



## Integration of sensor vision capabilities on UAV flight route optimization: A linear model and a heuristic algorithm proposal

Nahit Yılmaz<sup>1\*</sup> , Cevriye Temel Gencer<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Department of Logistics, Turkish Armed Forces General Staff, Ankara, 06100, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Industrial Engineering, Gazi University, Ankara, 06570, Turkey

### Highlights:

- A linear model proposal that takes sensor vision capabilities into the unmanned air vehicle routing process
- Development of heuristic routing algorithm using unit sensor covering and demon algorithms
- Improvement in route lengths

### Keywords:

- UAV route optimization,
- Sensor routing model,
- Sensor management,
- Unit sensor covering algorithm

### Article Info:

Research Article

Received: 28.03.2018

Accepted: 28.12.2018

### DOI:

10.17341/gazimmfd.571630

### Correspondence:

Author: Nahit Yılmaz

e-mail:

nahit.yilmaz@hotmail.com

phone: +90 312 402 6100

### Graphical/Tabular Abstract

One of the most important problems encountered in efficient use of UAV systems is to determine the minimum costed route which can observe the maximum number of targets. UAV route models can be developed by integrating vision capabilities of the sensors into the route plan. In this study, taking into account the sensor capabilities an integrated linear model and a two-phased heuristic routing algorithm are proposed for the route planning process of UAV.

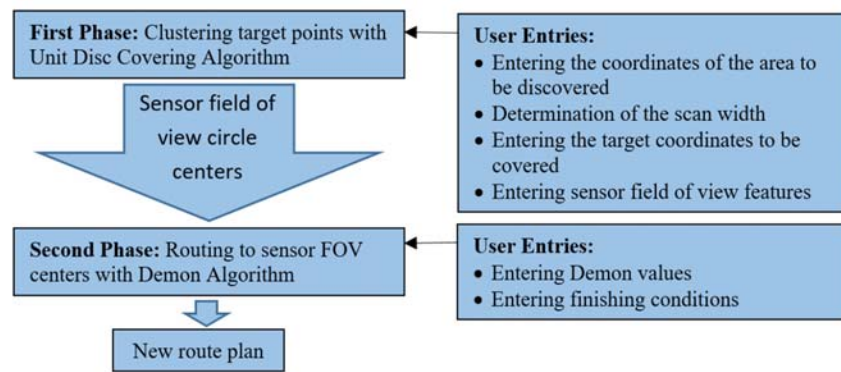


Figure A. Flowchart for two-phased heuristic routing algorithm

**Purpose:** In this study, we aimed to develop an UAV route model that includes sensor vision capabilities. For this purpose, a linear model and a two-stage heuristic algorithm are proposed.

### Theory and Methods:

UAV Route Optimization is considered as a common type of Traveling Salesman Problem and Vehicle Routing Problem in the literature. With the developed linear ISS&ROM, the sensor selection is made first in the routing process and then the route can be created according to the determined sensor types. In cases where ISS&ROM model is insufficient, we developed a two phase-heuristic algorithm in which Unit Sensor Covering Algorithm is used for clustering of task points and Demon Algorithm is used for routing process.

### Results:

The effectiveness of the proposed models are tested in 10, 20, 30, 40, 50, 107 locations. It is seen that the integer ISS&ROM model cannot provide a solution in determined time period when the number of locations is 107. Since routing problems are generally NP-hard, the number of nodes is too high to be solved by linear models. In the heuristic algorithm, it is seen that the route lengths are generally shorter than the linear model. The reason for this is the consideration of the entire area and the determination of the shortest route through the minimum number of sensor disc centers, while the route is generated in the linear model only through the targeted locations.

### Conclusion:

The integration of sensor field of view capabilities into UAV routing process is a significant factor in shortening the overall route length. The proposed heuristic algorithm can be used in developing new algorithms that can provide maximum dynamic target detection in minimum time.



## Sensör görüş yeteneklerinin İHA rota optimizasyonuna entegrasyonu: Doğrusal bir model ve sezgisel bir algoritma önerisi

Nahit Yılmaz<sup>1\*</sup> , Cevriye Temel Gencer<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Genelkurmay Başkanlığı, Ankara, 06100, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, 06570, Türkiye

### Ö N E Ç I K A N L A R

- İnsansız hava aracı rotalama sürecinde sensör görüş alanlarını dikkate alan doğrusal model önerisi
- Birim sensör kaplama ve demon algoritması kullanılarak sezgisel rotalama algoritması geliştirilmesi
- Rota uzunluğunda iyileştirme

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 28.03.2018

Kabul: 28.12.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.571630

#### Anahtar Kelimeler:

İHA rota optimizasyonu,  
sensör rotalama modeli,  
sensör yönetimi,  
birim sensör kaplama  
algoritması

#### ÖZET

Günümüzde ülkeler, İnsansız Hava Aracı teknolojilerinin geliştirilmesi için araştırma ve geliştirme çalışmalarına büyük kaynak aktarmaktadırlar. Teknoloji yoğun bu sistemlerin etkin kullanımında karşılaşılan en önemli problem, maksimum sayıda hedefi gözlemleyebilecek minimum maliyetli rota planını belirleyebilmektir. İnsansız Hava Aracı Rotalama Problemi; literatürde Çoklu Gezin Satıcı ve Araç Rotalama Probleminin bütünleştiği olarak kabul edilmektedir. İnsansız Hava Araçlarına entegre edilen sensörlerin görüş yeteneklerinin rota planına dâhil edilmesiyle rotalama modelleri geliştirilebilir. Bu çalışmada; İnsansız Hava Aracı rotalama sürecinde, sensör görüş yeteneklerini dikkate alan doğrusal bir model ve iki aşamalı sezgisel bir rotalama algoritması önerilmektedir. Önerilen modellerin testi için Türkiye güney sınır hattı üzerinde keşif ve gözetleme faaliyetine yönelik jenerik bir senaryo geliştirilmiştir. Test sonuçları, sensör yeteneklerinin İnsansız Hava Aracı uçuş rotalama modellerine dâhil edilmesinin uçuş yolunun en küçüklenmesinde etkili olduğunu ve iki aşamalı sezgisel rotalama algoritmasının İnsansız Hava Aracı rotalama sürecinde etkin olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

## Integration of sensor vision capabilities on UAV flight route optimization: A linear model and a heuristic algorithm proposal

### H I G H L I G H T S

- A linear model proposal that takes sensor vision capabilities into the unmanned air vehicle routing process
- Development of heuristic routing algorithm using unit sensor covering and demon algorithms
- Improvement in route lengths

#### Article Info

Research Article

Received: 28.03.2018

Accepted: 28.12.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.571630

#### Keywords:

UAV route optimization,  
sensor routing model,  
sensor management,  
unit sensor covering  
algorithm

#### ABSTRACT

Nowadays countries provide great resources for the research and development activities to develop Unmanned Air Vehicle technologies. The most important problem encountered in efficient use of these technologically intensive systems is to determine the minimum cost route plan which can observe the maximum number of targets. Unmanned Air Vehicle Route Optimization Problem is considered as the integration of Traveling Salesman Problem and Vehicle Routing Problem in the literature. Unmanned Air Vehicle Route Models can be developed by incorporating the vision capabilities of the sensors into the route plan. In this study, taking into account the sensor capabilities an integrated linear model and a two-phased heuristic routing algorithm are proposed for the route planing process of Unmanned Air Vehicle. A generic scenario related to surveillance and reconnaissance activities on southern borderline of Turkey has been developed in order to test the proposed models. The test results show that integrating sensor vision capabilities on Unmanned Air Vehicle flight route model is effective in minimization of total flight distance and the proposed two-phased heuristic routing algorithm can be effectively used in the Unmanned Air Vehicle route planing process.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsansız Hava Araçları (İHA), tehlikeli bölgelerde ve riskli görevlerde kullanılan, uzaktan komuta ile yönetilebilen veya önceden programlanmış plan doğrultusunda görev ifa edebilen sistemler olarak tanımlanmaktadır. Günümüzde, kapasite ve yetenekleri giderek artan İHA'ların geliştirilmesi için araştırma ve geliştirme çalışmalarına büyük kaynak aktarılmaktadır. İHA'lar arama-kurtarma, yangınla mücadele, fotoğrafçılık, kamera çekimi vb. sivil amaçlar için kullanılsa da keşif, gözetleme ve istihbarat çalışmaları İHA'ların en temel kullanım sahasıdır. Özellikle yasadışı göç ve terör faaliyetleri nedeniyle sınır bölgelerinin güvenliğini sağlamada İHA'lar birçok ülke tarafından etkin olarak kullanılmaktadır. Yapısal olarak, yer sistemi ve hava aracı olarak iki ana bölümden oluşan İHA'da; yer sistemleri hava aracının kontrolünün sağlandığı yapıları içerirken, hava aracı kısmında faydalı yük, uçuş için gerekli aviyonik cihazlar ve haberleşme sistemleri bulunur. Karakaya'ya [1] göre; teknoloji yoğun bu sistemlerin etkin kullanımında karşılaşılan en önemli problem, maksimum sayıda hedefi gözlemleyebilecek minimum maliyetli rota planını belirleyebilmektir. Diğer taraftan, Türkiye güney sınır hattının 2573 km'lik uzunluğu ve artan tehdit durumları düşünüldüğünde İHA kullanım verimliliğinin artırılması da önemli bir gerekliliktir [1]. Ancak; İHA'ların gözlem kabiliyetinin, dinamik konumları ve sensör yetenekleri ile ilişkili olmasından dolayı rota planlama sürecinin yanında ayrıca yürütülmesi gereken bir de sensör görev planı süreci söz konusudur [2]. Belirli bir rota doğrultusunda ilerleyen hava aracının karasal zeminde izleme yapan sensörünün nereye bakacağını belirlenmesi, literatürde "Sensör Kontrol Problemleri" olarak tanımlanmaktadır. Son yıllarda, literatürde; "Bütünleşik Rotalama (Coupled Routing)" şeklinde rota ve sensör planının birlikte ele alındığı [3, 4] ve "Ayrışık Rotalama (Decoupled Routing)" şeklinde her iki sürecin birbirinden ayrı olarak ele alındığı [5] çeşitli çalışmaların yapıldığı görülmektedir. Collins vd. [3], İHA rotalama ve sensör optimizasyonunu birlikte ele aldıkları çalışmalarında hedeflerin ve İHA'ların konumlarını bir olasılık dağılımına göre belirleyerek, sezgisel bir rota algoritması önermişlerdir. Sun ve Duan [4], benzer içerikli çalışmada hedeflerin ve İHA'ların konumlarının tahmin edilmesinde "Partikül Filtresi (Particle Filter)" kullanmayı önermişlerdir. Ancak bu çalışmalarda; rota planı sensör görüş alanlarını dikkate alacak şekilde yürütülmemekte, İHA'nın ve hedeflerin zamana bağlı konumlarının belirlenmesi için stokastik modeller türetilmektedir. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, NP-zor yapıda olan İHA rota optimizasyonu çalışmalarında genellikle sezgisel algoritmalarının önerildiği, sensör görüş yeteneklerinin rotalama sürecine dâhil edildiği sınırlı sayıda yayında ise doğrusal modellerin kullanılmadığı görülmektedir. Bu amaçla; çalışmada, karasal zeminde izleme yapan sensörün görüş alanının İHA rotalama modeline entegrasyonunu sağlamak amacıyla kapasiteli İHA rotalama modelinin geliştirilmesi hedeflenmiş, konum sayılarının fazla olduğu veya daha kısa sürede çözüm elde

edilmesinin hedeflendiği durumlar için ayrıca sezgisel bir rotalama algoritması geliştirilmiştir. Çalışma konusunun motivasyonunu, İHA rotalama sürecinde sensör görüş alanlarının rota planlarına dâhil edilmesi oluşturmaktadır. Geliştirilen doğrusal model ve sezgisel algoritma ile İHA'ların toplam uçuş uzunluğunun en küçüklenmesinde önemli sonuçlar alındığı uygulama sonuçlarında görülmektedir. Türkiye güney-doğu sınır hattına yönelik senaryoların test edildiği bu çalışmada sensör görüş alanlarına göre İHA rota planlaması ilk defa uygulanmaktadır. Çalışmanın ilerleyen aşamaları şu şekilde düzenlenmiştir: 2'nci bölümde İHA rota planı ve sensör yönetimi konularına ilişkin literatür incelemesi sunulmuş, 3'ncü bölümde rotalama ve sensör yönetiminin birlikte ele alındığı bütünleşik bir doğrusal model ve iki aşamalı sezgisel bir algoritma verilmiştir. 4'ncü bölümde önerilen modellerin, sınır bölgesinde keşif gözetleme amacıyla görevlendirilen İHA'ların yönetimine yönelik jenerik bir senaryoda test edilmiş, 5'nci bölümde ise çalışma sonuçları değerlendirilerek ileriki çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

İHA Rotalama Problemi; literatürde Çoklu Gezgin Satıcı [6] ve Araç Rotalama Probleminin (ARP) [7] bütünleşği olarak kabul edilmektedir. Konu itibarıyla İHA'lar son yıllarda ilgi çeken çalışma alanlarından biri olmuştur. Enright ve Frazzoli [8], dinamik hedeflerin olduğu bir ortamda İHA grubunun hedeflere atanması ve rotalanmasını araştırmış, amaç fonksiyonunu hedeflerin minimum zamanda tespiti üzerine kurmuşlardır. Kuyruk teorisi, kombinasyonel optimizasyon ve stokastik geometri kullanarak geliştirdikleri yöntemin etkinliğini senaryolarla test etmişlerdir. Pakkan ve Ermiş [9], İHA'ların çoklu hedeflere rotalanması sürecini Kapasiteli ARP olarak ele almış ve Genetik Algoritma tabanlı bir çözüm yöntemi önermişlerdir. Sun vd. [10], engebeli arazide İHA'lar için rota belirleme çalışmalarında "Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)", "Merkezileştirme" ve "B-spline Eğrisi" yapılarını kullanmışlardır. İHA'ların uçuş esnasında yapacakları keskin dönüşleri küçükmek için "B-spline Eğrisi", araziye ait izohips eğrilerini kullanarak uygun güzergâh belirlemede "Merkezileştirme" kullanılmıştır. Çalışmanın dikkat çeken noktası, PSO algoritmasının başlangıç partikülü olarak "Skeletonization" aşamasında belirlenen güzergâhların kullanmasıdır. Böylelikle PSO sürecinde gereksiz arama işleminden kaçınılmıştır. Chen vd. [11], statik ve dinamik engellerin bulunduğu ortamda hedeflerin takibi ve engellerden kaçınma için İHA'ların dinamik ve kinematik özelliklerini de dikkate alan doğrusal bir model önermişlerdir. Sundar ve Rathinam [12], hedef noktalarının bir adet İHA tarafından en az bir kez ziyaret edildiği ve herhangi bir yakıt merkezinden yakıt alımı yapılabilen İHA rota planı üzerine çalışmıştır. Yakıt kısıtlı gezgin satıcı problemi olarak ele aldıkları söz konusu probleme karışık tamsayı doğrusal programlama ve çeşitli sezgisel metodlar kullanarak çözüm aramışlardır. Seylan vd. [13], düzlemsel olmayan arazilerin insansız araçlarla taranması için geliştirdikleri yöntemde araziye eşit karesel

alanlara sahip düğümlere ayırmış, komşu düğümlere yükselti ve eğime bağlı ağırlıklar atamış ve Minimum Kapsama Ağacı ile tarama rotasını belirlemişlerdir. Mufallı vd. [14], izlenecek hedeflerin zaman penceresini de dikkate alarak sensor görev planı ve rotalama aşamalarını ayrı ayrı ele almışlardır. Guerriero vd. [15], dinamik hedeflerin İHA uçuş rotası ile kaplanması inceledikleri çalışmalarında; toplam uçuş yolunun en küçüklenmesi, zaman penceresi içerisinde tüm hedeflerin kaplanması ve kullanılan İHA sayısının en küçüklenmesi şeklinde üç farklı amaç üzerinde durmuşlardır. Babel [16], İHA'ların navigasyon yeteneklerinin de dikkate alındığı ve çeşitli engellerin bulunduğu yol üzerindeki rota planında ağ tabanlı bir method kullanmıştır. Bu çalışmada, İHA'ların iç navigasyon sisteminin yol açtığı gerçek konum ve tahmin edilen konum arasındaki farklılıklardan kaynaklanan rotalama problemlerine değinilmiş, uydu tabanlı konumlandırma sisteminin görsel navigasyon sistemi ile desteklenmesi gerektiği vurgulanmıştır. Karakaya [1], uçuş mesafesi kısıtlarına sahip belirli sayıda İHA'nın maksimum sayıda hedefi kapsayacak şekilde rotalanması probleminde Max-Min Karınca Kolonisi Algoritması ile çözüm aramıştır. En Yakın Komşu Sezgiseli ile karşılaştırılan test sonuçlarında, önerilen Max-Min Karınca Kolonisi Algoritmasının daha iyi sonuçlar verdiğine dikkat çekilmiştir. Sarıççek ve Akkuş [17], İHA'lar ile sınır güvenliğini sağlamada üs konumlarının seçimi ve rota planlaması aşamalarından oluşan iki aşamalı bir çalışma yürütmüşlerdir. Birinci aşamada; aday konumlar hava alanı yapısı, tehdit kaynaklarına yakınlık, sınır bölgesine yakınlık, hava trafik yoğunluğu kriterleri açısından ELECTRE metodu ile uzman kişilerce değerlendirilmiş ve her bir aday konum için uygunluk parametreleri belirlenmiştir. İkinci aşamada ise İHA rota planlaması, maksimum uygunluk değerini oluşturacak rota planı ve minimum maliyet oluşturacak İHA rotası şeklinde iki ayrı model olarak ele alınmıştır. Avellar vd. [5], tarafından yapılan çalışmada belirli bir alanı bir zaman dilimi içerisinde kamera yetenekleri ile tarayacak İHA'lar için görev planı belirleyen çözümler önerilmiştir. Geliştirdikleri yöntemde; önce bir İHA'nın karasal zemindeki hedefleri en kısa zamanda kapsayacağı ağaç yapısı belirlenmeye çalışılmış, ardından birinci aşamadan alınan sonuçlar doğrultusunda İHA filosunun tüm alanı kapsayacağı rota yapısı karışık tam sayılı doğrusal modelleme ile belirlenmeye çalışılmıştır. Zhang ve Duan [18], arazi engebeleri ve uçuşa yasak bölgelerin bulunduğu alanında dönüş açısı, tırmanma ve süzülme kısıtları altında üç boyutlu İHA rota planlaması için mutasyon, çaprazlama ve seçim temelli bir arama modeli olan kısıtlı-differansiyel genetik algoritma önermişlerdir. Çalışmaya ilişkin test sonuçları, önerilen arama modelinin PSO ve kısıtlı-PSO'ya göre en kısa rota uzunluğunu elde etmede daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Özalp vd. [19] ise genetik algoritmayı radara yakalanmadan rota oluşturma sürecinde kosinüs teoremi ile geliştirerek dairesel bir kaçış rotası oluşturmada kullanmışlardır. Diğer taraftan, İHA'ların rota planlaması sürecinde coğrafi yapı, tehlikeli bölgeler, emniyet irtifası, hareketli/hareketsiz hedefler, yükselti, yakıt, mühimmat, tehdit özelliklerinin çok kriterli karar verme teknikleri ile derecelendirildiği çalışmalar da bulunmaktadır

[20, 21]. İHA rotalama problemlerine ilişkin son yıllarda literatür taraması çalışmaları yapıldığı da görülmektedir [22, 23].

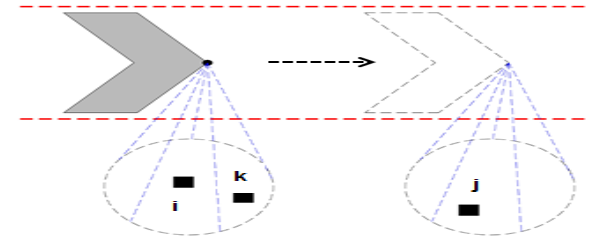
### 3. İHA SİSTEMLERİ ROTA OPTİMİZASYONU (ROUTE OPTIMIZATION OF UAV SYSTEMS)

İHA uçuş rota planlaması literatürde; yakıt kısıtı ve İHA'ların kontrol mesafesi kısıtı nedeniyle Kapasiteli ARP içerisinde yer bulmaktadır [2]. Ercan ve Gencer [24] tarafından, İHA'ların rota optimizasyonu için söz konusu kısıtları dikkate alan genel bir tamsayı programlama tabanlı model önerilmiştir.

#### 3.1. Bütünleşik Sensör Seçimi ve İHA Rotalama Modeli: ISS&ROM

(Integrated Sensor Selection and UAV Routing Model: ISS&ROM)

Herhangi bir konuma rotalanan İHA'nın bir sonraki konumunun, sensör yetenekleri dâhilinde bulunduğu konumdan gözlemi yapılamayan konumlara olacak şekilde planlanması beklenir. Şekil 1'de verilen örnek rota görselinde görüldüğü üzere, "i" konumu üzerinde bulunan İHA'nın bulunduğu konum itibarıyla sensör yetenekleri dâhilinde "k" konumunu izleme imkanı olduğundan, sonraki rotasının bulunduğu konum itibarıyla gözlem yapamadığı "j" konumuna doğru planlanması gerekir.



Şekil 1. ISS&ROM modeli için örnek rota görseli  
(A Route example for ISS&ROM model)

Bu çalışmada; İHA'ların kullandığı sensör yeteneklerinin rota planı sürecine dâhil edilmesi amacıyla Kapasiteli İHA Rotalama Modeli (KİRM) [24] temel alınarak ISS&ROM (Integrated Sensor Selection and Route Optimization Model) modeli geliştirilmiştir. İHA'nın sensör seçimi yapacağı ve seçilen sensöre göre rota planının oluşturulacağı ISS&ROM modeli ile KİRM [24] modeli arasındaki farkı, sensör görüş alanlarına yönelik kısıtları içeren Eş. 4, Eş. 5 ve Eş. 6 oluşturmaktadır.

İndisler:

- u : İHA'lar.  $\{1, \dots, U\}$
- i, j, p, l : Hedef noktaları.  $\{0, 1, \dots, N\}$  {0 üs merkezi}
- s : sensör tipleri indisi.

Parametreler:

- $e_i$  : i hedefini minimum yaklaşma mesafesi.
- $d_{i,j}$  : i-j noktaları arası uçuş mesafesi.

$Q_s$  : sensör miktarları.  
 $D$  : İHA'nın maksimum uçuş mesafesi.  
 $M$  : Büyük sayı.  
 $v(s, i, j)$  :  $s_k$  sensörü entegre edilmiş İHA,  $i$  noktası üzerindeyken  $j$  noktasını görebiliyorsa "1", dd. "0".  
 Bu veri, CBS Görüş Analizi sonuçlarından oluşturulan matristen alınmaktadır.

Pozitif Değişken:

$Y_i$  :  $i$  hedefine varıldığında kat edilen toplam uçuş mesafesi.

Karar Değişkeni:

$$x_{u,s,i,j} = \begin{cases} 1, & \text{u İHA'sı, } s_k \text{ sensörü ile } i \text{ noktasından} \\ & \text{j noktasına rotalanırsa,} \\ 0, & \text{d. d.} \end{cases}$$

Model:

$$\text{Min } Z = \sum_u \sum_s \sum_i \sum_j (d_{i,j} * x_{u,s,i,j}) \quad (1)$$

$$\text{st.} \\ \sum_s \sum_j x_{u,s,o',j} = 1 \quad \forall u \quad (2)$$

$$\sum_s \sum_i x_{u,s,i,o'} = 1 \quad \forall u \quad (3)$$

$$\sum_{i(i \neq p)}^N (x_{u,s,i,p} * (1 - v(s, i, p))) = \\ \sum_{j(j \neq p)}^N (x_{u,s,p,j} * (1 - v(s, p, j))) \quad \forall u, s, p \quad (p \neq 0) \quad (4)$$

$$\left[ \sum_u \sum_s \sum_{j(j \neq i)}^N x_{u,s,i,j} * (1 - v(s, i, j)) \right] + \\ \left[ \sum_u \sum_s \sum_{p(p \neq l, i)}^N \sum_{l(l \neq i)}^N x_{u,s,p,l} * (v(s, p, i) + v(s, l, i)) \right] \\ \geq 1 \quad \forall i \quad (i \neq 0) \quad (v(s, p, l) \neq 1) \quad (5)$$

$$\sum_u \sum_s \sum_{i(i \neq j)}^N x_{u,s,i,j} \leq 1 \quad \forall j \quad (j \neq 0) \quad (6)$$

$$\sum_u \sum_s \sum_j x_{u,s,o',j} \leq U \quad (7)$$

$$\sum_u \sum_j x_{u,s,o',j} \leq Q_s \quad \forall s \quad (8)$$

$$\sum_s x_{u,s,i,j} = 1 \quad \forall u, i, j \quad (9)$$

$$\sum_s \sum_i \sum_j x_{u,s,i,j} * d_{i,j} \leq D \quad \forall u \quad (10)$$

$$Y_i - Y_j + d_{i,j} \leq M * (1 - \sum_u \sum_s x_{u,s,i,j}) \\ \forall i, j \quad (i \neq j \neq 0) \quad (11)$$

$$d_{i,j} = \sqrt{\left[ (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + \left( \frac{(z_i + e_i)}{-(z_j + e_j)} \right)^2 \right]} \quad (12)$$

$$x_{u,s,i,j} \in (0,1) \quad ; \quad Y_i \geq 0 \quad (13)$$

Geliştirilen ISS&ROM modelinde, Eş. 1'de verilen amaç fonksiyonu ile rotalama sürecinde toplam uçuş mesafesinin en küçüklenmesi hedeflenmektedir. Eş. 2 ve Eş. 3 ile İHA'ların varış ve dönüşlerinin üs merkezine yapılması sağlanır. Eş. 4 ile bir konuma ulaşan hava aracının, bulunduğu konum itibariyle gözlem yapamadığı bir yere rotalanması sağlanır. Eş. 5 ile her konumun rota süreci içerisinde mutlaka gözlemlenmesi istenir. Eş. 6 ile İHA'ların uçuş sürecinde her konuma doğrudan uğrama zorunluluğu ortadan kaldırılır. Böylece; Eş. 4, Eş. 5 ve Eş. 6 ile gözlemlenemeyen konumlar arasında rotalama işleminin yapılması sağlanır. Eş. 7 ile üs merkezinden kalkan İHA sayısının kısıtlanması sağlanır. Eş. 8 ile İHA'ların kullandığı sensör sayısının envanter miktarını aşması önlenir. Eş. 9 ile İHA'lara sadece bir adet sensör entegrasyonu sağlanır. Eş. 10 ile rotalanan İHA'ların toplam uçuş mesafesinin, maksimum İHA uçuş mesafesini aşmaması sağlanır. Rotalama problemleri NP-zor yapıda olduğundan [4], Eş. 11 ile alt turların önlenmesi sağlanır. Uçuş halindeki bir İHA ile görev noktası arasındaki düşey mesafe üç boyutlu olarak ve belirli bir emniyetli yaklaşma mesafesi dikkate alınarak Eş. 12 ile hesaplanmaktadır. Eş. 13, karar değişkeni ve pozitif değişken için tanımlayıcı kısıttır. Modelde, "v(s, i, j)" şeklinde simgelenen parametre, sensör görüş yetenekleri dikkate alınarak konumlar arası mesafelerin İHA'nın görüş alanı içerisinde olup olmadığını ifade etmektedir. Diğer bir ifadeyle; herhangi bir konum üzerinde bulunan İHA'nın sensör yetenekleri dâhilinde görebildiği ve göremediği konumlar "v(s, i, j)" ile belirlenmektedir. Bu veri, Coğrafi Bilgi Sistemleri'nde yapılan Görüş Analizi sonuçları ile oluşturulan matristen alınmaktadır.

Rota sürecinde kullanılan düğüm sayısı ve planlanan araç sayısı büyük olduğunda, problemin karmaşık bir hal alması, çözüm süresinin uzaması veya hesaplanamaması beklenir. İHA'nın askeri içerikli kullanım alanları düşünüldüğünde, hedeflenen amaçlara uygun olarak kısa sürede bir rota planı belirlenmenin önemi ortaya çıkmaktadır. Bu amaçla çalışmada ek olarak, iki aşamalı bir sezgisel algoritma önerilmiştir.

### 3.2. İki Aşamalı Sezgisel Algoritma (Two-Phased Heuristic Algorithm)

Geliştirilen ISS&ROM modeli, rotalama sürecinde gözlemi hedeflenen konumlar içerisinde sensör görüş yeteneklerini de kullanarak uçuş planı yapmaktadır. Ancak; uçuş sürecinde gözlemi hedeflenen konumlar üzerinde rotalama yapmak yerine tüm alan dikkate alındığında, daha kısa rota uzunluğu ile keşif sürecinin yürütülmesi mümkün olabilir. Bu durumda; gözlemi hedeflenen konumları içerisine alacak şekilde tüm alanın sezgisel bir arama algoritması ile taranması gerekir. Şekil 2'de bu amaçla geliştirilen iki aşamalı sezgisel algoritmaya yönelik akış şeması verilmiştir:

Önerilen sezgisel algoritmada, görev noktalarının kümelenmesi için "Birim Sensör Kaplama Algoritması", rotalama süreci için ise "Demon Algoritması" kullanılmıştır. "Birim Sensör Kaplama Algoritmasının" uygulanması

sonucunda keşif ve gözetlemesi yapılacak alandaki hedeflerin en az sayıda sensör görüş alanı içerisinde gruplandırılması hedeflenmekte, bu algorithmda elde edilen sensör görüş alanlarının merkezlerine ise "Demon Algoritması" ile rotalama işlemi yapılmaktadır.

### 3.2.1. Birinci aşama: Birim sensör kaplama algoritması ile kümeleme

(First step: Clustering with unit disk covering algorithm)

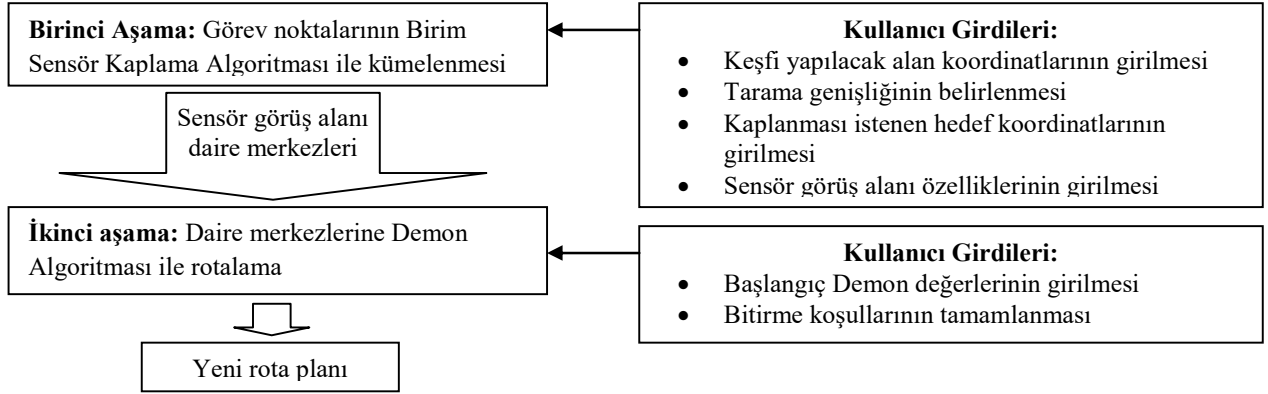
Birinci aşamada; gözlemlenmesi hedeflenen konumların, İHA üzerindeki sensör yetenekleri doğrultusunda kümelemesi sağlanmaktadır. Böylelikle İHA'nın, herhangi bir konumu izlemek amacıyla doğrudan ilgili konum üzerinde uçması yerine bu konumları gözlemleyebileceği yeni uçuş noktaları oluşturularak toplam uçuş yolu kısıtlanmaktadır. Bu problem türü, bir düzlemdeki noktaları kapsayan minimum daire yerleşiminin arandığı bir yer seçimi problemi olarak ifade edilebilir ve probleme kaplama algoritmaları ile çözüm bulmak mümkündür. Gary ve Johnson'a [25] göre; küme kaplama problemlerinin geometrik bir versiyonu olan Birim Disk Kaplama problemlerinde, " $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$ " olmak üzere "n" adet noktanın, " $D = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_m\}$ " minimum sayıdaki diskleri ile " $D^* \subseteq D$ " ve " $P \subseteq \cup_{di \in D^*} di$ " şeklinde kaplanması hedeflenmektedir. Disk alanları, sensör görüş alanı olarak düşünüldüğünde "Birim Disk Kaplama"nın İHA rotalama sürecinde kullanılması mümkün gözükmektedir. Şekil 3'de, önerilen "Birim Sensör Kaplama Algoritması"nın adımları verilmiştir. Birim Sensör Kaplama Algoritmasında; " $P_i$ " notasyonu, sorumluluk sahasında

tarama genişliğini ifade eden karesel alanın tüm köşe noktalarını simgelemektedir. Diğer bir ifadeyle; " $P_i$ " notasyonu, İHA'ya entegre edilen sensörün karasal zeminde odaklanacağı tüm mümkün konumları ifade etmektedir. " $S_i$ " notasyonu, sensörün karasal zeminde gözlem yapabileceği dairesel görüş alanını ifade etmektedir. " $G_i$ " notasyonu ise sorumluluk sahası içerisinde gözlemlenmesi/kaplanması istenen noktaları ifade etmektedir. Böylelikle birinci aşamada, gözlemlenmesi hedeflenen noktaları kapsayan minimum sayıdaki disk merkezleri bulunur. Burada diskler, İHA'lara entegre edilen kamera sensörlerinin karasal zeminde gözlem yaptığı dairesel alanları ifade etmektedir.

### 3.2.2. İkinci aşama: Demon algoritması ile rotalama

(Second step: Routing with demon algorithm)

İkinci aşamada ise, birinci aşamanın çıktısı olan disk merkezlerine Demon Algoritması kullanılarak rotalama yapılmaktadır. Creutz 'a [26] göre bu algoritma, basitçe hesaplanan kabul fonksiyonları kullanan ve Tavlama Benzetimi temelinde geliştirilen meta-sezgisel algoritmalarından biridir. Algorithmda kabul fonksiyonu, Tavlama Benzetimindeki gibi " $P(Kabul) = e^{-(\Delta/T)}$ " şeklinde Boltzmann dağılımından gelen bir olasılık fonksiyonuyla değil, Demon'un kredi değeriyle ilişkili olarak belirlenir [27]. Başlangıçta Demon kredisi olarak bir "D" değeri belirlenir. Bulunan geliştirilmemiş bir çözümde; eğer Demon'un kredi değeri, amaç fonksiyonunda sağlanan azalmadan daha büyük ise çözüm kabul edilir. Algoritma, daha yüksek bir amaç fonksiyonu değeri veren çözümü kabul ettiğinde, amaç fonksiyonunda sağlanan değişim Demon



Şekil 2. İki aşamalı sezgisel rotalama algoritması akış şeması (Flowchart for two-phased heuristic routing algorithm)

- Adım 1: Tarama yapılacak bölgeyi, tarama genişliğine göre karesel alanlara böl.
- Adım 2: Tüm karesel alan köşe noktalarına  $P_i$  noktalarını ata.
- Adım 3: Tüm  $P_i$  noktalarına, sensör görüş alanını ifade eden  $S_i$  disklerini yerleştir.
- Adım 4:  $S_i$  disklerinin kapsadığı  $G_i$  noktalarına göre eleman sayılarını belirle.
- Adım 5: Maks. sayıda  $G_i$  noktasını kapsayan  $S_i$  diskini belirle.
- Adım 6:  $S_i$  diskini yeni rota merkezi olarak belirle, kapsadığı  $G_i$  noktalarını kapsanacak noktalar kümesinden çıkar.
- Adım 7: Kapsanacak nokta kalmayana kadar algoritmayı tekrarla.

Şekil 3. Birim sensör kaplama algoritması adımları (Implementation steps of unit sensor covering algorithm)



kredisine eklenir. Benzer şekilde, geliştirilmiş bir çözüm elde edildiğinde, algoritma Demon kredisini amaç fonksiyonunda sağlanan düşüş kadar azaltır [28]. Şekil 4’de, oluşturulan algoritma adımları verilmiştir. Burada; ilk aşamada uygulanan “Birim Sensör Kaplama Algoritması” sonucunda ortaya çıkan daire merkezleri üzerinden minimum rota uzunluğunu veren rotanın aranması söz konusudur. Algoritma, başlangıçta rota merkezinden diğer tüm konumlara olan uzaklıkları belirler ve her iterasyon adımında rota planı içerisine yeni bir konumu dâhil ederek minimum rotayı belirlemeye çalışır. Her bir alternatif çözümün kabul edilmesindeki tek kriter amaç fonksiyonunu ifade eden, elde edilmiş toplam rota uzunluğunda azaltma sağlanıp sağlanmadığıdır. Böylelikle algoritma, kullanıcı tarafından belirlenmiş tamamlanma koşullarına ulaşıncaya kadar en kısa rota planını aramaya çalışır.

#### 4. TÜRKİYE GÜNEY SINIR HATTINDA SENARYO UYGULAMASI (CASE STUDY ON SOUTHERN BORDERLINE OF TURKEY)

Önerilen model ve sezgisel algoritma, en az sayıda İHA kullanılarak Türkiye güney sınır hattındaki 107 konumun (Şekil 5) gözlemlenmesinin hedeflendiği jenerik bir senaryoda test edilmiştir. Söz konusu jenerik konumların koordinatları Tablo 1’de verilmiştir. Geliştirilen senaryoda, Batman bölgesinde bulunduğu varsayılan üs bölgesinde konuşlu 10 adet İHA’dan oluşan bir filo ve İHA’lara entegre edilmek üzere 3 tip sensör kullanılmıştır. Kullanılan İHA’ların, ortalama 200 km/sa uçuş hızı ile 24 sa uçuş

gerçekleştirebildikleri, sensörlerin azami görüş menzillerinin ise sırasıyla 10, 15 ve 20 km olduğu varsayılmıştır.

##### 4.1. ISS&ROM Modeli Çözümleri (The Solutions of ISS&ROM Model)

Geliştirilen ISS&ROM modelinin etkinliğini test etmek amacıyla Şekil 5’deki farklı konum sayıları için model çalıştırılmıştır. Şekil 5’deki sırasıyla ilk 10, 20, 30, 40, 50 ve son olarak 107 konumun tamamı için ISS&ROM modeli ile elde edilen rota planları Tablo 2’de verilmiştir. Modelin çözümüne, GAMS 24.7.1 programı ile Intel™ Core™ i5-5200U CPU @2.20GHz özellikli bir bilgisayar kullanılarak ulaşılmıştır. Tablo 2’deki çözüm sonuçlarına göre " $x_1 - x_{20}$ " arası konumlar için örnek bir rota görseli Şekil 6’da verilmiştir. 15 km görüş menziline sahip " $s_2$ " sensörünün entegre edildiği bir adet İHA 880,265 km uçuş menzili ile Şekil 6’da verilen rota üzerinden uçuş icra ederek, hedeflenen ilk 20 konumun keşif ve gözlemini sağlayabilmektedir. Rota görselindeki kırmızı noktalar rota merkezlerini, turuncu noktalar ise uğranılmadan geçilen konumları ifade etmektedir. İHA’nın uçuş sürecinde bulunduğu konum itibarıyla gözlem yapabildiği konumlara rota planında uğranılmadan geçildiği Şekil 6’da görülebilmektedir. Diğer taraftan; Tablo 2’de, 107 konumun tamamı için bir rota planının elde edilemediği de görülmektedir. Rotalama problemleri genel olarak NP-zor yapıda olduğundan [7], düğüm sayısı fazla olduğunda doğrusal modeller ile çözüm elde edilemeye bilmektedir.

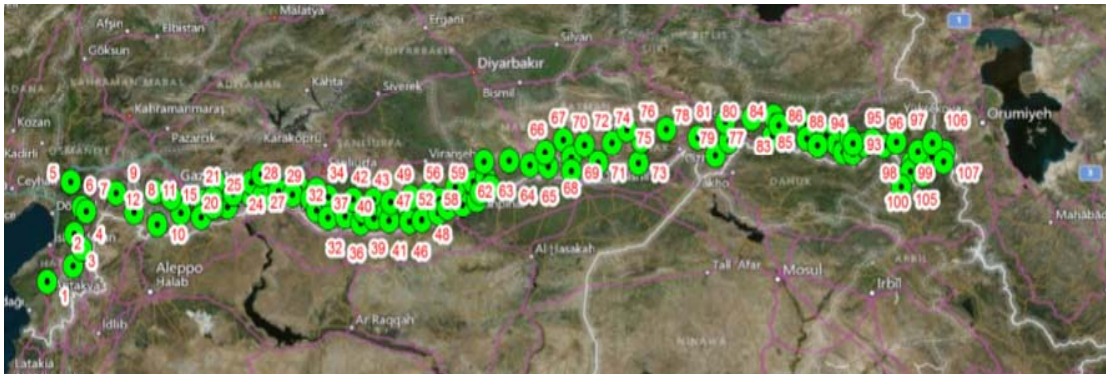
**Input:** /Başlangıç Demon (D) değerini gir./  
s=S<sub>0</sub> ; /Başlangıç çözümü üret./

**Repeat**  
s’; /Rassal bir komşu çözüm üret./  
 $\Delta E = f(s') - f(s)$  ; /Amaç fonksiyonunda sağlanan iyileştirmeyi belirle./  
**If**  $\Delta E \leq D$  **Then** ;  
s = s’ ; /Üretilen rassal komşu çözümü kabul et./  
D = D -  $\Delta E$  ; /Demon değerini revize et./

**Until** / İterasyon sayısı kısıtı sağlanıncaya kadar algoritmaya devam et./

**Output:** / Elde edilen en iyi çözümü ver./

Şekil 4. Demon algoritması adımları (Implementation steps of demon algorithm)



Şekil 5. Gözlemi hedeflenen konumların harita üzerindeki görüntüsü (An Image for the locations targeted for surveillance)

**Tablo 1.** Jenerik Konumların üç boyutlu koordinat verileri  
(Three-dimensional coordinate data of generic positions)

	x	y	z		x	y	z		x	y	z
N0	38,791380	32,471210	1200	N36	39,130261	36,762393	370	N72	41,528708	37,379645	849
N1	36,138236	36,306738	531	N37	39,151410	36,855549	394	N73	41,780917	37,225216	762
N2	36,383536	36,430186	80	N38	39,252160	36,938053	585	N74	41,807630	37,400532	603
N3	36,397747	36,676971	1040	N39	39,256509	36,799063	492	N75	42,045353	37,487747	1111
N4	36,470218	36,562500	109	N40	39,377157	36,847784	481	N76	41,671338	37,483207	828
N5	36,361286	37,078877	791	N41	39,401270	36,780755	442	N77	42,516530	37,286614	722
N6	36,470079	36,881743	1421	N42	39,058163	36,944561	374	N78	42,346088	37,422409	1052
N7	36,512688	36,851357	613	N43	39,416062	36,922984	526	N79	42,644965	37,397951	1527
N8	36,966095	36,845460	523	N44	39,571889	36,892120	484	N80	42,860599	37,572832	1847
N9	36,795231	36,991689	669	N45	39,769464	36,977042	469	N81	42,609996	37,546212	1084
N10	37,188823	36,748082	797	N46	39,594536	36,772115	427	N82	43,059955	37,434487	2773
N11	37,414120	36,841813	683	N47	39,748310	36,876984	453	N83	43,072197	37,586750	2661
N12	37,162648	37,003498	908	N48	39,711555	36,784692	438	N84	43,119652	37,519536	1187
N13	37,320511	36,957589	811	N49	39,606998	36,963528	496	N85	43,386482	37,517795	1729
N14	37,627123	36,932150	689	N50	39,884758	36,943636	451	N86	43,387460	37,415393	2498
N15	37,608317	36,806681	579	N51	39,868329	36,842309	408	N87	43,571805	37,440487	2072
N16	37,740477	37,082185	581	N52	39,957577	36,880065	406	N88	43,670765	37,372896	2754
N17	37,858186	36,885230	461	N53	40,044542	36,967852	412	N89	43,734379	37,310028	2133
N18	38,075502	36,985237	467	N54	40,100584	36,900024	369	N90	43,796591	37,420432	2827
N19	38,085767	37,075080	575	N55	40,156392	37,004274	439	N91	43,826158	37,306550	2326
N20	37,910627	36,988874	419	N56	40,031260	37,039584	435	N92	43,935263	37,367422	2458
N21	37,718713	36,949821	578	N57	40,237548	36,938130	391	N93	43,829958	37,378397	2560
N22	38,290739	37,073053	697	N58	40,202515	37,079996	453	N94	43,488692	37,360394	1549
N23	38,188931	36,967892	661	N59	40,268460	36,995584	428	N95	44,013774	37,401340	1524
N24	38,180528	37,138638	714	N60	40,321518	37,108932	474	N96	44,122490	37,359330	2673
N25	37,725891	36,884701	596	N61	40,367056	37,036537	420	N97	44,245113	37,387097	2733
N26	38,346069	37,009310	520	N62	40,305158	37,236114	488	N98	44,386073	37,223969	1875
N27	38,545945	37,029045	582	N63	40,546337	37,242862	522	N99	44,316420	37,119259	1101
N28	38,479708	36,982545	487	N64	40,744614	37,208187	543	N100	44,376920	37,159647	1834
N29	38,651646	36,951189	584	N65	40,917869	37,198716	722	N101	44,493752	37,136580	2130
N30	38,706682	36,860033	529	N66	40,888595	37,310590	1009	N102	44,579578	37,275335	1907
N31	38,820929	36,961772	453	N67	41,063513	37,402312	1016	N103	44,705426	37,307913	2088
N32	38,820014	36,803882	430	N68	41,141242	37,266436	993	N104	44,448056	37,313843	1279
N33	38,954427	36,891508	370	N69	41,140516	37,163753	590	N105	44,290599	37,040841	1175
N34	38,707946	37,017975	566	N70	41,267592	37,366530	945	N106	44,585247	37,382342	2000
N35	38,981995	36,812321	355	N71	41,394022	37,227671	908	N107	44,694136	37,236193	1987



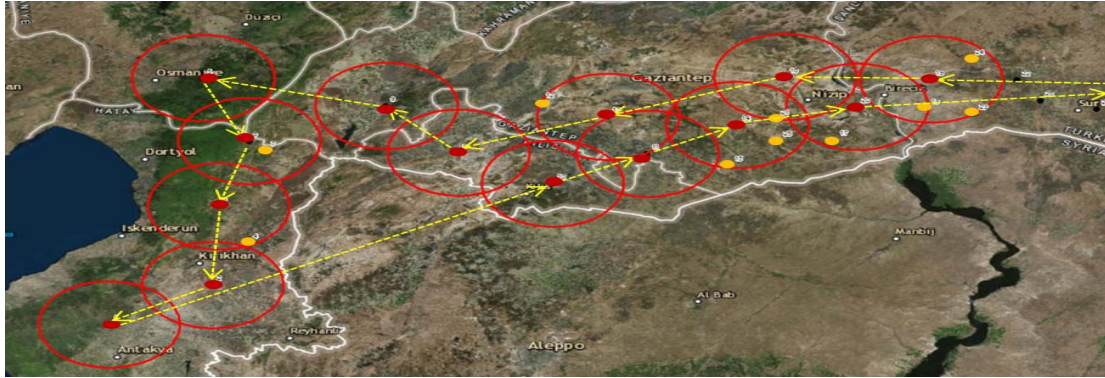
#### 4.2. İki Aşamalı Sezgisel Algoritma Çözümleri (The Solutions of Two Phased Heuristic Algorithm)

Önerilen sezgisel algoritma için, Qt programında C++ dilinde Karar Destek Sistemi (KDS) oluşturulmuştur. Hazırlanan KDS arayüzünde (Şekil 7); gözlem yapılacak konum koordinatlarının, tarama genişliğinin, sensör görüş

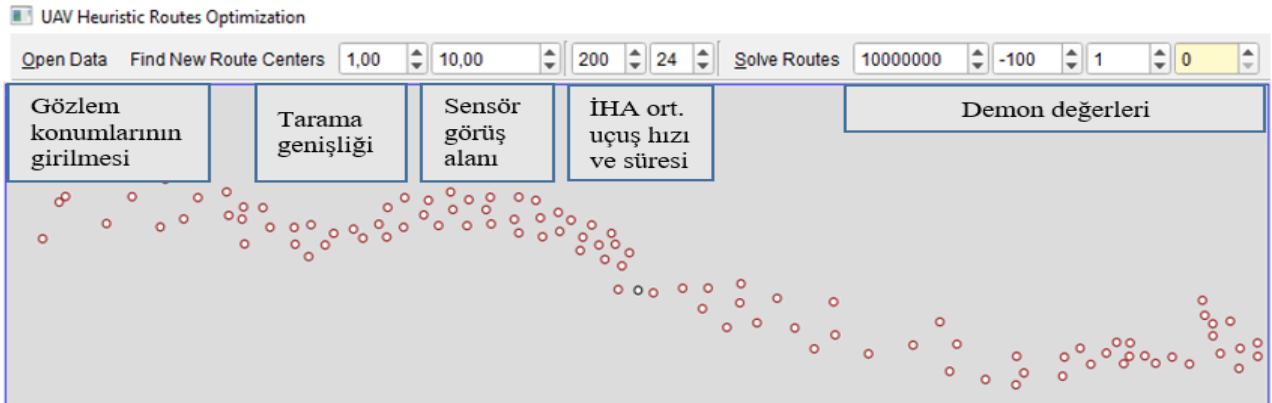
alan genişliğinin ve Demon değerlerinin girişi sağlanmaktadır. Örnek senaryo uygulamasına yönelik gerekli kullanıcı girdileri Şekil 2’de verilen arayüze girildikten sonra sezgisel rotalama algoritmasının birinci aşaması uygulanır. Sınır hattında gözlemi hedeflenen 107 konum için Birim Sensör Kaplama Algoritması kullanılarak farklı sensör tiplerine göre yeni görev merkezleri belirlenir.

**Tablo 2.** Farklı konum sayıları için ISS&ROM modeli çözüm sonuçları (ISS&ROM solutions for different location numbers)

Gözlemi Hedeflenen Konum Sayısı	İHA ve Sensör Tipi	İHA Rota Planı	Rota Uzunluğu (km)
$X_1 - X_{10}$ arası	$u_1 - S_3$	$X_0 - X_{10} - X_2 - X_1 - X_3 - X_6 - X_5 - X_9 - X_8 - X_0$	869,683
$X_1 - X_{20}$ arası	$u_1 - S_2$	$X_0 - X_{19} - X_{16} - X_{13} - X_8 - X_9 - X_5 - X_6 - X_3 - X_2 - X_1 - X_{10} - X_{11} - X_{14} - X_{20} - X_0$	880,265
$X_1 - X_{30}$ arası	$u_1 - S_3$	$X_0 - X_{29} - X_{23} - X_{13} - X_8 - X_9 - X_5 - X_6 - X_3 - X_1 - X_2 - X_{10} - X_{11} - X_{21} - X_0$	874,148
$X_1 - X_{40}$ arası	$u_1 - S_3$	$X_0 - X_{40} - X_{37} - X_{31} - X_{26} - X_{19} - X_{21} - X_{11} - X_{10} - X_9 - X_5 - X_6 - X_3 - X_1 - X_4 - X_8 - X_{13} - X_{14}$	898,695
$X_1 - X_{50}$ arası	$u_1 - S_3$	$X_0 - X_{42} - X_1 - X_4 - X_6 - X_5 - X_9 - X_8 - X_{10} - X_{13} - X_{21} - X_{23} - X_{28} - X_{31} - X_{37} - X_{44} - X_{50} - X_0$	899,750
$X_1 - X_{107}$ arası		Çözüm elde edilememiştir.	



**Şekil 6.** İlk 20 konum için ISS&ROM modeli ile elde edilen rota planı görseli.  
(The route plan obtained form ISS&ROM model for the first 20 locations)



**Şekil 7.** Önerilen rota algoritması için hazırlanan KDS ekran görüntüsü.  
(The image of decision support system of proposed routing algorithm)

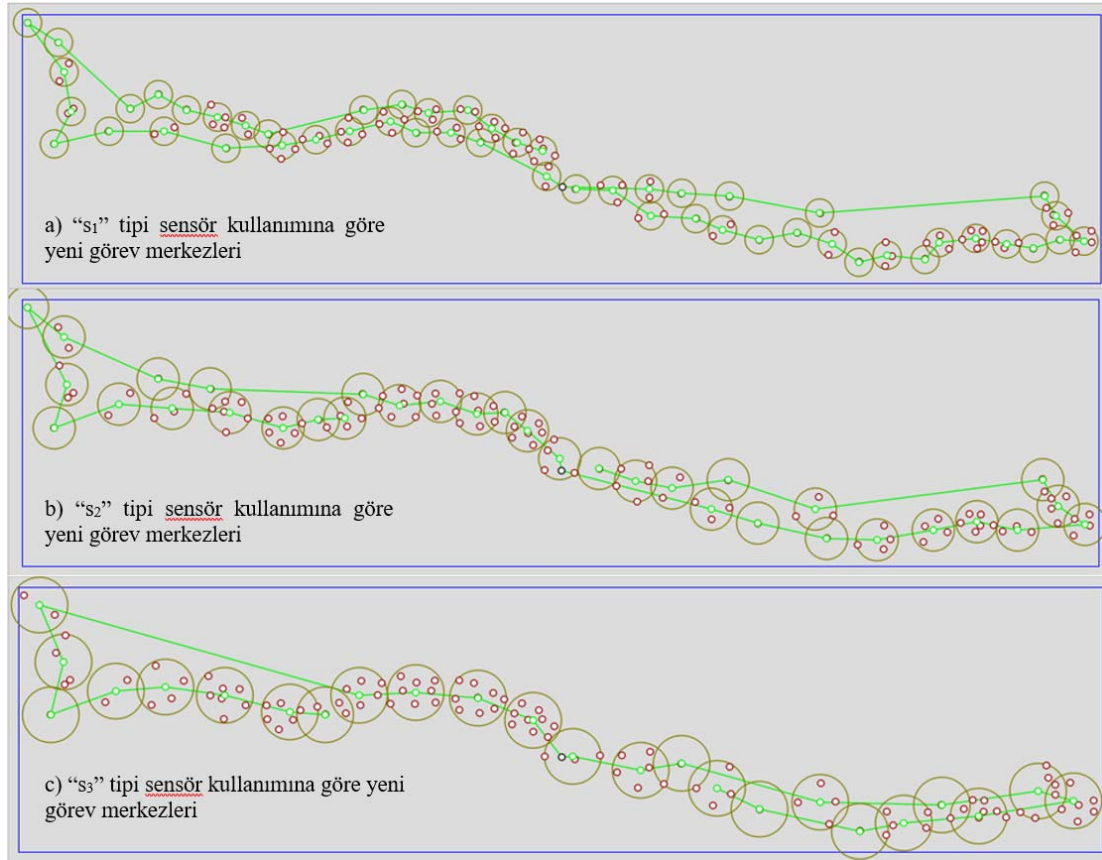
Şekil 8'deki rota planlarında yer alan birim daireler, sensörlerin rota sürecindeki görüş alanlarını ve diğer bir ifadeyle yeni rota merkezlerini göstermektedir. Çözüm sonuçlarına göre İHA'lara "s<sub>1</sub>" tipi sensör entegre edildiğinde 107 konumun gözlemlenebilmesi için 52 adet yeni rota merkezi üzerinde uçuş yapılması gerekmekte, "s<sub>2</sub>" tipi sensör entegre edildiğinde 34 adet yeni rota merkezi üzerinde uçuş yapılması gerekmekte, "s<sub>3</sub>" tipi sensör entegre edildiğinde ise tüm konumların gözlemlenebilmesi için 24 adet yeni rota merkezi üzerinde uçuş yapılması gerekmektedir. Yeni rota merkezleri tespit edildikten sonra, önerilen yaklaşımın ikinci aşamasına geçilir. Sırasıyla "s<sub>1</sub>", "s<sub>2</sub>" ve "s<sub>3</sub>" tip sensörlerin entegre edildiği İHA'lar için, Demon Algoritması ile elde edilen rota planları Şekil 8'de verilmiştir. Buna göre, 20 km.lik sensörün entegre edildiği iki adet İHA ile tüm konumların gözlemlendiği ve en küçük rota uzunluğunun elde edildiği görülmektedir. Tablo 3'de gözlemlenmesi hedeflenen konum sayısına göre ISS&ROM ve iki aşamalı sezgisel algoritmadan elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Tablo 2 incelendiğinde, sezgisel algoritmada rota uzunluklarının doğrusal modele göre genel olarak daha kısa olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni, doğrusal modelde gözlemi hedeflenen konumlar üzerinden rota oluşturulurken, sezgisel algoritmada tüm alanın dikkate alınması ve en az sayıdaki disk merkezi üzerinden en kısa rotanın belirlenmesidir. Ancak; " $x_1 - x_{30}$ " ve " $x_1 - x_{50}$ "

arası konumlar için "s<sub>1</sub>" sensörünün rota uzunluğu ISS&ROM modeline göre daha fazladır. Bu durumun nedeni ise; "s<sub>1</sub>" sensörünün görüş menziline küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan, Tablo 3'deki sezgisel algoritma çözüm sürelerine bakıldığında sensör genişliğinin arttığı durumlarda daha az sayıda sensör merkezi için rotalama işlemi yapıldığından çözüm süresinin de kısaldığı görülmektedir. Test sonuçlarına göre; geliştirilen ISS&ROM modeli gözlemlenmesi hedeflenen konum sayısı 107 olduğunda çözüm verememektedir. Senaryoda belirlenen 107 konumun tamamı için en kısa sürede en kısa rota uzunluğunu veren çözüme, "s<sub>3</sub>" sensörünün kullanıldığı iki aşamalı sezgisel algoritma ile ulaşılmaktadır.

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Günümüzde, kapasite ve yetenekleri giderek artan İHA'ların geliştirilmesi için ülkelerin yoğun çalışmalar yürüttüğü bilinmektedir. Ancak, teknoloji yoğun bu sistemleri üretme kabiliyetine sahip olmak kadar etkin ve etkili kullanmak da önemlidir. Bu nedenle son yıllarda literatürde İHA'larla obje arama süreci, rota optimizasyonu, sensör yönetimi vb. konular sıklıkla ele alınmaktadır. İHA sistemlerini kendi milli imkânları ile üretme kabiliyetine sahip olan Türkiye'de, güney sınır hattının güvenliğini sağlamak amacıyla yürütülen keşif ve gözetleme faaliyetlerinin en önemli unsuru bu insansız sistemlerdir. Ancak, Türkiye sınır hattının



Şekil 8. Demon algoritması ile oluşturulan rota planları (Route plans generated by demon algorithm)

**Tablo 3.** Elde edilen rota uzunlukları açısından yöntemlerin karşılaştırılması  
(Comparing the methods in terms of obtained route lengths)

Gözlemlenmesi Hedeflenen Konum Sayısı	ISS & ROM		İki aşamalı Sezgisel Algoritma					
			$s_1$ (10 km görüş menzilli)		$s_2$ (15 km görüş menzilli)		$s_3$ (20 km görüş menzilli)	
	Rota Uzunluğu	Çözüm Süresi (sn)	Rota Uzunluğu	Çözüm Süresi (sn)	Rota Uzunluğu	Çözüm Süresi (sn)	Rota Uzunluğu	Çözüm Süresi (sn)
$x_1 - x_{30}$ arası	874,148	0,109	886,34	0,259	864,16	0,253	838,16	0,240
$x_1 - x_{40}$ arası	898,695	0,234	892,35	0,264	874,44	0,252	842,64	0,244
$x_1 - x_{50}$ arası	899,750	0,313	904,98	0,280	875,24	0,273	845,45	0,268
$x_1 - x_{107}$ arası	-		1.693,083	0,262	1.658,886	0,256	1.587,787	0,255

uzunluğu ve artan tehdit durumları düşünüldüğünde İHA kullanım verimliliğinin artırılması önemli bir gerekliliktir. Literatür incelendiğinde, planlama sürecinde sıklıkla Kapasiteli İHA Rotalama doğrusal modelinin kullanıldığı ve sensör yeteneklerinin bu model türünde göz ardı edildiği görülmektedir. Ancak, sensör görüş alanlarının İHA rota sürecine dâhil edilmesi toplam rota uzunluğu, kullanılan İHA sayısı vb. kriterler açısından dikkate alınması gereken bir özelliktir. Bu amaçla çalışmada, İHA'ların üzerinde bulunan sensör yeteneklerini dikkate alan doğrusal bir model ve iki aşamalı sezgisel bir algoritma önerilmiştir. Önerilen modeller, Türkiye güney sınır hattı üzerinde keşif ve gözetleme faaliyetine yönelik jenerik bir senaryoda test edilmiştir.

Test sonuçlarına göre; geliştirilen ISS&ROM modeli gözlemlenmesi hedeflenen konum sayısı 107 olduğunda çözüm verememektedir. Senaryodaki 107 konum için doğrusal model ile çözüm elde edilememesi, gözlemlenmesi hedeflenen konum sayısı arttığında sezgisel çözümlere ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Literatüre bakıldığında, son yıllarda İHA rotalama problemlerine ilişkin çalışmalarda sıklıkla sezgisel algoritmaların önerilmesi de bu durumu doğrulamaktadır. Diğer taraftan; İHA sistemlerinin etkin kullanımında karşılaşılan en önemli problemin, maksimum sayıda hedefi gözlemleyebilecek minimum maliyetli rota planını belirlemek olduğu göz önüne alındığında, önerilen iki aşamalı sezgisel algoritmanın sunduğu çözümler dikkat çekmektedir. Senaryoya yönelik çözüm sonuçlarının özetlendiği Tablo 3 incelendiğinde, sezgisel algoritmada genel olarak doğrusal modele oranla daha kısa rota uzunluklarının elde edildiği görülmektedir. Bunun nedeni; sezgisel algoritmada gözlemlenmesi hedeflenen konumları kümeleme işlemi yapan Birim Sensör Kaplama Algoritması'dır. Böylelikle, gözlemlenmesi hedeflenen konumları içine alan minimum sayıdaki dairesel sensör görüş alanlarının merkezleri üzerinde uçuş gerçekleştirilmektedir. Kümeleme işlemi yapılırken sadece mevcut hedeflerin konumlarının değil tarama alanının tamamının dikkate alınması daha az sayıda sensör merkezi bulunmasını ve rotanın kısaltılabilmesini sağlamaktadır. Doğrusal model ve sezgisel algoritmanın çözüm sürelerine bakıldığında ise, sezgisel algoritmada genellikle daha kısa sürede çözümler

elde edildiği görülebilmektedir. Diğer taraftan en kısa rota uzunluğuna, en geniş kaplama alanına sahip sensörlerin kullanıldığı durumda ulaşılmaktadır. Sensör görüş alanı yeteneklerinin İHA rotalama sürecine dâhil edilmesi toplam rotanın kısaltılmasında önemli bir etken olarak dikkat çekmektedir. Bu çalışmada, İHA'ların karasal zeminde keşif ve gözetleme işlemi yürüten kamera sensörlerinin görüş alanı yeteneklerinin rotalama sürecine entegrasyonunu sağlayan modeller önerilmiştir. Önerilen doğrusal model ve sezgisel algoritma farklı coğrafi bölgeler için de kullanılabilir.

Türkiye'de özellikle keşif ve gözetleme alanında İHA'ların yoğun kullanıldığı bilinmektedir. İHA'ların kullanım verimliliğine katkı sağlamak amacıyla bu çalışmada önerilen ISS&ROM modeli ve sezgisel algoritma, farklı sezgisel algoritmalar veya farklı mesafe sensörleri kullanılarak geliştirilebilir ve daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Önerilen modeller, ileriki çalışmalarda dinamik obje arama süreçleriyle entegre edilerek geliştirilebilir. Böylelikle, minimum zamanda maksimum maksimum dinamik hedef tespitini sağlayabilecek yeni algoritmalar ortaya çıkarılabilir. Bu çalışmada belirtilen hususlar Türk Silahlı Kuvvetlerinin resmi görüşü olmayıp, yazarların bireysel görüşü ve değerlendirmesidir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Karakaya M., UAV route planning for maximum target coverage, Computer Science and Engineering: An International Journal, 4 (1), 27-34, 2014.
2. Kocabaş S., İnsansız hava araçlarının rota planlaması için bir karar destek sistemi, Yüksek Lisans Tezi, Kara Harp Okulu, Savunma Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2003.
3. Collins G.E., Riehl J.R., Vegdahl P.S., A UAV routing and sensor control optimization algorithm for target search, Proceedings of SPIE, USA, 6561, 6561D, 2007.
4. Sun C., Duan H., A restricted-direction target search approach based on coupled routing and optical sensor tasking optimization, Optik, 123, 2226-2229, 2012.
5. Avellar G.S.C., Pereira G.A.S., Pimenta L.C.A., Iscold P., Multi-UAV routing for aera coverage and remote

- sensing with minimum time, *Sensors*, 15 (11), 27783-27803, 2015.
6. Bektas T., The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures, *Omega*, 34 (3), 209-219, 2009.
  7. Laporte G., The vehicle routing problem: an overview of exact and approximate algorithms, *European Journal of Operation Research*, 59 (3), 345-358, 1992.
  8. Enright J.J., Frazzoli E., On multiple UAV routing with stochastic targets: performance bounds and algorithms, *Proc. of the AIAA Conference on Guidance, Navigation And Control*, Canada, 2005.
  9. Pakkan B., Ermiş M., Assignment of a fleet of unmanned aerial vehicles to multi targets using genetic algorithms, *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 4 (3), 77-84, 2010.
  10. Sun T.S., Chin-Li H., Shang-Yeng T., Yu-Hsiang Y., Chan-Cheng L., Intelligent flight task algorithm for unmanned aerial vehicle, *Expert Systems with Applications*, 38, 10036-10048, 2011.
  11. Chen Y., Han J., Zhao X., Three-Dimensional path planning for unmanned aerial vehicle based on linear programming, *Robotica*, 30, 773-781, 2012.
  12. Sundar K., Rathinam S., Route Planning Algorithms for Unmanned Aerial Vehicles with Refueling Constraints, *Proc. of the 2012 American Control Conference*, USA, 3266-3271, 2012.
  13. Seylan Ç., Semiz F., Bican Ö.S., İnsansız araçlarla düzlemsel olmayan alanların taranması, *Savunma Bilimleri Dergisi*, 11 (1), 107-117, 2012.
  14. Mufalli F., Batta R., Nagi R., Simultaneous sensor selection and routing of unmaned aerial vehicles for complex mission plans, *Computers and Operation Research*, 32, 2787-2799, 2012.
  15. Guerriero F., Surace R., Loscrí V., Natalizio E., A multi-objective approach for unmanned aerial vehicle routing problem with soft time windows constraints, *Applied Mathematical Modelling*, 38, 839-852, 2014.
  16. Babel L., Flight path planning for unmanned aerial vehicles with landmark-based visual navigation, *Robotics And Autonomous Systems*, 62, 142-150, 2014.
  17. Sarıççek İ., Akkuş Y., Unmanned aerial vehicle hub-location and routing for monitoring geographic borders, *Applied Mathematical Modelling*, 39 (14), 3939-3953, 2015.
  18. Zhang X., Duan H., An improved constrained differential evolution algorithm for unmanned aerial vehicle global route planning, *Applied Soft Computing*, 26, 270-284, 2015.
  19. Özalp N., Şahingöz Ö.K., Ayan U., Autonomous unmanned aerial vehicle route planning, (SIU) 21st Signal Processing and Communications Applications Conference, 1-4, 2013.
  20. Tezcaner D., Köksalan M., Multi objective route planning for unmanned air vehicles, *Proc. of the 20th International Conference on MCDM*, China, 2009.
  21. Arica N., Cicibaş H., Demir, K.A., İnsansız hava araçları için çok kriterli güzergâh planlama modeli, *Savunma Bilimleri Dergisi*, 11 (1), 251-270, 2012.
  22. Ercan C., Gencer C., Dinamik insansız hava sistemleri rota planlaması literatür araştırması ve insansız hava sistemleri çalışma alanları, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19 (2), 104-111, 2013.
  23. Ercan C., Gencer C., İnsansız hava sistemleri rota planlaması dinamik çözüm metotları ve literatür araştırması, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 1 (2), 51-72, 2013.
  24. Ercan C., Gencer C., An integer programming model for the heterogeneous UAV fleet routing problems, *Savunma Bilimleri Dergisi*, 12 (2), 119-144, 2013.
  25. Gary M.R., Johnson D.S., *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP Completeness*, New York: W.F.Freeman and Co., 1979.
  26. Creutz M., Microcanonical monte carlo simulation, *Physical Review Letters*, 50, 1411-1414, 1983.
  27. Zimmermann T., Salamon P., The demon algorithm, *International Journal of Computer Mathematics*, 42 (1/2), 21-31, 1992.
  28. Pepper J.W., Golden B.L., Wasil E.A., Solving the traveling salesman problem with annealing-based heuristics: A computational study, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 32 (1), 72-77, 2002.