

TÜRKİYE BÖLGESEL SEYRÜSEFER UYDU SİSTEMİNİN BİR ARTIRIM SİSTEMİ OLARAK TASARIMI VE ENİYİLEMESİ

Uzay Tuğcular¹
Türk Havacılık ve Uzay
Sanayii, Ankara

Arif Can Başbüyük²
Mehmet Fatih Engin³
Tahsin Çağrı Şişman⁴
Ceyhun Tola⁵
Türk Hava Kurumu
Üniversitesi, Ankara

Halil Ersin Söken⁶
TÜBİTAK Uzay
Teknolojileri Araştırma
Enstitüsü, Ankara

ÖZET

Bu çalışmada, Türkiye Bölgesel Seyrüsefer Uydu Sistemi (TBSUS) için daha önce yapmış olduğumuz öncül yörünge tasarımları baz alınarak böyle bir sistemin artırım sistemi (İng. augmentation system) olarak tasarlanması için gerekli analizler yapılacaktır. Bu öncül yörünge tasarımlarında konum ve kapsama alanı benzerlikleri nedeniyle Japonya BNUS sistemi olan Sanki-Başüstü Uydu Sistemi (SBUS) [İng. Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)] temel alınmıştır. Bu çalışmada, yine SBUS'nin ilk aşamasının bir artırım sistemi olarak GPS (İng. Global Positioning System) ile bütünleşik işlev görmesi gibi TBSUS'nin ilk aşamalarının benzer bir artırım sistemi işlevi görmesi için öncül yörünge tasarımları değerlendirilecektir. Bu değerlendirmede geometrik kesinlik seyreltisi (GKS) [İng. geometric dilution of precision (GDOP)] değeri nicel karşılaştırma yapmaya imkan veren tasarım parametresi olarak kullanılacaktır. Çok amaçlı genetik algoritma [İng. Multi Objective Genetic Algorithm] teknikleri kullanılarak yörünge tasarımlarının eniyilemesi de gerçekleştirilecektir.

GİRİŞ

Bu çalışmada, Türkiye bölgesi için bir Seyrüsefer Uydu Sistemi (SUS) tasarımı üzerinde çalışılmıştır. SUS'ler GPS gibi tüm Dünya'nın kapsama alanı olarak alındığı ya da Japonya bölgesel seyrüsefer uydu sistemi (BSUS) sistemi olan Sanki-Başüstü Uydu Sistemi (SBUS) [İng. Quasi-Zenith Satellite

¹Tasarım Mühendisi, Uydu Yer Sistemleri, E-posta: uzay.tugcular@tai.com.tr

²Ar. Gör., Uçak Müh. Böl., E-posta: acbasibuyuk@thk.edu.tr

³Yarı-zamanlı Öğr. Gör., Uzay Müh. Böl., E-posta: mfengin@thk.edu.tr

⁴Doç. Dr., Uzay Müh. Böl., E-posta: tcsisman@thk.edu.tr

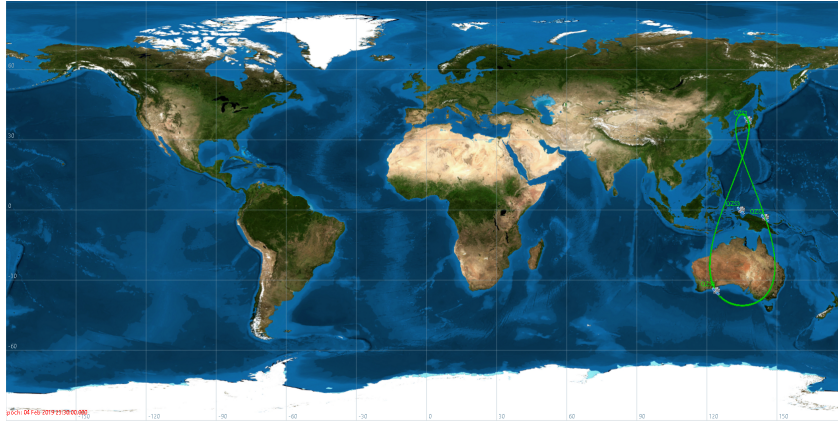
⁵Dr. Öğr. Üyesi, Uzay Müh. Böl., E-posta: ctola@thk.edu.tr

⁶Baş Araştırmacı Dr., Yönelim ve Yörünge Kontrol Grubu, E-posta: ersin.soken@tubitak.gov.tr

System (QZSS)] gibi bölgesel bir kapsama alanına sahip olacak şekilde tasarlanmış olabilmektedir. Bu çalışmada, SUS'lerin genel özelliklerini tartışmak için [Kaplan ve Hegarty, 2006] takip edilmiştir.

Küresel Seyrüsefer Uydu Sistemi (KSUS) terimi uydu sinyali alıcılarına otonom olarak konumlama ve zamanlama yapma imkanını küresel olarak sunan uydu takımlarını tanımlar. Halihazırda dört KSUS mevcuttur: Amerikan sistemi GPS, Rus sistemi GLONASS, Avrupa sistemi Galileo ve Çin sistemi BeiDou-2 ya da diğer adıyla COMPASS [Bhatta, 2010; Hofmann-Wellenhof ve Diğerleri, 2007, 2008].

BSUS terimi konumlama ve zamanlama servislerini Dünya'nın belli bir bölgesine sağlayan SUS'ler için kullanılır. Bu sistemler genellikle askeri amaçlar temel motivasyon oluşturacak şekilde kurulmuşlardır. Çünkü KSUS sahibi ülkeler özellikle askeri ihtiyaçları çerçevesinde sağlamış oldukları konumlama ve zamanlama servislerine erişimi engelleme ya da servis kalitesini düşürme imkanlarına sahiplerdir. BSUS olarak halihazırda operasyonel örnekler olarak 7 uydudan oluşan Hindistan Bölgesel Seyrüsefer Uydu Sistemi (HBSUS) [İng. Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS)] ve 4 uydudan oluşan Japonya'nın SBUS'sidir. SBUS uydu takımının yer izi (İng. ground track) Şekil 1'de verilmiştir. SBUS yukarıda da bahsedildiği gibi tam olarak bir BSUS değildir ama GPS varlığında bir artırım sistemi (İng. augmentation system) olarak işlev görür [Wu ve Diğerleri, 2004]. SBUS'nin temel hedefi özellikle yüksek gökdelenler barındıran Tokyo gibi metropolitan bölgelerinde GPS sisteminin uydularının düşük yükselme açısına (İng. elevation angle) sahip olmaları nedeni ile etkin olarak sağlanamayan konumlama ve zamanlama servislerinin iyileştirilmesidir. Bu iyileştirme yüksek yükselme açısı değerleri ile şehrin üzerinden geçiş yapan SBUS uydularının sağladığı artırım ile gerçekleştirilmektedir.



Şekil 1: SBUS uydu takımının yer izi.

Bir KSUS ya da BSUS tam operasyonel faza geçerken ara operasyonel fazlarda farklı niteliklere sahip olabilir. Örneğin, Çin'in KSUS'si BeiDou ilk zamanlarında BeiDou-1 adıyla bir BSUS olarak işlev görmüştür. Aynı şekilde Japonya SBUS'yi son operasyonel fazında bir BSUS olarak tasarlamıştır. Ancak sistem şu anda bir artırım sistemi olarak işlev görmektedir.

Daha önceki bir çalışmamızda [Büyük ve Diğerleri, 2019], olası bir Türkiye bölgesel seyrüsefer uydu sistemi (TBSUS) için konum ve kapsama alanı benzerlikleri nedeniyle Japonya'nın SBUS'sini temel alan öncül yörünge tasarımları gerçekleştirmiştik. Bu tasarımların temel hedefi TBSUS için nihai yörünge tasarımında bulunması olası yörünge alternatiflerinin bir analizini gerçekleştirmek şeklinde olmuştur. Bu çalışmada, yukarıdaki paragrafta bahsettiğimiz perspektif temel alınarak TBSUS için ilk fazların bir artırım sistemi olarak tasarlanması için gerekli analizler yapılacaktır. Ek olarak, bu elde edilen tasarım alternatiflerinde yörünge parametrelerinin eniyilemeleri çok amaçlı genetik algoritma teknikleri kullanılarak gerçekleştirilecektir. Tasarımlarda geometrik kesinlik seyreltisi (GKS) [İng. geometric dilution of precision (GDOP)] parametresi temel tasarım parametresi olarak kullanılacaktır. GKS değeri bir sinyal alıcı için konumlama ve zamanlama yapma imkanı veren

uyduların gökyüzünde geometrik olarak kümelenmek yerine dağınık olarak yayılmış olma durumlarını nicel hale getirir. Bu değer ne kadar küçükse uyduların o kadar dağınık bir yayılım gerçekleştirmiş olduklarını ve konumlama bilgisi sağlayabilmek için daha uygun olduklarını gösterir [Langley, 1999; Kaplan ve Hegarty, 2006]. GKS değerlerini kullanarak BSUS'nin yörünge tasarımı için en iyileme yapan benzer çalışmalar mevcuttur [Choi ve Diğerleri, 2013; Keyvani ve Diğerleri, 2019; Wu ve Diğerleri, 2004; Xia ve Diğerleri, 2020].

YÖNTEM

Geometrik Kesinlik Seyreltimi

GKS uyduların gökyüzündeki konfigürasyonunun konumlama doğruluğuna nasıl etki ettiğinin nicelleştirilmesini sağlayan bir parametredir. İyi bir konumlama doğruluğunu sağlamak için uyduların gözyüzünde geniş açılarla ayrılmış geniş bir dağılım göstermiş olması gereklidir. Bu şekilde bir konfigürasyona erişildikçe GKS değerleri küçülür. Aksi durumda uydular gökyüzünde birbirlerinden dar açılarla ayrışacak şekilde tek bir bölgeye kümelenmişlerse GKS değerleri büyür. Örneğin, GKS'nin 20 değerinden büyük olması çok düşük bir konumlama doğruluğunu işaret ederken, 1 civarındaki GKS değerleri ise çok iyi bir konumlama doğruluğuna karşılık gelir. GKS üzerine gayet açıklayıcı bir çalışma için [Langley, 1999]'e bakılabilir, aşağıdaki anlatımda ise [Kaplan ve Hegarty, 2006] takip edilmiştir.

Alicıdaki pozisyon ve zamandaki $\Delta\vec{x}$ farkı, sanki-mesafe değerlerindeki fark $\Delta\vec{\rho}$ ile

$$H\Delta\vec{x} = \Delta\vec{\rho}, \quad (1)$$

ifadesi ile bağlanır. Bu ifadede H matrisi bağıl pozisyon vektörü yönündeki birim vektörler olan $\vec{a}_i$ 'leri cinsinden

$$H = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} & 1 \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{xn} & a_{yn} & a_{zn} & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

şeklinde ifade edilir. GKS konum ve zaman ile ilgili seyreltilmiş kesinlik değerlerini barındıracak şekilde, H matrisi kullanılarak hesaplanan $(H^T H)^{-1}$ matrisi üzerinden tanımlanır. $(H^T H)^{-1}$ matrisinin bileşenleri

$$(H^T H)^{-1} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

şeklinde verilecek olursa GKS

$$\text{GKS} = \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33} + D_{44}}, \quad (4)$$

ifadesiyle bulunur.

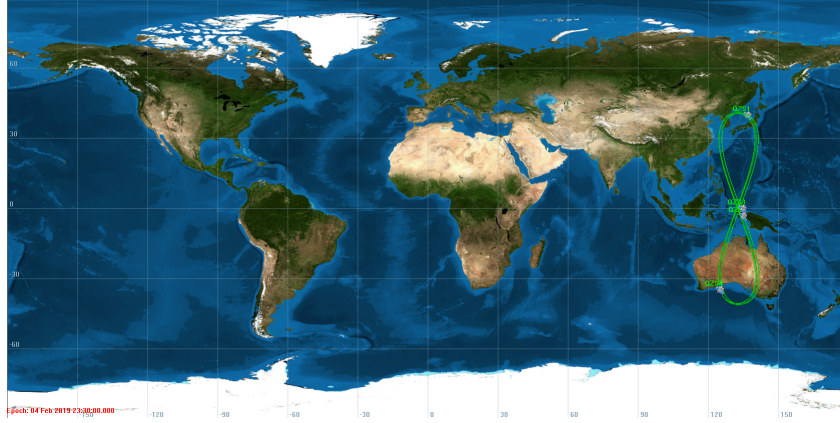
Sonuç olarak, bir uydu konfigürasyonundan elde edilebilecek konum doğruluğunu veren GKS değerleri hesaplanırken öncelikle alıcıdan uyduya bağıl konum vektörleri bulunur. Sonrasında, bu vektörlerin birim vektörleri kullanılarak oluşturulan H matrisi kullanılarak $(H^T H)^{-1}$ matrisi hesaplanır. Son olarak da (4) ifadesi ile GKS değeri bulunur.

UYGULAMALAR

Bu bölümde ilk olarak SBUS ve eğimli yer senkronize yörünge (EYSY) [İng. inclined geosynchronous orbits (IGSO)] uydu takımlarının yörünge elemanları, uydu takımları Tokyo üstünde

olacak şekilde tanımlanmıştır. Takip eden aşamada SBUS Ankara üzerinde olacak şekilde değiştirilmiş ve BSUS için ise [Büyük ve Diğerleri, 2019] çalışmasında verilmiş olan iki uydu takımı önermesinden GKS değerlerini daha fazla iyileştiren önerme tercih edilmiştir. Bütün bu uydu konfigürasyonları için GPS uyduları varlığında GKS analizleri yapılmıştır. STK programı ve MATLAB kodu ile yapılan analizlerde, uydudan gelen sinyaller, yükselme açısının 30 dereceden büyük olduğu durumlarda ulaşılabilir olarak kabul edilmiştir. Böylece yükseliş açısı maskesi kullanılarak çevresel yükseklik etkileri düşük tutarlılıkta modellenmiştir. İki uydu takımı önermesi için uydu yörüngeleri EK A'daki tablolarda verilmiştir.

İlk olarak, çalışmamızda bir yöntem doğrulaması sağlamak için [Wu ve Diğerleri, 2004] referansında SBUS için elde edilen veriler kullandığımız yöntemlerle elde edilmiştir. [Wu ve Diğerleri, 2004] referansında yapılan analizde kullanılan ve bu çalışmamızla uyumlu olan iki yörünge alternatifi şu şekildedir: ilk alternatifte, Şekil 1'de yer izi verilmiş olan SBUS uydu takımı için yer sabit (İng. geostationary) uydu hariç eliptik eğimli yer senkronize yörüngeye (EEYSY'ye) [İng. elliptic inclined geosynchronous orbits (EIGSO)] sahip üç uydu kullanılmıştır; ikinci alternatifte ise Şekil 2'de verilen yine yer sabit uydu hariç üç EYSY uydusu kullanılmıştır.



Şekil 2: Japonya üzerindeki üç EYSY uydusu ile bir yer sabit uyduya ait yer izi.

GPS uyduları ile beraber sırasıyla üç EEYSY uydusu ve üç EYSY uydusu varlığında GKS analizleri yapıldığında, [Wu ve Diğerleri, 2004] referansında bulunmuş olan GKS değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Bu değerler bu çalışma sırasında geliştirmiş olduğumuz MATLAB kodu ve ek olarak STK programı ile elde ettiğimiz değerler ile karşılaştırılması amacıyla sunulmuştur. Bu tabloda görüleceği üzere sadece GPS uydularının varlığında elde edilen GKS değerlerini, üç EEYSY ya da üç EYSY uydusunun varlığında sırasıyla minimum GKS için 0,5; maksimum GKS için 550, ortalama GKS için 7,5 mertebesinde iyileştirmek mümkün olmuştur. Üç EYSY uydusunun varlığında bu iyileştirmeler minimum ve ortalama GKS değerleri için sırasıyla 0,02 ve 0,2 mertebelerinde daha iyi olsa da EEYSY uydularının kuzey yarımkürede daha büyük bir zaman aralığında kalabiliyor olmaları nedeniyle bu uydulardan gelen sinyaller üç EYSY uydusuna göre ortalama olarak daha büyük yükselme açıları ile gelmektedir.

Tablo 1: [Wu ve Diğerleri, 2004] referansındaki SBSU ile EYSY konfigürasyonları için bulunmuş olan GKS değerleri.

		GPS (29)	GPS(29) + SBU(3)	GPS(29) + EYSY(3)
GKS	Min	2.98	2.48	2.46
	Maks	607.30	52.52	53.25
	Ort	14.45	7.10	6.90
TOKYO, Min Yükselme = 30der				

Tablo 1’de verilen [Wu ve Diğerleri, 2004] referansına ait verilerle bir karşılaştırma yapabilmek için ilk aşamada STK programı kullanılarak GPS uydularının varlığında Şekil 1’de verilen dört SBUS uydusu için, ek olarak Şekil 2’de verilen uydu takımı için ve son olarak Şekil 1’deki üç EEYSY uydusu için GKS hesabı yapılmıştır. STK programındaki bu hesaplamalar ECI referans eksenine göre yapılmış ve uydu dinamik modeli olarak iki cisim problemi kullanılmıştır. GPS uydularının yörüngeleri için EK A’da verilen yörünge elemanlarının karşılık geldiği zamanlarda aktif olarak çalışan GPS uydularının yörünge elemanları kullanılmıştır. Hesaplamalar sonucunda en yüksek, en düşük ve ortalama GKS değerleri bir gün için hesaplanmış ve bu sonuçlar Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2: Tokyo üzerinde hesaplanan en düşük, en yüksek ve ortalama GKS değerleri.

		GPS (29)	GPS(29) + SBU(4)	GPS(29) + EYSY(4)	GPS(29) + SBU(3)
GKS	Min	3.381067	2.668334	2.669910	2.708724
	Maks	776.447913	26.692447	22.511789	48.358527
	Ort	41.955181	4.700675	4.832455	5.318326
TOKYO, Min Yükselme = 30der					

Tablo 2 ilk ve son sütunlardaki değerler ile Tablo 1 sırasıyla ilk ve orta sütunlardaki değerler uydu sayıları bağlamında eş uydu konfigürasyonu değerleridir. Sadece GPS uydularının varlığında hesaplanmış olan GKS değerleri karşılaştırıldığında bu değerlerin minimum, maksimum ve ortalama GKS için sırasıyla 0,4, 170 ve 28 mertebelerinde farklı olduğu gözlenmektedir. Bunun sebebi olarak hesaplamaların GPS uydularının farklı zamanlara ait yörünge elemanları ile yapılmış olması öne sürülebilir. GPS(29)+SBU(3) sütunlarına ait değerler karşılaştırıldığında GKS mertebelerinin minimum, maksimum ve ortalama değerler için sırasıyla 0,2, 5 ve 1,6 kadar farklarla çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu farklar, bahsetmiş olduğumuz GPS uydu yörüngelerinin farklılıkları nedeniyle olabileceği gibi SBUS uydu verilerin tasarım değerleri ile çalışmamızda kullandığımız güncel yörünge elemanları arasındaki farklar nedeniyle de olabilir. Nicel bu farklılıklara rağmen önemli olan GPS uydularına eklenen üç EEYSY uydusunun konum belirleme hassasiyetini 10’lu mertebelerden 1’li mertebelere indirmiş olmasıdır ve bu sonuç bizim hesaplamalarımızda da görülmektedir. Ek olarak, Tablo 2’nin ikinci ve üçüncü sütunlarında verilen dört uydunun GPS uydularına eklendiği sonuçlarda, son sütundaki sonuçlara göre beklenebileceği üzere GKS değerleri daha da iyileştirilmiştir.

Tablo 3: Ankara üzerinde hesaplanan en düşük, en yüksek ve ortalama GKS değerleri.

		GPS (29)	GPS(29) + SBUA(4)	GPS(29) + TBSUS(5)
GKS	Min	3.053378	2.592928	2.514203
	Maks	1815.780573	11.025645	10.640551
	Ort	24.443965	4.609728	4.252876
ANKARA, Min Yükselme = 30der				

Tablo 3’nun ilk sütununda sadece GPS uydularının varlığında Ankara için hesaplanan GKS değerleri verilmiştir. İkinci sütunda ise GPS uyduları, üç SBU ve bir yer sabit uydularının olduğu SBUA konfigürasyonu için hesaplanan GKS değerleri verilmiştir. Bu sütunlardaki değerler karşılaştırılacak olursa GKS değerlerinin minimum, maksimum ve ortalama değerler olarak sırasıyla 0,5, 1.800 ve 20 mertebelerinde farklarla iyileştirmeler olduğu görülmektedir. [Büyük ve Diğerleri, 2019] çalışmasında verilmiş olan GPS uydularına ek olarak üç SBU ve iki yer sabit uydu takımını içeren TBSUS önermesi için hesaplanan GKS değerleri üçüncü sütunda verilmiştir. Üçüncü ve ikinci

sütündeki değerler karşılaştırılacak olursa TBSUS'nin SBUA'dan farklı olarak ekstradan sahip olduğu yer sabit uydusundan dolayı iyileştirme sağladığı görülmektedir.

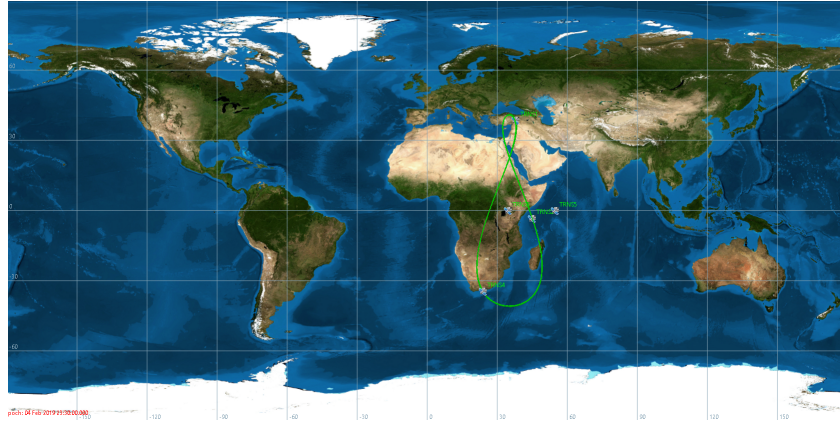
Tablo 4: GPS(29) + SBU(3) konfigürasyonu için Tokyo üzerinde hesaplanan ortalama, en düşük ve en yüksek GKS değerleri

	Ort	Min	Maks
Matlab ile hesaplanan GKS değerleri	5.328207	2.695894	50.058246
STK ile hesaplanan GKS değerleri	5.318326	2.708724	48.358527

Tablo 5: GPS(29) + TBSUS(5) konfigürasyonu için Ankara üzerinde hesaplanan ortalama, en düşük ve en yüksek GKS değerleri

	Ort	Min	Maks
Matlab ile hesaplanan GKS değerleri	4.252876	2.514203	10.640551
STK ile hesaplanan GKS değerleri	4.133995	2.479436	11.575165

Tablo 4, 5'de GPS uydularına ek olarak sırasıyla Tokyo üzerindeki SBUS ve Ankara üzerindeki TBSUS uyduları için geliştirmiş olduğumuz Matlab kodu ve STK programından elde edilen GKS değerleri karşılaştırılmıştır. Hesaplanan GKS değerlerinin SBUS için ortalama ve minimum değerlerin 0,01 kadar, maksimum değerinin 2 kadar farklarla çok yakın olduğu görülmektedir. Şekil 2'deki TBSUS için STK programı ve Matlab kodu ile hesaplanan GKS değerleri ise ortalama, minimum ve maksimum değerler sırasıyla 0,1, 0,03 ve 1 kadar farklarla birbirine çok yakın sonuçlardır. Elde edilen bu çok yakın GKS değerleri Matlab koduyla elde edilen verilerin tutarlılığını göstermektedir.



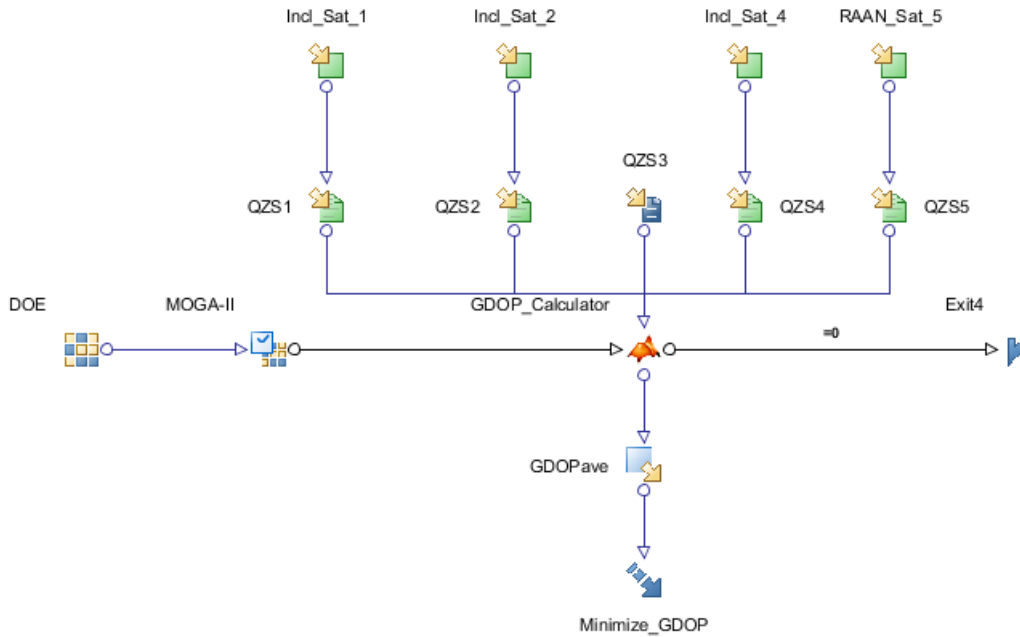
Şekil 3: Türkiye üzerindeki üç SBU uydusu ile iki yer sabit uyduya ait yer izi.

Elde edilen bu veriler Sonuç Bölümünde değerlendirilmiştir.

Bu analizlere ek olarak modeFRONTIER yazılımı kullanılarak TBSUS için [Büyük ve Diğerleri, 2019] bildirisinde önerilen ikinci konfigürasyondaki EYSY uydularının yörünge eğikliği 5 ile 80 derece arasında bağımsız olarak değiştirilerek, eş zamanlı olarak da SBUS baz uydu takımına eklenen beşinci yer sabit uydunun hangi boylamda konumlanacağı da bu uydunun yükseliş düğüm açısı 70 ile 190 derece arasında değiştirilerek Şekil 4'de verildiği şekilde eniyilemesi yapılmıştır. Bu analiz sonucunda Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de görüleceği üzere 80 derece yörünge eğikliği değeri en iyi değer olmuştur. Şekil 8'da görüleceği üzere de 70 derece yükseliş düğüm açısı da en iyi değer olarak ortaya çıkmıştır. Bütün bu sonuçlar Şekil 9'de özetlenmiştir. Bu analizler sonucunda en iyi yörünge sonucu olarak bütün yörünge eğikliği değerlerinin 80 derece olarak aynı olması ve uydunun verilen aralığa göre en uzak boylamda yer alması ortaya çıkmıştır. Bu konfigürasyonda da ortalama

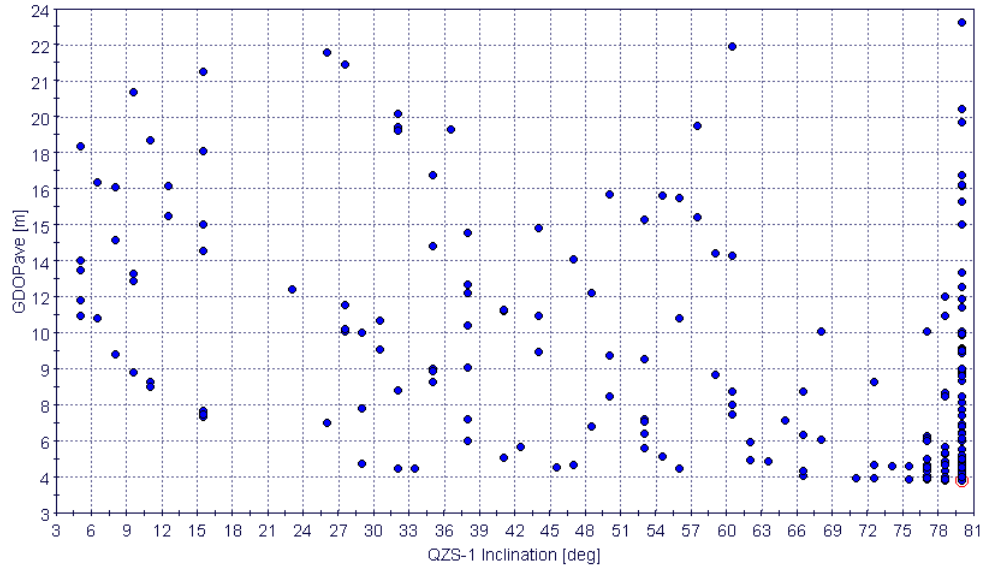
GKS değeri olarak 4,3356 değerine erişilmiştir. Bunlara ek olarak TBSUS, GPS uyduları ile beraber incelenerek de eniyileştirilmeye çalışılmıştır. Sınır değerler tekrar yörünge eğikliği için 5 ile 80 arasında, yükseliş düğümü için 70 ile 190 derece arasında belirlenmiştir. Bu bağlamda sonuçlar Şekil 11, Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14'de verilmiştir. Bu eniyileme sonuçları sınır değerlere yakın çıkmamıştır. SBUA-1, SBUA-2 ve SBUA-4 uyduları için eğiklik değerleri sırasıyla; 36.5, 26 ve 38 derece olarak bulunmuştur. SBUA-5 uydusunun yükseliş düğüm açısı ise 183 derece olarak elde edilmiştir. TBUS'un bir artırma sistemi olarak düşünülerek analiz edilmesinin yerinde bir karar olduğu söylenebilir. Bu veriler yine Sonuç Bölümünde değerlendirilmiştir.

Şekil 4'de gösterilen akış şeması, temel olarak modeFRONTIER programında yapılan optimizasyon akışını göstermektedir. SBUA-1, SBUA-2 ve SBUA-4 uydularının yörünge eğikliği değiştirilmek istenirken, SBUA-5 uydusunun yükseliş düğüm açısı değiştirilmek istenmektedir. SBUA-3 üzerinde ise hiçbir değişiklik uygulanmamaktadır. Maliyet fonksiyonu (İng. Cost Function) ortalama GKS değeri olarak tanımlanmıştır ve en iyileştirme işlemi ortalama GKS'yi en düşük değere indirmek üzerine kurgulanmıştır. MATLAB'da hesaplanan ortalama GKS değerleri modeFRONTIER programına gönderilerek çok amaçlı genetik algoritma yöntemi ile eniyileme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu eniyilemede GPS uyduları kullanılmamış, TBSUS tek başına eniyileştirilmiştir.

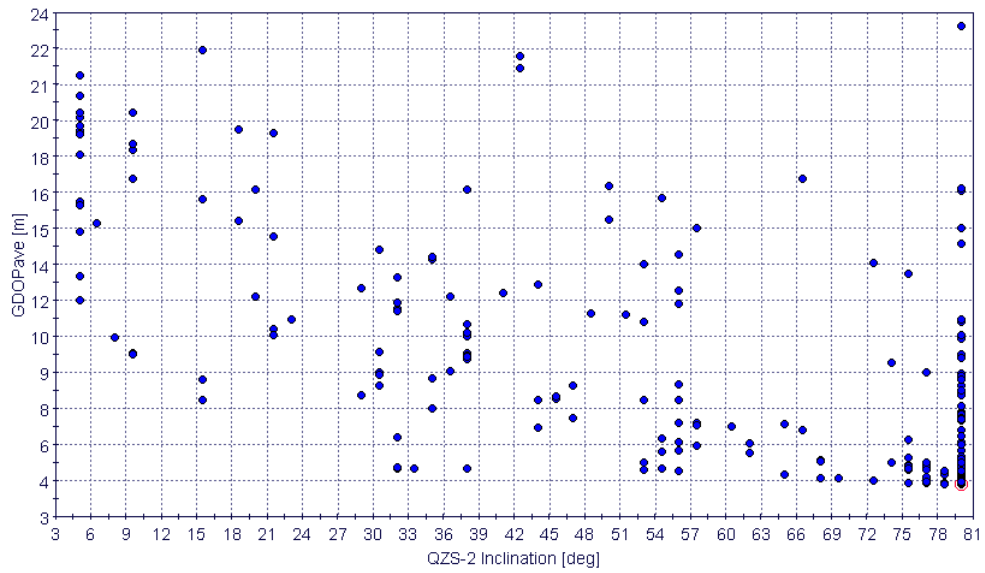


Şekil 4: Optimizasyon akış şeması

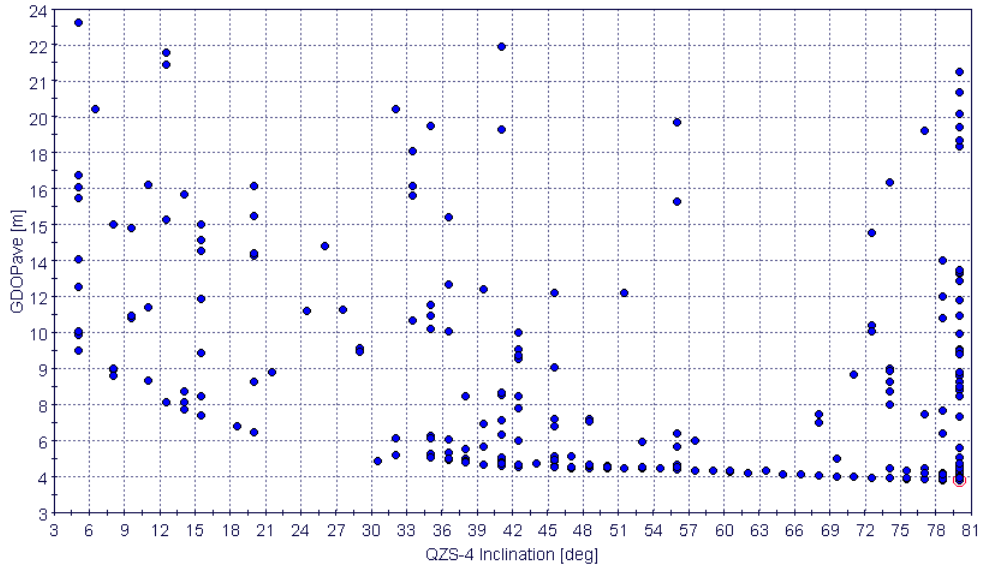
Şekil 5'de eniyileştirilmiş SBUA-1'in yörünge eğikliği grafiği verilmiştir. Bu grafikte her bir nokta genetik algoritma tarafından denenmiş değerleri göstermektedir. Görüldüğü üzere genetik algoritma en düşük ortalama GKS değerini veren yörünge eğikliğini sınır değere yakın bulmuştur. Şekil 6 ve Şekil 7'de sırasıyla SBUA-2 ve SBUA-4 uydularının eniyileştirilmiş yörünge eğiklikleri görülmektedir. Bu yörünge eğikliği değerleri de görüldüğü üzere sınır değerlerde bulunmaktadır.



Şekil 5: SBUA 1 uydusu için yörünge eğikliği eniyilemesi

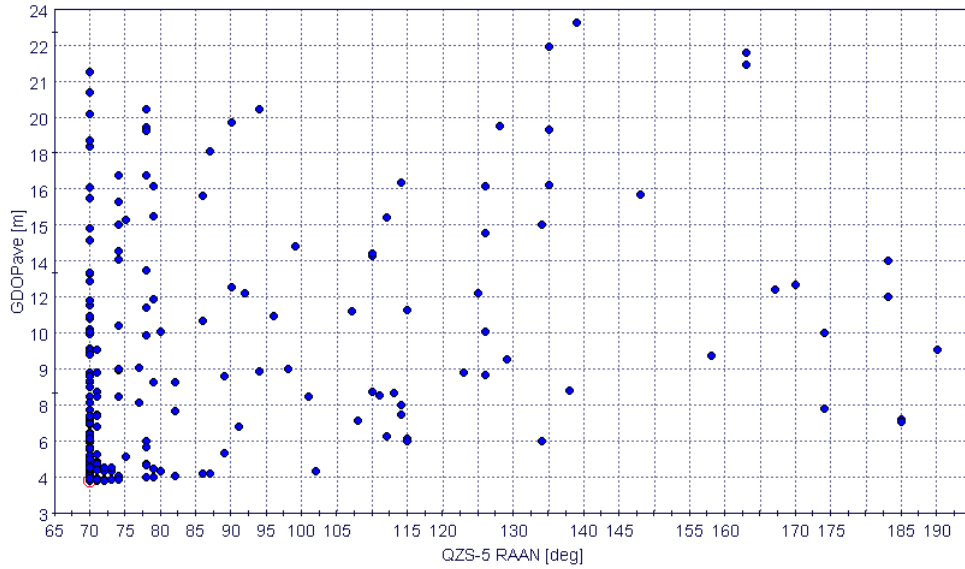


Şekil 6: SBUA 2 uydusu için yörünge eğikliği eniyilemesi



Şekil 7: SBUA 4 uydusu için yörünge eğikliği eniyilemesi

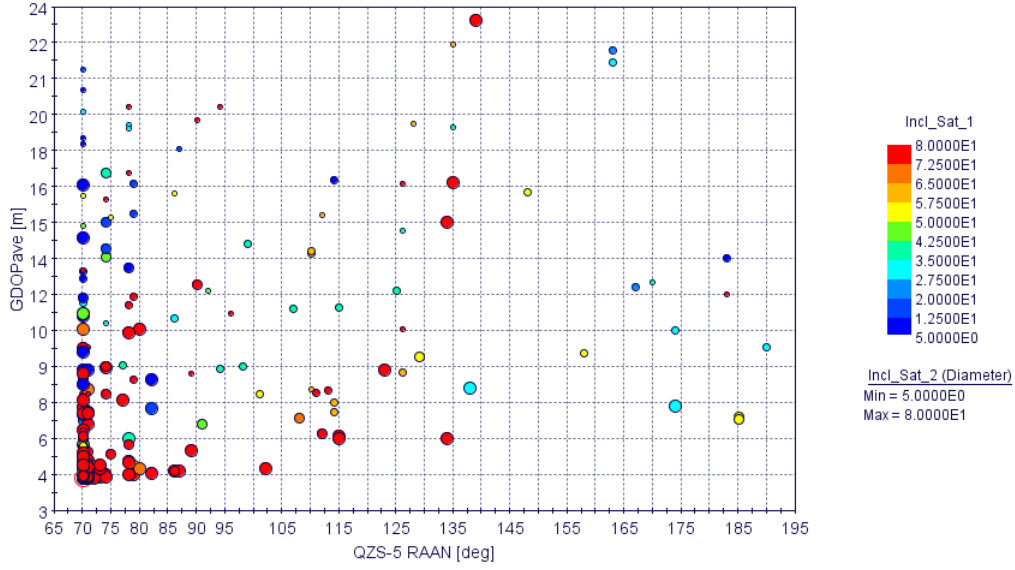
Şekil 8'de SBUA-5 uydusunun yükseliş düğüm açısının eniyileştirilmiş değeri kırmızı daire içerisinde görülmektedir. Sonuçlar sınır değerlere yakın çıkmakla beraber, yükseliş düğüm açısı uydunun Türkiye'ye olan uzaklığını doğrudan etkilemekte ve iletişim konisinden uzaklaşmasına sebep olmaktadır. Yükseliş düğüm açısının sınır değerlere yakınsaması her ne kadar ortalama GKS değerini düşürse de, Türkiye'ye ulaşacak sinyal kalitesinin düşmesine sebep olmakla beraber istenmeyen bir durumdur. Bu bağlamda sınır değerlere yakınsayan sonuçlar uygulanabilir değildirler.



Şekil 8: SBUA 5 uydusu için yükseliş düğüm açısı eniyilemesi

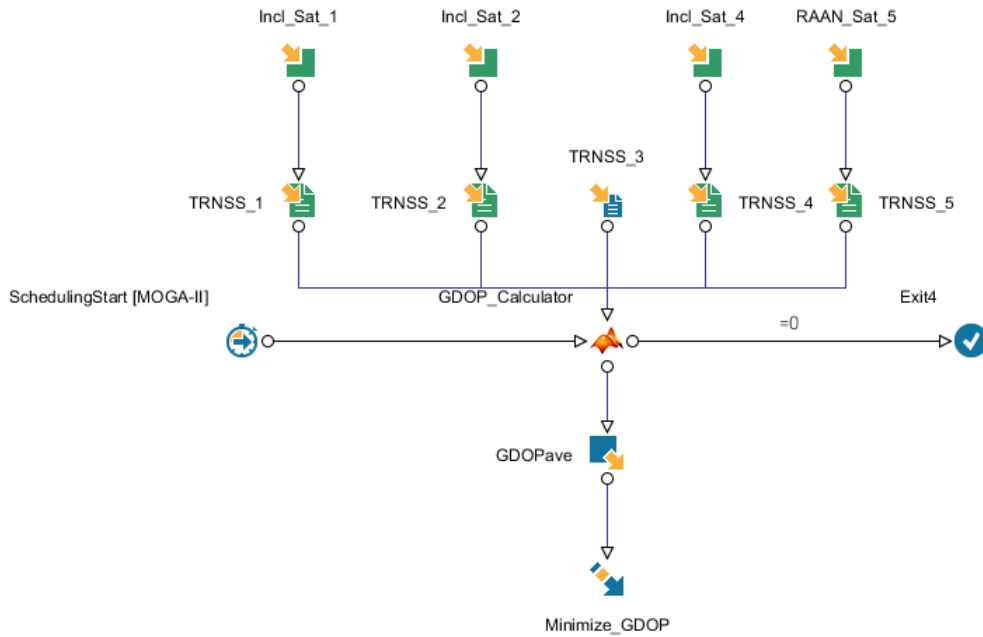
Şekil 9'de verilen grafikte değiştirilen yörünge eğikliği ve yükseliş düğümlerinin ortalama GKS değerine olan etkisi gösterilmiştir. Grafikte verilen noktalar, sağda gösterilen renk paleti için SBUA-1 uydusunun yörünge eğikliğini tasvir etmektedir. Bu noktaların çapı ise SBUA-2 uydusunun yörünge eğikliği göstermektedir. Grafiğin yatay eksen SBUA-5 uydusunun yükseliş düğüm açısını söylemektedir. Bu üç uydu için değişkenler göz önüne alındığında ortalama GKS değeri hepsi için sınır değerlere dayanmaktadır. Ortalama GKS değeri düşürülmüş olsa bile, yükseliş düğüm açısı

sınır değerlere geldiği için uydular Türkiye üzerinden uzaklaşmaktadır. Bu da uygulanabilirliği düşürmektedir.



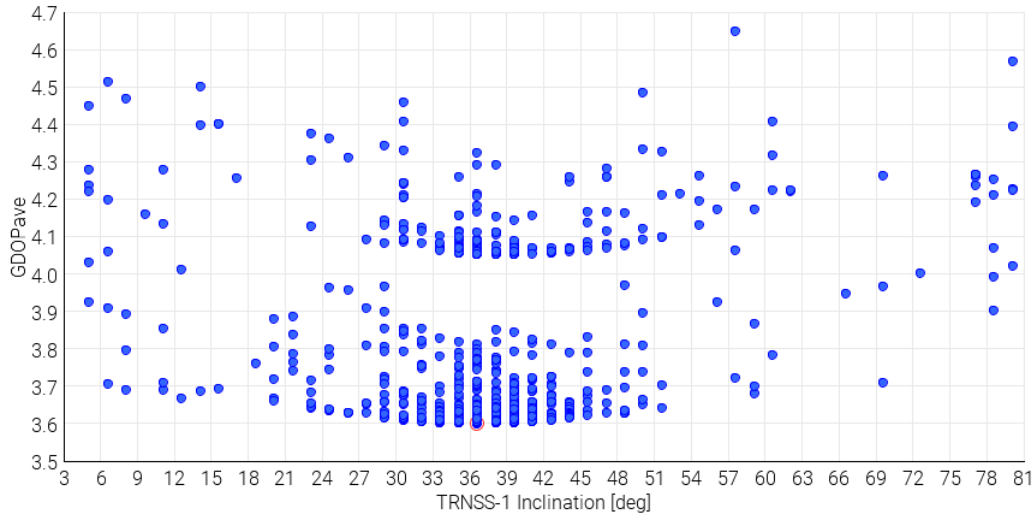
Şekil 9: Yörünge eğikliği ile yükseliş düğüm açısı değişimlerinin GKS'ye etkisi

Şekil 10'de akış şeması GPS uyduları ile beraber yapılan eniyileme akış şemasını göstermektedir. Temel olarak Şekil 4 ile aynı olan bu şema, ortalama GKS değerleri bağlamında birbirlerinden ayrılmaktadır. Bu şemada MATLAB kodu ortalama GKS değerlerini, TBSUS ve GPS uydularını kullanarak hesaplamaktadır. Bir önceki eniyileme işlemi ile aynı olarak çok amaçlı genetik algoritma yöntemi kullanılmış ve ortalama GKS değerleri en düşüğe tutulmaya çalışılmıştır. TBUA-1, TBUA-2 ve TBUA-4 için yörünge eğikliği değiştirilmiştir. TBUA-5'in ise yükseliş düğüm açısı değiştirilmiştir. Tekrar TBUA-3 uydusu için bir işlem yapılmamıştır.

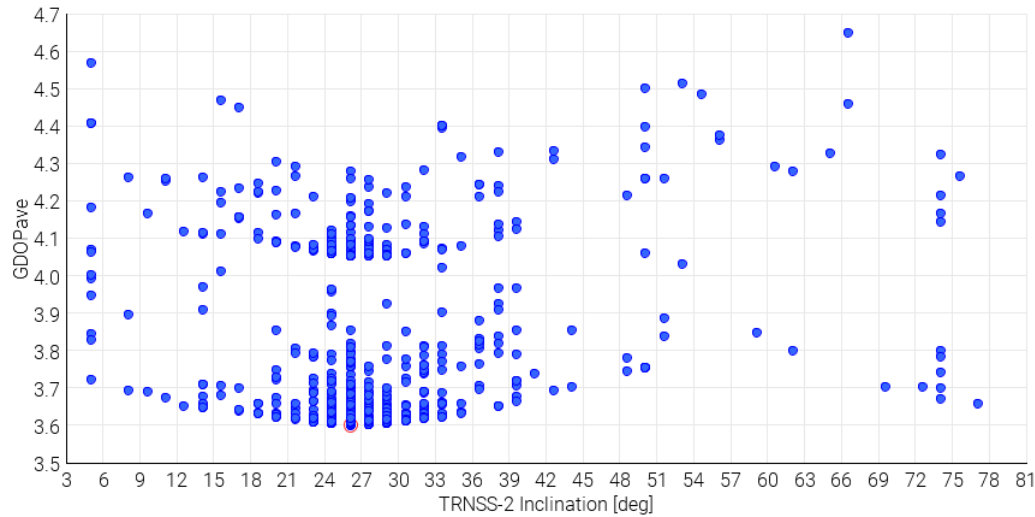


Şekil 10: GPS uyduları ve TBSUS için optimizasyon akış şeması .

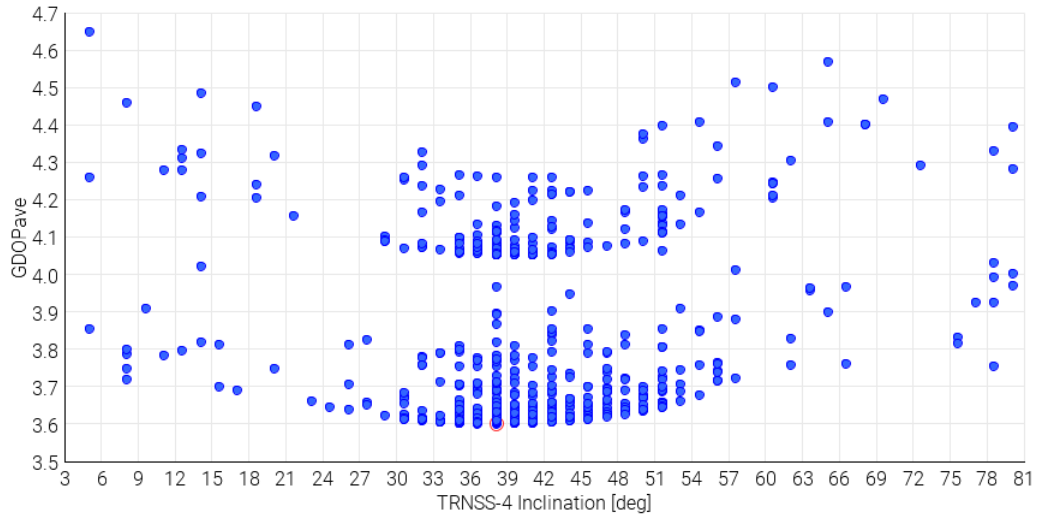
Şekil 11'de SBUA-1 uydusu için eniyilenmiş eğiklik değeri grafiği verilmiştir. Şekil 5'nin aksine, burada sonuçlar sınır değerlere dayanmamış olup, sonuçların uygulanabilir aralıklarda olduğu söylenebilir. Görüldüğü üzere 4.1 civarlarında bulunan lokal minimum, genetik algoritma vasıtasıyla global minimum noktasına çekilebilmiştir. Şekil 12'de verilen SBUA-2 uydusu yörünge eğikliği için de aynı eğilimin var olduğu söylenebilir. Sonuçların bu analiz için de sınır değerlerden uzak çıkması, uygulanabilirliğini arttırmaktadır. Şekil 13'de SBUA-4 uydusunun yörünge eğikliği eniyilmesi verilmiştir. Bu grafikte diğer ikisi gibi aynı eğilimi sergilemektedir. Bu bağlamda yapılan yörünge eğikliği en iyileme işlemi GPS uyduları hesaba katıldığında sınır değerlerden uzaklaşmaktadır. Bu da TBUS'un bir arttırım sistemi olan SBUS baz alınarak tasarlanmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 11: SBUA-1 uydusu için yörünge eğikliği eniyilmesi GPS uyduları ile birlikte

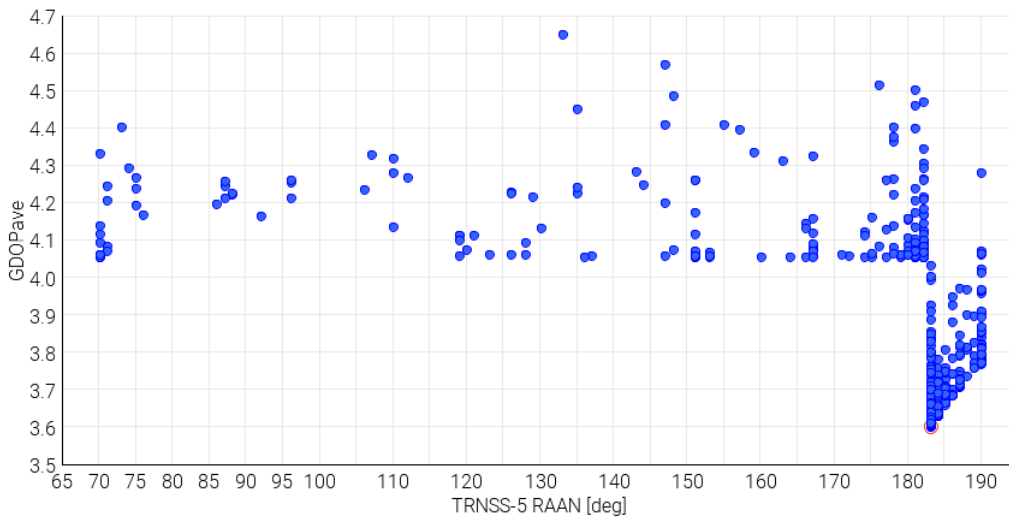


Şekil 12: SBUA-2 uydusu için yörünge eğikliği eniyilmesi GPS uyduları ile birlikte



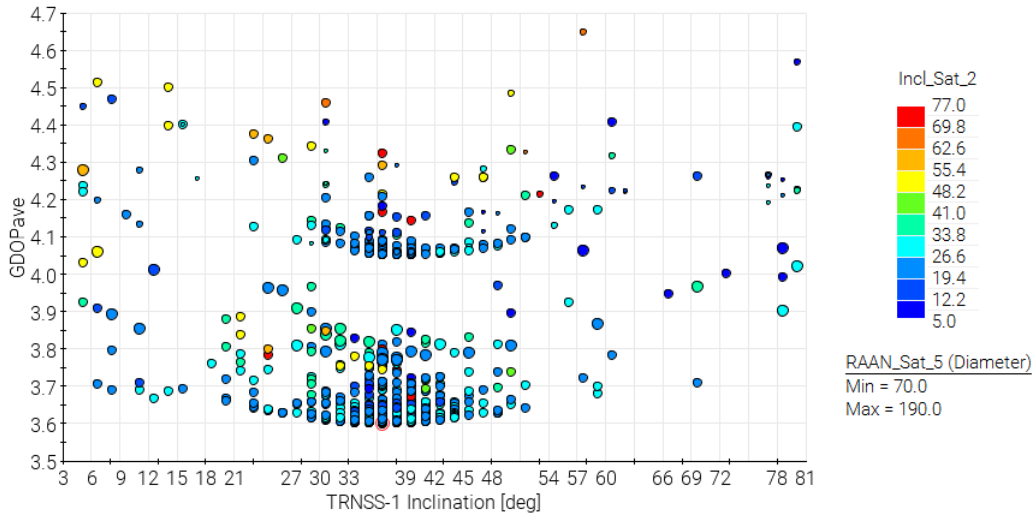
Şekil 13: SBUA-4 uydusu için yörünge eğikliği eniyilemesi GPS uyduları ile birlikte

Şekil 14’de verilen grafik SBUA-5 uydusu için yükseliş düğümü açısı için yapılan eniyileme sonuçlarını göstermektedir. Bu grafikte Şekil 8’in aksine sınır değerlerden uzaklaşmıştır. Elde edilen yeni yükseliş düğümü açısı SBUA-5 uydusunun Türkiye üzerine getirmemiş olsa da ortalama GKS değerini düşürmüştür. Grafikte görülen 4.1 civarındaki lokal minimum değeri genetik algoritma sayesinde global minimum değeri olan 3.6 civarlarına indirilmiştir. Bütün sonuçlara genel olarak bakıldığında genetik algoritma ile eniyileme işlemi yapılmasının doğru bir karar olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara sinyal kaybı ve uydü mesafesi açısından bakıldığında elde edilen yeni yükseliş düğümü açısının uygulanabilir bir değer olmadığı görülmektedir.



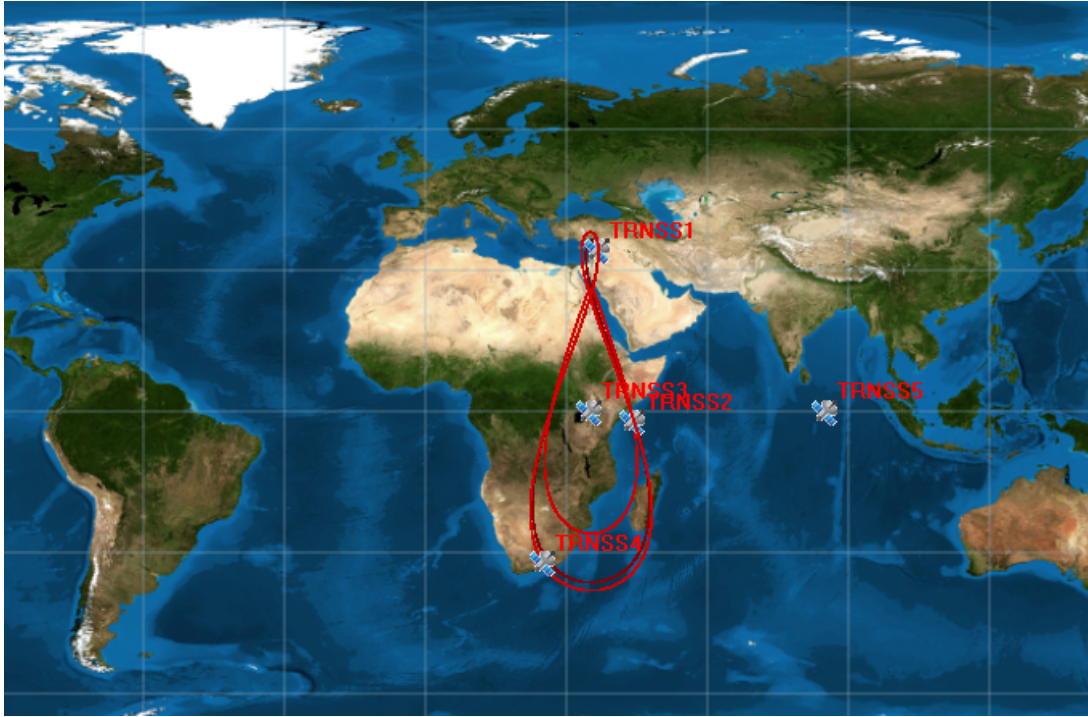
Şekil 14: SBUA 5 uydusu için yükseliş düğümü açısı eniyilemesi GPS uyduları ile

Şekil 15’de verilen grafik, TBSUS’nin GPS uydularını arttırmak için kullanıldığı zaman elde edilen eniyilenmiş ortalama GKS sonuçlarının, yörünge eğikliği ve yükseliş düğümü açısı ile olan korelasyonunu göstermektedir. Bu grafikte görüldüğü üzere elde edilen değerler, sınırlardan uzaklaştırılmış ve lokal minimum değerlerinden kurtarılmıştır. Kümelene, ortalama GKS değerinin 3.6 civarlarında olduğu bölgede olmakla beraber, 36.5 ve 28 derece eğiklik, 183 derece yükseliş açısı kapsamında ele alındığı zaman uygulanabilirliğin arttığı görülmektedir. Bu bağlamda TBSUS için yapılan analizlerde GPS ile beraber düşünüldüğü zaman sistem eniyilenebilir bir hale gelmektedir.



Şekil 15: SBUA 5 uydusu

Elde edilen bu yeni yörünge elemanları ile yörüngeler baştan oluşturulmuştur. Şekil 16'de eniyilenmiş yörünge elemanlarıyla oluşturulmuş yörüngelerin yer izi görülmektedir. Yer izinden de görüldüğü gibi sadece SBUA-5 uydusu Türkiye üzerinde konumlandırıl原因amamıştır. Dört ve beş uydulu konfigürasyonlar arasında ortalama GKS değerleri bakımından çok düşük bir fark olması nedeniyle SBUA-5 uydusunun kullanılmaması tartışmaya açık bir konudur. Eniyileme sonunda elde edilen yeni yörünge eğikliklerinin Türkiye'nin enlemlerinden daha büyük değerlerde çıkması içgüdüsel olarak beklenirken, elde edilen değerler 36-42 dereceden daha küçük çıkmıştır. Bu noktada eniyileme işleminin GPS uydularının kullanıldığı durumlar için yapılmasının daha doğru olduğu söylenebilir.



Şekil 16: SBUA 5 uydusu

SONUÇ

Uygulamalar Bölümünde elde edilen veriler şu şekilde değerlendirilebilir: Tablo 2 son sütundaki değerler ile Tablo 1 orta sütundaki değerler uydu sayıları bağlamında eş uydu konfigürasyonu değerleridir. Bu iki sütuna ait değerler karşılaştırıldığında mertebelerinde tam olarak tuttuğu görülmektedir. Sayıların tam olarak tutmama sebebi iki çalışmadaki GPS uydu verilerinin farklı tarihlere ait olması ve SBUS uydularına ait verilerdeki ufak farklardır. Tablo 3'un ikinci sütunu incelendiğinde SBUS uydularının Ankara üzerine taşındığı durumda da iyi bir artırım sistemi olabileceği görülmektedir. Aynı Tablonun üçüncü sütundaki değerler incelendiğinde ise yer sabit yörüngeye beşinci bir uydunun eklenmesinin ancak çok küçük bir iyileştirme sağlamasından dolayı bir artırım sistemi olarak SBUS'nin bir uydu eklemesi yapmadan iyi bir temel oluşturacağı kanaatine varılmıştır. Ancak ortalama GKS değerlerini 10 değerinin altına çekmek için de bir eniyilemeye ihtiyaç duyulduğu düşünülmektedir. Bu çalışmada elde edilen GKS değerleri sadece belirli bir nokta için olup, ileriki çalışmalarda Türkiye'nin üzerinde bir ağ oluşturularak bölgesel GKS değerleri de analiz edilecektir.

Eniyileme analizleri sonuçları değerlendirildiğinde ise bütün yörünge eğikliği değerlerinin aynı değere ulaşması SBUS'u temel almanın doğru bir yaklaşım olduğunu tekrar göstermiştir. Ayrıca, hem yörünge eğikliği hem de yükseliş düğüm açısı değerlerinde sınır değerlerin en küçük GKS'yi vermesi de bu değerler için uyduların gözyüzünde geniş açılarla ayrılmış bir şekilde geniş bir dağılıma eriştiğinin göstergesidir. Her ne kadar bu konfigürasyon GKS için en iyi sonuç olmuş olsa da mesafe ve düşük yükselme açısı kaynaklı atmosferik kırılma nedeniyle karşılaşılabilecek sinyal kayıpları, ve coğrafik engeller ile insan kaynaklı yapılaşmalar nedeniyle yüksek yükselme açısı değerlerine gereksinim olması nedenleriyle de daha bütünlüklü analizler yapılması gerekliliği de dikkate alınmalıdır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın ilk aşamalarında katkı sunmuş olan Ömer Utku Örengül'e ve bu çalışmada kullanılmış olan yer izleri şekillerini [Büyük ve Diğerleri, 2019] bildirisi sırasında yeniden oluşturmuş olan Seda Büyük'e teşekkür ederiz.

EK A: UYDU TAKIMLARININ YÖRÜNGE ELEMANLARI

Bu çalışmadaki uygulamalarda kullanılan iki uydu takımı önermesinin [Büyük ve Diğerleri, 2019] referansında tanımlanmış olan yörünge elemanları Tablo 6, 7, 8, 9 ve 10'de verilmiştir.

Bu Tablolarda; a yarı asal eksen (İng. semi-major axis), e yörünge basıklığını (İng. eccentricity), i yörünge eğikliğini (İng. inclination), Ω yükseliş düğüm açısını (İng. right ascension of ascending node), ω yerberi açısını (İng. argument of perigee), θ doğru ayrıklığı (İng. true anomaly), Tarih ise yörünge elemanlarının tanımlı olduğu zamanı belirtmektedir.

Tablo 6: Tokyo üzerinde aynı yörünge düzlemine oturtulmuş SBUS yörünge elemanları.

	SBU 1	SBU 2	SBU 3	SBU 4
a km	42167.7	42163.8	42165.0	42156.2
e	0.07572	0.07477	0.00014	0.07506
i der	41.2318	40.8192	0.05900	40.7077
Ω der	150.717	264.866	232.786	18.2382
ω der	270.586	270.277	115.916	269.023
θ der	203.913	91.3292	279.680	338.465
Tarih	04 Şubat 2019, 00:00:00.000			

Tablo 7: Tokyo üzerinde oturtulmuş EYSY yörünge elemanları.

	EYSY 1	EYSY 2	EYSY 3	EYSY 4
a km	42167.7	42163.8	42165.0	42156.2
e	0.00192	0.00192	0.00014	0.00192
i der	41.2318	40.8192	0.05900	40.7077
Ω der	150.717	264.866	232.786	18.2382
ω der	270.586	270.277	115.916	269.023
θ der	203.913	91.3292	279.680	338.465
Tarih	04 Şubat 2019, 00:00:00.000			

Tablo 8: Ankara üzerine oturtulmuş SBUS yörünge elemanları.

	SBUA 1	SBUA 2	SBUA 3	SBUA 4
a km	42167.7	42163.8	42165.0	42156.2
e	0.07572	0.07477	0.00014	0.07506
i der	41.2318	40.8192	0.05900	40.7077
Ω der	50.7171	175.866	132.786	278.238
ω der	270.586	270.277	115.916	269.023
θ der	203.913	91.3292	279.680	338.465
Tarih	04 Şubat 2019, 00:00:00.000			

Tablo 9: Ankara üzerine oturtulmuş birinci önerme için yörünge elemanları.

	TBSUS 1	TBSUS 2	TBSUS 3	TBSUS 4	TBSUS 5
a km	42167.7	42163.8	42164.9	42156.2	42164.9
e	0.07572	0.07477	0.00014	0.07506	0.00014
i der	41.2318	40.8192	0.05900	40.7077	0.05900
Ω der	50.7171	175.866	112.786	278.238	152.786
ω der	270.586	270.277	115.916	269.023	115.915
θ der	203.913	91.3292	279.680	338.465	279.680
Tarih	04 Şubat 2019, 00:00:00.000				

Tablo 10: Ankara üzerine oturtulmuş ikinci önerme için yörünge elemanları.

	TBSUS 1	TBSUS 2	TBSUS 3	TBSUS 4	TBSUS 5
a km	42167.7	42163.8	42164.9	42156.2	42164.9
e	0.07572	0.07477	0.00014	0.07506	0.00013
i der	41.2318	40.8192	0.05900	40.7077	0.05900
Ω der	50.7171	175.866	132.786	278.238	152.786
ω der	270.586	270.277	115.916	269.023	115.915
θ der	203.913	91.3292	279.680	338.465	279.680
Tarih	04 Şubat 2019, 00:00:00.000				

Kaynaklar

- Bhatta, B., 2010. *Global Navigation Satellite Systems: Insights into GPS, Glonass, Galileo, Compass, and Others.*, B.S. Publications, Vol. 1
- Büyük S., Örengül Ö. U., Başibüyük, A. C., Tuğcular, U., Şişman, T. C., Tola C., 2019. *Preliminary Orbit Design for Turkish Regional Navigation Satellite System*, RAST 2019, İstanbul, 11-14 Haziran
- Choi, M., Won, D. H. ve Ahn, J...(2018) *Conceptual Satellite Orbit Design for Koeran Navigation Satellite System* Japan Soc. Aero. Space Sci., Vol. 61, s.12-20
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. ve Collins, J., 2007. *Global Positioning System: Theory and Practice*, Springer-Verlag, Vol. 5
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. ve Wasle, E., 2008. *GNSS - Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*, Springer-Verlag, Vol. 1
- Kaplan, E. D. ve Hegarty, C. J., 2006. *Understanding GPS Principles and Applications*, Artech House Publishers, Vol. 2, s.322-328
- Keyvani, F., Torabi, S. H...(2019) *Design and Simulation of Regional Navigation Constellation with Optimized Mean DOP based on Hybrid GEO and IGSO Satellites* International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace, Vol. 6
- Langley, R.B., 1999. *Dilution of Precision*, GPS World, Mayıs
- Wu, F., Kubo, N. ve Yasuda, A., 2004. *Performance Evaluation of GPS Augmentation Using Quasi-Zenith Satellite System*, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Kasım 2004
- Xia, N., Zhi, Q., He, M., Hong, Y., ve Du, H...(2020) *A navigation satellite selection algorithm for optimized positioning based on Gibbs sampler* International Journal of Distributed Sensor Networks, Vol. 16