Uçuş Rotalarının ve En Kısa Yolların Karşılaştırmalı Mekânsal Analizi ve Görselleştirilmesi

(Comparative Spatial Analysis and Visualization of Flight Routes and Shortest Paths)

Melih BAŞARANER, Sinan ÇETİNKAYA

Yıldız Teknik Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölümü Kartografya Anabilim Dalı 34220 Davutpaşa, İstanbul mbasaran@yildiz.edu.tr

ÖΖ

Uçaklar bir havalimanından diğerine belirli uçuş rotaları kullanarak ulasırlar. Rotaların planlanmasında dikkate alınan en önemli ölçütlerden biri, mümkün olan en kısa yolun izlenmesidir. Fakat rotalar, çeşitli nedenlerle (meteorolojik koşullar, hava trafiği vb.) en kısa yollarla çakışmaz ve bir miktar saparlar. Bu çalışmada, sivil havacılıkta kullanılan bazı rotaların, jeodezi ve kartografya disiplinlerinin sunduğu farklı yaklaşımlar kullanılarak hesaplanan en kısa yollar ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Uygulamada, uzunlukları (yer mesafesi cinsinden) yaklaşık 400 ile 4000 km arasında değişen 14 adet rota incelenmiştir. Uçuş güzergâhları ve en kısa yollar, referans yüzeyler üzerinde ve üç boyutlu (3B) uzayda hesaplanmıştır. Avrıca havacılıkta kullanılan yer mesafesi ve hava mesafesi kavramları da kısaca irdelenmiştir. Ek olarak bir rota örneğinde iki ve üç boyutlu görselleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bulgular, otalik küre ve genel küre üzerinde hesaplanan kalkış ve varış noktaları arasındaki büyük daire yayı uzunluklarının jeodezik eğri uzunluğuna göre sırasıyla maksimum %0.06 ve %0.26 oranlarında değiştiğini göstermiştir. Uçuş güzergâhı ve jeodezik eğri karşılaştırıldığında, elipsoit yüzeyinde %0.3 ile %12.8 (medyan %6.1), 3B uzayda ise %0.3 ile %12.7 (medyan %6) oranları arasında değişen uzunluk artışları olduğu görülmüştür. Güzergâh boyunca sapmalar ise elipsoit yüzeyinde 11.4-185.4 km (medyan 42.7 km) ve 3B uzayda 11.4-185.7 km (medyan 42.8 km) aralığında olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Uçuş Rotaları, En Kısa Yollar, Referans Yüzeyler, Mesafeler, Mekânsal Analiz, Mekânsal Görselleştirme

ABSTRACT

Airplanes arrive from one airport to another using specific flight routes. One of the most important criteria taken into account in the planning of the routes is to follow the shortest possible route. However, the routes do not coincide with the shortest paths for a variety of reasons (meteorological conditions, air traffic, etc.) and deviate a little. In this study, it was aimed to compare some of the routes used in civil aviation with the shortest paths calculated using different approaches offered by geodesy and cartography disciplines. In experimental study, 14 routes ranging from about 400 to 4000 km in length (in terms of ground distance) were investigated. Flight routes and shortest paths were calculated on reference surfaces, and in three-dimensional (3D) space. Besides, the concepts of ground distance and air distance used in aviation were also briefly discussed. Furthermore, a two- and three-dimensional visualization was performed on a route example. The findings showed that the lengths of the great circles between the departure and arrival points calculated on authalic sphere and general sphere varied by a maximum of 0.06% and 0.26%, respectively, against the geodetic curve length. Compared with the flight path and the geodetic curve, it was observed that the increases in lengths ranged from 0.3% to 12.8% (median 6.1%) on the ellipsoid surface and from 0.3% to 12.7% (median 6%) in 3D space. Deviations along the route were 11.4-185.4 km (median 42.7 km) on the ellipsoid surface and 11.4-185.7 km (median 42.8 km) in 3D space.

Keywords: Flight Routes, Shortest Paths, Reference Surfaces, Distances, Spatial Analysis, Spatial Visualization

1. GİRİŞ

Hava trafiğini sağlıklı biçimde yönetebilmek icin hava sahalarında uçuş koridorları oluşturulmuştur. Uçaklar önceden belirlenmiş bu koridorları kullanırlar. Bu koridorlar boyunca, uçakların hava trafik kontrol birimiyle haberleştiği çesitli aüzeraâh noktaları (wavpoints) belirlenmiştir. Uçaklar, bu noktalardan geçerek varış noktasına ulaşırlar ve genellikle bu noktalarda yön, hız veya yükseklik değiştirirler. Bu noktalardan geçerken kullanılacak yükseklikler, öncelikle hava trafiğine bağlıdır ve hatta bazı ülkeler, sivil uçakların geçişi için belli irtifalar da belirlemişlerdir. Uçuş öncesi, uçakların izleyeceği rotalara ilişkin çeşitli bilgiler uçuş planlarında yer alır. Bu planlar, uçuş öncesi hava trafik kontrol birimine iletildikten sonra uçağın izlenmesine başlanır ve seyir hizmetleri verilir. Kalkış ve inişte ise farklı prosedürler uygulanır. Bu prosedürler önceden uçuş planı ile birlikte belirlense de, meteorolojik koşullar ve hava trafiğine bağlı olarak hava trafik kontrol birimi tarafından gerek görülürse değiştirilebilmektedir (FAA, 2011; 2015; 2016).

Uçuş rotaları; meteorolojik koşullar, yakıt harcaması, uçuş süresi, mevcut hava trafiği, arazi yükseltileri, hava sahası kısıtlamaları ve hava sahası kullanım ücretleri gibi çeşitli ölçütler dikkate alınarak belirlenir. Bu kapsamda, mümkün olan en az maliyetli yolun izlenmesi önemlidir. Geometrik açıdan bir noktadan diğerine en az maliyetle ulaşmak için en kısa yolun izlenmesi gerekir. En kısa yol, en klasik ve yaygın anlayışla küre üzerinde alınan en kısa yol yani ortodrom eğrisi (büyük daire yayı) olarak algılanmaktadır. Bununla birlikte, şekli geoide daha yakın olduğu için daha yüksek doğruluklu hesaplamalarda yeryüzü geometrik olarak dönel elipsoit (sferoit) kabul edilerek cözüme aidilir. Bu nedenle, elipsoit üzerinde iki nokta arasındaki en kısa mesafe olan ieodezik eğri uzunluğu daha hassas değerlendirmeler için kullanılır. Uçaklar, referans yüzeyi üzerinde değil belirli bir yükseklikte havada yol almaktadır. Dolayısıyla bir uçağın rotasının, yüzeylerinin referans üzerinde değerlendirilmesinin ötesinde üç boyutlu (konum ve yükseklik temelli) değerlendirilmesi, alacağı yolun çok daha gerçekçi bir biçimde belirlenmesi olanağını sağlar. Literatür incelendiğinde bu konuda pratik hesaplamaların daha ön planda olduğu ya da farklı yaklaşımlarla yapılabilecek hesaplamaların bir değerlendirmesinin olmadığı görülmektedir. Bu kapsamda, Walwyn (1996) bir saldırı uçağının mevcut konumu ve en yakın güzergâh noktası arasındaki mesafenin hassas biçimde elde edilmesi için çözümü daha pratik olan ve jeodezik eğriye oldukça yakın sonuç veren elipsoit üzerindeki büyük elips yaylarının hesaplanmasını ele almaktadır. Kralicek (2009) geniş bir alana ait havacılık verilerinin üc boyutlu (3B) görselleştirilmesi için OssimPlanet 3B yeryüzü görüntüleme vazılımı ve OpenSceneGraph kütüphanesiyle gerçekleştirdiği bir uygulama sunmaktadır. Nastro vd. (2010) büyük daire navigasyonuna ilişkin problemlerin çözümü için vektör analizini kullanmaktadır.

Literatürdeki eksiklikten hareketle, bu çalışmada uçuş rotalarının kullanılan referans yüzeyi üzerindeki en kısa yoldan ne kadar saptığının ve en kısa yol üzerinde gidildiği takdirde mesafelerin ne kadar değişeceğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, bu rotaların pratik olarak iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) görselleştirilmesi de ele alınmıştır.

Bu kapsamda, farklı yaklaşımlar ile referans yüzeyi üzerinde ve 3B uzayda mesafeler hesaplanmis karsılastırılmıştır. ve Bu vaklasımlarda referans vüzevleri olarak. WGS84 (World Geodetic System 1984) elipsoidine göre genel küre, WGS84 elipsoidine göre otalik küre ve WGS84 elipsoidi kullanılmıştır. Hesaplamalar, rotanın başlangıç ve bitiş koordinatlarına, rota boyunca yer alan tüm güzergâh noktalarının coğrafi koordinatlarına (enlem ϕ , boylam λ), güzergâh noktalarının jeodezik eğriye dik inilmesiyle elde edilen coğrafi koordinatlara ve bu noktaların elipsoidal kartezyen koordinatlarına dayalıdır.

2. HAVA MESAFESİ VE YER MESAFESİ

Hava mesafesi (air distance) ve yer mesafesi (ground distance) uçakların kat edecekleri yol ile ilgili olarak uçuş planlarında yer alan önemli bir bilgidir. Yer mesafesi hesaplanırken rüzgâr faktörü dikkate alınır. Rüzgâr, bir ucusu olumlu va da olumsuz yönde etkileyebilir. Uçuş esnasında baş rüzgârı yerine kuyruk rüzgârının alınması, uçağın yer hızını artırırken, tersi durumda bu değer azalır. Şekil 1'de görüldüğü gibi A noktasından C noktasına gitmek isteyen bir uçak, rüzgâr nedeniyle B noktasına ulaşır. Bu bağlamda, rotasından sapmamak için rüzgârı dikkate alarak doğrultusunu ayarlayabilir. Hava mesafesi, uçağın hızı (hava hızı) ve uçuş süresi yardımıyla hesaplanırken, yer mesafesi, uçağın hızı, rüzgârın yönü ve şiddeti ve uçuş süresi dikkate alınarak hesaplanır. Yeryüzünde alınan yol bakımından yer mesafesi anlamlıdır (FAA, 2011; 2016).





Uçuş planlamada temel hedef, tahmin edilen rüzgâr-akış modeli dikkate alındığında en kısa hava mesafesinde ya da en kısa zamanda uçmayı sağlayacak rotayı belirlemektir. Rüzgârı dikkate almaksızın en kısa yer mesafesinin ya da mesafeyi dikkate almaksızın en güçlü rüzgâr yönünün en kısa süreli rotayı üretmesi nadiren rastlanacak bir durumdur. Rüzgâr ve yer mesafesinin en uygun kombinasyonu, en kısa hava mesafesini ya da en kısa süreyi verecektir (Simpson, vd., 1965).

3. YÖNTEM

Uçuş rotası uzunluklarının hesaplanmasında çeşitli yaklaşımlar kullanılmıştır. Coğrafi koordinatlar, WGS84 datumuna dayalıdır. Yaklaşımın türüne göre referans yüzeyi küre veya WGS84 elipsoidi olmaktadır. WG84 elipsoidinin aşağıdaki eşitliklerde geçen parametrelerinin değerleri şöyledir: Büyük yarı eksen a = 6378137 m, küçük eksen b =yarı 6356752.314245 m, basıklık f = 1/298.257223563 ve birincil eksantirisite e =0.0818191908426215.

Küçük ölçekli harita yapımında (1:2 000 000 veya daha küçük) ya da sınırlı alanlarda hesaplama kolaylığı açısından aralarındaki farklar ihmal edilebilir olduğu için referans yüzeyi olarak elipsoit yerine küre kullanılabilir. Kürenin yarıçapı, referans elipsoidine ilişkin geometrik büyüklüklere dayalı olarak farklı şekillerde hesaplanabilir (Koçak, 1999; Özbenli, 2001; Uçar vd., 2011).

Jeodezik uygulamalarda, lokal yaklaşımlar için Gauss küresi kullanılabilir. Gauss küresinin yarıçapı R_G enleme göre değişkenlik gösterir ve (1) eşitliğiyle hesaplanır (Torge vd., 2012; Jekeli, 2012).

$$R_G = \frac{a(1-f)}{1-e^2 \sin^2 \varphi} \tag{1}$$

Global yaklaşımlarda kürenin yarıçapı, eksen uzunlukları ortalamasıyla R_m , elipsoit ve kürenin hacminin eşit alınmasıyla (hacim koruyan küre) R_v ya da elipsoit ve kürenin alanının eşit alınmasıyla (alan koruyan/otalik küre) R_s elde edilebilir (Sırasıyla eşitlik (2), (3) ve (4)). Bu üç yöntemle elde edilen yarıçap değerleri arasındaki farklar, birkaç metreyi geçmediği için WGS84 ve GRS80 elipsoitlerine karşılık genel küre yarıçapı için R =6371 km ortalama global değer olarak kullanılır (Torge vd., 2012; Jekeli, 2012).

$$R_m = \frac{1}{3}(2a+b) \tag{2}$$

$$R_{\nu} = \sqrt[3]{a^2 b} \tag{3}$$

$$R_s = b_{\sqrt{\left(1 + \frac{2}{3}e^2 + \frac{3}{5}e^4 + \cdots\right)}}$$
(4)

a. Genel küre üzerinde kalkış ve varış noktaları arasındaki ortodrom eğrisi uzunluğu

Kalkış *i* ve varış *j* noktalarının coğrafi koordinatları kullanılarak ortodrom eğrisi (büyük daire yayı) uzunluğu *S*, Kosinüs teoremini esas alan (5) eşitliği ile hesaplanmaktadır (Synder, 1987; Koçak, 1999; Uçar vd., 2011). Bu yaklaşımda, jeodezik (elipsoidal) enlem ve boylam değerleri, küre üzerindeymiş gibi kabul edilmekte ve kürenin yarıçapı $R = 6371 \ km$ alınmaktadır.

$$S_{i,j} = R \frac{\pi}{180^{\circ}} cos^{-1} \left[sin \varphi_i sin \varphi_j + cos \varphi_i cos \varphi_j cos (\lambda_j - \lambda_i) \right]$$
(5)

b. Otalik küre üzerinde kalkış ve varış noktaları arasındaki ortodrom eğrisi uzunluğu

Bir diğer yaklaşım, referans elipsoidi yerine otalik küre ve jeodezik enlem yerine otalik enlem kullanılmasıdır (Bildirici, 2016; Kimerling, vd., 2016). Boylam değeri ise değişmez. Otalik enlem β , jeodezik enlem φ ve elipsoidin birinci eksantrisitesi *e* kullanılarak (6) ve (7) eşitlikleriyle hesaplanır (Snyder, 1987).

$$\beta = \sin^{-1}(\frac{q}{q_p}) \tag{6}$$

$$q = (1 - e^2) \left\{ \frac{\sin\varphi}{(1 - e^2 \sin^2\varphi)} - \left(\frac{1}{2e}\right) ln \left[\frac{(1 - e\sin\varphi)}{(1 + e\sin\varphi)} \right] \right\}$$
(7)

 q_p ise $\varphi = 90^{\circ}$ alınarak (7) eşitliğiyle hesaplanır.

Otalik küre yarıçapı R_s , daha önce ifade edildiği gibi elipsoidin alanı kürenin alanına eşit alınarak elde edilir ve (4) ya da (8) eşitlikleriyle hesaplanabilir. WGS84 elipsoidine göre $R_s = 6371007.181$ m'dir (Snyder, 1987; Bildirici, 2016).

$$R_s = a \sqrt{\frac{q_p}{2}} \tag{8}$$

Sonrasında (5) eşitliğinde *R* yerine R_s ve φ yerine β kullanılarak uzunluk hesaplanır.

c. Kalkış ve varış noktaları arasındaki jeodezik eğri uzunluğu

Elipsoit üzerinde kalkış ve varış noktaları arasındaki en kısa yol, jeodezik eğriye karşılık gelir. Helmert ve önceki araştırmacıların jeodezik eğriye ilişkin temel ödev çözümlerini bilgisayar ortamında gerçekleştirmek ve iyileştirmek için Kearney (2011, 2013) tarafından önerilen yaklaşımlar bu aşamada esas alınmaktadır. Eşitlikler için bu kaynaklara başvurulabilir.

ç. Güzergâh noktaları arasındaki jeodezik eğri segmentlerinin toplam uzunluğu

Bu yaklaşımda, güzergâh noktaları arasındaki jeodezik eğri segmentlerinin uzunlukları parça parça elde edilmekte ve bunların toplamından kalkış ve varış noktası arasında alınan yol, WGS84 elipsoidi üzerinde hesaplanmaktadır.

d. Güzergâh noktalarının elipsoidal kartezyen koordinatlarıyla 3B yol uzunluğu

Uçaklar yeryüzünden belirli bir yükseklikte uçtuğu için havada kat ettikleri yol, elipsoidal kartezyen koordinatlar yardımıyla hesaplanabilir (Şekil 2).



Şekil 2. Elipsoidal kartezyen koordinatlar (Bossler, vd., 2010'dan kısmen değiştirilerek alınmıştır)

Bu yaklaşımda, (9) eşitliğiyle meridyene dik doğrultudaki normal kesit eğrilik yarıçapı R_N , (10), (11), (12) eşitlikleriyle güzergâh noktalarının 3B koordinatları (X, Y, Z) ve (13) eşitliğiyle 3B yol uzunluğu D elde edilmektedir. Burada n güzergâh noktası sayısını, i herhangi bir güzergâh noktasını ve Δ koordinat farklarını ifade etmektedir.

$$R_N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} \tag{9}$$

$$X = (R_N + h)cos\varphi cos\lambda \tag{10}$$

$$Y = (R_N + h)\cos\varphi\sin\lambda \tag{11}$$

$$Z = \left(\frac{b^2}{a^2}R_N + h\right)sin\varphi \tag{12}$$

$$D = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{\Delta X_{i,i+1}^2 + \Delta Y_{i,i+1}^2 + \Delta Z_{i,i+1}^2}$$
(13)

Planda uçuş yüksekliği, ortalama deniz seviyesine göredir ve pratik anlamda ortometrik yüksekliğe karşılık gelir. Elipsoidal yüksekliği hesaplamak için (14) eşitliği kullanılır. Bu eşitlikte *h* elipsoidal yüksekliği, *H* ortometrik yüksekliği ve *N* jeoit ondülasyonunu (jeoit yüksekliği) ifade etmektedir.

$$h = H + N \tag{14}$$

e. Jeodezik eğriye dik inilmiş güzergâh noktalarının elipsoidal kartezyen koordinatlarıyla 3B yol uzunluğu

Bu yaklaşımda güzergâh noktaları, jeodezik eğriye dik olarak inilmiştir. Kalkış noktası ve herhangi bir güzergâh noktası arasındaki uzunluk değeri, Gauss küresi üzerinde dik üçgen çözümüyle elde edilmektedir (Şekil 3). Bu amaçla elipsoidal 2. temel ödev ile ilk olarak kalkış noktası ve güzergâh noktaları arasındaki azimutlar α , ikinci olarak kalkış ve varış noktaları arasındaki azimut α_0 ve ayrıca bunların farkı $\Delta \alpha$ hesaplanmaktadır (Eşitlik 15). Jeodezik eğri üzerine dik inilen bir nokta ile kalkış noktası arasındaki jeodezik eğri uzunluğu S'; bir güzergâh noktası ile kalkış noktası arasındaki jeodezik eğri uzunluğu S ve azimut farkı $\Delta \alpha$ parametreleri kullanılarak Neper formülünü esas alan (16) eşitliğiyle elde edilmektedir. R_G ilgili iki noktanın enlemlerinin ortalaması kullanılarak (1) eşitliğiyle hesaplanmaktadır. Daha sonra kalkış noktasının coğrafi koordinatları, α_0 ve S' kullanılarak elipsoidal 1. temel ödev ile dik inilen noktanın coğrafi koordinatları elde edilmektedir.

$$\Delta \alpha_{1,k} = \left| \alpha_0 - \alpha_{1,k} \right| \tag{15}$$

$$S_{1,k}' = R_G \frac{\pi}{180^{\circ}} tan^{-1} \left[tan \left(\frac{S_{1,k}}{R_G} \times \frac{180^{\circ}}{\pi} \right) cos \Delta \alpha_{1,k} \right] (16)$$

$$(k = \{2, 3, \dots, n-1\})$$

Bu yöntemle elde edilen noktaların ortometrik yükseklikleri karşılık geldikleri güzergâh noktalarının ortometrik yükseklikleriyle aynı kabul edilmektedir. Bu noktaların elipsoidal yükseklikleri eşitlik (14)'e göre elde edilmektedir. Elipsoidal kartezyen koordinatlar (10), (11), (12) ve 3B yol uzunluğu (13) eşitliğiyle hesaplanmaktadır.



Şekil 3. Güzergâh noktaları ve jeodezik eğriye dik inilmiş noktalar

f. Orijinal ve jeodezik eğriye dik inilen güzergâh noktaları arasındaki elipsoidal ve 3B sapma uzunlukları

Bu aşamada güzergâh noktaları ve bu noktaların jeodezik eğriye dik inilmesiyle elde edilen noktalar arasındaki ortalama sapma uzunlukları hesaplanmaktadır. İlk durumda elipsoit yüzeyindeki sapma Dv, Sinüs teoremini esas alan (17) eşitliğiyle Gauss küresinde ve ikinci durumda 3B sapma Dv_{3B} , daha önce hesaplanan elipsoidal kartezyen koordinatlar kullanılarak (18) eşitliğiyle hesaplanmaktadır. Burada k nokta numarasını ifade etmektedir.

$$Dv_{k} = R_{G} \frac{\pi}{180^{\circ}} \times$$
$$sin^{-1} \left[sin \left(\frac{S_{1,k}}{R_{G}} \times \frac{180^{\circ}}{\pi} \right) sin \Delta \alpha_{1,k} \right]$$
(17)

 $Dv_{3B,k} = \sqrt{(X_k - X'_k)^2 + (Y_k - Y'_k)^2 + (Z_k - Z'_k)^2}$ (18)

4. UYGULAMA

a. Veriler

Uçuş verileri, havacılık bilgi değişim modeli (AIXM) standardına göre hazırlanmış genişletilebilir işaretleme dili (XML) dosyalarında yer almaktadır (Şekil 4). Uygulamada 9'u iç hat, 5'i dış hat olmak üzere toplam 14 adet rota incelenmiştir.

b. Mekânsal analiz ve görselleştirme

Bu aşamada ilk olarak, farklı XML dosyalarında yer alan uçuş verileri, Excel tablolarına

<Waypoint sequenceId="3" waypointId="EDASA" waypointName="EDASA" waypointLongName="EDASA" countryICAOCode="LT"> <Coordinates latitude="+142056" longitude="+108448">N3927.6 E03007.5</Coordinates> <Airway type="RNAV_SID">EDASA1J</Airway> <Altitude> <EstimatedAltitude> <Value unit="ft/100">350</Value> </EstimatedAltitude> </Altitude> <MinimumSafeAltitude> <Value unit="ft/100">83</Value> </MinimumSafeAltitude> <SegmentWind> <Direction> <Value type="true" unit="deg">280</Value> </Direction> <Speed> <Value unit="kt">16</Value> </Speed> </SegmentWind> <SegmentShearRate> <SegmentVerticalWindChange> <Value unit="kt">1</Value> </SegmentVerticalWindChange>

Şekil 4. XML formatlı uçuş verisi örneği

aktarılmıştır. Bu tablolardan güzergâh noktalarına ilişkin verileri içeren kısımlar çekilmiş ve ayrı dosyalar halinde kaydedilmiştir. Bu yeni Excel tabloları, CBS ortamına aktarılıp yapısal sorgulama dili (SQL) yardımıyla içerik ve birimler açısından yeniden düzenlenmiştir. Ardından tablolardaki coğrafi koordinatlar kullanılarak Geographic (WGS 84) (EPSG: 4326) koordinat sisteminde noktalar oluşturulmuştur. Noktaların elipsoidal yüksekliklerini elde etmek için U.S. National Geospatial Intelligence Agency tarafından yayımlanan ve aynı koordinat sisteminde tanımlı 2' 30" × 2' 30" çözünürlüklü yer gravite modeli 2008 (EGM2008) raster grid verileri kullanılmıştır (URL-2). Buradaki jeoit ondülasyonu değerleri, otomatik olarak güzergâh noktaları tablosuna aktarılmış ve elipsoidal yükseklikler ilgili sütunların toplamıyla elde edilmiştir.

Mesafe ve uzunluk hesaplamaları, açık kaynaklı istatistik ve grafik yazılımı R üzerinde geliştirilen program parçacıkları ve R için oluşturulmuş "geosphere" paketinde yer alan, elipsoit ve küre üzerindeki hesaplamalara yönelik fonksiyonlar ile gerçekleştirilmiştir (URL-1). Bu paketteki fonksiyonlar, Karney (2013)'e göre hazırlanmış yazılım kütüphanesine dayalıdır (URL-3). Elipsoit üzerinde 1. ve 2. temel ödevler için sırasıyla "geodesic" ve "geodesic_inverse" fonksiyonları, ortodrom eğrisi uzunluğu için ise "distCosine" fonksiyonu kullanılmıştır.

Rotalar, 2B olarak QGIS ve 3B olarak Google Earth Pro yazılımlarıyla görselleştirilmiştir. 2B görselleştirme için, R yazılımında güzergâhlar boyunca sabit bir uzunluk seçilerek (örnek harita için 0.2 mm'ye karşılık olarak 2.9 km aralıkla) nokta sıklaştırması yapılmıştır. Bu amaçla, jeodezik eğri için "geodesic" fonksiyonu kullanılmıştır. sonra Daha bu nokta koordinatlarıyla rota çizgisi oluşturulmuştur.

3B görselleştirme için orijinal ve dik inilerek elde edilen güzergâh noktaları, ayrı dosyalar halinde CSV formatına dönüştürülüp Australian Transportation Safety Bureau tarafından yayımlanan ATSB KML Creator uygulamasına aktarılmıştır (URL-4). Bu uygulama ile noktaların coğrafi koordinatları ve ortometrik yükseklikleriyle KML formatlı 3B rota geometrileri oluşturulmuştur.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Güzergâhlara ilişkin hava ve yer mesafeleri Tablo 1'de verilmektedir. Aralarındaki farklar, daha önce açıklandığı gibi rüzgârın etkisinden kaynaklanmaktadır. Uçuş planlarında bulunan yer mesafeleri, güzergâh boyunca jeodezik eğri segment veya 3B segment uzunluğuyla karşılaştırıldığında, kalkış ve varış noktalarına bağlanan segmentler hariç diğerlerinin yakın değerlere (maksimum 1-2 km civarı farklılığa) sahip oldukları görülmüştür. Bu farklılık, yer mesafesinin hız ve zaman bileşenleriyle görece daha kaba hesaplanmasından ve bu mesafenin referans yüzey üzerindeki bir eğri uzunluğuna değil yaklaşık olarak ortalama yükseklikte yatay bir mesafeye karşılık gelmesinden kaynaklanmaktadır. Kalkış ve iniş segmentlerinde ise farklı prosedürlere göre uçağın izlediği dolambaçlı yol, farkı belirgin olarak artırmaktadır. 10 000 m'ye varan uçuş yükseklikleri dikkate alındığında ±100 m aralığında değişen jeoit ondülasyonunun, 3B koordinat ve dolayısıyla uzunluk hesaplamalarına etkisi oldukça az olacaktır. Bu nedenle, çok hassas hesaplamalar gerekmiyorsa, uçağın 3B konumu hesaplanırken ortalama deniz yüzeyinden olan yüksekliği, pratik anlamda elipsoidal yükseklik yerine kullanılabilir.

Tablo 1. Hava mesafeleri ve yer mesafeleri

Kalkış (K)	Varış (V)	Hava mesafesi (km)	Yer mesafesi (km)	
Lefkoşa	Antalya	429.664	433.368	
İstanbul	Ankara	355.584	366.696	
Konya	İstanbul	561.000	557.452	
Samsun	İstanbul	779.692	759.32	
Sivas	İstanbul	774.136	753.764	
İstanbul	Adana	781.881	792.656	
İstanbul	Ordu	861.180	887.108	
İstanbul	Lefkoşa	975.646	820.436	
İstanbul	Trabzon	929.704	964.892	
Şanlıurfa	İstanbul	1088.352	1048.232	
Van	İstanbul	1393.059	1300.104	
Amsterdam	İstanbul	2400.192	2509.46	
İstanbul	Cidde	2527.389	2559.464	
İstanbul	Bişkek	4931.878	3889.200	

Kalkış ve iniş pistlerinin yönleri, uçağın gideceği ya da geldiği yönden farklı olabileceği için uçakların yollarını bir miktar uzatarak dönüş yapmaları gerekebilmektedir. Bu kısma ilişkin koordinat verisi mevcut olmadığı icin hesaplamalarda kalkış noktası ve ilk güzergâh noktası veya son güzergâh noktası ve varış noktası arasındaki elipsoidal 2. temel ödevden hesaplanan segmentler ve 3B segmentler daha kısa olmaktadır. Bunun sonucunda ver mesafesine kıyasla güzergâh uzunluğu daha kısa Dolayısıyla olmaktadır. güzergâh bovunca hesaplanan uzunluklara ilişkin aşağıda verilen istatistiksel değerlerde küçük bir artış olacağı dikkate alınmalıdır.

Rotalara ve en kısa yollara ilişkin elde edilen uzunluklar ve ortalama sapma uzunlukları, Tablo 2'de ve bu değerlerin grafik sunumu Şekil 5'te verilmektedir. Genel küre yerine otalik küre kabulü kullanıldığında beklendiği gibi ortodrom eğrisi uzunlukları, jeodezik eğri uzunluklarına daha

Uçuş Güzergâhı		Ortodrom Eğrisi Uzunluğu (km)		Jeodezik Eğri Uzunluğu (km)		3B Segment Toplam Uzunluğu (km)		Ort. Sapma Uzunlukları (km)	
Kalkış (K)	Varış (V)	Genel küre (K-V)	Otalik küre (K-V)	K-V	Uçuş güzergâhı segment toplamı	Uçuş güzergâhı	Jeodezik eğri güzergâhı	Elipsoit yüzeyi	3В
Lefkoşa	Antalya	311.724	311.850	311.900	351.760	352.774	313.001	32.343	32.379
İstanbul	Ankara	323.039	323.590	323.771	338.333	339.343	324.853	24.605	24.638
Konya	İstanbul	428.130	428.245	428.204	467.024	468.361	429.678	49.343	49.418
Samsun	İstanbul	607.878	609.047	609.430	642.603	644.531	611.368	45.056	45.134
Sivas	İstanbul	654.366	655.537	655.934	658.176	660.159	657.920	11.373	11.394
İstanbul	Adana	675.178	675.610	675.688	728.559	730.389	677.461	53.059	53.153
İstanbul	Ordu	736.601	738.017	738.487	798.561	800.577	740.647	44.815	44.894
İstanbul	Lefkoşa	736.989	736.698	736.440	802.001	803.827	744.544	26.937	26.978
İstanbul	Trabzon	879.301	880.993	881.554	940.593	942.722	883.830	41.240	41.313
Şanlıurfa	İstanbul	910.884	912.079	912.475	937.368	939.923	915.025	28.605	28.654
Van	İstanbul	1228.472	1230.562	1231.294	1250.815	1253.460	1233.917	24.307	24.349
Amsterdam	İstanbul	2248.479	2250.294	2250.684	2325.293	2330.414	2256.112	44.176	44.258
İstanbul	Cidde	2328.740	2325.219	2323.923	2520.005	2525.082	2328.747	185.358	185.696
İstanbul	Bişkek	3696.062	3703.636	3705.691	3859.589	3866.330	3712.356	96.412	96.255

Tablo 2. Farklı yaklaşımlarla hesaplanan rota uzunlukları ve ortalama dik sapma mesafeleri



Şekil 5. Farklı yaklaşımlarla hesaplanan rota uzunlukları

yakın bir değerde olmaktadır. Jeodezik eğriye göre uzunluk değişim oranı, otalik kürede maksimum binde 0.6, genel kürede ise maksimum binde 2.6 civarındadır. Referans yüzeyindeki (WGS84 elipsoidi) güzergâh uzunluğu ve 3B güzergâh uzunluğu kıyaslandığında maksimum binde 2.6 oranında bir fark meydana gelmiştir. Bu fark, daha çok yükseklik parametresinden ve kısmen ilk durumda elipsoit yüzeyi üzerinde eğri geometrisine ve ikinci durumda ise uzavdaki segmentler (doğru parçaları) seklindeki geometriye dayalı hesaplama yapılmasından kaynaklanmaktadır. Kalkış ve varış noktaları arasındaki toplam güzergâh uzunluğunun, jeodezik eğri uzunluğuna göre artışının medyan değeri %5.7 olup, minimum %0.3 ile Sivas-İstanbul rotasında ve maksimum %11.3 ile gözlemlenmiştir. Lefkosa-Antalya rotasında Mevcut rotaların, güzergâh noktalarına göre jeodezik eğriden ortalama dik sapma miktarları, genel olarak yaklaşık 11-53 km arasında gösterirken, değişkenlik İstanbul-Bişkek 96 İstanbul-Cidde güzergâhında km, güzergâhında ise 185 km civarında olmuştur. Medyan bazında sapma miktarı 42.8 km'dir.

Havacılıkla ilişkili en hassas navigasyon uygulamalarında birkaç metrelik konum doğruluğu fazlasıyla yeterlidir. Jeodezik eğri üzerindeki dik boylarını hesaplarken jeodezik üçgen, Gauss küresi üzerinde Neper formülü ve Sinüs teoremi ile çözülmüştür. Yapılan testlerde, üç köşesinin coğrafi koordinatı bilinen bir jeodezik üçgenin Gauss küresi üzerinde hesaplanan kısa kenarının uzunluğu, bu kenarın koordinatı bilinen iki noktası arasındaki jeodezik eğri uzunluğuyla karşılaştırıldığında, en uzun kenarı 2270.661 km olan bir üçgende sapma miktarının 52.6 cm'yi geçmediği görülmüş ve bu yaklaşım yeterli bulunmuştur (Şekil 6).





Bir rotaya ilişkin 2B ve 3B görselleştirme örneği Şekil 7 ve 8'de verilmiştir. En kısa yolların 2B görselleştirilmesi için hazır çevrimiçi araçlar da bulunmaktadır. İki nokta arasındaki jeodezik eğrinin görselleştirilmesi için URL-3 üzerinden ulaşılabilen Google Maps tabanlı hesaplama ve çizim arayüzü kullanılabilir. Ayrıca yaygın kullanımlı web haritacılığı uygulaması olan Google Maps, yeni bir özellik olarak harita üzerinde iki farklı konum işaretlendiğinde ortodrom eğrisi ve uzunluğunu görüntüleyebilmektedir. Google Earth uygulamasında ise 3B görünüm ve yükseklik profili (boykesit) oluşturulabilmektedir.



Şekil 7. Rotaların 2B görselleştirilmesi: Amsterdam (AMS) - İstanbul (SAW) örneği



Şekil 8. Rotaların 3B görselleştirilmesi: Amsterdam (AMS) - İstanbul (SAW) örneği

6. SONUÇ

Bu çalışmada uçuş planlarında yer alan rotaların uzunlukları, farklı yaklaşımlara göre kalkış ve varış noktaları veya güzergâh noktaları kullanılarak referans yüzeyler üzerinde ve 3B uzayda hesaplanmış ve en kısa yollarla karşılaştırılmıştır. Ek olarak, rotalar 2B ve 3B görselleştirilmiştir. Hesaplamalar, küre yüzeyinde, elipsoit yüzeyinde ve 3B uzayda olmak üzere üç farklı biçimde yapılmıştır. Mevcut rotalara ilaveten, referans yüzeyleri üzerindeki en kısa yollar da hesaplamalara dâhil edilmiş ve aralarındaki uzunluk farkları ve ortalama sapmalar elde edilmiştir. Havacılık uygulamalarında, jeodezik uygulamalarla karşılaştırıldığında gereksinim duyulan konum ve yükseklik doğruluğu daha düşüktür ve bu çalışmada jeodezik uygulamalarda kullanılan yardımcı küre yaklaşımına yönelik gösterilmistir. kısıtlamaların esnetilebileceği Ayrıca en kısa yol hesaplamalarında, otalik küre yaklaşımının jeodezik eğriye daha yakın uzunluk değerleri vermesi nedeniyle genel küreye alternatif olarak pratik hesaplamalarda dikkate alınabileceği değerlendirilmektedir. Gelecek calışmalar, ucuşlar esnaşında kaydedilmiş daha yüksek çözünürlüklü (daha sık noktalı) verilerle gerçekleştirilebilir. Böylece uçuş planında yer almayan, kalkış ve iniş boyunca alınan yollar (manevralar) da hesaplamalara dâhil edilebilir.

TEŞEKKÜR

Uçuş verilerinin temini ve bu konudaki bilgilendirmeleri için Pegasus Havayolları Navigasyon Birimi Müdür Yardımcısı Geomatik Yüksek Mühendisi Mete Ercan Pakdil'e teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Bildirici, İ.Ö. (2016). Kartografya Ders Notu. Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Bossler, J.D., Snay, R. (2010). Datums and Geospatial Reference Systems. J.D. Bossler, J.B. Campbell, R.B. McMaster, C. Rizos (ed.) Manual of Geospatial Science and Technology, 2nd Edition. CRC Press, Boca Raton.
- FAA (2011). **Flight Navigator Handbook**. U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, FAA-H-8083-18.
- FAA (2015). Instrument Procedures Handbook.U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, FAA-H-8083-16A.
- FAA (2016). **Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge**. U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, FAA-H-8083-25A.
- Jekeli, C. (2012). Geometric Reference Systems in Geodesy. Ohio State University, Ohio, USA.
- Karney, C.F.F. (2011). **Geodesics on an Ellipsoid of Revolution**. Technical report, SRI International, E-print arXiv: 1102.1215v1.
- Karney, C.F.F. (2013). Algorithms for Geodesics. Journal of Geodesy 87, 43-55.
- Kimerling, A.J., Buckley, A.R., Muehrcke, P.C., Muehrcke, J.O. (2016). Map Use: Reading, Analysis, Interpretation, 8th edition. ESRI Press, Redlands.

- Koçak, E. (1999). Harita Projeksiyonları. ZKÜ Yayınları, Zonguldak.
- Kralicek, T. (2009). Python Language Bindings for 3D Airspace Visualization. Bachelor's Thesis, Institute of Informatics, Masaryk University, Brno.
- Nastro, V., Tancredi, U. (2010). Great Circle Navigation with Vectorial Methods. Journal of Navigation 63(3), 557-563.
- Özbenli, E. (2001). Jeodezi-I: Elipsoid, Elipsoid Yerine Kullanılacak Küreler ve Küre Üzerinde Jeodezik Hesaplar, 2. Baskı. K.T.Ü. Müh. Mim. Fak. Yay., Trabzon.
- Simpson, L., Bashioum, D., Carr, E. (1965). Computer Flight Planning in the North Atlantic. Journal of Aircraft 2(4), 337-346.
- Snyder, J.P. (1987). Map Projections Working Manual. US Geological Survey, Professional paper 1395, Washington.
- Torge, W., Müller, J. (2012). Geodesy, 4th edition. Walter de Gruyter, Berlin.
- Uçar, D., İpbüker C., Bildirici, İ.Ö. (2011). **Matematiksel Kartografya: Harita Projeksiyonları Teorisi ve Uygulamaları, 2. Baskı**, Atlas Yayın Dağıtım, Ankara.
- Walwyn, P.R. (1999). The Great Ellipse Solution for Distances and Headings to Steer between Waypoints. Journal of Navigation 52 (3), 421-424.
- URL-1: https://cran.r-project.org/web/ packages/geosphere/index.html (Erişim tarihi: 7 Aralık 2016).
- URL-2: http://earth-info.nga.mil/GandG/ wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_gis.ht ml (Erişim tarihi: 12 Aralık 2016).
- URL-3: http://geographiclib.sourceforge.net/ (Erişim tarihi: 5 Aralık 2016).
- URL-4: https://www.atsb.gov.au/utilities/ atsbkml-creator/ (Erişim tarihi: 19 Aralık 2016).