Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences
(*Anadolu Çevre ve Hayvancılık Bilimleri Dergisi*)
DOI: https://doi.org/10.35229/jaes.1626339

JAES
Year: 10 No: 2, 2025 (182-190)
AÇEH
Yıl: 10, Sayı: 2, 2025 (182-190)

DERLEME MAKALESİ REVIEW PAPER

Derleme: Sürdürülebilir Havacılık Yakıtları Üretimi ve Çevresel Etkileri

Gonca YAŞAR[1]* **Burcu ONAT[1]**
[1]*İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Çevre Mühendisliği Bölümü, 34315, İstanbul,Türkiye*

Geliş Tarihi: *24.01.2025* ***Kabul Tarihi:*** *18.02.2025* ***Basım Tarihi:*** *25.03.2025*

Atıf yapmak için: **Yaşar, G. & Onat, B. (2024).** Derleme: Sürdürülebilir Havacılık Yakıtları Üretimi ve Çevresel Etkileri. *Anadolu Çev. Hay.Bil. Dergisi*, ***10***(2), 182-190. https://doi.org/10.35229/jaes.1626339

How to cite: **Yaşar, G. & Onat, B. (2024).** Review: Sustainable Aviation Fuels Production and Environmental Impacts. *J. Anatoli. Env. Anim. Sci.*, ***10***(2), 182-190. https://doi.org/10.35229/jaes.1626339

*: https://orcid.org/0000-0002-9623-5220
: https://orcid.org/0000-0002-3036-2809

***Sorumlu yazarın:**
Gonca YAŞAR
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Çevre Mühendisliği Bölümü, 34315, İstanbul,Türkiye
: gonca.yasar@ogr.iuc.edu.tr

Öz: Yakıttan kaynaklanan sera gazı emisyonlarına ilişkin düzenlemelerle birlikte, havacılık sektörünün küresel karbon salınımına katkısı %2,5' tur. En büyük katkıyı yapan ticari uçuşlardan kaynaklanan karbon salınımının azaltılmasına yönelik çalışmalar da artış göstermektedir. Sürdürülebilir havacılık yakıtı (SAF) havacılık sektörünün karbon emisyonlarını azaltma hedeflerine önemli bir katkı sunmaktadır. Kullanımı onaylanan SAF'lar için uçaklarda herhangi bir değişikliğe gerek duyulmaması önemli bir avantaj sağlamaktadır. SAF üretiminde hammadde kaynağı olarak özellikle atıkların tercih edilmesi potansiyel çevresel etkilerin değerli enerji kaynaklarına dönüştürülmesiyle döngüsel ekonomiye teşvik ederek atıkların azaltılmasını da sağlamaktadır. Ticari uçuşlarda halihazırda SAF kullanımı sınırlı olsa da uzun uçuşlardaki dekarbonizasyon potansiyeli yüksektir. Bununla birlikte hammadde kaynaklarının sınırlayıcı etkisi de göz önünde bulundurulması gereken bir durumdur. Yaşam döngü analizi, bir ürünün yaşam döngüsü boyunca, hammadde elde etme, üretim ve kullanım aşamalarından atık yönetimine kadar, potansiyel çevresel etkileri ve kullanılan kaynakları değerlendirmek için bir araç olarak tanımlanır. Yaşam döngü analizinin SAF'a uygulanması fosil yakıtlara kıyasla sera gazı azaltım potansiyelinin somutlaştırılması bakımından önemli bir rol oynamaktadır. Bu inceleme makalesinde havacılığın karbon emisyonlarına etkisi, yenilenebilir enerji alternatifi olarak SAF türleri, hammadde kaynakları, dönüşüm teknolojileri ve bu yakıt türlerinin yaşam döngü analizleriyle ilgili çalışmalardan bahsedilmiş aynı zamanda Türkiye'deki SAF talimatlarıyla birlikte SAF üretimini etkileyen diğer politikalara değinilmiştir.

Anahtar kelimeler: SAF üretimi, sürdürülebilir havacılık yakıtı, yaşam döngü analizi.

Review: Sustainable Aviation Fuels Production and Environmental Impacts

rresponding author's:
a YAŞAR
bul University-Cerrahpasa, Environmental
neering Department, 34315, Istanbul, Türkiye
gonca.yasar@ogr.iuc.edu.tr

Abstract: The contribution of fuel-related greenhouse gas emissions to global carbon emissions from the aviation sector is 2.5%. The contribution of fuel-related greenhouse gas emissions to global carbon emissions from the aviation sector is 2.5%. The major emission contribution comes from commercial flights. Efforts to reduce carbon emissions are increased. Sustainable aviation fuel (SAF) makes a significant contribution to the aviation sector's carbon emission reduction targets. Approved SAFs do not require any modifications to the aircraft, which is a significant advantage. Preferring waste as a feedstock source for SAF production ensures that the potential environmental impacts of waste are converted into valuable energy resources and reduces waste by promoting a circular economy. While the use of SAF is currently limited on commercial flights, the potential for decarbonization on extended flights is high. However, the limited availability of feedstocks must also be taken considered. Life cycle assessment is defined as a methodology for assessing the potential environmental impacts of a product's life cycle, including raw material procurement, utilization phases and waste management. Life cycle assessment of SAFs plays an important role in reducing greenhouse gas (GHG) emissions compared to fossil fuels. This review paper aims to examine that aviation carbon emissions and SAFs as a renewable energy alternative, feedstock sources, conversion pathways and life cycle assessments of sustainable aviation fuels. In addition, SAF regulations in Turkey and other policies affecting SAF production are mentioned.

Keywords: Life cycle assessment, SAF production, sustainable aviation fuel.

GİRİŞ

Ekonomik küreselleşmenin gelişmesi, bilim ve teknolojinin ilerlemesiyle birlikte hava taşımacılığı; ticari ilişkiler ve kişiler arası iletişimde giderek daha önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle jet yakıtı da benzin ve dizelin ardından en önemli ulaşım yakıtı haline gelmiştir. Hava taşımacılığına yönelik artan talep, havacılık yakıtlarına olan küresel talebin hızla büyümesine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır (Yang vd., 2022).

Geleneksel havacılık yakıtı yenilenemeyen bir enerji kaynağı olan petrolün damıtılmasıyla elde edilmektedir. Fosil yakıt rezervlerinin azalması, sanayileşme ve modernleşmeye bağlı olarak artan enerji ihtiyacı ve küresel ısınma konusunda artan farkındalıkla birlikte, petrol bazlı yakıtlara alternatiflerin aranmasına yönelik artan bir itici güç oluşturmaktadır. Motor tasarımı gibi temel konularda değişiklik yapılması önemli bir çaba ve yatırım gerektirmektedir. Bu nedenle yapılan araştırmaların odağı esas olarak fosil bazlı yakıtlar yerine ikinci ve üçüncü nesil hammaddelerle üretilmiş biyoyakıtlar gibi daha sürdürülebilir, karbon-nötr sıvı yakıtlar olmuştur. Bu yumuşak geçiş CO_2 emisyonlarının etkili bir şekilde azaltılması konusunda öncelikli tercih sebebi olabilir (Farooqui vd., 2022).

Açıklanan istatistiklere göre, havacılık sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonlarının küresel emisyonların yaklaşık %2'sini oluşturduğu tespit edilmiştir (Wang vd., 2024). Havacılık sektöründeki büyümeye bağlı olarak CO_2 üretimindeki artışın 2035 yılına kadar 1,1-1,5 milyar ton olması beklenmektedir. Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonu (ICAO), sivil havacılık sektörü için politikalar, standartlar ve uygulamalar geliştirmek üzere 191 üye devlet ve endüstri gruplarıyla birlikte çalışarak havacılık sektörü için sera gazı emisyonları konusunu ele alma rolüne öncülük eden bir Birleşmiş Milletler kuruluşudur. ICAO, 2020'den sonra uluslararası sivil havacılığın karbon-nötr büyümesini kolaylaştırmak ve karbon-nötr emisyon hedefine ulaşmak için Uluslararası Havacılık için Karbon Dengeleme ve Azaltma Programı'nı (CORSIA) uygulamaya koymuştur. CORSIA kapsamında operasyonel ve teknolojik verimliliğin arttırılması, alternatif havacılık yakıtlarının benimsenmesi gibi sera gazı azaltım stratejilerinin yanı sıra, uluslararası havacılık emisyonlarındaki artışı dengelemeye yönelik bir önlem sistemi belirlenmiştir. 2050'ye kadar planlanan net sıfır karbon hedefini karşılamak için, karbon azaltımının büyük bir kısmının biyokütle, atıklar, bitkisel yağlar vb. gibi petrol dışı kaynaklardan elde edilen düşük karbonlu alternatif jet yakıtlarının kullanımından elde edilmesi beklenmektedir (Chong vd., 2021).

Havacılık endüstrisinde temel olarak karbon sayısı 8 ile 16 arasında olan hidrokarbonların bir karışımı olmak üzere 4 farklı türde havacılık yakıtı bulunmaktadır. Bunlar kerosen (Jet A/A-1), kerosen-benzin karışımı (Jet B), havacılık benzini (avgas) ve biyoyakıttır. Jet A/A1 hafif, rafine edilmiş petrol kerosen tipi bir yakıt olmakla birlikte ticari uçuşlarda kullanılır. Jet A-1'in donma noktası -47 °C, Jet A'nın donma noktası -40°C olup Jet A genellikle Amerika Birleşik Devletleri'nde kullanılan bir yakıt türüdür. Parlama noktası 20 °C ve donma noktası -72 °C olan Jet B askeri jetlerde, avgas yüksek oktanlı yakıt gerektiren küçük özel uçaklarda kullanılır. Biyoyakıtların araştırılması ve geliştirilmesi, kerosen kullanımına alternatif olarak ortaya çıkmıştır (Farooqui vd., 2022; Raab vd., 2024). Sürdürülebilir havacılık yakıtlarının (SAF) geleneksel havacılık yakıtı (kerosen) ile benzerliği sebebiyle, uçak motorlarında veya ilgili ekipmanlarda değişiklik yapılmadan doğrudan harmanlanabilir ve birbirlerinin yerine kullanılabilirler. SAF kerosene göre önemli avantajlar sunarken, havacılık sektörüne entegrasyonu çevrenin korunması ve iklim değişikliğine ilişkin uluslararası politikalarla uyum sağlamasını gerektirmektedir.

Emniyetli, güvenli ve ekonomik hava ulaşımını sağlayabilmek amacıyla kurulan Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği'nin (IATA) SAF ile ilgili ana rolü, ilgili çalışma grupları aracılığıyla uzman girdisi sağlamanın yanı sıra politika belirlemek ve geliştirmektir. Bu doğrultuda dünyada SAF'ın gelişim sürecine dair politikalar ve IATA kapsamında atılan adımlar Tablo 1' de özetlenmiştir (Efthymiou ve Ryley, 2022; Wang vd., 2024; IATA, 2024).

Tablo 1. SAF üretimi ve kullanımının tarihçesi.
Table 1. History of saf production and usage.

YIL	POLİTİKALAR/ ÖNEMLİ KONULAR	AÇIKLAMA	ULUSLARARASI HAVA TAŞIMACILIĞI BİRLİĞİ(IATA)
1990	Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi	Uluslararası iş birliğinin yönetilmesi için gerekli ilkelerin belirlenmesi (sorumluluklar İlkesi, Yetkinlikler İlkesi, Eşitlik İlkesi, Sürdürülebilir Kalkınma İlkesi)	
	Kyoto Protokolü	Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde ICAO aracılığıyla havacılık emisyonlarınının sınırlandırması ya da azaltması	
2008			Biyojet yakıtı ile ilk test uçuşu gerçekleştirilmiştir.
2009	Havacılık ve Alternatif Yakıtlar için Küresel Çerçeve	ICAO tarafından kerosen, karışımlı jet yakıtı ve SAF arasındaki kesin ayrımlar açıklanmış ve tanımlanmıştır.	

2011-2015			22 havayolu şirketi, kullanılmış yemeklik yağ, jatrofa, ketencik ve alg gibi hammaddelerden elde edilen %50'ye varan biyojet yakıt karışımlarıyla 2.500'den fazla ticari yolcu uçuşu gerçekleştirmiştir.
2015	Paris Anlaşması	Kyoto sonrası dönemde uluslararası mekanizmalar için planlar geliştirilmektedir.Ulusal Olarak Belirlenen Katkılar (NDC) mekanizması önerilmiştir	
2016	38. Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonu (ICAO) Kongresi	Havacılık Karbon Azaltım Çerçevesi geliştirilmiştir CORSIA'nın kabul edilmesiyle SAF ile ilgili kurallar henüz yürürlükte olmamakla birlikte üye ülkelerde havacılık için alternatif yakıtlara yönelik politikaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılmasının teşvik edilmesi	Oslo Havalimanı'nda ortak hidrant sistemi aracılığıyla düzenli sürdürülebilir yakıt tedariki başlamıştır. Alternatif yakıt üreticileri sürece dahil olmuştur. Los Angeles'ta günlük uçuşlarda SAF ticari operasyonlara dahil edilmiştir
2017	39.Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonu (ICAO) Kongresi	CAO tarafından SAF ilk kez tanımlamıştır. SAF'ın uluslararası havacılık yakıt talebindeki payının 2050 yılına kadar %50'ye ulaşması öngörülmektedir	Cancun'da düzenlenen 73. IATA toplantısında üyeler SAF kullanılması kararını oybirliğiyle kabul etmiştir.
2018	Uluslararası Sivil Havacılık Sözleşmesi Ek 16, Cilt IV	SAF'ın çerçeve sürdürülebilirlik kriterlerinin geliştirilmesi	
2019			SAF kullanılan ticari uçuş sayısı 250.000
2020			İki yeni SAF sertifikasının Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu (ASTM) tarafından onaylanması ve üretimi onaylanan SAF sayısının 7'ye yükselmesi
2021	Uluslararası Havacılık için Karbon Denkleştirme ve Azaltım Programı (CORSIA) Faz 1 Pilot	CORSIA kapsamındaki havayollarının, geçmiş dönemdeki emisyon artışını dengelemek için yeterli karbon kredisi satın aldıklarını gösteren bir rapor sunmaları gerekmektedir. 2027'den itibaren SAF kullanımının zorunlu olması ve SAF harmanlama oranlarını emisyon azaltma mekanizmalarına dahil etmesi	Boston'da düzenlenen 77. IATA Genel Kurulu, küresel hava taşımacılığı sektörünün 2050 yılına kadar net sıfır karbon emisyonuna ulaşmasını öngören bir kararı onaylamıştır.
2022			41'inci ICAO Toplantısı'nda 2050 yılına kadar net sıfır CO_2 emisyonuna ulaşmak için uzun vadeli bir hedef belirlenmiştir. SAF üretimi (300 milyon L olmuştur.
2023			IATA, SAF dahil olmak üzere 2050 yılına kadar net sıfıra ulaşmak için stratejik yol haritası yayınlamıştır. AB, 'Fit for 55' mevzuatını tamamlayan ReFuelEU Aviation'ı kabul etmiştir. SAF ve kerosen harmanının 2025 yılında asgari %2'lik bir karışımla başlayıp 2050 yılında %70'e yükseltilmesi planlanmıştır. ICAO 2030'da karbon emisyonunun %5 azaltılması için SAF üretimini teşvik edecek küresel bir çerçeve üzerinde anlaşmıştır. %100 SAF kullanılarak dünyanın ilk ticari transatlantik uçuşu gerçekleştirilmiştir. SAF üretimi 600 milyon litre ve küresel jet yakıtı kullanımının %0,2'sini temsil etmektedir.
2024			2024 yılında SAF üretimi 1.250 milyar litreye ulaşarak küresel jet yakıtı kullanımının %0,3'ünü temsil etmektedir.

Türkiye'de SAF ile ilgili Düzenlemeler: Türkiye'de de havacılık kaynaklı karbon emisyonlarını azaltmaya ve sürdürülebilir havacılık yakıtı kullanımına yönelik çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM) tarafından 'SAF Talimatı' taslağı Ağustos 2024'te (SHT-SAF) yayınlanmıştır. Bu talimat kapsamında uluslararası uçuşlardan kaynaklanan emisyonların ICAO'nun 2030 yılında %5 emisyon azaltımı hedefi kapsamında gerekli SAF kullanımı ile alakalı bilgi ve belgeler SGHM resmi internet sitesinden yayımlanacaktır. SHGM tarafından bir takvim yılında kullanılacak SAF miktarını resmi internet sitesinde o takvim yılı sona ermeden açıklanacaktır. Tüm paydaşların belirtilen SAF miktarını ilgili takvim yılı içinde arz etmek ve tüketilmesini sağlamakla yükümlü olduğu belirtilmektedir (SHGM, 2024). Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından SAF hammadde kaynaklarından biri olan bitkisel ve hayvansal atık yağların yönetiminin daha etkin hale getirilmesi amacı ile Bitkisel Atık Yağların Kontrolü Yönetmeliği (BAYKY) hazırlanmıştır (T.C Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2015).

Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı Kriterleri: Yenilenebilir veya atık hammaddelerden üretilen ve CORSIA sürdürülebilirlik kriterlerini karşılayan yakıtlar SAF olarak kabul edilir. Küresel fosil jet yakıtı (petrol bazlı) üretiminin ortalama yaşam döngüsü sera gazı emisyonları; ham petrol geri kazanımı, nakliye ve rafinaj, jet yakıtı nakliyesi ve jet yakıtı yanması dahil olmak üzere kuyudan çıkarılıp uçakta kullanımına kadar (Well To Wake) olan emisyonların toplamı 89 gCO_2e/MJ olarak belirlenmiştir. Bu nedenle, yaşam döngüsü sera gazı emisyonları 89 gCO_2e/MJ'den düşük olan yakıtlar CORSIA için uygun kabul edilmiştir (Prussi vd., 2021).

SAF'ın petrol bazlı havacılık yakıtının yerine kullanılabilmesi için SAF ürünlerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu (ASTM) standartları çerçevesinde doğrulanması gerekmektedir (Wang vd., 2024). Havacılık yakıtını düzenleyen üç temel ASTM standardı D1655, D7566 ve D4054'tür. ASTM D1655, Jet A ve Jet A-1 havacılık yakıtı için minimum gerekliliklerini belirtir ve havacılık yakıtı üreticileri için kapsamlı bir kılavuz görevi görerek, geliştirilen yakıtın mevcut havacılık altyapısına sorunsuz bir şekilde entegre olmasını sağlamak için gerekli test ve analiz gereksinimlerini ana hatlarıyla belirtir. ASTM D7566 ise ASTM D1655 onaylı yakıtlarla harmanlanmadan önce kullanıma hazır sentetik yakıtlar (SAF) için özellik ve bileşim gereksinimlerini tanımlamaktadır. ASTM D4054, potansiyel bir alternatif jet yakıtını değerlendirmek için test ve özellik kriterlerini detaylandırır (Lau vd., 2024). SAF ve fosil jet yakıtının ASTM 1655 ve D7566 standartlarına

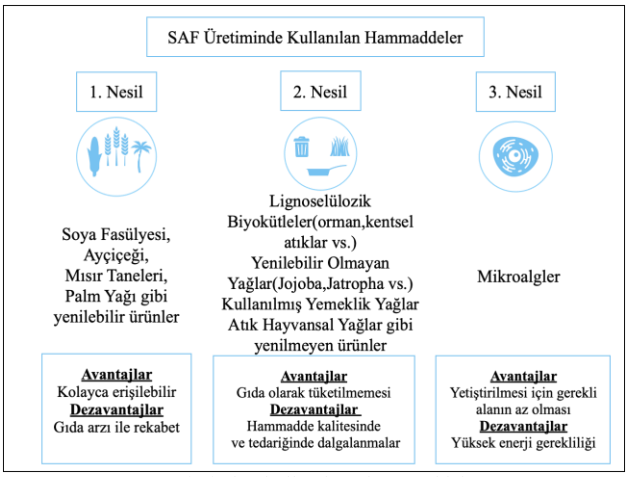
göre sağlaması gereken spesifikasyonlar Tablo 2'de verilmiştir (Wang vd., 2024).

Tablo 2. SAF ve fosil jet yakıtının ASTM D1655 ve ASTM D7566 standartlarına göre sahip olması gereken spesifikasyonlar.
Table 2. Specifications of SAF and fossil jet fuel according to ASTM D1655 and ASTM D7566 standards.

Spesifikasyon	ASTM 1655	ASTM 7566
Asidite	0.1	0.1
Aromatikler (%) Max	25	25(8) Max
S,Kütle % Max	0.3	0.3
10 % Rec Max	205(400)	205
%90 Rec	-	40
BP	300	300
Parlama Noktası °C	38	38
Yoğunluk, kg/m^3	775-840	775-840
Donma Noktası °C	-40(Jet A) -47(Jet A-1)	-40(Jet A) -47(Jet A-1)
Viskozite -20 °C	8 Max	8 Max
Spesifik Enerji MJ/kg min	42.8	42.8
Dumanlanma Noktası (min)	25	25
Dumanlanma Noktası (max)	19.3	18.3
Naftalinler %	3	3
İletkenlik pS/m	50-450	-

SAF Türleri ve Hammadde Kaynakları: SAF üretim sürecinde amaç, kerosen bazlı havacılık yakıtının ana bileşeni olan sentetik parafinik (petrolden elde edilen mineral yağ) kerosen (SPK) elde etmektir. SPK'dan üretilen yakıtın aromatikler ve halkalı zincirli alkanlardan yoksun olması sebebiyle geleneksel kerosen bazlı havacılık yakıtı ile harmanlanması gerekmektedir. Buna rağmen, SAF karbon emisyonlarının azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunur ve yaşam döngüsü sera gazı emisyonları geleneksel havacılık yakıtı emisyonlarına göre daha düşüktür (Wang vd., 2024).

Hammadde seçimi kökenine ve özelliklerine bağlı olarak SAF kategorisinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Potansiyel hammaddenin sahip olması gereken bazı temel özellikler; hammaddenin bulunabilirliği, gıda üretimini etkilememesi, uygun maliyet ve düşük çevresel ayak izidir. SAF üretiminde kullanılan hammadde kaynakları birinci, ikinci ve üçüncü nesil olmak üzere 3 gruba ayrılmaktadır. Hammadde kaynaklarının türleri, avantajları ve dezavantajları Şekil 1'de gösterilmiştir (Lau vd., 2024).



Şekil 1. SAF üretiminde kullanılan hammaddeler, avantajlar ve dezavantajlar.
Figure 1. Advantages and disadvantages of feedstocks for SAF production pathways.

Birinci nesil hammadde kaynakları tarım arazilerinin kullanımı sebebiyle yenilebilir gıda ürünlerinin maliyetini arttırabilir, dünyanın yakıt ihtiyacını karşılamak üzere bu hammaddelerin yetiştirilmesi ekolojik dengenin bozulmasına ve ormansızlaşmaya yol açabilir (Şekil 1). İkinci nesil hammaddeler gıda tedarik zincirini doğrudan etkilemeyeceğinden, biyoyakıt dönüşümü için daha iyi seçeneklerdir. Hammaddelerin yakıt üretimine hazır hale getirilmesi sürecindeki stabilizasyon aşamaları ve temini konusundaki sürekliliğin sağlanması ikinci nesil hammaddeler için dezavantaj oluşturabilecek durumlardır. Mikroalgler, büyük ölçekli üretim için iyi bir lipid kaynağıdır, hızlı üremeleri nedeniyle yetiştirilmeleri çok kolaydır. Ancak yüksek sermaye maliyetleri nedeniyle bu konudaki araştırmalar nispeten daha azdır (Monika vd., 2023; Michaga vd., 2021; Yousefzadeh vd., 2024).

ASTM tarafından onaylanmış SAF türleri şunlardır; *Fisher Tropsch Sentetik Parafinik Kerosen (FT-SPK), Hidroişlenmiş(Hydroprocessed) Esterler ve Yağ Asitleri Sentetik Parafinik Kerosen (HEFA-SPK), Hidroişlenmiş Fermente Şekerler Sentezlenmiş İzo parafinler (HFS-SIP), Aromatikli Fischer-Tropsch Sentetik Parafinik Kerosen (FT-SPK/A), Alkolden Jete Sentetik Parafinik Kerosen (ATJ-SPK), Katalitik Hidrotermoliz Sentezlenmiş Kerosen (CHJ/ CH-SK), Hidroişlenmiş Hidrokarbonlar, Esterler ve Yağ Asitleri Sentetik Parafinik Kerosen (HC-HEFA-SPK), Aromatiklerle Alkolden Jete Sentetik Kerosen (ATJ-SKA). FT-SPK,* ASTM tarafından onaylanan en eski SAF dönüşüm yoludur. Süreç, sentetik gaz üretimi, sentetik ham petrol üretimi ve nihai ürünü üretmeden önce sentetik ham petrolün ayrıştırılması, yükseltilmesi ve rafine edilmesini içeren 3 ana aşamadan oluşmaktadır. *HEFA-SPK,* biyokütleden yağın çıkarılması ve doymamış lipid trigliseritlerin hidrojenlenmesiyle üretilir. *HFS-SIP,* hidroişleme ve fraksiyonlama işlemlerinin bir kombinasyonu yoluyla fermente edilebilir şekerlerden elde edilen farnesenin (birbirine yakın 6 kimyasal bileşik) işlenmesiyle üretilir. *FTSPK/A, FT-SPK* sentezinden türetilmiştir. Temel fark *FT-SPK/A'da* aromatiklerin bulunmasıdır. *ATJ-SPK,* yenilenebilir kaynaklardan alkol üretilmesi, kısa zincirli alkollerin (C1-C4) daha uzun hidrokarbonlara (C8-C16) dönüştürülmesiyle üretilir. *CHJ/ CH-SK* üretimi, katalizör eşliğinde yüksek sıcaklık ve basınçta (240–450 ◦C ve 1.5–25 MPa) yürütülen bir süreçtir. *HC-HEFA-SPK* yönteminde hammadde olarak algler (Botryococcus braunii) kullanılır. *HEFA-SPK'dan* tek farkı hammadde kaynağıdır. *HC-HEFA-SPK* yeni onaylanmış bir SAF'tır. *ATJ-SKA' nın ATJ-SPK* prosesinden farkı aromatiklerin bulunmasıdır (Lau vd., 2024; Wang vd., 2024; Bardon vd., 2025; Watson vd.,2024).

SAF üretim yollarının uygunluğu Teknoloji Hazırlık Seviyesi (TRL) ve Yakıt Hazırlık Seviyesi (FRL) ile ölçeklendirilmektedir. FRL TRL'den daha geniş bir perspektifle türetilmiştir: yakıt sadece kimyasal olarak işlevsel olmakla kalmamalı, aynı zamanda teknolojik bağlamda da (yani uçak ve yakıt ikmal altyapıları) kullanımı mümkün olmalıdır. Seviye 4 prototip yani laboratuvarda doğrulanmış teknoloji, 5-6 doğrulanmış teknoloji, 7 ticari sunum öncesi ve 8 ticari ürün yani tamamlanmış ve nitelikli anlamına gelmektedir (Bardon vd., 2025). HEFA en olgun SAF türü (Tablo 3) olmakla birlikte ve şu anda ticari olarak kullanılmaktadır. Halihazırda güvenli ve ölçeklenebilir bir teknoloji olduğu için tercih edilmektedir. Yaklaşık %80 civarında sera gazı azaltım potansiyeli mevcuttur (Mannion vd., 2024). SAF dönüşüm proseslerinin özellikleri ASTM onaylı ve henüz ASTM onayı almamış potansiyel teknolojiler Tablo 3'te verilmiştir (Cabrera vd., 2022; Lau vd., 2024; Xu vd., 2025).

Tablo 3. ASTM Onaylı ve Potansiyel SAF Türleri.
Table 3. ASTM-approved and potential SAF types.

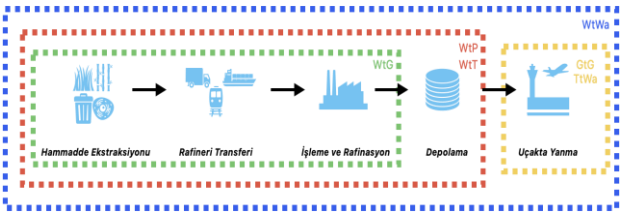
Hammadde	Proses	Ara Ürün	Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı (SAF) Dönüşüm Prosesi	Max Karışım Oranı (%v/v)	Onaylanma Yılı	Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu (ASTM) 7566	Teknoloji Hazırlık Seviyesi (TRL)	Yakıt Hazırlık Seviyesi (FRL)
Tarım ve Ormancılık Kalıntılar. Yağ içeren bitkiler. Kentsel katı atıklar	Gazlaştırma	Sentez Gazı	FT-SPK Fisher Tropsch Sentetik Parafinik Kerosen	50	2009	Ek 1	6-8	6-7
Yağ içeren bitkiler Kullanılmış yemeklik yağ Hayvansal yağ	Nötralizasyon	Hidrokarbonlar ve Lipitler	HEFA-SPK Hidroproseslenmiş Esterler ve Yağ Asitleri Sentetik Parafinik Kerosen	50	2011	Ek 2	9	99
Şeker kamışı ve selüloz bazlı şekerler	Ekstraksiyon	Şeker	HFS-SIP Hidroproseslenmiş Fermente Şekerler Sentezlenmiş İzo parafinler	10	2014	Ek 3	7-8	5-7
Ek1'e Aromatik Bileşikler Eklenir	Gazlaştırma	Sentez Gazı	FT-SPK/A Aromatikli Fischer Tropsch Sentetik Parafinik Kerosen	50	2015	Ek 4	6-8	6-7
Şekerler nişasta ve selüloz	Fermantasyon	Etanol ve İzobütanol	ATJ-SPK Alkolden Jete Sentetik Parafinik Kerosen	50	2016-İzobütanol 2018-Etanol	Ek 5	7-8	77
Trigliserit Bazlı Hammaddeler	Katalitik Hidrotermoliz	Bioyağ	CHJ/ CH-SK Katalitik Hidrotermoliz Sentezlenmiş Kerosen	50	2020	Ek 6	4-6	66
Alg (Botryococcus braunii)	Ekstraksiyon	Bio türevli lipitler ve hidrokarbonlar	HC-HEFA-SPK Hidroproseslenmiş Hidrokarbonlar, Esterler ve Yağ Asitleri Sentetik Parafinik Kerosen	50	2020	Ek 7		66
Ek 5'e Aromatik Bileşikler Eklenir			ATJ-SKA Aromatikli Alkolden Jete Sentetik Kerosen	50	2023	Ek 8		
SAF Üretimi için Henüz Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu (ASTM) Onayı Almamış Potansiyel Teknolojiler								
Islak Alg			HtL. Hidrotermal Sıvılaştırma (Sıvı Jet Yakıtı)					
Şeker			APR. Sulu Faz Reformu (Sıvı Jet Yakıtı)					
Lignin			Piroliz Hidroproseslenmiş depolimerize selülozik jet(Sıvı Jet Yakıtı)					
Karbondan Zengin Hammdde			Fotofermantasyon (Hidrojen)					

SAF üretimi için henüz ASTM onayı almamış potansiyel teknolojiler ve hammaddeler mevcuttur. Potansiyel teknolojiler için kullanılan hammaddeler ıslak alg, biyo-bazlı polisiklik alkan(şeker), karbon açısından zengin atık gaz ve lignindir. Hidrojenden SAF üretilebilirliği de araştırılmıştır. Lignoselülozik hammaddeler ve ıslak alglerden üretilen jet yakıtı hidrotermal sıvılaştırma (HtL) üretim veriminin düşük olmasıyla birlikte verimliliği ve ürün kalitesini artırmak için yüksek performanslı katalizörler araştırılmaktadır. Ayrıca bu yöntemde kullanılan hammaddenin ön işlem prosesinde de (karıştırma, taşıma vb.) teknik sorunlarla karşılaşılmaktadır. Şekerden jet yakıtı sulu faz reformu (APR), lignoselülozik biyokütlede bulunan selüloz bileşenlerinin asit hidrolizi yoluyla parçalanmasıyla üretilir.

Lignoselülozdan jet yakıtı piroliz yöntemi biyo-yağ ekstraksiyonu, dekarboksilasyon ve sikloalkanın jet yakıtı üretmek için uygun hidrokarbonlara yükseltilmesi olmak üzere 3 adımdan oluşmaktadır. Karbonhidrattan hidrojene fotofermentasyon yöntemiyle üretilen hidrojenin hava taşıtlarında yakıt olarak kullanılması yeni bir yakıt dağıtım sisteminin geliştirilmesini ve uçak motorlarının ya da uçağı yeniden tasarlanmasını gerektirmektedir. Bu önemli değişiklikler göz önüne alındığında, mevcut altyapı ve teknoloji ile uyumlulukları nedeniyle şu anda geleneksel jet yakıtının yerine kullanılacak yakıtlar tercih edilmektedir (Lau vd., 2024; Bardon vd.,2025).

Sıvılaştırılmış doğal gazın (LNG) bir havacılık yakıtı olarak kullanılması 1970'lerde NASA tarafından araştırılmıştır. NASA ve Boeing tarafından yürütülen daha yakın tarihli bir program, 2040'larda pazara girebilecek farklı LNG yakıtlı uçak konseptlerini değerlendirmiştir. LNG'nin ana bileşeni olan LCH4, LNG'nin zaten küresel olarak mevcut bir seçenek olması avantajına sahiptir. Ayrıca, biyokütle ve elektrikten metan sentezi, SAF sentezinden daha az karmaşıktır. Hidrojen gibi metanın da sıvılaştırılması havaalanı altyapısında değişiklik yapılmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, gerekli büyük yatırımlar göz önüne alındığında yakıt çeşitliliğinde bir değişiklik olmaması şaşırtıcı değildir. Çünkü ticari havacılık sektöründe şu ana kadar herhangi bir değişiklik talebi olmamıştır. Ekonomik veya diğer teşviklerin yeterince yüksek olması halinde bu durum gelecekte değişebilir (Raab vd., 2024).

SAF Üretim Prosesinde Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Yaklaşımları: CORSIA kapsamında, SAF kullanımından kaynaklanan emisyon azaltımları, 2018 yılında ICAO'da kabul edilen yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) yaklaşımı kullanılarak hesaplanmaktadır. YDD yöntemi, havacılık yakıtlarının yaşam döngüsü sera gazı emisyonlarının hesaplanması için uluslararası düzeyde benimsenen ilk yaklaşım haline gelmiştir (Prussi vd., 2021). Tam bir YDD yaklaşımı normalde tüm ürün tedarik zincirinin çerçevelenmesini gerektirir ve beşikten mezara kadar yapılmalıdır, ancak yakıt bazlı ürünlerin değerlendirilmesi söz konusu olduğunda en genel anlamda Well-to-Wake (WtWa) yaklaşımı olarak adlandırılır ve farklı hammaddeler ve proses yolları arasında, seçilen teknolojilerin tüm sera gazı (GHG) emisyonlarını, ekstraksiyondan üretime ve nihai yanmaya kadar toplam ömürleri içeren tutarlı bir sürdürülebilir havacılık yakıtı karşılaştırması sağlayabilir. YDD, havacılık yakıtlarına uygulandığında dört tipik sistem sınırı ile değerlendirme yapılabilir (Şekil 2): mavi renkle gösterilen Well to Wake (WtWa), yeşil renkle gösterilen Well to Gate (WtG), kırmızı renkle gösterilen Well to Pump (WtP) ya da Well to Tank (WtT) sarı renkle gösterilen ise Gate to Gate (GtG) dir (Kolosz vd., 2020).



Şekil 2. Genel bir havacılık yakıtının YDD sistem sınırları.
Figure 2. System boundaries for LCA of an aviation fuel.

Hammaddelerin değişkenliği ve diğer faktörler nedeniyle, ASTM sertifikasyonu tarafından onaylanmış SAF üretimi için en iyi evrensel yol belirlenememiş olup tüm üretim yollarının kendi içinde güçlü ve zayıf yönleri vardır (Lau vd., 2024). Biyokütle bazlı jet yakıtının farklı proseslerinin çevre ve kaynaklar üzerindeki etkisini karşılaştırmak amacıyla yapılan YDD çalışmaları temel olarak biyokütle bazlı sıvı yakıtın sera etkisini azaltma katkısına odaklanmıştır (Li vd., 2019). Yapılan bazı çalışmalar hammadde kaynakları ve dönüşüm yöntemleriyle birlikte Tablo 4'te verilmiştir (Watson vd., 2024; Seber vd., 2014; Sieverding vd., 2016; Han vd., 2013; Wang vd., 2023; Budsberg vd., 2016; Sun vd., 2023; Castillo Landero vd., 2023; Lokesh vd., 2015; Mousavi-Avval & Shah, 2021; Handler vd., 2012; Ringsred vd., 2021).

Tablo 4. SAF'la ilgili yapılan YDD Çalışmaları
Table 4. Life cycle assessment of SAF

Referans	Yakıt Türü	Hammadde Türü	Envanter Analiz Metodu	Fonksiyonel Birim	Sistem Sınırı	Sera Gazı Emisyonu
Seber vd., 2014	HEFA	Don Yağı Kullanılmış Yemeklik Yağ	GREET-2011 Framework SimaPro 7.3.3	MJ Yakıt	Well to Wake	K. Yemeklik Yağ: 16.8-21.4 g CO_2 eq/MJ Don Yağı: 25.7-83.9 g CO_2 eq/MJ
Sieverding vd., 2016	HEFA	Camelina, Carinata, Kanola, Ayçiçeği	GREET 2014- vl.2.0.11219	Emisyonlar için kg kirlilik/kg ürün	Well to Tank (Pump)	Kanola en yüksek Ketencik en düşük 2,17 kg/kg
Han vd., 2013	HEFA -ATJ	Yağlı Tohumlar Mısır Sapı	GREET	MJ Yakıt	Well to Wake	Fosil Yakıta göre Sera Gazı Azaltımı HEFA %41-63 ATJ %89
Wang vd., 2023	ATJ	Mısır Koçanı	GREET 2020 Tsinghua -CA3EM ASPEN Plus V11		Well to Wake	31.66 g CO_2 eq/MJ
Budsberg vd., 2016	HFS-SIP	Kavak	GREET- vl.2.0.11425		Well to Wake	60-73 g CO_2 eq/MJ
Sun vd., 2021	ATJ	Mısır Sapı	CML2001-Gabi 9	GJ Yakıt	Cradle to Grave	Piroliz 64,8 kg CO_2eq/GJ Fermantasyon 18,4 kg CO_2eq/GJ Gazlaştırma 19,9 kg CO_2eq/GJ
Castillo Landero vd., 2023	HEFA	Palmiye Yağı	Open LCA- CML-IA -Ecoinvent 3.8	GJ Enerji	Gate to Gate/Cradle to Gate	12.2-12,8 kg CO_2eq/GJ
Lokesh vd., 2015	HEFA	Ketencik, Mikroalg, Jatrofa	ALCEmB	MJ Yakıt	Cradle to Grave	Ketencik %70, Mikroalg %58 Jatrofa %64 oranında emisyon azaltımı
Mousavi-Avval & Shah, 2021	HEFA	Akça Çiçeği	Open LCA- TRACI -Ecoinvent 3.2	GJ Yakıt	Well to Gate	35-49 kg CO_2eq/GJ
Handler vd., 2012		Mikroalg	SimoPro 7.2-IPCC GWP 100	1 kg kuru alg		0.1–4.4 kg CO_2eq/kg hammadde
Ringsred vd., 2021		Orman Atıkları	GHGenius model 4.03	MJ Yakıt	Well to Wake	25.7-28.3 gCO_2e/MJ

Sun vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada mısır sapının biyoyakıta dönüştürülmesinde çevresel performanslarını karşılaştırmak için fermantasyon, piroliz ve gazlaştırma sistemleri üzerinde kapsamlı bir YDD yapılmıştır. Asitleşme potansiyeli, en çok dikkat çeken etki kategorisidir. Biyoyakıt üretimi ve tarım, çevreyi esas olarak etkileyen süreçler olarak belirlenmiştir. Castillo-Landero vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada, palm

yağı biyoyakıt üretim sürecini iyileştirmek için süreç yoğunlaştırma ve ısı entegrasyonu uygulanmış ve tekno-ekonomik analiz ve YDD yapılmıştır. Lokesh vd. (2015) tarafından yürütülen çalışmada, ketencik, mikroalg ve jatrofa hammaddelerinden üretilen sentetik parafinik kerosenler referans yakıt olan Jet-A1'e göre %70, %58 ve %64 oranında emisyon tasarrufu sağladığını ortaya koymuştur. Mousavi-Avval ve Shah (2021) tarafından yapılan çalışmada akça çiçeği hidroişlenmiş yenilenebilir jet yakıtı (HRJ) üretiminin enerji ihtiyacı ve çevresel etkileri değerlendirilmiştir. Akça çiçeği bazlı HRJ üretiminin enerji kullanım verimliliği, kanola gibi diğer yağlı tohumlardan elde edilen HRJ'den daha yüksek olarak tahmin edilmiştir. Akça çiçeği bazlı HRJ'nin küresel ısınma potansiyeli benzer yağlı tohumlardan elde edilen HRJ'den ve fosil jet yakıtından daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Wang vd. (2023) tarafından çalışmada Çin'deki etanolden elde edilen yakıtın enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarını(GHG) değerlendirmek için YDD yapılmıştır. Temiz elektrik ve ısı üretiminin enerji yoğun sistemin GHG emisyonlarını etkili bir şekilde azaltabileceği ve en yüksek azaltımın %21,55 olduğu ortaya konulmuştur. Budsberg vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada kavak biyokütlesinden üretilen biyojet yakıtların, kerosene kıyasla küresel ısınma potansiyelini ve fosil yakıt kullanımını azalttığı tespit edilmiştir. Hidrojen üretimi önemli bir GHG emisyonu ve fosil yakıt kullanımı kaynağı olarak tanımlanmıştır. Her etki kategorisi için daha düşük değerler, fazla ısı/buhar taleplerini karşılamak için doğal gaz yerine orman atığı (hog fuel) kullanılmasıyla sağlanmaktadır. Seber vd. (2014) yaptığı YDD çalışmasında, don yağından elde edilen HEFA ve dizel yakıtlar ile kullanılmış yemeklik yağdan elde edilen sarı gresin GHG emisyonları ve üretim maliyetleri hesaplanmış, geleneksel üretime kıyasla sırasıyla %76-81 ve %81-86 oranında sera gazı emisyonu azaltımı sağladığı belirlenmiştir.

SONUÇ

SAF ile ilgili yapılan YYD çalışmalarında; hammadde, üretim yöntemi, sistem sınırı gibi tercih edilen bir çok faktörün SAF türlerinin çevresel etki potansiyellerini etkilediği ve kerosene kıyasla GHG emisyonu azaltım potansiyellerinin yüksek olduğu görülmektedir. Fakat büyük ölçekli SAF üretimi, yaygın olarak tercih edilebilmesi için göz önünde bulundurulması gereken çeşitli zorluklarla karşı karşıyadır. Temel zorluk, SAF üretimi için yeterli ve sürdürülebilir hammadde tedarikinin sağlanmasıdır. Yaygın hammaddeler arasında atık yağlar, tarımsal kalıntılar ve gıda dışı enerji bitkileri yer almaktadır. SAF talebini karşılamak için üretimin ölçeklendirilmesi, gıda üretimiyle rekabet etmeden veya orman kaybına neden olmadan sürdürülebilir ve bol miktarda hammadde kaynağı bulmayı gerektirir. Şu anda, SAF üretim maliyeti geleneksel jet yakıtından daha yüksektir. Bu maliyet eşitsizliği SAF'ın havayolu şirketleri tarafından büyük ölçekte kullanılmasını zorlaştırmaktadır. SAF'ın geliştirilmesi ve kullanımının sağlanması için kalıcı ve güvenilir politikalar oluşturulması, SAF için istikrarlı bir pazar oluşturmak açısından çok önemlidir.

ICAO tarafından belirlenen SAF politikasında ilk aşamada, teknolojik hazırlığın geliştirilmesi için mali destek sağlayarak yatırım risklerini azaltmak ve paydaş katılımını arttırmaya yönelik teşviklerle SAF üretimini arttırmayı amaçlamaktadır. İkinci aşamada, SAF talebinin oluşturulması için ülkelerin kullanılma yönelik zorunluluklar oluşturması önemli bir rol oynamaktadır. SAF'a artan ilgi, bu konuda yapılan yatırımları ve teşvikleri arttırmıştır. Yetkili kurumlar, SAF üreticileri ve havayolu şirketleri arasında; izlenecek pazar politikaları ve finansal destek konularında yapılan anlaşmalarla sürdürülebilir SAF temini sağlanır. Önerilen bu çözümler ve yaklaşımlar bir araya getirilerek, büyük ölçekli SAF üretimiyle ilgili zorlukların üstesinden gelinebilir ve daha sürdürülebilir bir havacılık endüstrisine geçiş hızlandırılabilir.

KAYNAKLAR

Bardon, P. & Massol, O. (2025). Decarbonizing aviation with sustainable aviation fuels: Myths and realities of the roadmaps to net zero by 2050. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, ***211***, 115279. DOI:10.1016/j.rser.2024.115279

Budsberg, E., Crawford, J.T., Morgan, H., Chin, W.S., Bura, R. & Gustafson., R. (2016). Hydrocarbon bio-jet fuel from bioconversion of poplar biomass: life cycle assessment. *Biotechnology for Biofuels*, 9, 170. DOI: 10.1186/s13068-016-0582-2

Cabrera, E. & Melo De Sousa, J.M. (2022). Use of sustainable fuels in aviation-a review. *Energies*, ***15***, 2440. DOI: 10.3390/en15072440

Castillo-Landero, A., Dominguillo-Ramírez, D., Aburto, J., Sadhukhan, J. & Martinez Hernandez, E. (2023). Improving the economic, environmental, and safety performance of bio-jet fuel production through process intensification and integration using a modularity approach. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. ***11***(2), 660-669. DOI: 10.1021/acssuschemeng.2c05491

Chong, C.T. & Ng, J. (2021). Chapter 6-sustainability of aviation biofuels, biojet fuel in aviation applications production. *Usage & Impact of Biofuels*, 287-335. DOI: 10.1016/B978-0-12-822854-8.00005-6

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2015). *Bitkisel atık yağların kontrolü*

yönetmeliği. https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/editordosya/bitkiselatikyonetmeligi.pdf (Ziyaret tarihi: 1 Kasım 2024)

Efthymiou, M. & Ryley, T. (2022). Chapter 8- governance and policy developments for sustainable aviation fuels. *Sustainable Alternatives for Aviation Fuels*, 201-214. DOI: 10.1016/B978-0-323-85715-4.00010-0

Farooqui, S.A., Sinha, A.K. & Ray, A. (2022). Chapter 13- progress and trends in renewable jet fuels. *Advanced Biofuel Technologies*, 333-364. DOI: 10.1016/B978-0-323-88427-3.00011-8

Han, J., Elgowainy, A., Cai, H. & Wang, M.Q. (2013). Life-cycle analysis of bio-based aviation fuels. *Bioresource Technology*, ***150***, 447-456. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.07.153

Handler, R., M., Canter, C., E., Kalnes, T., N., Lupton, F., S., Kholiqov, O., Shonnard., D. R. & Blowers, P. (2012). Evaluation of environmental impacts from microalgae cultivation in open-air raceway ponds: analysis of the prior literature and investigation of wide variance in predicted impacts. *Algal Research*, ***1***, 83-92. DOI: 10.1016/j.algal.2012.02.003

IATA, (2024). International Air Transport Association. *Fly net zero CO_2 emissions by 2050*. https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet-sustainable-aviation-fuels/ (Ziyaret Tarihi: 1 Kasım 2024)

Kolosz, B. W., Luo, Y., Xu, B., Maroto-Valer, M. M. & Andresen, J. M. (2020). Life cycle environmental analysis of 'drop in' alternative aviation fuels: a review. *Sustainable Energy Fuels*, ***4***, 3229. DOI: 10.1039/C9SE00788A

Lau, J. I.C., Wang, Y.S., Ang, T., Seo, J.C.F., Khadaroo, S.N.B.A., Chew, J.J., Lup, A.N.K. & Sunarso, J. (2024). Emerging technologies, policies and challenges toward implementing sustainable aviation fuel (SAF). *Biomass & Bioenergy*, ***186***, 107277. DOI: 10.1016/j.biombioe.2024.107277

Li, M., Zhao, W., Xu, Y., Zhao, Y., Yang, K. & Tao, W. (2019). Comprehensive life cycle evaluation of jet fuel from biomass gasification and fischer-tropsch synthesis based on environmental and economic performances. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, ***58***(41), 19179-19188. DOI: 10.1021/acs.iecr.9b03468

Lokesh, K., Sethi, V., Nikolaidis, T., Goodger, E. & Nalianda, D. (2015). Life cycle greenhouse gas analysis of biojet fuels with a technical investigation into their impact onjet engine performance. *Biomass & Bioenergy*, ***77***, 26-44. DOI: 10.1016/j.biombioe.2015.03.005

Mannion, L.A., Bell, A., Murphy, T., Kelly, M., Ghaani, M.R. & Dooley, S. (2024). A physics constrained methodology for the life cycle assessment of sustainable aviation fuel production. *Biomass & Bioenergy*, ***185***, 107169. DOI: 10.1016/j.biombioe.2024.107169

Michaga, M.F.R., Michailos, S., Hughes, K.J., Ingham, D. & Pourkashanian, M. (2021). 10-Techno-economic and life cycle assessment review of sustainable aviation fuel produced via biomass gasification. *Sustainable Biofuels*, 269-303. DOI: 10.1016/B978-0-12-820297-5.00012-8

Monika, Banga, S. & Pathak, V.V. (2023). Biodiesel production from waste cooking oil:a comprehensive review on the application of heterogenous catalysts. *Energy Nexus*, ***10***, 100209. DOI: 10.1016/j.nexus.2023.100209

Mousavi-Avval, S.H. & Shah, A. (2021). Life cycle energy and environmental impacts of hydroprocessed renewable jet fuel production from pennycress. *Applied Energy*, ***297***, 117098. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117098

Prussi, M., Lee U., Wang, M., Malina, R., Valin, H., Taheripour, F., Velarde, C., Staples, M., D., Lonza, L. & Hileman, J. I. (2021). Corsıa: the first internationally adopted approach to calculate life-cycle ghg emissions for aviation fuels. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, ***150***, 111398. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111398

Raab, M., Dietrich, R., Philippi, P., Gibbs, J., Oesingmann, K., Grimme, W. & Scheelhaase, J. (2024). Aviation fuels of the future − a techno-economic assessment of distribution, fueling and utilizing electricity-based LH2, LCH4 and kerosene (saf). *Energy Conversion & Management: X*, ***23***, 100611. DOI: 10.1016/j.ecmx.2024.100611

Ringsred, A., Dyk, S. & Saddler, J. (2021). Life-cycle analysis of drop-in biojet fuel produced from British Columbia forest residues and wood pellets via fast-pyrolysis. *Applied Energy*, ***287***, 116587. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116587

Seber, G., Malina, R., Pearlson, M.N., Olcay, H., Hileman, J.I. & Barret, S.R.H. (2014). Environmental and economic assessment of producing hydroprocessed jet and diesel fuel from waste oils and tallow. *Biomass & Bioenergy*, ***67***, 108-118. DOI: 10.1016/j.biombioe.2014.04.024

Sieverding, L.H., Zhao, X., Wei, L. & Stone, J.J. (2016). Life-cycle assessment of oilseeds for biojet

production using localized cold-press extraction. *Journal of Environmental Quality*, ***45***, 967-976. DOI: 10.2134/jeq2015.06.0313

SHGM. (2024). Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü. *Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı Talimatı (SHT-SAF) Taslağı*. https://web.shgm.gov.tr/documents/sivilhavacilik/files/mevzuat/sektorel/taslaklar/2024/SHT-SAF.pdf (Erişim tarihi: 1 Kasım 2024)

Sun, H., Luo, Z., Li, S., Xue, S., Zhou, Q. & Wei, T. (2021). Comparative life cycle assessment (lca) of biofuel production via corn stover: fermentation to ethanol, pyrolysis to bio-oil, and gasification to jet fuel. *Biomass Conversion & Biorefinery*, ***13***, 12809-12821. DOI: 10.1007/s13399-021-02054-z

Wang, B., Zhao, J.T. & Zhao, M. (2024). Sustainable aviation fuels: Key opportunities and challenges in lowering carbon emissions for aviation industry. *Carbon Capture Science & Technology*, ***13***, 100263. DOI: 10.1016/j.ccst.2024.100263

Wang, X., Guo, L., Lv, J., Li, M., Huang, S., Wang, Y. & Ma, X. (2023). Process design, modeling and life cycle analysis of energy consumption and ghg emission for jet fuel production from bioethanol in China. *Journal of Cleaner Production*, ***389***, 136027. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136027

Watson, M.J., Machado, P.G., Da Silva, A.V., Saltar, Y., Riberio, C.O., Nascimento, C.A.O. & Dowling, A.W. (2024). Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and markets: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, ***449***, 141472. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.141472

Xu, Y., Zhang, Y., Deng, X., Lee, S., Wang, K. & Li, L. (2025). Bibliometric analysis and literature review on sustainable aviation fuel (SAF): Economic and management perspective. *Transport Policy*, ***162***, 296-312. DOI: 10.1016/j.tranpol.2024.11.014

Yang, Q. & Chen, F. (2022). Chapter 9-life cycle assessment of biojet fuels. *Sustainable Alternatives for Aviation Fuels*, 215-236. DOI: 10.1016/B978-0-323-85715-4.00004-5

Yousefzadeh, H., Borhan, E., Haznedaroglu, B., Z., Uzun, A. & Erkey, C. (2024). Hydrothermal liquefaction of *Chlamydomonas nivalis* and *Nannochloropsis gaditana* microalgae under different operating conditions over copper-exchanged zeolites. *Biochemical Engineering Journal*, ***205***, 109237. DOI: 10.1016/j.bej.2024