

OPTİMAL KONTROL TEKNİKLERİ İLE RÜZGAR ETKİSİ ALTINDA UÇAK ROTA OPTİMİZASYONU

Fulin Sezenoğlu¹, Barış Başpınar² ve İbrahim Özkol³
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

ÖZET

Bu çalışmada, optimal kontrol teknikleri kullanılarak rüzgar etkisi altında uçak rota optimizasyon problemi ele alınmıştır. Rüzgar hesaba katılarak optimize edilmiş uçuş rotaları, yakıt tüketimini dolayısıyla karbondioksit salınımını azaltmak adına önemli bir tedbirdir. Bununla beraber son yıllarda yapılan çalışmalar havacılığın çevre üzerindeki olumsuz etkilerinin karbondioksit yanı sıra atmosfere salınan karbondioksit tabanlı olmayan diğer sera gazlarından da kaynaklandığını ortaya koymuştur. Bu sebeple çalışma kapsamında sadece yakıt tüketimi veya uçuş zamanının merkeze konularak rotaların belirlenmesi yerine çevresel etkilere odaklanılarak optimizasyon tabanlı bir rota planlamasına gidilmesi amaçlanmıştır. Seyir fazına odaklanılarak rüzgar ve atmosferik faktörlerin de değerlendirildiği rota planlama problemi doğrusal olmayan bir optimizasyon problemine dönüştürülerek çözülmüştür. Rota planlama hesaplamaları; rüzgar tahminleri, operasyonel kısıtlar, yakıt tüketimi, uçak performansı, ve atmosfer koşulları gibi unsurları değerlendirerek çözümlenmiştir. Sıcaklık, basınç, hava yoğunluğu gibi temel unsurlar standart atmosfer yaklaşımından hareketle modele dahil edilmiştir. Çalışmada gerçek rüzgar verisinden elde edilen tahmin verileri kullanılmıştır. Uçak performans modeli BADA (Base of Aircraft Data) veri tabanı ile uyumlu şekilde oluşturulmuştur. Bu sayede oluşturulan model sivil havacılıktaki 400'den fazla uçak tipi ile kullanılabilir. Geliştirilen algoritma B737-800 uçağının performans verileriyle belirlenen bir rüzgar alanında eniyelenmiş rotanın üretilmesi için kullanılmıştır. Bir vaka incelemesi olarak gerçek hava trafik verileri kullanılarak İstanbul-Ankara seferlerinde önerilen algoritmanın kullanılmasıyla karbondioksit emisyonlarının çevre üzerindeki etkisinin ne kadar azaltılabileceğinin analizi sunulmuştur.

GİRİŞ

Günümüzde, havacılık sektörü dünyada en hızlı büyüyen sektörlerden biri haline gelmiştir. Havacılık sektörüne olan bu talep artışının uzun vadede hava trafik yoğunluğunu da hızla arttırması öngörülmektedir. Bu nedenle, su buharı, karbondioksit, azot oksit, ve sera gazları gibi uçakların atmosfere salınımlarının azaltılmasına yönelik araştırmalar oldukça önem kazanmıştır. Yapılan çalışmalarda, dünya atmosfer sisteminin radyasyon dengesinin ve bunun sonucunda oluşan sıcaklık değişiminin, atmosferdeki sera gazlarının konsantrasyonunu değiştirebilecek ve yoğunlaşma izlerinin ve sirüs bulutlarının ortaya çıkmasına neden olabilecek gazların ve parçacıkların emisyonu yoluyla, hava trafik yoğunluğunun artmasıyla, etkilendiği yer almaktadır [Koch, 2013]. Buna ek olarak, karbondioksitin temel etkisi neredeyse emisyonun konumundan bağımsız iken, azot oksit ve su buharının etkileri coğrafi konum ve emisyon yüksekliği ile değişen atmosferik koşullara bağlıdır [Koch, 2013]. Bunun yanında özellikle yeni nesil yolcu uçaklarına bakarsak eskilere göre daha fazla azot oksit salınım oranlarına sahip olduğunu görebiliriz. Bu

¹ Araştırma görevlisi, Uçak Müh. Böl., E-posta: sezenoglu19@itu.edu.tr

² Dr. Öğr. Üyesi, Uçak Müh. Böl., E-posta: baspinarb@itu.edu.tr

³ Prof. Dr, Uçak Müh. Böl., E-posta: ozkol@itu.edu.tr

bilgiler ışığında, hava trafiğinin, küresel ısınma üzerinde dikkat edilmesi gereken bir etkisi olduğunu söylenebilir.

Açık literatürde, gelişen havacılık endüstrisi ile alakalı birçok çalışma yürütülmüştür. Son zamanlarda, bu araştırma alanındaki en popüler konu ticari uçaklar için rota optimizasyonu problemi. Özellikle, havacılığın çevre üzerindeki etkisinin farkındalığının artmasıyla birlikte, rüzgar, iklim veya hava durumu dikkate alınarak yapılan uçak rota optimizasyonu probleminin araştırılması önemli ölçüde artmıştır. Bu problemler genel anlamda, uçuş süresinin azaltılması, en kısa rotanın hesaplanması veya yakıt tüketiminin en aza indirilmesi açısından değerlendirilmektedir. Yakıt tüketiminin, bir havayolu şirketinin harcamalarının yaklaşık dörtte birine denk geldiği bilindiğine göre, hem çevresel hem de ekonomik açıdan oldukça büyük bir öneme sahiptir. Dünyayı etkisi altına alan Covid-19 pandemisi sebebiyle son iki yıldır endüstri finansal bir krizle mücadele etmektedir. Yakıt tüketiminin azaltılması üzerine yapılan çalışmaya göre, rüzgarın çok olduğu bir gün seçilerek optimize edilmiş rota uygulamasının, toplam verimliliği maksimum %4,3 oranında iyileştirdiği bulunmuştur. Buna ek olarak, yapılan bu çalışmada aynı rota için seçilen iki güne ait farklı rüzgar şartları altında rota optimizasyonu yapılarak daha iyi rüzgar koşullarında yakıt tüketiminin %9,27 oranında ve uçuş süresinin %8,24 oranında azaldığı görülmüştür [Edinger, Kuenz, Mollwitz, Schmitt, Schwach, Zillies, 2014]. 2-boyutta ve 3-boyutta iklim ve hava koşullarına göre optimize edilmiş rota planlaması karşılaştırıldığında ise, 3-boyutta iklim ve hava koşullarına göre yapılan optimizasyonun, ortalama sıcaklığın düşürülmesinde %20-35 daha başarılı olduğu ifade edilmiştir [Frömming, Grewe, Gollnick, Lührs, Niklass, 2016]. İklim ve rüzgar faktörü hesaba katılarak yapılan uygulamaların yanında ısınmaya sebep olacak bir diğer faktör yoğunlaşma izleridir. Yoğunlaşma izleri, dünyadan yayılan uzun dalga radyasyonlarının yaklaşık %33'ünü bloke ederek dünya sıcaklığında artışa sebep olur. Burada yoğunlaşma izlerinden kaçınmak sera etkisini ortadan kaldıracak ve sıcaklığı arttırmayacaktır. Ayrıca, yapılan analizde yoğunlaşma izi oluşturan uçuşların seyir fazlarının 2000 ft veya 4000 ft yükseltmenin, yoğunlaşma izi üreten uçuşları %14,8 azalttığı belirtilmiştir [Avila, Sherry, Thompson, 2019]. İklim etkisi büyük ölçüde irtifaya bağlıdır dolayısıyla seyir fazı diğer uçuş fazlarına göre daha fazla önem arz etmektedir. 4-boyutta uçağın kalkış ağırlığının performans üzerindeki etkisini incelemek adına yapılan çalışmada, yalnızca seyir fazındaki uçuş için yüksek irtifa ve düşük hız profilinde kalkış ağırlığı optimuma yaklaşır, bu profilde kalkış ağırlığı optimize edilerek üretilen rotanın düşük yakıt tüketimine neden olmasını açıklar. Yakıt tüketimi ve kalkış ağırlığı arasında doğrusal bir ilişki vardır ve şöyle ifade edilir; her fazladan alınan 500 kg kalkış ağırlığı için yaklaşık 40 kg fazladan yakıt tüketilmektedir bu da uçuş boyunca yaklaşık %0,75 fazladan yakıt tüketimine karşılık gelmektedir [Olivares, Soler, Staffetti, 2015]. Şimdiye kadar genel yaklaşım olarak yakıt tüketiminin, zamanın ve mesafenin optimize edilmesiyle rota planlaması incelenmiştir. Klasik yaklaşımlardan farklı olarak iki nokta arasındaki minimum enerji prensibi ile rota planlamasının yapıldığı çift fazlı hibrit bir algoritma da literatüre sunulmuştur [Delahaye, Legrand, Puechmorel, Zhu, 2016]. Ticari uçakların rota planlamasında, seyir fazı için çok amaçlı optimizasyon probleminin çözülmesini ele alan başka bir çalışma incelendiğinde çalışmanın temel olarak tek bir rota için yapıldığı ve rüzgar alanı, atmosferik çevre modeli, ısınma gibi faktörlerin problemi karmaşıklaştırdığı sebebiyle dahil edilmediği buna bağlı olarak daha sistematik ve doğru sonuçlar elde etmek için belirtilen analizlerin yapılmasının gerekliliği vurgulanmıştır [Lan, Liao, Wang, 2021]. Optimizasyon probleminin simülasyon aşamasında, bir çok çalışmada transatlantik uçuşlar baz alınarak sonuçlar oluşturulmuştur. Bunun yanında, havacılığın çevreye olan etkisini daha kolay inceleyebilmek adına yalnızca CO2 emisyonunun iklim üzerindeki etkisini azaltmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır [Chen, Li, Ng, Sridhar, 2014].

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin, tek amaçlı optimizasyon problemlerine göre daha gerçekçi ve ideal sonuçlar verdiği bilinmektedir. Bu sebeple, çalışma kapsamında modelleme aşamasında maliyet fonksiyonu çok amaçlı olarak oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında rüzgar ve çevresel etkileri değerlendirerek çözümlenen rota optimizasyonu ile havacılığın iklim üzerindeki olumsuz etkilerinin düşürüldüğü gösterilmiştir. Vaka incelemesi olarak daha önce odaklanılmamış olan Türkiye üzerindeki uçuşlardan hareketle analizlerin yapılması literatüre yapılan katkılardandır.

İlk olarak kullanılan yöntem, problemin tanımı ve optimal kontrol problemi anlatılmıştır. Ardından yöntemin rota planlamasına uygulanması ve tasarlanan alt modeller gösterilmiştir. Bir sonraki bölümde simülasyon sonuçları ve değerlendirmeler sunulmuştur. Son olarak, sonuç bölümüyle çalışma tamamlanmıştır.

YÖNTEM

Bu bölümde, odaklanılan temel yöntem sunulmuştur. Ele alınan problem için oluşturulan modelde optimal kontrol teknikleri kullanılmıştır.

Problem Tanımı

Rota planlama, belirlenen başlangıç ve bitiş şartları arasında sistem dinamiğine bağlı kalarak rota bulmaktır. Sistem dinamiğini etkileyen rüzgar veya hava durumu gibi dış etkenler olduğu zaman, problem daha karmaşık bir hal almaktadır. Bu çalışmada, tanımlanan problem optimal kontrol ile çözülecektir.

Optimal Kontrol Problemi ve Çözüm Yöntemi

Matematiksel optimizasyonun bir alt dalı olan optimal kontrol, dinamik sistemin optimizasyonu için kullanılır. Optimal kontrol probleminin genel gösterimi aşağıdaki gibidir [Hok, Neil, Sridhar, 2011],

$$J(t, x(t), u(t)) = c_Y \cdot Y(t_0, t_f, x(t_0), x(t_f)) + c_\psi \cdot \int_{t_0}^{t_f} \psi(x(t), u(t), t) dt \quad (1)$$

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) \quad (2)$$

$$x(t_0) \in [x_{min,0}; x_{max,0}] \quad (3)$$

$$x(t_f) \in [x_{min,f}; x_{max,f}] \quad (4)$$

$$x(t) \in [x_{min}; x_{max}] \quad (5)$$

$$u(t) \in [u_{min}; u_{max}] \quad (6)$$

$$p(t) \in [p_{min}; p_{max}] \quad (7)$$

Bu gösterimde, $x(t)$ durum değişkenlerini tanımlar, $u(t)$ kontrol değişkenlerini tanımlar ve ψ maliyet fonksiyoneldir. Optimizasyon probleminin dinamik kısıtları $\dot{x}(t)$ olarak verilmiştir. Buna ek olarak, $p(t)$ yol vektörüdür.

Optimal kontrol problemini çözmek için üç temel yaklaşım mevcuttur; dinamik programlama, doğrudan metotlar ve dolaylı metotlardır. Öncelikle, Hamilton-Jacobi-Bellman denklemlerini kullanan dinamik programlama, problemi alt problemlere böler ve bu alt problemleri tekrar tekrar hesaplayarak çözüm bulur. Ancak, dinamik programlama rota optimizasyonu gibi büyük ölçekli optimizasyon problemleri için yüksek hesaplama yükü sebebiyle uygun değildir. Diğer bir yaklaşım ise dolaylı metotlardır. Sınır değer problemlerini çözümlerinde uygulanan dolaylı metotlar, mühendislik problemlerine uygulanabilirliği açısından daha kontrol edilebilirdir. Öte yandan, bu yaklaşımda da ilk tahminler genellikle karmaşık matematiksel hesaplara neden olur ve bazen de mantıksal ilk tahminlerin fiziksel bir anlamı olmayabilir.

Son olarak bu çalışmada, optimal kontrol problemi doğrudan metotlar kullanılarak doğrusal olmayan bir programlama problemi olarak ifade edilmiştir. Rota planlama problemini çözmek için son yaklaşım olan doğrudan metotlar kullanılmıştır.

RÜZGARA GÖRE OPTİMİZE EDİLMİŞ ROTA PLANLAMA

Bu bölümde, optimizasyon problemini anlatmak için önce, BADA [Eurocontrol, 2014] esas alınarak oluşturulan üç serbestlik dereceli uçak modeli ve sonra rüzgar modeli sunulmuştur. Bu bölümde son olarak havacılığın çevre üzerindeki etkisini incelemek için kullanılan emisyon modeli uygulanmıştır.

Uçak Dinamikleri

Üç serbestlik dereceli nokta-kütle uçak hareket denklemleri aşağıdaki gibidir,

$$\dot{x}(t) = v(t) \cos \chi(t) \cos \gamma(t) + W_x(x, y) \quad (8)$$

$$\dot{y}(t) = v(t) \sin \chi(t) \cos \gamma(t) + W_y(x, y) \quad (9)$$

$$\dot{h}(t) = v(t) \sin \gamma(t) \quad (10)$$

$$\dot{v}(t) = \frac{Thr}{m(t)} - g \sin \gamma(t) - \frac{c_D S \rho v(t)^2}{2m(t)} \quad (11)$$

$$\dot{\chi}(t) = \frac{c_L S \rho v \sin \mu(t)}{2m(t) \cos \gamma(t)} \quad (12)$$

$$\dot{m}(t) = -f \quad (13)$$

Sunulan uçak modeli, altı durum ve üç kontrol değişkenlerinden oluşmaktadır. Durum değişkenleri; konum x ve y , irtifa h , uçağın hızı v , yön açısı χ , ve uçağın kütlesi m olarak belirlenmiştir. Bunun yanında üç kontrol değişkeni vardır. Bunlar; uçuş yolu açısı γ , yatış açısı μ , ve itki Thr . $W_x(x, y)$ ve $W_y(x, y)$ ise sırasıyla x ve y eksenindeki rüzgarın hızıdır.

Rüzgar Modeli

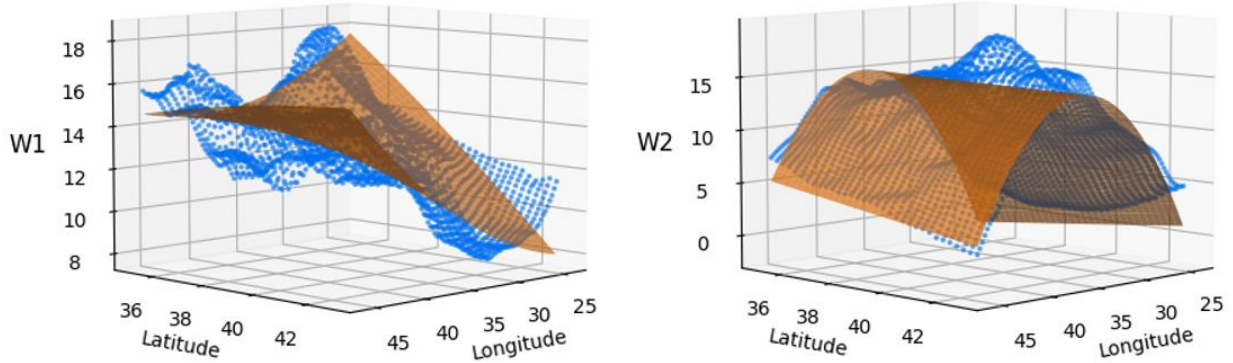
Rüzgar modeli iki boyutta uygulanmıştır. Rotadaki değişim, rüzgarın x ve y bileşenleri yatayda uçağın hareket denklemlerine eklendiğinde, açıkça görülmüştür. Rüzgar modeli $W = (W_x, W_y)$ formunda kullanılmıştır.

Bu çalışmada, rüzgar tahmini bir günlük gerçek rüzgar verisi kullanılarak yapılmıştır. Rüzgarın düşey bileşeni ihmal edilmiştir ($W_z \approx 0$). Rüzgarın yatay bileşenleri, çok değişkenli polinomsal regresyon yöntemi ile aşağıdaki iki doğrusal olmayan denklem kullanılarak tahmin edilmiştir [Hansen, Soler, Zoe, 2014].

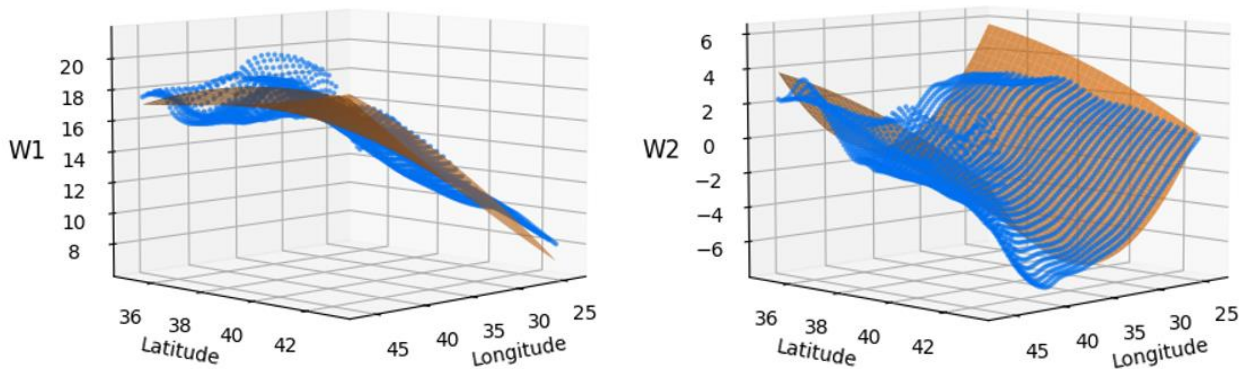
$$W_x = \beta_{000}^x + \beta_{100}^x x_e + \beta_{010}^x y_e + \beta_{001}^x z_e + \beta_{200}^x x_e^2 + \beta_{110}^x x_e y_e + \beta_{020}^x y_e^2 + \beta_{101}^x x_e z_e + \dots + \beta_{00m}^x z_e^m \quad (14)$$

$$W_y = \beta_{000}^y + \beta_{100}^y x_e + \beta_{010}^y y_e + \beta_{001}^y z_e + \beta_{200}^y x_e^2 + \beta_{110}^y x_e y_e + \beta_{020}^y y_e^2 + \beta_{101}^y x_e z_e + \dots + \beta_{00m}^y z_e^m \quad (15)$$

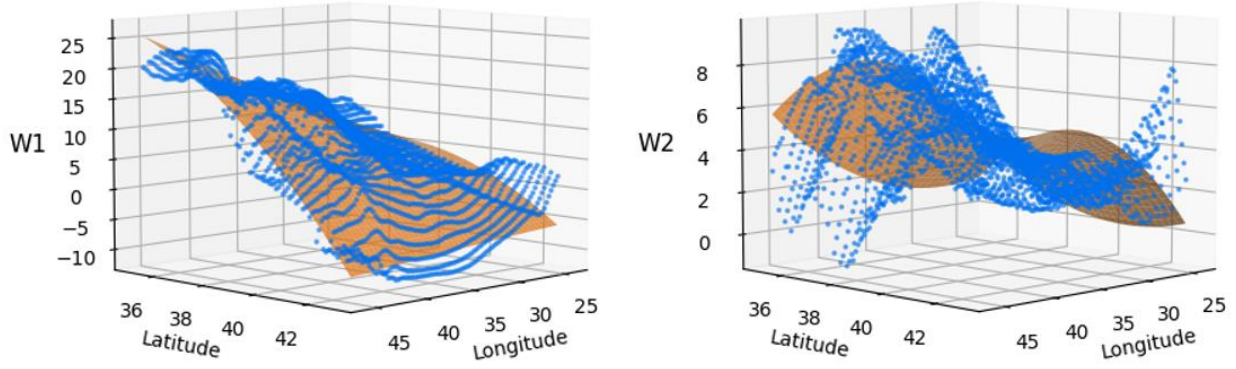
Farklı irtifa değerleri için üç farklı gün seçilerek uygulanan, Türk hava sahası (Turkish Airspace) üzerindeki rüzgarın x ve y bileşenleri için ayrı ayrı hesaplanan rüzgar verileri aşağıda gösterilmiştir. Gerçek rüzgar verisi mavi noktalarla belirtilmiştir, turuncu ile gösterilen yüzey ise yukarıda bahsedilen teknik ile hesaplanmış rüzgar verilerini göstermektedir (Şekil1, Şekil 2, Şekil3).



Şekil 1: 01/10/2018 Tarihli Rüzgar Verisi. Rüzgarın x yönündeki bileşeni $W1$ ile, y yönündeki bileşeni ise $W2$ ile belirtilmiştir.



Şekil 2: 05/10/2018 Tarihli Rüzgar Verisi. Rüzgarın x yönündeki bileşeni $W1$ ile, y yönündeki bileşeni ise $W2$ ile belirtilmiştir.



Şekil 3: 07/10/2018 Tarihli Rüzgar Verisi. Rüzgarın x yönündeki bileşeni W1 ile, y yönündeki bileşeni ise W2 ile belirtilmiştir.

Yukarıdaki grafiklerde, gerçek veri ile rüzgar modeli kullanılarak hesaplanan tahmini verinin yakınsadığı açıkça gözlemlenmektedir.

Optimizasyon Problemi

Optimal kontrol problemi, uçuş süresini, rotayı ve yakıt tüketimini minimize edecek şekilde oluşturulmuştur. Sıcaklık, basınç, hava yoğunluğu gibi parametreler Uluslararası Standart Atmosfer (ISA) modeline göre hesaplanmıştır. Uçak performans modeli BADA' ya [Eurocontrol, 2014] göre oluşturulmuştur. Bu çalışmada, üç boyutlu uzayda seyir fazındaki uçaklar için rüzgar faktörü hesaba katılarak optimum rotayı bulmak hedeflenmiştir. Bu çalışma kapsamında, üç boyutlu rotaların modellenmesi için optimal kontrol teknikleri kullanılmıştır. Rüzgara göre optimize edilmiş rotaları hesaplamak için, yol kısıtları olan ve doğrusal olmayan bir optimal kontrol problemi çözülmüştür. Bir rüzgar alanında optimize edilmiş optimum rotayı hesaplamak için optimal kontrol problemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur,

$$\min (x(t_f) - x_d)^2 + (y(t_f) - y_d)^2 + \int_0^{t_f} (c_1 f + c_2) dt$$

kısıtlar:

(16)

uçak modeli (8) – (13)

$$T = T_{SL} - \beta h$$

$$p = p_{SL} \left(\frac{T}{T_{SL}} \right)^{\frac{g}{\beta R}}$$

$$\rho = \frac{p}{RT}$$

$$C_L = \frac{2mg}{\rho S v^2 \cos \mu}$$

$$C_0 = f(d_{1:5}, M)$$

$$C_2 = f(d_{6:10}, M)$$

$$C_6 = f(d_{11:15}, M)$$

$$C_D = A \cdot [C_0 + (C_2 C_L^2) + (C_6 C_L^6)]$$

$$C_T = f(a_{1:36}, \delta_T, M)$$

$$Thr = \delta \cdot W_{mref} \cdot C_T$$

$$C_F = f(f_{1:25}, C_T, M)$$

$d_1, d_2, \dots, d_{15}, a_1, a_2, \dots, a_{36}, f_1, f_2, \dots, f_{25}$ katsayıları BADA'dan elde edilebilmektedir. A uçak tipine bağlı değişen ölçek faktörüdür. c_1, c_2 katsayıları sırasıyla yakıt tüketimi ve uçuş süresinin amaç fonksiyonu üzerindeki ağırlığını belirleyen katsayılardır.

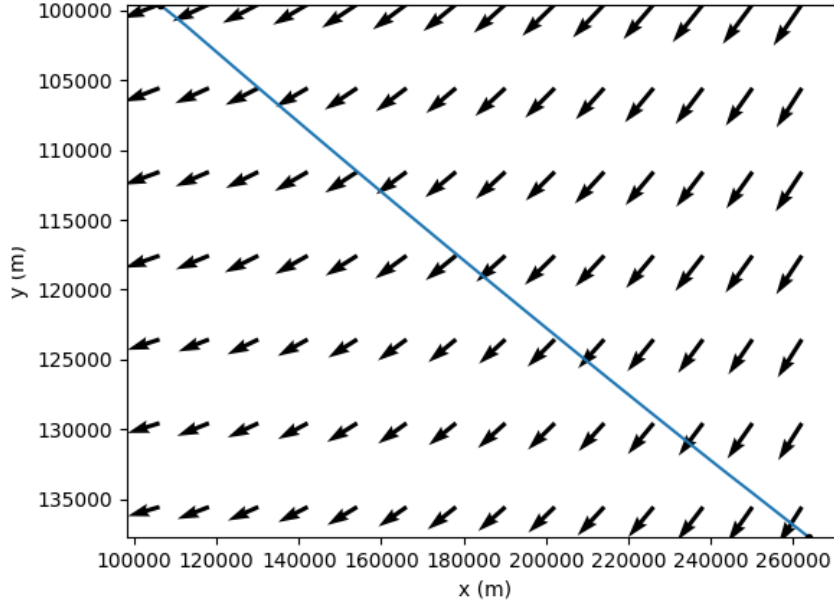
Emisyon Modeli

Emisyon modeli, ICAO Motor Egzoz Veri Bankası [ICAO,2012] ve Boeing Metot 2 [DuBois, Paynter, 2006] esas alınarak oluşturulmuştur. CO₂ emisyon indeksi yükseklikten bağımsız sabit bir

katsayı olarak sunulmaktadır [Carlier, Jelinik, Smith, 2004]. Bu model kullanılarak, belirlenen rota için salınan emisyon değerleri hesaplanabilmektedir.

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Üç boyutta rüzgar bilgilerini de değerlendirerek optimize edilmiş uçak rota planlama modeli sunulduğu şekilde elde edilmiştir. Yukarıda anlatıldığı üzere elde edilen rüzgar verisine göre, rüzgar faktörü yatay düzlemde hareket denklemlerine eklenmiştir.



Şekil 4: Rüzgara Göre Optimize Edilmiş Uçak Rotası

Şekil 4'de sonuçları sunulan örnek çalışmada, BADA' dan alınan B737-800 uçağının performans parametreleri kullanılmıştır. Uçuşlar seyir fazına göre incelenmiştir. Seyir fazında optimum rota için, uçuş süresi 801.30 s ve yakıt tüketimi 632.96 kg bulunmuştur. Bu rota için, toplam salınan CO₂ miktarı 1993.17 kg'dır. Yapılan detaylı analizler sonucu Şekil 4'de verilen örnek çalışmada, gerçek uçuşta harcanan yakıt ve CO₂ salınımına göre sunulan metotla %8.7 oranında bir iyileşme olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 1. Optimizasyon sonuçları ile gerçek uçuş verilerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması

UÇUŞ NO	OPTİMİZASYON SONUÇLARI			UÇUŞ PLANINA GÖRE SONUÇLAR		
	CO ₂ [kg]	UÇUŞ SÜRESİ [s]	YAKIT TÜKETİMİ [kg]	CO ₂ [kg]	UÇUŞ SÜRESİ [s]	YAKIT TÜKETİMİ [kg]
1	1993.17	801.30	632.96	2183.13	1010	693.28
2	2002.22	804.97	635.83	2091.71	966	664.25
3	1661.78	661.69	527.76	1690.79	782	536.93
4	2059.04	820.93	653.87	2225.74	1028	706.81
5	2099.65	837.60	666.77	2094.40	970	665.10
6	2049.90	81724	650.97	2146.37	993	681.60

Tablo 1'de görüldüğü üzere, optimizasyon sonuçları ve gerçek uçuş planlarından elde edilen sonuçlardan bazıları karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. İstanbul-Ankara arası yapılan, seyir fazındaki, uçuş simülasyon sonuçlarından analiz edildiği üzere, bir uçuş için günlük ortalama 628 kg yakıt tüketilirken ortalama salınan CO₂ miktarı 1977 kg'dır. Planlanan uçuş sonuçları ve optimizasyon sonuçları karşılaştırıldığında önerilen model sayesinde uçuşlarda ortalama %4.4 oranında yakıt tüketimi ve CO₂ salınımı iyileşmesi olduğu gözlemlenmiştir.

SONUÇ

Bu çalışmada, üç boyutta, rüzgar ve hava durumuna göre optimize edilmiş seyir fazındaki uçak rotaları elde edilmiştir. Bu çalışmanın amacı, havacılığın çevre üzerindeki etkisini iyileştirmektir. Çok amaçlı optimizasyon problemi, yakıt tüketimi, yol ve zaman maliyetleri bakımından ele alınmıştır. Problem gerçek hava trafik verileri kullanılarak optimize edilmiştir. Çalışmanın bir diğer özelliği ise daha önce incelenmemiş olan Türk hava sahası üzerinde bir günlük gerçek rüzgar verisi kullanılarak rüzgar modelinin oluşturulması ve Türkiye özelinde uçuşların incelenmesidir.

Sonuç olarak, uygulama kısmında açıkça görülüyor ki önerilen model sayesinde İstanbul-Ankara seferlerinin seyir fazı dikkate alındığında ortalama %4.4 oranında yakıt tasarrufu ve CO₂ salınımı azalımı olduğu görülmüştür. Yapılan bu çalışma ile beraber, bir sonraki aşamada nitrojen oksit gibi diğer uçak emisyonlarının çevre üzerindeki etkisinin azaltılmasına yönelik bir çalışma yapılacaktır ve bunların Türk hava sahası üzerindeki etkileri araştırılacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Avrupa Birliği Ufuk 2020 Araştırma ve Yenilik programı altında 875503 numaralı hibe sözleşmeli ClimOP projesi kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

- Avila, D., Sherry, L., ve Thompson, T., 2019. *Reducing global warming by airline contrail avoidance: A case study of annual benefits for the contiguous United States*, Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, Cilt.2, ss.100033.
- Carrier, S., Jelinik, F., ve Smith, J., 2004. *Advanced Emission Model (AEM3) v1.5*, Technical Report EEC/SEE/2004/004. Eurocontrol, ss. 1-69.
- Chen, N. Y., Li, J., Ng, H. K., Sridhar, B., 2014. *Three-Dimensional Trajectory Design for Reducing Climate Impact of Trans-Atlantic Flights*, 14th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Atlanta, 16-20 Haziran.
- Delahaye, D., Legrand, K., Puechmorel, S., ve Zhu, Y., 2016. *Aircraft trajectory planning under wind uncertainties*, IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC), Sacramento, 25-29 Eylül.
- DuBois, D., and Paynter, G.C., 2006. *Fuel Flow Method2 for Estimating Aircraft Emissions*, SAE Int.
- Edinger C., Kuenz A., Mollwitz V., Schmitt A., Schwoch G., ve Zillies J., 2014. *Wind optimized routing: An opportunity to improve european flight efficiency?*, Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS) Conference Proceedings, Herndon, 8-10 Nisan.
- Eurocontrol , 2014. *User Manual For The Base Of Aircraft Data (BADA) Family 4*, Technical Report.
- Frömming C., Grewe V., Gollnick V., Lührs B., Niklass M., 2016. *Cost-Benefit Assessment of 2D and 3D Climate And Weather Optimized Trajectories*, 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Washington, D.C., 13-17 Haziran.
- Hansen, M., Soler, M., Zou, B., 2014. *Flight trajectory design in the presence of contrails: Application of a multiphase mixed-integer optimal control approach*, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 48, ss. 172-194.
- Hok, K. Ng., Neil, Y. Chen. ve Sridhar, B., 2011. *Aircraft trajectory optimization and contrails avoidance in the presence of winds*, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, ss. 1-13.
- Koch, A., 2013. *Climate Impact Mitigation Potential given by Flight Profile and Aircraft Optimization*, Doktora Tezi.
- Lan, J., Liao, Y., Wang, S., 2021. *Multi-objective Optimization for Cruising Phase in Civil Aircraft's Trajectory Planning*, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Bristol, Mart.
- Olivares, A., Soler, M., ve Staffetti, E., 2015. *Multiphase Optimal Control Framework for Commercial Aircraft Four-Dimensional Flight-Planning Problems*, Journal of Aircraft, Cilt.52, ss. 274-286.