

DOPPLER ÖLÇÜMLERİNİN OPTİMİZASYONLA YÖRÜNGE TESPİTİNDE KULLANILMASI

Mert Can ARABACI¹
Hatice Merve CİRTİL²
Bahadır ERDENK³
Mert KAYA⁴
Kürşat YENİDOĞAN⁵
Türk Hava Kurumu
Üniversitesi, Ankara

Mehmet Fatih ERTÜRK⁶
İstanbul Teknik Üniversitesi,
İstanbul

Habib
GHANBARPOURASL⁷
Tahsin Çağrı ŞİŞMAN⁸
Türk Hava Kurumu
Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Bu çalışmada, bir amatör uydu yer istasyonundan alınan sinyallerin Doppler kayması ölçümleri ya da bu kaymanın teorik olarak hesaplanmış verileriyle yörünge tespiti yapılması hedeflenmektedir. Yörünge tespiti için hesaplanan gözlem verileri kullanılarak optimizasyon tabanlı yapılan bir başlangıç yörünge tahmini ve bu yörüngeyi diferansiyel düzeltmeye tabi tutulmasıyla alınan sonuçlar incelenmiştir. Çalışma, alçak Dünya yörüngesindeki uyduların yörünge tespitini hedeflemekle birlikte farklı yörünge tiplerindeki uydular için de testler yapılmıştır. Gözlenen sinyaldeki kayma bilgisinin farklı yörüngeler için hesaplanan teorik kayma miktarıyla örtüşmesiyle gözlenen uydunun yörünge bilgisi tayin edilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda yörünge bilinmeyen bir uydunun yalnızca Doppler kayması bilgisi kullanılarak yörüngesinin bir şekilde tespit edilmesi mümkün olmuştur.

GİRİŞ

Uydu sayısı her geçen gün artarken, bu uyduların takip edilmesinin önemi ve zorluğu da artmaktadır. Optik ve radyo temelli farklı uydu takip yöntemleri bulunmasına rağmen sistem hassasiyetinin maliyetle birlikte arttığı da gözlemlenebilmektedir. Hassas verilerin maliyetli olması uzay durum farkındalığı için oldukça kritik olan uydu takip işinin yalnızca bazı hükümetlerin, askeri

¹Öğrenci, Uzak Müh. Böl., E-posta: mert.can.arabaci@stu.thk.edu.tr

²Öğrenci, Uzak Müh. Böl., E-posta: hatice.merve.cirtil@stu.thk.edu.tr

³Öğrenci, Uzak Müh. Böl., E-posta: bahadir.erdenk@stu.thk.edu.tr

⁴Öğrenci, Uzak Müh. Böl., E-posta: s150222055@stu.thk.edu.tr

⁵Öğrenci, Uzak Müh. Böl., E-posta: s150222007@stu.thk.edu.tr

⁶Öğrenci, Savunma Teknolojileri Pr., E-posta: erturkm19@itu.edu.tr

⁷Dr. Öğr. Üyesi, Mekatronik Müh. Böl., E-posta: hghanbarpourasl@thk.edu.tr

⁸Doç. Dr., Uzak Müh. Böl., E-posta: tcsisman@thk.edu.tr

güçlerin ve uzay ajanslarının kontrolüne bırakmaktadır. Fakat bu durum, elde edilen verinin kapalı kalmasına ve doğru bilginin kısıtlandırılmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle özellikle amatör optik ve radyo sistemleriyle yapılabilecek paylaşıma açık, hassas uydu tespit faaliyetleri oldukça önemlidir.

Dünya çapında insanların gerek optik gerekse radyo teknikleriyle, uzay durum farkındalığına katkı sağlama çabası giderek artmaktadır. Bir hobiye dönen bu uğraşın kökenleri Soğuk Savaş dönemlerine dayanmaktadır. 1956 yılında astronom Fred Lawrance Whipple'in önderliğinde "Operation Moonwatch" [Wikipedia, 2020] ismiyle başlayan bu uğraşlar ilk yapay uyduyu tespit etmek için bilim insanlarıyla küresel çapta amatör astronom ve meraklı sivilleri bir araya getirmiştir. Aynı tarihlerde Guier ve ekibi uyduyu farklı bir şekilde gözlemlemeyi deneyerek uydunun sinyallerini yakalamayı amaçladılar. HF bantta yayın yapan uyduyu dinlemek için çalışmaya başlayan radyo amatörleri duydukları "bip" sesinden fazlasıyla etkilenmişti. Guier ve Weiffenbach ise Doppler etkisini bariz bir şekilde hissedebildikleri bu sinyallere farklı bir bakış açısıyla baktılar. Sinyallerdeki Doppler kaymasını inceleyerek, bu verinin yardımıyla uydunun yörüngesinin tespit edilip edilemeyeceğini anlamak istediler. Bunun için Sputnik-1'in tüm geçişlerini kaydedip her geçişin kendine has bir Doppler kayması vardır hipoteziyle çalışmalarını sürdürdüler. Dönemin insanları için inanması güç olan bu çalışmalar sonucunda belirlenen bir başlangıç koşulu için hesaplanan Doppler kayması, başlangıç koşullarının en küçük kareler yakıştırması yöntemiyle güncellenmesi ve gözlemdaki Doppler verisiyle örtüştürülmesinin ardından Sputnik-1'in yörüngesi hassas bir şekilde elde edilmiştir. Bu keşif navigasyon gibi yeni icatlara da kapı açmıştır [Helen, G., 1998].

Optik ve radyo gözlem amatörlerinin yapmaya başladığı uydu takibi Sputnik-1'in fırlatılmasından sonra yapılan tüm çalışmaların ardından yerini 1958'de profesyonel takip sistemlerine bıraktı. Buna rağmen bu fikre olan ilgi hiçbir zaman kaybolmadı. Günümüzde bu akımın öncüleri olarak SeeSat-L ve SatNOGS ağları gösterilebilir. SeeSat-L 1994 yılında, yapılan optik gözlemlerin paylaşılması amacıyla kurulan bir e-posta listesinden ibaret olsa da Dünya çapında birçok kullanıcısıyla ve paylaştığı açık verileriyle uzay durum farkındalığına ciddi katkı sağlamaktadır. Daha çok genç olmasına rağmen bu çalışmanın da çıkış noktası sayılabilecek olan ve 2014'te hayata geçen SatNOGS ise radyo gözlemleri için aktif yüzlerce istasyon kullanmasıyla amatör gözlemlere yeni bir heyecan katmıştır. Bu çalışmanın ilk aşamasında da SatNOGS ağının bir üyesi olan Türk Hava Kurumu Üniversitesi Astronomi Topluluğu bünyesinde ki #510 UTAA-Astro istasyonundan elde edilen verilerin kullanılması planlanmıştır.

Optik sistemler, Dünya üzerinden teleskoplu veya teleskopsuz sensörler ile uyduların görünür geçişlerinin takip edilmesini esas almaktadır. Bu gözlemler, uydunun belirli bir anda gökyüzünde ki açısal bilgisini verirken, mesafe ile ilgili herhangi bir bilgi sağlamaz. Elde edilen açısal bilgiler, gözlem zamanı ve gözlemcinin konumuyla birleşince başlangıç yörünge tespiti yapmak için yeterli veri sağlanmış olur.

Radar ve lidar sistemleriye yön ve mesafe bilgilerinin birlikte elde edilmesine imkan tanıyarak, yörünge tespitinin daha hassas yapılmasını sağlamaktadır. Bu çalışmada olduğu gibi pasif sistemlerin kullanılmasıyla uydulardan gelen sinyallerin Doppler kayması tespit edilebilir. Bu veri aynı zamanda mesafe değişim olarak incelenebilir. Elde edilen verinin kullanımıyla yapılacak olan yörünge tespiti ve düzeltilmesi çalışmaları takip eden süreçte detaylandırılacaktır.

Uzay durum farkındalığı ve yörünge belirleme çalışmalarıyla ilgili daha detaylı bilgi için [Vetter, J. R., 2007]'a başvurulabilir.

YÖNTEM

Bu çalışmada yer istasyonlarından yapılan Doppler gözlemlerinden elde edilen veriler, hem optimizasyonla başlangıç yörünge tespiti hem de diferansiyel düzeltme işlemleri için kullanılacaktır. Bu işlemler için gerekli olan mesafe değişim oranının direkt olarak gözlemlerden ve teorik

hesaplamalardan elde edilmiştir. Elde edilen gözlem verileri ilk olarak başlangıç yörünge tespiti için optimizasyon işlemine, ardından diferansiyel düzeltme işlemine tabi tutularak hassasiyeti arttırmış yörünge tespiti amaçlanmıştır.

Donanım

Uydu sinyallerinin alınacağı Türk Hava Kurumu Üniversitesi bünyesindeki Astronomi Topluluğu Amatör Uydu Yer İstasyonu [THKÜ, 2019] VHF-UHF ve L bantlarında çalışma kapasitesine sahiptir. İstasyon SatNOGS ağına Türkiye’den dahil olmuş ilk üniversite istasyonu olup, 1 adet çapraz Yagi-Uda anteni VHF-UHF ve 1 adet Yagi-Uda anteni ise L-bantta çalışan yönlü antenlere sahiptir. Tasarımı SatNOGS’a ait olan döndürücü sistemiyle gökyüzünde aktif cisim takibi de yapabilmektedir. Aynı zamanda mobil amaçlarla kullanılmak üzere birer adet VHF-bantta turnstile ve VHF-UHF bantta Yagi-Uda anteni de bulunmaktadır. İstasyonun henüz çatı kurulumu tamamlanmadığı için bahsi geçen mobil antenlerin bu çalışmada kullanılmıştır.

Doppler Hesabı ve Eldesi

Doppler, hareketli bir dalga kaynağının ürettiği sinyalin gözlemci tarafından farklı zaman veya konumlarda farklı frekanslarda algılanması olayıdır. Bu durum, hareket sebebiyle dalga kaynağının gözlemlenen frekansındaki değişim olarak kabul edilebilir. Bir ambulansın sirenleri açık olarak hareket etmesiyle, gözlemciye göre yaklaşır ya da uzaklaşır durumda olmasına bağlı olarak sesin farklı algılanması, Doppler kaymasına örnek olarak verilebilir. Doppler etkisi günümüzde astronomi alanında da sıklıkla kullanılmaktadır. Yıldızlar tarafından üretilen elektromanyetik dalgaların frekansındaki kayma değişiklikleri analiz edilerek yıldızın konumu hesaplanabilmektedir.

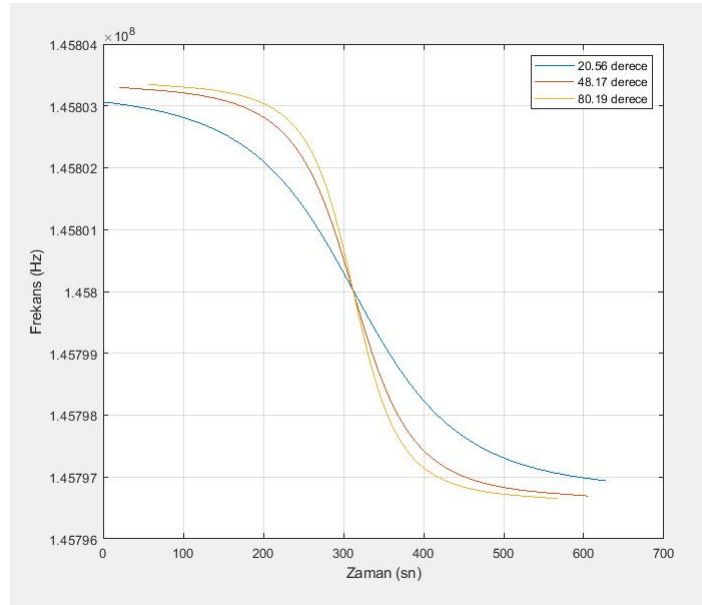
$$f' = \frac{(v \pm v_0)}{(v \mp v_s)} f \quad (1)$$

Eşitlik (1) hız değişiminin frekans değişimi ile olan bağlantısını göstermektedir. Burada f' dalganın gerçek frekansı, f gözlemlenen frekans, v ışık hızı, v_0 gözlemcinin hızı, v_s kaynağın hızını temsil etmektedir.

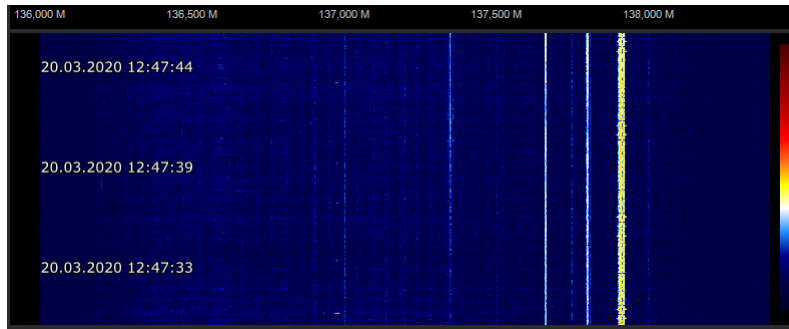
Frekansın zamana bağlı değerinin grafiği Doppler eğrisini oluşturur. Ölçülen frekans sabit olmayacak bir şekilde azalır. Frekansın değişim hızı geçişin en başında düşük olmasına rağmen, uydunun en yakın olduğu an bu değişim en yüksek seviyededir. Ayrıca uydunun yüksekliğine bağlı olarak frekanstaki değişimler farklılık göstermektedir. Örneğin, Uluslararası Uzay İstasyonu’nun, UUI, farklı azami yüksekliğe sahip geçişleri, (1) ile hesaplanmıştır ve Şekil-1’de gösterilen frekans değişim grafiği elde edilmiştir. Paylaşılan bu şekilde ölçülen frekansların teorik frekans, kayıpsız ölçüm, olduğu unutulmamalıdır. Burada görüleceği üzere uydunun yüksekliği ile frekans değişimindeki artış miktarı doğru orantılıdır.

Bir süre boyunca zaman-frekans eksenlerinde kaydedilen sinyalin ve sinyalin genlik bilgisinin olduğu grafikler “şelale grafiği” olarak bilinmektedir. Bu grafik, zaman içinde elde edilen sinyalin genliğini göstermek için renk çizelgesi yardımıyla renklendirilir. Şekil-2’de kırmızı güçlü bir sinyali temsil ederken, siyah ve koyu mavi ise arka plan gürültüsünü temsil etmektedir.

Yapılan gözlemlerin kayıtları STRF programı yardımıyla veri noktalarına dönüştürülür. STRF yazılımı yapılan gözlem ya da gözlemlerin Doppler eğrilerinin, belirli bir andaki uydunun konum bilgilerini içeren İki Satır Veri Seti’nin (İVS) ileletilmesiyle oluşturulan Doppler eğrileriyle kıyaslayarak sinyalin kaynağı olan uydunun ve yörüngesinin tespit edilebildiği bir yazılımdır [Bassa, C., 2014].



Şekil 1: Uluslararası Uzay İstasyonu'na ait farklı azami yüksekliklerde Doppler eğrisi



Şekil 2: Zaman-frekans değişimini gösteren şelale grafiği [Bassa, C., 2014]

STRF, IQ, eş evreli ve dört evreli, formatta aldığı sinyallerle zaman dalgalı spektrogramlar üretmektedir. Bu işlem sırasında kullanıcının tanımladığı sayıda spektral kanala Hızlı Fourier Dönüşümü uygulamaktadır. Dönüşümle birlikte sinyalin şelalesini çizmek mümkün hale gelmiştir.

Çizilen bu sinyal şelalesinden istenilen sinyaller noktasal olarak seçilir. Seçilen noktaların zaman, frekans, sinyal kazancı ve gözlemcinin COSPAR (İng. Committee on Space Research) numarası bilgileri kaydedilir. Elde edilen verilerdeki tarih, frekans ve gözlemci bilgileri bu çalışmanın girdilerini oluşturmaktadır.

Ayrıca sinyallerin kaydedildiği SDR# programı üzerinden elle frekans-zaman kayıtlarının alınması da mümkündür.

Parçacık Sürü Optimizasyonu

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), sürü halinde hareket eden bazı hayvanların sergiledikleri hareketlerin, sürüdeki diğer bireyleri etkilediğinin ve sürünün amacına daha kolay ulaştığının gözlemlenmesinden esinlenilerek Kennedy ve Eberhart tarafından 1995 yılında geliştirilmiş bir optimizasyon algoritmasıdır [Eberhart, R. C. ve Kennedy, J. , 1995].

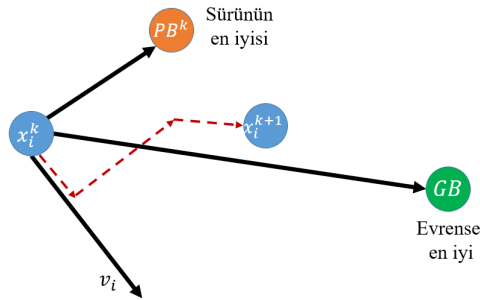
PSO'da da bir sürü ve bu sürünün bireyi olan parçacıklar bulunmaktadır. Her parçacığın bir pozisyonu ve bu pozisyonunda bir değeri vardır. Parçacıkların pozisyonlarının güncellenmesi ise

hızlarıyla ölçülür. Bir parçacığın hızı bir önceki iterasyondaki hızı, sürünün ve şimdiye kadar gelen tüm sonuçların, evrenin, en iyisinin rastgele belirlenmiş kat sayılarla çarpılarak toplanmasıyla elde edilir. Bulunan hız değeriyle güncellenen yeni pozisyonun değeri hesaplanıp sürünün ve evrenin en iyi sonuçlarıyla kıyaslanarak bu değerlerde gerektiği takdirde güncelleme yapılır. Hızın belirlenmesinde rastgele faktörler etkili olsa da zamanla parçacıklar belirli noktalara doğru yakınsamaya başlar. Bu süreç belirlenen kriterlere ulaşılan kadar devam eder.

Doğrusal olmayan bir problemin optimizasyonu sırasında parçacıklar değerlerine göre ya yerel ya da evrensel en iyi noktaya yakınsayabilirler. Yerel en iyi noktaların fazla olması evrensel en iyiyi bulmayı zorlaştırır. Bu durum dağlık bir arazideki en alçak vadiyi ararken bilinen vadilerin en alçağının aslında bilinmeyen başka bir vadiden daha yüksekte bulunması durumuyla açıklanabilir. Parçacıkların yerel en iyiye yakınsaması durumunda mevcut pozisyon bilgileri yanıltıcı olmaktadır. PSO, gradyan tabanlı diğer optimizasyon tekniklerinin aksine bu yerel noktalara daha düşük ihtimalle yakınsamaktadır. Yerel yakınsamanın önüne geçmek için sürü boyutunu arttırıp keşif potansiyelini arttırmak, çaprazlama ya da mutasyon gibi yöntemler mevcut olmakla birlikte takip eden süreçte detaylarına değinilecek olan mutasyon yöntemi bu çalışma için seçilmiştir.

Eşitlik (2)'de k sürüsündeki i parçacığının hız vektörünün hesaplanmasında kullanılan formül verilmiştir. ω_{opt} eylemsizlik faktörü, c_1 parçacığın kendi katsayısı ve c_2 ise sürüye bağlı katsayısıdır. r_1 ve r_2 ise rastgele atanmış sayılardan oluşmaktadır. $\vec{PB}$ sürünün, $\vec{GB}$ ise evrenin en iyi noktalarıdır. Ardından (3) ile parçacığın yeni pozisyonu belirlenmiş olur.

$$\vec{v}_{i+1}^k = \omega_{opt} \vec{v}_i^k + c_1 r_1 (\vec{PB}^k - \vec{x}_i^k) + c_2 r_2 (\vec{GB} - \vec{x}_i^k) \quad (2)$$



Şekil 3: Bir parçacığın hareketi

$$\vec{x}_{i+1}^k = \vec{x}_i^k + \vec{v}_{i+1}^k \quad (3)$$

Bu çalışmada parçacığın pozisyonu uydunun Kepler elemanlarının bilgisini içermektedir. Durum vektörü yerine yörünge elemanları üzerinden optimizasyonun yapılma sebebi ise parçacığın yörüngesel kısıtlarının belirlenmesinde kolaylık sağlamasıdır. Yörünge elemanlarının ya da başka bir deyişle parçacığın pozisyonunun sınırlandırılmasında bir takım mantıksal ve doğal sınırlar kabul edilmiştir. Belirlenen ve belirlenemeyen sınırların detaylı incelenip hedef uydu için arama kümesini daraltacak doğru seçimler yapılması, optimizasyonun performansını fazlasıyla arttırarak doğru yörüngeye yakınsamayı sağlayacaktır. Burada kabul edilen ve genellikle doğru sonuca yakın yerlere yakınsamayı sağlayan kabuller ise yarı büyük eksen, dışmerkezlik ve eğiklik hakkındadır. Bu kısıtlamalar bildirinin uygulamalar kısmında tartışılmıştır.

Algoritma-(1) oluşturulurken [Yarpiz, 2016] ve [Salehizadeh, S. M. A. ve Yadmellat, P., 2009]'dan yararlanılmış ve bu iki kaynaktan tek bir algoritma oluşturulmuştur. Kullanılan ana algoritma

[Yarpiz, 2016]'dan, mutasyon yapısı ise [Salehizadeh, S. M. A. ve Yadmellat, P., 2009]'dan uyarlanmıştır.

$$\vec{v}_{i+1}^k = \omega_{opt} \vec{v}_i^k - L(\vec{r}_1(\vec{P}\vec{B}^k - \vec{x}_i^k) + \vec{r}_2(\vec{G}\vec{B} - \vec{x}_i^k)) \quad (4)$$

Mutasyon sürünün yerel en iyi noktalara yakınsamasını engellemek amacıyla Algoritma-(1)'de görüldüğü gibi belirli bir süre boyunca $\vec{G}\vec{B}$ 'nin değişmemesi durumunda aktif olmaktadır. Sürünün ikiye bölünerek bir kısmının (2), bir kısmının (4) ile güncellenmesiyle sürünün keşif kapasitesi artırılır ve olası yerel noktaya yakınsama durumu önlenmiş olur. [Salehizadeh, S. M. A. ve Yadmellat, P., 2009]'da mutasyon, azami iterasyon sayısının %75'ine ulaşıldıktan sonra aktif olmaktadır. Fakat bu çalışmada yüksek iterasyon sayısından ötürü iterasyonların %75'inin beklenmesi durumunda sürü yerel en iyiye yakınsayacağı için mutasyon işlevselliğini yitirecektir. Bu sebeple mutasyon, belirli bir iterasyon sayısına ulaşıldığında değil $\vec{G}\vec{B}$ 'nin uzun süre değişmeden kalmasından sonra aktif olmaktadır.

Parçacığın değeri, parçacığın mevcut pozisyonunda sahip olduğu yörünge elemanlarının gözlem zamanları için ilerletilerek Doppler eğrisinin elde edilmesi ve bu Doppler eğrisindeki noktaların gözlem sonucu elde edilen Doppler eğrisine göre alınan ortalama karekök, RMS, değeridir. Dolayısıyla optimizasyonun amacı bu RMS değerini sıfıra yaklaştırmaktır.

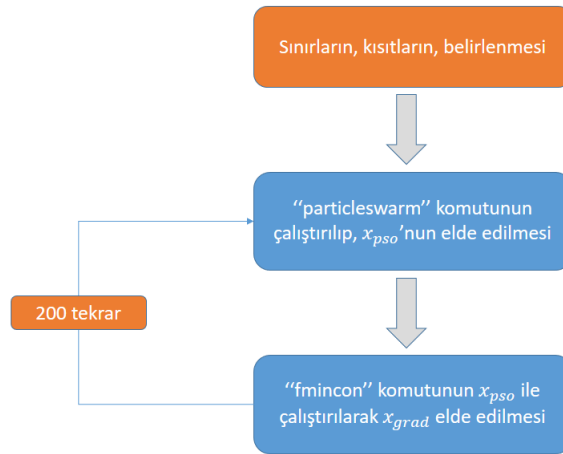
Guier ve Weiffenbach'ta çalışmalarında, [Guier, W. H. ve Weiffenbach, G. C., 1958] ve [Guier, W. H. ve Weiffenbach, G. C., 1959], benzer mantıkla eğri yakıştırma yöntemini kullanarak yörünge elemanlarını tespit etmeye çalışmıştır. Onların uydu hakkında uyguladıkları kısıtlar daha katı olduğu için iyi bir başlangıç yörüngesi tahminiyle en küçük kareler yöntemini kullanmaları mümkün olmuştur. Bu çalışmada ise uydu hakkında bilgiler en alt seviyede tutularak başlangıç yörüngesi optimizasyonlar yardımıyla oluşturulmuş ve daha sonra en küçük kareler yöntemi [Vallado, D. A., 1997] ile diferansiyel iyileştirme yapılmıştır.

Alınan sonuçlarda bazı yerel en iyilere yaklaşımlar söz konusu olsa da PSO'nun defalarca çalıştırılmasıyla doğru noktaya yakınsamış sonuçlar çoğunluğu oluşturduğu için doğru yörünge elemanları tespit edilebilmektedir. Fakat bu sonuçların hassasiyeti istenilen düzeyde değildir. Yine yapılan testlerde görülmüştür ki PSO yüksek dışmerkezlik ya da yarı büyük eksen uzunlukları için doğru sonuçlara yakınsamada zorlanmaktadır. Bu durum yörünge elemanları için oluşturulan sınırların daraltılması ile önlenmektedir. Dolayısıyla ileri çalışmalarda bu sınırların daha detaylı incelenerek mümkün olduğunca az bilgiyle daraltılması optimizasyon çalışmasının performansını olumlu yönde etkileyecektir.

Algoritma 1 PSO Algoritması

— Sınırlar belirlenir —
 $a_{min-max}$, $e_{min-max}$, $\Omega_{min-max}$, $i_{min-max}$, $\omega_{min-max}$ ve $\theta_{min-max}$ tanımlanır
Hız sınırları ise ilgili yörünge elemanın ± 0.2 katıdır
— Sürünün ivmelenme kat sayıları belirlenir —
 $\kappa = 1$, $\phi_1 = 2.05$, $\phi_2 = 2.05$
 $\phi = \phi_1 + \phi_2$
 $\chi = \frac{2\kappa}{|2 - \phi - \sqrt{\phi^2 - 4\phi}|}$
 $\omega_{opt} = 1$, $\omega_{opt_{damp}} = 0.9$
 $c_1 = \chi\phi_1$, $c_2 = \chi\phi_2$
Azami iterasyon sayısını, maxit belirlenir
Bilinmeyen değerlerin 4-10 katı olacak şekilde sürü boyutu belirlenir

- 1: **for** Sürüdeki her bir parçacık için **do**
- 2: Altı klasik yörünge elemanı belirlenen sınırlar içerisinde rastgele tanımlanır
- 3: Parçacığın değeri hesaplanır
- 4: $\vec{PB}$ ve $\vec{GB}$ ile kıyaslanıp gerekli güncelleme yapılır
- 5: **end for**
- 6: **for** k=1'den maxit'e kadar **do**
- 7: **if** $\vec{GB}$ son 50 iterasyonda değişmemişse **then**
- 8: mutasyon=1
- 9: **else**
- 10: mutasyon=0
- 11: **end if**
- 12: **for** i=1'den sürü boyutu kadar **do**
- 13: **if** mutasyon=1 **then**
- 14: $\gamma = rand()$
- 15: **if** $i < \gamma$ (sürü boyutu) **then**
- 16: $\vec{v}_i^{k+1} = \omega_{opt}\vec{v}_i^k + c_1\mathbf{r}_1(\vec{PB}^k - \vec{x}_i^k) + c_2\mathbf{r}_2(\vec{GB} - \vec{x}_i^k)$
- 17: **else**
- 18: $L = 2 \left(1 - \frac{k}{\text{maxit}}\right)$
- 19: $\vec{v}_i^{k+1} = \omega_{opt}\vec{v}_i^k - L(\mathbf{r}_1(\vec{PB}^k - \vec{x}_i^k) + \mathbf{r}_2(\vec{GB} - \vec{x}_i^k))$
- 20: **end if**
- 21: **else**
- 22: $\vec{v}_i^{k+1} = \omega_{opt}\vec{v}_i^k + c_1\mathbf{r}_1(\vec{PB}^k - \vec{x}_i^k) + c_2\mathbf{r}_2(\vec{GB} - \vec{x}_i^k)$
- 23: **end if**
- 24: Hız değerlerinin sınırları kontrol edilir ve sınırları geçen sayılar sınırlara çekilir
- 25: $\vec{x}_i^{k+1} = \vec{x}_i^k + \vec{v}_i^{k+1}$
- 26: Pozisyon değerlerinin sınırları kontrol edilir ve sınırları geçen sayılar sınırlara çekilir
- 27: Yeni parçacığın değeri hesaplanır, $\vec{PB}^k$ ile $\vec{GB}$ ile kıyaslanarak gekirse bu değerlerde güncelleme yapılır
- 28: **end for**
- 29: $\omega_{opt} = \omega_{opt}\omega_{opt_{damp}}$
- 30: **end for**



Şekil 4: Kullanılan optimizasyonların akış grafiği

Azami iterasyon sayısının 2000 olduğu 30 testte PSO'dan gelen sonuçların uygulamalar bölümünde değinileceği üzere genellikle diferansiyel düzeltme işlemleri için yeterince iyi bir başlangıç değeri olmadığı da görülmüştür. Bu sebeple MATLAB'in Optimizasyon Araç Kutusu kullanılarak PSO'dan gelen sonuçlar gradyan tabanlı optimizasyona girdi olarak verilmiştir. Burada yazılan PSO kodu çalışma süresi bakımından MATLAB'in "particleswarm" fonksiyonuna göre daha yavaş çalıştığı için uzun süreli hesap yapmaya izin vermemektedir. Bu zaman problemini çözebilmek için "particleswarm" komutu da çalışmada kullanılmıştır. Şekil-4'te görülen prosedür ile iki optimizasyon yöntemi art arda 200 defa çalıştırılmış ve uygulama kısmında incelenen sonuçlar elde edilebilmiştir. Bu fonksiyonlar için kullanılan ayarlar ise Şekil-5'te görülebilmektedir.

"fmincon" ayarları	"particleswarm" ayarları
<pre> Default properties: Algorithm: 'interior-point' CheckGradients: 0 ConstraintTolerance: 1.000000000000000e-06 Display: 'final' FiniteDifferenceStepSize: 'sqrt(eps)' FiniteDifferenceType: 'forward' HessianApproximation: 'bfgs' HessianFcn: [] HessianMultiplyFcn: [] HonorBounds: 1 MaxFunctionEvaluations: 3000 MaxIterations: 1000 ObjectiveLimit: -1.000000000000000e+20 OptimalityTolerance: 1.000000000000000e-06 OutputFcn: [] PlotFcn: [] ScaleProblem: 0 SpecifyConstraintGradient: 0 SpecifyObjectiveGradient: 0 StepTolerance: 1.000000000000000e-10 SubproblemAlgorithm: 'factorization' TypicalX: 'ones(numberOfVariables,1)' UseParallel: 1 </pre>	<pre> Default properties: CreationFcn: @pswcreationuniform Display: 'final' FunctionTolerance: 1.000000000000000e-06 HybridFcn: [] InertiaRange: [0.100000000000000 1.100000000000000] InitialSwarmMatrix: [] InitialSwarmSpan: 2000 MaxIterations: '200*numberOfVariables' MaxStallIterations: 20 MaxStallTime: Inf MaxTime: Inf MinNeighborsFraction: 0.250000000000000 ObjectiveLimit: -Inf OutputFcn: [] PlotFcn: [] SelfAdjustmentWeight: 1.490000000000000 SocialAdjustmentWeight: 1.490000000000000 SwarmSize: 'min(100,10*numberOfVariables)' UseParallel: 1 UseVectorized: 0 </pre>

Şekil 5: MATLAB Araç Kutusu'ndan kullanılan fonksiyonların mevcut ayarları

Diferansiyel Düzeltme

Diferansiyel düzeltme, başlangıç yörünge tespitleriyle yapılan yörünge tahminlerinin düzeltilerek Algoritma-(2)'de olduğu gibi hata payının düşürülmesini amaçlamaktadır. Bir uydunun yörüngesini tanımlamak için ya durum vektörünün, $\vec{D}(\vec{r}, \vec{v})$, ya da Kepler elemanlarının, $(h, e, i, \Omega, \omega, \theta)$, altı yörünge değişkeni olacak şekilde bilinmesi gerekmektedir. Diferansiyel düzeltmede bilinen bu altı değişken, yapılan gözlemlerle ilişkilendirilerek düzeltilmiş yörünge elemanları elde edilmektedir. Gözlemsel veri, uydunun farklı anlardaki açılal bilgileri, gözlemciye olan mesafesi ya da bu çalışmada ki gibi mesafe değişim oranı da olabilmektedir.

$$\vec{X}_{nominal} = [r_{x_0} \ r_{y_0} \ r_{z_0} \ v_{x_0} \ v_{y_0} \ v_{z_0}] \quad (5)$$

Eşitlik (5)'de $\vec{X}_{nominal}$ durum vektörünü, r_x , r_y , r_z uydunun pozisyon vektörünün bileşenlerini, v_x , v_y , v_z uydunun hız vektörünün bileşenlerini temsil etmektedir. $\vec{X}_{nominal}$, PSO'da olduğu gibi gözlem zamanları için ilerletilmiş ve o anlardaki mesafe değişim oranları hesap edilerek $\dot{\rho}_{gözlem(N \times 1)}$ oluşturulur.

$$\tilde{b} = [\dot{\rho}_{gözlem(N \times 1)} - \dot{\rho}_{hesaplanan(N \times 1)}] \quad (6)$$

Eşitlik (6)'da $\tilde{b}$ artık matrisi, $\dot{\rho}_{gözlem}$ Doppler etkisinden elde edilen mesafe değişim oranlarını, $\dot{\rho}_{hesaplanan}$ güncellenmiş durum vektörlerinden elde edilen mesafe değişim oranlarını, N ise gözlem sayısını temsil etmektedir.

$$\mathbf{A} = \frac{\partial g_{gözlem}}{\partial \vec{X}_0} \approx \frac{f(\vec{X}_{nominal} + \delta \vec{x}) - f(\vec{X}_{nominal})}{\delta \vec{x}} \quad (7)$$

Diferansiyel düzeltmenin en kritik elemanı olan $\mathbf{A}$, kısmi türev, matrisi (7) ile oluşturulmaktadır. Eşitliğin sol tarafında bulunan kısmi türev işlemini yapabilmek için ileri yönlü fark metodu kullanılmıştır. Bu sayede ilerletme işlemi merkezi farklar yöntemine göre daha az sayıda tekrarlanmış ve işlem süresinden de tasarruf edilmesi sağlanmıştır [Vallado, D. A., 1997]. Buradaki $\delta \vec{x}$, (8) ile tanımlanmıştır.

$$\delta \vec{x} = \vec{X}_{nominal} * 0.01 \quad (8)$$

$\vec{X}_{nominal}$ 'in iterasyon sonucunda güncellenme miktarı ise (9) ile hesaplanmaktadır. Burada bulunan $\mathbf{W}$ matrisi gözlem verilerinin gürültü bilgilerinin olduğu diagonal bir matristir. Bu çalışmada gözlem verilerinin gürültüsü tespit edilmediği için $\mathbf{W}$ birim matris kabul edilerek (9), (10) şeklinde güncellenerek kullanılmıştır. Birim matris kabulüyle oluşan yeni denklemin sonuçları ciddi bir şekilde değiştirmedeği [Vallado, D. A., 1997]'da görülmektedir.

$$\delta \vec{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W} \tilde{b} \quad (9)$$

$$\delta \vec{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \tilde{b} \quad (10)$$

Son olarak $\vec{X}_{nominal}$ (10) ile toplanarak yeni $\vec{X}_{nominal}$ oluşturulur. Tüm bu süreç istenilen hassasiyet elde edilene ya da yakınsama gerçekleşene kadar devam eder. Hassasiyet ya da yakınsama durumunun kontrolü için göreceli hata, RMS gibi farklı hata tespit yöntemleri kullanılabilir. Bu çalışmada [Vallado, D. A., 1997]'da olduğu gibi RMS değeri (11) yakınsamanın belirlenmesi için (12) kullanılmıştır.

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \tilde{b}_i^2} \quad (11)$$

$$\left| \frac{\text{RMS}_{\text{eski}} - \text{RMS}_{\text{yeni}}}{\text{RMS}_{\text{eski}}} \right| \leq \text{tolerans} \quad (12)$$

Algoritma 2 Diferansiyel Düzeltme

```

1:  $\mathbf{X}_{nominal}$ 'in tanımlanması
2: Toleransın belirlenmesi
3:  $k = 1$ , conv = 1, tolerans =  $10^{-5}$ 
4: while conv > tolerans do
5:    $\dot{\mathbf{p}}_{hesaplanan} = f(\vec{X}_{nominal})$ 
6:    $\tilde{\mathbf{b}} = \left[ \dot{\mathbf{p}}_{gözlem(N \times 1)} - \dot{\mathbf{p}}_{hesaplanan(N \times 1)} \right]$ 
7:    $\delta \vec{x} = 0.01 \vec{X}_{nominal}$ 
8:    $\dot{\mathbf{p}}_{1.01xhesaplanan} = f(\vec{X}_{nominal} + \delta \vec{x})$ 'in hesaplanması
9:   for j=1'den gözlem sayısı, N, kadar do
10:    for i=1'den değişken sayısı kadar do
11:       $A(:, i) = \frac{\dot{\mathbf{p}}_{1.01xhesaplanan} - \dot{\mathbf{p}}_{hesaplanan}}{\delta \vec{x}}$ 
12:    end for
13:     $\mathbf{ata}_j = \mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 
14:     $\mathbf{atb}_j = \mathbf{A}^T \tilde{\mathbf{b}}_j$ 
15:  end for
16:   $\mathbf{toplaml\_ata} = \sum_{j=1}^N \mathbf{ata}_j$ 
17:   $\mathbf{toplaml\_atb} = \sum_{j=1}^N \mathbf{atb}_j$ 
18:   $\delta \vec{X} = \mathbf{toplaml\_ata} * \mathbf{toplaml\_atb}$ 
19:   $\vec{X}_{nominal} = \vec{X}_{nominal} + \delta \vec{X}$ 
20:   $\text{RMS}_k = \sqrt{\frac{\tilde{\mathbf{b}}^T \tilde{\mathbf{b}}}{N-1}}$ 
21:   $\text{conv} = \left| \frac{\text{RMS}_{k-1} - \text{RMS}_k}{\text{RMS}_{k-1}} \right| \leq \text{tolerans}$ 
22:   $k = k + 1$ 
23: end while

```

UYGULAMALAR

Çalışmada iki farklı yöntemle elde edilmiş gözlem verisinin kullanılmıştır. Bunlardan ilki daha önce belirtildiği gibi Türk Hava Kurumu Üniversitesi Astronomi Topluluğu bünyesinde bulunan Amatör Uydu Yer İstasyonu'ndan yapılan gözlemlerin elle ya da STRF programı vasıtasıyla frekans-zaman bilgisine çevrilerek gerçek gözlem verilerinin elde edilmesi idi. Fakat ilk aşamada kullanılacak olan yöntemin doğruluğunu ispatlamak için ikinci yöntem tercih edilmiş ve gözlem verileri suni olarak oluşturulmuştur. Suni gözlem verileri, belirlenen uydunun güncel IVS'sinin küresel Dünya modelince, gerçek ayrıklık değeri üzerinden ilerletilerek [Curtis, H. D., 2010], 41.0850° Kuzey, 39.3832° Doğu koordinatlarında bulunan gözlemciye göre azami yükseklik açısının 20° üstüne çıktığı ilk geçiş için oluşturulmuştur. Bu geçişin mesafe değişim oranı 10° ve üzeri yükseklik değerlerine göre (13) üzerinden hesaplanmıştır.

$$\dot{\mathbf{p}}_N = \frac{\vec{r}_N - \vec{R}_N}{r_N - R_N} \cdot \vec{v}_N \quad (13)$$

Farklı tip yörüngelerde yakınsama durumunu anlayabilmek adına dört adet uydu hedef olarak seçilmiştir. Bu uyduların başlangıç yörüngeleri ve bu yörüngelerin zamanları Tablo-1'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar UUI için yapılan testler üzerinden değerlendirilmiştir. Her bir uydu için MATLAB Araç Kutusu üzerinden Şekil-4'de ki prosedür uygulanmış olup elde edilen en iyi sonuçlar

yörünge elemanları için Tablo-4'te, konum vektörü için Tablo-5'te, hız vektörü için Tablo-6'da paylaşılmıştır.

Uydu adı	NORAD No.	a (km)	e	Ω ($^\circ$)	i ($^\circ$)	ω ($^\circ$)	θ ($^\circ$)	İVS zamanı
UUI	25544	6797.3239	0.0001128	91.0487	51.6401	7.3517	352.7633	20221.20025503
NOAA-19	33591	7229.2044	0.001298	229.1645	99.1957	288.9491	71.1680	20222.43813291
Molniya 1-53	13070	68754.1832	0.7441	311.6925	62.3603	276.8869	352.7633	20222.36821551
Express MD2	38745	8518.0033	0.2206	338.5851	49.8869	172.2323	187.8422	20221.55306048

Tablo 1: Hedef uyduların başlangıç yörüngeleri ve İVS zamanları

Optimizasyonun sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için yörünge elemanlarının bazı kısıtlamalara tabi tutulması gerekmektedir. Çalışma, alçak Dünya yörüngesindeki uyduları hedeflediği için yerberi ve yeröte noktaları 200 – 2000 km irtifa aralığındaki uydular için kabaca 6500 ve 8500 km olarak belirlenmiştir. Bu değerler için olası en büyük yar büyük eksen uzunluğu 15000 km, dışmerkezlik değeri ise 0.1333 olarak hesaplanabilir. [Guier, W. H. ve Weiffenbach, G. C., 1959]'da belirtildiği gibi ilk olarak dairesel yörüngeler için hesap yapılmak istenmiş ve dışmerkezlik 0 kabul edilerek yarı büyük eksen uzunluğu 6500 – 8500 km arasına çekilmiştir. Aynı şekilde uydunun ileri, prograde, veya geri, retrograde, hareketi ile eğiklik açısının sınırları 0 – 90 veya 90 – 180 derece arasında kabul edilmiştir. Bu kabul ile birlikte optimum noktanın aynı yörüngenin zıt yönlü hareketinde gelmesi engellenmiştir.

Kullanılan PSO kodu bu sınırlar dahilinde daha önce belirtilmiş ayarlarla 50 bireyli bir sürü için 2000 azami iterasyon sayısı ile 30 defa çalıştırılmıştır. Alınan en iyi RMS değeri Tablo-2'de "En iyi PSO" adıyla sunulmuştur. Bu iterasyonların ortalama RMS değeri ise 53.2770 gelmektedir. Burada görülebileceği gibi PSO yeterince hassas sonuç verememiştir. Kullanılan kodun özellikle işlem zamanı olarak çok maliyetli olması sebebiyle fazla sayıda çalıştırılması mümkün olamamaktadır. Bahsedilen zaman problemini çözebilmek için MATLAB'in Optimizasyon Araç Kutusu'ndaki "particleswarm" komutu kullanılarak 200 defa çalıştırılmıştır. Bu sonuçların ortalama RMS değeri 758.374 iken en iyi sonuç "Matlab PSO" adıyla Tablo-2'ye eklenmiştir. Görüldüğü üzere en iyi sonuçlar geliştirilen PSO koduna benzer gelmektedir. Komut zaman bakımından fazla sayıda çalıştırılmaya imkan tanısa da tolerans değerlerinin düşük olması ve mutasyon gibi tekniklerin kullanılmamasından ötürü sonuçları hala yeterince hassas değildir.

Test Çeşitleri	RMS (km/s ²)	a (km)	e	Ω ($^\circ$)	i ($^\circ$)	ω ($^\circ$)	θ ($^\circ$)	$\omega + \theta$ ($^\circ$)
Gerçek Değerler	0	6797.3239	0.0001128	91.0487	51.6401	7.3517	352.7633	0.1150
En iyi PSO	33.5190	6882.7849	0	52.7564	52.3585	83.9685	232.7027	316.6712
En iyi MATLAB PSO	23.2622	6839.6043	0	113.9495	64.7159	128.4201	228.7715	357.1917
En iyi MATLAB Gradyan	0.0978	6796.4076	0	91.1522	51.6913	152.1694	207.6454	359.8148

Tablo 2: Optimizasyonlardan elde edilen yörüngelerin Kepler elemanları

Bu noktada optimizasyon tekniklerinin birlikte kullanılarak daha hassas sonuç alınabileceği üzerinde durularak, yine MATLAB Araç Kutusu'nda bulunan "fmincon" komutunun yöntem kısmında belirtilen ayarlarla gradyan tabanlı optimizasyonda kullanılması kararlaştırılmıştır. Her çalıştırmada PSO'dan gelen sonuçların başlangıç noktası olduğu ve yörünge elemanları için aynı sınırlara sahip olduğu durumda alınan sonuçların oldukça hassas olduğu görülmüştür. Dairesel yörünge kabulünden dolayı herhangi bir dışmerkezlik değeri bulunmayan fakat RMS değeri 0.0978 çıkan sonucu Tablo-2'de görebilirsiniz.

Genetik ve gradyan tabanlı optimizasyon yöntemlerinin birlikte kullanılmasıyla elde edilen sonuç dışmerkezlik tahmini için diferansiyel düzeltmeye tabi tutulduğunda alınan sonuçlar Tablo-3'de bulunmaktadır. Diferansiyel düzeltmenin yakınsama toleransı 10^{-5} olarak tanımlanmıştır. Düzeltmeye verilen dört sonuçtan yalnızca birisi başarıyla yakınsamış, diğerleri hata vererek düzeltme sürecinden çıkmıştır. Bu sebeple diferansiyel düzeltmenin, verilen başlangıç değerine göre sonuç verebildiği fakat düşük RMS'li başlangıç değerinin iyi bir başlangıç tahmini için referans

alınamayacağı sonucuna ulaşılmıştır. Diferansiyel düzeltme işleminin iyi başlangıç olarak tanımladığı kriter ise sonraki çalışmalarda incelenecektir.

Test Çeşitleri	RMS (km/s ²)	a (km)	e	Ω (°)	i (°)	ω (°)	θ (°)	$\omega + \theta$ (°)
Gerçek Değerler	0	6797.3239	0.0001128	91.0487	51.6401	7.3517	352.7633	0.1150
En iyi PSO	—	—	—	—	—	—	—	—
En iyi MATLAB PSO	1.9076	6814.8966	0.002469	93.8964	52.7811	108.3800	254.2681	2.6481
En iyi MATLAB Gradyan	—	—	—	—	—	—	—	—

Tablo 3: Diferansiyel düzeltmeden sonra

Takip eden tablolarda aynı yöntemlerle fakat farklı yörünge tiplerindeki uydular incelenmiş ve “En iyi MATLAB Gradyan” sonuçları listelenmiştir. En yüksek dışmerkezlik değerine sahip olan Molniya 1-53 uydusu için uygulanan kısıtlarda bir takım düzenlemeler yapılmış, olası en uç yerberi ve yeröte noktaları 6500 – 200000 km olarak kabul edilmiştir. Bu değerlere karşılık gelen azami dışmerkezlik değeri ise 0.9370 olarak hesaplanmıştır. Buna rağmen optimizasyon kodunun arama kümesi çok geniş olduğu için 200 iterasyon yerine 25 iterasyon yapılarak en iyi sonuç alınmıştır.

Uydu adı	RMS (km/s ²)	a (km)	e	Ω (°)	i (°)	ω (°)	θ (°)	$\omega + \theta$ (°)
Uİİ	0	6797.3239	0.0001128	91.0487	51.6401	7.3517	352.7633	0.1150
	0.09778	6796.4076	0	91.1522	51.6913	152.1694	207.6454	359.8148
NOAA-19	0	7229.2044	0.001298	229.1645	99.1957	288.9491	71.1680	0.1171
	0.00000001194	7235.7385	0	229.0974	99.1796	181.7058	179.4342	0.0114
Molniya 1-53	0	68754.1832	0.7441	311.6925	62.3603	276.8869	352.7633	269.6502
	19.5314	27347.7763	0.7605	310.2337	72.3646	272.9800	102.4620	375.4421
Express MD2	0	8518.0033	0.2206	338.5851	49.8869	172.2323	187.8422	0.0745
	0.3587	8519.4081	0.2240	237.6580	57.2400	243.4523	188.0347	71.4870

Tablo 4: Hedef uyduların MATLAB Gradyan ile bulunan en iyi yörüngelerinin Kepler elemanları üzerinden karşılaştırılması

Uydu adı	RMS (km/s ²)	r (km)	r_x (km)	r_y (km)	r_z (km)
Uİİ	0	6796.5633	-132.8566	6795.2562	10.6967
	0.09778	6796.4076	-123.0483	6795.2718	-17.2382
NOAA-19	0	7226.1646	-4726.8890	-5465.6896	14.5789
	0.00000001194	7235.7385	-4754.2017	-5452.8233	142.1146
Molniya 1-53	0	17654.1934	-6187.2219	-5366.8227	-15639.2469
	19.5314	13794.7669	9437.9949	-9432.2293	3500.4137
Express MD2	0	10369.6255	9656.8796	-3778.0555	10.3117
	0.3587	10398.2909	2741.5587	-5643.8512	8291.8787

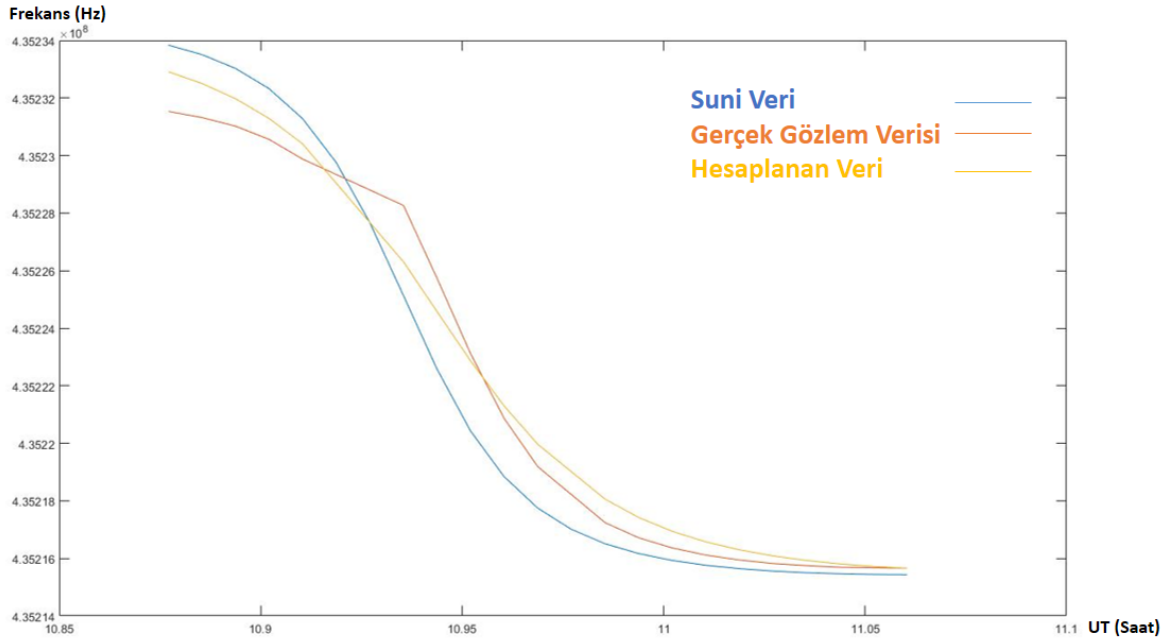
Tablo 5: Hedef uyduların MATLAB Gradyan ile bulunan en iyi yörüngelerinin konum vektörleri üzerinden karşılaştırılması

Uydu adı	RMS (km/s ²)	v (km/s ²)	v_x (km/s ²)	v_y (km/s ²)	v_z (km/s ²)
Uİİ	0	7.6586	-4.7518	-0.1025	6.0053
	0.09778	7.6582	-4.7468	-0.0707	6.0093
NOAA-19	0	7.4286	-0.8942	0.7808	7.3331
	0.00000001194	7.4221	-0.7981	0.8867	7.3256
Molniya 1-53	0	6.2737	4.2718	-4.5869	0.2654
	19.5314	6.5738	3.2375	-1.0593	5.6224
Express MD2	0	5.4848	1.0861	3.3670	4.1913
	0.3587	5.4662	3.5056	3.9929	1.2832

Tablo 6: Hedef uyduların MATLAB Gradyan ile bulunan en iyi yörüngelerinin hız vektörleri üzerinden karşılaştırılması

Yapılan işlemlerin gerçek veri ile test edilmesi için Gurwin Techsat 1B, GO-32, uydusu seçilmiştir. Uydu 98.7°'lik eğikliğe, 812-813 km asgari ve azami irtafalarına sahiptir. 435.225 Mhz merkez

frekansında 30 saniyede bir rutin olarak sinyal göndermektedir. Uydunun 17.08.2020 tarihinde, yerel saatle 13.51'de, 39.9455° Kuzey, 32.6871° Doğu konumlu gözlemci için yaptığı geçiş kaydedilerek frekans zaman verileri oluşturulmuştur.



Şekil 6: GO-32'nin gözlemsel, suni ve optimizasyonla hesaplanan frekans zaman grafikleri

Uydunun merkez frekansının 435.225 Mhz olduğu bilinse de, gözlem sonuçları bunun aksini göstermektedir. Şekil-6'da turuncu grafik gözlem süresince alınan sinyallerden oluşturulmuştur. Mavi grafik ise aynı geçiş için 435.225 Mhz merkez frekansına göre çizilmiş, suni frekans zaman grafiğidir. Açıkça görülebildiği üzere, gözlemin başında 2 kHz mertebesinde olan sinyaller arası fark, geçişin sonunda 1 kHz'in altına düşmüştür. Sarı ile çizilmiş grafik ise optimizasyon sonucunda elde edilmiş frekans zaman grafiğidir. Merkez frekanstaki bu denli büyük değişimler optimizasyonun performansını gözle görülür bir şekilde olumsuz yönde etkilemiştir. Değişimler uydu kaynaklı olabileceği gibi alıcı ya da yazılımsal problemlerden de kaynaklanıyor olabilir.

Test Çeşitleri	RMS (km/s ²)	a (km)	e	Ω (°)	i (°)	ω (°)	θ (°)	$\omega + \theta$ (°)
Gerçek Değerler	0	7191.0386	0.0000465	170.8631	98.7304	186.0731	174.0447	0.1178
En iyi MATLAB Gradyan	0.5694	7150.1339	0	174.5416	90	116.3571	269.9262	26.2833

Tablo 7: GO-32 uydusunun gerçek frekans zaman verisiyle elde edilen MATLAB Gradyan sonucunun Kepler elemanları üzerinden karşılaştırılması

Tablo-7, suni verilerle yapılan testlerdeki aynı yöntemle, GO-32'nin gerçek gözlem verileri kullanılarak oluşturulmuştur. Gözlemlenen frekans zaman noktalarının sayısının az olmasının, RMS'in bir miktar düşük gelmesinde etkili olduğu unutulmamalıdır. Sonuçlarda hesaplanan eğiklik açısının alt sınıra takılması en dikkat çeken hatadır. Tüm elemanlar birlikte incelendiğinde ise uydunun konumunun hassas bir şekilde bulunamadığı fakat yörüngesi hakkında kaba bir fikir oluşturulabildiği görülmüştür. Geçiş sayısını arttırmak, gözlemci sayısını arttırmak, merkez frekansı gerçekten sabit olan bir uydu seçmek ya da merkez frekanstaki değişim miktarlarını bilmek sonuçları daha iyiye götürebilecek geliştirmeler olarak sayılabilir.

SONUÇ

Bu çalışmada bir uydunun gönderdiği sinyalden elde edilebilecek Doppler kayması verileri, genetik ve gradyan tabanlı optimizasyonlarla birlikte kullanılarak yörünge tespiti yapılmıştır. PSO'nun gradyan tabanlı optimizasyon için gerekli olan başlangıç koşullarını oluşturduğu süreçte elde edilen sonuçlar diferansiyel düzeltme ile iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bu süreç suni veriler için hassas yörünge tepitinin mümkün olduğunu, gerçek veriler içinse kaba bir yörünge tahmini yapmanın mümkün olduğunu göstermiştir. Yörünge polar ya da dairesel olup olmasının hassasiyeti etkilediği de gösterilmiştir. Alınan sinyalin merkez frekansının yanlış bilinmesi ya da sabit olmaması durumunda, gerçek veri ile yapılan hesaplamaların hassasiyetinde düşüş gözlemlenmiştir. Takip eden çalışmalarda optimizasyon yöntemlerinin daha da güçlendirilerek veri hassasiyetinin yörüngeden bağımsız bir şekilde artırılması, hassasiyeti artırılmış sonuçlar için gözlemlerin hangi koşullarda yapılacağı, çoklu gözlem ya da çoklu gözlemci durumlarının incelenmesi hedeflenmektedir.

Kaynaklar

- Ali, I., Bobanni, P. G., Al-Dhahir, N., Hershey, J., 2002. *Doppler Applications in LEO Satellite Communication Systems.*, Kluwer Academic Publishers, s. 27-38
- Bassa, C., 2014. *Çevrim içi: Radio Frequency Satellite Tracking.*, Erişilebilir: github.com/cbassa/strf, Erişim tarihi: 18.01.2020
- Curtis, H. D., 2010. *Orbital Mechanics for Engineering Students.*, Elsevier, 3. Baskı
- Eberhart, R. C. ve Kennedy J., 1995. *A New Optimizer Using Particle Swarm Theory.*, Symposium on Micro Machine and Human Science, Japonya, 1995
- Estévez, D., 2019. *Çevrim içi: An Strf Crash Course.*, Erişilebilir: destevez.net/2019/01/an-strf-crash-course/, Erişim tarihi: 13.02.2020
- Guier, W. H. ve Weiffenbach, G. C., 1958. *Theoretical Analysis of Doppler Radio Signals from Earth Satellites.*, Nature, böl.: 181, s. 1525-1526, 31 Mayıs 1958
- Guier, W. H. ve Weiffenbach, G. C., 1959. *The Doppler Determination of Orbits.*, Applied Physics Laboratory The Johns Hopkins University, 1959
- Helen, G., (1998) *Something New Under the Sun: Satellites and the Beginning of the Space Age.*, Springer, 1. Baskı, 1998
- Patton, R. B., 1960. *Orbit Determination from Single Pass Doppler Observations.*, IRE Transactions on Military Electronics.
- Salehizadeh, S. M. A. ve Yadmellat, P., 2009 *Local Optima Avoidable Particle Swarm Optimization.*, IEEE Swarm Intelligence Symposium, Nashville, 2009
- THKU, 2019. *Çevrim içi: Ground Station-Hardware.*, Erişilebilir: ast.thk.edu.tr/en/groundstation-hardware/, Erişim tarihi: 08.01.2020
- Vallado, D. A., 1997. *Fundamentals of Astrodynamics and Applications.*, The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Vetter, J. R., 2007. *Fifty Years of Orbit Determination: Development of Modern Astrodynamics Methods.*, John Hopkins APL Technical Digest, Cilt 27, No:3
- Wikipedia, 2020. *Çevrim içi: Operation Moonwatch.*, Erişilebilir: en.wikipedia.org/wiki/Operation_Moonwatch, Erişim tarihi: 18.02.2020

Yarpiz, 2016. *Çevrim içi: Particle Swarm Optimization (PSO) in MATLAB-Video Tutorial.*,
Erişilebilir: yarpiz.com/440/ytea101-particle-swarm-optimization-pso-in-matlab-video-tutorial,
Erişim tarihi: 23.01.2020