



Multi-objective optimization of remote sensing satellite constellation in terms of maximum revisit time and system total cost in the geography of Türkiye

Ceyhun Tola^{1*}, Utku Mutlu²

¹Technology and Strategy Management Division, Aselsan Inc, 06200, Ankara, Türkiye

²Graduate School, Aeronautics and Astronautics Engineering Doctor of Philosophy Program, Istanbul Technical University, 34469, Istanbul, Türkiye

Highlights:

- Multi-objective satellite constellation optimization
- Parametric simulation with STK via a home-written Matlab script
- Effects of orbital and satellite constellation design parameters on maximum revisit time

Keywords:

- Satellite Constellation
- Revisit Time
- Remote Sensing
- Orbital Mechanics
- Multi-Objective Optimization

Article Info:

Research Article

Received: 08.11.2023

Accepted: 15.09.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1388128

Correspondence:

Author: Ceyhun Tola

e-mail: ctola@aselsan.com.tr

phone: +90 555 218 5627

Graphical/Tabular Abstract

Minimizing not only the total cost but also the maximum revisit time of the constellation is quite essential. This study performs minimization both of the total constellation cost and the maximum revisit time of a Walker Delta constellation system covering a wide area that includes the geography of Türkiye. The optimization workflow is prepared in ModeFrontier environment as it is shown in Figure A at which a Matlab script is used to perform parametrically control the Systems Tool Kit (STK) software that is used to model, to simulate and to calculate the maximum revisit time of the system.

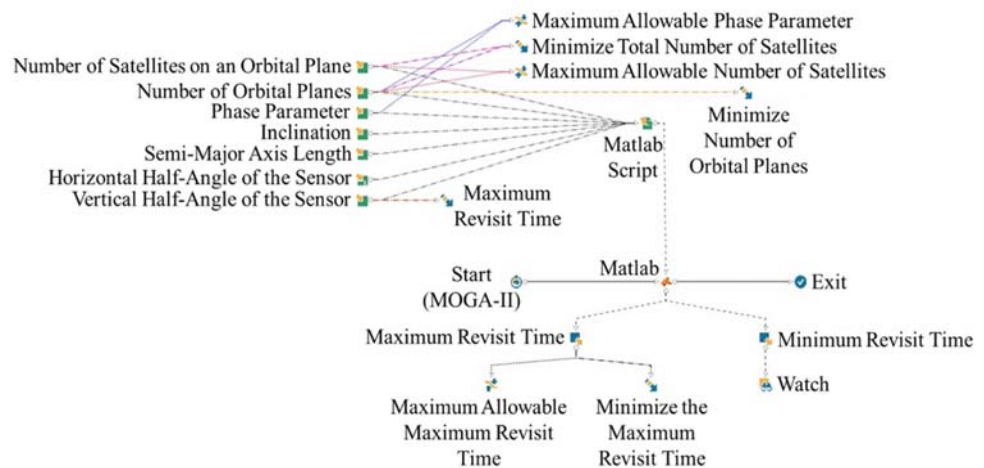


Figure A. Optimization Workflow

Purpose: The aim of this study is to design a Walker Delta satellite constellation covering a wide area that includes the geography of Türkiye, with the objective of collecting data within the shortest possible maximum revisit time and at the lowest possible total cost.

Theory and Methods: A home-written Matlab script was prepared to model and simulate any constellation configuration in STK environment parametrically and to determine the maximum revisit time. The script was integrated into the ModeFrontier software. Multi-Objective Genetic Algorithm method is used to optimize six different optimization variables which are the number of orbital planes, the number of satellites located in one of the orbital planes, the phase parameter, the orbital inclination, the semi-major axis length, and the vertical half-angle of the sensor. The optimization has four objectives: to minimize the total number of satellites, the number of orbital planes, the vertical half-angle of the sensor, and the maximum revisit time.

Results: This work showed that to achieve a maximum revisit time of less than 120 minutes in the region where data is to be collected, there should be a minimum of 33 satellites, at least 11 orbital planes, and a minimum vertical half-angle of 15 degrees for the sensor.

Conclusion: From the Pareto-optimal solution set obtained through optimization, a satellite constellation configuration, with a maximum revisit time of approximately 94 minutes, is equipped with sensors with a 17.2° vertical half-angle and requires 39 satellites distributed across 13 different planes is selected as the most suitable design considering its total cost and maximum revisit time.



Türkiye coğrafyası özelinde uzaktan algılama takım uydu konfigürasyonunun maksimum tekrar ziyaret süresi ve sistem toplam maliyeti açısından çok amaçlı optimizasyonu

Ceyhun Tola^{1*}, Utku Mutlu²

¹Aselsan A.Ş., Teknoloji ve Strateji Yönetimi Sektör Başkanlığı, 06200, Yenimahalle, Ankara, Türkiye

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Uçak ve Uzay Mühendisliği Doktora Programı, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye

ÖNEÇİKANLAR

- Çok amaçlı takım uydu optimizasyonu
- Matlab betiği kullanılarak Systems Tool Kit üzerinde parametrik simülasyon
- Yörünge ve takım uydu tasarım parametrelerinin maksimum tekrar ziyaret süresi üzerine etkisi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 08.11.2023

Kabul: 15.09.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1388128

Anahtar Kelimeler:

Takım uydu,
tekrar ziyaret süresi,
uzaktan algılama,
yörünge mekaniği,
çok amaçlı optimizasyon

ÖZ

Afet, savunma ve istihbarat konuları özelinde bir bölgedeki değişimi mümkün olduğunca kısa süre içerisinde tespit etmek kritik öneme sahip olduğundan, bu amaçla tasarlanan takım uydu sistemlerinin maksimum tekrar ziyaret süresini mümkün olduğunca azaltmak gerekir. Çalışma kapsamında, Türkiye coğrafyasını barındıran geniş bir bölgeden mümkün olduğunca kısa maksimum tekrar ziyaret süresinde veri toplayan ve mümkün olduğunca düşük toplam maliyete sahip bir Walker Delta takım uydu konfigürasyonunun elde edilmesi hedeflenmiştir. Takım uydu konfigürasyonlarını kurgulayarak maksimum tekrar ziyaret süresini Systems Tool Kit yazılımına parametrik olarak hesaplamak amacıyla bir Matlab betiği oluşturulmuş ve bu betik ModeFrontier yazılımı içerisine entegre edilerek Çok Amaçlı Genetik Algoritma yöntemini kullanan bir optimizasyon döngüsü hazırlanmıştır. Optimizasyonun 4 amacı bulunmakta olup bunlar: toplam uydu sayısının, yörünge düzlem sayısının, algılayıcı sensörün düşey yarı açısının ve maksimum tekrar ziyaret süresinin minimize edilmesidir. Çalışma sonucunda, veri toplanmak istenen bölgede maksimum tekrar ziyaret süresinin 120 dakikanın altında kalması için toplam uydu sayısının en az 33, yörünge düzlem sayısının en az 11 ve algılayıcı sensörün düşey yarı açısının en az 15 derece olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Optimizasyon sonucunda elde edilen pareto-optimal çözüm kümesi içerisinden hem toplam maliyet hem de maksimum tekrar ziyaret süresi bakımından tatmin edici sonuçlara sahip olan bir takım uydu konfigürasyonu seçilmiştir.

Multi-objective optimization of remote sensing satellite constellation in terms of maximum revisit time and system total cost in the geography of Türkiye

HIGHLIGHTS

- Multi-objective satellite constellation optimization
- Parametric simulation with STK via a home-written Matlab script
- Effects of orbital and satellite constellation design parameters on maximum revisit time

Article Info

Research Article

Received: 08.11.2023

Accepted: 15.09.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1388128

Keywords:

Satellite constellation,
revisit time,
remote sensing,
orbital mechanics,
multi-objective optimization

ABSTRACT

Minimizing the maximum revisit time of satellite constellations is crucial for the rapid detection of changes, especially in disaster, defense and intelligence contexts. This study aims to design a Walker Delta satellite constellation to cover Türkiye's geography, collecting data with short revisit times and low costs. A Matlab script was created to calculate the maximum revisit time parametrically in the Systems Tool Kit software by configuring satellite constellation configurations, and this script was integrated into the ModeFrontier software to create an optimization loop using the Multi-Objective Genetic Algorithm method. The optimization has four objectives: minimizing the number of satellites, the number of orbital planes, the vertical half-angle of the sensor, and the maximum revisit time. As a result of the study, it was concluded that to achieve a maximum revisit time of fewer than 120 minutes in the region where data is to be collected, there should be a minimum of 33 satellites, at least 11 orbital planes, and a minimum vertical half-angle of 15 degrees for the sensor. A satellite constellation configuration was chosen from the optimized Pareto-optimal solution set, meeting cost and revisit time criteria.

1. Giriş (Introduction)

Uzaktan algılama, bir bölge hakkındaki bilgilerin bir mesafeden elde edilmesidir. Hava ve uydu platformlarında kullanılan uzaktan algılama sensörleri ile yansıyan veya yayılan enerjinin tespit edilerek kaydedilmesi sayesinde gezegenlerin gözlemi yapılmaktadır. 1957 yılında ilk yapay uydu olan Sputnik 1'in uzaya gönderilmesi ile uydular kullanılarak uzaktan algılama görevlerinin yapılabileceği bir çağ başlamış ve bundan sonra birlerce yer gözlem uydusu uzaya gönderilmiştir [1]. Günümüzde, yer gözlem uyduları verileri kullanılarak dünyadaki iklim değişikliği, afetler, su kaynakları, ekoloji, sağlık ve hava kalitesi, savunma ve istihbarat analizleri gerçekleştirilmektedir [2-4]. Afetler, savunma ve istihbarat konularında uzaktan algılama verisinin istenilen bölgeden tekrar elde edilme süresi bir diğer deyişle uyduların bölgeyi tekrar ziyaret süresi kritik öneme sahiptir. Tekrar ziyaret süresi, dünya üzerindeki aynı konumun bir uydu tarafından yeniden gözlemlenebilmesi için geçen süredir.

Değişim tespiti, aynı bölgeye ait farklı zamanlarda alınmış uzaktan algılama verisi analiz edilerek gerçekleştirilmektedir. Afet durumu olmasa bile uzaktan algılama verileri incelenerek potansiyel riskler belirlenebilir. Afet durumlarında ise afet bölgesinden daha kısa zaman aralıkları ile veri elde edilmesi sayesinde alınacak önlemler veya yapılacak işlemlere karar verilmesi kolaylaşmaktadır [5]. Barış ve savaş durumlarında anlık strateji geliştirmek veya daha doğru bir harekât planlaması yapmak amacıyla uzaktan algılama verilerinin kısa sürelerde elde edilerek analiz çalışmalarının yapılması sonucunda olası riskler azaltılabilir veya tamamen bertaraf edilebilir. Bir gözlem takım uydusuna ait uzaktan algılama verilerini daha yüksek frekansta (daha kısa zaman aralıklarıyla) elde edebilmek için uydular tarafından yer küre üzerinde ilgilenilen bölgenin tekrar ziyaret süresinin azaltılması gerekmektedir. Bu sürenin azaltılması, optimal yörünge parametrelerine sahip bir takım uydu oluşturularak sağlanabilir. Uydulardaki sensörlerin teknik özellikleri ve uydu irtifası, yörünge eğikliği gibi yörünge parametreleri tekrar ziyaret süresini etkilemektedir. Tekrar ziyaret süresi tek bir değere bağlı olmadığı için istenilen sonuca ulaşmak amacıyla bu işlem optimizasyon problemi olarak ele alınmaktadır. Optimizasyon problemleri sayesinde birden fazla değişkenin algoritmalar kullanılarak hedeflenen amaçlara en uygun şekilde seçilmesi mümkündür.

1945 yılında Arthur C. Clarke [6] yer sabit yörüngeye yerleştirilen uydular ile küresel iletişimin sağlanabileceğini ortaya koymuş ve ilk defa takım uydu kavramını literatüre kazandırmıştır. Küresel ve bölgesel kapsama için Streets of Coverage (SOC), Walker Delta ve Walker Star takım uydu modelleri kullanılarak mümkün olan en az toplam uydu sayısı ile ideal takım uyduları oluşturmak amacıyla literatürde çeşitli çalışmalar yürütülmüştür [7, 8]. Yörünge düzlem sayıları ve takım uydudaki uydu sayıları 100 uyduyu geçmeyecek şekilde optimize edilmiş; böylece SOC ve Walker takım uydu modelleri oluşturulmuştur. En düşük genel sistem maliyetini veren takım uydularını belirlemek amacıyla kapsam lokasyonu, fırlatma aracı kapasitesi, yedek strateji, çapraz bağlantı gibi gerçek hayat unsurları incelenmiştir [9]. Luo ve Shu [10] tarafından yürütülen çalışmada, çoklu hedef bölgesini mümkün olan en kısa sürede tekrar ziyaret etmek için oluşturulacak Walker takım uydu konfigürasyonunu belirleyecek optimizasyona dayalı bir yöntem önerilmiştir. Çalışma kapsamında 3 takım uydu parametresine (toplam uydu sayısı, düzlem sayısı, faz parametresi) ait kombinasyonlar tek bir optimizasyon değişkenine indirgenmiş ve bu değişken ile yarı büyük eksen uzunluğu ve yörünge eğikliği parametreleri Genetik Algoritma yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir [10]. Shin vd. [11] tarafından yürütülen çalışmada, takım uydunun daha düşük tekrar ziyaret süresinde süreksiz bölge kapsama problemini çözmek amacıyla en iyi yörünge eğim değerini bulan bir algoritma geliştirilmiş ve Seul için elde edilen yörünge eğim değeri

ile Common Ground Track (CGT) takım uydusu ve Walker takım uydusu oluşturularak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Uydu sayısı azaltıldığında CGT takım uydu modelinin maksimum tekrar ziyaret süresinin Walker takım uydu modeline göre daha kısa olduğu fakat uydu sayısı arttığında Walker takım uydu modelinin maksimum tekrar ziyaret süresinin CGT takım uydu modeline göre daha kısa olduğu ve maksimum tekrar ziyaret süresi bakımından daha başarılı olduğu görülmüştür [11]. Takahashi ve Yamazaki [12] uzaktan algılama ile veri alınmak istenen bölgenin sınırlarındaki belirsizliği (ileride bu sınırlarda değişiklik olması durumunu) hesaba katarak 40° kuzey paraleli ile 40° güney paraleli arasında rastgele seçilebilecek hedef bölgeler için neredeyse sürekli (aralıksız) görüntüleme işlemini gerçekleştirebilen bir Walker takım uydu modeli kurgulamışlardır. Bu amaçla, Systems Tool Kit (STK) ve Matlab yazılımlarından faydalanmışlar ve Çok Amaçlı Genetik Algoritma yöntemi aracılığıyla takım uydu optimizasyonu gerçekleştiren yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımın amacı, 40° kuzey paraleli ile 40° güney paraleli arasında uzun bir süre boyunca %99'dan fazla gözlem oranına sahip bir takım uydu konfigürasyonu kurgulamaktır [12]. Söz konusu çalışmada, uzaktan algılama sisteminin sensörü yönlendirerek algılayabileceği toplam alanı belirleyen görüntüleme açısı değeri, optimizasyon değişkenlerinden biri olarak hesaba katılmış olup; sensörün görüş alanını belirleyen parametreler optimizasyon değişkeni olarak analiz edilmemiştir. Lee [13], uzaktan algılama takım uyduları aracılığıyla gözlem yapılan bölgedeki uydunun hedefe erişim sayısına bağlı olarak dağıtık hedeflerin gözlem önceliğine ve yoğunluğuna göre optimum tekrar ziyaret süresi sağlayan bir yöntem önermiştir. Önerilen yöntem, RGT (Repeat Ground Track) yörüngesinin dinamik modeline dayalı olarak geometrik analiz yöntemi aracılığıyla sensör alanının yaklaşık çözümü ve birden fazla hedef için erişim matrisinin uygulanması sayesinde Walker takım uydu modeline kıyasla tekrar ziyaret süresini önemli ölçüde azaltmıştır [13]. Ayrıca literatürde takım uyduların fırlatma ve yörüngeye yerleştirme maliyetini mümkün olduğunca azaltmaya yönelik bir optimizasyon modeli de geliştirilmiştir [14]. Geliştirilen model, sırası ile görevin uygulanabilirliğini değerlendirme ve optimal planlama olmak üzere 2 aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada verilen kaynaklar ile takım uydunun fırlatma aracından yörüngeye yerleştirme mimarisinin fizibilitesi değerlendirilmiş; ikinci aşamada ise dinamik bir lojistik modeline dayalı olarak takım uydunun yörüngeye yerleştirme mimarisini optimize etmek amacıyla Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama Algoritması kullanılmıştır [14]. Melaku ve Kim [15], dünya gözlemi ve uzaktan algılama amacıyla Doğu Afrika coğrafyasında hizmet vermesi planlanan bir küp takım uydu kümesini, uydu sayısını en aza indirerek maliyeti mümkün olduğunca azaltmak ve aynı zamanda sistemin hizmet ettiği bölgeyi mümkün olduğunca arttırmak için Çok Amaçlı Genetik Algoritma yöntemini kullanarak optimize etmişlerdir.

Literatürdeki çalışmaların hiçbirinde hem sensör boyutu hem yörünge parametreleri eş zamanlı olarak Türkiye coğrafyası özelinde optimize edilmemiştir. Bu çalışma kapsamında, Walker Delta takım uydu modeli kullanılarak 34°- 43° kuzey paralelleri ve 24°- 46° doğu meridyenleri içerisindeki gözlem alanında tekrar ziyaret süresini en aza indirecek mümkün olan en az toplam uydu sayısına, yörünge düzlem sayısına ve sensör görüntüleme alanına sahip bir takım uydu konfigürasyonunun kurgulanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda: Yörünge düzlemlerinin sayısı, her bir düzlemdeki uydu sayısı, faz parametresi, yörünge eğikliği, yarı büyük eksen uzunluğu ve algılayıcı sensörün düşey yarı açısı parametreleri optimizasyon değişkenleri olarak belirlenmiştir. Matlab ortamında STK yazılımını parametrik olarak kontrol edebilen bir betik oluşturularak bu betiğin ModeFrontier yazılımı aracılığıyla çalıştırılması sağlanmış ve böylece Çok Amaçlı Genetik Algoritma yöntemi kullanılarak çok amaçlı bir optimizasyon çalışması yürütülmüştür. Yürütülen çalışmada, hem sensör

boyutu ve yörünge parametrelerini eş zamanlı olarak maliyet etkin şekilde çok amaçlı optimize etme bakımından hem de Türkiye coğrafyası özelinde optimum takım uydur kurma senaryosu inceleme bakımından ilk olma özelliğine sahiptir.

2. Yörünge Parametreleri ve Uzaktan Algılama için Takım Uydur Yapısı (Orbital Parameters and Construction of Satellite Constellation for Remote Sensing)

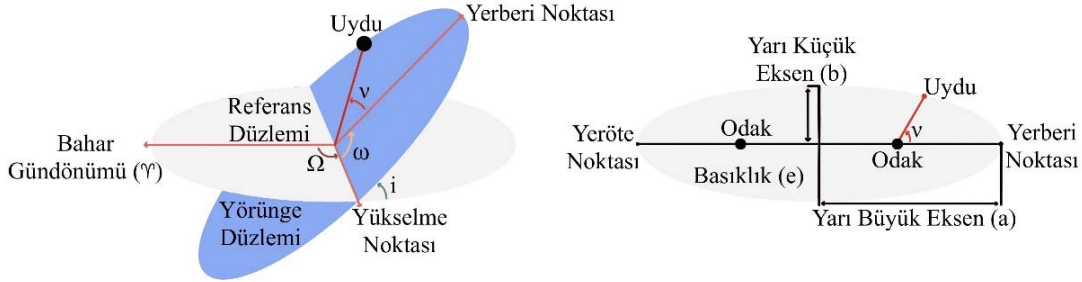
Aynı amacı gerçekleştirmek üzere bütünlük bir sistem olarak görev yapan uydur grubu, takım uydur olarak adlandırılır. Navigasyon, telekomünikasyon, nesnelerin interneti, hava durumu izleme, Dünya gözlemi gibi birçok alan için takım uydular kullanılmaktadır. Dünya üzerinde inceleme yapılmak istenen bölgeden daha kısa süre aralıklarıyla veri elde edilmesi amacıyla farklı uzaktan algılama takım uydularını oluşturulmuştur. Takım uydular tasarlanırken yörünge parametreleri ve uydularda kullanılan sensörlerin teknik özellikleri sayesinde hangi alanların görüntüleneceği, görüntü alanı ve uzaktan algılama verilerinin mekânsal çözünürlüğü belirlenmektedir. Bu sebeple, altı temel yörünge parametresini tanımlamak önemlidir.

Yörünge, bir cismin kütle çekimi nedeniyle başka bir cismin etrafında izlediği yol; yörünge düzlemi ise bir cismin yörüngesinde döndüğü düzlemdir. Kapalı yörüngeler dairesel ve eliptik olmak üzere iki gruba ayrılır. Eliptik yörüngeler iki odağa sahiptir. Uydular bu iki odakta biri etrafında döner. Eliptik yörüngelerde basıklık değeri (e) 0 ile 1 arasındadır. Dairesel yörüngeler için basıklık değeri 0'dır ve yarı büyük eksen ile yarı küçük eksen uzunlukları birbirine eşittir.

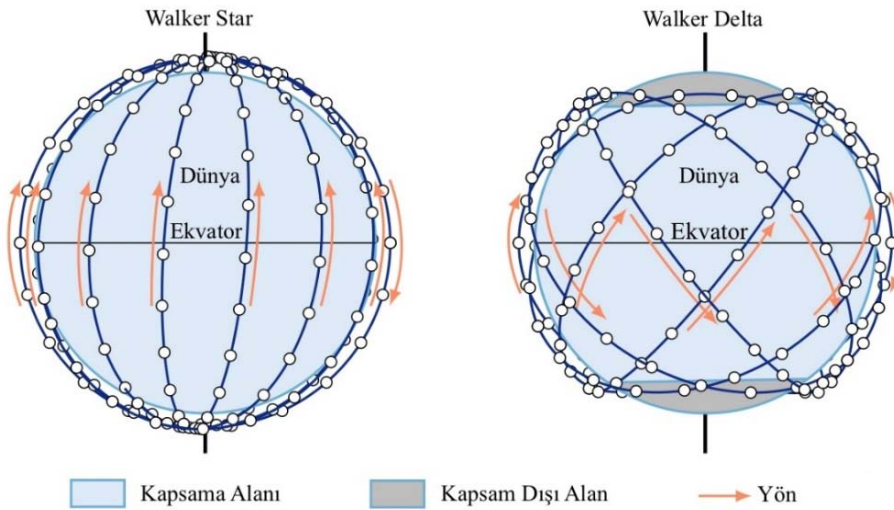
Dairesel yörüngede yarıçap yarı büyük eksene eşittir. Yörünge eğikliği (i), referans düzlem ile yörünge düzlemi arasındaki açıyı; yarı büyük eksen uzunluğu (a), yörüngeyi tanımlayan elipsin büyük eksen uzunluğunun yarısını; yarı küçük eksen uzunluğu (b), yörüngeyi tanımlayan elipsin küçük eksen uzunluğunun yarısını; gerçek anomali (v) yörünge düzleminde, uydunun bulunduğu yer ile yerberi noktası arasındaki açıyı; yükselme noktası açısı (Ω), ekvator düzleminde bahar gündönümü (γ) ile yükselme noktası doğrultusu arasındaki açıyı temsil etmektedir. Bahar gündönümü, kuzey yarı kürede ilkbaharın, güney yarı kürede sonbaharın başlangıcıdır. Yerberi açısı (ω), yörünge düzleminde yükselme noktasıyla yerberi noktası arasındaki açıyı temsil etmekte olup, bahsi geçen bütün yörünge parametreleri Şekil 1'de gösterilmiştir.

Takım uydur modellerinden biri olan Walker takım uydur modeli sıklıkla tercih edilen bir model olup bu modele ait geometriler Şekil 2'de gösterilmiştir.

Walker takım uydur modelinde yörüngedeki uydular dairesel yörüngede, ortak yarı büyük eksen ve ortak yörünge eğikliği parametrelerine sahiptirler. Delta ve Star olmak üzere 2 farklı Walker takım uydur konfigürasyonu mevcuttur. Bu çalışma kapsamında, Walker Delta takım uydur modeli kullanılmıştır. Walker Delta konfigürasyonunda yörünge düzlemleri yükselme noktası açıları (Ω) 360° lik daireyi eşit parçalara bölecek şekilde konumlandırılmaktadır. Yörünge eğikliği (i), yarı büyük eksen uzunluğu (a), takım uydudaki toplam uydur sayısı (T), yörünge düzlem sayısı (P) ve faz parametresi (F) değerleri Walker takım uydusunu oluşturan parametrelerdir.



Şekil 1. Yörünge parametreleri (Orbital parameters)



Şekil 2. Walker takım uydur geometrileri (Walker constellation geometries) [16]

Burada faz parametresi, komşu düzlemlerdeki uydular arasındaki göreceli aralığı belirleyen bir parametredir. Faz parametresi üst sınırı takım uyduda kullanılacak yörünge düzlemlerin sayısından en fazla bir eksik olabilir. Komşu yörünge düzlemlerindeki eşdeğer uydular için gerçek anomalideki derece cinsinden değişim (Δv) Eş. 1'de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$\Delta v = \frac{f \cdot 360}{n_u} \quad (1)$$

Uzaktan algılama, pasif ve aktif algılama olmak üzere ikiye ayrılır. Uzaktan algılama için pasif sensörler güneşten gelen doğal enerjiyi, aktif sensörler ise kendi enerji kaynaklarını kullanırlar. Uzaktan algılama sensörünün parametreleri ve uydunun bulunduğu irtifa, görüntüleme kapasitesini belirlemektedir. Şekil 3'te uzaktan algılama sensörünün görüntüleme geometrisi gösterilmiştir.

Sensörlerin görüntüleme alanı genişledikçe istenilen görüntü çözünürlüğünün sağlanması sensör maliyetini ve boyutunu arttırmaktadır. Buna ilaveten, uzaktan algılama sensörünün görüntüleme alanı tekrar ziyaret süresini de etkilemektedir. İdeal parametreler seçilerek yer gözlem takım uydusu oluşturulmasıyla tekrar ziyaret süresi kısaltılabilir.

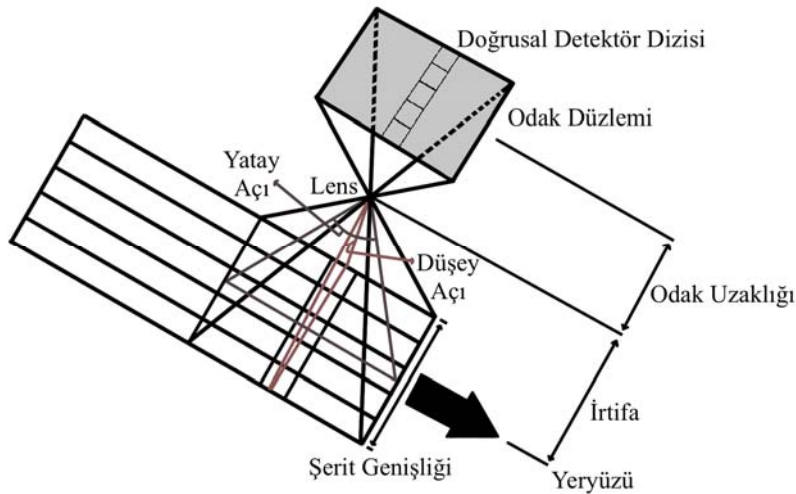
3. Optimizasyon Döngüsü (Optimization Cycle)

Çalışma kapsamında optimize edilen 6 farklı optimizasyon değişkeni: Yörünge düzlemlerinin sayısı, her bir düzlemdaki uydusu sayısı, faz parametresi, yörünge eğikliği, yarı büyük eksen uzunluğu ve algılayıcı sensörün düşey yarı açısıdır. Takım uydusu konfigürasyonları tasarlanırken mümkün olan en az maliyet ile mümkün olan en kısa sürede görev bölgesini tekrar ziyaret etmek (maksimum tekrar ziyaret süresinin minimize edilmesi) oldukça önemlidir. Takım uydusu sisteminde görev yapacak toplam uydusu sayısının artması hem üretim hem de fırlatma maliyetlerini arttırmaktadır. Takım uydusu konfigürasyonundaki uyduların birbirinden farklı yörünge düzlemine yerleştirilmeleri fırlatma maliyetlerini arttırmaktadır. 4 uyduyu aynı yörünge düzlemine tek bir fırlatma aracıyla yerleştirmek mümkün olabileceği gibi 4 farklı fırlatma aracı kullanarak uyduların her birini farklı yörünge düzlemlerine yerleştirmek de mümkündür. Toplam uydusu sayısı ve yörünge düzlem sayısı aynı zamanda takım uydusunun işletileceği coğrafyadaki tekrar ziyaret süresini de ciddi ölçüde etkilediği için bu iki parametre optimizasyon değişkeni olarak belirlenmiş ve toplam maliyeti mümkün olduğunca azaltmak

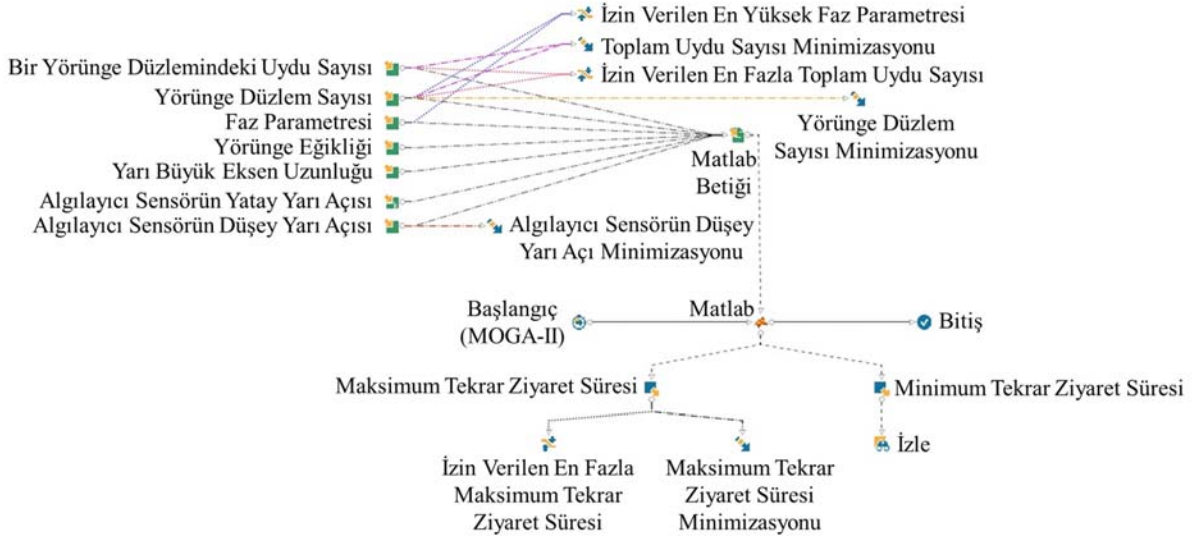
amacıyla optimizasyon hedefleri kapsamında minimize edilmişlerdir. Algılayıcı sensörün açısının artması her bir uydunun daha geniş tarama yapmasına olanak sağlayacağı için takım uydusu konfigürasyonunun tekrar ziyaret süresini kısaltacaktır; ancak, daha büyük sensör hem birim uydusu maliyetinin artmasına hem de kütle artışına yol açacağından, birim uydusu fırlatma maliyetlerinde de artışa sebep olacaktır. Dolayısıyla, algılayıcı sensör boyutunun optimizasyon değişkeni olarak belirlenmesi ve optimizasyon hedefleri kapsamında minimize edilmesi önem arz etmektedir. Yarı büyük eksen uzunluğu, uydunun irtifasını ve dolayısıyla yörüngedeki teğetsel hızını belirleyen bir parametredir. Uyduların daha yüksek irtifadaki bir yörüngeye yerleştirilmesi fırlatma maliyetlerini bir miktar arttırmakta ancak teğetsel hızı da etkilediği için doğru yörünge parametreleri ile ayarlanmış bir takım uydusu konfigürasyonunun maksimum tekrar ziyaret süresini azaltabilmektedir. Bu sebeple, yarı büyük eksen uzunluğu da optimizasyon değişkeni olarak belirlenmiştir. Son olarak, yörünge eğikliği ve faz parametresi de takım uydusu konfigürasyonundaki uyduların dizilimini ve dolayısıyla maksimum tekrar ziyaret süresini belirleyen kritik parametreler olduğu için optimizasyon değişkenleri olarak belirlenmişlerdir.

Optimizasyon akış şeması Şekil 4'te gösterildiği gibi ModeFrontier ortamında kurgulanmıştır. Bahsi geçen optimizasyon değişkenleri Şekil 4'ün sol üstünde yeşil renkli simgeler ile temsil edilmiştir. Optimizasyon değişkenlerinin içerisine algılayıcı sensörün yatay yarı açısı dahil edilmemiş olup bu değer çalışma kapsamında sabit (10°) olarak hesaba katılmıştır.

Kurgulanan optimizasyon döngüsü tek bir Matlab düğüm noktasından ibarettir. Hazırlanan Matlab betiği STK (Systems Tool Kit) yazılımı üzerinde parametrik olarak bir uydusu kümesi modelleme ve bu sayede Türkiye'nin de içerisinde bulunduğu geniş bir coğrafyayı ($34^\circ - 43^\circ$ kuzey paralelleri ve $24^\circ - 46^\circ$ doğu meridyenleri) modellenen uydusu kümesinin hangi sıklıkla tekrar ziyaret edeceğini hesaplamak amacıyla hazırlanmıştır. Bu betik yardımıyla, yer gözlem amacıyla oluşturulan bir uydusu kümesinin önceden tanımlanan bir coğrafyadaki konumları maksimum ve minimum tekrar ziyaret süreleri STK yazılımına hesaplatılarak sonuçlar Matlab ortamında depolanabilir. Burada maksimum tekrar ziyaret süresi, uzaktan algılama uydularından herhangi birinin bir konumu ardışık ziyareti arasında geçen en uzun süreyi; minimum tekrar ziyaret süresi de uzaktan algılama uydularından herhangi birinin bir konumu ardışık ziyareti arasında geçen en kısa süreyi tanımlamaktadır. Maksimum tekrar ziyaret süresinin mümkün olduğunca kısaltılması o bölgeden mümkün



Şekil 3. Uzaktan algılama sensörünün görüntüleme geometrisi (Imaging geometry of remote sensing sensor)



Şekil 4. Optimizasyon akış şeması (Optimization workflow)

olduğunca sık veri alınarak bölgede çıkabilecek bir yangın, oluşabilecek bir afetin ortaya çıkaracağı hasar ya da ortaya çıkabilecek bir askeri tehdidi daha kısa sürede tespit etmek açısından kritik öneme sahiptir. Maksimum tekrar ziyaret süresini azaltırken bunu mümkün olan en az sayıda uydu ve mümkün olan en az sayıda yörünge düzlemi ile gerçekleştirmek hem uyduların toplam maliyetini hem de fırlatma maliyetlerini düşüreceği için kritiktir. Buna ek olarak, uydular üzerinde kullanılan sensörlerin boyutu, uydu başına düşen sensör maliyetini belirlediği için görevde kullanılacak uyduların sensör açılarının da mümkün mertebe azaltılması önem arz etmektedir.

Şekil 4'ten görüleceği üzere, yeşil renk ile temsil edilen optimizasyon değişkenleri ve sabiti Matlab betiğine girdi sağlamakta; Matlab betiği, kontrol ettiği STK yazılımından elde etmiş olduğu maksimum ve minimum tekrar ziyaret süresi sonuçlarını ModeFrontier'e çıktı olarak göndermektedir. Minimum tekrar ziyaret süresi sadece izlenmekte, maksimum tekrar ziyaret süresi ise hem minimize edilecek bir amaç olarak hem de bir kısıt olarak kullanılmaktadır. Ayrıca uydu kümesindeki toplam uydu sayısı, yörünge düzlem sayısı ve her bir düzlemdeki uydu sayısının çarpımı ile elde edilmekte olup bu sayının hem minimize edilmesi hem de en fazla 48 olması için gerekli amaç ve kısıt bilgisi Şekil 4'teki döngü içerisinde tanımlanmıştır. Son olarak yörünge düzlem sayısını ve algılayıcı sensörün açısını minimize etmek için tanımlanan amaç düğümleri de Şekil 4'te gösterilmiştir. ModeFrontier yazılımı içerisinde bulunan Çok Amaçlı Genetik Algoritma (MOGA-II) yöntemi kullanılarak yürütülen optimizasyon sürecinde 4 farklı amaç ve 3 farklı kısıt bulunmaktadır.

Çok Amaçlı Genetik Algoritma yöntemleri, birden fazla amaca sahip optimizasyon problemlerini lokal minimum noktalara takılmadan çözmek amacıyla kullanılan güçlü algoritmalar. Bu algoritmalar, genetik prensiplere dayanan popülasyon tabanlı bir arama ve optimizasyon yaklaşımını benimserler. Çalışma kapsamında tercih edilen MOGA-II, birden fazla amaç fonksiyonunu optimize etmek için geliştirilmiştir ve bu amaçlar arasındaki dengeyi sağlamak için bir çözüm seti üretir. MOGA-II, genetik operatörlerin (çaprazlama, mutasyon) kullanımıyla bir popülasyon oluşturur ve ardından bu popülasyonu, tanımlanmış amaçları optimize eden çözümler üretmek için iteratif olarak iyileştirir. MOGA-II'nin avantajları arasında, çok amaçlı optimizasyon problemleri için etkili bir çözüm elde etme yeteneği, paralel hesaplama ile ölçeklenebilirlik ve çeşitli problemlere

uyarlanabilirlik sayılabilir. MOGA-II, kolay kullanımı sebebiyle farklı gerçek dünya problemlerine başarıyla uygulanmıştır. Bu algoritma test fonksiyonları kullanılarak doğrulanmıştır [17]. MOGA-II algoritması, optimizasyon sürecinde aşağıdaki adımları uygular [18]:

- **Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması:** Başlangıç popülasyonu genellikle rastgele seçilen ya da Sobol Algoritması vb. bir algoritma yardımıyla yarı rastgele seçilen bireylerden oluşturulur. Bu popülasyondaki her bir birey bir çözüm adayını temsil eder.
- **Uygunluk Değerlerinin Hesaplanması:** Oluşturulan her bir çözüm adayı için uygunluk değerleri hesaplanır. Çözüm adaylarının her biri, amaç fonksiyonlarına göre değerlendirilir ve uygunluk değerleri belirlenir.
- **Belirlenen Kriterlere Göre Popülasyonun Seçilmesi:** Çaprazlama ve mutasyon işlemleri için kullanılmak üzere bir sonraki nesil popülasyon belirlenir. Seçim işlemi, MOGA-II'de elitizm stratejisine dayanır. Elitizm stratejisi, her neslin en iyi çözüm adaylarının (uygunluk değeri en yüksek olanların) bir sonraki nesle kopyalanmasını sağlar. Böylece, en iyi çözüm adayları yeni nesle aktarılır ve bu adayların genetik materyali korunur, böylece optimal çözüme hızla yaklaşılabilir.
- **Çaprazlama (Crossover) İşlemi:** Seçilen bireyler arasında çaprazlama işlemi sayesinde, iki veya daha fazla bireyin genetik materyalinin birleştirilmesi; böylece, yeni çözüm adaylarının oluşturulması sağlanır.
- **Mutasyon İşlemi:** Yeni oluşturulan çözüm adaylarında mutasyon işlemi gerçekleştirilir. Mutasyon, bireylerin genetik materyalinde rastgele değişiklikler yaparak çeşitliliği artırmayı hedefler. Böylece optimizasyon sürecinin olası bir lokal minimum noktasına yakınsamasının önüne geçilerek global minimum noktanın bulunması garanti altına alınır.
- **Yeni Popülasyonun Oluşturulması:** Çaprazlama ve mutasyon işlemleri sonucunda elde edilen yeni çözüm adaylarıyla yeni bir popülasyon oluşturulur.
- **Yeniden Uygunluk Değerlerinin Hesaplanması ve Sıralanması:** Yeni oluşturulan popülasyon için uygunluk değerleri hesaplanır ve sıralanır. Bu işlem, sonraki iterasyon için kullanılmak üzere en uygun çözüm adaylarının seçilmesine yardımcı olur.
- **Durdurma Kriterlerinin Kontrol Edilmesi:** Optimizasyon sürecinin belirlenen bir kriteri (örneğin, maksimum iterasyon sayısı) karşılayıp karşılamadığı kontrol edilir. Belirlenen kriter karşılanıncaya kadar optimizasyon süreci devam eder.

Bu çalışma kapsamında odaklanılan optimizasyon problemine benzer problemlerde, literatürde genellikle Çok Amaçlı Genetik Algoritma gibi iteratif yöntemlerden faydalanılmaktadır. Genetik Algoritma Yönteminde, ilk adım başlangıç popülasyonunun oluşturulması olup; kötü bir başlangıç popülasyonu, optimizasyonun daha uzun sürede yakınsamasına yol açabilir. Her bir çözümün oldukça uzun sürdüğü hesaplamalı akışkanlar dinamiği gibi mühendislik analizlerinin gerçekleştirildiği optimizasyon döngülerinde bu durumun önüne geçmek için Etkileşimli Bulanık Bayes Arama Algoritması (Interactive Fuzzy Bayesian Search Algorithm) gibi yöntemler tercih edilebilir. Bu yöntemin detaylarının anlatıldığı bir çalışma Mortazavi tarafından yayımlanmıştır [19]. Ayrıca bu tür alternatif yöntemlerin gerçek bir mühendislik problemi üzerindeki uygulamaları da literatürde mevcuttur [20, 21]. Ancak, bu çalışmada optimizasyon sürecinde gerçekleştirilen her bir çözümün kısa sürede sonuçlanması, MOGA – II çözücüsünün ModeFrontier yazılımı kütüphanesinde bulunması ve söz konusu algoritmanın birden fazla hedefe sahip kompleks problemlerde lokal minimuma takılmadan global minimuma ulaşmadaki başarısı sebebiyle Çok Amaçlı Genetik Algoritma Yönteminin kullanımı tercih edilmiştir. Çalışma kapsamında, takım uydusu ve yörünge mekaniği hesaplamalarının STK yazılımına yaptırılmasının sebebi, söz konusu yazılımın Air Force Institute of Technology gibi bu alanda uzmanlaşmış enstitüler ve üniversiteler tarafından benimsenmiş ve yaygın olarak kullanılıyor olmasıdır [22-25].

Optimizasyonun 4 amacı toplam uydusu sayısının (n_u), yörünge düzlemi sayısının (n_{yd}), her bir uyduda kullanılan algılayıcı sensörün düşey yarı açısının (θ_{syd}) ve maksimum tekrar ziyaret süresinin (t_{max-yz}) minimize edilmesi olup söz konusu amaçlar matematiksel olarak Eş. 2’de ifade edilmiştir.

$$\min_{s \in S} n_u \ \& \ \min_{s \in S} n_{yd} \ \& \ \min_{s \in S} \theta_{syd} \ \& \ \min_{s \in S} t_{max-yz} \quad (2)$$

Optimizasyon süreci 3 farklı kısıt altında yürütülmektedir. Toplam uydusu sayısının 48’i aşmaması gerekmektedir. Bu durum Eş. 3’te ifade edilmiştir.

$$g_1(s) = \frac{n_u}{48} - 1 \leq 0 \quad (3)$$

Maksimum tekrar ziyaret süresinin 120 dakikayı aşmaması gerekmektedir. Bu durum Eş. 4’te ifade edilmiştir.

$$g_2(s) = \frac{t_{max-yz}}{120 \text{ dk}} - 1 \leq 0 \quad (4)$$

Maksimum izin verilen faz parametresi değerinin yörünge düzlem sayısının 1 eksiğinden büyük olmaması gerekmektedir. Bu durum Eş. 5’te tanımlanmıştır.

$$g_3(s) = \frac{n_{yd}-1}{f} - 1 \geq 0 \quad (5)$$

Optimizasyon sürecine dahil edilen 6 değişkene ait alt ve üst sınırlar Tablo 1’de listelenmiş olup optimizasyon sonuçları bu sınırlar içerisinde geçerlidir. Tablo 1’de s_a ve $s_{\bar{u}}$ sırasıyla değişkenlere ait alt ve üst limitleri temsil etmektedir. Optimizasyon değişkenleri ayrık (Discrete) olarak seçilmiştir. Uydu sayısı, yörünge düzlemi sayısı ve faz parametresi tam sayı olmalıdır. Bu parametreler optimizasyon sürecinde 1’er birim hassasiyetle sonuçları tam sayı olacak şekilde değişim gösterebilir. Yörünge eğikliği $0,1^\circ$ hassasiyetle, yarı büyük eksen uzunluğu 1 km hassasiyetle ve algılayıcı sensörün düşey yarı açısı $0,08^\circ$ hassasiyetle değişim gösterebilir. Bu durumun matematiksel ifadesi Eş. 5- Eş. 7’de gösterilmiştir.

$$S = \{s_1 \in \mathbb{Z} \ \& \ s_2 \in \mathbb{R} \mid s_a \leq s_{1,2} \leq s_{\bar{u}}\} \quad (5)$$

$$s_1 = \{n_{yd}, n_u, f, a\} \quad (6)$$

$$s_2 = \{i, \theta_{syd}\} \quad (7)$$

Süreç kapsamında Çok Amaçlı Genetik Algoritma (MOGA-II) yönteminin tercih edilmesinin temel sebepleri problemin birden fazla amaca sahip olması ve seçilen algoritmanın lokal minimuma takılmadan mümkün olduğunca yüksek doğrulukta çözüm üretmedeki başarısıdır.

4. Optimizasyon Sonuçları (Optimization Results)

Optimizasyon çözümü sırasında Intel® Xeon® Silver 4216 2.10 GHz 64 çekirdekli işlemci ve 128 GB belleğe sahip bir iş istasyonu kullanılmış olup 3321 adet takım uydusu konfigürasyonu modellenerek uzaktan algılama simülasyonu yürütülmüştür.

4.1. Bütün Sonuçlarının Dağılımı (Distribution of All Results)

Simülasyonu gerçekleştirilen takım uydusu konfigürasyonlarının 2679 kadarı uygulanabilir (Feasible) alternatifler olup 642 kadarı kısıtlardan en az birini ihlal ettiği için uygulanamaz (Unfeasible) konfigürasyonlar olarak gruplandırılmıştır. Optimizasyon kapsamında elde edilen uygulanabilir ve uygulanamaz çözümlerin saçılma grafiği Şekil 5’te gösterilmiş olup; uygulanamaz çözümler sarı, uygulanabilir çözümler yeşil baloncuklar ile gösterilmiştir.

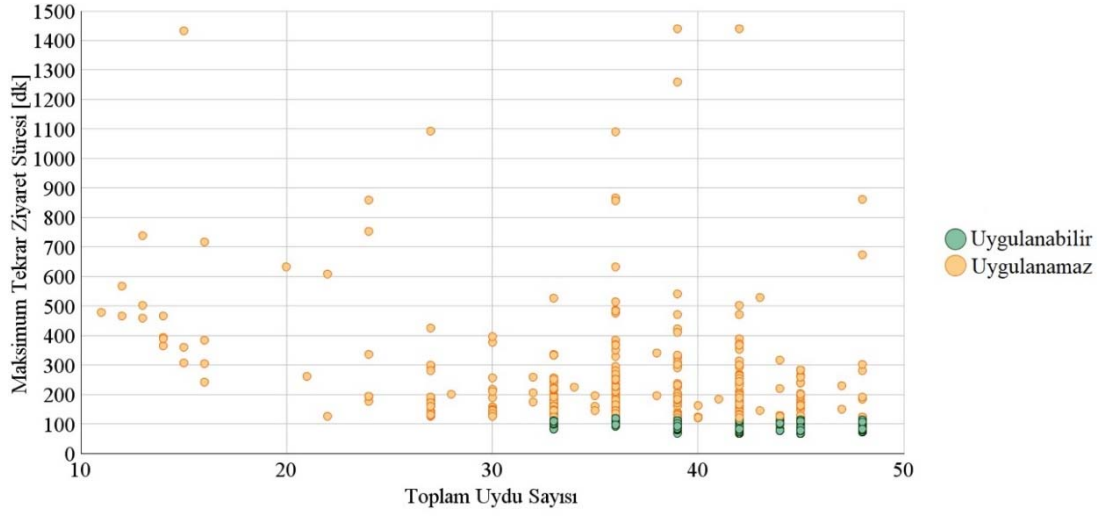
Şekil 5 incelendiğinde toplam uydusu sayısını 33’ün altına düşürmenin maksimum tekrar ziyaret süresini 120 dakikanın üzerine çıkardığı ve bu sebeple uygulanabilir çözüm elde etmeyi engellediği görülmektedir.

4.2. Uygulanabilir Sonuçlarının Dağılımı (Distribution of Feasible Results)

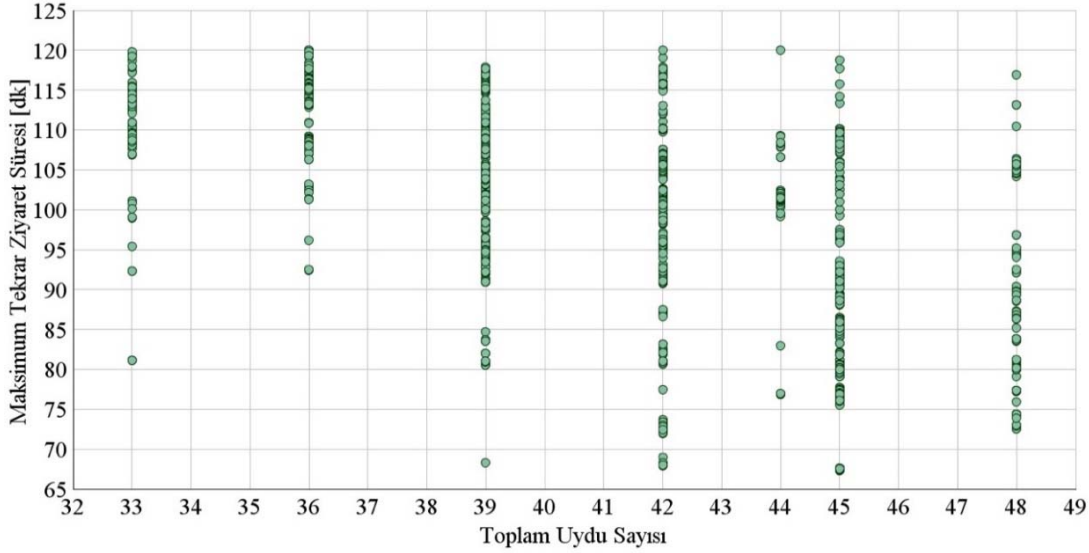
Şekil 5’teki hiçbir kısıtlamayı ihlal etmeyen (uygulanabilir) çözümlerin filtrelenerek yeni bir grafik oluşturulması durumunda Şekil 6’daki dağılım elde edilmektedir.

Tablo 1. Optimizasyon değişkenlerine ait alt ve üst sınırlar (Lower and upper boundaries of the optimization variables)

Değişken	Açıklama	s_a	$s_{\bar{u}}$	Birim
n_{yd}	Yörünge Düzlemi Sayısı	1	48	-
n_{yd-u}	Bir Yörünge Düzlemindeki Uydu Sayısı	1	48	-
f	Faz Parametresi	0	47	-
i	Yörünge Eğikliği	43,0	90,0	°
a	Yarı Büyük Eksen Uzunluğu	6778	6978	km
θ_{syd}	Algılayıcı Sensörün Düşey Yarı Açısı	10,00	30,00	°



Şekil 5. Optimizasyon sonucunda elde edilen bütün çözümlerin saçılma grafiği
(Scatter plot of all solutions obtained from the optimization process)



Şekil 6. Optimizasyon sonucunda elde edilen uygulanabilir çözümlerin saçılma grafiği
(Scatter plot of feasible solutions obtained from the optimization process)

4.2.1. Uygulanabilir sonuçlarının optimizasyon hedefleri ile değişimi (Variation of feasible results with optimization objectives)

Çalışma kapsamında türetilen uygulanabilir çözümlerin yörünge düzlemi sayısı ve algılayıcı sensörün düşey yarı açısı ile olan değişimini inceleyebilmek amacıyla sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilen saçılma grafikleri hazırlanmıştır. Bu grafiklerdeki renk göstergeleri sırasıyla yörünge düzlem sayısı ve algılayıcı sensörün düşey yarı açısını temsil etmektedir.

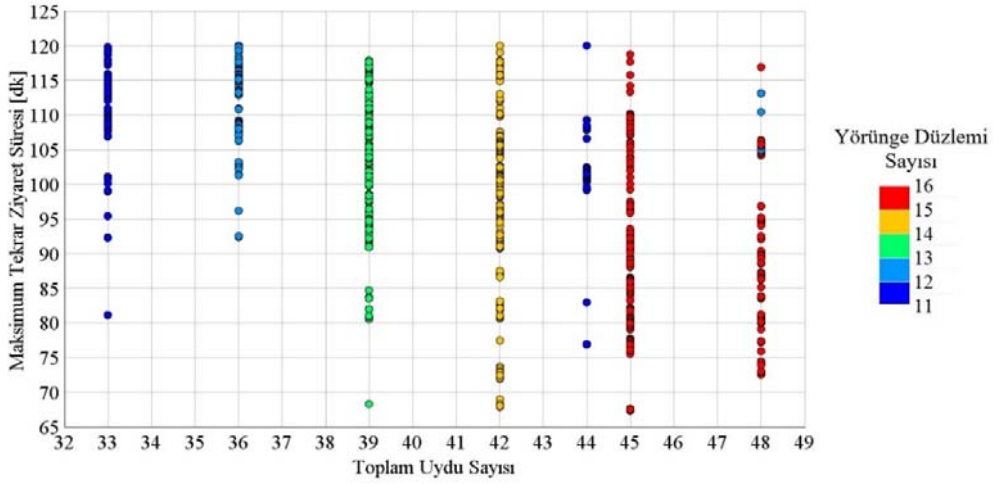
Şekil 7 incelendiğinde uygulanabilir alternatiflerin en az 11 farklı yörünge düzlemine sahip olması gerektiği görülmektedir. Bu durumda elde edilen düşük maksimum tekrar ziyaret süresi 75 – 80 dakika civarında olmaktadır. Bu süreyi daha fazla düşürmek için yörünge düzlemi sayısının artırılması gerekmektedir.

Şekil 8 incelendiğinde uygulanabilir alternatiflerin en az 15° algılayıcı sensör düşey yarı açısına sahip olması gerektiği görülmektedir. Maksimum tekrar ziyaret süresini mümkün olduğunca düşürmek hem

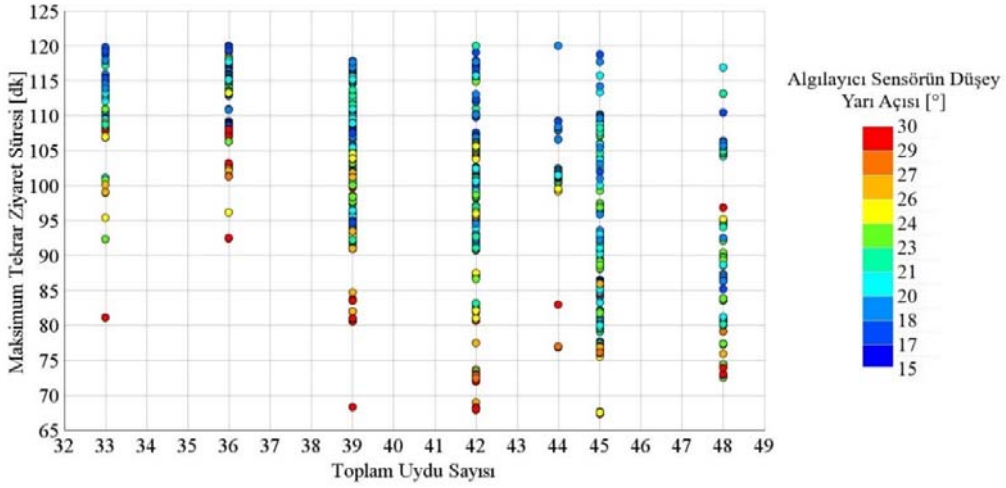
toplam uydu sayısını artırarak hem de daha büyük açı tarayabilen bir sensör kullanarak mümkün olmaktadır. Bu durumu daha detaylı incelemek amacıyla Şekil 9'da sunulan saçılma grafiği hazırlanmıştır. Şekil 9'daki renk göstergesi, maksimum tekrar ziyaret süresini temsil etmektedir. Şekil 9 incelendiğinde toplam uydu sayısı ve algılayıcı sensörün düşey yarı açısını azaltmanın maksimum tekrar ziyaret süresini önemli ölçüde artırdığı görülmektedir. Bu noktada önemli olan mevcut uygulanabilir çözümler içerisinde en iyilerini elde etmektir.

4.3. Pareto-Optimal Sonuçlarının Dağılımı (Distribution of the Pareto-Optimal Results)

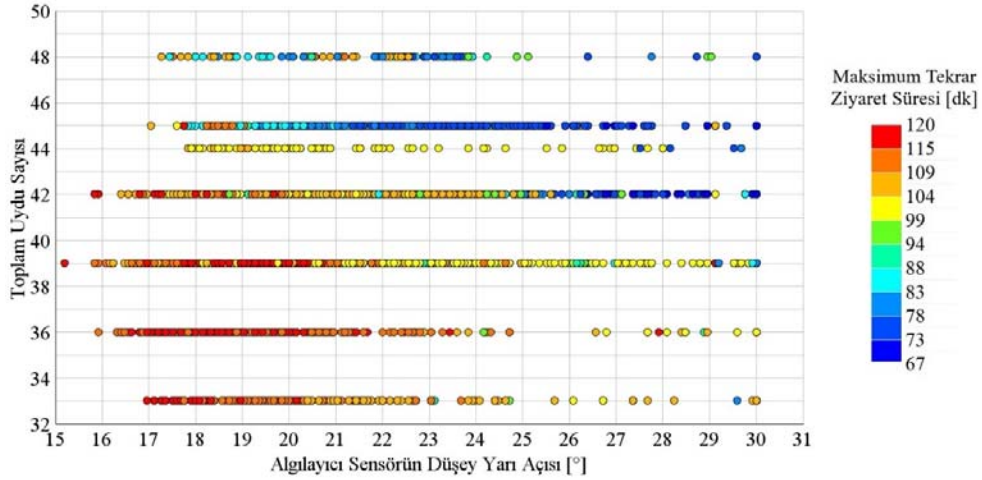
Bu çalışmada incelenen problemde olduğu gibi birden fazla amaca sahip optimizasyon problemlerinin sonucunda tek bir optimum değerden öte, en avantajlı çözümleri barındıran bir optimum çözüm kümesi elde edilir. Bu küme, pareto-optimal çözüm kümesi olarak adlandırılır.



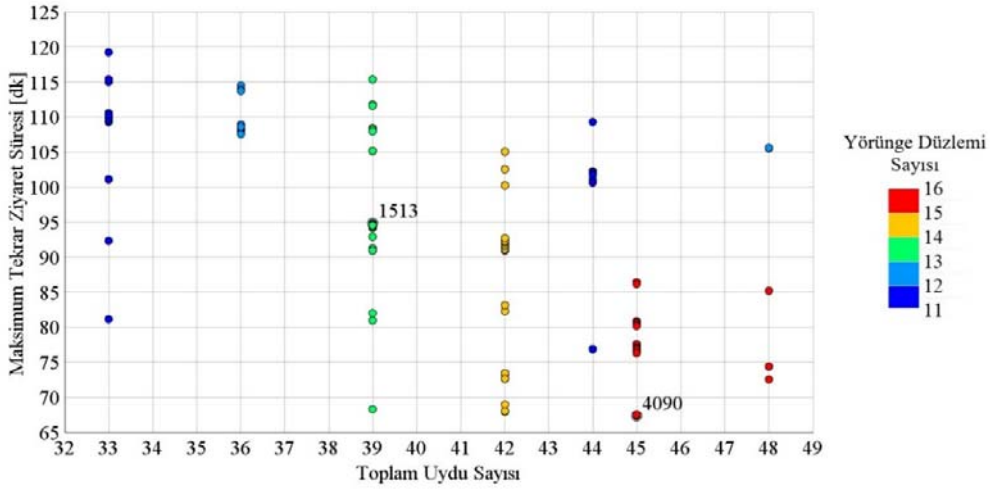
Şekil 7. Uygulanabilir optimizasyon çözümlerinin Toplam uydu sayısı – Maksimum tekrar ziyaret süresi – Yörünge düzlem sayısı için saçılma grafiği (Scatter plot for Total number of satellites – Maximum revisit time – Number of orbital planes of feasible optimization solutions)



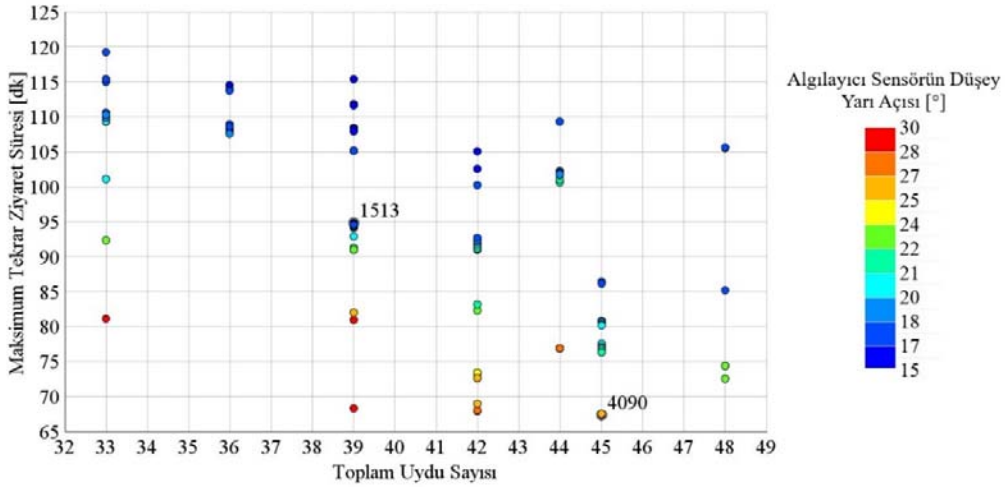
Şekil 8. Uygulanabilir optimizasyon çözümlerinin Toplam uydu sayısı – Maksimum tekrar ziyaret süresi – Sensör yarı açısı için saçılma grafiği (Scatter plot for Total number of satellites – Maximum revisit time – Sensor vertical half angle of feasible optimization solutions)



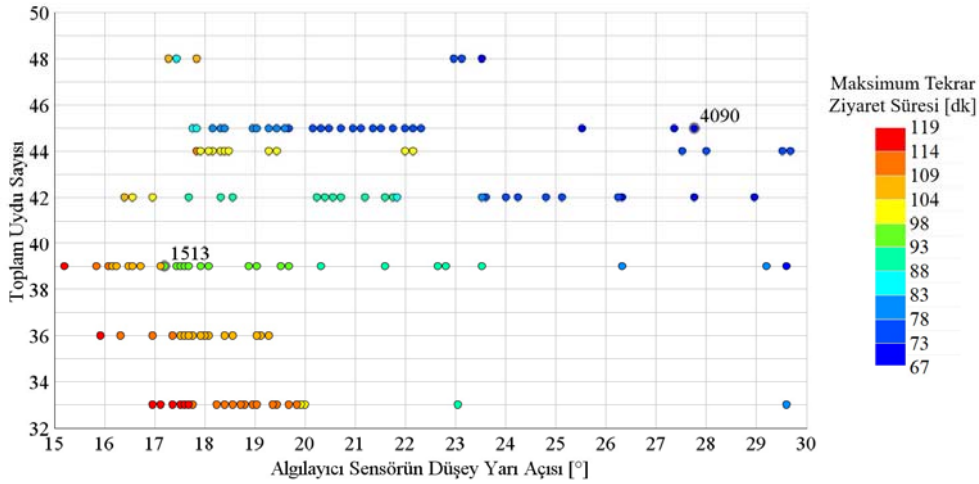
Şekil 9. Uygulanabilir optimizasyon çözümlerinin Sensör düşey yarı açısı – Toplam uydu sayısı – Maksimum tekrar ziyaret süresi için saçılma grafiği (Scatter plot for Sensor vertical Half angle – Total number of satellites – Maximum revisit time of feasible optimization solutions)



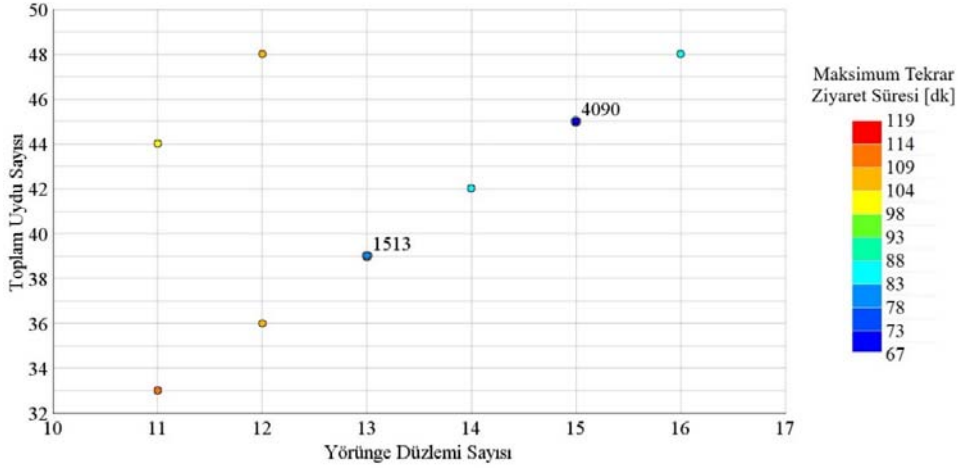
Şekil 10. Pareto-optimal çözümlerin Toplam uydu sayısı – Maksimum tekrar ziyaret süresi – Yörünge düzlem sayısı için saçılma grafiği (Scatter plot for pareto-optimal solutions of Total number of satellites – Maximum revisit time – Number of orbital planes)



Şekil 11. Pareto-optimal çözümlerin Toplam uydu sayısı – Maksimum tekrar ziyaret süresi – Sensör düşey yarı açısı için saçılma grafiği (Scatter plot for pareto-optimal solutions of Total number of satellites – Maximum revisit time – Sensor vertical half angle)



Şekil 12. Pareto-optimal çözümlerin Sensör düşey yarı açısı – Toplam uydu sayısı – Maksimum tekrar ziyaret süresi için saçılma grafiği (Scatter plot for pareto-optimal solutions of Sensor vertical half angle – Total number of satellites – Maximum revisit time)



Şekil 13. Pareto-optimal çözümlerin Yörünge düzlem sayısı – Toplam uydu sayısı – Maksimum tekrar ziyaret süresi için saçılma grafiği (Scatter plot for pareto-optimal solutions of Number of orbital planes – Total number of satellites – Maximum revisit time)

4.3.1. Pareto-Optimal sonuçlarının optimizasyon hedefleri ile değişimi (Variation of the Pareto-Optimal results with optimization objectives)

Çalışma kapsamında türetilen pareto-optimal çözümler, Şekil 10 ile Şekil 13 arasında sunulan saçılma grafiklerinde gösterilmiştir. Sırasıyla ilk iki grafikteki renk göstergeleri yörünge düzlem sayısını ve algılayıcı sensörün düşey yarı açısını; son iki grafikteki renk göstergeleri ise maksimum tekrar ziyaret süresini temsil etmektedirler.

4.4. Uygun Takım Uydu Konfigürasyonunun Seçimi (Selection of the Suitable Satellite Constellation Configuration)

Şekil 10 ile Şekil 13 arasında sunulan grafikler incelendiğinde elde edilen en düşük maksimum tekrar ziyaret süresinin yaklaşık 67 dakika olduğu görülmüştür. 4090 numaralı bu çözümün pareto-optimal çözümler içerisindeki konumu Şekil 10 ile Şekil 13 arasında sunulan grafiklerde işaretlenmiştir. Bu çözümün elde edilmesinde kullanılan optimizasyon değişkenleri ve toplam uydu sayısı Tablo 2’de listelenmiştir.

Tablo 2 incelendiğinde 4090 numaralı tasarımın $27,76^\circ$ sensör yarı açısına sahip, 15 farklı düzlemden her birine 3’er adet konumlandırılan bir uydu kümesi ile sağlandığı görülmektedir.

Tablo 2. En düşük maksimum tekrar ziyaret süresine sahip 4090 numaralı konfigürasyona ait parametreler (Parameters of the configuration ID 4090 having the minimum revisit time)

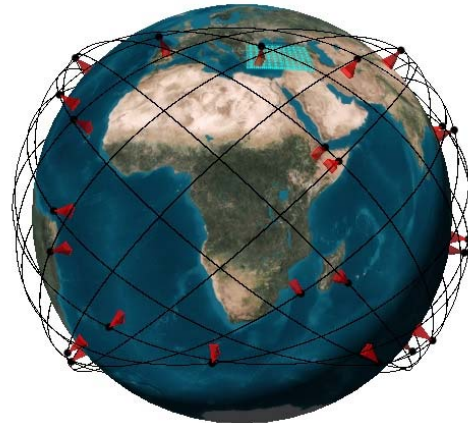
Parametre	Açıklama	Değer	Birim
n_{yd}	Yörünge düzlemi sayısı	15	-
n_{yd-u}	Bir yörünge düzlemindeki uydu sayısı	3	-
N	Toplam uydu sayısı	45	-
f	Faz parametresi	5	-
i	Yörünge eğikliği	43,0	$^\circ$
a	Yarı büyük eksen uzunluğu	6868	km
θ_{sdy}	Algılayıcı sensörün düşey yarı açısı	27,76	$^\circ$
t_{max-yz}	Maksimum tekrar ziyaret süresi	67,34	dk

Daha az yörünge düzlem sayısı ve toplam uydu sayısına sahip aynı zamanda çok daha küçük sensör açısına ihtiyaç duyan bir uydu kümesi alternatifini mevcut pareto-optimal çözüm kümesi içerisinde bulunmaktadır. Maliyet açısından daha etkin ve yaklaşık 95 dk civarında maksimum tekrar ziyaret süresine sahip 1513 numaralı bu tasarımın elde edilmesinde kullanılan optimizasyon değişkenleri ve toplam uydu sayısı Tablo 3’te listelenmiştir.

Tablo 3. Maliyet etkin 1513 numaralı konfigürasyona ait parametreler (Parameters of the cost-effective configuration ID 1513)

Parametre	Açıklama	Değer	Birim
n_{yd}	Yörünge düzlemi sayısı	13	-
n_{yd-u}	Bir yörünge düzlemindeki uydu sayısı	3	-
N	Toplam uydu sayısı	39	-
f	Faz parametresi	8	-
i	Yörünge eğikliği	43,0	$^\circ$
a	Yarı büyük eksen uzunluğu	6957	km
θ_{sdy}	Algılayıcı sensörün düşey yarı açısı	17,20	$^\circ$
t_{max-yz}	Maksimum tekrar ziyaret süresi	94,83	dk

1513 numaralı bu çözümün pareto-optimal çözümler içerisindeki konumu Şekil 10 ile Şekil 13 arasında sunulan grafiklerde işaretlenmiştir. Bu çözüm, maliyet etkin ve aynı zamanda mümkün mertebe düşük maksimum tekrar ziyaret süresine sahip olması bakımından bu çalışma kapsamında seçilen tasarımdır. 1513 numaralı takım uydu konfigürasyonunun dünya yörüngesi üzerindeki temsili Şekil 14’te sunulmuştur.



Şekil 14. 1513 numaralı takım uydu konfigürasyonunun dünya yörüngesi üzerinde görünümü (Illustration of the satellite configuration ID 1513 on Earth’s orbit)

5. Sonuçlar (Conclusion)

Çalışma kapsamında, Türkiye coğrafyasını içerisinde barındıran 34° - 43° kuzey paralelleri ile 24° - 46° doğu meridyenleri arasındaki bölgeden mümkün olduğunca kısa tekrar ziyaret süresinde veri toplayan ve mümkün olduğunca düşük maliyete sahip bir Walker

Delta takım uydusu konfigürasyonu, çok amaçlı bir optimizasyon problemi kurgulanarak tasarlanmıştır. ModeFrontier yazılımı üzerinde kurgulanan optimizasyon döngüsünde yörünge düzlem sayısı, bir yörünge düzleminde bulunan uydusu sayısı, faz parametresi, yörünge eğikliği, yarı büyük eksen uzunluğu ve algılayıcı sensörün düşey yarı açısı, toplam uydusu sayısı 48'i geçmeyecek ve takım uydunun veri aldığı bölge içerisinde maksimum tekrar ziyaret süresi 120 dakikanın altında kalacak şekilde Tablo 1'de paylaşılan sınırlar dahilinde Çok Amaçlı Genetik Algoritma yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir. Birim uydusu maliyetini düşürmek ve uydusu boyutunu, dolayısıyla kütlelerini, azaltmak amacıyla algılayıcı sensör boyutları mümkün olduğunca küçültülmüş; fırlatma maliyetlerini en aza indirmek amacıyla toplam uydusu sayısı ve yörünge düzlem sayısı mümkün olduğunca azaltılmıştır. Takım uydusu alternatiflerinin parametrik olarak STK yazılımı üzerinde modellenmesine aracılık etmek amacıyla çalışma kapsamında bir Matlab betiği hazırlanarak ModeFrontier yazılımında hazırlanan döngüye entegre edilmiştir. Kurgulanan optimizasyon döngüsü, hem sensör boyutu ve yörünge parametrelerini eş zamanlı olarak maliyet etkin şekilde çok amaçlı optimize etme bakımından hem de Türkiye coğrafyası özelinde optimum takım uydusu kurma senaryosu inceleme bakımından literatürde ilk olma özelliğine sahiptir.

Gerçekleştirilen optimizasyon süreci sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

- Toplam uydusu sayısını, yörünge düzlem sayısını ve algılayıcı sensörün düşey yarı açısını arttırmak maksimum tekrar ziyaret süresini kısaltmakta ancak takım uydusu sisteminin toplam maliyetini arttırmaktadır.
- Veri toplanmak istenen bölgede maksimum tekrar ziyaret süresinin 120 dakikanın altında kalması için toplam uydusu sayısının en az 33, yörünge düzlem sayısının en az 11 ve algılayıcı sensörün düşey yarı açısının en az 15 derece olması gerekmektedir.
- Optimizasyon çözümleri sonucunda elde edilen en düşük maksimum tekrar ziyaret süresi yaklaşık 67 dakikadır. Ancak bu süreyi elde edebilmek için yaklaşık 27,8°'lik düşey yarı açısına sahip sensörler ile donatılmış ve 15 ayrı düzleme yerleştirilmiş 45 adet uydusu ihtiyaç vardır.
- Birden fazla amaca sahip optimizasyon problemlerinde tek bir optimum çözümden ziyade optimum çözüm alternatiflerini barındıran bir pareto-optimal küme elde edilir. Çalışma kapsamında, bu kümedeki çözümler kullanılarak maksimum tekrar ziyaret süresinden bir miktar feragat ederek sistem maliyetini düşürmek amacıyla algılayıcı sensör boyutlarını, yörünge düzlem sayısını ve toplam uydusu sayısını düşürmek mümkündür. Bu amaçla, maksimum tekrar ziyaret süresi yaklaşık 94 dakika olan, 17,2°'lik düşey yarı açısına sahip sensörler ile donatılmış ve 13 ayrı düzleme yerleştirilmiş 39 adet uydusu ihtiyaç duyan bir takım uydusu konfigürasyonunun hem daha düşük toplam maliyete hem de tatmin edici maksimum tekrar ziyaret süresine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Gelecek çalışmalarda, takım uydusu konfigürasyonundaki uyduların farklı yere yakın yörünge irtifalarında da konumlandırılması durumunun hesaba katılması; yer gözlem amacıyla tasarlanan bu uydulardan, odaklanılan coğrafya özelinde küresel konum belirleme doğruluğunu maksimize etme amacıyla da faydalanılması hedefinin de göz önünde bulundurularak birden fazla amaca hizmet eden bir takım uydusu konfigürasyonunun elde edilmesi faydalı bilgiler sunacaktır.

Kaynaklar (References)

1. Tatem, A. J., Goetz, S. J., Hay, S. I., Fifty years of earth observation satellites: Views from above have lead to countless advances on the ground in both scientific knowledge and daily life, *American scientist*, 96 (5), 390, 2008.

2. İşler B., Aslan Z., Modeling of vegetation cover and spatio-temporal variations, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (4), 1863-1874, 2021.
3. Pamula, A. S., Gholizadeh, H., Krzmarzick, M. J., Mausbach, W. E., Lampert, D. J., A remote sensing tool for near real-time monitoring of harmful algal blooms and turbidity in reservoirs, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 59 (5), 929-949, 2023.
4. Bahşi, K., Ustaoglu, B., Aksoy, S., Sertel, E., Estimation of emissions from crop residue burning in Türkiye using remotely sensed data and the Google Earth Engine platform, *Geocarto International*, 38 (1), 2157052, 2023.
5. Van Westen, C. J., Remote sensing for natural disaster management, *international archives of photogrammetry and remote sensing*, 33(B7/4; PART 7), 1609-1617, 2000.
6. Clarke, A. C., Extra-Terrestrial Relays, *Wireless World*, 51 (10), 305-308, 1945.
7. Luders, R. D., Satellite networks for continuous zonal coverage, *ARS Journal*, 31 (2), 179-184, 1961.
8. Walker, J. G., Circular orbit patterns providing continuous whole earth coverage, *Royal Aircraft Establishment Farnborough, United Kingdom, Technical Report 70211*, 1970.
9. Lang, T. J., Adams, W. S., A comparison of satellite constellations for continuous global coverage, *Mission Design & Implementation of Satellite Constellations*, Springer, 51-62, 1998.
10. Luo, Y., Shu, P., Optimization design of Walker constellation for multi-target rapid revisit, *2018 Eighth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC)*, Harbin, China, 483-486, 2018.
11. Shin, J., Park, S. Y., Son, J., Song, S. C., Design of Regional Coverage Low Earth Orbit (LEO) Constellation with Optimal Inclination, *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 38 (4), 217-227, 2021.
12. Takahashi, S., Yamazaki, H., A Constellation Optimization Method for Nearly Continuous Observation of Arbitrary Sites, *2023 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA*, 1-11, 2023.
13. Lee, S. S., Target-Oriented Satellite Constellation Method for Revisit Performance, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61, 1-11, 2023.
14. Sung, T., Ahn, J., Optimal deployment of satellite mega-constellation, *Acta Astronautica*, 202, 653-669, 2023.
15. Melaku, S. D., Kim, H. D., Optimization of multi-mission cubesat constellations with a multi-objective genetic algorithm, *Remote Sensing*, 15, 1572-1584, 2023.
16. Leyva-Mayorga, I., Soret, B., Matthiesen, B., Roper, M., Wübben, D., Dekorsy, A., Popovski, P., NGS0 Constellation Design for Global Connectivity, *ArXiv, abs/2203.16597*, 2022.
17. Poles S., MOGA-II An improved Multi-Objective Genetic Algorithm, *Esteco*, 2003.
18. Kalyanmoy, D., Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms, *John Wiley & Sons, New York, A.B.D.*, 2001.
19. Mortazavi, A., Interactive fuzzy Bayesian search algorithm: A new reinforced swarm intelligence tested on engineering and mathematical optimization problems, *Expert Systems with Applications*, 187, 115954, 2022.
20. Moloodpoor, M., Mortazavi, A., Özbalta, N., Thermo-Economic Optimization of Double-Pipe Heat Exchanger Using a Compound Swarm Intelligence, *Heat Transfer Research*, 52 (6), 1-20, 2021.
21. Moloodpoor, M., Mortazavi, A., Simultaneous optimization of fuel type and exterior walls insulation attributes for residential buildings using a swarm intelligence, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19 (4), 2809-2822, 2022.
22. Tamer Y., Electro-Optic Satellite Constellation Design Using Multi-Objective Genetic Algorithm, Yüksek Lisans Tezi, Department of the Air Force Air University, Air Force Institute of Technology, Ohio, ABD, 2020.
23. Diniz H. C., Navigation Constellation Design Using a Multi-Objective Genetic Algorithm, Yüksek Lisans Tezi, Department of the Air Force Air University, Air Force Institute of Technology, Ohio, ABD, 2015.
24. Abbate E. A., Disaggregated Imaging Spacecraft Constellation Optimization with a Genetic Algorithm, Yüksek Lisans Tezi, Department of the Air Force Air University, Air Force Institute of Technology, Ohio, ABD, 2014.
25. Agresti, L., Multi Objective Genetic Algorithm Optimization of a Cubesats Constellation to Ensure Communication Services During Natural Disasters Over Europe, Yüksek Lisans Tezi, Politecnico di Torino, Torino, İtalya, 2019.