



<http://dx.doi.org/10.7240/mufbed.v24i3.300>

## Dağıtık Sualtı Sensör Ağlarının Karma Tamsayı Doğrusal Olmayan Programlama ile Optimizasyonu

Mümtaz KARATAŞ\*

*Sabancı Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Orhanlı - Tuzla, 34956 İstanbul*

### Özet

Bu çalışmada geniş deniz sahalarının aranması maksadıyla birden çok kaynak ve alıcının bir araya getirilmesiyle oluşturulan dağıtık sualtı sensör ağlarının en yüksek kaplamayı sağlayacak şekilde konfigürasyonu problemi incelenmiştir. Birbirlerinden bağımsız ve farklı mevkilerde bulunan sensörlerin oluşturduğu bu tipi sistemlerde her kaynak-alıcı çifti için tespit bölgesi Cassini ovaleri ile modellenmektedir. Karma Tamsayı Doğrusal Olmayan Programlama (KTDOP) yöntemi kullanılarak modellenen optimizasyon probleminde söz konusu ovalerin geometrik özelliklerinden istifade edilmiş, çeşitli sayılarda kaynak ve alıcılardan oluşan sensör ağları için optimum konfigürasyonlar oluşturulmuştur. Elde edilen teorik sonuçlar Monte Carlo simülasyonları ile doğrulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Sualtı sensör ağları, Cassini ovaleri

## Optimization of Distributed Underwater Sensor Networks with Mixed Integer Non-Linear Programming

### Abstract

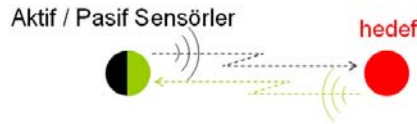
In this study is analyzed the problem of configuring distributed underwater sensor networks composed of multiple sources and receivers to achieve maximum area coverage for searching large ocean areas. In such surveillance systems where independent receivers are deployed in different locations, the detection zone for each source-receiver pair is modeled by a Cassini oval. Modeling the optimization problem with Mixed Integer Non-Linear Programming method, geometrical properties of such ovals are used to create optimal sensor configurations for different number of sensor. The theoretical results are verified with Monte Carlo simulations.

**Key Words:** Underwater sensor networks, Cassini ovals

## Giriş

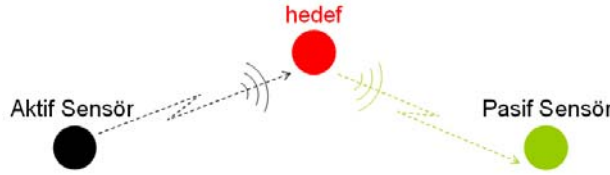
Sualtı keşif ve gözetleme sistemlerinin temel kullanım amacı sualtında bulunan hedef ve cisimlerin akustik yolla tespitidir. Söz konusu sistemler birbirlerinden bağımsız kaynak ve alıcılardan oluşmaktadır. Sistemin çalışma prensibi, kaynak tarafından suya gönderilen ses enerjisinin hedeften yansması ve yansıyan enerjinin sisteme ait alıcılar tarafından algılanarak hedef tespitinin sağlanması şeklindedir. Dağıtık sualtı sensör ağları olarak nitelendirilebilecek bu tür sistemlerin saha araması maksadıyla kullanıldığı durumlarda, sistemin verimliliği sensörlerin geometrik konfigürasyonuna bağlıdır. Dolayısı ile kullanıcı için kısıtlı sayıdaki sensör ile oluşturulacak konfigürasyon ile maksimum hedef tespit olasılığının sağlanması problemi ortaya çıkmaktadır [1]. Kaynak ve alıcıların adedine ve kullanım şekline göre dağıtık sualtı sensör ağları farklı isimler almaktadır. [2].

a. Monostatik Sistemler: Sistemde alıcı ve kaynak aynı cihaz içerisinde (dolayısı ile aynı mevkide) bulunmaktadır. Günümüzde hala en yaygın olarak kullanılan sensör tipidir.



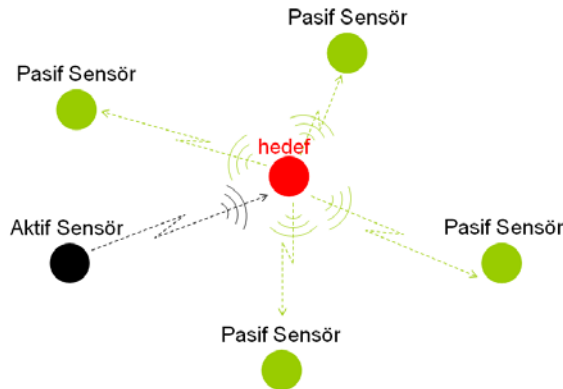
Şekil-1 Monostatik Sistem

b. Bistatik Sistemler: Kaynak ve alıcı birbirlerinden bağımsız iki ayrı sensör olarak görev yapmaktadır ve farklı mevkilere yerleştirilerek kullanılabilir.



Şekil-2 Bistatik Sistem

c. Multistatik Sistemler: Birbirlerinden ayrı birden fazla kaynak ve/veya alıcının bulunduğu sistemler olup bistatik sistemlerin geliştirilmiş hali olarak düşünülebilir. Sensörlerin tespit menzili, birbirlerine göre konumu ve aralarındaki mesafe sistemin etkinliğini önemli ölçüde etkilemektedir.



Şekil-3 Multistatik Sistem

Multistatik sistemlerin monostatik sistemlere göre bazı önemli avantaj ve dezavantajları vardır. En önemli avantajları şu şekilde özetlenebilir [3]:

- a. Alıcılar kaynaklara göre daha az maliyetlidir. Az sayıda yüksek güçlü ve maliyetli kaynak ve çok sayıda düşük maliyetli alıcının kullanıldığı sistemlerin toplam maliyeti, aynı etkinliği ve saha kaplamasını sağlayacak monostatik sistemlere göre daha az olacaktır.
- b. Multistatik sistemler, kaynak ve alıcı rolünde pek çok farklı sensör veya platformu ihtiva edebileceğinden daha esnek bir yapıya sahiptir.
- c. Kaynak mevkileri tehdit platform tarafından tespit edilebilirken alıcılar pasif olduklarından yerlerini belli etmezler. Multistatik bir sistemde kaynak ve alıcılar farklı mevkilerde bulduklarından alıcı mevkilerinin gizli kalması arama birliğine avantaj sağlar ve hedefin tespit edilmekten kurtulması daha güç hale gelir.
- ç. Multistatik sistemlerde hedef tespiti aynı anda birden fazla alıcı tarafından yapılabildiğinden, elde edilen hedef temasının hatalı olma olasılığı düşmekte ve bunun neticesinde daha güvenilir tespitler yapılabilmektedir.
- d. Deniz dibinde gömülü bulunan mayın, batık, vb. cisimlerin tespiti, mevkilerinin belirlenmesi ve teşhisi bistatik ve multistatik sistemler ile daha kolaydır. Hata olasılığının azaltılması, arama gayretinin, hedeflerin tespit, teşhis ve izlenmesine daha fazla süreyle yoğunlaştırılmasına imkân tanır.

Multistatik sistemlerin başlıca dezavantajlar ise şunlardır:

- a. Söz konusu sistemlerin etkin olarak kullanılabilmesi için sahadaki tüm sensör mevkilerinin hassas olarak bilinmesi ve sensörlerle sürekli iletişim halinde olunması gerekmektedir.
- b. Hedef bilgisi aynı anda birden çok sensör tarafından sağlandığından daha karmaşık hedef izleme algoritmalarının kullanılması zorunludur.
- c. Sistemin planlanması, kullanılması ve etkinliğinin ölçülmesi daha zordur.

Bu çalışmada dağıtık sensör ağ tiplerinden birden çok kaynak ve alıcının bir araya getirilmesiyle oluşturulan multistatik sistemler ile yapılan saha araması kapsamında, sahada hareketsiz olduğu varsayılan hedeflerin tespit olasılığını, bir başka deyişle sahada elde edilen kaplama oranını maksimize edecek sensör konfigürasyonlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bistatik ve multistatik sistemler olarak incelenen dağıtık sualtı sensör ağlarının optimizasyonu kapsamında yapılan çalışmalar genel olarak sistemlerin enerji kısıtı (kaynak ve alıcı pil ömrü kısıtı) altında çizelgeleme (kaynak ve alıcı gruplarının çalışma sırasının belirlenmesi) optimizasyonu ve gelişigüzel oluşturulan multistatik sahalarda beklenen saha kaplamasının stokastik yöntemlerle hesaplanması konuları üzerinde yoğunlaşmış olup konu ile ilgili yapılmış başlıca çalışmalara aşağıda özetlenmiştir.

[4]'te bistatik sonoboyların heterojen kıyı sularında çizelgeleme optimizasyonu maksadıyla geliştirilen Genetik Algoritma tabanlı SCOUT (Sensor Coordination for Optimal Utilization and Tactics) programı tanıtılmış, geometrik düzende oluşturulan monostatik ve bistatik sonoboy sahalarının homojen olmayan ortam koşullarında optimum sonuçlar vermediği,

SCOUT programı ile oluşturulan sonoboy sahaların optimuma yakın sonuçlar verdiği ifade edilmiştir.

Sahaya üniform olarak yerleştirilmiş bir multistatik sistem ile yapılan hedef arama performansına ilişkin üst sınırın (upper bound) yakınsandığı çalışma [5]'de, öncelikle pasif sensörlerden oluşan sensör ağlarının performans tahmini yapılmış, daha sonra aynı yöntem multistatik sistemlere uygulanmış ve elde edilen sonuçlar Monte Carlo simülasyonları ile doğrulanmıştır.

[6]'da mevkileri bilinen alıcıların olduğu bir sahada hareketli kaynakların rota ve çizelgeleme optimizasyonu, performans ölçütü alt sınırı Posterior Cramer-Rao Lower Bound (PCRLB) yöntemi ile tespit edilen Genetik Algoritma kullanılarak yapılmıştır. Çalışma neticesinde kaynakların sahada birbirleri ile koordineli şekilde kullanılacağı rotalar ve çalışacakları zaman aralıklarını belirten çizelgeleri optimuma yakın olarak tespit edilmiştir.

Homojen ortam koşulları ve doğrusal akustik propogasyonun olduğu bir ortamda multistatik sensörlerin çizelgeleme problemi saha kaplaması da göz önüne alınarak [7]'de incelenmiş, geliştirilen çizelgeleme algoritması simülasyonlar ile test edilmiştir.

Kıyı sularında saha arama maksatlı kullanılan multistatik sistemlerin çizelgeleme probleminin dinamik yöntemlerle optimizasyonu kullanılan sensörlerin enerji kısıtı olması durumu için [8]'de incelenmiş, yöntem olarak "Partially Observable Markov Decision Process (POMDP)" kullanılmış, geliştirilen algoritmanın tespit olasılığı ve sistemin ömrü açısından greedy yöntemlerden daha başarılı sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

[9], [10] ve [11]'de ise multistatik sistemlerin hedef takibi algoritmaları ele alınmış, kaynak, hedef ve alıcı geometrilerinin hedefin takibine olan etkileri analiz edilmiş, aynı andan birden çok sensörden elde edilen hedef bilgisinin birleştirilerek güvenilirliği daha fazla mevki bilgisinin oluşturulması, böylelikle hatalarının minimize edilmesi incelenmiş, bu kapsamda Kalman ve Wiener filtreleri kullanılarak probleme çözüm aranmıştır.

[12]'de, ortamda yankılanmanın (reverberation) olduğu durumlar için Doğrusal Kalman filtreleri kullanılarak multistatik sistemlerin aynı anda birden çok hedefi takip edebilmelerine yönelik algoritma geliştirilmiş, geliştirilen algoritma gerçek ve simüle hedef bilgileri ile test edilmiştir.

İnsansız hava araçlarını kullanarak multistatik hedef tespiti ve izlemesi yapan radar sistemlerinin enerji kısıtı altında hedef takibini sürekli ve doğru olarak yapabilmeleri için optimum sistemin dizaynı [13]'te araştırılmıştır.

Generic Oceanographic Array Technology System (GOATS) araştırma programı kapsamında mayınların insansız sualtı araçları ile bistatik ve multistatik tespitine yönelik yapılan çalışmalar [14]'te açıklanmış, 3 boyutlu ortam modelleri ve gelişmiş insansız sualtı araçları sonarları kullanılarak alçak frekans ile deniz yatağındaki mayınların tespit edildiği ifade edilmiştir.

Bu çalışmada ise yukarıdaki çalışmalardan farklı sabit hedeflerin maksimum tespit olasılığını sağlayacak sensör konfigürasyonlarının farklı sayıdaki kaynak ve alıcı grupları için analitik yöntemlerle belirlenmesi amaçlanmış, çizelgeleme ve enerji kısıtı gibi hususlar dikkate alınmadan doğrusal akustik propogasyon varsayımı altında karma tamsayılı doğrusal olmayan

programlama (KTDOP) yöntemi ile çözüm aranmıştır. Elde edilen teorik çözümler Monte Carlo simülasyonları ile test edilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde bistatik ve multistatik sistemlerin akustik tespit kriterleri ve tespit gerçekleştirebilecekleri bölgelerin geometrik özellikleri incelenmiştir. Üçüncü bölüm kapsamında problem KTDOP yöntemi ile modellenmiş ve elde edilen çözümler incelenmiştir. Dördüncü bölümde, elde edilen konfigürasyonlar ve analitik sonuçlar MATLAB® kullanılarak Monte Carlo simülasyonları ile test edilmiştir. Son bölümde çalışma sonuçları özetlenerek değerlendirmelerde bulunulmuştur.

## Bistatik Tespit Bölgesi

Bu bölümde herhangi bir kaynak-alıcı çifti ile sağlanan kaplama bölgesi özellikleri ve geometrisi incelenmiştir.

### Bistatik Tespit Kriteri

Tespitin gerçekleşebilmesi için kaynaktan yayımlanan enerjinin hedeften yansımını müteakip bir ya da daha fazla alıcıda  $TH$  ile simgelenen akustik enerji seviyesini geçecek seviyede etki oluşturması gereklidir. [15]'te belirtilen aktif sonar denklemini bistatik sensörler için yazacak olursak;

$$SL - TL_1 - TL_2 \geq TH \quad (1)$$

(1)'te  $SL$  aktif sensör gücü,  $TL_1$  ve  $TL_2$  ise sırasıyla kaynaktan hedefe ve hedeften alıcıya olan transmisyon kaybı miktarlarıdır. Homojen ortam koşulu varsayımı altında sahadaki herhangi iki nokta arasındaki transmisyon kaybı sabit bir  $m > 0$  için kuvvet kuralını izleyeceğinden (1) aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir:

$$SL - m \log(R_1) - m \log(R_2) \geq TH \quad (2)$$

Yukarıda  $R_1$  ve  $R_2$  sırasıyla kaynaktan hedefe ve hedeften alıcıya olan mesafeyi belirtmektedir. (2)'ü bistatik mesafelerin çarpımı için çözecek olursak tespit sağlanması için bu çarpımın  $b^2$  olarak nitelendireceğimiz bir eşik değerinin altında olması gerektiği (3)'te görülmektedir.

$$R_1 R_2 \leq 10^{\frac{1}{m}(SL-TH)} \equiv b^2 \quad (3)$$

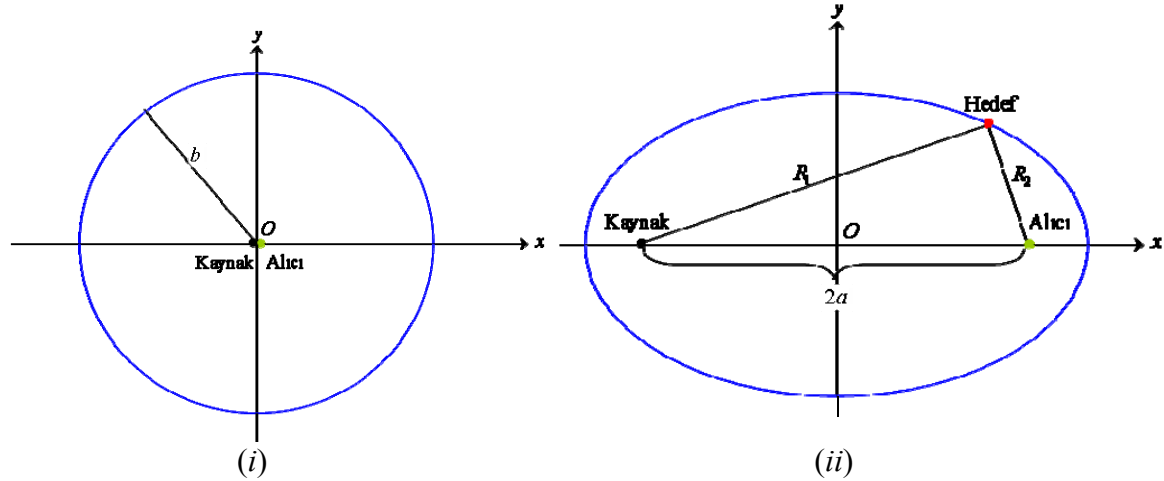
$b$ 'yi "Eşlenik Monostatik Menzil" olarak tanımlayabiliriz [16]. (3) bistatik bir sistemin tespit sahasını, bir başka deyişle sensörün hedefi algılayabileceği bölgeyi oluşturan Cassini ovali denklemdir [3].

### Cassini Ovali ve Temel Özellikleri

Cassini ovali ilk kez 1680 yılında İtalyan gökbilimci Giovanni Domenico Cassini (1625–1712) tarafından dünyanın güneş etrafındaki yörünge şekline bir model olarak incelenmiştir. Domenico Cassini, Kepler'in gezegenler eliptik yörüngelerde ilerlediğine dair teorisini reddetmiş ve bahse konu yörüngelerin Cassini ovali şeklinde olduğunu iddia etmiştir [17].

Günümüzde Cassini ovaleri aynı zamanda tıp biliminde alyuvarların şeklinin modellenmesi için de kullanılmaktadır [18-22].

James ve James [22], Cassini ovalini, kendisine komşu olan iki kenarının uzunluklarının çarpımı ve karşı kenarın uzunluğu sabit olan üçgen tepe noktalarının birleştirilmesiyle oluşan şekil olarak tanımlamıştır.



Şekil-4 (i) Monostatik tespit bölgesi (ii) Bistatik üçgen ve Cassini ovali

Şekil-4 (i)'de  $b$  tespit menziline sahip bir monostatik sensörün tespit bölgesi,  $b$  yarıçaplı bir daire görülmektedir. Aynı sensörü oluşturan kaynak ve alıcı birbirlerinden  $2a$  mesafesi kadar uzaklaştırılacak olursa Şekil-4 (ii)'de gösterilen bistatik tespit bölgesi oluşmaktadır. Cassini ovali tanımını aynı şekilde görülen bistatik üçgene uygulayacak olursak üçgenin tepe noktası hedef, diğer köşeleri sensörler, tepe noktasına komşu iki kenar uzunlukları  $R_1$  ve  $R_2$ , çarpımları sabit  $b^2$  ve tepe noktasına karşı kenarın uzunluğu sabit  $2a$  olarak düşünülebilir [23]. Dolayısı ile  $a$  parametresi sensörler arası mesafenin yarısı olarak tanımlanabilir.

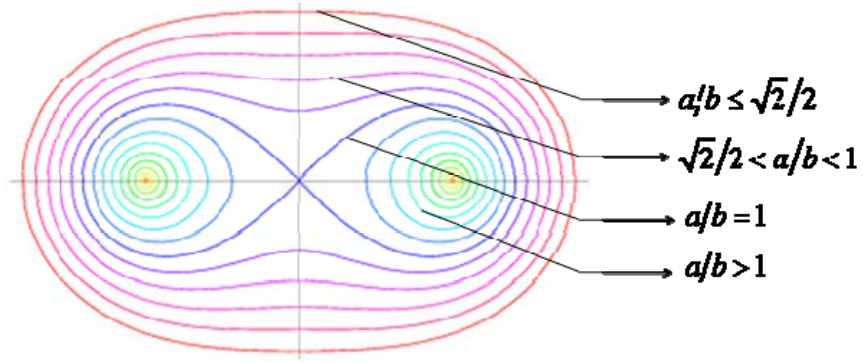
Sensörlerin  $(\pm a, 0)$  noktalarında sabit olduğunu varsayarsak Cassini ovalinin Kartezyen denklemi  $R_1 R_2 = b^2$ 'den yola çıkarak şu şekilde olacaktır [24]:

$$\left[ (x-a)^2 + y^2 \right] \left[ (x+a)^2 + y^2 \right] = b^4, \quad a, b \in \mathbb{R}. \quad (4)$$

Bu oval  $x$  ve  $y$  eksenlerine göre simetrik olup aldığı şekiller temel parametreler olan  $a$  ve  $b$ 'nin birbirine oranına bağlı olarak farklılık göstermektedir [25].

- $a/b \leq \sqrt{2}/2$  için şekil elipse benzeyen tek bir konveks eğridir ve  $x$  eksenini  $x = \pm \sqrt{a^2 + b^2}$  noktalarında keser.
- $\sqrt{2}/2 < a/b < 1$  için şekil üst ve alt kısımlarından içeri doğru hafifçe bastırılmış konveks olmayan bir eğri şeklindedir.
- $a/b = 1$  için şekil bir Bernoulli Lemniscate'dir. Bu eğri, Kartezyen düzleminin merkezinden geçmekte olup  $\infty$  sembolüne benzemektedir.
- $a/b > 1$  için şekil iki ayrı konveks ovale ayrılır ve  $x$ -eksenini ayrıca  $x = \pm \sqrt{a^2 - b^2}$  noktalarında keser.

Şekil-5'te  $a$ 'nın sabit değeri için Cassini ovalinin alabileceği farklı şekiller görülmektedir.



Şekil-5 Cassini ovalinin alabileceği farklı şekiller ( $a$  sabit,  $b$  değişken)

## Multistatik Sensör Optimizasyonu

### Varsayımlar

Bu bölümde maksimum tespit olasılığı,  $PoD^*$ 'a ulaşmak için kullanılması gereken multistatik sensör konfigürasyonlarının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bistatik sistemlerden farklı olarak multistatik sistemlerde sahada çok sayıda kaynak ve/veya alıcı bulunmakta, tek kaynak kullanılsa dahi birçok alıcı tarafından aynı anda hedef tespiti yapılabilmekte, bunun neticesinde sensörler arası mesafenin yanı sıra sensör geometrisi, yani sensörlerin birbirlerine göre konumları da önem kazanmaktadır.

Bu kapsamda; hedefin  $A_F$  alanına sahip  $F \subset \square^2$  sahasında sabit bir mevkide bulunduğu,  $b > 0$  eşdeğer monostatik menziline sahip  $x_1$  adet kaynak ve  $x_2$  adet alıcının ise  $F' \subset F \subset \square^2$  sahasına yerleştirildiği varsayılmaktadır. Tespit bölgesinin her zaman için  $F$  sahası sınırları içinde kalması için  $F'$  sahası boyutlarının  $m'$  ve  $n'$  ve  $F$  sahası boyutlarının ise en az  $m = m' + 2b$  ve  $n = n' + 2b$  olduğu kabul edilmiştir. (Bkz. Şekil-6)

### Eşdeğer Saha Kaplaması

$F$  sahasındaki bir  $(x,y)$  noktasında bulunan hedefin tespit edilme olasılığı, bahse konu noktanın sensörlerin tespit bölgesi,  $C$ , içinde olup olmama olasılığına bağlıdır.  $(x,y)$  noktası için geçerli olan bu olasılığı tüm düzlem için entegre edecek olursak ve bu toplama  $ESK$ , "Eşdeğer Saha Kaplaması" dersek, tespit olasılığı,  $PoD$ ;

$$PoD = \frac{ESK}{A_F} \quad (5)$$

olarak ifade edilebilir. Bu durumda sabit bir  $A_F$  değeri için  $ESK$ 'nın maksimize edilmesi hedef tespit olasılığını da maksimize edecektir. Bu nedenle problem KTDOP yöntemi ile modellenirken  $PoD$  değeri yerine  $ESK$  değerinin maksimizasyonu hedeflenmiştir. Monostatik sistemler için  $ESK$ 'nın maksimizasyonu çok pratik bir şekilde, sensörlerin sahaya kaplama bölgeleri birbirleri ile çakışmayacak şekilde yayılması ile elde edilirken multistatik sistemlerde, tespit bölgelerinin şekli, sensörler arası mesafeye bağlı olduğundan, aynı çözüm yöntemi geçerli değildir [26].

## Model ve Formülasyon

Bu yöntemde problem ele alınırken  $F$  sahası kare şeklinde ufak boyutlu  $x_3$  adet hücreye bölünerek grid yapısına dönüştürülmüştür.  $ESK$  hesaplamasında sahayı oluşturan noktalar yerine oluşturulan bu hücreler esas alınmış, bu kapsamda  $k = 1, 2, \dots, x_3$  hücresinin orta noktası,  $(\delta_k^x, \delta_k^y)$ ,  $C$  içinde ise bahse konu hücrenin kapsandığı varsayılmış ve problem KTDOP yöntemi ile formülize edilmiştir.

### Parametreler

- $x_1$  : kaynak adedi  
 $x_2$  : alıcı adedi  
 $x_3$  : sahadaki hücre adedi  
 $b$  : eşdeğer monostatik menzil  
 $m, n$  :  $F$  sahası eni ve boyu  
 $\delta_k^x$  :  $k$ . hücre orta noktasının  $x$ -eksenindeki pozisyonu  
 $\delta_k^y$  :  $k$ . hücre orta noktasının  $y$ -eksenindeki pozisyonu

### İndisler

- $i = 1, 2, \dots, x_1$   
 $j = 1, 2, \dots, x_2$   
 $k = 1, 2, \dots, x_3$

### Karar Değişkenleri

- $\varphi_i^x$  :  $i$ . aktif sensörün  $x$ -eksenindeki pozisyonu  
 $\varphi_i^y$  :  $i$ . aktif sensörün  $y$ -eksenindeki pozisyonu  
 $\psi_j^x$  :  $j$ . pasif sensörün  $x$ -eksenindeki pozisyonu  
 $\psi_j^y$  :  $j$ . pasif sensörün  $y$ -eksenindeki pozisyonu  
 $\rho_{ijk}$  :  $k$ . hücrenin  $i$ . aktif ve  $j$ . pasif sensör ile kaplanmasına ilişkin kukla değişken

### Amaç Fonksiyonu

$$\max z = \sum_{k=1}^{x_3} \left( 1 - \prod_{i=1}^{x_1} \prod_{j=1}^{x_2} (1 - \rho_{ijk}) \right)$$

### Kısıtlar

$$\rho_{ijk} \leq \frac{b^4}{\left[ (\varphi_i^x - \delta_k^x)^2 + (\varphi_i^y - \delta_k^y)^2 \right] \left[ (\psi_j^x - \delta_k^x)^2 + (\psi_j^y - \delta_k^y)^2 \right]} \quad \forall i, j, k \quad \{1\}$$

$$m - b \geq \varphi_i^x, \psi_j^x \geq b \quad \forall i, j \quad \{2\}$$

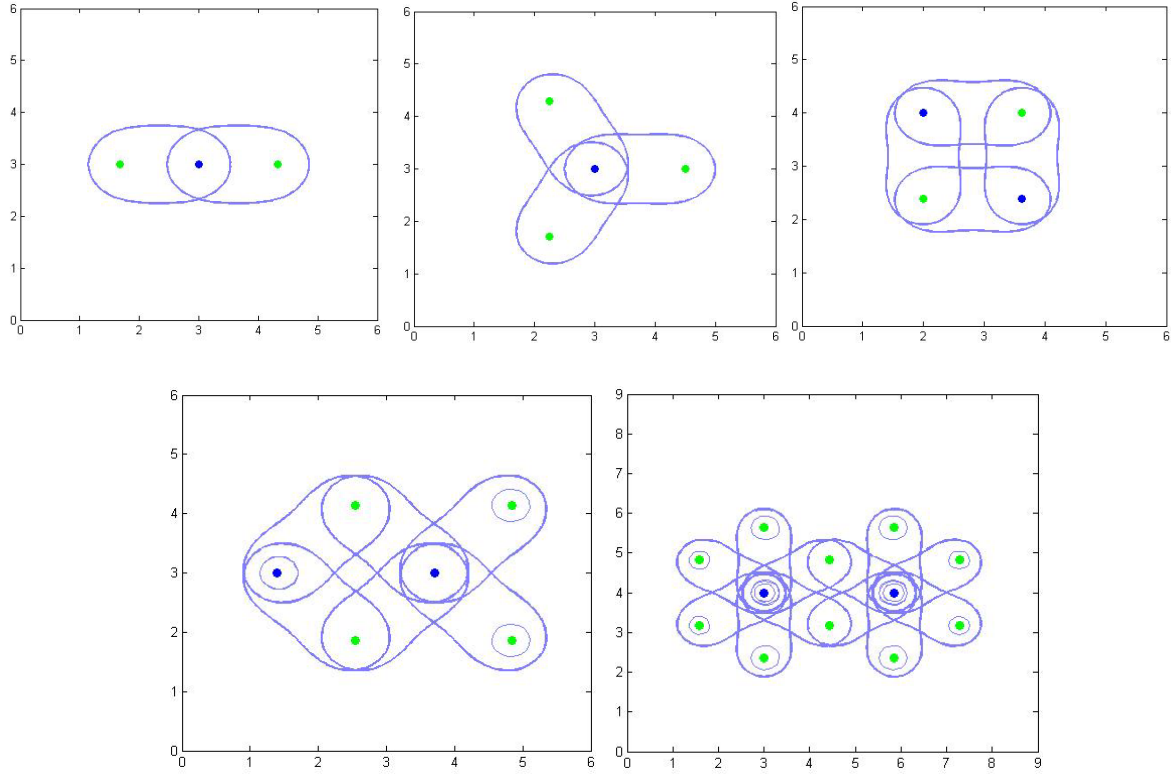
$$n - b \geq \varphi_i^y, \psi_j^y \geq b \quad \forall i, j \quad \{3\}$$

$$\rho_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, k \quad \{4\}$$



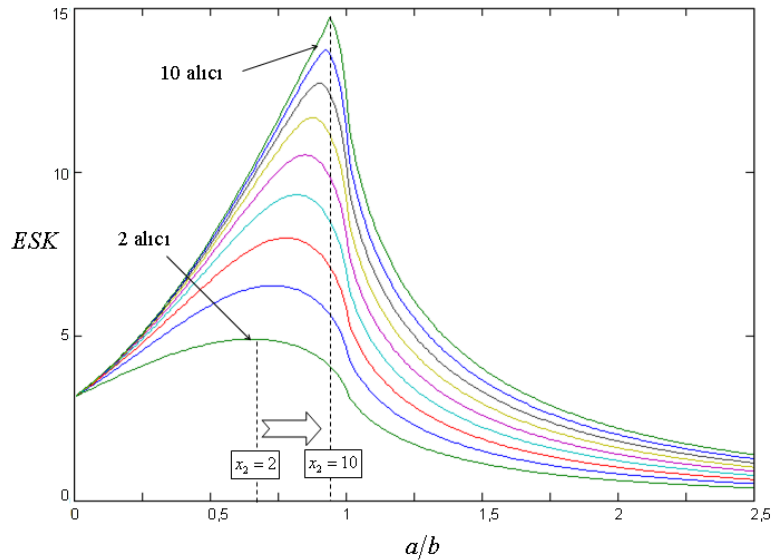


durumunda ise kaynakların her alıcı ile bir bistatik bir çift oluşturduğu ve sensörler arası mesafelerin  $1,60b$  olduğu tespit edilmiştir.



Şekil-7 Farklı sensör sayıları için KTDOP ile elde edilen optimum konfigürasyonları

$x_1=1$  ve  $x_2=2,3,\dots,10$  için tüm  $a/b$  oranları için elde edilen  $ESK$  değerleri ve optimum  $a/b$  oranları Şekil-8'de görülmektedir. Alıcı sayısı arttıkça optimum  $a/b$  oranının da arttığı, optimum oranın  $a/b=1$ 'e yakınsadığı görülmektedir.



Şekil-8: Poligonal yerleştirmede  $x_1=1$  ve  $x_2=2,3,\dots,10$  için  $ESK$ 'nın  $a/b$  oranına göre değişimi.

## Simülasyon

Multistatik sensörlerin  $F$  sahasında sağlayacakları  $ESK$ 'sının maksimize edilmesi için kullanılması gereken konfigürasyonlar bir önceki bölümde KTDOP yöntemi ile belirlenmiştir. Bu bölümde, bahse konu konfigürasyonların etkinliği MATLAB® programı kullanılarak yapılan Monte Carlo simülasyonu ile test edilmiş, elde edilen teorik konfigürasyonlar simülasyon neticeleri ile karşılaştırılmıştır.

Bu kapsamda yapılan simülasyonlar iki ana gruptan oluşmaktadır. İlk grup simülasyonda tek kaynak ve çok sayıda alıcı durumu ele alınmış, poligonal konfigürasyonlar için kaynak alıcı mesafesinin doğruluğu test edilmiştir.

İkinci grup simülasyonda ise aynı sayıda sensörden oluşan farklı konfigürasyona sahip multistatik sistem konfigürasyonları oluşturulmuş, elde edilen  $ESK$  değerleri ile KTDOP yöntemi ile elde edilen optimum konfigürasyonlara ait  $ESK$  değerleri karşılaştırılmıştır. Yapılan tüm simülasyonlarda işlem kolaylığı sağlaması maksadıyla  $b=1$  km. olarak alınmıştır.

### Tek Kaynak Simülasyonları:

Saha: Arama sahası  $F$ , kenar uzunlukları  $m, n=6$  km, alanı  $A_F=36$  km<sup>2</sup> olan bir karedir.

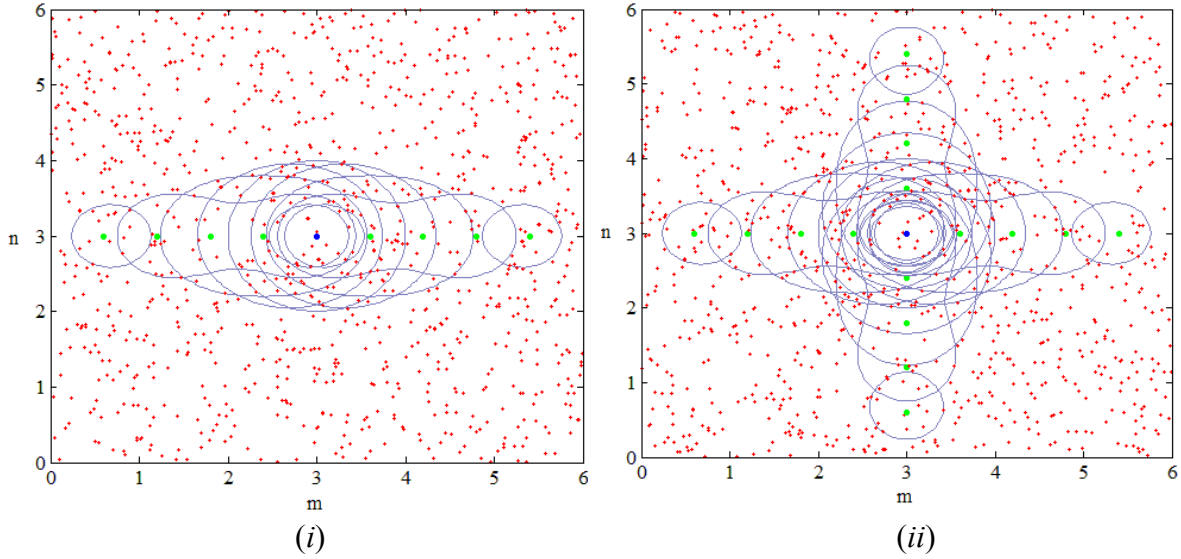
Hedefler: Simülasyon kapsamında sahada  $n_H=10^6$  adet hedef gelişigüzel noktalarda oluşturulmaktadır. Oluşturulan her bir hedef sahada  $x_H \in U[0, m]$  ve  $y_H \in U[0, n]$  olmak üzere  $(x_H, y_H)$  noktasına yerleştirilmektedir.

Sensörler: Simülasyonlar  $x_1=1$  adet kaynak etrafında  $x_2=2, 3, \dots, 6$  adet alıcının poligonal yerleştirildiği durumlar için ayrı ayrı yapılmaktadır. Her  $x_2$  değeri için simülasyon başlangıcında kaynak ve alıcılar sahanın orta noktasında birbirleri arasındaki mesafe  $d=0$  km. olacak şekilde bulunmakta, daha sonra alıcılar birbirleri ile  $(360/x_2)^\circ$  açı farkı yapacak şekilde kaynaktan  $\rho=0,01$  km. mesafe atışlarıyla uzaklaştırılmakta, bu işlem  $d=2$  km. olana kadar devam etmektedir.

$d=[0,2]$  km. aralığındaki her  $\rho=0,01$  km. artışı için sistemin tespit bölgesi,  $C$ , içinde kalan hedef sayısı  $n_C$  sayılmakta,  $PoD = n_C/n_H$  ise  $ESK$ , (5) kullanılarak,

$$ESK = PoD \cdot A_F = \frac{n_C}{n_H} \cdot A_F \quad (6)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Şekil-9'da  $x_1=1, x_2=2$  ve  $x_1=1, x_2=4$  için poligonal yerleşim düzeni simülasyonu görülmektedir.



Şekil-9: (i)  $x_1=1, x_2=2$  için poligonal yerleşim düzeni simülasyonu  
(ii)  $x_1=1, x_2=4$  için poligonal yerleşim düzeni simülasyonu

Simülasyon Sonuçları: En büyük  $ESK$ 'nı sağlayan sensör ayırım mesafeleri için elde edilen simülasyon sonuçları ile teorik değerler Tablo-1'de karşılaştırılmıştır. Teorik ve simülasyon değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir.

Tablo-1: Poligonal yerleşim düzenleri için kaynak-alıcı optimum mesafelerinin KTDOP yöntemi ile ve simülasyon sürecinde elde edilen değerleri

	$x_2 = 2$	$x_2 = 3$	$x_2 = 4$	$x_2 = 5$	$x_2 = 6$
KTDOP ( $a/b$ )	0,64	0,73	0,80	0,83	0,85
Simülasyon ( $a/b$ )	0,65	0,72	0,80	0,83	0,86

### Birden Çok Kaynak Simülasyonları:

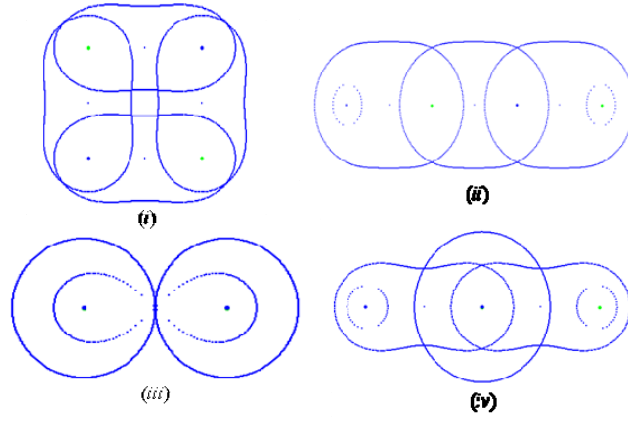
Bu grup simülasyonda hem kaynak hem de alıcı sayısının birden fazla olduğu durumlar için KTDOP yöntemi ile elde edilen konfigürasyonların etkinliği test edilmiştir.

Saha: Arama sahası  $F$ , kenar uzunlukları  $m, n=12$  km, alanı  $A_F=144$  km<sup>2</sup> olan bir karedir.

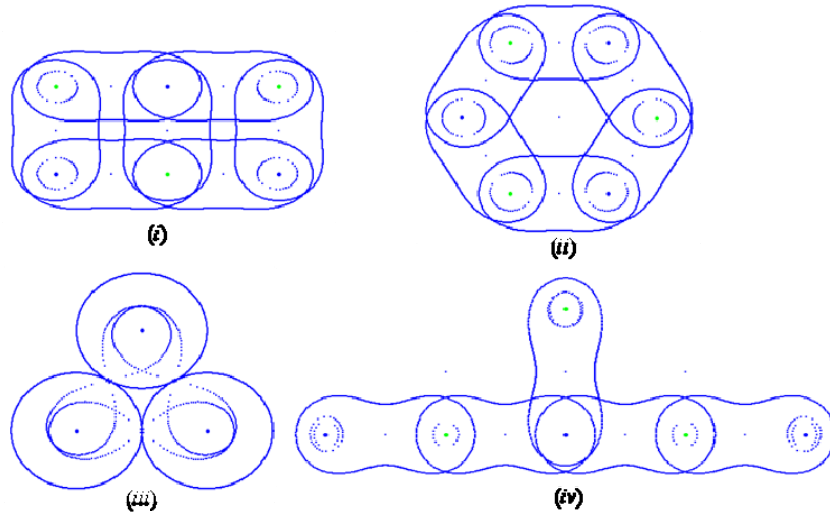
Hedefler: İlk grup simülasyonda olduğu gibidir.

Sensörler: Simülasyonlar kapsamında  $x_1, x_2=2$ ,  $x_1, x_2=3$  ve  $x_1, x_2=4$  adet sensörden oluşan multistatistik sistemlerin  $ESK$  değerleri test edilmiştir. Her grup simülasyon için KTDOP yöntemi ile elde edilen konfigürasyon haricinde farklı konfigürasyonlar denenmiş ve  $ESK$  değerleri karşılaştırılmıştır. Denenen her yeni alternatif için sensörler arası mesafe  $d$  değiştirilerek maksimum  $ESK$  değeri tespit edilmiştir.

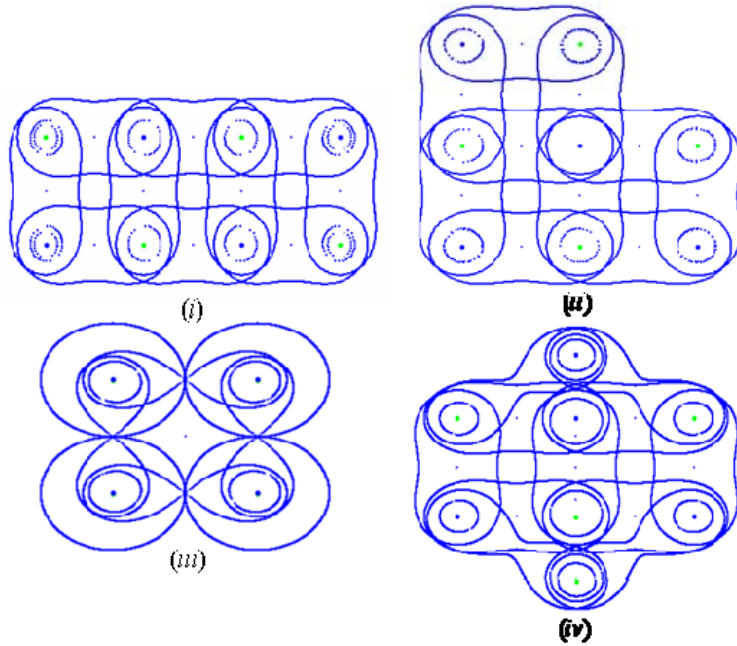
$x_1, x_2=2$ ,  $x_1, x_2=3$  ve  $x_1, x_2=4$  sensör adetleri için dörder adet alternatif konfigürasyon simülasyona tabi tutulmuş, her simülasyon için belirlenen alternatifler Şekil-10, 11 ve 12'de, elde edilen  $ESK$  değerleri ise Tablo-2'de özetlenmiştir.



Şekil-10  $x_1, x_2 = 2$  adet kaynak ve alıcı için belirlenen konfigürasyon alternatifleri



Şekil-11  $x_1, x_2 = 3$  adet kaynak ve alıcı için belirlenen konfigürasyon alternatifleri



Şekil-12  $x_1, x_2 = 4$  adet kaynak ve alıcı için belirlenen konfigürasyon alternatifleri

Tablo-2:  $x_1, x_2 = 2, 3, 4$  adet kaynak ve alıcı için belirlenen konfigürasyon alternatiflerine ait *ESK* değerleri

Alternatif #	<i>ESK</i> (km <sup>2</sup> )		
	$x_1, x_2 = 2$	$x_1, x_2 = 3$	$x_1, x_2 = 4$
(i)	7,23	11,63	16,04
(ii)	6,86	11,44	15,91
(iii)	6,28	9,42	12,57
(iv)	5,63	10,37	14,27

Yapılan simülasyonlar sonucu en yüksek *ESK*'na sahip konfigürasyonların KTDOP yöntemi ile elde edilen ve Alternatif-(i) olarak belirtilen konfigürasyonlar olduğu, farklı yerleşim planlarının her zaman daha düşük kaplamaya sahip olduğu görülmektedir.

## Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışmada, bistatik ve multistatik akustik sistemler olarak adlandırılan dağıtık sualtı sensörlerinin maksimum kaplamayı sağlayacak şekilde optimizasyonu amaçlanmıştır. Birbirlerinden bağımsız ve farklı mevkilerde bulunan kaynak ve alıcıdan oluşan bir bistatik sistemin tespit bölgesinin, bir başka deyişle sahada kapladığı alanın Cassini ovaleri ile modellenmesi ve söz konusu ovalerin sensörler arasındaki mesafeye bağlı olarak farklı şekiller alması optimizasyon probleminin çözümünü güç hale getirmiştir. Birden çok bistatik sistemin biraraya gelmesiyle oluşan multistatik sistemlerde maksimum kaplamayı elde edebilmek için kullanılması gereken konfigürasyonların tespit edilebilmesi için karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama yöntemi kullanılmış, çeşitli sensör sayıları için optimum konfigürasyonlar elde edilmiş, çözümler daha sonra Monte Carlo simülasyonları ile test edilmiştir. Genel olarak elde edilen çözümler incelendiğinde;

- Sistemde tek kaynak olduğu durumlarda alıcıların kaynak etrafında poligonal şekilde (eşit mesafede ve açılarda) konumlandırılmalarının en uygun hareket tarzı olduğu,
- Alıcı sayısı arttıkça, alıcıların kaynaktan olan optimum mesafelerinin de arttığı, ancak  $a/b$  oranının her zaman 1'den küçük olduğu,
- Birden fazla kaynak olması durumunda alıcıların her kaynak için eşit sayıda paylaşılmasının, bazılarının kaynaklar tarafından kaplamayı artıracak şekilde ortak kullanılmasının (Bkz. Şekil 5.30) *ESK*'yı maksimize edeceği,

tespit edilmiştir.

Elde edilen optimum konfigürasyonlar özellikle geniş deniz sahalarının aranması maksadıyla kullanılan dağıtık sualtı sensör ağlarının daha etkin kullanımı, maksimum kaplamayı sağlayacak sensör geometrilerinin ve sensörler arası mesafelerin belirlenmesi konularında planlayıcılara ve karar vericilere karar desteği sağlayabilecek niteliktedir. Gelecek dönemde konuya ilişkin yapılacak çalışmalarda sabit alıcılar ile birlikte hareketli bir kaynağı içeren dağıtık sualtı sensör ağlarının optimizasyonu konusunun incelenmesi hedeflenmektedir.

Bu tez "Naval Postgraduate School" ve "Türkiye Bilimsel ve Teknolojik araştırma Kurumu (TÜBİTAK)" (B.02.1.TBT.0.06.01-214-36-109) tarafından desteklenmiştir.

## **Kaynaklar**

- [1] Akyıldız, I.F., Pompili, D. ve Melodia T. (2005) "Underwater acoustic sensor networks: research challenges", *Ad Hoc Networks*, Volume 3, Issue 3, Pages 257-279.
- [2] Kim S., Ku B., Hong W. ve Ko H. (2008). "Performance comparison of target localization for active sonar systems", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol.44, no.4, pp.1371-1380.
- [3] Cox, H. (1989). "Fundamentals of Bistatic Active Sonar", *Underwater Acoustic Data Processing* (Y. Chan, ed.), Kluwer, pp. 3-24.
- [4] DelBalzo D.R., Kierstead D.P. ve Stangl K.C. (2005) "Oceanographic effects on optimized multistatic sonobuoy fields" *OCEANS*, Proceedings of MTS/IEEE, Vol 2, pp. 1319-1324.
- [5] Walsh M.J. ve Wettergren T.A. (2008). "Search performance prediction for multistatic sensor fields", Technical Report, Naval Undersea Warfare Center, Newport, RI.
- [6] Tharmarasa R., Kirubarajan T. ve Lang T. (2009). "Joint path planning and sensor subset selection for multistatic sensor networks", *Proc. of Symposium on Computational Intelligence in Security and Defence Applications*.
- [7] Wang I.J., Lim J.H. ve Terzis A. (2008). "Energy-efficient sensor management in multistatic active sonar networks", *IEEE Signals, Systems and Computers*, 42<sup>nd</sup> Asilomar Conference, 1611-1616.
- [8] Saksena A. ve Wang I.J. (2008). "Dynamic ping optimization for surveillance in multistatic sonar buoy networks with energy constraints" *Decision and Control, CDC*, 47<sup>th</sup> IEEE Conference, 1109–1114.
- [9] Coraluppi S. (2006) "Multistatic sonar localization", *Oceanic Engineering*, *IEEE Journal*, Vol 31, Issue: 4, 964-974.
- [10] Simakov S. (2008). "Localization in airborne multistatic sonars", *Oceanic Engineering*, *IEEE Journal* , Vol 33, Issue:3, 278 – 288.
- [11] Erdinç O. ve Willet P. (2006). "Multistatic sensor placement: a tracking approach", *Information Fusion*, 9<sup>th</sup> International Conference, pp.1-8.
- [12] Poikonen A., Mertsalmi P. ve Mattila P. (2009). "Multistatic sonar studies in shallow water environment in the gulf of Finland", *UAM-Underwater Acoustics Measurements Seminar*.
- [13] Casbeer D.W., Swindlehurst A.L. ve Beard R. (2006). "Connectivity in UAV multi-static radar network", *American Institute of Aeronautics and Astronautics AIAA*, 6209.
- [14] Schmidt H., Edwards J.R. ve Liu T.C. (2002). "GOATS: AUV-based Multi-static Sonar Concept for Littoral MCM", 5<sup>th</sup> International Symposium Technology and the Mine Problem, U.S. Naval Postgraduate School, Monterey, CA.
- [15] Urick R.J. (1983). "Principles of Underwater Sound", 3<sup>rd</sup> Edition, Peninsula Publishing, Los Altos, CA.
- [16] Willis N.J. (2008). "Bistatic Radar", *Radar Handbook*, Skolnik M.I. (Editor in Chief), McGraw-Hill Professional, pp.23.4.
- [17] Hirst A.E., Lloyd E.K., "Cassini, his ovals and a space probe to Saturn", *The Mathematical Gazette*, Vol. 81, No. 492, (1997).
- [18] Hellmers, J., Eremina, E. ve Wriedt T. (2006). "Simulation of light scattering by biconcave Cassini ovals using the nullfield", *Journal Of Optics A: Pure And Applied Optics*, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 8, 1–9 method with discrete sources.
- [19] Angelov, B. ve Mladenov., I.M. (1999). "Geometry, Integrability and Quantization" 1<sup>st</sup> edition, Mladenov ve Naber G., (Sofia: Coral Press) pp. 27–47.
- [20] Mazon P. ve Muller S. (1998). "Dielectric or absorbing particles: EM surface fields and scattering", *Journal Of Optics*, Vol 29, 68–77.

- [21] Di Biasio, A. ve Cametti, C. (2005). "Effect of the shape of human erythrocytes on the evaluation of the passive electrical properties of the cell membrane", *Bioelectrochem*, Vol 65 pp. 163-169.
- [22] James G. ve James R. C. (1992). "Mathematics Dictionary", 5<sup>th</sup> edition, D. Van Nostrand Co. Inc., New York, 47.
- [23] Willis, N. J. (2005). "Bistatic Radar", 2<sup>nd</sup> edition, SciTech Publishing Inc., Raleigh, NC.
- [24] MacTutor (2012), "History of Mathematics Archive, Cassinian Ovals", <http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Curves/Cassinian.html>.
- [25] Gray A. (1997) "Cassinian Ovals, Modern Differential Geometry of Curves and Surfaces with Mathematica", 2<sup>nd</sup> edition, Boca Raton, FL: CRC Press, pp.82-86.
- [26] Washburn, A.R. (2010). "A Multistatic Sonobuoy Theory", Technical Report, Naval Postgraduate School, Monterey, CA.
- [27] GAMS Development Corporation, General Algebraic Modeling System (GAMS). (2005). Retrieved December 15, 2007, <http://www.gams.com>.