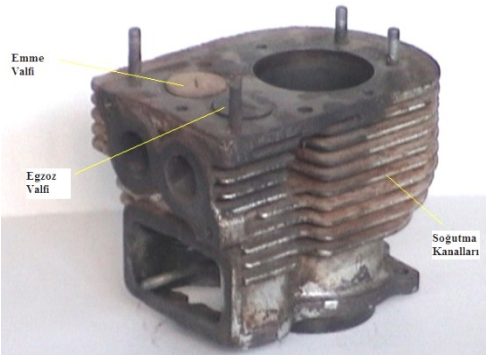
Motora Ait Temel Parçalar

Silindir

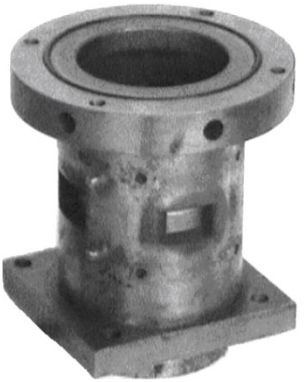
İçerisinde piston kursunun tamamlandığı, üzerine emme ve egzoz portlarının açıldığı, motordan iş elde edilen motor elemanıdır.

Orijinal motor silindiri alüminyum malzemeden yapılmış ve üzeri hava ile soğutmayı sağlamak maksadıyla soğutma kanatları yerleştirilmiştir. Silindir üzerinde bir emme ve bir egzoz olmak üzere iki adet valf bulunmaktadır. Motorun orijinal silindirine ait fotoğrafı şekil 5'te verilmiştir. Bu çalışmada modifiye edilerek imalatı yapılmış silindirin fotoğrafı ise şekil 6'da verilmiştir.

Şekil 5. Motora ait orijinal silindir.



Şekil 6. Modifiye sonrası imalatı yapılan silindir.



Silindir kafası

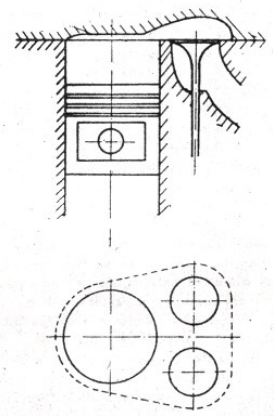
Üzerine bujinin bağlanmasını sağlayan, silindirin üst kısmını kapatan, piston tarafından sıkıştırılan hava-yakıt karışımının buji tarafından ateşlenmesi sonucu yanmanın meydana geldiği kısımdır. Orijinal silindir kafası alüminyum alaşımı malzemeden imal edilmiş olup silindirde olduğu gibi üzerine soğutma kanatları yerleştirilmiştir. Tek parça halindeki silindir kafası ve yanma odasına ait fotoğraf şekil 7'de verilmiştir. Buji, silindir bloğu içerisinde bulunan egzoz supabına yakın olarak yerleştirmiştir. Pistonun üst kısmında bulunan hacimle, supapların üst kısmında bulunan hacim dar bir kanalla birleştirilmiştir. Sıkıştırma stroğunun sonlarına doğru silindirdeki karışım büyük bir hızla supapların üst tarafında kalan bölüme doğru akar. Bu suretle meydana gelen kuvvetli hava hareketi yanma hızının artmasına sebep olur (Özdamar et al., 1970). L tipi

olarak adlandırılan bu tip yanma odasına ait şematik resim şekil 8'de verilmiştir. Tasarımı yapılan yeni silindir kafası ise bujinin ve Kistler 601-A piezoelektrik basınç detektörünün bağlandığı kapak ve yanma odası olmak üzere iki parça halinde imal edilmiştir. Denemeler esnasında farklı sıkıştırma oranlarında motoru çalıştırmak amacıyla farklı yüksekliklerde imalatı yapılmış yanma odaları ve kapak şekil 9'da verilmiştir. Bu silindir kafası ile ilgili detaylar üçüncü ve dördüncü bölümde verilmiştir.

Şekil 7.Orjinal silindir kafası ve yanma odası.

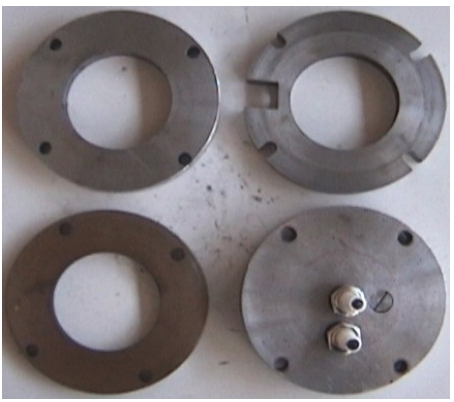


Şekil 8. L tipi silindir kafası



(Özdamar et al., 1970).

Şekil 9. Deney motoruna ait silindir kafası parçaları.



Piston

Silindir içinde iki ölü nokta arasında hareket ederek zamanları meydana getiren elemandır. Silindirin alt tarafında hareketli bir kapak vazifesi görür. Yanmış gaz basıncı nedeniyle meydana gelen hareketi biyel yardımı ile krank miline iletir. Piston başı yanma odasının alt yüzeyini teşkil ettiğinden, piston yanma zamanında meydana gelen yüksek sıcaklığa dayanabilmeli ve bu sıcaklık değişmelerinden sıkışıp kaynamadan görevine devam edebilmelidir. Ayrıca piston yanma zamanında meydana gelen yüksek basınca da dayanabilmeli, uzun süre ısı ve basınç altında normal şeklini de koruyabilmelidir (Özdamar et al., 1970). Pistonlar malzeme olarak genellikle alüminyum alaşımlarından yapılırlar. Bunun yanında dökme demir ve yumuşak dökme çelik malzemeden yapılan pistonlarda bulunmaktadır. Deney motorunda kullanılan piston alüminyum alaşımından yapılmış bir piston olup üzerinde iki adet kompresyon ve iki adet yağ segmanı bulunmaktadır. Bu çalışmada motora ait piston kullanılmış, ancak segmanlarının yıpranmış olmasından dolayı segman kanalları genişletilerek daha kalın segmanlarla yenilenmiştir. Pistonun segmanlar üzerindeki çapı 71,21 mm'dir.

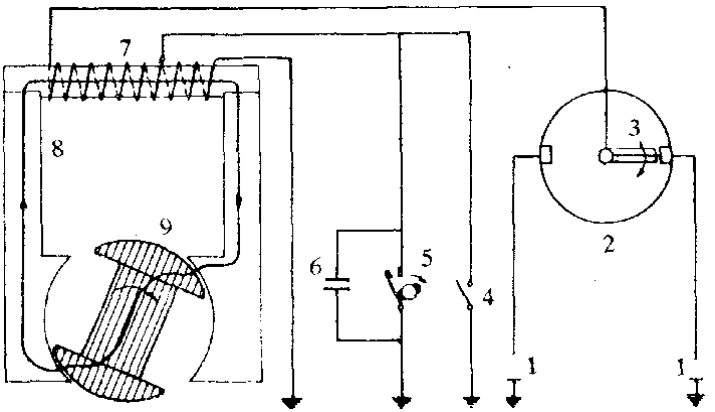
Krank Biyel Mekanizması

Biyel, piston üzerine gelen gaz kuvvetini ana mile iletmeye yarar. Pistonun doğrusal hareketini ana milde dairesel harekete dönüştürür. Biyel kolu karbonlu çelikten veya krom nikelli çeliklerden imal edilir. Ani darbelere karşı burulma ve eğilmeye karşı dayanıklıdır. Kalıp içinde dövülerek imal edilir. Krank millerinin diğer bir adı da ana milidir. Karter içerisinde bulunan ana mil biyel kolundan aldığı hareketi dairesel harekete dönüştürür. Mevcut motordaki krank-biyel mekanizması hiçbir değişiklik yapılmadan kullanılmıştır.

Ateşleme Sistemi

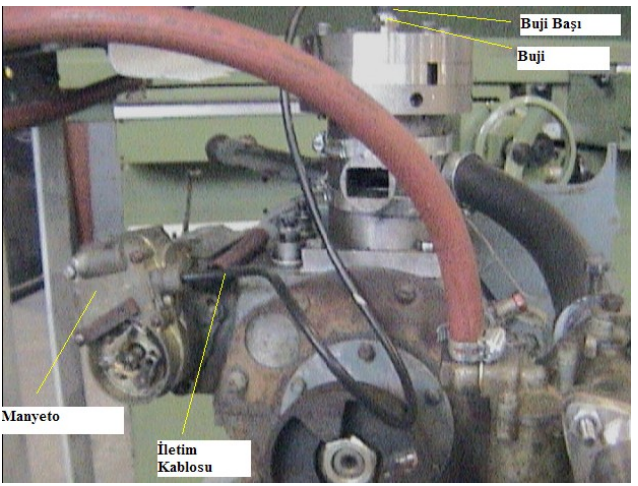
Benzin motorlarında tutuşmanın harici bir sistemle temin edilmesi gerekmektedir. Buji ateşlemeli motorlarda faklı tipte ateşleme sistemlerine rastlamak mümkündür. Bu çalışmada kullanılan motorda manyetolu ateşleme sistemi kullanılmış olması nedeniyle, aşağıda kısaca bu sistem hakkında bilgi verilmiştir. Manyetolu ateşleme sistemleri güç kaynağı (akü) gerektirmezler. Bu sistemler yüksek gerilimli bir manyetodan ibarettir. Komple bir manyetolu sistem şekil 10'daki gibi demir bir çekirdek etrafına sarılı primer ve sekonder sargılar ile kutup sayısı 2, 4, 6… olarak değişebilen sürekli manyetik özellikli bir rotordan ibarettir. Kutup sayısı iki ise düşük gerilimli manyeto daha fazla ise yüksek gerilimli manyeto olarak adlandırılır. Şekilde görülen rotorun kutuplan demir çekirdek ayaklan ile bir hizaya gelince demir çekirdekte oluşan manyetik alanın şiddeti maksimumdur. Rotor armatörü dik pozisyona doğru hareket edip 45°'lik açı yapınca akü şiddeti sıfır, dik pozisyonda ise (90°) negatif maksimum olur. Çekirdekteki bu manyetik alan primer sargı üzerinde bir akım indükler. Oluşan elektrik akımı ise çekirdekteki manyetik alana ters yönde etki gösteren bir başka manyetik alan meydana getirir. Primer akım maksimum değerine ulaştığı zaman (manyetik alan şiddetinin sıfır olmasından biraz sonra) platin kesiciler açılır ve primer akımın indüklediği manyetik alan kırılır. Böylece klasik sistemlerdeki gibi sekonder devre üzerinde çok yüksek bir voltaj indüklenir ve bu voltaj buji tırnak aralığı direncini yenecek yüke kadar sekonder kapasiteyi artırır. Manyetik alanın kırılma hızı indüklenen akımın şiddetini arttıracağından motor ve dolayısıyla rotor-hızı arttıkça ateşleme performansı yükselir. Manyetolu ateşleme sistemlerini diğerlerinden ayıran en önemli özellik de budur. Hatta, ilk ateşleme sırasında akım oldukça düşer ve dışarıdan destek gerekir (Balcı et al., 1994). Deney motorunda kullanılan ateşleme sistemi ve elemanları şekil 11'de görülmektedir. Bu çalışmada mevcut ateşleme sisteminde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.

Şekil 10. Manyetolu ateşleme sistemi elemanları



1. Buji 2. Distribütör 3. Tevzi makarası 4. Kontak anahtarı 5. Platin kesiciler 6. Kondansatör 7. Bobin 8. Çekirdek 9. Mıknatıs *(Balcı et al., 1994).*

Şekil 11. Deney motorunda kullanılan ateşleme sistemi elemanları.

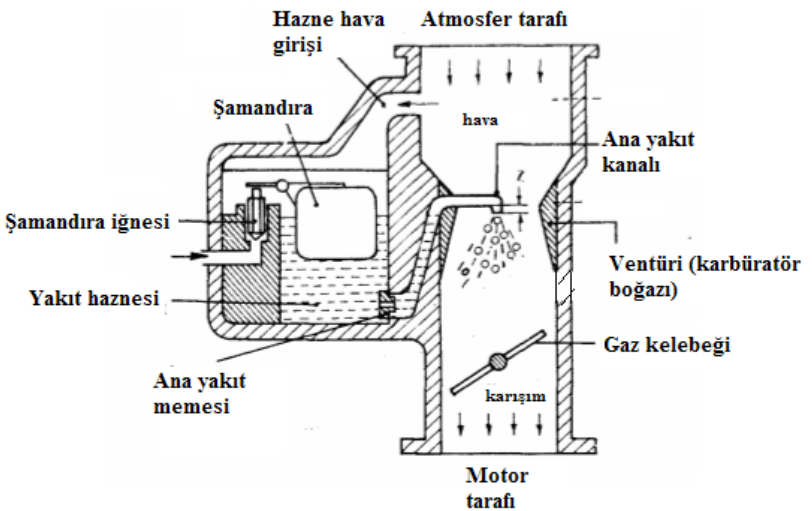


Yakıt Sistemi

Günümüzde kimyasal enerjiyi mekanik enerjiye dönüştüren güç makinelerinin çoğunda yakıt olarak kullanılan sıvı veya gaz

halindeki hidrokarbonlar, yanma reaksiyonu için yaklaşık 1'e 15 oranında hava gerektirir. Hangi tür yakıt donanımı kullanılırsa kullanılsın, motora yeterli miktarda yakıt veya karışım sevk edilmeli, yakıt zerreciklere ayrılmalı (atomizasyon) ve yakıt-hava karışım oranı istenen değerde tutulmalıdır. Ayrıca silindir içindeki makro veya mikro ölçekli dağılımın iyi bir yanma sağlayacak şekilde gerçekleşmesine yardımcı olunmalıdır (Balcı et al., 1994). İmalatı yapılan deney motorunda karbüratörlü yakıt sistemi kullanılmıştır. Bu sistemler değişen çalışma şartlarında motor için uygun karışım oranını teşkil eder ve motora direkt olarak karışım sevk ederler. Karbüratörün sağlaması gereken yakıt/hava oranı en genel ifadesi ile; motorun düzgün ve güvenilir çalışması kaydı ile belli bir devirde mümkün olan en düşük yakıt sarfiyatı ve gerekli dönme momenti veya ortalama efektif basıncı temin eden yakıt/hava oranı şeklinde tarif edilir. Basit bir karbüratör sabit seviye kabı, yakıt memesi, ventüri lülesi ve gaz kelebeğinden ibarettir (Şekil.12).

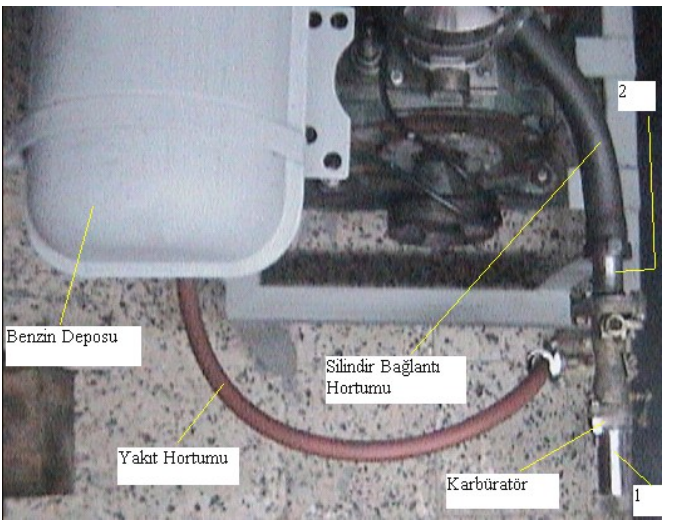
Şekil 12. Basit bir karbüratörün yapısı



(Balcı et al., 1994).

Bu çalışmada, motorun yakıt sistemi üzerinde de önemli bir değişiklik yapılmamıştır. Orijinal sistemden farklı olarak sadece karbüratörün hava giriş kanalı flanşlı bir boru vasıtasıyla hava kompresörüne bağlanmıştır. Yakıt sisteminde kullanılan elemanlar, benzin deposu, benzin hortumu, karbüratör ve karbüratörde karışan yakıt-havayı silindire taşıyan bağlantı hortumudur (Şekil 13).

Şekil 13. Deney düzeneğindeki yakıt sistemi elemanları.



Yağlama Sistemi

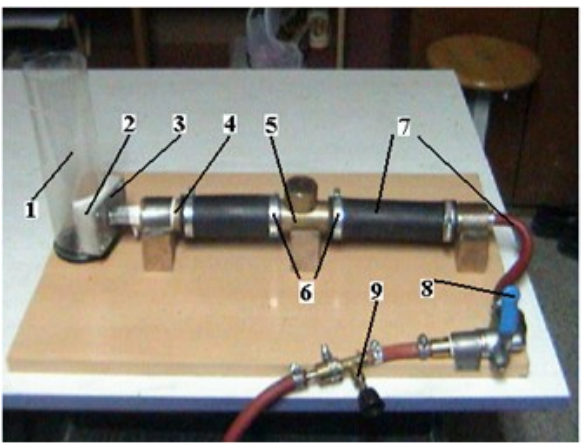
İçten yanmalı motorlarda, hareketli parçaların sürtünmesini azaltmak ve ısınan parçaları da soğutmak için yağlamaya ihtiyaç duyulur (Saxena & Rask, 1987). Motor parçalarının yağlanabilmesi için, yağların yağlama donanımında dolaşması ve yağın yataklara gönderilmesi çeşitli şekillerde olmaktadır. Motorda çarpma tip yağlama sistemi kullanılmıştır. Çarpma usulü ile yağlanan motorlarda genellikle biyel başında bir kepçe bulunur. Bu kepçe, pistonun her alt ölü noktaya inişinde karterdeki yağa dalarak yağı krank mili dönerken silindir cidarlarına ve yataklara sıçratır ve gerekli yerlerin yağlanmasını sağlar. Bazı motorlarda, ana yatak keplerinde ve biyel başlarında yağ toplama çanakları vardır.

Sıçrayan yağlar bu çanaklarda toplanarak yatakların daha iyi yağlanmasını mümkün kılar (Özdamar & Yelken, 1998).

Emme Portu Giriş Açısının Deneysel Tespiti

Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi Laboratuvarlarında bir deney düzeneği hazırlanarak, farklı giriş açılarında silindir içerisindeki akışkan hareketleri incelenmiştir. Akışkan hareketleri akışa madde ilavesi metodu kullanılarak görünür hale getirilmiş ve içerisinden düzlemsel bir ışık kaynağı geçirilerek partiküllerin yansıttığı ışık, bu düzleme dik konumda yerleştirilmiş bir dijital kamera yardımı ile görüntülenmiştir. Hazırlanan deney düzeneğinin fotoğrafı şekil 14'te verilmiştir. Şekil 15'te basit görüntüsü verilen ventürinin en dar kesitine yerleştirilmiş bir hazne içerisinde duman çıkartan malzeme yakılarak elde edilen hava-duman karışımı şekil 16'da gösterilen farklı açılarda imal edilmiş manifoltlar içerisinden silindire gönderilmiştir.

Şekil 14. Emme portu ve emme manifoltu bağlantı açısının tespiti için hazırlanan deney düzeneği.

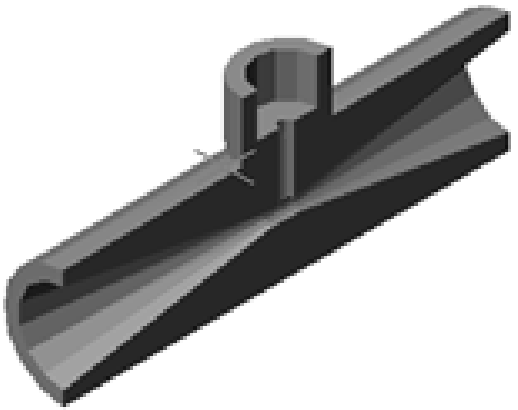


1. Silindir
2. Port
3. Manifold
4. Bağlantı Parçası
5. Ventüri
6. Kelepçe
7. Hortum
8. Açma-Kapama Vanası
9. Kısma Vanası

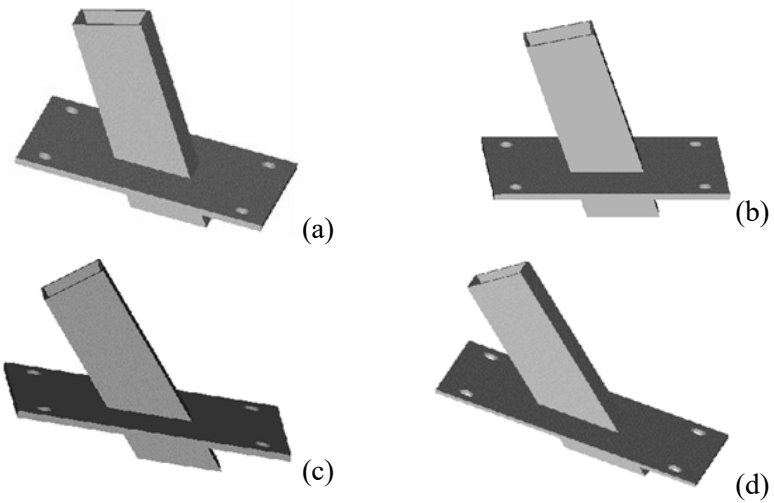
20º, 30º, 40º, ve 50º manifolt bağlantı açılarındaki akışkan hareketleri bir dijital kamera yardımı ile video kasete çekilmiş ve daha sonra bu görüntülerden ilgili bölümlerin kare kare fotoğrafları

alınarak incelenmiştir. Manifolt bağlantı pozisyonu şekil 17'de şematik olarak gösterilmiştir.

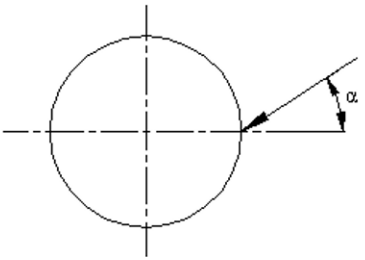
Şekil 15. Ventüri.



Şekil 16. Deneylerde kullanılan farklı açılarda imal edilmiş manifoltlar (a) 20º'lik manifolt, (b) 30º'lik manifolt, (c) 40º'lik manifolt, (d) 50º'lik manifolt.



Şekil 17. Manifoltların silindire bağlantı açısı.

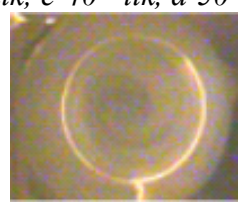


Yapılan bu deneyin amacı, girdap merkezi ile silindir merkezinin üst üste çakıştığı ve akışkanın silindir içerisinde homojen şekilde dağıldığı giriş manifoltu bağlantı açısının optimum değerini tespit etmektir. Farklı giriş açılarında silindir içerisinde girdap oluşumu ile ilgili yapılan deneylerde elde edilen görüntüler şekil 18'de verilmiştir. 20°'lik manifolt bağlantısı ile elde edilen görüntüde (şekil 18-a), girdap merkezinin silindir merkezinin etrafında hareket ettiği ve akışkanın silindirin bir tarafında yığıldığı görülmektedir. Benzer şekilde 30°'lik manifoltla da akışkan dönüşünün homojen bir yapıya sahip olmadığı anlaşılmaktadır (Şekil 18-b). Manifolt bağlantı açısı büyüdükçe (Şekil 18-c ve d) girdap şeklinin katı cisim dönüşlü yapıya yaklaştığı görülmektedir. Bu sonuca göre, tasarımı yapılan silindire açılan emme portu yan yüzeyine 50º açıyla manifolt bağlanabilecek bir pah kırılmasının uygun olacağına karar verilmiştir.

Şekil 18. Farklı açılarda bağlanmış manifoldlar ile elde edilen akış görüntüleri (a-20º' lik, b-30º' lik, c-40º' lik, d-50º' lik).



(a)



(b)

 (c)  (d)

SONUÇLAR

Bu çalışmanın sonucunda, karışım oranı, türbülans, silindir içi gaz akışları, buji konumu v.b. faktörlerin çeşitli yakıtların alev gelişimi üzerindeki etkilerini daha iyi anlayabilmek için oluşturulacak optik silindir kafalı bir deney motorunda kullanılmak üzere ihtiyaç duyulan akış kontrollü bir silindirin imalatı yapılmıştır. Bu maksatla, Rus yapımı Ulyanovetz marka UD IT model 4 zamanlı, 2 valfli, L tipi bir motora ait silindir döngülü süpürmeli ve iki zamanlı motor silindiri olarak modifiye edilmiştir. İmalatı yapılan motor silindiri içerisinde öncelikle eksenel girdap oluşturulması hedeflenmiştir. Homojen dağılımlı bir girdap oluşturabilmek için, emme manifoltunun en uygun bağlantı açısı tespit edilmiştir.

Optik motor tasarımının ön hazırlığı olarak üretilmiş olan bu deney motorunda, yapılacak deneylerde optik parçaların zarar görmemesi için motor sıkıştırma oranı mümkün olan minimum değerlerde tespit dilmiştir (r = 6,5/1). Ateşleme veriminin daha da iyi olması istendiği için bu değer daha sonra yanma odası hacmi küçültülmek suretiyle r = 7,11/1 değerine kadar yükseltilmiştir.

Açıklama

Bu kitap bölümü, 2004 yılında, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalında, tamamlanan "**Tek Silindirli akış kontrollü motor silindiri tasarımı ve imalatı**" başlıklı Yüksek Lisans tezinden bölümleri içermektedir. Tamamlanan tez, Yükseköğretim Kurulu, Ulusal Tez Merkezi veri tabanında 150560 numarası ile tanımlanmaktadır.

Kaynaklar

Arcoumanis, C., Bicen, A. F., & Whitelaw, J. H. (1982). *Effect of Inlet Parameters on the Flow Characteristics in a Four-Stroke Model Engine*. 820750. https://doi.org/10.4271/820750

Arcoumanis, C., Bicen, A. F., & Whitelaw, J. H. (1983). Squish and Swirl-Squish Interaction in Motored Model Engines. *Journal of Fluids Engineering*, *105*(1), 105–112. https://doi.org/10.1115/1.3240925

Arcoumanis, C., & Whitelaw, J. H. (1987). Fluid Mechanics of Internal Combustion Engines—a Review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Mechanical Engineering Science*, *201*(1), 57–74. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1987_201_087_02

Arcoumans, C., & Whıtelaw, J. (1987). Frequency Analysis of Tumble and Swirl in Motored Engines. *Institution of Mechanical Engineers*, *201*(C1), 57–74.

Aydın, K., & Walker, C. P. (1993). Flow and Combustion Analysis within a Spark Ignition Engine. *Institution of Mechanical Engineers*, *C245*(025), 249–260.

Balcı, M., Borat, O., & Sürmen, A. (1994). *İçten Yanmalı Motorlar (Cilt 1)*. Teknik Eğitim Vakfı Yayınları.

Beretta, G. P., Rashidi, M., & Keck, J. C. (1983). Turbulent flame propagation and combustion in spark ignition engines. *Combustion and Flame*, *52*, 217–245. https://doi.org/10.1016/0010-2180(83)90135-9

Bradley, D., Hynes, J., Lawes, M., & Sheppard, C. G. W. (1988). Limitations to Turbulence-Enhanced Burning Rates in Lean Burn Engines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, London*.

Bradley, D., Lau, A. K. C., & Lawes, M. (1992). Flame Stretch Rate as a Determinant of Turbulent Burning Velocity.

Philosophical Transactions: Physical Sciences and Engineering, *338*(1650), 359–387.

Buran, D. (1998). *Turbulent Flame Propagation in a Methane Fuelled Spark Ignition Engine* [PhD thesis]. School of the Mechanical Engineering the University of Leeds.

Fansler, T. D. (1985, February 1). *Laser Velocimetry Measurements of Swirl and Squish Flows in an Engine with a Cylindrical Piston Bowl*. https://doi.org/10.4271/850124

Gatowski, J. A., Heywood, J. B., & Deleplace, C. (1984). Flame photographs in a spark-ignition engine. *Combustion and Flame*, *56*(1), 71–81. https://doi.org/10.1016/0010-2180(84)90006-3

Glover, A. R., Hundleby, G. E., & Hadded, O. (1988, February 1). *An Investigation into Turbulence in Engines using Scanning LDA*. https://doi.org/10.4271/880379

Heywood, J. B. . (1989). *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill.

Hill, P. G., & Zhang, D. (1994). The effects of swirl and tumble on combustion in spark-ignition engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, *20*(5), 373–429. https://doi.org/10.1016/0360-1285(94)90010-8

Inoue, T. ., Nakanıshı, K. ., Noguchı, H., & Iguchı, S. (1980). The Role of Swirl and Squish in Combustion of the SI Engine. *VDI-Berichte*, 181–188.

Kajiyama, K., Nishida, K., Murakami, A., Arai, M., & Hiroyasu, H. (1984, February 1). An Analysis of Swirling Flow in Cylinder for Predicting D.I. Diesel Engine Performance. *SAE International Congress and Exposition*. https://doi.org/10.4271/840518

Kuwahara, K., & Ando, H. (1993). TDC Flow Field Structure of Two-Intake-Valve Engines with Pentroof Combustion Chamber. *JSME International Journal Series B*, *36*(4), 688–696. https://doi.org/10.1299/jsmeb.36.688

Lancaster, D. R. (1976, February 1). Effects of Engine Variables on Turbulence in a Spark-Ignition Engine. *SAE Paper*. https://doi.org/10.4271/760159

Mikulec, A., Kent, J. C., & Tabaczynski, R. J. (1988, February 1). The Effect of Swirl on Combustion in a Pancake Chamber Spark Ignition Engine: The Case of Constant Inducted Kinetic Energy. *SAE International Congress and Exposition*. https://doi.org/10.4271/880200

Namazian, M., Hansen, S., Lyford-Pike, E., Sanchez-Barsse, J., Heywood, J. B., & Rife, J. (1980, February 25). Schlieren Visualization of the Flow and Density Fields in the Cylinder of a Spark-Ignition Engine. *1980 Automotive Engineering Congress and Exposition*. https://doi.org/10.4271/800044

Özdamar, İ., Karasu, T., Taşkaya, Y., & Arvuz, V. (1970). *Otomobil Motorları*. E.T.Y.Ö.O. Matbaası.

Özdamar, İ., & Yelken, B. (1998). *Benzin motorları*. Anadolu Üniversitesi Basımevi.

Reynolds, W. C. (1980). Modelling of Fluid Motion in Engines. *Combust Model In Reciprocating Engines, Symp, GM Res Lab*, 41–68.

Saxena, V., & Rask, R. B. (1987). Influence of Inlet Flows on the Flow Field in an Engine. *SAE International Congress and Exposition*, 19. https://doi.org/10.4271/870369

Tennekes, Henk. (2018). *A First Course in Turbulence*. MIT Press.

Urushihara, T., Murayama, T., Takagi, Y., & Lee, K.-H. (1995). Turbulence and Cycle-by-Cycle Variation of Mean Velocity Generated by Swirl and Tumble Flow and Their Effects on Combustion. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. B*, 950813. https://doi.org/10.4271/950813

Witze, P. O. (1982). The Effect of Spark Location on Combustion in a Variable-Swirl Engine. *SAE International Congress and Exposition*, 14. https://doi.org/10.4271/820044

BÖLÜM 5

SENTETİK YAKITLARIN (E-FUEL) MEVCUT DURUMU VE GELECEĞİ

RASİM BEHÇET[1]

Giriş

Küresel enerji sistemi; nüfus artışı, ekonomik faaliyetlerin genişlemesi, sanayileşme, kentleşme, teknolojik gelişmeler, enerji güvenliği ve iklim değişikliğiyle mücadele gereksinimleri doğrultusunda hızlı bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Uzun yıllar boyunca enerji sisteminin temelini oluşturan kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar; yüksek enerji yoğunlukları, kolay depolanabilirlikleri, mevcut altyapılarla uyumlulukları ve yaygın tedarik zincirleri nedeniyle küresel enerji arzında önemli bir konuma sahip olmuştur. Bununla birlikte, fosil yakıtların yakılması sonucunda ortaya çıkan CO_2 emisyonları, enerji sektörünün iklim değişikliğine katkısının temel unsurlarından birini oluşturmaktadır. Bu nedenle günümüzde enerji dönüşümünün temel hedeflerinden biri, ekonomik ve sosyal gelişmeyi sürdürürken enerji kaynaklı sera gazı emisyonlarını azaltabilecek daha düşük karbonlu bir enerji sisteminin oluşturulmasıdır. Uluslararası Enerji Ajansının (International Energy Agency [IEA], 2026) *Global Energy Review 2026* raporuna göre küresel enerji talebi 2025 yılında %1,3

[1]Prof. Dr.,İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000 0002 6897 3066

oranında artmış ve yaklaşık 8 EJ ilave enerji talebi meydana gelmiştir. Bununla birlikte enerji talebindeki artışın yapısı önceki dönemlerden farklılaşmaya başlamıştır. 2025 yılında güneş fotovoltaik (PV) teknolojisi, küresel enerji talebindeki artışın %25'inden fazlasını karşılayarak ilk kez modern bir yenilenebilir enerji teknolojisinin küresel enerji talebi artışına en büyük katkıyı sağlayan kaynak olmuştur. Güneş, rüzgâr, nükleer, hidroelektrik ve diğer düşük emisyonlu kaynaklar birlikte değerlendirildiğinde, 2025 yılındaki küresel enerji talebi artışının yaklaşık %60'ı düşük emisyonlu kaynaklardan karşılanmıştır (IEA, 2026).

Elektrik sektöründeki dönüşüm de bu gelişmeyle paralel olarak hızlanmaktadır. Küresel elektrik talebi 2025 yılında yaklaşık %3 oranında artmış ve toplam enerji talebindeki büyümenin iki katından fazla bir hızla yükselmiştir. Aynı yıl yenilenebilir kaynakların küresel elektrik üretimindeki payı %34'e ulaşmış; güneş ve rüzgârın toplam payı ise %17'ye yükselmiştir (IEA, 2026).

Bu gelişmeler, enerji sisteminin giderek daha fazla elektrik merkezli bir yapıya yöneldiğini göstermektedir. Ancak enerji dönüşümünün yalnızca elektrik üretiminin yenilenebilir kaynaklardan gerçekleştirilmesiyle tamamlanması mümkün değildir. Enerjinin kullanım alanları incelendiğinde ulaştırma, ağır sanayi, havacılık, denizcilik ve bazı yüksek sıcaklıklı endüstriyel proseslerin doğrudan elektrik enerjisiyle karşılanması teknik ve ekonomik açıdan çeşitli güçlükler içermektedir. Bu nedenle geleceğin enerji sisteminde doğrudan elektrifikasyon, hidrojen, biyoyakıtlar ve sentetik yakıtlar gibi farklı enerji taşıyıcılarının birlikte kullanılması beklenmektedir (IEA, 2025).

Özellikle yenilenebilir elektrik üretimindeki hızlı büyüme, elektrik enerjisinin yalnızca doğrudan tüketilmesini değil, aynı zamanda başka enerji taşıyıcılarına dönüştürülmesini de mümkün hâle getirmektedir. Bu kapsamda Power-to-X (PtX) yaklaşımı önem kazanmaktadır. Yenilenebilir elektrik kullanılarak hidrojen üretilmesi ve hidrojenin daha sonra amonyak, metanol veya

sentetik hidrokarbon yakıtlara dönüştürülmesi, elektrik enerjisinin depolanabilir ve taşınabilir kimyasal enerjiye dönüştürülmesini sağlamaktadır. E-Fuel teknolojisi de bu dönüşüm zincirinin özellikle ulaştırma sektöründeki önemli uygulamalarından birini oluşturmaktadır.

Dolayısıyla küresel enerji dönüşümü yalnızca "fosil yakıtlardan yenilenebilir elektriğe geçiş" şeklinde değerlendirilmemelidir. Dönüşüm aynı zamanda enerjinin üretim biçiminin, taşıyıcılarının, depolama yöntemlerinin ve son kullanım teknolojilerinin birlikte değişmesi anlamına gelmektedir. Bu açıdan E-Fuel, yenilenebilir elektrik ile geleneksel sıvı yakıt altyapısı arasında bağlantı oluşturabilecek teknolojilerden biri olarak değerlendirilmektedir (IEA, 2025).

Ulaşım Sektöründe Elektrifikasyon ve Sınırlamalar

Ulaştırma sektörü küresel enerji sisteminin en önemli enerji tüketicilerinden biridir. IEA'nın (2025) enerji verimliliği değerlendirmesine göre ulaştırma sektörü küresel enerji talebinin yaklaşık %30'unu oluşturmaktadır. Karayolu taşımacılığı, ulaştırma sektöründeki enerji tüketiminin açık ara en büyük bölümünü meydana getirirken havacılık, deniz taşımacılığı ve demiryolu daha küçük ancak stratejik alt sektörleri oluşturmaktadır.

Ulaştırma sektörünün enerji dönüşümündeki önemi, büyük ölçüde petrol ürünlerine olan bağımlılığından kaynaklanmaktadır. Benzin ve motorin başta olmak üzere sıvı fosil yakıtlar, uzun yıllardır karayolu taşımacılığının temel enerji taşıyıcısı olmuştur. Havacılıkta jet yakıtı, denizcilikte ise ağır fuel-oil ve benzeri sıvı yakıtlar yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu nedenle ulaştırma sektörünün karbonsuzlaştırılması, yalnızca yeni araç teknolojilerinin geliştirilmesini değil, aynı zamanda yakıt sisteminin dönüştürülmesini de gerektirmektedir.

Son yıllarda bu dönüşümün en hızlı gerçekleştiği alanlardan biri elektrikli araçlardır. Bataryalı elektrikli araçların enerji dönüşüm verimliliğinin yüksek olması, rejeneratif frenleme olanağı ve kullanım sırasında doğrudan egzoz emisyonu oluşturmaması, özellikle binek otomobiller açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.

Küresel elektrikli otomobil satışları 2024 yılında 17 milyon adedi aşmış ve toplam yeni otomobil satışlarının %20'sinden fazlasını oluşturmuştur. IEA'nın (2025) değerlendirmesinde elektrikli otomobil satışlarının 2025 yılında 20 milyon adedi aşması ve küresel yeni otomobil satışlarının yaklaşık dörtte birine ulaşması öngörülmüştür.

2026 yılında yayımlanan IEA verileri ise bu beklentinin gerçekleştiğini göstermektedir. 2025 yılında küresel elektrikli otomobil satışları 20 milyon adedi aşmış ve yeni otomobil satışlarının yaklaşık %25'ini oluşturmuştur. Böylece elektrikli araçların küresel otomobil pazarındaki ağırlığı daha da artmıştır (IEA, 2026).

Bu gelişme, karayolu taşımacılığının önemli bir bölümünün doğrudan elektrik enerjisiyle karşılanabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte ulaştırma sektörünün tamamının aynı ölçüde elektrifikasyona uygun olduğu söylenemez. Araç türü, taşıma mesafesi, taşınan yük, enerji ihtiyacı, şarj altyapısı ve operasyon süresi gibi faktörler elektrifikasyonun uygulanabilirliğini doğrudan etkilemektedir.

Özellikle ağır ticari araçlarda yüksek batarya kapasitesine duyulan gereksinim, aracın toplam kütlesini artırabilmekte ve yük kapasitesi üzerinde etkiler oluşturabilmektedir. Uzun mesafeli taşımacılıkta ise yüksek enerji ihtiyacının kısa sürede karşılanabilmesi için güçlü şarj altyapısına ihtiyaç duyulmaktadır. IPCC, bataryalı ve hidrojen yakıt hücreli ağır taşıtların geliştirilmekte olduğunu; ancak menzil, maliyet ve altyapı gibi sorunların ticari yaygınlaşmada önemli parametreler olmaya devam

ettiğini belirtmektedir (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2022).

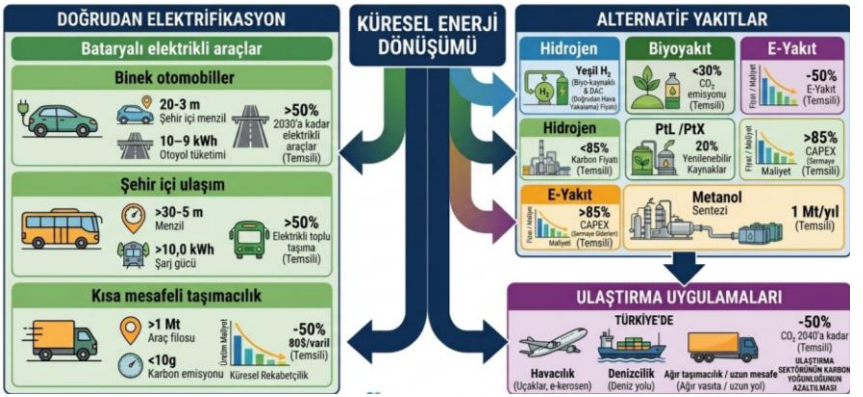
Havacılık ve deniz taşımacılığında ise durum daha farklıdır. Uçakların yüksek özgül enerji gereksinimi nedeniyle batarya ağırlığının önemli bir sınırlama oluşturması, özellikle uzun mesafeli uçuşlarda doğrudan elektrikli tahrikin uygulanabilirliğini sınırlandırmaktadır. Benzer şekilde okyanus aşırı deniz taşımacılığında gemilerin uzun süre yüksek güçte çalışması, büyük miktarda enerji depolanmasını gerektirmektedir.

IPCC (2022), havacılık ve deniz taşımacılığında düşük karbonlu ve yüksek enerji yoğunluklu yakıtlara ihtiyaç bulunduğunu; gelişmiş biyoyakıtlar, hidrojen türevleri, amonyak ve sentetik yakıtların bu sektörler için değerlendirilen seçenekler arasında yer aldığını belirtmektedir. Sentetik yakıtların düşük karbonlu hidrojen ile yakalanmış CO_2 kullanılarak üretilebilmesi, özellikle mevcut sıvı yakıt altyapısından yararlanılabilmesi açısından dikkat çekmektedir. Bununla birlikte bu yakıtların üretim maliyetlerinin azaltılması ve büyük ölçekli üretim tesislerinin geliştirilmesi hâlen önemli araştırma ve yatırım konularıdır.

Elektrifikasyonun Uygulanabilirliği ve Tamamlayıcı Yakıt İhtiyacı

Enerji dönüşümünde elektrifikasyon temel seçeneklerden biri olmakla birlikte, bütün ulaşım uygulamalarının aynı yöntemle elektriklendirilmesi mümkün değildir. Bu durum, ulaştırma sektörünün farklı alt segmentlerinde farklı enerji taşıyıcılarının kullanılmasını gerektirmektedir.

Şekil 1. Ulaştırma sektöründe enerji dönüşümünün genel yapısı



Bu yapı içerisinde temel yaklaşım, elektrikli araçların uygun olduğu alanlarda doğrudan elektrifikasyondan yararlanılması; yüksek enerji yoğunluğu ve uzun menzil gerektiren uygulamalarda ise hidrojen, biyoyakıt veya E-Fuel gibi alternatiflerin değerlendirilmesidir. Böylece enerji dönüşümü, tek bir teknolojiye dayalı olmaktan çıkarak sektör ve kullanım koşullarına göre farklı enerji taşıyıcılarının birlikte kullanıldığı bir sistem hâline gelmektedir.

Burada E-Fuel'ün önemli özelliği, sentetik olarak üretilmesine rağmen fiziksel ve kimyasal özellikleri uygun şekilde tasarlandığında mevcut sıvı yakıt sistemleriyle büyük ölçüde uyum sağlayabilmesidir. IPCC'ye (2022) göre sentetik yakıtların fosil yakıtlara benzer özellikleri, mevcut ve yeni araçlarda motor tasarımında önemli değişiklikler yapılmadan kullanılabilmelerine olanak sağlayabilmektedir.

Ancak bu avantaj, E-Fuel'ün doğrudan elektrikli araçlara göre daha verimli olduğu anlamına gelmemektedir. Tam tersine E-Fuel üretiminde elektrik önce hidrojene, ardından sentetik yakıta dönüştürülmekte ve son aşamada yakıt tekrar bir motorda mekanik enerjiye çevrilmektedir. Her dönüşüm aşamasında enerji kaybı meydana geldiğinden, aynı miktarda hareket enerjisi elde etmek

için doğrudan bataryalı elektrikli araçlara kıyasla daha fazla yenilenebilir elektrik gerekebilmektedir (IPCC, 2022).

Bu nedenle E-Fuel'ün gelecekteki kullanım alanının belirlenmesinde yalnızca "yakıt kullanılabilir mi?" sorusu değil, "Bu yakıtın kullanılması teknik olarak gerekli mi ve harcanan yenilenebilir enerji açısından rasyonel mi?" sorusu da önem kazanmaktadır. Bu yaklaşım E-Fuel'ün özellikle yüksek enerji yoğunluğu gerektiren ve doğrudan elektrifikasyonun daha güç olduğu sektörlerde değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

E-Fuel Teknolojisine Geçiş İhtiyacı

Yukarıdaki gelişmeler birlikte değerlendirildiğinde, ulaştırma sektöründe geleceğin enerji sisteminin çoklu bir yapıya sahip olması beklenmektedir. Binek otomobiller ve şehir içi ulaşımda bataryalı elektrikli araçlar önemli bir dönüşüm alanı oluştururken; ağır ticari araçlar, uzun mesafeli taşımacılık, havacılık ve denizcilik gibi uygulamalarda farklı enerji taşıyıcılarının kullanımına ihtiyaç duyulabilecektir.

Bu noktada E-Fuel teknolojisi, yenilenebilir elektrik ile mevcut sıvı yakıt altyapısı arasında bir **enerji dönüşüm köprüsü** oluşturma potansiyeline sahiptir. Yenilenebilir elektrikten elektroliz yoluyla hidrojen elde edilmesi, atmosferik veya sürdürülebilir kaynaklardan CO_2 yakalanması ve daha sonra bu iki girdinin kimyasal sentez süreçlerinde birleştirilmesi sayesinde sentetik benzin, dizel, metanol ve jet yakıtı gibi ürünler üretilebilmektedir.

E-Fuel'ün temel özelliklerinden biri, karbonun enerji sistemine yeniden kazandırılabilmesidir. Eğer üretimde kullanılan hidrojen düşük karbonlu elektrikten elde edilir ve yakıt sentezinde kullanılan CO_2 atmosferden veya sürdürülebilir biyojenik kaynaklardan sağlanırsa, yakıtın yaşam döngüsü sera gazı emisyonlarının fosil yakıtlara göre önemli ölçüde azaltılması mümkün olabilir. Bununla birlikte bu durum otomatik olarak "sıfır emisyon" anlamına gelmemektedir. Elektrik üretimi, hidrojen

üretimi, CO_2 yakalama, yakıt sentezi, taşıma ve kullanım aşamalarının tamamının değerlendirilmesi gerekmektedir (IPCC, 2022).

Bu nedenle E-Fuel teknolojisinin değerlendirilmesinde üç temel kriter ön plana çıkmaktadır:

1. *Teknik uygunluk:* Yakıtın mevcut motor, uçak, gemi ve yakıt altyapısıyla uyumluluğu,
2. *Enerji etkinliği:* Yenilenebilir elektrikten nihai hareket enerjisine kadar olan toplam dönüşüm verimi,
3. *Yaşam döngüsü sürdürülebilirliği:* Üretimden kullanıma kadar oluşan toplam sera gazı emisyonları ve diğer çevresel etkiler.

Bu üç kriter, E-Fuel'ün yalnızca alternatif bir yakıt olarak değil, küresel enerji dönüşümünün belirli sektörlerindeki tamamlayıcı bir teknoloji olarak değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Sonuç olarak küresel enerji sisteminde yenilenebilir elektrik üretiminin hızlı biçimde artması ve ulaştırmada elektrikli araçların yaygınlaşması, bir yandan enerji sisteminin karbonsuzlaşmasına katkı sağlarken diğer yandan elektrifikasyonun teknik açıdan daha zor olduğu sektörlerde yeni enerji taşıyıcılarına olan ihtiyacı gündeme getirmektedir. E-Fuel bu bağlamda, yenilenebilir elektrik, hidrojen ve CO_2 kaynaklarını bir araya getirerek yüksek enerji yoğunluklu sentetik yakıt üretme potansiyeline sahip bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte yüksek enerji gereksinimi, üretim maliyeti ve gerekli yenilenebilir elektrik kapasitesi E-Fuel'ün yaygınlaşmasındaki temel sorunlar arasında bulunmaktadır (IPCC, 2022).

E-FUEL KAVRAMI VE ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ

E-Fuel veya elektro-yakıt, temel olarak elektrik enerjisinin kimyasal enerjiye dönüştürülmesiyle elde edilen sentetik yakıtları ifade etmektedir. Kavram özellikle yenilenebilir elektrik

kullanılarak üretilen hidrojenin, yakalanmış CO_2 veya farklı karbon kaynaklarıyla birleştirilerek sıvı ya da gaz yakıtlara dönüştürülmesi bağlamında kullanılmaktadır. Yenilenebilir elektrikten elde edilen hidrojenin kimyasal sentez süreçlerinde kullanılmasıyla elektrik enerjisi, yüksek enerji yoğunluklu yakıtlar biçiminde depolanabilmektedir (El-Gohary et al., 2024).

E-Fuel teknolojileri, daha geniş bir teknoloji ailesi olan Power-to-X (PtX) kapsamında değerlendirilmektedir. PtX yaklaşımında elektrik enerjisi hidrojen, metanol, amonyak veya hidrokarbonlar gibi farklı enerji taşıyıcılarına dönüştürülürken, doğrudan sıvı yakıt üretimini ifade eden Power-to-Liquid (PtL), E-Fuel teknolojilerinin ulaştırma açısından önemli bir alt grubunu oluşturmaktadır. PtL sistemlerinde yenilenebilir elektrik kullanılarak hidrojen üretilmekte, ardından hidrojen ile CO_2 çeşitli kimyasal sentez süreçlerinden geçirilerek sentetik hidrokarbonlar elde edilmektedir.

E-Fuel üretiminin temel girdileri yenilenebilir elektrik, su, düşük emisyonlu hidrojen ve sürdürülebilir bir CO_2 kaynağıdır. Üretilecek yakıtın türüne bağlı olarak proses gazları, katalizörler ve çeşitli kimyasal girdiler de kullanılabilmektedir. CO_2; endüstriyel noktasal kaynaklardan, biyojenik kaynaklardan veya atmosferden Doğrudan Hava Yakalama (Direct Air Capture, DAC) yöntemiyle elde edilebilir. DAC teknolojisi yüksek enerji ve maliyet gerektirmesine rağmen atmosferik karbonun yakalanarak yakıt üretiminde yeniden kullanılmasına olanak sağlaması nedeniyle önemli bir seçenek olarak değerlendirilmektedir (El-Gohary et al., 2024).

E-Fuel tek bir yakıt türünü ifade etmemekte; üretim yöntemi ve son ürüne bağlı olarak e-benzin, e-dizel, e-kerosen, e-metanol ve e-DME gibi farklı yakıtlar üretilebilmektedir. Fischer–Tropsch sentezi, metanol sentezi ve diğer kimyasal dönüşüm yolları, farklı

sıvı E-Fuel türlerinin üretiminde kullanılabilmektedir (*Liquid e-fuels for a sustainable future*, 2025).

E-Fuel üretimi; yenilenebilir elektrikten hidrojen üretilmesi, sürdürülebilir kaynaklardan CO_2 sağlanması ve bu bileşenlerin çeşitli sentez süreçleriyle sentetik yakıtlara dönüştürülmesine dayanan bütünleşik bir üretim zinciridir. Bu zincirin temel aşamaları; elektroliz yoluyla hidrojen üretimi, CO_2'nin yakalanması veya temin edilmesi, sentez gazı oluşumu ve Fischer–Tropsch veya metanol sentezi yoluyla nihai yakıt üretimini kapsamaktadır. Üretim sürecinin genel akışı Şekil 2'de gösterilmektedir.

Şekil 2. E-Fuel üretim sürecinin genel şeması



Kaynak: El-Gohary et al. (2024), IEA (2025) ve güncel PtL çalışmalarından yararlanılarak hazırlanmıştır**.**

Şekil 2'de görüldüğü üzere, E-Fuel üretim zincirinin ilk aşamasını yenilenebilir elektrik ve su kullanılarak gerçekleştirilen hidrojen üretimi oluşturmaktadır. Daha sonra hidrojen, sürdürülebilir bir karbon kaynağından elde edilen CO_2 ile birleştirilerek sentez gazı veya doğrudan metanol gibi ara ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır. Sonraki aşamada ise Fischer–Tropsch veya benzeri sentez süreçleriyle e-dizel, e-benzin ve e-kerosen gibi sentetik yakıtlar elde edilmektedir. Bu nedenle E-Fuel üretim zincirinin performansı yalnızca yakıt sentez aşamasına değil,

yenilenebilir elektrik üretiminden hidrojen ve CO_2 teminine kadar uzanan bütünleşik sisteme bağlıdır.

E-Fuel Üretim Teknolojileri

E-Fuel üretiminde başlıca teknolojik yollar Power-to-Liquid/Fischer–Tropsch (PtL-FT), Power-to-Methanol, CO_2 hidrojenasyonu ve yüksek sıcaklıklı elektroliz ile entegre sentez prosesleridir. Genel üretim zinciri; (1) yenilenebilir elektrik üretimi, (2) hidrojen üretimi, (3) CO_2'nin sağlanması ve dönüştürülmesi ve (4) sentetik yakıt sentezi ile son işlemler olmak üzere dört temel aşamada incelenebilir. Bu aşamaların her biri yakıtın maliyetini, enerji verimliliğini ve çevresel performansını doğrudan etkilemektedir.Yüksek sıcaklıklı elektroliz ile Fischer–Tropsch sentezinin bütünleştirildiği sistemlerde proses ısısının yeniden kullanılması ve sentez gazı bileşiminin kontrol edilmesi, toplam E-Fuel verimliliğinin artırılması açısından önemli bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (*International Journal of Hydrogen Energy*, 2026).

Hidrojen Üretimi

E-Fuel üretiminin temel aşamalarından biri hidrojen üretimidir ve yenilenebilir elektrik tabanlı sistemlerde hidrojenin başlıca üretim yöntemi su elektrolizidir. Elektroliz işleminde su, elektrik enerjisi kullanılarak hidrojen ve oksijene ayrıştırılmaktadır:

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$$

Elektroliz teknolojileri arasında alkali elektroliz (AEL), proton değişim membranlı elektroliz (PEMEL) ve katı oksit elektrolizi (SOEC) öne çıkmaktadır. AEL olgunlaşmış bir teknoloji iken PEMEL, değişken yenilenebilir elektrik üretimine hızlı tepki verebilmesi ve kompakt sistemlere olanak sağlaması bakımından önemlidir. SOEC ise yüksek sıcaklıkta çalışması sayesinde proses ısısının daha etkin kullanılmasına imkân vermektedir.

IEA'nın *Global Hydrogen Review 2025* raporuna göre küresel su elektrolizi kurulu kapasitesi 2024 yılında yaklaşık **2 GW** seviyesine ulaşmış ve 2025 yılının Temmuz ayına kadar 1 GW'dan fazla yeni kapasite eklenmiştir. Çin, küresel kurulu elektroliz kapasitesinin yaklaşık %65'ini oluşturmuştur (International Energy Agency [IEA], 2025). IEA'nın 2026 değerlendirmesine göre ise küresel elektroliz kapasitesi 2025 yılında 4 GW'ın üzerine çıkmış ve 2,5 GW'dan fazla kapasite inşa aşamasına gelmiştir (IEA, 2026).

Bununla birlikte küresel hidrojen üretiminin büyük bölümü hâlen fosil kaynaklara dayanmaktadır. 2024 yılında küresel hidrojen üretimi yaklaşık 100 Mt olurken düşük emisyonlu hidrojenin payı %1'in altında kalmıştır (IEA, 2025). Dolayısıyla E-Fuel'ün düşük karbonlu niteliği yalnızca hidrojen kullanılmasına değil, hidrojenin hangi yöntemle üretildiğine de bağlıdır.

CO_2 Yakalama ve Karbon Kaynağı

Hidrojen üretiminden sonra E-Fuel sentezinin ikinci temel girdisi CO_2'dir. CO_2; endüstriyel tesislerin baca gazlarından, biyokütle ve biyogaz gibi biyojenik kaynaklardan veya atmosferden DAC yöntemiyle elde edilebilir. DAC, belirli bir endüstriyel kaynağa bağımlı olmadan CO_2 temin edebilmesi açısından avantaj sağlarken, atmosferdeki CO_2 konsantrasyonunun düşük olması nedeniyle yüksek enerji tüketimine ve maliyete yol açabilmektedir.CO_2'nin kaynağı, E-Fuel'ün yaşam döngüsü sera gazı emisyonlarının belirlenmesinde kritik öneme sahiptir. Atmosferik veya biyojenik karbonun yakıt kullanımı sonrasında yeniden atmosfere verilmesi, uygun üretim koşullarında fosil karbonun yer altından çıkarılmasına kıyasla farklı bir karbon döngüsü oluşturabilir. Ancak **"karbon nötr"** değerlendirmesi yalnızca CO_2'nin yakalanmasına dayandırılamaz; elektrik üretimi, hidrojen üretimi, CO_2 yakalama, sentez, taşıma ve kullanım

aşamalarının tamamının yaşam döngüsü içerisinde değerlendirilmesi gerekir.

Sentez Gazı Üretimi

Hidrojen ve CO_2'nin doğrudan Fischer–Tropsch reaktörüne gönderilmesi genellikle yeterli değildir. FT sentezi için uygun H_2/CO oranına sahip sentez gazının oluşturulması gerekir. Bu amaçla CO_2'nin bir bölümünün karbon monoksite dönüştürülmesini sağlayan ters su-gazı değişim (Reverse Water Gas Shift, RWGS) reaksiyonu kullanılmaktadır:

$$CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$$

RWGS aşaması, E-Fuel tesisinin enerji tüketimi ve toplam proses verimliliği açısından önemlidir. Reaksiyon sıcaklığı, katalizör özellikleri ve proses ısısının yeniden kullanımı sistem performansını doğrudan etkiler. Bu nedenle yeni nesil PtL tesislerinde elektroliz, RWGS ve FT proseslerinin birbirinden bağımsız üniteler olarak değil, enerji ve madde akışlarının birlikte optimize edildiği entegre sistemler olarak tasarlanması önem taşımaktadır.

Fischer–Tropsch Sentezi

Fischer–Tropsch (FT) sentezi, sentez gazından uzun zincirli hidrokarbonların üretildiği katalitik bir proses olup özellikle sentetik dizel ve sentetik kerosen üretiminde önem taşımaktadır. Basitleştirilmiş FT reaksiyonu:

$$nCO + (2n+1)H_2 \rightarrow C_nH_{2n+2} + nH_2O$$

şeklinde ifade edilmektedir. Proseste başta demir (Fe) ve kobalt (Co) olmak üzere farklı katalizörler kullanılabilmektedir. FT sonucunda farklı zincir uzunluklarına sahip hidrokarbonlar oluştuğundan, ürünlerin istenen yakıt özelliklerine ulaşabilmesi için

damıtma, hidrokraking ve izomerizasyon gibi son işlemler uygulanabilmektedir.

FT sentezinin önemli avantajlarından biri, proses koşulları ve son işlem aşamalarının değiştirilmesiyle farklı hidrokarbon fraksiyonlarının üretilebilmesidir. Bu özellik, özellikle havacılıkta kullanılabilecek sentetik kerosen ve ağır taşımacılıkta değerlendirilebilecek sentetik dizel üretimine olanak sağlamaktadır. Yüksek sıcaklıklı SOEC–FT sistemlerinde proses ısısının yeniden kullanılması ve sentez gazı bileşiminin optimize edilmesi de toplam sistem verimliliğinin geliştirilmesine yönelik güncel araştırma alanları arasında yer almaktadır (*International Journal of Hydrogen Energy*, 2026).

Metanol Sentezi ve Alternatif E-Fuel Yolu

Metanol sentezi, FT prosesine alternatif önemli bir E-Fuel üretim yoludur. Hidrojen ile CO_2'nin katalitik reaksiyonu basitleştirilmiş olarak

$$CO_2 + 3H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O$$

şeklinde ifade edilmektedir. Yenilenebilir elektrikten elde edilen düşük emisyonlu hidrojen ve uygun bir CO_2 kaynağı kullanıldığında e-metanolüretilebilmekte; elde edilen metanol doğrudan yakıt olarak kullanılabildiği gibi dimetil eter (DME) veya sentetik benzin gibi ürünlere de dönüştürülebilmektedir.

Metanol sentezi özellikle denizcilik sektöründe önem taşımaktadır. Bunun temel nedenleri arasında metanolün sıvı hâlde depolanabilmesi ve metanol kullanımına uygun motor teknolojilerinin geliştirilmesi bulunmaktadır. Bu kapsamda iki temel üretim yolu öne çıkmaktadır:

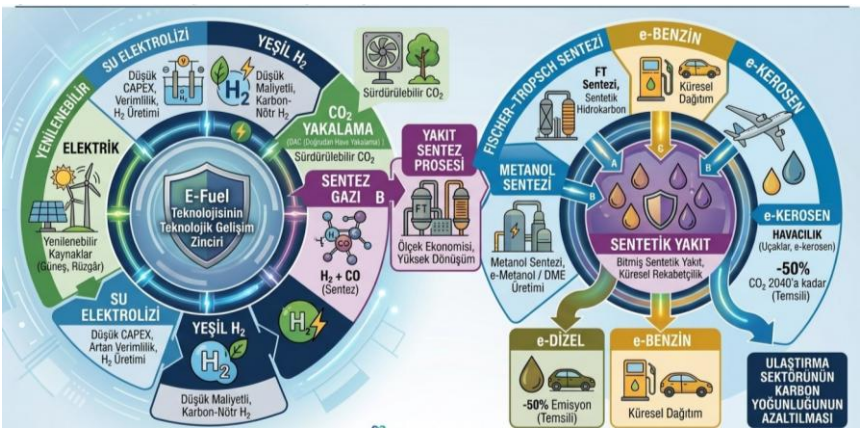
$H_2 + CO_2 \rightarrow$ sentez gazı $\rightarrow$ Fischer–Tropsch $\rightarrow$ e-dizel/e-kerosen

ve

$H_2 + CO_2 \rightarrow$ e-metanol $\rightarrow$ doğrudan kullanım

Bu yolların enerji tüketimi, maliyetleri, ürün özellikleri ve kullanım alanları farklı olduğundan üretim sistemi hedeflenen yakıt ve kullanım alanına göre optimize edilmelidir.

Şekil 3. E-Fuel teknolojisinin teknolojik gelişim zinciri



Şekil 3'te gösterildiği üzere, E-Fuel teknolojisinin gelişimi tek bir üretim yöntemine değil, yenilenebilir elektrik, hidrojen üretimi, karbon yakalama ve yakıt sentezi teknolojilerindeki gelişmelerin birlikte ilerlemesine bağlıdır. Özellikle elektrolizör verimliliğinin artırılması, CO_2'nin düşük enerji tüketimiyle yakalanması ve sentez proseslerinin ölçeklendirilmesi, E-Fuel üretim zincirinin teknik ve ekonomik performansını doğrudan etkilemektedir.

E-Fuel Üretim Zincirinin Genel Değerlendirmesi

E-Fuel teknolojisi, hidrojen üretimi, CO_2 yakalama, sentez gazı üretimi ve sentetik yakıt sentezi alanlarında demonstrasyon ve ticari ölçekli projelerin geliştirildiği bir aşamaya ulaşmıştır. Bununla birlikte sektör henüz fosil yakıtlarla geniş ölçekte maliyet açısından rekabet edebilecek olgunluğa ulaşmamış olup gelişimi düşük emisyonlu hidrojen, yenilenebilir elektrik ve sentetik yakıt

talebinin birlikte gelişmesine bağlıdır. IEA (2025), düşük emisyonlu hidrojen projelerinde finansman güçlükleri, proje iptalleri, düzenleyici belirsizlikler ve yeterli talep oluşmamasının önemli sınırlayıcılar olduğunu belirtmektedir.

E-Fuel tesislerinin ekonomik ve çevresel açıdan uygulanabilirliği; düşük maliyetli yenilenebilir elektrik, yüksek verimli elektroliz kapasitesi, sürdürülebilir CO_2 tedariki, RWGS, FT veya metanol sentezinin verimli işletilmesi, üretim ve dağıtım altyapısı ile uzun vadeli yakıt talebinin birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir. Ayrıca elektroliz, CO_2 yakalama, sentez gazı üretimi, FT veya metanol sentezi ve yakıtın son işlemlerinin birbirinden bağımsız değil, bütünleşik bir sistem olarak tasarlanması toplam performans açısından önemlidir.

Özellikle elektroliz sırasında oluşan oksijenin değerlendirilmesi, yüksek sıcaklıklı proseslerden açığa çıkan ısının yeniden kullanılması, CO_2 yakalama ve dönüşüm ünitelerinin sentez prosesleriyle bütünleştirilmesi ve değişken yenilenebilir elektrik üretiminin enerji depolama sistemleriyle birlikte yönetilmesi, sistem verimliliğini ve ekonomik performansı geliştirebilecek başlıca yaklaşımlardır. Bu nedenle E-Fuel teknolojisinin geleceği,

Elektroliz + CO_2 yakalama + Sentez teknolojileri

bütünleşik bir enerji ve yakıt sistemi içerisinde optimize edilmesine bağlıdır. Böyle bir yaklaşım; enerji verimliliği, üretim maliyeti, yaşam döngüsü sera gazı emisyonları, su tüketimi, karbon kaynağının sürdürülebilirliği ve mevcut ulaşım altyapısıyla uyumluluğun birlikte değerlendirilmesine olanak sağlayarak, özellikle havacılık, denizcilik ve uzun mesafeli ağır taşımacılık gibi doğrudan elektrifikasyonun daha sınırlı olduğu alanlarda E-Fuel kullanım potansiyelinin belirlenmesine katkı sağlayacaktır.

Şekil 3'de görüldüğü üzere E-Fuel üretimi tek bir kimyasal işlemden oluşmamaktadır. Elektroliz, CO_2 yakalama, sentez gazı üretimi, hidrokarbon sentezi ve yakıtın son işleme aşamaları birbirine bağlı bir sistem meydana getirmektedir. Bu nedenle E-Fuel tesislerinin performansı yalnızca yakıt sentez reaktörünün verimliliğiyle değil, bütünleşik sistemin toplam enerji ve madde akışlarıyla değerlendirilmelidir.

E-FUEL'ÜN ENERJİ, EKONOMİ VE ÇEVRESEL PERFORMANSI

E-Fuel teknolojisinin ulaştırma sektöründeki potansiyelinin değerlendirilmesinde yalnızca yakıtın teknik özellikleri değil, üretimden nihai kullanıma kadar bütün enerji ve madde dönüşüm zinciri dikkate alınmalıdır. Bu kapsamda yenilenebilir elektrik miktarı, hidrojen üretim verimi, CO_2 yakalama yöntemi, sentetik yakıt sentezinin verimi, taşıma ve depolama süreçleri ile nihai kullanım verimliliği birlikte değerlendirilmelidir. Ekonomik açıdan ise yakıtın birim üretim maliyetinin yanı sıra elektrolizör, CO_2 yakalama, sentez tesisi, yenilenebilir enerji santrali, depolama ve dağıtım altyapısına ilişkin yatırım ve işletme giderleri önem taşımaktadır. Çevresel performans bakımından E-Fuel'ün "karbon nötr" veya "düşük karbonlu" olarak nitelendirilmesi de üretim zincirinin tamamına bağlıdır. Yenilenebilir elektrik, düşük emisyonlu hidrojen ve sürdürülebilir CO_2 kullanılması durumunda fosil yakıtlara kıyasla önemli sera gazı azaltımları sağlanabilirken, fosil kaynaklı elektrik veya hidrojen kullanımı bu avantajı önemli ölçüde azaltabilmektedir (International Energy Agency [IEA], 2025; Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2022).

Enerji Verimliliği

E-Fuel teknolojisinin temel teknik dezavantajlarından biri, yenilenebilir elektriğin nihai mekanik enerjiye dönüştürülmesi sırasında çok sayıda enerji dönüşüm aşamasının bulunmasıdır.

Doğrudan bataryalı elektrikli araçlarda enerji zinciri Elektrik → Batarya → Güç elektroniği → Elektrik motoru → Tekerlek şeklinde nispeten kısa iken, E-Fuel kullanan içten yanmalı motorlu araçlarda Yenilenebilir elektrik → Elektroliz → Hidrojen → CO_2 yakalama/dönüşümü → Sentetik yakıt sentezi → Taşıma/depolama → İçten yanmalı motor → Mekanik enerji şeklinde daha uzun bir dönüşüm zinciri oluşmaktadır. Elektroliz, CO_2'nin dönüştürülmesi, sentez gazı üretimi, Fischer–Tropsch veya metanol sentezi, yakıtın arıtılması ve yanma gibi aşamaların her birinde enerji kayıpları meydana geldiğinden, aynı miktarda tekerlek enerjisi elde etmek için E-Fuel yolunun doğrudan elektrifikasyona göre daha fazla yenilenebilir elektrik gerektirmesi beklenmektedir (IPCC, 2022; Energies, 2024).

Bu nedenle E-Fuel değerlendirmesinde yakıt üretim verimi ile yenilenebilir elektrikten tekerleğe toplam verimin birbirinden ayrılması gerekir. Literatürde farklı E-Fuel üretim yolları için proses verimlerinin kullanılan teknoloji ve sistem sınırlarına bağlı olarak yaklaşık %59–89 arasında değişebildiği bildirilmektedir; ancak bu değerler yakıtın içten yanmalı motorda mekanik enerjiye dönüştürülmesi sırasında oluşan kayıpları kapsamamaktadır (Energy Conversion and Management, 2025). Well-to-wheel yaklaşımı, bu nedenle E-Fuel ile bataryalı elektrikli araçların enerji performansını karşılaştırmada daha uygun bir çerçeve sunmaktadır.

Bununla birlikte düşük toplam enerji verimi, E-Fuel'ün bütün ulaştırma uygulamalarında teknik açıdan uygun olmadığı anlamına gelmemektedir. Havacılık, uzun mesafeli deniz taşımacılığı ve bazı ağır hizmet uygulamalarında yüksek enerji yoğunluğu, uzun menzil ve hızlı yakıt ikmali gibi özellikler önem taşımaktadır. Bu nedenle E-Fuel'ün değerlendirilmesinde yalnızca enerji dönüşüm verimine değil, belirli ulaşım uygulamasının enerji yoğunluğu ve operasyonel gereksinimlerine de bakılması gerekmektedir (IPCC, 2022; Energies, 2024).

Ekonomik Durum

E-Fuel üretim maliyetinin başlıca belirleyicileri yenilenebilir elektrik fiyatı, elektrolizör yatırım maliyeti ve verimi, elektrolizörün kullanım süresi, CO_2 yakalama yöntemi, sentez tesisi yatırım maliyeti, su tüketimi, bakım ve finansman giderleri ile tesisin kapasite faktörüdür. Özellikle elektrik maliyeti ile kapasite faktörü arasında önemli bir ilişki bulunmaktadır. Yüksek yatırım maliyetine sahip elektroliz ve sentez tesislerinin yıl içerisinde daha uzun süre çalıştırılması, sabit yatırım giderlerinin daha fazla yakıt üretimine dağıtılmasını sağlayarak birim maliyeti azaltabilmektedir. Buna karşılık yalnızca ucuz elektrik temini yeterli olmayıp yenilenebilir elektrik üretiminin sürekliliği, enerji depolama ihtiyacı ve tesisin kapasite faktörü de dikkate alınmalıdır.

CO_2'nin doğrudan havadan yakalanması (DAC) durumunda maliyetler daha da artabilmektedir. Bunun temel nedeni atmosferdeki CO_2 konsantrasyonunun düşük olması ve ayrıştırma işleminin önemli miktarda enerji ve ekipman gerektirmesidir. Buna karşılık yüksek saflıkta ve uygun maliyetli endüstriyel CO_2 kaynakları bazı sistemlerde maliyet avantajı sağlayabilmekte, ancak kullanılan karbonun yaşam döngüsü açısından sürdürülebilirliği ayrıca değerlendirilmelidir. Bir 2024 çalışmasında güneş PV elektriği, DAC, elektroliz ve Fischer–Tropsch sentezine dayalı bir E-Fuel sisteminin temel senaryosunda seviyelendirilmiş yakıt maliyeti yaklaşık 3,1 €/L olarak hesaplanmış ve maliyet üzerinde özellikle enerji üretimi ile hidrojen üretiminin belirleyici olduğu gösterilmiştir (Environmental Research, 2024).

PtL-SAF üzerine yapılan gelecek senaryolarında da teknolojik gelişme, yenilenebilir enerji maliyetlerindeki düşüş ve üretim ölçeğinin büyümesiyle maliyetlerin azalabileceği belirtilmektedir. Seymour ve arkadaşları (2024), Avrupa'daki hibrit güneş PV–rüzgâr sistemlerine dayalı PtL-SAF üretiminde belirli düşük maliyetli bölgelerde üretim maliyetlerinin 2030 yılında

yaklaşık 1,21 €/L'den 2050 yılında 0,71 €/L düzeyine gerileyebileceğini hesaplamıştır. Ancak bu tür değerlerin senaryo sonuçları olduğu ve elektrik fiyatı, kapasite faktörü, teknoloji maliyeti ve finansman koşullarındaki değişimlerden önemli ölçüde etkilendiği dikkate alınmalıdır (Seymour et al., 2024).

E-Fuel'ün ekonomik uygulanabilirliği ayrıca karbon fiyatlandırması, düşük karbonlu yakıt zorunlulukları, vergi ve yatırım teşvikleri ile uzun dönemli yakıt satın alma anlaşmalarından etkilenmektedir. Bu mekanizmalar doğrudan üretim maliyetini ortadan kaldırmaktan ziyade erken dönem yatırım risklerini ve fosil yakıtlarla arasındaki maliyet farkını azaltabilmektedir.

Çevresel Performans

E-Fuel'ün çevresel performansı temel olarak kullanılan elektrik kaynağına, hidrojenin üretim yöntemine ve CO_2'nin kaynağına bağlıdır. Yenilenebilir elektrik, düşük emisyonlu hidrojen ve sürdürülebilir CO_2 kullanılması durumunda fosil yakıtlara göre yaşam döngüsü sera gazı emisyonlarında önemli azalmalar sağlanabilir. Buna karşılık yüksek karbon yoğunluklu elektrik veya fosil kaynaklı hidrojen kullanılması, E-Fuel'ün çevresel avantajını önemli ölçüde azaltabilir (IEA, 2025; IPCC, 2022).

E-Fuel'ün yalnızca egzoz emisyonlarına bakılarak "sıfır emisyonlu yakıt" olarak değerlendirilmesi uygun değildir. Yakıtın yanması sırasında karbon içeren yakıtlardan CO_2 açığa çıkmaya devam etmektedir. Buradaki temel farklılık, yakıt sentezinde kullanılan karbonun fosil kaynaklardan yeni bir karbon girdisi olarak sisteme eklenmesi yerine atmosferik, biyojenik veya uygun şekilde geri kazanılmış CO_2'den sağlanabilmesidir. Bu nedenle çevresel değerlendirmede yenilenebilir elektrik üretimi → hidrojen

üretimi → CO_2 yakalama → E-Fuel sentezi → taşıma/depolama → yanma zincirinin tamamı dikkate alınmalıdır.

Bu kapsamda "karbon nötr" ve "düşük karbonlu" kavramları birbirinden ayrılmalıdır. E-Fuel teorik olarak kapalı bir karbon döngüsüne yaklaşabilse de elektrik üretimi, ekipman imalatı, CO_2 yakalama, yakıt sentezi ve lojistik süreçlerinden kaynaklanan yaşam döngüsü emisyonları bulunmaktadır. Bu nedenle temel değerlendirme, yakıtın mutlak olarak sıfır emisyonlu olup olmadığı yerine, fosil yakıta kıyasla yaşam döngüsü sera gazı emisyonlarını ne ölçüde azalttığı üzerinden yapılmalıdır.

Su tüketimi de E-Fuel üretiminde dikkate alınması gereken bir diğer çevresel parametredir. Elektroliz için doğrudan su girdisine ihtiyaç duyulmasının yanı sıra sentez ve soğutma proseslerinde de su kullanılabilmektedir. Su tüketiminin bölgesel etkisi özellikle su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde önem kazanmakta ve bu nedenle tesis yer seçiminde yalnızca yenilenebilir elektrik maliyeti değil, su kaynakları, CO_2 tedariki, ulaşım altyapısı ve nihai yakıt talebi de birlikte değerlendirilmelidir. PtL-SAF üzerine yapılan yaşam döngüsü çalışmalarında da sera gazı emisyonlarının ve su ayak izinin elektrik üretim yöntemi ile üretim proseslerine duyarlı olduğu gösterilmiştir (Energy Conversion and Management, 2023).

Enerji–Ekonomi–Çevre Açısından Genel Değerlendirme

E-Fuel teknolojisinin performansı enerji, ekonomi ve çevre boyutlarının birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir. Enerji açısından temel sınırlama, çok sayıda dönüşüm aşaması nedeniyle toplam verimin düşük olması ve aynı ulaştırma hizmeti için doğrudan elektrifikasyona göre daha fazla yenilenebilir elektrik gerektirmesidir. Ekonomik açıdan temel belirleyiciler yenilenebilir elektrik fiyatı, elektrolizör ve sentez tesislerinin yatırım maliyeti, hidrojen üretimi, CO_2 yakalama, kapasite faktörü ve finansman

koşullarıdır. Çevresel açıdan ise E-Fuel'ün avantajı, üretim zincirinin düşük karbonlu elektrik ve sürdürülebilir karbon kaynaklarıyla çalıştırılmasına bağlıdır (IEA, 2025; IPCC, 2022).

Bu nedenle E-Fuel'ün kullanım alanlarının, doğrudan elektrifikasyonun teknik veya operasyonel açıdan sınırlı kaldığı uygulamalar dikkate alınarak değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Havacılık ve uzun mesafeli deniz taşımacılığı, yüksek enerji yoğunluğu ve sıvı yakıt gereksinimi nedeniyle öne çıkan alanlardır. Buna karşılık doğrudan elektrifikasyonun uygulanabildiği birçok kara taşımacılığı uygulamasında E-Fuel kullanımı, aynı miktarda hareket enerjisi için daha fazla yenilenebilir elektrik gerektirebilmektedir. Sonuç olarak E-Fuel'ün sürdürülebilirliği yalnızca yakıtın kimyasal özelliklerine değil, hangi elektrikle, hangi hidrojenle, hangi CO_2 kaynağıyla ve hangi üretim teknolojisiyle üretildiğine bağlıdır. Bu nedenle E-Fuel değerlendirmelerinde enerji verimliliği, üretim maliyeti, yaşam döngüsü sera gazı emisyonları, su tüketimi, karbon kaynağının sürdürülebilirliği ve mevcut altyapıyla uyumluluk gibi göstergelerin birlikte ele alındığı bütünleşik bir yaklaşım gerekmektedir.

ULAŞIM SEKTÖRÜNDE E-FUEL'ÜN KULLANIM ALANLARI

E-Fuel teknolojisinin ulaştırma sektöründeki kullanım alanları; enerji yoğunluğu, menzil gereksinimi, yakıt ikmal süresi, mevcut altyapıyla uyumluluk ve doğrudan elektrifikasyonun teknik uygulanabilirliği gibi kriterlere göre farklılık göstermektedir. Bataryalı elektrikli araçların hızla yaygınlaştığı binek otomobil segmentinde E-Fuel kullanımının daha sınırlı kalması beklenirken, yüksek enerji yoğunluğu ve sıvı yakıt gereksiniminin önem taşıdığı havacılık ve uzun mesafeli deniz taşımacılığında sentetik yakıtların daha belirgin bir kullanım alanı bulması beklenmektedir. Bununla birlikte E-Fuel'ün ulaştırma sektöründeki geleceği yalnızca teknik

özelliklere değil, üretim maliyeti, yenilenebilir elektrik gereksinimi ve düzenleyici politikaların gelişimine de bağlı olacaktır (IEA, 2025, 2026).

Karayolu Taşımacılığı

Karayolu taşımacılığında E-Fuel'ün kullanım potansiyeli, binek otomobiller ile ağır hizmet araçları açısından farklı değerlendirilmelidir. Binek otomobillerde bataryalı elektrikli araçların yaygınlaşması, batarya teknolojisinin gelişmesi ve şarj altyapısının büyümesi, yeni araçlarda E-Fuel kullanımının kapsamını sınırlandırabilecek temel faktörlerdir. IEA'ya göre küresel elektrikli otomobil satışları 2025 yılında 20 milyon adedi aşmış ve yeni otomobil satışlarının yaklaşık dörtte birine ulaşmıştır. Bu gelişme, binek otomobillerde doğrudan elektrifikasyonun hızla yaygınlaştığını göstermektedir (IEA, 2026). Bununla birlikte mevcut içten yanmalı motorlu araç filosunun kısa sürede tamamen yenilenmesi mümkün olmadığından, uygun özelliklere sahip sentetik benzin ve dizel yakıtların mevcut araçlarda veya yakıt altyapısında kullanılabilmesi belirli bir geçiş seçeneği oluşturabilir. Ancak bu kullanımda yakıtın motor ve yakıt sistemiyle teknik uyumluluğu, yakıt standartları, emisyon gereklilikleri ve yaşam döngüsü karbon yoğunluğu dikkate alınmalıdır.

Ağır hizmet ve uzun mesafeli karayolu taşımacılığında ise değerlendirme daha karmaşıktır. Yüksek taşıma kapasitesi, uzun menzil ve kısa yakıt ikmal süresi gereksinimleri; batarya kütlesi, şarj süresi ve yüksek güçlü şarj altyapısı gibi konuları önemli hale getirmektedir. Bununla birlikte batarya teknolojilerindeki gelişmeler ve hidrojen yakıt hücrelerinin kullanımına yönelik çalışmalar, ağır taşımacılıkta alternatifleri çeşitlendirmektedir. Bu nedenle E-Fuel'ün ağır karayolu taşımacılığındaki potansiyeli, bataryalı elektrikli ve hidrojen tabanlı sistemlerle birlikte teknik,

ekonomik ve çevresel kriterler açısından değerlendirilmelidir (IEA, 2025, 2026).

Havacılık

Havacılık, E-Fuel teknolojisinin önemli kullanım alanlarından biri olarak değerlendirilmektedir. Bunun temel nedenleri uzun menzil, yüksek faydalı yük ve düşük yakıt kütlesi gereksinimleridir. Günümüzde bataryaların gravimetrik enerji yoğunluğunun sıvı hidrokarbon yakıtlara göre düşük olması, özellikle uzun mesafeli ticari havacılıkta tam elektrikli tahrik sistemlerinin kullanımını sınırlandıran temel teknik faktörlerden biridir (IPCC, 2022). Bu nedenle yenilenebilir elektrikten üretilen hidrojen ile sürdürülebilir CO_2'nin kullanıldığı Power-to-Liquid (PtL) süreçleriyle sentetik kerosen üretimi, sürdürülebilir havacılık yakıtlarının önemli teknolojik seçeneklerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

IEA'nın değerlendirmelerine göre sürdürülebilir havacılık yakıtı (SAF) üretiminin 2030 yılına kadar önemli ölçüde artması beklenmekte, ancak sentetik yakıtların toplam SAF üretimi içerisindeki payının üretim maliyeti ve yenilenebilir elektrik gereksinimleri nedeniyle sınırlı kalabileceği öngörülmektedir (IEA, 2025). Avrupa Birliği'nde ReFuelEU Aviation düzenlemesi de SAF kullanımını kademeli olarak artırırken sentetik havacılık yakıtları için ayrıca hedefler belirlemektedir. Düzenleme kapsamında SAF kullanım oranının 2025'te %2, 2030'da %6, 2040'ta %34 ve 2050'de %70 seviyesine ulaşması; sentetik havacılık yakıtları için ise 2030'da %1,2 ve 2050'de %35 oranlarının hedeflenmesi öngörülmektedir (European Commission, 2026). Bu hedefler, E-Fuel'ün havacılık sektöründe teknolojik gelişmenin yanı sıra enerji ve yakıt politikaları açısından da önem taşıdığını göstermektedir. Bununla birlikte sentetik kerosen üretiminin yaygınlaşması için düşük karbonlu yenilenebilir elektrik, büyük ölçekli elektroliz

kapasitesi, sürdürülebilir CO_2 kaynakları ve yeterli PtL üretim kapasitesinin birlikte geliştirilmesi gerekmektedir.

Deniz Taşımacılığı

Deniz taşımacılığı, uzun mesafelerde yüksek miktarda enerjinin taşınmasını gerektirdiğinden alternatif yakıtların önemli kullanım alanlarından biridir. Denizcilikte hidrojen, amonyak, metanol, biyoyakıtlar ve sentetik hidrokarbonlar üzerinde çalışmalar yürütülmekte ve yakıt seçiminde enerji yoğunluğu, depolama hacmi, güvenlik, motor teknolojisi, yakıt ikmal altyapısı ve yaşam döngüsü emisyonları birlikte değerlendirilmektedir (IEA, 2025, 2026). Özellikle e-metanol, mevcut denizcilik yakıt seçenekleri arasında E-Fuel teknolojisi açısından dikkat çeken bir üründür. Metanolün sıvı halde depolanabilmesi ve uygun motor teknolojilerinde kullanılabilmesi önemli avantajlar sağlarken, hidrojen ve amonyak gibi karbon içermeyen yakıtlar farklı teknik ve çevresel özellikler sunmaktadır. Buna karşılık bu yakıtların depolama hacmi, güvenlik koşulları ve yakıt ikmal altyapısı bakımından farklı gereksinimleri bulunmaktadır.

Bu nedenle denizcilik sektöründe E-Fuel'ün geleceği tek bir yakıt türüne bağlı değildir. Geminin büyüklüğü, seyir rotası, yakıt ikmal noktaları, taşıma mesafesi ve motor teknolojisine bağlı olarak hidrojen, amonyak, metanol, biyoyakıtlar ve sentetik hidrokarbonlar farklı seçenekler oluşturabilmektedir. IEA'nın güncel değerlendirmeleri de denizcilikte düşük emisyonlu yakıt seçeneklerinin çeşitlenmeye devam ettiğini ve bunların yaygınlaşmasında yakıt maliyetleri ile düzenleyici politikaların önemli rol oynadığını göstermektedir (IEA, 2026).

E-Fuel'ün ulaştırma sektöründeki kullanım alanları değerlendirildiğinde, teknolojinin bütün ulaşım türleri için aynı ölçüde uygun olmadığı görülmektedir. Binek otomobillerde doğrudan elektrifikasyonun hızlı gelişimi E-Fuel'ün yeni

araçlardaki kullanım alanını sınırlayabilirken, mevcut içten yanmalı araç filosu belirli ölçüde sentetik yakıtlar için potansiyel bir kullanım alanı oluşturabilir. Ağır karayolu taşımacılığında ise E-Fuel; batarya ve hidrojen teknolojileriyle birlikte değerlendirilmesi gereken seçeneklerden biridir. Havacılıkta yüksek enerji yoğunluğu ve sıvı yakıt gereksinimi nedeniyle sentetik kerosen önemli bir potansiyele sahipken, denizcilikte e-metanol ve sentetik hidrokarbonlar hidrojen, amonyak ve biyoyakıtlarla birlikte değerlendirilmektedir (IEA, 2025, 2026; IPCC, 2022). Dolayısıyla E-Fuel, ulaştırma sektörünün tamamında tek bir yakıt alternatifi olarak değil, doğrudan elektrifikasyonun teknik veya operasyonel açıdan sınırlı kaldığı uygulamalarda kullanılan tamamlayıcı bir enerji taşıyıcısı olarak ele alınmalıdır. Bu kullanımın yaygınlaşması ise teknik uygunluğun yanı sıra üretim maliyeti, yenilenebilir elektrik arzı, sürdürülebilir CO_2 kaynakları, yakıt standartları ve düzenleyici politikaların birlikte gelişmesine bağlı olacaktır.

POLİTİKA, DÜZENLEMELER VE E-FUEL'ÜN GELECEĞİ

E-Fuel teknolojisinin gelecekteki gelişimi yalnızca teknik ilerlemelere ve üretim maliyetlerindeki düşüşe bağlı değildir. Sentetik yakıtların ulaştırma sektöründe yaygınlaşabilmesi için yenilenebilir elektrik arzının artırılması, düşük karbonlu hidrojen üretiminin geliştirilmesi, sürdürülebilir CO_2 kaynaklarının oluşturulması, yakıt standartlarının belirlenmesi ve uzun dönemli pazar talebinin güvence altına alınması gerekmektedir. Bu nedenle E-Fuel'ün gelişiminde enerji, iklim ve ulaştırma politikaları doğrudan ilişkili hâle gelmektedir.

Avrupa Birliği, E-Fuel'ü bağımsız bir yakıt kategorisinin yanı sıra yenilenebilir kökenli biyolojik olmayan yakıtlar (Renewable Fuels of Non-Biological Origin, RFNBO) ile sürdürülebilir havacılık ve denizcilik yakıtları kapsamında ele almaktadır. Bu yaklaşımda yakıtın kimyasal yapısının yanında

üretimde kullanılan elektrik, hidrojen ve karbon kaynağının sürdürülebilirliği de dikkate alınmaktadır (European Union, 2023).

Avrupa Birliği'nde E-Fuel Politikaları ve RFNBO Düzenlemeleri

Avrupa Birliği'nin yenilenebilir enerji ve ulaştırma politikalarında RFNBO'lar önemli bir yer edinmiştir. Yenilenebilir Enerji Direktifi'nin (RED III) revizyonuyla ulaştırmada yenilenebilir enerji kullanımının artırılması ve düşük karbonlu yakıtların sisteme dâhil edilmesi için daha güçlü hedefler oluşturulmuştur. Bu düzenlemeler, E-Fuel üretiminde kullanılan elektriğin ve hidrojenin yenilenebilir nitelikte olduğunun kanıtlanmasını önemli hâle getirmektedir (European Union, 2023).

RFNBO sisteminde E-Fuel'ün yalnızca sentetik olması yeterli değildir. Yakıtın yenilenebilir yakıt olarak değerlendirilebilmesi için üretim zincirinin ilgili sürdürülebilirlik ve sera gazı azaltım kriterlerini karşılaması gerekmektedir. Böylece yenilenebilir elektrikle üretilen hidrojen ve sürdürülebilir karbon kaynağı kullanılan sentetik yakıtlar ile fosil kaynaklı elektrik veya hidrojen kullanılan ürünler arasında düzenleyici açıdan ayrım yapılmaktadır.

Bu yaklaşım, üreticilerin yalnızca yakıt üretim kapasitesini artırmasını değil, elektrik ve karbon girdilerinin izlenebilirliğini ve sürdürülebilirliğini de belgelemesini gerektirmektedir. Dolayısıyla sertifikasyon, izleme ve yaşam döngüsü emisyonlarının hesaplanması E-Fuel ekonomisinin temel unsurları arasında yer almaktadır.

Havacılık ve Denizcilik Düzenlemelerinin E-Fuel Talebine Etkisi

E-Fuel'ün gelecekteki kullanımında havacılık sektörü özel bir konuma sahiptir. Avrupa Birliği'nin ReFuelEU Aviation

düzenlemesi kapsamında havacılık yakıtı tedarikçilerinin sürdürülebilir havacılık yakıtı (SAF) kullanımını kademeli olarak artırması öngörülmektedir. SAF için asgari oran 2025 yılında %2 olarak başlamış ve 2050 yılında %70'e ulaşacak şekilde belirlenmiştir. Sentetik havacılık yakıtları için ayrıca 2030 yılında %1,2 ve 2050 yılında %35 oranında özel alt hedefler bulunmaktadır (European Commission, 2026).

Bu düzenleme, E-Fuel açısından yalnızca teknolojik üretim kapasitesinin değil, düzenlemeler yoluyla oluşturulan pazar talebinin de yatırım kararlarında dikkate alınmasını sağlamaktadır. Avrupa Komisyonu'nun sürdürülebilir ulaştırma yatırım planında, ReFuelEU Aviation ve FuelEU Maritime hedeflerinin karşılanması amacıyla 2035 yılına kadar yaklaşık 20 milyon ton sürdürülebilir alternatif yakıta ihtiyaç duyulacağı ve bunun yaklaşık 6,8 milyon tonunun e-yakıt olması gerektiği belirtilmektedir. Plan kapsamında 2035'e kadar yaklaşık 100 milyar avroluk yatırım ihtiyacı da öngörülmektedir (European Commission, 2025).

Deniz taşımacılığında ise FuelEU Maritime, gemiler tarafından kullanılan enerjinin sera gazı yoğunluğunun zaman içerisinde azaltılmasını hedeflemektedir. Düzenleme, RFNBO kullanımını teşvik etmekte ve belirli koşullarda RFNBO'lar için alt hedef mekanizmaları öngörmektedir. Bununla birlikte uygulamanın başarısı yakıtların üretim kapasitesi, bulunabilirliği, coğrafi dağılımı ve maliyeti gibi faktörlere de bağlıdır. Dolayısıyla E-Fuel'ün gelişimi, üretim teknolojilerinin yanında havacılık ve denizcilikte oluşturulan düzenleyici talep ile de yakından ilişkilidir.

Yenilenebilir Elektrik Maliyetlerinin Gelecekteki Etkisi

E-Fuel üretim ekonomisinin temel girdilerinden biri yenilenebilir elektriktir. Bu nedenle güneş ve rüzgâr enerjisinin maliyetindeki gelişmeler, sentetik yakıtların gelecekteki ekonomik performansı açısından önem taşımaktadır. IRENA'nın

değerlendirmesine göre 2024 yılında devreye alınan yeni büyük ölçekli yenilenebilir enerji kapasitesinin %91'i, yeni fosil yakıt alternatiflerinin en düşük maliyetinden daha düşük elektrik üretim maliyetine sahip olmuştur. Aynı yıl yeni karasal rüzgâr projelerinin küresel ağırlıklı ortalama LCOE değeri 0,034 USD/kWh, güneş PV için ise 0,043 USD/kWh olarak hesaplanmıştır (IRENA, 2025).

Bununla birlikte yenilenebilir elektrik maliyetlerindeki düşüş doğrudan E-Fuel maliyetlerinin aynı oranda azalacağı anlamına gelmemektedir. Çünkü toplam üretim maliyetinde elektrolizör, CO_2 yakalama, sentez tesisi, finansman ve işletme giderleri de önemli yer tutmaktadır. Buna rağmen düşük maliyetli yenilenebilir elektriğin yaygınlaşması, E-Fuel üretiminin en önemli değişken maliyetlerinden birinin azaltılması açısından önemli bir potansiyel oluşturmaktadır.

Özellikle güneş ve rüzgâr potansiyeli yüksek bölgelerde hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin elektroliz ve E-Fuel tesisleriyle birlikte işletilmesi kapasite faktörünün artırılmasına katkı sağlayabilir. Bu nedenle gelecekte E-Fuel tesislerinin yalnızca yakıt talebinin yüksek olduğu bölgelere değil, aynı zamanda düşük maliyetli yenilenebilir elektrik ve sürdürülebilir CO_2 kaynaklarının bulunduğu bölgelere yönelmesi mümkün olabilir.

E-Fuel'ün Ticarileşmesinde Finansman ve Pazar Riski

E-Fuel teknolojilerinin pilot ölçekten ticari ölçeğe taşınmasında teknik yeterlilik kadar finansman da önemlidir. Büyük ölçekli elektroliz, CO_2 yakalama ve Fischer–Tropsch veya metanol sentez tesisleri yüksek başlangıç yatırımı gerektirmektedir. İlk ticari tesislerde teknoloji, yakıt fiyatı, elektrik fiyatı ve uzun dönemli yakıt talebine ilişkin belirsizlikler yatırım riskini artırmaktadır.

IEA'nın 2026 değerlendirmesinde, düşük emisyonlu hidrojen projelerinde uzun vadeli offtake anlaşmalarının

yetersizliği büyük ölçekli yatırımların önündeki önemli engellerden biri olarak belirtilmektedir. 2025 yılında yeni imzalanan düşük emisyonlu hidrojen alım anlaşmalarının yalnızca yaklaşık %20'sinin kesin sözleşme taahhüdüyle desteklenmiş olması, yeni enerji yakıtlarının ticarileşmesinde talep güvencesinin önemini göstermektedir (IEA, 2026).

Bu nedenle E-Fuel yatırımlarında uzun dönemli yakıt satın alma anlaşmaları, kamu destekleri, yatırım garantileri, karbon fiyatlandırması ve fark sözleşmeleri gibi mekanizmalar ilk ticari tesislerin finansmanında rol oynayabilir. Böylece üretim kapasitesi ile gelecekteki yakıt talebi arasındaki belirsizliklerin azaltılması amaçlanmaktadır.

E-Fuel'ün Gelecekteki Teknolojik Gelişim Alanları

E-Fuel teknolojisinin gelecekteki gelişimi üç temel teknolojik eksen üzerinden değerlendirilebilir. Birinci eksen, daha düşük maliyetli güneş ve rüzgâr elektriği, hibrit yenilenebilir enerji sistemleri ve enerji depolama çözümlerinin geliştirilmesidir. İkinci eksen, daha yüksek verimli ve düşük maliyetli elektrolizörlerle elektrikten hidrojen üretiminin geliştirilmesidir. Üçüncü eksen ise DAC, biyojenik ve endüstriyel CO_2 kaynakları ile RWGS, Fischer–Tropsch ve metanol sentez teknolojilerinin ölçeklendirilmesidir.

Bu üç alan birbirinden bağımsız değildir. Elektrolizör veriminin artması aynı miktarda hidrojen için gerekli elektrik tüketimini azaltırken, düşük maliyetli yenilenebilir elektrik E-Fuel üretim maliyetinin düşürülmesine katkı sağlayabilir. Benzer şekilde CO_2 yakalama maliyetlerinin azaltılması, özellikle DAC tabanlı E-Fuel sistemlerinin ekonomik uygulanabilirliğini artırabilir.

Şekil 4. E-Fuel'ün gelecekteki gelişimini belirleyen temel bileşenler



Bu nedenle gelecekte E-Fuel tesislerinde yalnızca tek tek proseslerin geliştirilmesi yerine, yenilenebilir elektrik–elektroliz–CO_2 yakalama–yakıt sentezi zincirinin bütünleşik olarak optimize edilmesi önem kazanacaktır. Bu bütünleşik yaklaşım, enerji verimliliğinin artırılması, üretim maliyetlerinin azaltılması ve yaşam döngüsü sera gazı emisyonlarının düşürülmesi açısından belirleyici olacaktır.

Şekil 4'te görüldüğü üzere, E-Fuel teknolojisinin gelecekteki gelişimi yenilenebilir elektrik, hidrojen üretimi ve CO_2 yakalama ile yakıt sentez teknolojilerinin birbirine bağlı gelişimine dayanmaktadır. Yenilenebilir elektrik maliyetlerinin azalması üretim ekonomisini desteklerken, elektrolizör verimliliğinin artırılması hidrojen üretimindeki enerji tüketimini azaltabilir. Benzer şekilde CO_2'nin daha düşük enerji ve maliyetle temin edilmesi ve sentez proseslerinin geliştirilmesi, E-Fuel üretim zincirinin genel performansını iyileştirebilir.

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

E-Fuel teknolojisi; yenilenebilir elektrik, hidrojen üretimi, sürdürülebilir CO_2 kaynakları ve yakıt sentez teknolojilerini bir araya getiren bütünleşik bir enerji dönüşüm yaklaşımıdır. Bu

çalışma kapsamında E-Fuel'ün üretim teknolojileri, enerji ve ekonomik performansı, çevresel etkileri, ulaştırma sektöründeki kullanım alanları, politika ve düzenlemeler ile gelecekteki gelişim potansiyeli birlikte değerlendirilmiştir. Elde edilen genel sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

E-Fuel teknolojisi, yenilenebilir elektrik enerjisinin hidrojen ve sürdürülebilir karbon kaynakları aracılığıyla sıvı veya gaz yakıtlara dönüştürülmesini sağlayan ve özellikle elektrifikasyonun teknik olarak sınırlı olduğu ulaştırma alanlarında değerlendirilen alternatif bir yakıt teknolojisidir.

E-Fuel üretim zinciri; yenilenebilir elektrik üretimi, suyun elektroliziyle hidrojen üretimi, CO_2'nin yakalanması, sentez gazı veya metanol üretimi ve Fischer–Tropsch gibi sentez süreçlerinden oluşan çok aşamalı bir enerji dönüşüm sistemidir.

E-Fuel sistemlerinin temel sınırlamalarından biri, elektriğin hidrojen ve sentetik yakıta dönüştürülmesi ve daha sonra motor veya türbin aracılığıyla tekrar mekanik enerjiye çevrilmesi nedeniyle doğrudan elektrik kullanımına kıyasla daha düşük toplam enerji verimliliğine sahip olmasıdır.

Bu nedenle aynı ulaşım hizmetinin sağlanması için E-Fuel sistemleri, doğrudan elektrifikasyona göre daha fazla yenilenebilir elektrik kapasitesi gerektirebilir. Bu durum, yenilenebilir enerji kaynaklarının sınırlı olduğu sistemlerde önemli bir planlama kriteridir.

Bununla birlikte düşük enerji dönüşüm verimliliği, E-Fuel'ün tüm ulaştırma uygulamalarında uygun olmadığı anlamına gelmemektedir. Yüksek enerji yoğunluğu ve sıvı yakıt olarak kullanılabilmesi, özellikle uzun menzil ve yüksek enerji yoğunluğu gerektiren uygulamalarda önemli bir özellik sağlamaktadır.

Binek otomobillerde bataryalı elektrikli araçların gelişmesi E-Fuel'ün yeni araçlardaki kullanım alanını sınırlandırabilir. Buna karşılık mevcut içten yanmalı araç filosunda, teknik ve mevzuatsal uygunluk sağlandığında sentetik benzin ve dizel yakıtlar mevcut yakıt altyapısıyla birlikte değerlendirilebilir.

Ağır hizmet ve uzun mesafeli karayolu taşımacılığında batarya kütlesi, menzil, şarj süresi ve altyapı gereksinimleri nedeniyle batarya, hidrojen ve E-Fuel seçeneklerinin teknik ve ekonomik açıdan birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Havacılık, E-Fuel teknolojisinin önemli potansiyel kullanım alanlarından biridir. Uzun menzilli uçuşlarda yüksek enerji yoğunluklu sıvı yakıtlara duyulan ihtiyaç, sentetik kerosen ve Power-to-Liquid tabanlı yakıtların önemini artırmaktadır.

Deniz taşımacılığında E-Fuel; hidrojen, amonyak, metanol ve biyoyakıtlarla birlikte değerlendirilmektedir. Özellikle e-metanol ve sentetik hidrokarbonlar uzun mesafeli deniz taşımacılığında araştırılan seçenekler arasındadır.

E-Fuel'ün ekonomik uygulanabilirliği; yenilenebilir elektrik maliyeti yanında elektrolizör yatırım ve verimliliği, hidrojen üretimi, CO_2 yakalama, sentez tesisi, kapasite faktörü, finansman koşulları ve tesis ölçeğine bağlıdır.

Büyük ölçekli tesislerin kurulması, elektrolizör teknolojisinin geliştirilmesi, yenilenebilir enerji maliyetlerinin azaltılması ve CO_2 yakalama teknolojilerinin iyileştirilmesi, E-Fuel üretim maliyetlerinin azaltılmasına katkı sağlayabilecek temel gelişmelerdir.

E-Fuel'ün çevresel performansı, kullanılan elektrik ve karbon kaynaklarına doğrudan bağlıdır. Yenilenebilir elektrik, düşük karbonlu hidrojen ve sürdürülebilir CO_2 kullanılması

durumunda fosil yakıtlara kıyasla sera gazı emisyonlarında önemli azaltımlar sağlanabilir.

E-Fuel'ün yalnızca egzoz emisyonlarına bakılarak “sıfır emisyonlu yakıt” olarak değerlendirilmesi doğru değildir. Elektrik üretiminden hidrojen ve CO_2 teminine, yakıt sentezinden taşıma, depolama ve kullanım aşamasına kadar bütün süreç yaşamdöngüsü perspektifiyle değerlendirilmelidir.

E-Fuel'ün karbon nötr niteliği, kullanılan karbonun kaynağı ile yaşam döngüsü boyunca atmosfere salınan ve yeniden yakalanan karbon arasındaki dengeye bağlıdır. Bu nedenle CO_2 kaynağının sürdürülebilirliği, teknolojinin çevresel performansında temel bir belirleyicidir.

CO_2'nin doğrudan havadan yakalanması (DAC), biyojenik kaynaklardan elde edilmesi veya uygun endüstriyel kaynaklardan geri kazanılması, farklı enerji, maliyet ve çevresel sonuçlar doğurmaktadır. Ayrıca elektroliz nedeniyle oluşan su ihtiyacı, özellikle su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde tesis planlamasında dikkate alınmalıdır.

Avrupa Birliği'nin RFNBO, ReFuelEU Aviation ve FuelEU Maritime gibi düzenlemeleri, E-Fuel ve diğer düşük karbonlu yakıtların ulaştırma sektöründeki kullanımının gelişmesinde önemli bir düzenleyici çerçeve oluşturmaktadır.

E-Fuel'ün ticarileşmesi yalnızca teknolojik olgunluğa bağlı değildir. Yüksek yatırım maliyetleri, elektrik fiyatlarındaki belirsizlik ve gelecekteki yakıt talebine ilişkin riskler nedeniyle uzun vadeli yakıt alım anlaşmaları, finansman mekanizmaları ve istikrarlı düzenleyici çerçeveler önem taşımaktadır.

E-Fuel üretiminin yaygınlaşması, aynı zamanda yenilenebilir elektrik kapasitesinin artırılmasını gerektirmektedir. Bu nedenle E-Fuel yalnızca alternatif bir yakıt olarak değil,

yenilenebilir enerji, hidrojen üretimi ve karbon yakalama teknolojileriyle bütünleşmiş bir enerji sistemi olarak ele alınmalıdır.

E-Fuel'ün sürdürülebilirliği değerlendirilirken yalnızca üretim miktarı veya yakıt maliyeti değil; yenilenebilir elektrik tüketimi, enerji dönüşüm verimi, yaşam döngüsü sera gazı emisyonları, su tüketimi, karbon kaynağı ve altyapı uyumluluğu birlikte dikkate alınmalıdır.

Geleceğin ulaştırma enerji sisteminde bataryalı elektrik, hidrojen, biyoyakıtlar ve E-Fuel teknolojilerinin farklı teknik ve enerji gereksinimlerine sahip uygulamalarda birlikte değerlendirilmesi, bütünleşik bir enerji sistemi yaklaşımının temelini oluşturabilir.

Sonuç olarak E-Fuel'ün gelecekteki rolü, doğrudan elektrifikasyonun teknik olarak uygulanabildiği alanlardan ziyade yüksek enerji yoğunluğu, uzun menzil ve sıvı yakıt kullanımının önemli olduğu havacılık, denizcilik ve belirli ağır taşımacılık uygulamalarında yoğunlaşabilecek bir tamamlayıcı teknoloji olarak değerlendirilebilir.

E-Fuel teknolojisinin uzun vadeli gelişimi; düşük maliyetli yenilenebilir elektrik, yüksek verimli elektrolizörler, sürdürülebilir CO_2 kaynakları, gelişmiş sentez teknolojileri, büyük ölçekli üretim tesisleri, uygun ekonomik koşullar ve istikrarlı politika mekanizmalarının birlikte geliştirilmesine bağlıdır.

Kaynakça

D’Adamo, I., Gastaldi, M., Giannini, M., & Nizami, A. S. (2024). Environmental implications and levelized cost analysis of E-fuel production under photovoltaic energy, direct air capture, and hydrogen. *Environmental Research, 246*, 118163. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118163

Dell’Aversano, S., Villante, C., Gallucci, K., Vanga, G., & Di Giuliano, A. (2024). E-fuels: A comprehensive review of the most promising technological alternatives towards an energy transition. Energies, 17(16), 3995.

El-Gohary, M., et al. (2024). Forging a sustainable sky: Unveiling the pillars of aviation e-fuel production for carbon emission circularity. iScience, 27(3), 109154.

European Commission. (2023). Directive (EU) 2023/2413 amending Directive (EU) 2018/2001 as regards the promotion of energy from renewable sources. European Union.

European Commission. (2026). ReFuelEU Aviation. Directorate-General for Mobility and Transport.

International Energy Agency. (2025a). Delivering sustainable fuels. IEA.

International Energy Agency. (2025b). Energy efficiency 2025: Transport. IEA.

International Energy Agency. (2025c). Global EV outlook 2025. IEA.

International Energy Agency. (2025d). Global hydrogen review 2025. IEA.

International Energy Agency. (2025e). Renewables 2025: Analysis and forecast to 2030. IEA.

International Energy Agency. (2026a). Global energy review 2026. IEA.

International Energy Agency. (2026b). Global EV outlook 2026. IEA.

International Energy Agency. (2026c). Global hydrogen review 2026. IEA.

International Renewable Energy Agency. (2025). Renewable power generation costs in 2024. IRENA.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Climate change 2022: Mitigation of climate change: Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Litwinowicz, M., Majewska, K., Szczesniak, A., & Dybiński, O. (2026). Power-to-Liquid pathways based on high-temperature electrolysis and Fischer-Tropsch synthesis: Review of integrated concepts and prospects for MCE-FT systems. International Journal of Hydrogen Energy, 250, 155938.

Colelli, L., Dell'Aversano, S., Bassano, C., Vanga, G., Gallucci, K., & Vilardi, G. (2026). Liquid e-fuels for a sustainable future: A comprehensive review of production, regulation, and technological innovation. Energy Conversion and Management, 347, 120529.

Seymour, K., Held, M., Stolz, B., Georges, G., & Boulouchos, K. (2024). Future costs of power-to-liquid sustainable aviation fuels produced from hybrid solar PV-wind plants in Europe. Sustainable Energy & Fuels, 8, 811–825.

Sustainable aviation fuel (SAF) production through power-to-liquid (PtL): A combined techno-economic and life cycle assessment. (2023). Energy Conversion and Management, 292, 117427.


BİDGE