KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİSTATİK VE MULTİSTATİK SUALTI SENSÖR AĞLARININ OPTİMİZASYONU

DOKTORA TEZİ

Y.Müh. Mümtaz KARATAŞ

Anabilim Dalı: Endüstri Mühendisliği

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Gülşen AKMAN

KOCAELİ, 2012

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİSTATİK VE MULTİSTATİK SUALTI SENSÖR AĞLARININ OPTİMİZASYONU

DOKTORA TEZİ

Y.Müh. Mümtaz KARATAŞ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 31 Kasım 2011

Tezin Savunulduğu Tarih: 06 Ocak 2012

Tez Danışmanı
Yrd.Doç.Dr. Gülşen AKMAN

(.....)

Üye
Prof.Dr. Zerrin ALADAĞ

(.....)

Üye
Prof.Dr. Semra BİRGÜN

(.....)

Üye
Prof.Dr. Alpaslan FIĞLALI

(.....)

Üye
Prof.Dr. Y.İlker TOPÇU

(.....)

KOCAELİ, 2012

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Sensör ağlarının optimizasyonu problemleri birçok alanda karşımıza çıkan ve genelde çözümü zor olan problemlerdir. Temel olarak bilgi toplama, bilgi işleme, ortam izleme, gözetleme veya arama amaçlarıyla kullanılan sensör ağlarının başta çevre, sağlık, ticari veya askeri alanlar olmak üzere birçok alanda uygulaması bulunmaktadır. Kablosuz sensörler, akustik sensörler, radarlar en yaygın kullanılan sensör tipleri olup söz konusu sistemlerin uygulama alanları kullanılan sensör tiplerine bağlı olarak çeşitlendirilebilmektedir. Sivil veya askeri amaçlarla kullanılabilen, bistatik ve multistatik çalışma kabiliyetine sahip yeni nesil sualtı akustik gözetleme ve keşif sistemlerinin yaygınlaşmasıyla beraber, söz konusu akustik sistemlerin etkinliklerinin analitik yöntemlerle ölçülmesi ve optimizasyonu ihtiyacı da ortaya çıkmıştır. Bu çalışma kapsamında, bistatik ve multistatik akustik sensör ağlarının hedef tespit olasılığı tahmini formüllerinin geliştirilmesi ve optimum sensör yerleşim planlarının oluşturulması ile söz konusu ihtiyaca cevap verilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmamın her aşamasında deneyimini, bilgisini, yardım ve desteklerini esirgemeyen danışmanım Sayın Yrd.Doç.Dr. Gülşen AKMAN'a,

Paylaştığı uzman görüşleri ve yönlendirmeleri ile çalışmamın şekillenmesine büyük katkısı olan Naval Postgraduate School, ABD'de görevli Sayın Prof.Dr. Alan R. WASHBURN'e,

Bilgi ve tecrübeleri ile bana destek olan Sayın Prof.Dr. Zerrin ALADAĞ'a ve Sayın Prof.Dr. Semra BİRGÜN'e,

Uzun tartışmalar ve fikir alışverişleri sayesinde, karşılaştığım problemlerden çıkış yolu bulmama yardımcı olan ofis arkadaşlarım Eng Yau PEE, Jay FORAKER ve Helcio Vieira JUNIOR'a,

Eğitim ve iş hayatım süresince sevgi ve emekleri ile daima yanımda olan ve beni bugünlere getiren annem Ayşe KARATAŞ ve babam Orhan KARATAŞ'a,

Sabrını ve desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen eşim Şah Aslı KARATAŞ'a

Teşekkürlerimi sunuyorum.

Y.Müh. Mümtaz KARATAŞ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ v
TABLOLAR DİZİNİ viii
ÖZET ix
ABSTRACT x
1. GİRİŞ 1
2. SUALTI AKUSTİK TESPİT SİSTEMLERİ 3
2.1. Tanım 3
2.2. Alıcı ve Kaynakların Kullanımı 4
2.3. Sualtı Akustik Tespit Sistemleri Tipleri 5
2.4. Multistatik Sistemlerin Avantaj ve Dezavantajları 7
2.5. Multistatik Sistemlerin Kullanım Yöntemleri 8
2.6. Multistatik Sistemlerin Planlanması 10
3. SUALTI AKUSTİK MODELLERİ 14
3.1. Literatürde Yapılan Çalışmaların Özeti 14
3.2. Tanımlar 18
3.2.1. Tespit mesafesi eğrisi 18
3.2.2. Tarama genişliği 19
3.2.3. Tespit olasılığı (Probability of detection) (PoD) 20
3.2.4. Kurabiye kalıbı (Cookie cutter) tespit modeli 20
3.3. Sualtı Akustiği 24
3.3.1. Sualtı ortamı 24
3.3.1.1. Ses hızına etki eden faktörler 24
3.3.1.2. Ses hızı formülü 25
3.3.2. Sonar denklemleri 26
3.3.2.1. Sonar denklemi parametreleri 27
3.3.2.1.1. Tespit eşik seviyesi (*DT*) 27
3.3.2.1.2. Sensör ve hedef kaynak seviyesi (*SL*) 28
3.3.2.1.3. İletim kaybı (*TL*) 28
3.3.2.1.3.1. Sesin dağılması 29
3.3.2.1.3.1.1. Küresel dağılma 29
3.3.2.1.3.1.2. Silindirik dağılma 29
3.3.2.1.3.2. Sesin zayıflaması 30
3.3.2.1.3.2.1. Emilme kaybı 30
3.3.2.1.3.2.2. Saçılma/yankılanma kaybı 30
3.3.2.1.4. Yönlendirme indeksi (*DI*) 32
3.3.2.1.5. Hedef kuvveti (*TS*) 32
3.3.2.1.6. Sensör gürültüsü ($NL_{SENSÖR}$) 32
3.3.2.1.7. Ortam gürültüsü (NL_{ORTAM}) 33
3.3.3. Sonar tespit mesafesinin tahmini 34
4. BİSTATİK VE MULTİSTATİK TESPİT BÖLGESİ 36
4.1. Bistatik Tespit Kriteri 36
4.2. Cassini Ovali ve Temel Özellikleri 37

4.2.1. Cassini ovali alan hesabı 42
4.2.2. Cassini ovali çevre hesabı 43
4.2.2.1. Matz yakınsamaları ile çevre hesabı 44
4.2.2.2. Hipergeometrik fonksiyonlar ile çevre hesabı 45
4.2.2.3. Sayısal integral ile çevre hesabı 49
5. RASTGELE OLUŞTURULMUŞ BİSTATİK VE MULTİSTATİK SENSÖR SAHALARI 52
5.1. Rastgele Yerleştirilmiş Bistatik Sensörler 52
5.1.1. Analitik çözüm 53
5.1.2. Simülasyon sonuçları 56
5.2. Rastgele Yerleştirilmiş Multistatik Sensörler 58
5.2.1. Poisson sahaları 58
5.2.2. Multistatik sensörler ile tespit olasılığı 60
5.2.3. Optimum saha büyüklüğünün tespiti 62
5.2.4. Eşdeğer saha kaplaması 67
5.2.5. Simülasyon sonuçları 68
6. BİSTATİK VE MULTİSTATİK SENSÖRLERİN OPTİMİZASYONU 73
6.1. Bistatik Sensör Optimizasyonu 73
6.1.1. Hareketsiz hedefler 74
6.1.2. Hareketli hedefler 75
6.1.2.1. Senaryo-1 75
6.1.2.1.1. Doğru-küme kesişim problemi 76
6.1.2.1.2. Problemin haritalanması 76
6.1.2.1.3. Analitik çözüm 77
6.1.2.2. Senaryo-2 87
6.1.2.2.1. Poisson sahalarının süpürülmesi 88
6.1.2.2.2. Analitik çözüm 88
6.1.3. Simülasyon sonuçları 91
6.1.3.1. Hareketsiz hedef simülasyonu 91
6.1.3.2. Hareketli hedef simülasyonu - Senaryo 1 93
6.1.3.3. Hareketli hedef simülasyonu - Senaryo 2 94
6.2. Multistatik Sensörlerin Optimizasyonu 97
6.2.1. KTDOP yöntemi ile problemin çözümü 98
6.2.1.1. KTDOP yöntemi 98
6.2.1.2. Model 99
6.2.1.3. KTDOP ile elde edilen sonuçlar 101
6.2.1.3.1. Bir kaynak-iki alıcı 101
6.2.1.3.2. Bir kaynak-üç alıcı 102
6.2.1.3.3. İki kaynak-iki alıcı 102
6.2.2. GA Yöntemi ile problemin çözümü 103
6.2.2.1. GA yöntemi 103
6.2.2.2. Model 107
6.2.2.3. GA ile elde edilen sonuçlar 110
6.2.3. Simülasyon sonuçları 111
6.2.3.1. Tek kaynak simülasyonu 112
6.2.3.1.1. Simülasyon sonuçları 112
6.2.3.2. Birden çok kaynak simülasyonu 113
6.2.3.2.1. Simülasyon sonuçları 114
6.2.4. Poligonal yerleştirme stratejilerinin analitik olarak değerlendirilmesi 116

6.2.4.1. Bir kaynak-*n* alıcı poligonal yerleştirme 116
6.2.4.2. Bir kaynak-*n* alıcı ile tabaka oluşturma 129
6.2.4.3. Bir kaynak-*n* alıcı ile daire paketleme problemi 131
SONUÇLAR VE ÖNERİLER 134
KAYNAKLAR 140
ÖZGEÇMİŞ 148

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Monostatik Sistem 6
Şekil 2.2: Bistatik Sistem 6
Şekil 2.3: Multistatik Sistem 6
Şekil 2.4: Multistatik sistem ile uzun mesafeli gözetleme. 8
Şekil 2.5: Multistatik sistem ile geniş sahaların gözetlenmesi ve aranması. 9
Şekil 2.6: Yedeklenebilir alçak frekanslı sonar 9
Şekil 2.7: Bistatik sistemlerin gömülü hedeflerin tespitinde kullanımı 10
Şekil 3.1: Örnek bir tespit mesafesi eğrisi ($P(x)$: kümülatif tespit olasılığı) 18
Şekil 3.2: R_M yarıçaplı tespit sahası ve bu sahadan geçiş yapan hedef izi 18
Şekil 3.3: Tarama genişliği W ve azami tespit mesafesi R_M olan sensör 19
Şekil 3.4: Tarama genişliğinin (W) tespit mesafesi eğrisi üzerinde gösterimi 20
Şekil 3.5: Sahaya tekbiçimli dağılımla rastgele dağıtılmış hedefler 21
Şekil 3.6: (*i*) s_1 sensörüne ait tespit fonksiyonu (*ii*) s_2 sensörüne ait tespit fonksiyonu 21
Şekil 3.7: s_1 sensörü ile süpürülen saha 22
Şekil 3.8: s_2 sensörü ile süpürülen saha 23
Şekil 3.9: Basınç, tuzluluk, sıcaklık ve ses hızının jenerik değişimi 25
Şekil 3.10: (*i*) Aktif sonar dinlemesi (*ii*) Pasif sonar dinlemesi 27
Şekil 3.11: Toplam iletim kaybının frekans ve mesafeye bağlı değişimi 31
Şekil 3.12: Çevre gürültüsü hesaplama eğrileri (WENZ eğrileri) 34
Şekil 3.13: Sonar tespit mesafesi tahmini diyagramı 35
Şekil 4.1: b yarıçaplı daire şeklindeki monostatik tespit bölgesi 38
Şekil 4.2: Bistatik üçgen ve Cassini ovali 39
Şekil 4.3: Cassini ovalinin alabileceği farklı şekiller (a sabit, b değişken) 41
Şekil 4.4: Cassini ovalinin alabileceği farklı şekiller (b sabit, a değişken) 41
Şekil 4.5: (*i*) Cassini ovalinin $a/b \le 1$ için x-eksenini kestiği noktalar (*ii*) Cassini ovalinin $a/b > 1$ için x-eksenini kestiği noktalar 42
Şekil 4.6: Sayısal integral ve Willis yakınsaması ile hesaplanan bistatik alanın (Cassini ovali alanı) a/b oranına göre değişimi. 43
Şekil 4.7: Cassini ovalinin kartezyen düzleminde gösterimi 46
Şekil 4.8: Sayısal integral ile birinci Matz yakınsaması ile hesaplanan bistatik çevrenin (Cassini ovali çevresi) a/b oranına göre değişimi 50
Şekil 5.1: Bistatik sensörler arasındaki mesafenin beklenen değerini bulma probleminin iki nokta arasındaki mesafenin beklenen değerini bulma problemine haritalanması 53
Şekil 5.2: m=3 km, n=4 km için sensörler arasındaki mesafenin olasılık yoğunluk fonksiyonu 56
Şekil 5.3: Saha alanına göre sensörler arası beklenen mesafe 57
Şekil 5.4: Saha alanına göre beklenen kaplama alanı 57
Şekil 5.5: Dikdörtgen şeklindeki bir sahada oluşturulan örnek bir Poisson sahası 59
Şekil 5.6: $PoD(y)$'nin küçük ve büyük y yakınsamaları 61
Şekil 5.7: F ve F' sahaları 62

Şekil 5.8: Monostatik sensörlerin F sahasına rastgele yerleştirilmesi 63
Şekil 5.9: $PoD(y')/y'$ grafiği, birim çaba için elde edilen tespit olasılığı 64
Şekil 5.10: y çaba yoğunluğu parametresine göre PoD, PoD^* ve Optimum Saha Oranı.....65
Şekil 5.11: $y \le 1{,}1$ için optimum F'/F oranı kullanılması durumunda elde edilecek PoD kazanç değerleri 67
Şekil 5.12: Sensör sayısı ve EAC ilişkisi 68
Şekil 5.13: Rastgele multistatik sensör sahaları için elde edilen teorik ve simülasyon PoD değerleri 69
Şekil 5.14: $x_1 = 5$ ve $x_2 = 10$ adet sensör ile 10^3 adet hedefin m,n=10 boyutlarındaki sahada rastgele yerleştirilmesi.....71
Şekil 5.15: Rastgele multistatik sensör sahaları simülasyonu için oluşturulan altı senaryo için elde edilen teorik ve simülasyon EAC değerleri 71
Şekil 6.1: $f_C'(a)$ değişimi 75
Şekil 6.2: Doğru-küme kesişim problemleri 76
Şekil 6.3: ℓ'nin koordinat düzleminde gösterimi 78
Şekil 6.4: Hareketli hedeflerin bistatik sensörler ile tespiti probleminin doğru-küme kesişim problemine haritalanması. (*i*) Tek konveks tespit sahası (*ii*) Tek konveks olmayan tespit sahası (*iii*) İki ayrı konveks tespit sahası için haritalama.....81
Şekil 6.5: P_C, P_C^e ve P_C^i'nin a/b>1 için Cassini ovali üzerinde gösterimi.....84
Şekil 6.6: P_C^e ve P_C^i hesabı için kullanılacak uzunluk değerleri 85
Şekil 6.7: P_C^e'yi kesen doğru kümesinin C' ve/veya C'''yi de kesme olasılığı ($PoD_{K_1',K_1''}$) 86
Şekil 6.8: Normalize edilmiş bistatik etkin çevre.....86
Şekil 6.9: Normalize edilmiş A_C ve P_C^{eff} değerleri.....87
Şekil 6.10: Farklı a/b ve vt değerlerine göre EAC'nin aldığı değerler.....90
Şekil 6.11: vt ve a/b değişimi 90
Şekil 6.12: $m' = 4$ km ve $n' = 2$ km ve b=1 km için hareketsiz hedef simülasyonu ve sensörlerin x-ekseni boyunca hareketleri.....92
Şekil 6.13: $m' = 4$ km ve $n' = 2$ km, b=1 km ve $\kappa = (0,01),(0,02),....,\frac{m'}{2}$ için elde edilen simülasyon sonuçları. 92
Şekil 6.14: Düzgeçiş yapan hedef simülasyonu 93
Şekil 6.15: $r = 4$ km.,8 km. ve b=1 km için elde edilen simülasyon sonuçları. 94
Şekil 6.16: m,n=22 km ve b=1 km için hareketli hedef simülasyonu.....95
Şekil 6.17: m,n=22 km ve a/b=0, 1, 2 değerleri için hareketli hedef simülasyonu sonuçları 96
Şekil 6.18: m,n=22 km ve vt=9 km ve 20 km için hareketli hedef simülasyonu.....97
Şekil 6.19: Kare şeklinde hücrelere bölünmüş F ve F' sahaları 100
Şekil 6.20: Bir kaynak-iki alıcı için optimum sensör yerleşim düzeni.....102
Şekil 6.21: Bir kaynak-üç alıcı için optimum sensör yerleşim düzeni 102
Şekil 6.22: İki kaynak-iki alıcı için optimum sensör yerleşim düzeni.....103
Şekil 6.23: Çapraz değişim örneği.....105
Şekil 6.24: Mutasyon örneği-1 105
Şekil 6.25: Mutasyon örneği-2 106

Şekil 6.26: GA akış şeması 106
Şekil 6.27: MATLAB GAOT arayüzü ile tek kaynak ve dört alıcı parametre girişi 109
Şekil 6.28: Tek kaynak ve dört alıcı optimizasyonu problemi için elde edilen sonuçların MATLAB GAOT ile grafiksel gösterimi 109
Şekil 6.29: Tek kaynak içeren multistatik sistemler için GA çözümleri 110
Şekil 6.30: Birden çok kaynak içeren multistatik sistemler için GA çözümleri 111
Şekil 6.31: (*i*) $x_1 = 1,\ x_2 = 2$ için poligonal yerleşim düzeni simülasyonu (*ii*) $x_1 = 1,\ x_2 = 4$ için poligonal yerleşim düzeni simülasyonu 113
Şekil 6.32: $x_1, x_2 = 2$ adet kaynak ve alıcı için belirlenen yerleşim düzeni alternatifleri 114
Şekil 6.33: $x_1, x_2 = 3$ adet kaynak ve alıcı için belirlenen yerleşim düzeni alternatifleri 115
Şekil 6.34: $x_1, x_2 = 4$ adet kaynak ve alıcı için belirlenen yerleşim düzeni alternatifleri 116
Şekil 6.35: Cassini ovalinin kartezyen düzleminde iki farklı durum için yerleştirilmesi 117
Şekil 6.36: (*i*) *n*=3 için poligonal yerleştirme (*ii*) *n*=4 için poligonal yerleştirme 118
Şekil 6.37: $a/b \le 1$ ve $a/b > 1$ için kaynağın kartezyen koordinat düzlemi merkezinde bulunduğu durumda Cassini ovalinin *x*-eksenini kestiği noktalar 119
Şekil 6.38: Poligonal yerleştirmede *n*=2,3,…,10 için *EAC*'nin *a*/*b* oranına göre değişimi. 121
Şekil 6.39: *n*=2,3,...,50 için optimum *a*/*b* oranları 122
Şekil 6.40: *n*=100 için elde edilen saha kaplaması 122
Şekil 6.41: Cassini ovalinin kartezyen düzlemi merkezi ekseninde θ° dönüşü, $a/b \le 1$ 123
Şekil 6.42: Cassini ovalinin kartezyen düzlemi merkezi ekseninde dönüşü, $a/b > 1$ 127
Şekil 6.43: *n* adet ve *n*-1 adet alıcının poligonal yerleştirilmesi sonucu elde edilen EAC değerleri 130
Şekil 6.44: Poligonal yerleştirmede dış halkanın oluşturulması (*n*=13) 130
Şekil 6.45: Poligonal yerleştirmede dış halkanın oluşturulması (*n*=24) 131
Şekil 6.46: Cassini ovalleri ile daire paketleme 132
Şekil 6.47: $a/b \gg 1$ için *r* mesafesi 132
Şekil 6.48: (*i*) Daire paketleme için *EAC*'nin sensör sayısına göre değişimi (*ii*) Toplam sensör sayısına bağlı olarak eklenen her yeni sensörün *EAC*'ye katkısı 133

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 5.1: Bistatik sensörler arasındaki mesafenin beklenen değerini bulma probleminin iki nokta arasındaki mesafenin beklenen değerini bulma problemine haritalanması 53
Tablo 5.2: *y* çaba yoğunluğu parametresine göre *PoD*, PoD^*, *PoD* Kazanç ve Optimum Saha Oranı Değerleri 66
Tablo 5.3: Rastgele multistatik sensör sahaları simülasyonu için oluşturulan senaryo bilgileri ve teorik *EAC* değerleri 70
Tablo 6.1: Hareketli hedeflerin bistatik sensörler tarafından tespit edilmesi probleminin doğru-küme kesişim problemine haritalanması 77
Tablo 6.2: Poligonal yerleşim düzenleri için kaynak-alıcı optimum mesafelerinin KTDOP yöntemi ile ve simülasyon soucunda elde edilen değerleri 113
Tablo 6.3: $x_1, x_2 = 2$ adet kaynak ve alıcı için farklı alternatiflerin karşılaştırılması 115
Tablo 6.4: $x_1, x_2 = 3$ adet kaynak ve alıcı için farklı alternatiflerin karşılaştırılması 115
Tablo 6.5: $x_1, x_2 = 4$ adet kaynak ve alıcı için farklı alternatiflerin karşılaştırılması 116

BİSTATİK VE MULTİSTATİK SUALTI SENSÖR AĞLARININ OPTİMİZASYONU

Mümtaz KARATAŞ

Anahtar Kelimeler: Bistatik Sistemler, Multistatik Sistemler, Tespit Olasılığı, Sensör Yerleşim Optimizasyonu, Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama, Genetik Algoritma.

Özet: Sualtı Akustik Tespit Sistemleri (SATS) kaynak ve alıcılardan oluşmaktadır. Yeni nesil SATS'nde kaynak ve alıcılar birbirlerinden ayrı ve bağımsız olarak aynı sensör ağı ve ortam içerisinde kullanılabilmekte, bu sayede sualtı gözetleme ve keşif işlemleri daha etkin yapılabilmektedir. Tek kaynak ve alıcı içeren sistemler bistatik, birden çok kaynak ve/veya alıcı içerenler ise multistatik sistemler olarak isimlendirilmekte olup söz konusu sistemlerin etkinliği sensörlerin yerleşim planı ve aralarındaki mesafeler ile doğrudan ilişkilidir.

Bu çalışmada, saha araması amacıyla kullanılan bistatik ve multistatik sualtı akustik sensörlerinin etkinliğinin analitik yöntemlerle tahmin edilebilmesi ve planlayıcılara referans oluşturması için çeşitli teorik formüller literatüre kazandırılmış, farklı tipteki hedeflerin tespit olasılıklarının en büyüklenmesine yönelik optimum sensör yerleşim planları oluşturulmuştur. Bistatik sistemler için yapılan çalışmada integral geometrisi ve geometri olasılığı teorilerinden faydalanılmış; multistatik sistemler için yapılan çalışmada Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama (KTDOP) ve Genetik Algoritma (GA) teknikleri kullanılmıştır. Elde edilen tüm teorik sonuçlar Monte Carlo simülasyonları ile test edilmiş ve doğrulanmıştır.

Geliştirilen formüller kullanılarak, sahaya tekbiçimli dağılımla rastgele yerleştirilen bistatik ve multistatik sistemlerin hedef tespit olasılığı değerleri, sensör sayısı, tespit mesafesi ve saha büyüklüğü parametreleri yardımıyla tahmin edilmekte, ayrıca kullanılan sensör sayısına bağlı olarak optimum saha büyüklüğü belirlenmektedir. Geliştirilen optimum sensör yerleşim planları ile sahada elde edilebilecek hedef tespit olasılığı ve saha kaplaması değerleri en büyüklenmektedir.

OPTIMIZATION OF BISTATIC AND MULTISTATIC UNDERWATER SENSOR NETWORKS

Mümtaz KARATAŞ

Keywords: Bistatic Systems, Multistatic Systems, Probability of Detection, Sensor Location Optimization, Mixed Integer Non Linear Programming, Genetic Algorithm.

Abstract: Underwater acoustic detection systems are composed of sources and receivers. In new generation underwater acoustic detection systems, sources and receivers can be used separately and independently of each other in the same sensor network and area providing more effective surveillance and reconnaissance. Bistatic systems contain one source and receiver and systems containing more than one source and/or receiver are called as multistatic systems. The effectiveness of such systems is directly related with the configuration of the system and the distance between sensors.

In this study, we developed theoretical formulas for analytically predicting the effectiveness of bistatic and multistatic systems used for area search and to provide a benchmark for planners. We also generated optimal sensor configurations to maximize the detection probability for different target models. For optimizing bistatic systems we used integral geometry and geometrical probability theories and Mixed Integer Non-Linear Programming and Genetic Algorithm methods for optimizing multistatic systems. All theoretical results are confirmed through Monte Carlo simulations.

Using the formulas one can compute the target detection probability for bistatic and multistatic systems that are uniformly and randomly deployed in the area with parameters such as the number of sources and receivers, detection range and area. The optimal area size with respect to the number of sensors can be determined as well. Also using the optimal sensor configurations developed in this study it is possible to maximize the probability of detection and area coverage.

1. GİRİŞ

Denizlerin dünya yüzeyinin yüzde yetmişini kaplaması, dünya nüfusunun üçte ikisinden fazlasının deniz kıyılarında yaşaması, yüz elliden fazla kıyı devletinin bulunması, uluslararası ticaretin yüzde doksanın deniz yoluyla yapılması ve dünyada ortaya çıkan yeni siyasi ve ekonomik gelişmeler, devletleri deniz gücüne ve deniz güvenliğine her geçen gün daha da fazla önem vermek durumunda bırakmaktadır. Özellikle denize kıyısı olan devletler için deniz gücü genellikle savunma politikasının bir gerekliliği olmakla birlikte, günümüz küreselleşme dünyasında ekonomisi ticaret ile beslenmeyen ülke olmadığından ve yüzyıllardır olduğu gibi bugün de ticaretin ana ulaşım ağı deniz yolları olduğundan, bu yolların güvenliği tüm devletler için önem taşımaktadır. Deniz sahalarının güvenliğini sağlamakla görevli deniz kuvvetleri sadece barışta ve savaşta kullanılan kuvvet olarak değil, uluslararası deniz ticareti, enerji hatları ve okyanus kaynakları da göz önüne alınarak daha geniş bir kapsam dahilinde düşünülmelidir.

21. yüzyılın getirdiği yeni kavramsal gelişmeler, deniz güvenliği kavramının sorgulaması, yenilemesi ve geliştirmesi gerektiği gerçeğini de beraberinde getirmektedir. Her geçen gün bu alandaki teknoloji ilerlemekte, kullanılan cihaz ve sensörler daha etkin hale gelmekte, hem deniz güvenliğini tehdit eden hem de güvenliği sağlamakla görevli unsurlar arasındaki teknoloji yarışı hız kazanmaktadır. Bu da beraberinde deniz sahalarının güvenliğinin sağlanmasında büyük rol oynayan yeni nesil sensörlerin ve sensör ağlarının kullanım yöntem ve taktiklerinin bilimsel yöntemlerle belirlenmesi ve sensör yerleşim düzenlerinin analitik yöntemlerle oluşturulması ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada, deniz sahalarının korunması, gözetlenmesi ve deniz ulaşım yollarının güvenliğinin sağlanması maksatlarıyla kullanılan en etkin sensörler olan Sualtı Akustik Tespit Sistemleri (SATS)'nin analitik olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

Literatürde SATS optimum yerleşim düzenlerinin oluşturulması konusuna yönelik bugüne kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde, monostatik sistemlerin optimizasyonu konusunda çok sayıda çalışmanın yapıldığı görülmektedir. Bununla birlikte, bistatik ve multistatik sensör yerleşim düzenlerinin optimizasyonu ve bu sistemlerin etkinliklerinin analitik yöntemlerle ölçülmesi ve tahmin edilmesi konularında çok kısıtlı ve yetersiz seviyede teorik çalışma bulunmaktadır. Literatürdeki bu eksiklikten ve ihtiyaçtan yola çıkarak bu çalışmada, geniş deniz sahalarının aranması veya gözetlenmesi amacıyla kullanılan bistatik ve multistatik SATS'nin sualtı hedeflerini tespit olasılıklarının analitik yöntemlerle teorik olarak hesaplanması ve optimum sensör yerleşim düzenlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmadan elde edilecek teorik sonuçların ve optimum sensör yerleşim düzenlerinin, saha arama ve geniş deniz sahalarının gözetlenmesi gibi uygulamalara esas teşkil etmesi, böylelikle SATS'nin daha etkin olarak kullanılması, hedef tespit başarısının artırılması hedeflenmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde bistatik ve multistatik sistem tanımları, avantaj ve dezavantajları, kullanım yöntemleri, planlama şekli, çalışmanın hedefleri ve önerilen saha araması adımları açıklanmıştır. Üçüncü bölümde, yapılan araştırmaya temel oluşturacak genel bilgiler sunulmuş, bu kapsamda literatür taraması, genel tanımlar ve sualtı akustiği hakkında özet bilgi bu bölümde yer almıştır. Dördüncü bölümde bistatik ve multistatik sistemlerin tespit kriterleri ve tespit bölgelerinin geometrik özellikleri incelenmiştir. Beşinci bölüm kapsamında rastgele oluşturulmuş bistatik ve multistatik sensör sahaları incelenmiş, sensör sayısı ve saha büyüklüğüne bağlı olarak tespit olasılıkları analitik yöntemlerle hesaplanmıştır. Altıncı bölümde ise bistatik ve multistatik sistemlerin optimum yerleşim düzenleri ele alınmış, farklı hedef modelleri için optimum bistatik sensör ayrım mesafeleri ile en yüksek kaplamayı sağlayacak multistatik sensör yerleşim düzenleri oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında elde edilen teorik sonuçların doğruluğu MATLAB® programı ile Monte Carlo simülasyonları yapılarak test edilmiştir. Son bölümde çalışmanın sonuçları özetlenerek değerlendirilmiş, yorumlanmış ve geleceğe yönelik önerilerde bulunulmuştur.

2. SUALTI AKUSTİK TESPİT SİSTEMLERİ

2.1. Tanım

SATS genel olarak bir deniz sahasının veya önemli bir liman girişinin gözetlenmesi, yüksek değere sahip bir yüzer platformun (akaryakıt gemisi, uçak gemisi, petrol platformu, vb.) sualtından gelebilecek tehditlere karşı korunması ya da deniz tabanında mayın, batık, vb. nesnelerin aranması amaçlarıyla kullanılmaktadır. SATS tarafından tespit edilen sualtı hedef ve cisimlerine ait veriler, karadaki ya da denizdeki merkez istasyonlara ulaştırılır ve bu istasyonlarda işlenerek kullanıcıya sunulur. Son olarak, elde edilen hedef bilgisi ve bu bilginin güvenilirlik derecesine göre ne tür önlemler alınması gerektiğine karar verilir [1].

Deniz sahalarının güvenliğinin sağlanmasında oldukça önemli bir rol oynayan SATS, temel olarak kaynak (aktif sensörler) ve alıcılardan (pasif sensörler) oluşmaktadır. Sistemin temel çalışma prensibi, kaynaktan yayımlanan akustik enerjinin hedeften yansımasını takiben alıcı tarafından algılanması, bunun sonucunda hedefin tespit edilmesi, bulunduğu yerin belirlenmesi ve izlenmesidir. Burada sözü geçen kaynak, sonarı olan bir gemi, daldırılabilir sonarı olan bir helikopter, aktif sonoboy (denizaltıları tespit etmek ya da sualtı araştırması yapmak maksadıyla uçak veya gemiler tarafından denize atılan seyyar sonar), uçaklar tarafından atılan patlayıcı şarjlar; alıcı ise pasif sonar, pasif sonoboy veya bir hidrofon (sualtı mikrofonu) sistemi olabilir.

Akustik haberleşme, uzun mesafeli sualtı haberleşmesinde kullanılan en etkin yöntem olduğundan, bu tür faaliyetlerin gerçekleştirilmesinde akustik sensörler her zaman esas alınmıştır [1]. Manyetik sensörlerle yapılan saha gözetleme ya da arama faaliyetlerinde, aranan hedefin tespit edilebilmesi için arama sensörü ile aynı derinlikte olması gerekirken, aynı hedefin akustik sensörler ile tespit edilebilmesinde böyle bir gereklilik bulunmamakta, tespit işlemi hedefin suya yaydığı gürültü nedeniyle daha kolay

yapılmaktadır. Bu nedenle sualtı keşif ve gözetleme faaliyetlerinde akustik sensörler, manyetik sensörlere göre daha kullanışlı ve etkilidir [2]. Akustik haberleşmede hem algılama hem iletişim sualtı ortamında yapıldığından, her iki işlem de sualtı ortam koşullarını belirleyen çok sayıdaki akustik parametreden etkilenmektedir. Akustik enerjinin yayılım şekli, ortamdaki gürültü, hedefin yaydığı gürültü, derinlik, tuzluluk, sıcaklık, deniz dibi yapısı, rüzgar hızı, vb. parametreler sualtındaki enerji yayılımını, dolayısıyla sensörlerin tespit mesafesini ve gözetlenebilen sahanın genişliğini etkilemektedir. Bu nedenle akustik sensörlerin tespit mesafeleri, ortam koşullarını yukarıda belirtilen parametreleri dikkate alarak modelleyen gelişmiş akustik simülasyonlar ve yazılımlar kullanılarak belirlenmelidir.

2.2. Alıcı ve Kaynakların Kullanımı

SATS'nin en önemli elemanlarından birisi olan alıcılar, çalıştıkları süre boyunca sadece akustik dinleme yapar ve sualtından aldıkları enerjiyi analiz ederler. Aynı ortamda bulunan hedeften yayılan gürültünün alıcıya ulaşması ve ortam gürültüsünden daha şiddetli bir etki yaratması durumunda ise hedefin tespitini sağlarlar [2-4]. Dolayısı ile sadece alıcılar kullanılarak yapılan saha aramasında, tespitin sağlanmasına etki eden en önemli parametre hedefin suya yaydığı gürültü şiddetidir. Ancak, günümüzde sualtında kullanılan platformların suya en az seviyede gürültü yayacak şekilde yalıtılmasına ve sessizleştirilmesine olanak veren teknolojinin gelişmesi ve denizlerdeki ticari trafiğin, dolayısıyla ortam gürültüsünün artması sonucunda pasif sensörlerin etkinliği oldukça azalmıştır [5-8]. Ortam gürültüsünün yüksek olduğu durumlarda sessiz hedeflerin sadece pasif yöntemlerle tespit edilmesi oldukça güç hale gelmiştir [9].

Kaynaklar, bulundukları ortama ses enerjisi gönderir ve hedeften yansıyan enerjiyi varsa bünyelerindeki alıcılar ile algılayarak daha uzak mesafelerden hedef tespiti sağlarlar. Bu özellikleri nedeniyle saha aramasında veya gözetleme faaliyetlerinde alıcılara göre daha etkin olmalarına karşın, suya yüksek güçte ses enerjisi yaydıkları için hedefe kendi konumlarını belli ederler. Bunun sonucunda sualtı hedefleri tespit edilebilecekleri mesafeye gelmeden çok önce, sahadaki kaynakların konumlarını dikkate alarak

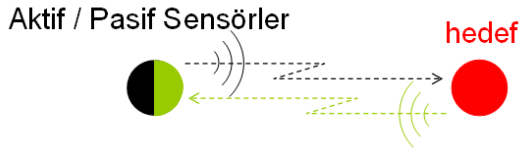
uzaklaşırlar veya tespit edilmemek için çeşitli tedbirler alırlar (ör: derinlik değiştirme, yön ve hız değiştirme, gürültü azaltma, gizlenme, vs.). Kaynakların diğer bir özelliği ise suya belirli bir şiddetin üstünde ses enerjisi yayımlayan düzeneğe ve teknolojiye sahip olmalarından dolayı alıcılara göre daha pahalı olmalarıdır. Bir kaynağın maliyeti bir alıcının maliyetinden altı veya yedi kat fazla olabilir. Özetle, daha uzak mesafeden tespit sağlayabilmelerine rağmen kendi konumlarını belli etmeleri ve yüksek maliyete sahip olmalarından dolayı kaynaklar her zaman saha aramasında ve gözetlemesinde etkin olarak kullanılamaz [10].

Alıcı ve kaynakların tek başlarına kullanılması durumlarında oluşan bu tür önemli dezavantajların ortadan kaldırılabilmesi amacıyla Coon tarafından saha arama ve gözetleme faaliyetlerinde kaynak ve alıcıların bir arada kullanılması, güçlü bir kaynak ve çok sayıda düşük maliyetli alıcı ile daha etkin ve düşük maliyetli saha araması yapılması fikri ortaya atılmıştır [11]. Bu yeni yöntemde, kaynak ve alıcılar arama yapılacak sahada farklı konumlarda bulunmakta, hedef tespiti, kaynak tarafından yayımlanan akustik enerjinin hedeften yansımasını takiben farklı konumlarda bulunan alıcılar tarafından yapılmaktadır. Böylece alıcılar ile uzak mesafeden hedef tespiti sağlanmakta, hedef kaynak konumunu tespit etse dahi, alıcı konumlarını bilmediğinden kolaylıkla kaçamamaktadır.

2.3. Sualtı Akustik Tespit Sistemleri Tipleri

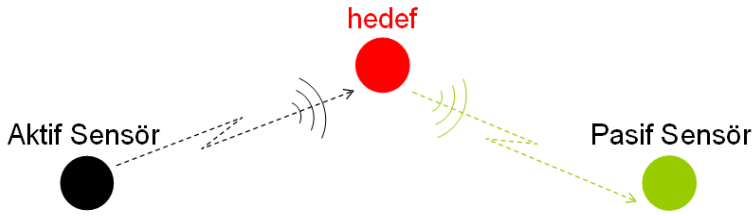
Kaynak ve alıcıların bir arada kullanılması yaklaşımı kapsamında oluşturulan akustik sistemler, kullanılan sensörlerin tipine, sayısına ve kullanılış şekillerine göre farklı isimler almaktadır [12,13]. Bu sistemleri aşağıdaki gibi gruplamak mümkündür.

a. Monostatik Sistemler: Günümüzde hala en yaygın olan geleneksel aktif sonar kullanım yöntemidir. Kaynak ve alıcı aynı ünite veya cihazda bulunmaktadır. (Bkz. Şekil 2.1)



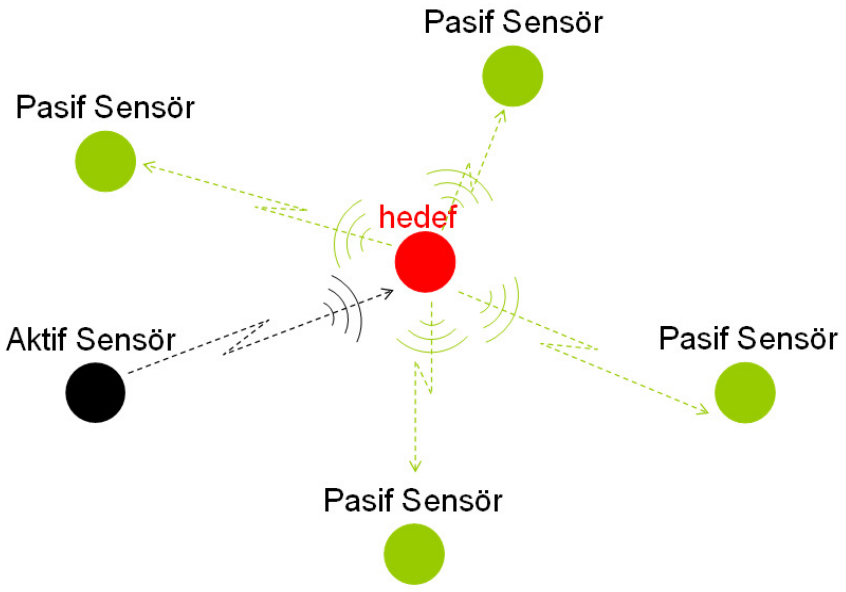
Şekil 2.1: Monostatik Sistem

b. Bistatik Sistemler: Birbirlerinden ayrı ve bağımsız tek kaynak ve tek alıcının bulunduğu sistemlerdir. (Bkz. Şekil 2.2)



Şekil 2.2: Bistatik Sistem

c. Multistatik Sistemler: Birbirlerinden ayrı ve bağımsız birden fazla alıcı ve kaynağın bulunduğu sistemler olup bistatik sistemlerin geliştirilmiş hali olarak düşünülebilir. (Bkz. Şekil 2.3) Sensörlerin tespit mesafesi, birbirlerine göre konumları ve aralarındaki mesafe sistemin etkinliğini önemli ölçüde etkilemektedir.



Şekil 2.3: Multistatik Sistem

2.4. Multistatik Sistemlerin Avantaj ve Dezavantajları

Multistatik sistemlerin monostatik sistemlere göre bazı önemli avantaj ve dezavantajları vardır. En önemli avantajları şu şekilde özetlenebilir [14-16]:

a. Alıcılar kaynaklara göre daha az maliyetidir. Az sayıda kaynak ve çok sayıda düşük maliyetli alıcının kullanıldığı sistemlerin toplam maliyeti, aynı etkinliği ve saha kaplamasını sağlayacak monostatik sensörlerden oluşan sistemlere göre daha azdır.

b. Kaynak ve alıcı rolünde farklı sensör ve platformlar kullanılabileceğinden, multistatik sistemler daha esnek bir yapıya sahiptir. Gemi sonarları, araştırma gemileri tarafından kullanılan sonar dizinleri veya helikopterlerin daldırılabilir sonarları kaynak olurken pasif sonoboylar veya insansız sualtı araçları alıcı rolünde kullanılabilir.

c. Kaynak konumları tehdit platform tarafından tespit edilebilirken alıcılar pasif olduklarından yerlerini belli etmezler. Multistatik bir sistemde kaynak ve alıcılar farklı konumlarda bulunduklarından alıcı konumlarının gizli kalması arama ekibine avantaj sağlar ve hedefin tespit edilmekten kaçınması daha güç hale gelir.

ç. Multistatik sistemlerde hedef tespiti aynı anda birden fazla alıcı tarafından yapılabildiğinden, elde edilen hedef bilgisinin hatalı olma olasılığı azalır ve daha güvenilir bilgi sağlanır.

d. Deniz dibinde gömülü bulunan mayın, batık, vb. cisimlerin tespiti bistatik ve multistatik sistemler ile daha kolaydır. Hata olasılığı düşük olduğundan, arama çabası, hedeflerin tespiti ve izlenmesine daha fazla süreyle yoğunlaştırılabilir.

Multistatik sistemlerin başlıca dezavantajlar ise şunlardır:

a. Hedef bilgisi aynı anda birden çok alıcı tarafından sağlandığından, multistatik sistemlerde daha karmaşık hedef izleme algoritmalarının kullanılması zorunludur.

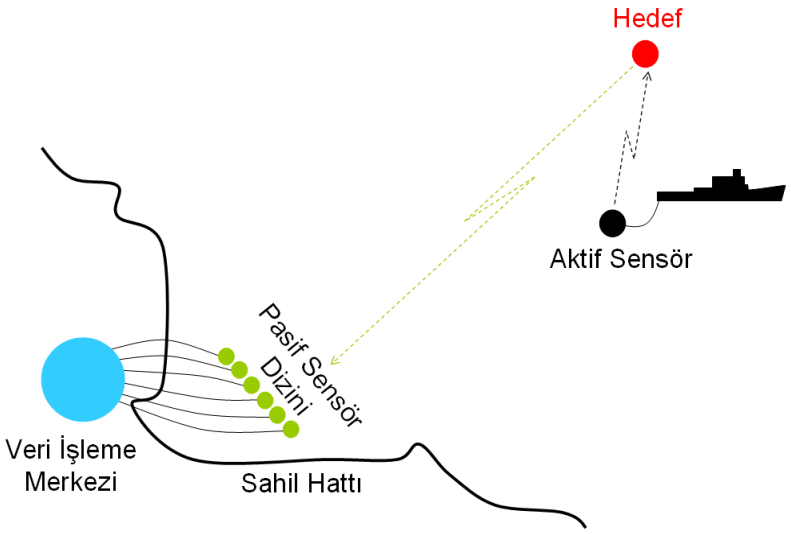
b. Multistatik sistemlerin etkin olarak kullanılabilmesi için sahadaki tüm sensör konumlarının hassas olarak bilinmesi ve sensörlerle sürekli iletişim halinde olunması gereklidir.

c. Sistemin planlanması, kullanılması ve etkinliğinin ölçülmesi daha zordur.

2.5. Multistatik Sistemlerin Kullanım Yöntemleri

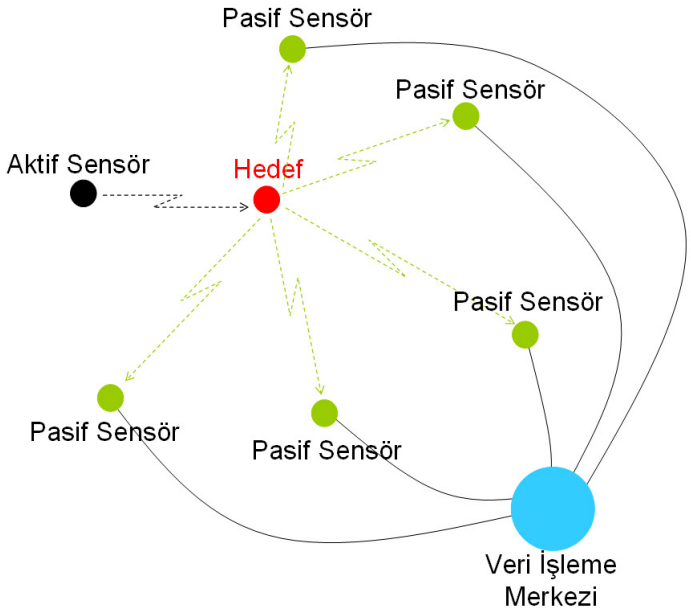
Multistatik sistemler temel olarak aşağıda belirtilen amaçlara yönelik olarak kullanılmaktadır [13].

a. Uzun Mesafeli Gözetleme: Kıyı şeridi veya önemli sahillerin gözetlenmesi ve sualtından gelebilecek hedeflerin tespit edilebilmesi amacıyla kıyı şeridine yerleştirilen hidrofon dizini ve sahilden uzakta bulunan kaynak ile oluşturulan multistatik uzun mesafeli sahil gözetleme sistemleridir. (Bkz. Şekil 2.4)



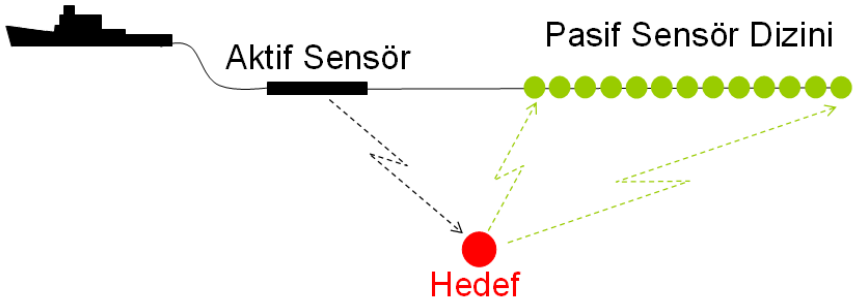
Şekil 2.4: Multistatik sistem ile uzun mesafeli gözetleme.

b. Geniş Sahaların Gözetlenmesi ve Aranması: Sahaya çok sayıda alıcı ile yüksek güçlü bir veya daha fazla kaynağın yerleştirilmesi ile oluşturulur. (Bkz. Şekil 2.5) Kullanılan sensör sayısı arttıkça gözetlenebilen saha büyüklüğü, yani saha kaplaması da artacaktır.



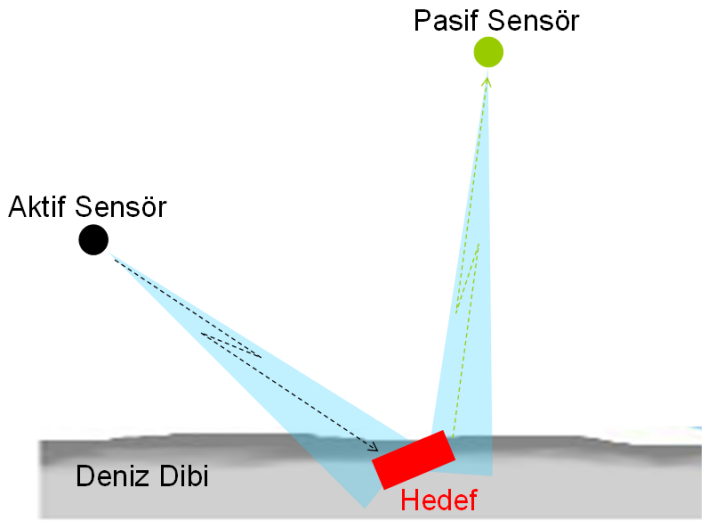
Şekil 2.5: Multistatik sistem ile geniş sahaların gözetlenmesi ve aranması.

c. Yedeklenebilir Alçak Frekanslı Sonarlar: Suüstü gemileri tarafından yedeklenen alçak frekanslı aktif sonar ve bu frekansta dinleme özelliği olan pasif sonar dizini ile oluşturulan dizinler bu sistemlere örnektir. (Bkz. Şekil 2.6)



Şekil 2.6: Yedeklenebilir alçak frekanslı sonar

ç. Gömülü Hedeflerin Tespiti: Mayın, batık gibi kısmen veya tamamen gömülü hedeflerin tespiti için ses dalgalarının deniz tabanından içeriye doğru belli bir miktar girebilmeleri gerekmektedir. (Bkz. Şekil 2.7) Bu da güçlü bir kaynak ve dipten farklı yönlere yansıyan enerjinin algılanabilmesi için farklı noktalarda bulunan alıcılar yardımı ile daha etkin şekilde gerçekleşir.



Şekil 2.7: Bistatik sistemlerin gömülü hedeflerin tespitinde kullanımı

2.6. Multistatik Sistemlerin Planlanması

Sualtı sensörlerinde bulunan hidrofon, akustik enerjiyi yayan ve algılayan akustik modem, işlemci, batarya, bunları koruyan ve korozyonu önleyen su geçirmez özel tüp ile temas bilgilerini veri işleme merkezlerine yayan anten gibi yüksek teknoloji kullanımını gerektiren ana parçalar sensör maliyetinin artmasına neden olur. Bunun yanında sensörlerin gözetlenecek sahaya yerleştirilmesi için harcanan çaba ek bir maliyet oluşturur [17]. Bu nedenle, sensör kullanım planlamasını yapmakla sorumlu kişiler için sensör adedi, maliyet, ulaşılmak istenen hedef tespit olasılığı veya saha kaplama oranı gibi kısıtlar altında çözülmesi gereken bir optimizasyon problemi mevcuttur [18]. Bu tür problemler için çözüm yöntemleri araştırılırken sonuca doğrudan etki edebilecek sensör tespit mesafesi, arama sahası boyutu, aranan hedefin hareket tarzı gibi hususların göz önünde bulundurulması gerekir.

Bu kapsamda bu çalışmanın amacına ulaşabilmesi için belirlenen başlıca hedefler şunlardır:

Hedef-1: Rastgele yerleştirilmiş bistatik ve multistatik sensörlerin hedef tespit olasılıklarının hesaplanması.

Hedef-2: Rastgele yerleştirilecek multistatik sensör sahaları için arama yapılacak optimum saha büyüklüğünün belirlenmesi.

Hedef-3: Hareketli ve hareketsiz hedeflerin tespiti için optimum bistatik sensör ayrım mesafelerinin belirlenmesi.

Hedef-4: Sahada en büyük kaplamayı sağlayacak multistatik sensör yerleşim düzenlerinin oluşturulması.

İlk iki hedef, sensörlerin sahaya planlayıcı tarafından önceden belirlenmiş herhangi bir düzene bağlı kalmadan, tekbiçimli dağılımla ve rastgele şekilde yerleştirildiği durumlarda elde edilebilecek kaplamanın ve bu kaplamanın en büyütülmesi için sensörlerin yerleştirilmesi gereken en uygun saha büyüklüğünün tespitidir. Böylelikle arama teorisinde monostatik sistemler için büyük öneme sahip rastgele saha arama yönteminin bistatik ve multistatik sensör sahalarındaki uygulaması ve etkinliği incelenecektir. Üçüncü hedef, bistatik sistemde kaynak ve alıcı arasındaki mesafenin, hareketli ve hareketsiz hedefleri tespit olasılığına etkisinin analiz edilmesi ve optimum sensör ayrım mesafesinin belirlenmesidir. Bu kapsamda sahada hareketsiz halde bulunan bir cismin veya hareket eden bir hedefin en yüksek olasılıkla tespit edilebilmesi için kaynak ve alıcının birbirlerinden ne kadar uzakta konumlandırılması gerektiği, bu mesafenin değişimi ile hedef tespit olasılığının ne şekilde etkileneceği bistatik sistemin tespit menzili parametresi göz önüne alınarak araştırılacaktır. Dördüncü ve son hedef ise multistatik sistemler ile elde edilebilecek en büyük saha kaplaması için kullanılması gereken sensör yerleşim düzeninin belirlenmesidir. Bu kapsamda farklı sayıda kaynak ve alıcı alternatifi için en iyi sensör yerleşim düzenleri araştırılacak, sensör sayılarının değişimine göre planlamanın nasıl değiştirilmesi gerektiği incelenecektir.

Herhangi bir saha arama faaliyetinin fiilen uygulanmasından önce, planlayıcı tarafından bir ön hazırlığın yapılması ve faaliyetlerin belirli bir iş akışına bağlı olarak yürütülmesi başarıyı artıracaktır. Bu kapsamda izlenmesi önerilen adımlar aşağıda özetlenmiştir.

Adım-1: Kaplama tipinin belirlenmesi.

Adım-2: Oşinografik şartların analiz edilmesi ve değerlendirilmesi.

Adım-3: Hedefin muhtemel hareket tarzının belirlenmesi (sahadan düzgeçiş yapma, yüksek hızla hareket etme, hareketsiz halde bulunma, vb.).

Adım-4: Kullanılacak sensör tip ve adetlerinin belirlenmesi.

Adım-5: Sensör yerleşim düzeninin planlanması.

Adım-6: Sensörlerin fiziksel olarak sahaya yerleştirilmesi ve sahanın aranması.

Literatürde Adım-1 kapsamında değerlendirmeye alınabilecek üç tip kaplama tanımı mevcuttur. Bunlar sırasıyla bariyer oluşturmaya yönelik kaplama, nokta savunması amaçlı kaplama ve genel saha kaplamasıdır [19]. Bariyer oluşturma, hedefin belirli bir hattı geçmesini engellemek için mevcut sensörlerin hedefin geliş yönünde yerleştirilmesidir. Nokta savunması, sensörlerin, korunması ya da izole edilmesi istenen hassas noktaların etrafında ya da yakınında belirli bir düzende kullanılmasıdır. Sensörler bu yöntemde korunacak noktaların etrafında yoğunlaştırılır ve saha genelinde kaplanmayan bölgeler oluşur [19]. Genel saha kaplamasında ise arama yapılacak sahanın mevcut sensörlerle tamamen ya da tamamına yakın bir şekilde kaplanması amaçlanır. Hedefin ulaşmak istediği özel bir nokta ya da sızmak istediği bir hat olmadığından, saha içerisinde herhangi bir konumda bulunabileceği varsayılır. Bu nedenle planlayıcının elindeki kısıtlı sayıdaki sensörü, sahada en büyük kaplamayı veya en yüksek hedef tespit olasılığını sağlayacak şekilde kullanması gerekir. Çözülmesi gereken bu problem genel saha kaplaması problemini diğer iki probleme göre daha zor hale getirir. Bu çalışmada planlayıcının, elindeki sensörler yardımıyla büyük bir deniz sahasında bulunan bir hedefin tespit olasılığını genel saha kaplaması sağlayarak en büyütmeye çalıştığı, bariyer ya da nokta savunması uygulamadığı varsayılmıştır.

Kaplama tipinin belirlenmesinin ardından Adım-2'de, saha araması yapılacak bölgedeki oşinografik şartlar analiz edilmeli ve bu şartlarda hedefin mesafeye bağlı olarak tespit edilme olasılığı belirlenmelidir. Tespit mesafesi saha kaplamasını ve hedef tespit olasılığını doğrudan etkileyecek bir parametre olup oşinografik şartların arama ekibinin lehine olduğu durumlarda hedefin çok uzun mesafelerden tespit edilme ihtimali

artmaktadır. Tespit mesafesine etki eden parametreler ve bu mesafenin tespiti hakkında özet bilgi ikinci bölümde verilmiştir.

Adım-3'te hedef platformun tipi ve hareket şekli belirlenmeli ve sensör planlamasında dikkate alınmalıdır. Söz konusu platformlar sahada düşük hızla hareket eden ya da yüksek hızla düzgeçiş yapan bir denizaltı, sualtından bilgi toplama amacıyla kullanılan hareketli ya da hareketsiz insansız sualtı araçları, dalgıçlar, sabit bir konumda bulunan mayın, batık, vb. cisimler olabilir.

Adım-4'te saha büyüklüğü, sensör maliyeti ve istenen hedef tespit olasılığı gibi faktörler göz önüne alınarak saha aramasında kullanılacak sensör tip ve adetleri belirlenmelidir. Kaynakların alıcılara göre daha pahalı olduğu düşünüldüğünde, az sayıda kaynak ve çok sayıda alıcı ile düşük maliyetli yüksek kaplama oranı elde edilebilecektir [11]. Bu adımda belirlenen sensör tip ve adetleri, Adım-5'te oluşturulan sensör yerleşim düzeni sonucu hesaplanan tespit olasılığının istenenden düşük ya da fazla çıkması durumunda güncellenebilir.

Kaplama tipinin, tespit mesafesinin, hedef tipi ile sensör tip ve adetlerinin belirlenmesinden sonra Adım-5'te hedef tespit olasılığını en büyütmeye yönelik sensör yerleşim planlaması yapılmalıdır.

Son adımda ise sensörler planlanan konumlara fiziksel olarak yerleştirilmeli ve saha araması yapılmalıdır. Sensör yerleşim işlemi geniş deniz sahalarında genellikle uçaklar ya da gemiler yardımı ile yapılmaktadır.

3. SUALTI AKUSTİK MODELLERİ

3.1. Literatürde Yapılan Çalışmaların Özeti

Monostatik SATS için hedef tespit olasılığını en büyütmeye yönelik sensör yerleşim düzenlerini sensör tespit mesafesini dikkate alarak belirleyen başlıca çalışmalar [17-45]'te bulunmaktadır. Söz konusu çalışmalarda probleme genel olarak geometrik yöntemlerle veya evrimsel metodlarla çözüm aranmış, saha kaplamasının en büyüklenmesi yanında, en az sayıda sensör kullanımı, nokta savunması sağlanması, tespit zamanının ve toplam maliyetin en küçüklenmesi, sensör ağı ömrünün en büyüklenmesi gibi amaçlar için de analitik çözümler elde edilmiştir. Bu çalışmalar içerisinden öne çıkan bazıları aşağıda açıklanmıştır.

Pompili, Melodia ve Akyildiz'ın çalışmasında, arama yapılan sahanın, sensör algılama bölgeleri birbirleri ile en az seviyede çakışacak şekilde tamamen veya belirli bir oranda kaplanabilmesi için ihtiyaç duyulan sensör adedinin belirlenmesi hedeflenmiş, bu kapsamda problem iki boyutlu uzayda geometrik olarak ele alınmış ve ihtiyaç duyulan sensör sayısını hesaplayan bir algoritma geliştirilmiştir [17].

Jourdan ve Weck çalışmasında, Çok Amaçlı Genetik Algoritma (Multi Objective Genetic Algorithm - MOGA) yöntemi ile sınırlı sayıda sensörü kullanarak saha kaplamasını ve sensör ağı ömrünü en büyütmeyi amaçlamıştır. Saha kaplamasının en büyütülmesi için sensörlerin birbirlerinden ayrı ve uzak noktalara yerleştirilmesi gerekirken diğer yandan iletişim kurmaları için harcanan enerji, mesafe bağlı olarak artmakta ve sistem ömrü azalmaktadır. Bu doğrusal olmayan çok amaçlı optimizasyon probleminin MOGA yöntemi ile rahatlıkla çözülebileceği gösterilmiştir [22].

Lin ve Chiu'nun çalışmasında, grid yapısına sahip bir sahanın monostatik sensörler kullanılarak kaplanması problemi incelenmiş, tüm sahanın en az sayıda sensör ile

kaplanabilmesi için "güç vektörü" kavramı ortaya atılmış, bu kapsamda griddeki her hücre için bir "güç vektörü" oluşturulmuş, kaplanan hücreler için vektöre 1 değeri, kaplanmayanlar için ise 0 değeri atanmış, bu model yardımıyla problem Tavlama Yöntemi (Simulated Annealing) kullanılarak çözülmüştür [29].

Chakrabarty ve Iyengar'ın yaptıkları çalışmada, farklı maliyetlere sahip monostatik sistemler ile nokta savunması amaçlı kaplama sağlanması problemi ele alınmış, en düşük maliyetle en yüksek kaplamanın sağlanması için Tamsayılı Doğrusal Programlama yöntemi kullanılmış, sensör sayısının artmasıyla birlikte söz konusu yöntemin yetersiz kalması üzerine, geliştirilen böl ve fethet (divide and conquer) yöntemi ile çözüm tekniği açıklanmıştır [32].

Dhillon ve Chakrabarty'nin çalışmasında, sınırlı sayıda monostatik sensör ile aynı anda birden çok önemli noktanın savunulması amaçlı kaplama problemi incelenmiş, savunulacak noktaların önem seviyelerinin farklı olması durumunda sensör yerleşiminin her nokta için en az istenen düzeyde kaplama sağlanacak şekilde yapılabilmesi için geliştirilen algoritma açıklanmıştır [38].

Barrett'in yaptığı çalışmada, Hudson Nehri'ne yerleştirilen monostatik sensörlerin hedef tespit olasılığını en büyütürken hedefi tespit zamanını da en küçültmesi amaçlanmış, problem Genetik Algoritma yöntemi kullanılarak çözülmüştür [43].

Yukarıda açıklanan problemler ve geliştirilen çözüm teknikleri monostatik sensörler için geçerli olup bu çalışmalarda kaynak ve alıcıların birbirlerinden bağımsız olarak kullanıldıkları durumlar ele alınmamıştır. Bistatik ve multistatik sistemlere ilişkin yapılan teorik çalışmalar daha çok 2000 yılından sonra başlamıştır. Bu çalışmalar ise ağırlıklı olarak multistatik sistemlerin çizelgeleme optimizasyonu ve hedef takip algoritmalarının geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Söz konusu çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

DelBalzo, Kierstead ve Stangl'ın yaptıkları çalışmada monostatik ve bistatik sonoboyların heterojen ortam koşullarına sahip kıyı sularında çizelgeleme ve yerleşim optimizasyonu maksadıyla geliştirilen Genetik Algoritma tabanlı SCOUT (Sensor Coordination for Optimal Utilization and Tactics) programı tanıtılmış, SCOUT programı ile oluşturulan sonoboy sahalarının homojen olmayan ortam koşullarında düzgün geometrik yerleşim düzenine göre daha iyi sonuçlar verdiği, programın geliştirme faaliyetlerine devam edildiği ifade edilmiştir [46].

Walsh ve Wettergren'ın çalışmasında, sahaya tekbiçimli dağılımla yerleştirilmiş bir multistatik sistem ile yapılan arama etkinliğine ilişkin üst sınır teorik olarak yakınsanmış, öncelikle sadece alıcılardan oluşan SATS'nin performans tahmini yapılmış, daha sonra aynı tahmin yöntemi multistatik sistemlere de uygulanmış ve elde edilen sonuçlar Monte Carlo simülasyonları ile test edilmiştir [47].

Tharmarasa, Kirubarajan ve Lang'ın yaptıkları çalışmada, konumları bilinen alıcıların olduğu bir sahada hareket halinde olan kaynakların rota ve çizelgeleme optimizasyonu, performans ölçütü alt sınırı Posterior Cramer-Rao Lower Bound (PCRLB) tekniği ile belirlenen Genetik Algoritma yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Çalışma sonucunda kaynakların sahada birbirleri ile koordineli şekilde kullanılmalarını sağlayan rotalar ve çizelgeleme tespit edilmiştir [48].

Wang, Lim ve Terzis tarafından yapılan çalışmada, homojen ortam koşulları ve doğrusal akustik propogasyonun olduğu bir ortamda multistatik sensörlerin çizelgeleme problemi saha kaplaması da göz önüne alınarak incelenmiş, geliştirilen çizelgeleme algoritması simülasyonlar ile test edilmiştir [49].

Saksena ve Wang'ın çalışmasında, kıyı sularında saha araması amacıyla kullanılan multistatik sistemlerin çizelgeleme probleminin dinamik yöntemlerle optimizasyonu sensörlerin enerji kısıtlarının olduğu durum için incelenmiştir. Bu çalışmada "Kısmen Gözlenebilir Markov Karar Prosesi (Partially Observable Markov Decision Process – POMDP)" yöntemi kullanılmış, geliştirilen algoritmanın tespit olasılığı ve sistemin

ömrü açısından açgözlü (greedy) algoritmalardan daha başarılı sonuçlar verdiği belirtilmiştir [50].

Coraluppi'nin [51], Simakov'in [52] ve Erdinç ve Willet'in [53] yaptıkları çalışmalarda ise multistatik sistemlerin hedef takibi algoritmaları ele alınmış, kaynak, hedef ve alıcı geometrisinin hedef takibine olan etkileri analiz edilmiş, aynı anda birden çok sensörden elde edilen bilginin birleştirilerek güvenilirliği yüksek hedef bilgisinin oluşturulması, böylelikle hatalarının en aza indirgenmesi konusu incelenmiş, bu kapsamda Kalman ve Wiener filtreleri kullanılarak probleme çözüm aranmıştır.

Poikonen, Mertsalmi ve Mattila'nın yaptıkları çalışmada, ortamda yankılanmanın (reverberation) olduğu durumlar için Doğrusal Kalman Filtreleri kullanılarak multistatik sistemlerin aynı anda birden çok hedefi takip edebilmelerine yönelik bir algoritma geliştirilmiş, geliştirilen algoritmanın doğruluğu ve etkinliği gerçek ve simüle hedefler kullanılarak test edilmiştir [54].

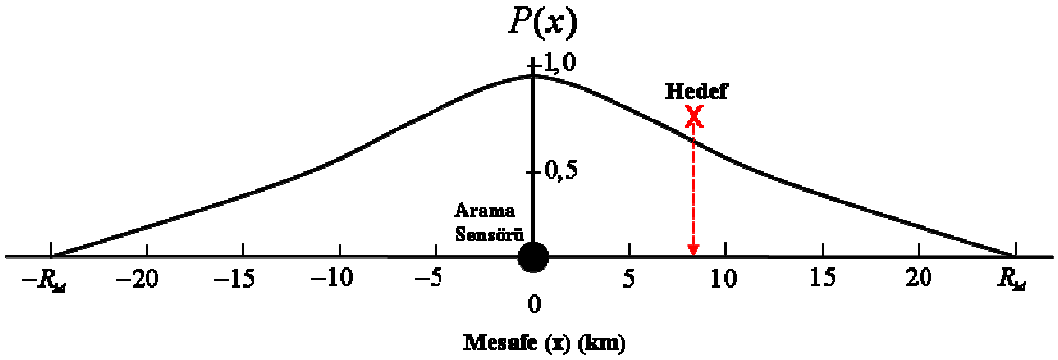
Casbeer, Swindlehurst ve Beard'in çalışmasında, insansız araçlar kullanarak multistatik hedef tespiti ve izlemesi yapan sistemlerin enerji kısıtı altında hedef takibini sürekli ve doğru olarak yapabilmeleri maksadıyla kullanılması önerilen optimum sistem yerleşim düzeni açıklanmıştır [55].

Schmidt, Edwards ve Liu tarafından yapılan çalışmada, "Jenerik Okyanus Dizin Teknoloji Sistemi (Generic Oceanographic Array Technology System-GOATS)" araştırma programı kapsamında deniz dibindeki mayınların bistatik ve multistatik çalışan insansız sualtı araçları ile tespit edilmesine yönelik yöntemler geliştirilmiş, üç boyutlu ortam modelleri ve alçak frekansta çalışan sonarlara sahip gelişmiş insansız sualtı araçları ile deniz yatağındaki yarı gömülü mayınların tespit edildiği ifade edilmiştir [56].

3.2. Tanımlar

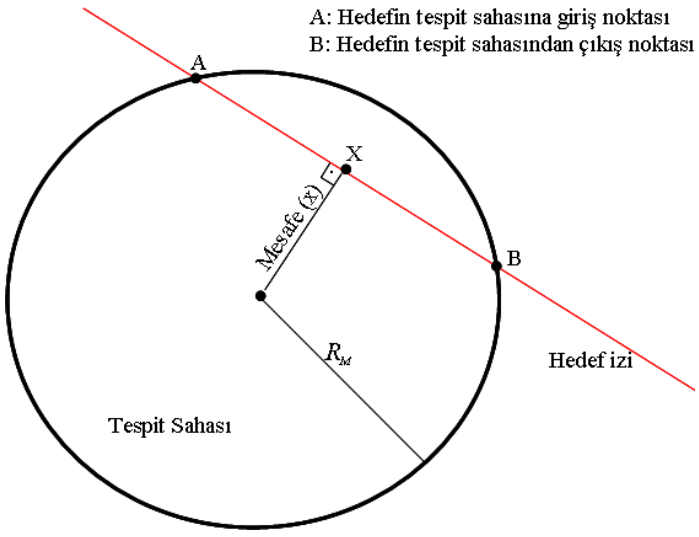
3.2.1. Tespit mesafesi eğrisi

Tespit mesafesi eğrisi, hedefin arama sensöründen olan mesafesine göre tespit edilme olasılığını gösteren fonksiyondur.



Şekil 3.1: Örnek bir tespit mesafesi eğrisi ($P(x)$: kümülatif tespit olasılığı)

Tespit mesafesi eğrisi Şekil 3.1'de belirtilen arama sensörünün tespit bölgesi, Şekil 3.2'de R_M yarıçaplı bir daire olarak görülmektedir. R_M, sensörün en uzak tespit mesafesini simgelemektedir. Hedefin sensörden olan mesafesi arttıkça tespit olasılığı da azalmakta, R_M mesafesinin ilerisinde tespit edilememektedir.

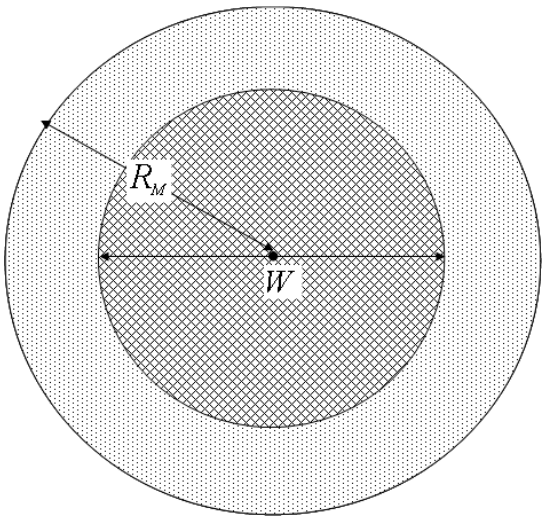


Şekil 3.2: R_M yarıçaplı tespit sahası ve bu sahadan geçiş yapan hedef izi

Sensörün R_M yarıçaplı tespit bölgesine *A* noktasından girerek *B* noktasından çıkan bir hedefin, geçişi esnasında sensöre en yakın bulunduğu nokta *X* ve bu noktanın sensöre olan mesafesi *x* olsun. Bu durumda hedefin kümülatif tespit olasılığı, *P*(*x*), hedef *A* noktasından *B* noktasına ilerleyene kadar sürekli artar. Bu durumda tespit mesafesi eğrisi, *P*(*x*) değerinin tüm *x* değerleri için hesaplanmasıyla oluşturulur [57].

3.2.2. Tarama genişliği

Azami tespit mesafesi R_M olan sensörün sahadaki etkin tespit mesafesinin genişliği o sensörün tarama genişliği olup *W* ile gösterilir. *W*, arama teorisinde sensörlerin birbirleri ile karşılaştırılmasında ve etkinliklerinin ölçülmesinde sıklıkla kullanılan bir parametredir.

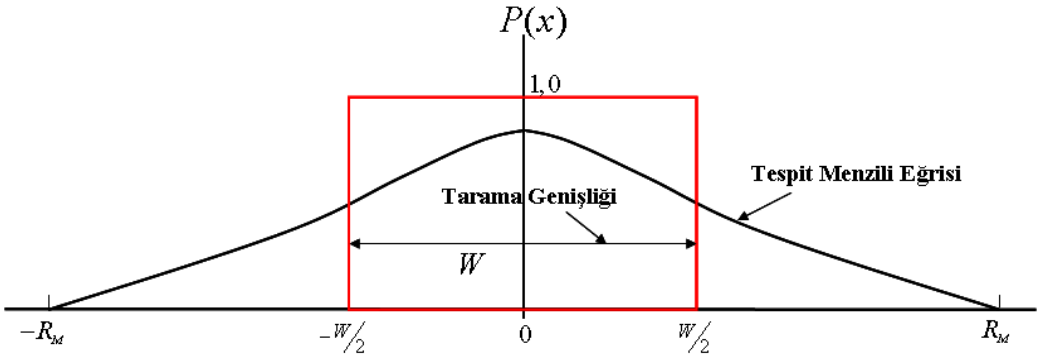


Şekil 3.3: Tarama genişliği *W* ve azami tespit mesafesi R_M olan sensör

Tarama genişliği, matematiksel olarak tespit mesafesi eğrisinin altında kalan alan olarak tanımlanabilir ve (3.1) ile hesaplanır [58].

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} P(x) \cdot \partial x = \int_{-R_M}^{R_M} P(x) \cdot \partial x \tag{3.1}$$

Şekil 3.4'te, Şekil 3.3'te belirtilen sensöre ait tespit mesafesi eğrisi ve tarama genişliği görülmektedir.



Şekil 3.4: Tarama genişliğinin (*W*) tespit mesafesi eğrisi üzerinde gösterimi

3.2.3. Tespit olasılığı (Probability of detection) (PoD)

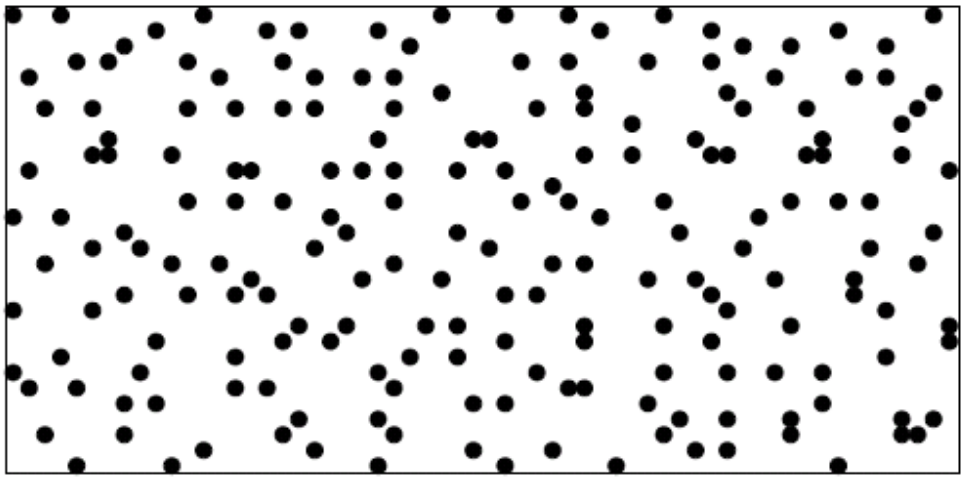
Aranan hedefin arama sensörlerinden herhangi birisinin tespit mesafesi içine girme olayının en az bir kez oluşması olasılığıdır. Arama teorisinde etkinlik ölçütü olarak kullanılan başlıca parametredir.

3.2.4. Kurabiye kalıbı (Cookie cutter) tespit modeli

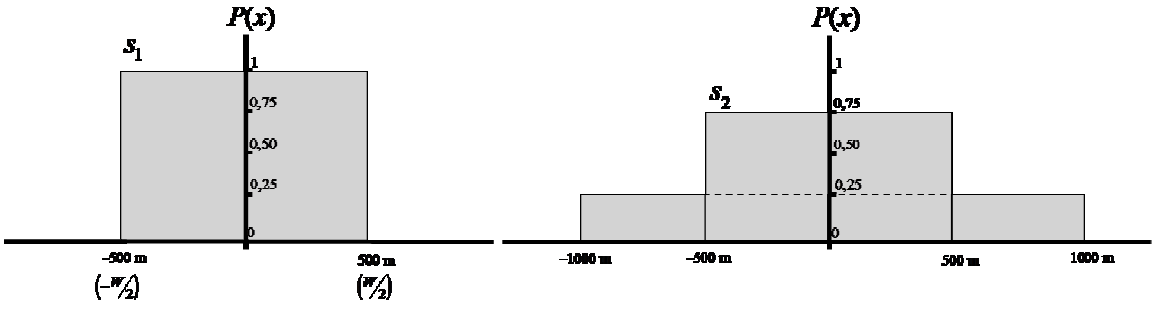
Kurabiye kalıbı tespit modelinde, hedefin sensör tarama genişliği (*W*) içerisinde iken daima tespit edileceği, bu bölgenin dışında ise hiçbir zaman tespit edilemeyeceği varsayılmaktadır. Dolayısıyla, *W* tarama genişliğine sahip bir s_i kurabiye kalıbı sensörü, *T* hedefini kendisine *W*/2'den daha yakın mesafede iken her zaman tespit edebilen ve *W*/2'den daha uzakta iken ise hiçbir zaman tespit edemeyen sensör olarak ifade edilebilir [59]. s_i ile *T* arasındaki mesafe $d(s_i,T)$ ve $PoD_{Kurabiye\ Kalıbı}$ sensörün hedefi tespit olasılığı ise model matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$PoD_{Kurabiye\ Kalıbı} = \begin{cases} 1 & ,d(s_i,T) \le W/2 \\ 0 & ,d(s_i,T) > W/2 \end{cases} \tag{3.2}$$

Kurabiye kalıbı tespit modeli, aşağıda bir örnek yardımıyla açıklanmıştır. Şekil 3.5'teki siyah noktalar tüm sahaya tekbiçimli dağılımla rastgele dağıtılmış aynı özelliklere sahip hedefleri simgelemektedir. Dağılımın tekbiçimli olmasının sebebi sahanın büyük boyutlu herhangi bir bölgesindeki hedef sayısı ile aynı boyuttaki başka bir bölgesindeki hedef sayısının aynı olmasını sağlamaktır. Hedeflerin rastgele yerleştirilmesinin sebebi ise hedef konumlarının tahmin edilebilir olmalarını engellemek ve sahanın herhangi bir kısmı için düzenli yerleştirmeden dolayı oluşabilecek bir sabit hatayı veya dengesizliği engellemektir.



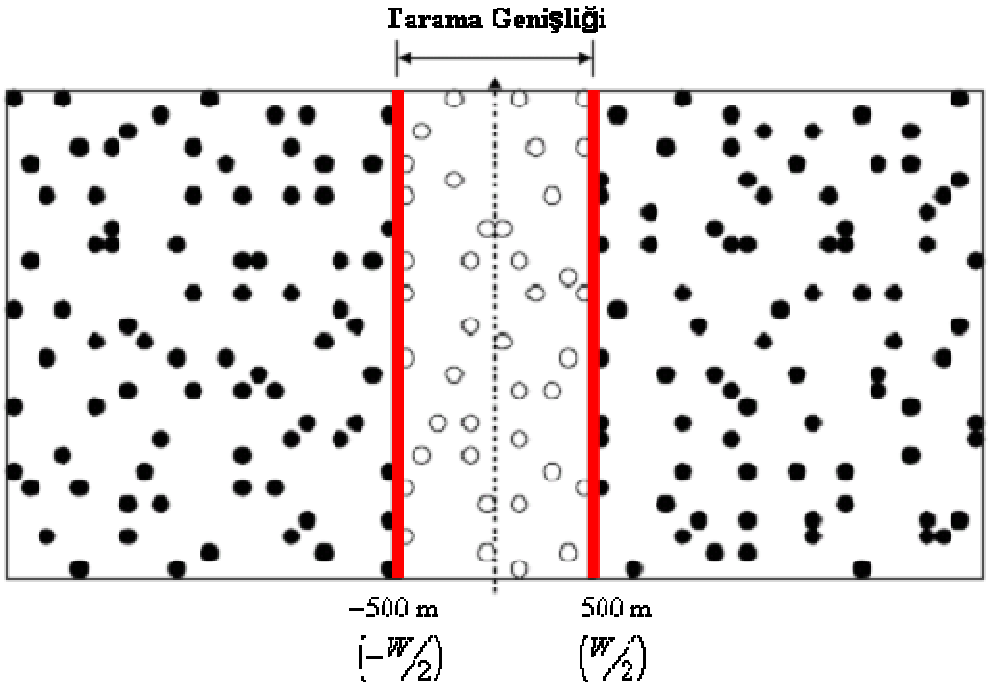
Şekil 3.5: Sahaya tekbiçimli dağılımla rastgele dağıtılmış hedefler



(*i*) (*ii*)

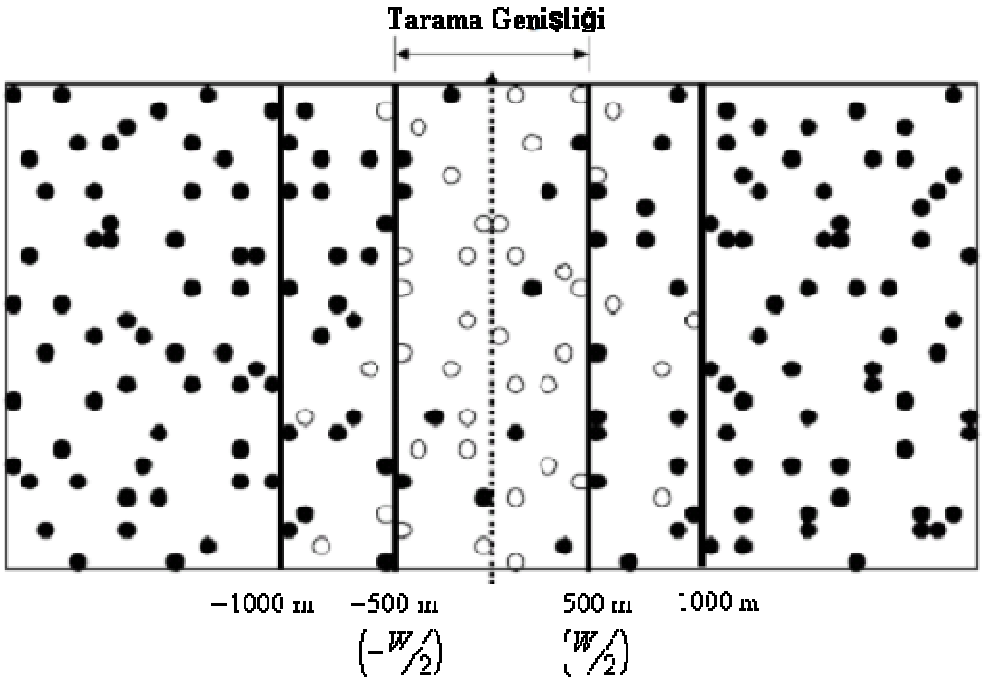
Şekil 3.6: (*i*) s_1 sensörüne ait tespit fonksiyonu (*ii*) s_2 sensörüne ait tespit fonksiyonu

Şekil 3.6'da bu örnekte kullanılan iki farklı sensör olan s_1 ve s_2'ye ait $P(x)$ tespit fonksiyonları görülmektedir. s_1 kurabiye kalıbı sensörü olup 0-500 m arasındaki hedefleri 1 olasılık ile, 500 m'den daha uzakta olan hedefleri 0 olasılık ile tespit edebilmektedir. s_2 ise 0-500 m mesafesi içinde bulunan hedefleri 0,75 ve 500-1000 m mesafesi içinde bulunan hedefleri 0,25 olasılıkla tespit edebilen daha gerçekçi bir sensördür. s_1, s_2'nin kurabiye kalıbı sensörü olarak ifade edilmiş halidir.



Şekil 3.7: s_1 sensörü ile süpürülen saha

Örneğin ilk adımında saha s_1 sensörü tarafından alt kenardan üst kenarı kadar sabit bir rotada süpürmüştür (Bkz. Şekil 3.7). Bu durumda tarama genişliği içinde tespit edilemeyen hedef sayısı ve tarama genişliği dışında tespit edilen hedef sayısı 0'dır. Tespit edilen toplam hedef sayısı 40'tır.



Şekil 3.8: s_2 sensörü ile süpürülen saha

Örneğin ikinci adımında ise saha aynı hat kullanılarak s_2 sensörü tarafından süpürmüştür (Bkz. Şekil 3.8). Bunun sonucunda 0-500 m mesafedeki hedeflerden 11 adedi tespit edilememiş, 500-1000 m mesafedeki hedeflerden 11 adedi tespit edilmiş, toplamda ise yine 40 adet hedef tespit edilmiştir.

Sonuç olarak bu örnekte, gerçekte farklı hedefleri farklı olasılıklar ile tespit edebilen bu iki sensörün toplam tespit olasılığı açısından birbirlerine denk olduğu görülmektedir. Matematiksel hesaplamaları kolaylaştıran kurabiye kalıbı tespit modeli bu özelliği nedeniyle farklı sensörlerin birbirleri ile karşılaştırılmasında ve hedef tespit olasılıklarının hesaplanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır [60]. Bu çalışmada ele alınan bistatik ve multistatik sistemler için de aynı yaklaşım kullanılmış ve sensörlerin etkinliği kurabiye kalıbı tespit modeli kullanılarak belirlenmiştir.

3.3. Sualtı Akustiği

Sualtı akustiği, deniz yatağı ve su altında ses dalgalarının doğrusal ve doğrusal olmayan yayılımını, saçılımı ve etkileşimini inceleyen ve buna dayalı pratik uygulama alanları geliştiren bir bilim dalıdır [61]. Sualtında ses, titreşim yaparak içinde bulunduğu ortama güç ileten bir kaynaktan yayılır, içinden geçtikleri ortamın moleküllerini hareket ettirerek yoluna devam eder ve alıcıya ulaşır.

Ses dalgalarının taşıdıkları enerjiye bağlı olarak birim alana uyguladıkları akustik güce ses şiddeti denir ve *I* ile gösterilir. Sesin şiddeti, ses kaynağına olan uzaklığın karesi ile ters orantılıdır ve (3.3) formülü ile hesaplanır.

$$I = \frac{\text{Ses gücü}}{\text{Alan}} \left[\frac{W}{m^2} \right] \tag{3.3}$$

3.3.1. Sualtı ortamı

Sualtı ortamının yapısı ses dalgalarının suyun içerisindeki ilerleyiş şekline etki etmektedir. Ortamla ilgili en önemli parametre ses hızı profilidir.

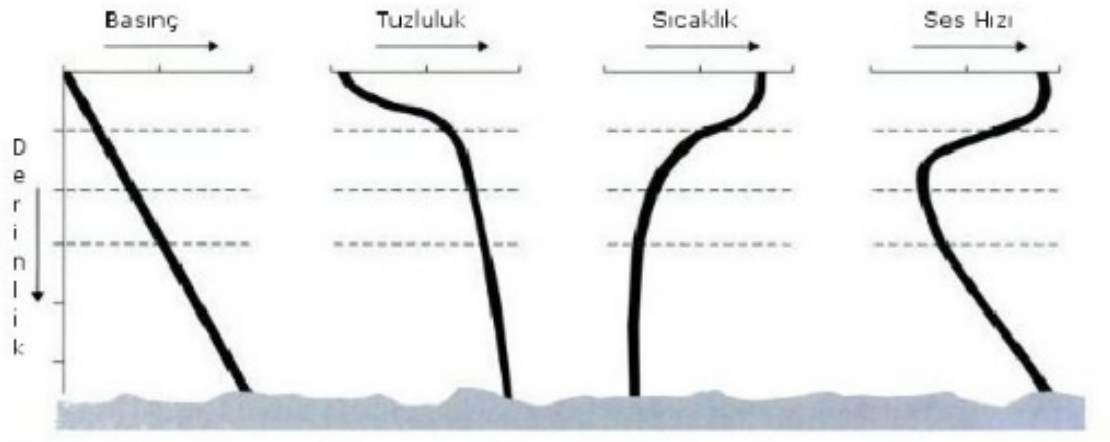
3.3.1.1. Ses hızına etki eden faktörler

Sualtındaki ses hızı sıcaklık, tuzluluk ve basıncın bir fonksiyonudur. Bu parametreler mevsim, coğrafi bölge ve zamana göre değişir.

a. Sıcaklık: Ses hızına en çok etki eden parametredir. Sıcaklık, ses hızı ile doğru orantılıdır. 1ºC'lik sıcaklık artışı ses hızının 3 m/sn artmasına neden olur.

b. Tuzluluk: Tuzluluk 1 kg deniz suyunda çözünmüş olarak bulunan tüm mineral tuzlar ve elementlerin oranıdır. Tuzluluğun artması ile birlikte ses hızı da artar. Tuzluluğun binde bir değişimi ile ses hızında 1,3 m/sn'lik bir değişim gözlenmektedir.

c. Basınç: Sıcaklık ve tuzluluğun değişmediği ortamlarda basınç ses hızı üzerinde etkin bir rol oynamaktadır. Derinliğin 1 m'lik artışı basıncın etkisi ile ses hızını 0,017 m/sn artırır. 200 m derinlikten sonra sıcaklık ve tuzluluk fazla değişmediğinden basıncın etkisi ses hızı üzerinde belirleyici bir rol oynamaya başlar. Basınç, tuzluluk, sıcaklık ve ses hızının derinliğe bağlı jenerik değişimi Şekil 3.9'da görülmektedir.



Şekil 3.9: Basınç, tuzluluk, sıcaklık ve ses hızının jenerik değişimi

3.3.1.2. Ses hızı formülü

Literatürde ses hızının ampirik olarak hesaplanmasını sağlayan pek çok formül bulunmaktadır. Bunlardan en sık kullanılanı Mackenzie tarafından 1981 yılında geliştirilen formüldür [62]. T santigrat cinsinden sıcaklığı, S binde bir cinsinden tuzluluğu, D ise metre cinsinden derinliği ifade edecek olursa ses hızı, V_{SES} ;

$$V_{SES} = 1448,96 + 4,591T - 5,304.10^{-2}T^2 + 2,374.10^{-4}T^3 + 1,340.(S-35) + 1,630.10^{-2}D + 1,675.10^{-7}D^2 - 1,025.10^{-2}T(S-35) - 7,139.10^{-13}T.D^3 \quad (3.4)$$

olarak hesaplanır.

3.3.2. Sonar denklemleri

Sonar denklemleri, sonar performanslarının tahmin edilmesine mantıksal bir zemin hazırlamak üzere düzenlenmiş, ortam, hedef ve sensör özelliklerini birbirleri ile bağdaştıran ve sualtı akustiği uygulamalarında tasarım bakımından altyapı oluşturan denklemlerdir [63]. Ortamda bir hedef varken ona ait sonar sinyalini hedef olarak belirlemek "Tespit" işlemidir. Aynı işlemi ortamda hedef yokken yapmak ise "Hatalı Tespit" olarak tanımlanır. Bu durumda eğer tespit sağlanmışsa, ortamdaki sinyal (S) ve gürültü (N) parametreleri kullanılarak;

$$S - N \geq DT \tag{3.5}$$

ifadesi yazılabilir. Yukarıdaki denklemde DT, tespit eşik seviyesi olup aşağıda açıklanmıştır. (3.5)'teki basit sonar formülü aşağıda belirtilen sensör, ortam ve hedef parametreleri ile geliştirilecek olursa (3.6) ve (3.7) formülleri ile daha ayrıntılı biçimde ifade edilebilir.

Sensöre ait parametreler:
Tespit Eşik Seviyesi (Detection Threshold) (DT)
Sensör Kaynak Seviyesi (Source Level) (SL)
Sensör Gürültüsü (Self Noise Level) ($NL_{SENSÖR}$)
Yönlendirme İndeksi (Directivity Index) (DI)

Ortama ait parametreler:
İletim Kaybı (Transmission Loss) (TL)
Yankılanma Kaybı (Reverberation Level) (RL)
Ortam Gürültüsü (Ambient Noise Level) (NL_{ORTAM})

Hedefe ait parametreler:
Hedef Kuvveti (Target Strength) (TS)
Hedef Kaynak Seviyesi (Source Level) (SL)

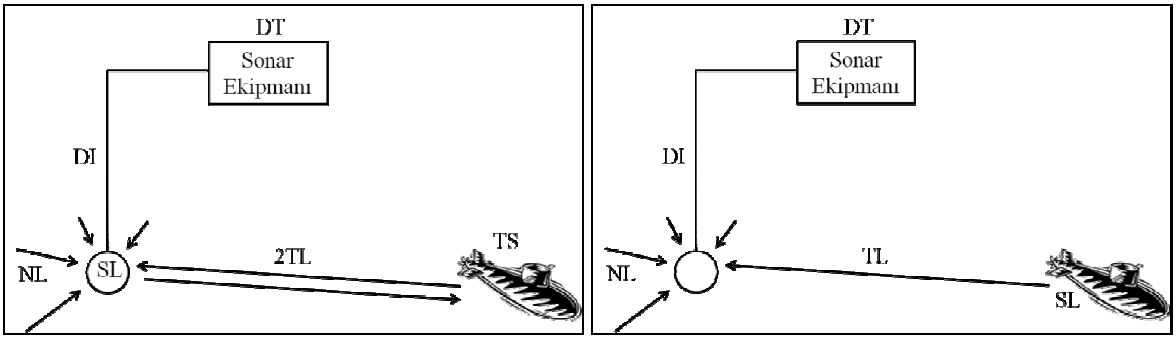
Sensöre, ortama ve hedefe ait parametrelerin de ilave edilmesiyle pasif sonar denklemi:

$$SL - TL + DI - NL \geq DT \tag{3.6}$$

aktif sonar denklemi ise

$$SL - 2TL + DI + TS - NL \geq DT \tag{3.7}$$

şeklinde formüle edilir [2]. Formüllerin dizayn mantığı Şekil 3.10'daki aktif ve pasif sonar dinlemelerinde görsel olarak sunulmuştur.



(*i*) (*ii*)

Şekil 3.10: (*i*) Aktif sonar dinlemesi (*ii*) Pasif sonar dinlemesi

3.3.2.1. Sonar denklemi parametreleri

Bu bölümde aktif ve pasif sonar denklemlerinde kullanılan parametreler hakkında özet bilgi verilmiştir.

3.3.2.1.1. Tespit eşik seviyesi (*DT*)

Sonar sistemlerinin performanslarının tahmin edilebilmesi için, akustik tespit problemi, ortamdaki sinyal ve gürültü parametreleri ile söz konusu parametrelerin değişimi göz önüne alınarak kullanıcıya ölçülebilen bir değer verecek şekilde tanımlanır. Bu değere Tespit Eşik Seviyesi (*DT*) denir ve bu değer sinyal ve gürültü sonara ulaşana kadar

meydana gelen tüm değişimleri ifade eder. Bir sinyalin tespit edilmiş olarak değerlendirilebilmesi için gerekli olan kriter alıcı tarafından toplanan sinyal seviyesinin belirlenen eşik seviyesini geçmesidir. Akustik olarak *DT*, sonar tarafından, çevrede hedefe ait bir sinyal olduğunun tespit edilebilmesi için gerekli olan en düşük Sinyal-Gürültü seviyesidir. Bir sinyali tespit edebilme süreci içerisinde insan faktörü de olduğundan bu işlem aynı zamanda şans ve tecrübeye de bağlıdır. Ortamda bulunan ve sinyali maskeleyen gürültü seviyesinin sürekli değişiklik gösterdiği göz önüne alındığında *DT* istatistiksel bir kavramdır.

3.3.2.1.2. Sensör ve hedef kaynak seviyesi (*SL*)

Güç çeviricinin (transdüser) akustik ekseninde ve 1 m mesafesinde 1 µPa. referans değerinde oluşan ses basınç seviyesine kaynak seviyesi denir. Bu terim hem arama yapan platformun hem de hedef platformun yaydığı ses için kullanılabilir. Hedefin kendi bünyesinden yayılan akustik enerji; makine gürültüsü, pervane sesi, gövdeden yayılan sesler, vb. enerjilerden oluşur. Pasif sonar denkleminde hedefin kaynak seviyesi kullanılırken aktif sonar denkleminde arama platformunun kaynak seviyesi değeri kullanılır.

3.3.2.1.3. İletim kaybı (*TL*)

Ses dalgaları su içerisinde ilerlerken genellikle doğrusal bir yayılım göstermezler ve bu yayılım esnasında çeşitli sebeplerle şiddet kaybına uğrarlar. Bu kayba iletim kaybı denir ve 1 m mesafedeki ses şiddetinin *R* mesafedeki ses şiddeti ile karşılaştırılması sonucunda elde edilir. *TL* değeri (3.8) formülü yardımı ile hesaplanır.

$$TL = 10\log\left(\frac{I_{1m}}{I_R}\right) \tag{3.8}$$

TL'nin başlıca nedenleri sesin dağılması (spreading) ve zayıflaması (attenuation)'dır.

3.3.2.1.3.1. Sesin dağılması

Yayılmanın şekline bağlı olarak ses çok geniş bir alana yayılabilir. Sınırsız bir su alanında bir noktadan yayılan ses, küresel veya silindirik olarak ilerlerken toplam enerji seviyesinde teorik olarak bir kayba uğramamasına karşın oluşan cephe alanının büyümesi nedeniyle birim alandaki enerji yoğunluğundan kayba uğrar. Sesin hangi ortamlarda nasıl bir yayılım gösterdiği kesin olarak bilinmemekle birlikte 1000 m'den daha uzun mesafelerde "silindirik" yayılım, 1000 m'den daha kısa mesafelerde ise "küresel" yayılım gösterdiği kabul edilmektedir.

3.3.2.1.3.1.1. Küresel dağılma

Genelde derin sularda ve ses kaynağının 1000 m mesafesi içinde meydana gelir. Akustik enerji kaynaktan her yöne tekbiçimli olarak yayılır. Daha da uzaklaştıkça kırılma ve yansıma etkileri ses dalgasını daha farklı bir şekilde yayılmasına neden olur. Küresel yayılma esnasında ses yoğunluğu mesafenin her katı için 6 dB düşer ve

$$TL_{KÜRESEL} = 20\log R \tag{3.9}$$

olarak ifade edilir.

3.3.2.1.3.1.2. Silindirik dağılma

1000 m'den uzak mesafelerde ses dalgaları yatay olarak ilerleme gösterir ve bu yayılmaya silindirik yayılma adı verilir. Silindirik yayılma esnasında ses yoğunluğu mesafenin her katı için 3 dB düşer. Bu kayıp:

$$TL_{SİLİNDİRİK} = 10\log R + 30dB \tag{3.10}$$

olarak ifade edilir.

3.3.2.1.3.2. Sesin zayıflaması

Sesin sualtında ilerlerken zayıflaması, emilme kaybı (absorption loss) ve saçılma/yankılanma kaybı (scattering and reverberation loss) ile oluşur.

3.3.2.1.3.2.1. Emilme kaybı

Emilme kaybı su içerisinde yayılan ses enerjisinin çeşitli sebeplerle ısı enerjisine dönüşmesi nedeniyle oluşan kayıplardır. Isı dönüşümüne sebep olan temel etken viskozitedir. Suyun bu özelliği frekansa bağlı olarak çeşitli seviyelerde emilme kaybına neden olmaktadır. Ayrıca emilme kaybı suyun sıcaklığına ve sesin frekansına bağlı olarak değişir. Düşük frekanslarda (5-40 Hz) ve yüksek frekanslarda (>1000 Hz) emilme kaybı frekansın karesiyle doğru orantılıdır. Orta frekanslarda ise frekansa ek olarak sıcaklığın da etkisi görülür. Deneysel çalışmalar sonucu emilme kaybı için pek çok formül geliştirilmiş olup bunlardan en yaygın kullanılanı aşağıdaki formüldür [64].

$$TL_{EMİLME} = \alpha R$$
$$\alpha = 1,0936\left(\frac{0,1f^2}{1+f^2} + \frac{40f^2}{4100+f^2}\right) \; {}^{dB}\!/_{kyd} \tag{3.11}$$

(3.11) formülünde f frekans (kHz), R ise mesafedir (m).

3.3.2.1.3.2.2. Saçılma/yankılanma kaybı

Saçılma/Yankılanma kaybı su içinde homojen olmayan yapılardan kaynaklanan kayıplardır. Saçılım ve yankılanma kaybının yüzey, hacim ve dip kaynaklı olmak üzere üç tipi mevcuttur.

a. Yüzey saçılımı/yankılanması: Sesin yüzeye çarpması sonucu oluşur ve deniz durumu arttıkça yüzey saçılımı/yankılanması da artar. Yüzeyden her sekme için 1-10 dB arası fark oluşturur. Frekans ve dalga boyu da düzeyini etkiler.

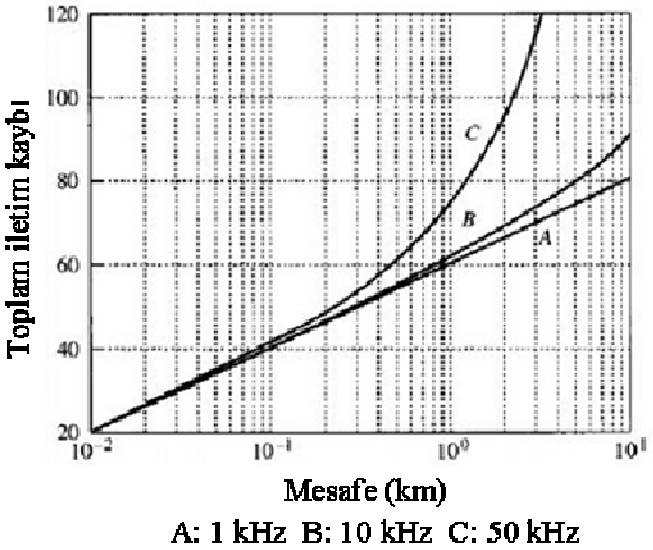
b. Hacim saçılımı/yankılanması: Su içerisindeki balık, deniz memelileri, hava kabarcıkları ve değişik sıcaklıktaki su kütleleri gibi yansıtıcılar nedeniyle oluşur.

c. Dip saçılımı/yankılanması: Ses dalgalarının kaynağı terk etmelerini takiben suda ilerledikten sonra dibe çarpmaları sonucunda oluşur. Dip saçılımı/yankılanması dip yapısına ve sesin frekansına bağlıdır. Genellikle yumuşak ve çamurlu dipler sert ve pürüzsüz diplere göre daha az saçılmaya neden olurlar. Her dipten sekme 3-30 dB arası kayba neden olur. Saçılım ve yankılanma farklı okyanus ortamlarında büyük farklılıklar gösterir. Toplam saçılım ve yankılanma kaybı, β, ayrıca hesaplanarak denklemlere ilave edilir.

Toplam iletim kaybı formül (3.12) ile hesaplanır.

$$TL_{TOPLAM} = \begin{cases} 20\log R + \alpha r + \beta & , R \le 1000 \text{ m} \\ 10\log(R-1000) + 30 + \alpha r + \beta & , R > 1000 \text{ m} \end{cases} \tag{3.12}$$

Bu değer ayrıca aşağıdaki grafik yardımıyla yaklaşık olarak hesaplanabilir.



Şekil 3.11: Toplam iletim kaybının frekans ve mesafeye bağlı değişimi

3.3.2.1.4. Yönlendirme indeksi (*DI*)

Alıcı tarafından tüm yönlerde (Omni Directional) ölçülen gürültü seviyesi, $N_{\text{OMNI DIRECTIONAL}}$'ın yönlendirilmiş (Directional) olarak ölçülen gürültü seviyesi, $N_{\text{DIRECTIONAL}}$'a oranıdır. Bir başka deyişle, aynı akustik güce sahip yönlendirilmiş türde bir kaynak her yöne iletim yapan kaynağa göre herhangi bir mesafede daha fazla akustik şiddet meydana getirmekte olup bu akustik şiddetlerin birbirine logaritmik oranı, yönlendirilmiş kaynağın istenen yöne ne kadar yoğunlaştırılabildiğini gösterir. Bu oran yönlendirme, yönlendirmenin dB eşiti ise yönlendirme indeksidir.

$$DI = 10\log\left(\frac{N_{\text{OMNI DIRECTIONAL}}}{N_{\text{DIRECTIONAL}}}\right) \tag{3.13}$$

3.3.2.1.5. Hedef kuvveti (*TS*)

Hedeften yansıyan akustik enerjinin alıcıdan 1 m mesafedeki değerinin doğrudan hedefe gelen enerjiye logaritmik oranıdır. Yansıyan bu enerji, hedeften olabileceği ortamdaki farklı platformlardan, balık sürülerinden veya büyük deniz canlılarından da yansıyan enerji olabilir [65,66]. *TS* değeri formül (3.14) yardımı ile hesaplanır.

$$TS = 10\log\left(\frac{I_{1m}}{I_R}\right) \tag{3.14}$$

3.3.2.1.6. Sensör gürültüsü ($NL_{SENSÖR}$)

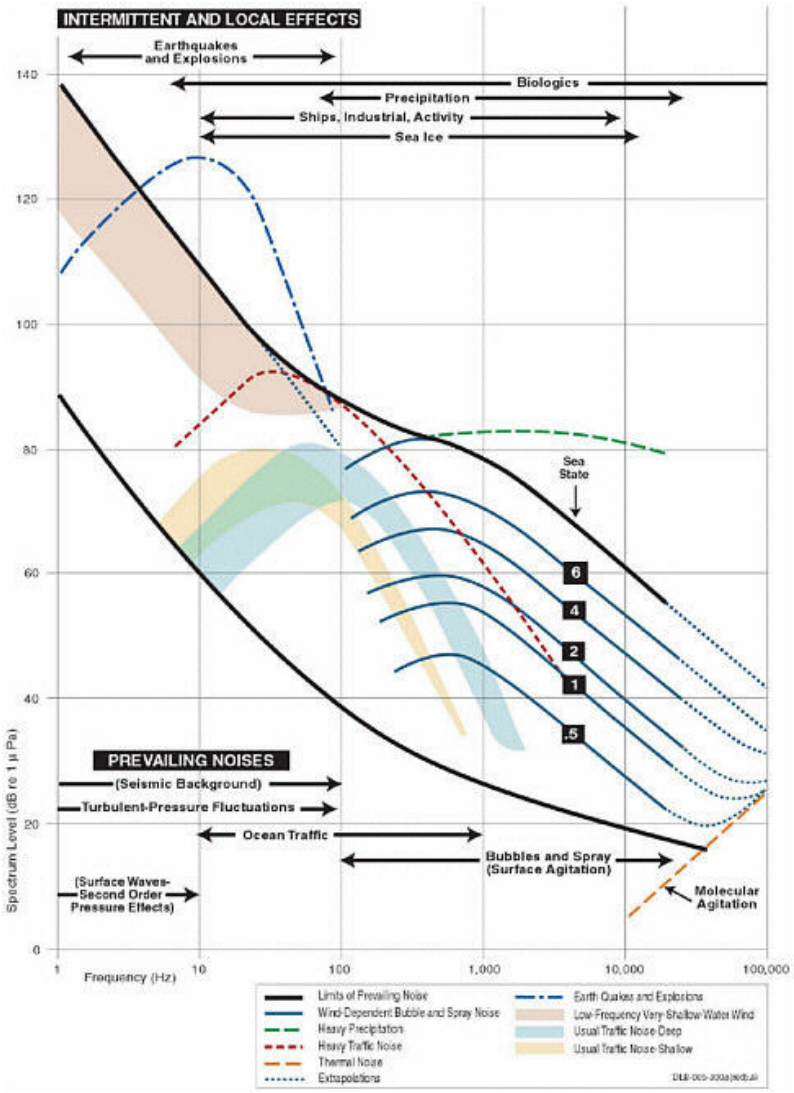
Platform ya da sonardan kaynaklanan gürültüdür. Bir başka deyişle platformun kendi bünyesinde çalışan parçalar nedeniyle ortaya çıkan gürültü şiddetidir.

3.3.2.1.7. Ortam gürültüsü (NL_{ORTAM})

Ortam gürültü seviyesi bölgede çevresel şartlar nedeniyle oluşan ve sürekli değişiklik gösterebilen bir parametre olup, deniz durumu, deniz trafiği yoğunluğu, sahil aktiviteleri gibi bir çok değişkene bağlıdır. Ortam gürültüsüne etki eden temel faktörler takip eden maddelerde belirtilmiştir.

a. Satıh gürültüsü
b. Biyolojik gürültüler
c. Deniz trafiği gürültüsü
ç. Isıl gürültüler
d. Deniz suyu türbülansı
e. Sismik gürültüler

Çevre gürültüsünün artması sonarın tespit mesafesini azaltır ve hedeten gelen sinyalin gürültü sinyallerinden ayırt edilmesini zorlaştırır. Gürültü seviyesi, ortam gürültüsü ve sensör gürültüsü seviyelerinin alıcıda oluşturduğu toplam etkiyi gösterir. Ortam gürültüsü çoğunlukla hava ve deniz durumu ile deniz trafiği faktörlerinin istatistiksel olarak hazırlanmış grafiklere "WENZ Eğrileri" uygulanması vasıtasıyla gerçeğe yakın değerler olarak hesaplanabilmektedir. WENZ eğrileri Şekil 3.12'de görülmektedir.

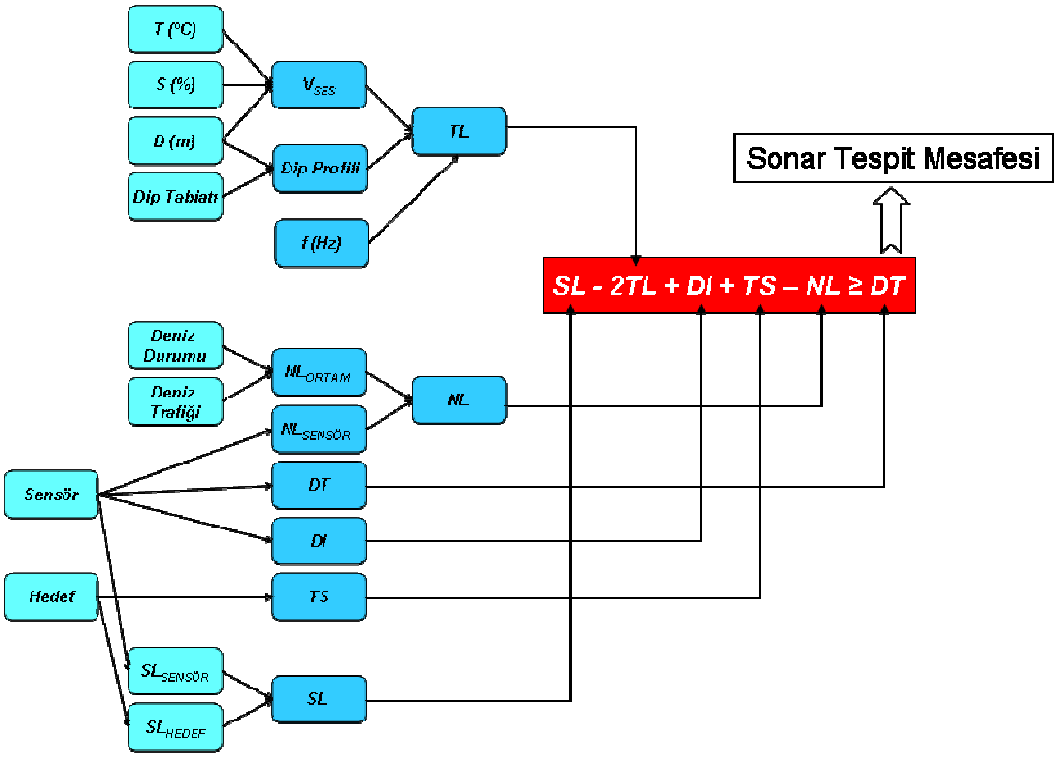


Şekil 3.12: Çevre gürültüsü hesaplama eğrileri (WENZ eğrileri)

3.3.3. Sonar tespit mesafesinin tahmini

Sonar tespit mesafesinin tahmini için kullanılan başlıca parametreler ve söz konusu parametrelerin birbirleri ile ilişkisi Şekil 3.13'teki diyagramda görülmektedir. Sıcaklık, tuzluluk ve derinlik parametreleri yardımıyla derinliğe bağlı ses hızı profili; dip profili ve frekans kullanılarak iletim kaybı değeri elde edilir. Ortam gürültüsü değeri, deniz durumu, deniz trafiği ve yukarıda belirtilen diğer parametreler yardımı ile tespit edilir, sensör gürültüsü ile toplanarak toplam gürültü seviyesi değeri elde edilir. Benzer şekilde sensör ve hedef kaynak seviyeleri toplanarak kaynak seviyesi değeri bulunur. Tespit eşik

seviyesi, yönlendirme indeksi ve hedef kuvveti parametrelerinin de sisteme tatbik edilmesi sonucu aktif ve pasif sonar denklemleri kullanılarak sonar mesafe tahminleri yapılır.



Şekil 3.13: Sonar tespit mesafesi tahmini diyagramı

4. BİSTATİK VE MULTİSTATİK TESPİT BÖLGESİ

4.1. Bistatik Tespit Kriteri

SATS'nde tespitin gerçekleşebilmesi için kaynaktan yayılan enerjinin hedeften yansımasını takiben bir ya da daha fazla alıcıda belirli bir akustik enerji seviyesini geçecek seviyede etki oluşturması gereklidir. AT (Acoustic Threshold) ile tanımlayacağımız bu akustik enerji seviyesi, alıcının hassasiyetine, ortamdaki ve platformdaki gürültüye, sensör parametrelerine (tespit ve hatalı tespit ayarları) ve hedef tipine bağlıdır. $AT = DT + NL - TS - DI$ olarak tanımlanırsa, Bölüm 2.3.2'de belirtilen teorilerden yola çıkarak monostatik bir sistemde tespitin sağlanabilme koşulu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$SL - 2TL \geq AT \tag{4.1}$$

Bistatik sistemlerde kaynaktan hedefe ve hedeften alıcıya olan mesafeler ve buna bağlı olarak iletim kayıpları farklı olduğundan, bu sistemler için formül (4.1)'de belirtilen tespit kriteri aşağıdaki şekilde tekrar düzenlenebilir.

$$SL - TL_1 - TL_2 \geq AT \tag{4.2}$$

Formül (4.2)'de, SL kaynak gücü, TL_1 ve TL_2 ise sırasıyla kaynaktan hedefe ve hedeften alıcıya olan iletim kaybı miktarlarıdır. Ortamın homojen olduğunu, yani sahadaki herhangi iki nokta arasındaki iletim kaybının sabit bir $m > 0$ için basit kuvvet kuralını izlediğini varsayarsak formül (4.2)'yi aşağıdaki şekilde tekrar yazabiliriz.

$$SL - m\log(R_1) - m\log(R_2) \geq AT \tag{4.3}$$

R_1 ve R_2 sırasıyla kaynaktan hedefe ve hedeften alıcıya olan mesafeyi belirtmektedir. (4.3) eşitsizliğini bistatik mesafelerin çarpımı, R_1R_2, için çözecek olursak tespitin sağlanması için bu çarpımın b^2 olarak nitelendireceğimiz bir eşik değerinin altında olması gerektiği (4.4) denkleminde görülmektedir.

$$R_1R_2 \le 10^{\frac{1}{m}(SL-AT)} \equiv b^2 \tag{4.4}$$

Yukarıdaki denklemde *b* parametresi, "Eşdeğer Monostatik Tespit Mesafesi" ya da kaynak ve alıcının aynı konumda bulunduğu durumdaki "Tespit Mesafesi Geometrik Ortalaması" olarak tanımlanabilir [67]. *b* parametresi, akustik modelleme ve simülasyon programları kullanılarak Bölüm 2.3.3'te belirtilen sonar tespit mesafesi tahmini yöntemi ile belirlenir. (4.4) denklemi aynı zamanda bistatik bir sistemin tespit sahasını, bir başka deyişle sensörün hedefi algılayabileceği bölgeyi oluşturan Cassini ovali denklemidir [14]. Bu tür sensörler için (3.2) fonksiyonu ile ifade edilen kurabiye kalıbı tespit modeli aşağıdaki şekilde tekrar tanımlanabilir.

$$PoD_{Kurabiye\ Kalıbı} = \begin{cases} 1 & , R_1R_2 \le b^2 \\ 0 & , R_1R_2 > b^2 \end{cases} \tag{4.5}$$

Bu çalışmada Cassini ovalleri, bistatik ve multistatik sistemlerin tespit bölgelerini modelleyen geometrik şekil olarak kabul edilmiştir. Cassini ovallerinin temel geometrik özellikleri hakkında bilgi bir sonraki bölümde verilmiştir.

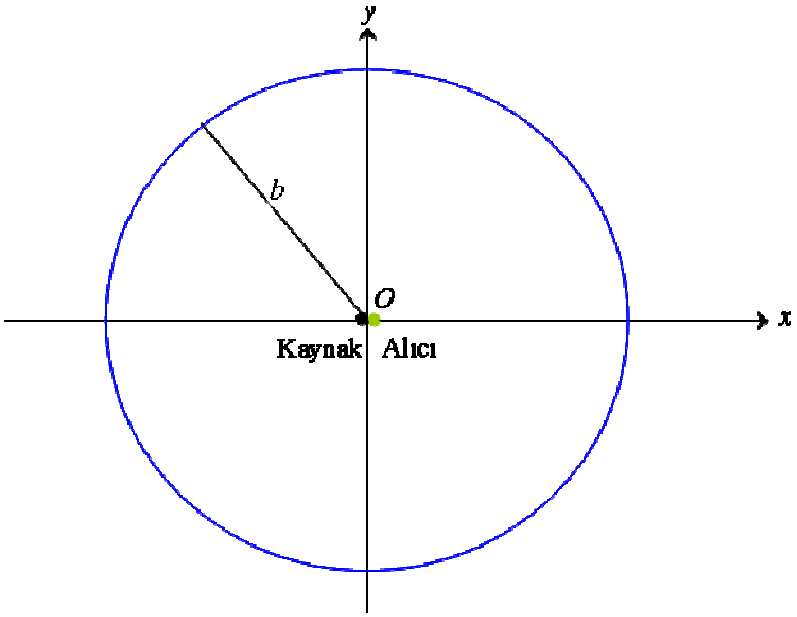
4.2. Cassini Ovali ve Temel Özellikleri

Cassini ovali ilk kez 1680 yılında İtalyan gökbilimci Giovanni Domenico Cassini (1625-1712) tarafından dünyanın güneş etrafındaki yörünge şekline bir model olarak geliştirilmiştir. Domenico Cassini, Kepler'in gezegenler eliptik yörüngelerde ilerlediğine dair teorisini reddetmiş ve bu yörüngelerin Cassini ovali şeklinde olduğunu iddia

etmiştir [68]. Günümüzde Cassini ovalleri aynı zamanda tıp biliminde alyuvarların üç boyutlu olarak modellenmesi için de kullanılmaktadır [69–72].

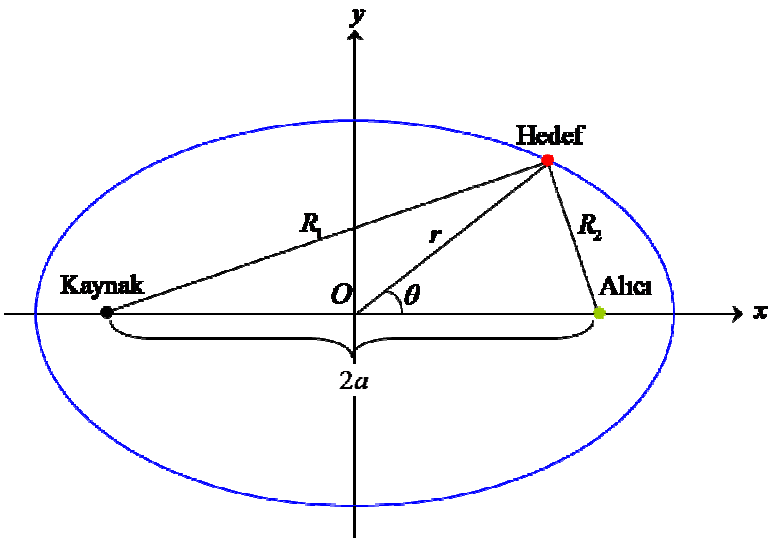
James ve James Cassini ovalini, kendisine komşu olan iki kenarının uzunluklarının çarpımı ve karşı kenarın uzunluğu sabit olan üçgen tepe noktalarının birleştirilmesiyle oluşan şekil olarak tanımlamışlardır [73].

b tespit mesafesine sahip monostatik sistemin tespit bölgesi *b* yarıçaplı bir daire olarak ifade edilmektedir (Bkz. Şekil 4.1).



Şekil 4.1: *b* yarıçaplı daire şeklindeki monostatik tespit bölgesi

Sözkonusu monostatik sistemi oluşturan kaynak ve alıcının birbirlerinden $2a > 0$ mesafesi kadar ayrılmaları halinde ortaya çıkan bistatik sistemin tespit bölgesi ise $R_1 R_2 = b^2$ koşulunu sağlayan noktaların birleştirilmesiyle oluşan oval olarak ifade edilir (Bkz. Şekil 4.2).



Şekil 4.2: Bistatik üçgen ve Cassini ovali

Cassini ovali tanımı Şekil 4.2'de görülen bistatik üçgene uygulanacak olursa 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 [67]. Dolayısı ile a parametresi sensörler arası mesafenin yarısı olarak tanımlanır.

Cassini ovali aralarında sabit mesafe bulunan iki noktaya olan mesafelerinin çarpımı yine sabit olan noktaların birleştirilmesiyle oluşan şekil olarak da tanımlanabilir. Bu tanım elipsin tanımına benzemekte olup tek farkı R_1 ve R_2 mesafelerinin toplanması yerine birbirleri ile çarpılmasıdır.

Sensörlerin $(\pm a, 0)$ noktalarında sabit olduğu varsayılırsa, Cassini ovalinin kartezyen denklemi $R_1 R_2 = b^2$'den yola çıkarak aşağıdaki şekilde olacaktır [74].

$$\left[(x-a)^2 + y^2\right]\left[(x+a)^2 + y^2\right] = b^4, \quad a, b \in \mathbb{R}. \tag{4.6}$$

(4.6) denklemini polar forma dönüştürmek için öncelikle $x = r.\cos\theta$ ve $y = r.\sin\theta$ olarak tanımlanır.

$$r^4 - 2a^2r^2\cos 2\theta + a^4 - b^4 = 0 \tag{4.7}$$

$$r^2 = a^2\cos 2\theta \pm \sqrt{a^4\cos^2 2\theta - (a^4 - b^4)} \tag{4.8}$$

ise, $\theta \in [-\theta_0, \theta_0]$ ve $\theta_0 = \frac{1}{2}\sin^{-1}\left[\left(\frac{b}{a}\right)^2\right]$ için:

$$r = \pm a\sqrt{\cos 2\theta \pm \sqrt{\left(\frac{b}{a}\right)^4 - \sin^2 2\theta}} \tag{4.9}$$

olarak hesaplanır.

Oval *x* ve *y* eksenlerine göre simetrik olup aldığı şekiller temel parametreler olan *a* ve *b*'nin birbirine oranına bağlı olarak farklılık gösterir [75]. *a*/*b* oranına göre ovalin alabileceği şekiller şunlardır:

$a/b = 0$ için şekil *b* yarıçaplı bir dairedir.

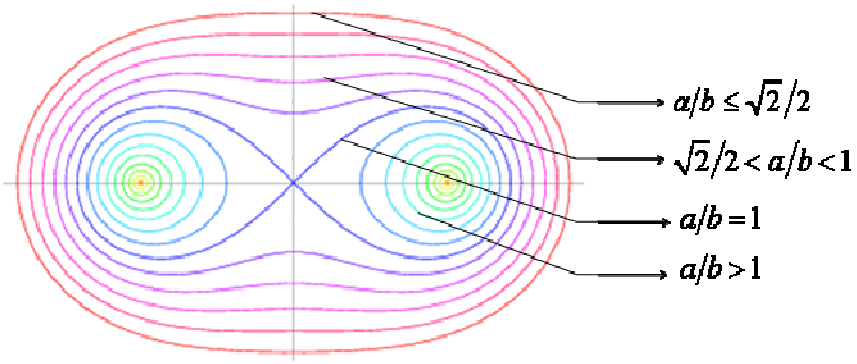
$0 < a/b \le \sqrt{2}/2$ için şekil elipse benzeyen tek bir konveks eğridir ve *x* eksenini $x = \pm\sqrt{a^2 + b^2}$ noktalarında keser.

$\sqrt{2}/2 < a/b < 1$ için şekil üst ve alt kısımlarından içeri doğru hafifçe bastırılmış konveks olmayan bir eğridir.

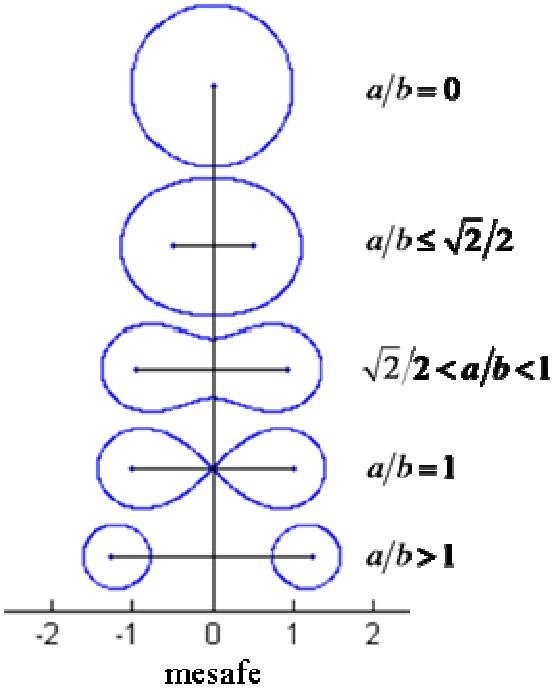
$a/b = 1$ için şekil bir Bernoulli Lemniscate'dir. Bu eğri, kartezyen düzleminin merkezinden geçmekte olup ∞ sembolüne benzer.

$a/b > 1$ için şekil iki ayrı konveks ovale ayrılır ve x-eksenini ayrıca $x = \pm\sqrt{a^2 - b^2}$ noktalarında keser.

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te sırasıyla a'nın ve b'nin sabit değerleri için Cassini ovalinin alabileceği şekiller görülmektedir.

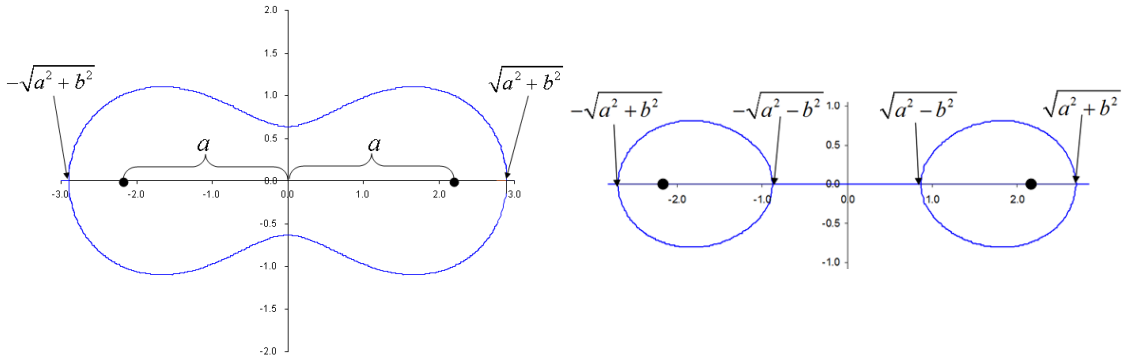


Şekil 4.3: Cassini ovalinin alabileceği farklı şekiller (a sabit, b değişken)



Şekil 4.4: Cassini ovalinin alabileceği farklı şekiller (b sabit, a değişken)

Şekil 4.5'te Cassini ovalinin x-ekseninde kestiği noktalar a/b oranının 1'den küçük ve büyük olma durumları için görülmektedir. $a/b>1$ için oval $\left[-\sqrt{a^2-b^2},\sqrt{a^2-b^2}\right]$ aralığında tanımsız olup x-eksenini dört ayrı noktada keser.



(*i*) (*ii*)

Şekil 4.5: (*i*) Cassini ovalinin $a/b\le 1$ için x-eksenini kestiği noktalar
(*ii*) Cassini ovalinin $a/b>1$ için x-eksenini kestiği noktalar

4.2.1. Cassini ovali alan hesabı

(4.6) denklemi y için çözülecek olursa;

$$y=f_C(x)=\pm\sqrt{-a^2-x^2\pm\sqrt{4x^2a^2+b^4}} \tag{4.10}$$

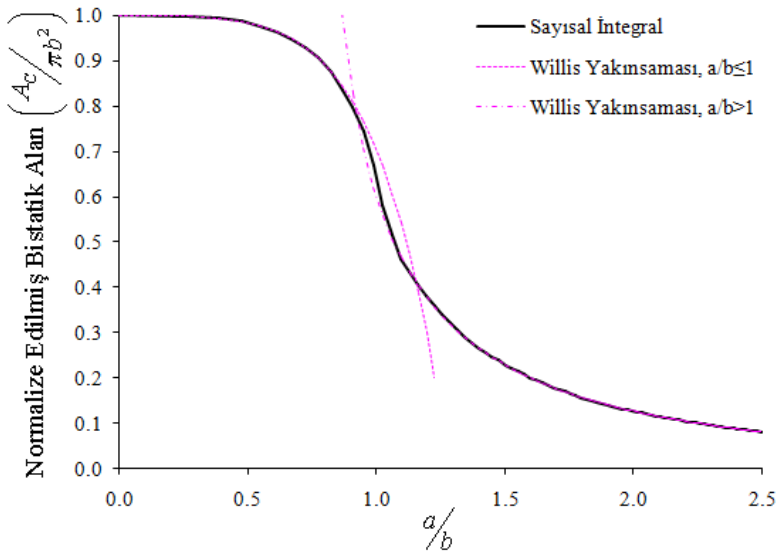
elde edilir. Cassini ovalinin alanı, A_C, aşağıda belirtilen sayısal integral yardımı ile hesaplanabilir:

$$A_C=\begin{cases}4\displaystyle\int_0^{\sqrt{a^2+b^2}} f_C(x)\partial x & ,a/b\le 1\\ 4\displaystyle\int_{\sqrt{a^2-b^2}}^{\sqrt{a^2+b^2}} f_C(x)\partial x & ,a/b>1\end{cases} \tag{4.11}$$

A_C'yi hesaplamak için ayrıca Willis [76] tarafından geliştirilen aşağıdaki yakınsama da kullanılabilir.

$$A_C \approx \begin{cases} \pi b^2 \left(1 - \dfrac{a^4}{4b^4} - \dfrac{3a^8}{64b^8}\right) & , a/b \le 1 \\ \dfrac{\pi b^4}{2a^2}\left(1 + \dfrac{b^4}{8a^4} + \dfrac{3b^8}{64a^8} + \dfrac{25b^{12}}{1024a^{12}}\right) & , a/b > 1 \end{cases} \tag{4.12}$$

Şekil 4.6'da Cassini ovali alanının sayısal integral ve Willis yakınsaması ile hesaplanarak monostatik tespit bölgesi alanı, πb^2'ye göre normalize edilmiş şekli görülmektedir. a/b=0 değeri için A_C en büyük değeri almakta, a/b'nin artışı ile azalmaktadır.



Şekil 4.6: Sayısal integral ve Willis yakınsaması ile hesaplanan bistatik alanın (Cassini ovali alanı) a/b oranına göre değişimi.

4.2.2. Cassini ovali çevre hesabı

Cassini ovali çevresi, P_C, alanda olduğu gibi a ve b parametrelerine bağlı olup ilk olarak Matz tarafından yapılan çalışmalarda üç yöntem kullanılarak yakınsanmıştır [77-79]. Bu

bölümde bu yakınsamalara ilave olarak geliştirilen hipergeometrik fonksiyonlar ve sayısal integral ile çevre hesaplamaları açıklanmıştır.

4.2.2.1. Matz yakınsamaları ile çevre hesabı

Aşağıda Cassini ovali çevresi P_C'nin, Matz tarafından üç farklı şekilde yakınsanmış hali görülmektedir.

İlk yakınsama [77]:

$$P_C \approx 2\pi\sqrt{\left(\frac{b^4}{b^2+a^2}\right)\left[1+\frac{\rho^2}{8}+\frac{15\rho^4}{256}+\frac{75\rho^6}{2048}+etc.\right]} \tag{4.13}$$

ve $\rho^2 = \dfrac{4b^2a^2}{(b^2+a^2)^2}$

İkinci yakınsama [78]:

$$\begin{aligned} P_C &\approx 4\left(\frac{2a^2-b^2}{b^2\sqrt{b^2-a^2}}\right)\int_0^{\sqrt{a^2+b^2}}\sqrt{\left(\frac{b^4(b^2-a^2)}{(2a^2-b^2)^2}\right)}dx \\ &\approx 2\left[\left(\frac{\sqrt{\left[b^4(b^2-a^2)+(b^2+a^2)(2a^2-b^2)^2\right]}}{b^2}\right)\right. \\ &\quad \sqrt{\left(\frac{(b^2+a^2)}{(b^2-a^2)}\right)}+\frac{b^2\sqrt{(b^2-a^2)}}{2a^2-b^2} \\ &\quad \left.\log\left(\frac{(2a^2-b^2)\sqrt{(b^2+a^2)}+\sqrt{\left[b^4(b^2-a^2)+(b^2+a^2)(2a^2-b^2)^2\right]}}{b^2\sqrt{(b^2-a^2)}}\right)\right] \end{aligned} \tag{4.14}$$

Üçüncü yakınsama [79]:

$a/b<1$ için:

$$P_C = 2\pi b\left\{1+\sum\left(\frac{1.3.5.7.....(2n-1)}{2.4.6.8.....2n}\right)^2\left[\sqrt{\left(1+\frac{a^2}{b^2}\right)-\left(1-\frac{a^2}{b^2}\right)}\right]^{2n}\right\} \tag{4.15}$$

$a/b=1$ için:

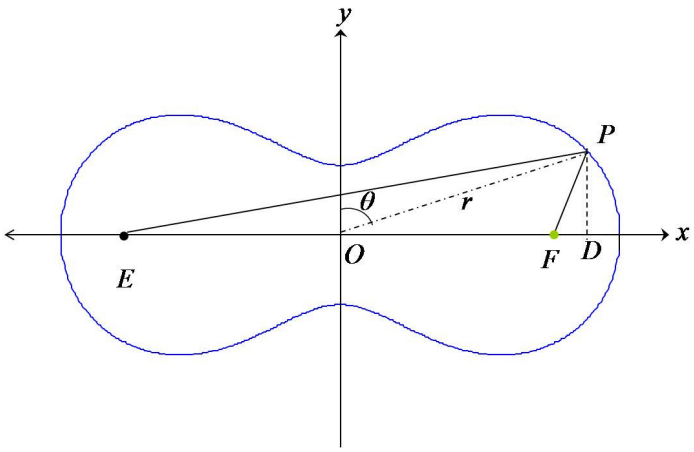
$$P_C = 2\pi a\left\{1+\sum\left(\frac{1.3.5.7.....(2n-1)}{2.4.6.8.....2n}\right)^2.2^n\right\} \tag{4.16}$$

$a/b>1$ için:

$$P_C = 2\pi a\left(\frac{b}{a}\right)^2\left\{1+\sum\left(\frac{1.3.5.7.....(2n-1)}{2.4.6.8.....2n}\right)^2\left[\sqrt{\left(1+\frac{b^2}{a^2}\right)-\left(1-\frac{b^2}{a^2}\right)}\right]^{2n}\right\} \tag{4.17}$$

4.2.2.2. Hipergeometrik fonksiyonlar ile çevre hesabı

Bu bölümde P_C'nin hipergeometrik fonksiyonlar ile hesaplanmasına ilişkin adımlar açıklanmıştır. Şekil 4.7'de Cassini ovali kartezyen düzlemi üzerinde görülmektedir. Çevrenin hipergeometrik fonksiyonlar ile hesaplanabilmesi için şekil üzerinde belirtilen bazı uzunluk ölçüleri ile ovalin polar denkleminden yararlanılmıştır.



Şekil 4.7: Cassini ovalinin kartezyen düzleminde gösterimi

Şekil 4.7'de, $OP = r$ ve $\angle POD = \left(\frac{1}{2}\pi - \theta\right)$ ise, $OD = x = r.\sin\theta$ ve $PD = y = r.\cos\theta$ olarak yazılabilir. (4.9) denkleminden yola çıkarak;

$$r^4 + 2a^2(1-2\sin^2\theta)r^2 = b^4 - a^4 \tag{4.18}$$

yazılabilir. (4.18) denklemini geliştirecek olursak;

$$\begin{aligned} &\cos 2\theta = \frac{(b^4-a^4)-r^4}{2a^2r^2}, \quad \therefore \sin 2\theta = \sqrt{\frac{4a^4r^4-[(b^4-a^4)-r^4]^2}{4a^4r^4}} \\ &\therefore \frac{\partial\theta}{\partial r} = \frac{(b^4-a^4)-r^4}{2a^2r^2\sin 2\theta}, \quad \left(\frac{r\partial\theta}{\partial r}\right)^2 = \frac{[(b^4-a^4)+r^4]^2}{4a^4r^4-[(b^4-a^4)-r^4]^2} \end{aligned} \tag{4.19}$$

ve

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{1}{2}\cos^{-1}\left(\frac{(b^4-a^4)-r^4}{2a^2r^2}\right)^2 = \cos^{-1}\left[\sqrt{\frac{(b^4-a^4)-r^4}{4a^2r^2}}+\frac{1}{2}\right] \\ &= \cos^{-1}\left(\frac{\sqrt{b^4-(a^2-r^2)^2}}{2ar}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{\sqrt{(a^2+r^2)^2-b^4}}{2ar}\right) \end{aligned} \tag{4.20}$$

yazılabilir. Bu durumda $\theta = 0$ ise $r = \pm\sqrt{b^2 - a^2} = \pm c_1$ ve $\theta = \frac{1}{2}\pi$ ise $r = \pm\sqrt{b^2 + a^2} = \pm c_2$ olarak ifade edilebilir. Cassini ovali birbirine eş dört yaydan oluştuğundan;

$$P_C = 4\int_{c_1}^{c_2} \sqrt{\left(\frac{4a^4r^4 - \left[(b^4 - a^4) - r^4\right]^2 + \left[(b^4 - a^4) + r^4\right]^2}{4a^4r^4 - \left[(b^4 - a^4) - r^4\right]^2} \right)} \partial r$$

$$= 8b^2 \int_{c_1}^{c_2} \frac{r^2 \partial r}{\sqrt{\left[(b^2 - a^2) + r^2\right]\left[(b^2 - a^2) - r^2\right]\left[r^2 + (b^2 - a^2)\right]\left[r^2 - (b^2 - a^2)\right]}} \tag{4.21}$$

$$= 8b^2 \int_{c_1}^{c_2} \frac{r^2 \partial r}{\sqrt{\left[(b^2 + a^2)^2 - r^4\right]\left[r^4 - (b^2 - a^2)^2\right]}}$$

olarak bulunur.

$$r^4 = (b^2 + a^2)^2 \cos^2\phi + (b^2 - a^2)^2 \sin^2\phi \tag{4.22}$$

şeklinde ifade edersek,

$$4r^3 dr = 2\left[-(b^2 + a^2)^2 + (b^2 - a^2)^2\right] \sin\phi \cos\phi d\phi \tag{4.23}$$

$$\therefore r^2 dr = \frac{-2b^2a^2 \sin\phi \cos\phi d\phi}{\left[(b^2 + a^2)^2 \cos^2\phi + (b^2 - a^2)^2 \sin^2\phi\right]^{1/4}} \tag{4.24}$$

elde edilir. (4.21) denklemini; (4.22) ve (4.24) denklemlerini kullanarak yeniden ifade edecek olursak:

$$P_C = 8b^2 \int_0^{\frac{1}{2}\pi} \frac{2b^2a^2\left[(b^2+a^2)^2\cos^2\phi+(b^2-a^2)^2\sin^2\phi\right]^{-1/4}\sin\phi\cos\phi\partial\phi}{\sqrt{\left\{\left[(b^2+a^2)^2-(b^2-a^2)^2\right]\sin^2\phi\right\}\left\{\left[(b^2+a^2)^2-(b^2-a^2)^2\right]\cos^2\phi\right\}}}$$

$$= 4b^2 \int_0^{\frac{1}{2}\pi} \frac{\partial\phi}{\left[(b^2+a^2)^2\cos^2\phi+(b^2-a^2)^2\sin^2\phi\right]^{1/4}}$$

$$= 4b^2 \int_0^{\frac{1}{2}\pi} \frac{\partial\phi}{(b^2+a^2)^2-\left[(b^2+a^2)^2-(b^2-a^2)^2\sin^2\phi\right]^{1/4}}$$

$$= 4b^2 \int_0^{\frac{1}{2}\pi} \frac{\partial\phi}{\left[(b^2+a^2)^2-4b^2a^2\sin^2\phi\right]^{1/4}}$$

$$= \frac{4b^2}{\sqrt{b^2+a^2}} \int_0^{\frac{1}{2}\pi} \frac{\partial\phi}{\left[1-\rho\sin^2\phi\right]^{1/4}} \tag{4.25}$$

ifadesi $\rho = \frac{4b^2a^2}{(b^2+a^2)^2}$ için elde edilir. Bu noktada P_C hipergeometrik seriler kullanılarak;

$$P_C = 2\pi b.\Pi(a,b) \tag{4.26}$$

ve

$$\Pi(a,b) = \frac{{}_2\mathrm{H}_1\left(\frac{1}{4},\frac{1}{2},1,\varepsilon\right)}{4\sqrt{1+\left(a/b\right)^2}} \tag{4.27}$$

olarak ifade edilebilir. (4.27) denkleminde ${}_2\mathrm{H}_1\left(\frac{1}{4},\frac{1}{2},1,\varepsilon\right)$ fonksiyonu $\alpha = \frac{1}{4}$, $\beta = \frac{1}{2}$, $\gamma = 1$ ve $\varepsilon = \frac{2\left(a/b\right)}{1+\left(a/b\right)^2}$ parametrelerine sahip Gauss-Hipergeometrik fonksiyonudur.

4.2.2.3. Sayısal integral ile çevre hesabı

Bu bölümde P_C'nin sayısal integraller ile hesaplanması yöntemi açıklanmıştır. Kartezyen düzlemde bir $f(x)$ fonksiyonunun $x=[a,b]$ arasındaki yay uzunluğu S, $S = \int_a^b \sqrt{1+\left[f'(x)\right]^2}\,\partial x$ formülü ile hesaplanır. Cassini ovali her iki eksene de simetrik olduğundan, merkez noktaları kartezyen düzleminde $(\pm a, 0)$ konumlarında olan bir ovalin tek bir bölge için hesaplanan yay uzunluğu dört ile çarpılarak P_C hesaplanabilir.

$$
\begin{aligned}
P_C &= 4\int_{x_l}^{x_u} \sqrt{1+\left[f_C'(x)\right]^2}\,\partial x \\
&= 4\int_{x_l}^{x_u} \sqrt{1+\left[\frac{1}{2}\frac{-2x+\frac{4xa^2}{\sqrt{4x^2a^2+b^4}}}{\sqrt{-a^2-x^2+\sqrt{4x^2a^2+b^4}}}\right]^2}\,\partial x \\
&= 4\int_{x_l}^{x_u} \sqrt{\frac{b^4(a^2-\sqrt{4x^2a^2+b^4})}{(4x^2a^2+b^4)(a^2+x^2-\sqrt{4x^2a^2+b^4})}}\,\partial x
\end{aligned}
\tag{4.28}
$$

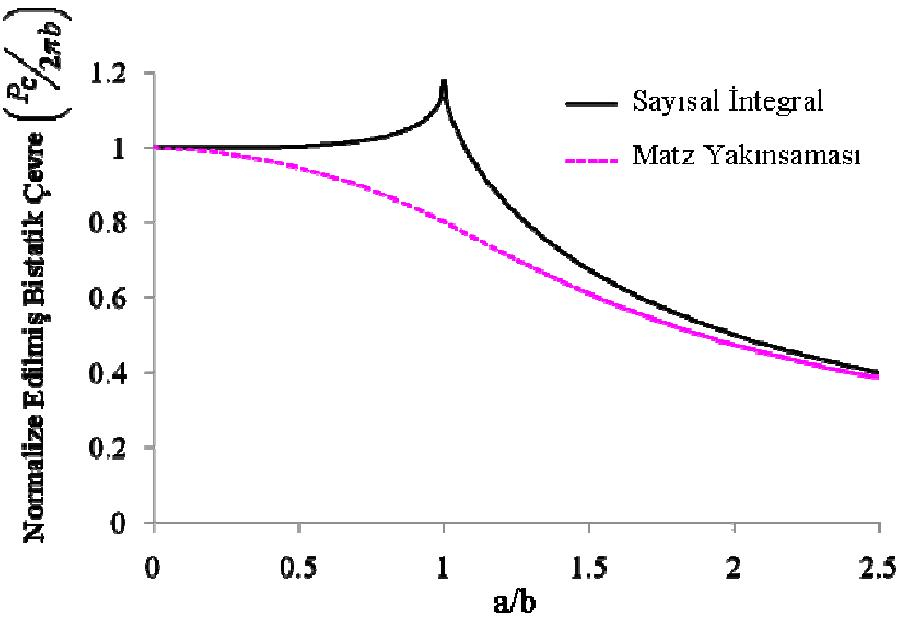
olup yukarıdaki denklemde $(x_l, x_u) = \begin{cases} \left(0, \sqrt{a^2+b^2}\right) & ,\frac{a}{b} \le 1 \\ \left(\sqrt{a^2-b^2}, \sqrt{a^2+b^2}\right) & ,1 < \frac{a}{b} \end{cases}$ değerlerini almaktadır. Bir başka ifadeyle, $f_C^S(x)$ fonksiyonu Cassini ovalinin S yay uzunluğu fonksiyonu ise,

$$P_C = 4\int_{x_l}^{x_u} f_C^S(x)\,\partial x \tag{4.29}$$

ve

$$f_C^S(x) = \sqrt{1+\left[f_C'(x)\right]^2} = \sqrt{\frac{b^4(a^2-\sqrt{4x^2a^2+b^4})}{(4x^2a^2+b^4)(a^2+x^2-\sqrt{4x^2a^2+b^4})}} \tag{4.30}$$

olarak yazılabilir.



Şekil 4.8: Sayısal integral ile birinci Matz yakınsaması ile hesaplanan bistatik çevrenin (Cassini ovali çevresi) *a*/*b* oranına göre değişimi

Şekil 4.8'de sayısal integral ve Matz yakınsaması ile hesaplanmış Cassini ovali çevresinin monostatik tespit bölgesi çevresi $2\pi b$'ye göre normalize edilmiş hali görülmektedir. P_C en büyük değerini *a*/*b*=1 için almakta, *a*/*b*'nin artışı ile keskin bir düşüş göstermektedir. Matz yakınsaması ise $a/b > 1{,}5$ için sayısal integral ile elde edilen değerler yakındır.

Bu bölümde bistatik ve multistatik sistemlerin tespit bölgelerinin Cassini ovalleri ile modellenebileceği, bu kapsamda bistatik sensörler tarafından tespit sağlanabilmesi için, hedefin kaynak ve alıcıya olan mesafeleri çarpımının eşdeğer monostatik tespit mesafesinin karesinden küçük olması gerektiği görülmüştür. Daha sonra Cassini ovallerinin temel geometrik özellikleri ile alan ve çevre hesaplamalarına ilişkin farklı

yöntem ve formüller açıklanmıştır. Çevre hesabı için sayısal integral ve Willis yakınsaması, alan hesabı için ise Matz yakınsamaları, hipergeometrik fonksiyonlar ve sayısal integral yöntemleri kullanılmıştır. İntegraller yardımıyla ifade edilen alan ve çevre değerlerinin kapalı formlarının olmaması nedeniyle söz konusu değerler sayısal integral yolu ile hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda ovalin en büyük alana $a/b=0$ değeri için, en büyük çevreye ise $a/b=1$ değeri için ulaştığı görülmüştür.

5. RASTGELE OLUŞTURULMUŞ BİSTATİK VE MULTİSTATİK SENSÖR SAHALARI

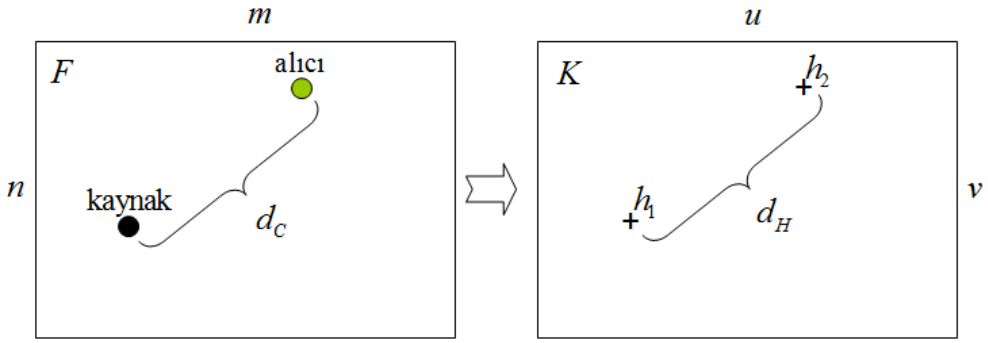
Herhangi bir sensör ağının etkinliği o ağda bulunan sensörlerin geometrik dizilişine, yani yerleşim düzenine bağlıdır. Bununla birlikte, konuya daha stratejik bir seviyeden bakılırsa, sensör ağlarının etkinliğin öncelikle kaynak miktarına, yani mevcut sensörlerin tip ve adedine bağlı olduğu görülür. Bu nedenle çalışmanın ilk bölümünde konu bu seviyede incelenmiş, sensör yerleşim düzeni ele alınmamış, mevcut tüm kaynak ve alıcıların sahaya tekbiçimli dağılımla rastgele şekilde yerleştirildiği varsayılmıştır. Bu temel varsayım altında bistatik ve multistatik sistemlerde sensör adedi, saha büyüklüğü ve tespit olasılığı arasındaki ilişki analitik yöntemlerle analiz edilmiştir. "Statik" kelimesinden de anlaşılacağı gibi, yapılan çalışma kapsamında sensörlerin sabit konumlarda bulunduğu, hareket etmediği varsayılmıştır. Takip eden bölümlerde ilk olarak rastgele oluşturulmuş bistatik sahalar, daha sonra rastgele oluşturulmuş multistatik sahalar incelenmiş, elde edilen tüm teorik sonuçlar MATLAB® programında yapılan Monte Carlo simülasyonları ile test edilmiştir. Yapılan tüm simülasyonlarda b=1 km kabul edilmiştir.

5.1. Rastgele Yerleştirilmiş Bistatik Sensörler

Bu bölümde m ve n boyutlarında dikdörtgen şeklindeki bir F sahasına bir kaynak ve bir alıcının rastgele yerleştirildiği varsayılmıştır. Bu varsayım altında sahada elde edilebilecek kaplamanın saha boyutu ve Eşdeğer Monostatik Tespit Menzili parametrelerine göre hesaplanması amaçlanmaktadır. Bu durumda sensörler tarafından elde edilecek saha kaplaması A_C ve kaplamanın beklenen değeri $E[A_C]$, sensörler arası mesafe, d_C'nin beklenen değeri $E[d_C]$'ye bağlıdır. $E[d_C]$ ise sahanın boyutları, m ve n parametrelerine göre değişmektedir. Bu nedenle $E[A_C]$'nin hesaplanabilmesi için öncelikle $E[d_C]$'nin m ve n değerlerine bağlı olarak hesaplanması gerekmektedir.

5.1.1. Analitik çözüm

Çözümün ilk adımında rastgele yerleştirilmiş bistatik sensörler arasındaki mesafenin beklenen değerini bulma problemi, Şekil 5.1'de belirtilen dikdörtgen şeklindeki bir sahadan rastgele seçilecek iki nokta arasındaki mesafenin beklenen değerini bulma problemine haritalanmış, böylece problem geometrik bir problem halini almıştır.



Şekil 5.1: Bistatik sensörler arasındaki mesafenin beklenen değerini bulma probleminin iki nokta arasındaki mesafenin beklenen değerini bulma problemine haritalanması

Bu kapsamda; m, n boyutlarındaki F sahası, u, v boyutlarındaki K sahasına; kaynak ve alıcı konumları, h_1 ve h_2 noktalarına; sensörler arası mesafe d_C, noktalar arası mesafe d_H'ye ve sensörler arası mesafenin beklenen değeri $E[d_C]$, noktalar arası mesafenin beklenen değeri $E[d_H]$'ye haritalanmıştır (Bkz. Tablo 5.1).

Tablo 5.1: Bistatik sensörler arasındaki mesafenin beklenen değerini bulma probleminin iki nokta arasındaki mesafenin beklenen değerini bulma problemine haritalanması

Bistatik sensörler arasındaki mesafenin beklenen değerini bulma problemi	**İki nokta arasındaki mesafenin beklenen değerini bulma problemi**
m, n boyutlarına sahip F sahası	u, v boyutlarına sahip K sahası
Kaynak ve alıcı konumları	h_1 ve h_2 noktalarının konumları
Sensörler arası mesafe d_C	Noktalar arası mesafe d_H
Sensörler arası mesafenin beklenen değeri $E[d_C]$	Noktalar arası mesafenin beklenen değeri $E[d_H]$

u, v boyutlarındaki K sahasından rastgele seçilen h_1 ve h_2 noktaları arasındaki mesafe d_H ve $s = {d_H}^2$ ise, s'nin olasılık yoğunluk fonksiyonu $g(s)$,

$$g(s)=\begin{cases} -2\dfrac{\sqrt{s}}{u^2v}-2\dfrac{\sqrt{s}}{uv^2}+\dfrac{\pi}{uv}+\dfrac{s}{u^2v^2} & ,0<s\le u^2 \\ -2\dfrac{\sqrt{s}}{u^2v}-\dfrac{1}{v^2}+\dfrac{2}{uv}\arcsin\left(\dfrac{u}{\sqrt{s}}\right)+\dfrac{2}{u^2v}\sqrt{s-u^2} & ,u^2<s\le v^2 \\ \dfrac{1}{v^2}+\dfrac{2}{uv}\arcsin\left(\dfrac{u}{\sqrt{s}}\right)+\dfrac{2}{u^2v}\sqrt{s-u^2} & \\ -\dfrac{1}{u^2}+\dfrac{2}{uv}\arcsin\left(\dfrac{v}{\sqrt{s}}\right)+\dfrac{2}{uv^2}\sqrt{s-v^2} & \\ -\dfrac{\pi}{uv}-\dfrac{s}{u^2v^2} & ,v^2<s\le u^2+v^2 \end{cases} \tag{5.1}$$

olarak ifade edilir [80]. $s=d_H{}^2$ olduğundan $g(d_H)$ aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$g(d_H)=g(d_H{}^2)\frac{\partial s}{\partial d_H}=2d_H.g(d_H{}^2)=2d_H.g(s) \tag{5.2}$$

Mesafenin beklenen değeri ise

$$E[d_H]=\int_0^{u^2+v^2}\sqrt{s}.g(s).\partial s=\int_0^{\sqrt{u^2+v^2}}d_H.g(d_H).\partial d_H \tag{5.3}$$

olarak hesaplanabilir. Bu çözümü bistatik sistem problemine haritalayacak olursak; $s=d_C{}^2$ ise, s'nin olasılık yoğunluk fonksiyonu;

$$g(s)=\begin{cases} -2\dfrac{\sqrt{s}}{m^2 n}-2\dfrac{\sqrt{s}}{mn^2}+\dfrac{\pi}{mn}+\dfrac{s}{m^2 n^2} & ,0<s\le m^2 \\ -2\dfrac{\sqrt{s}}{m^2 n}-\dfrac{1}{n^2}+\dfrac{2}{mn}\arcsin\left(\dfrac{m}{\sqrt{s}}\right)+\dfrac{2}{m^2 n}\sqrt{s-m^2} & ,m^2<s\le n^2 \\ \dfrac{1}{n^2}+\dfrac{2}{mn}\arcsin\left(\dfrac{m}{\sqrt{s}}\right)+\dfrac{2}{m^2 n}\sqrt{s-m^2} & \\ -\dfrac{1}{m^2}+\dfrac{2}{mn}\arcsin\left(\dfrac{n}{\sqrt{s}}\right)+\dfrac{2}{mn^2}\sqrt{s-n^2} & \\ -\dfrac{\pi}{mn}-\dfrac{s}{m^2 n^2} & ,n^2<s\le m^2+n^2 \end{cases} \tag{5.4}$$

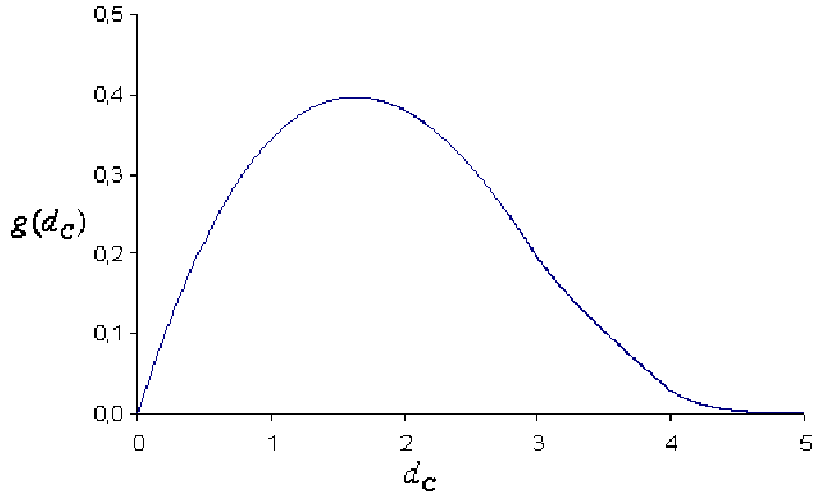
olarak ifade edilir. Benzer şekilde;

$$g(d_C)=g(d_C{}^2)\frac{\partial s}{\partial d_C}=2d_C.g(d_C{}^2)=2d_C.g(s) \tag{5.5}$$

ve

$$E[d_C]=\int_0^{m^2+n^2}\sqrt{s}.g(s).\partial s=\int_0^{\sqrt{m^2+n^2}}d_C.g(d_C).\partial d_C \tag{5.6}$$

olarak hesaplanır. Şekil 5.2'de boyutları *m*=3 km, *n*=4 km olan *F* sahasına rastgele yerleştirilen bistatik sensörler arasındaki mesafenin olasılık yoğunluk fonksiyonu görülmektedir.



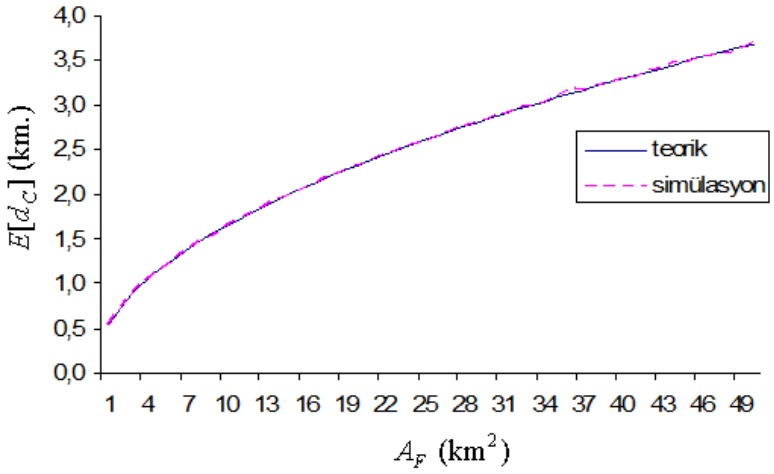
Şekil 5.2: *m*=3 km, *n*=4 km için sensörler arasındaki mesafenin olasılık yoğunluk fonksiyonu

$E[d_C]$'nin hesaplanmasını takiben $E[A_C]$, (4.11) denkleminin (5.7) denkleminde yerine konmasıyla hesaplanır.

$$E[A_C] = \int_{-\infty}^{\infty} A_C . g(A_C) \partial A_C$$
$$= 4 \int_{0}^{\sqrt{m^2+n^2}} \int_{0}^{\sqrt{\frac{s}{4}+b^2}} \sqrt{-s - x^2 + \sqrt{4x^2 s + b^4}} . g(s) . \partial x \partial s \qquad (5.7)$$

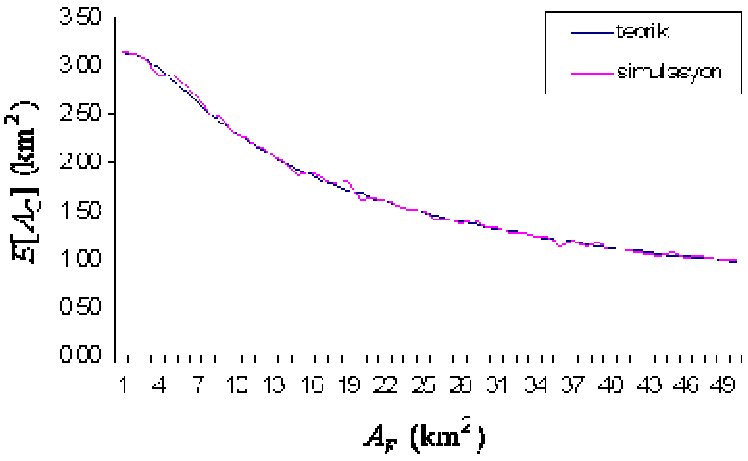
5.1.2. Simülasyon sonuçları

Yapılan Monte Carlo simülasyonu kapsamında, $m = n = \sqrt{A_F}$ olacak şekilde oluşturulan kare şeklindeki sahalarda rastgele olarak belirlenen nokta çiftleri arasındaki mesafelerin (d_H) ortalaması alınmış ve elde edilen sonuçlar teorik değerlerle karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda $A_F = 1, 2, ..., 50 \text{ km}^2$ için rastgele seçilen 10^6 adet (h_1, h_2) nokta çifti arasındaki mesafelerin aritmetik ortalaması, $\overline{d}_H$ ile (5.6) fonksiyonu değerleri Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3: Saha alanına göre sensörler arası beklenen mesafe

Benzer şekilde $E[d_C]$ simülasyonu kapsamında rastgele belirlenen nokta çiftleri esas alınarak oluşturulan bistatik alanların aritmetik ortalamaları ile (5.7) fonksiyonundan elde edilen teorik değerler Şekil 5.4'te görülmektedir.



Şekil 5.4: Saha alanına göre beklenen kaplama alanı

Her iki simülasyonda da elde edilen değerlerin teorik değerlere çok yakın olduğu, A_F'nin artmasıyla birlikte $E[d_C]$'nin arttığı, $E[A_C]$'nin ise azaldığı görülmektedir. Cassini ovali alanının sensörler arası mesafeyle birlikte azaldığı gözönüne alındığında elde edilen sonuçların beklenen şekilde olduğu görülmektedir.

5.2. Rastgele Yerleştirilmiş Multistatik Sensörler

Bu bölümde, *b* eşdeğer monostatik tespit mesafesine sahip rastgele yerleştirilmiş kaynak ve alıcıları ihtiva eden *F* sahasının Poisson sahası özelliklerini taşıdığı varsayılmıştır. Bu kapsamda, incelenecek multistatik sensör sahası, kaynaklar için *g*, alıcılar için ise *h* yoğunluğunda olan birbirinden bağımsız iki-boyutlu iki ayrı Poisson sahasından oluşmaktadır.

5.2.1. Poisson sahaları

İki-boyutlu Öklit uzayında bulunan bir Poisson sahası, birim alanda ortalama nokta sayısını belirten λ parametresi ile ifade edilmektedir. *a* sahası içerisindeki her küçük alan, λa olasılığı ile bir hedef içermekte, bu alan yeterince küçük seçildiğinde birden fazla hedef içerme olasılığı göz ardı edilebilecek seviyede küçük olmaktadır. Bu durumda, N_A adet nokta içeren *A* sahasını *A*/*K* alanına sahip birbirinden bağımsız *K* parçaya bölersek, *A* alanında hiçbir noktanın bulunmama olasılığı,

$$P(N_A = 0) = \lim\left(1 - \lambda \frac{A}{K}\right)^K = e^{-\lambda A} \tag{5.8}$$

olarak hesaplanır [81]. *A* alanında *n* adet nokta bulunması olasılığı:

$$P(N_A = n) = \frac{(\lambda A)^n}{n!} e^{-\lambda A} \qquad n = 0,1,2,... \tag{5.9}$$

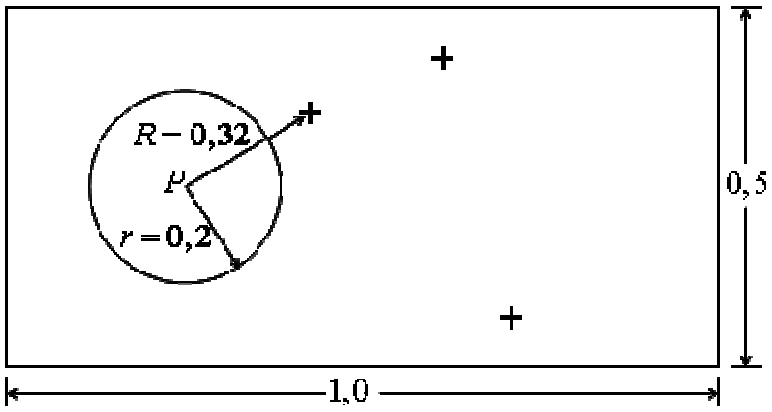
(5.9) denklemi Poisson dağılımı fonksiyonu olduğundan bu tür sahalar Poisson sahaları olarak isimlendirilir.

P, *A* sahası üzerindeki herhangi bir konum ve bu konumun kendisine en yakın noktaya olan mesafesi *R* olsun. *P* noktasına *r* mesafesinden daha yakın bulunan noktaların

toplam sayısı N_r ise, $R > r$ ile $N_r = 0$ olayları eş olaylardır. r yarıçaplı bir dairenin alanı πr^2 olduğundan;

$$P(R > r) = P(N_r = 0) = \mathrm{e}^{-\lambda \pi r^2} \tag{5.10}$$

olur [82]. Şekil 5.5'te $\lambda = 5,2$ adet/birim saha yoğunluğuna sahip bir Poisson sahası görülmektedir. İlk olarak *P* noktası etrafına *r*=0,2 yarıçaplı bir daire çizilmiş, daha sonra ortalaması 2,6 olan Poisson dağılımından örnekleme yapılmış (örnek 3 çıkmıştır) ve noktalar birbirlerinden bağımsız olarak sahaya rastgele yerleştirilmiştir. Bu örnekte noktalardan hiçbiri dairenin içinde değildir ve *R*=0,32'dir. $P(R > 0,2)$ değeri, bu özelliklerde binlerce Poisson sahası simüle edilerek hesaplanabileceği gibi, (5.10) denklemi kullanılarak $P(R > 0,2) = e^{-(5,2)\pi(0,2)^2} = 0,52$ olarak kolayca hesaplanabilir.



Şekil 5.5: Dikdörtgen şeklindeki bir sahada oluşturulan örnek bir Poisson sahası

Poisson sahalarına ait iki önemli özellik daha aşağıda belirtilmiştir:

λ yoğunluğuna sahip bir Poisson sahasının, μ yoğunluğuna sahip başka bir Poisson sahası ile birleşmesi sonucu ortaya çıkan yeni saha, $\lambda+\mu$ yoğunluğuna sahip yeni bir Poisson sahasıdır. μ yoğunluğuna sahip bir Poisson sahasındaki her noktanın, birbirlerinden bağımsız olarak *p* olasılığı ile sahadan çıkarılması sonucu ortaya çıkan yeni saha, $\lambda(1-p)$ yoğunluğuna sahip yeni bir Poisson sahasıdır.

5.2.2. Multistatik sensörler ile tespit olasılığı

Hedefin bistatik bir sensör çifti tarafından tespit edilebilmesi, (4.4) denklemi gereği söz konusu hedefin sensörlere olan mesafelerinin çarpımının b^2'den küçük veya büyük olması durumlarına bağlıdır (Kurabiye Kalıbı Tespit Modeli). Q, en küçük mesafe çarpımının b^2'den büyük olma olasılığı, yani hedefin tespit edilmeme olasılığı olarak tanımlanırsa, hedefin tespit olasılığı, PoD, $1-Q$'ya eşit olur.

Kaynak ve alıcılar sırasıyla g ve h yoğunluklarında iki Poisson sahası oluşturduğundan, seçilecek her $r \geq 0$ için (5.10) denklemi kullanılarak $P(R_1 > r) = \mathrm{e}^{-\pi g r^2}$ ve $P(R_2 > r) = \mathrm{e}^{-\pi h r^2}$ eşitlikleri yazılabilir. Her iki durumda da, hedefin sensörlerden herhangi birisine olan en yakın mesafesinin r'den büyük olması durumu, hedefin sensörlerin etrafında oluşturulacak r yarıçaplı dairelerin içinde bulunmaması durumuna denk olduğundan yapılan hesaplamalarda Poisson rassal sayısının 0'a eşit olma olasılığı kullanılmıştır. R_1 ve R_2 birbirlerinden bağımsız olduklarından;

$$\begin{aligned} Q &= \int_0^\infty P(R_1 > \frac{b^2}{r}) f_{R_2}(r) \partial r \\ &= \int_0^\infty \mathrm{e}^{-\frac{\pi g b^4}{r^2}} 2\pi h r \, \mathrm{e}^{-\pi h r^2} \, \partial r \end{aligned} \tag{5.11}$$

olarak ifade edilebilir. $s = \pi g b^2$, $t = \pi h b^2$, $x = \pi h r^2$ olarak tanımlanır ve x, s, ile t (5.11) denkleminde yerine koyulursa,

$$Q = \int_0^\infty \mathrm{e}^{-(\frac{st}{x} + x)} \partial x = y K_1(y) \tag{5.12}$$

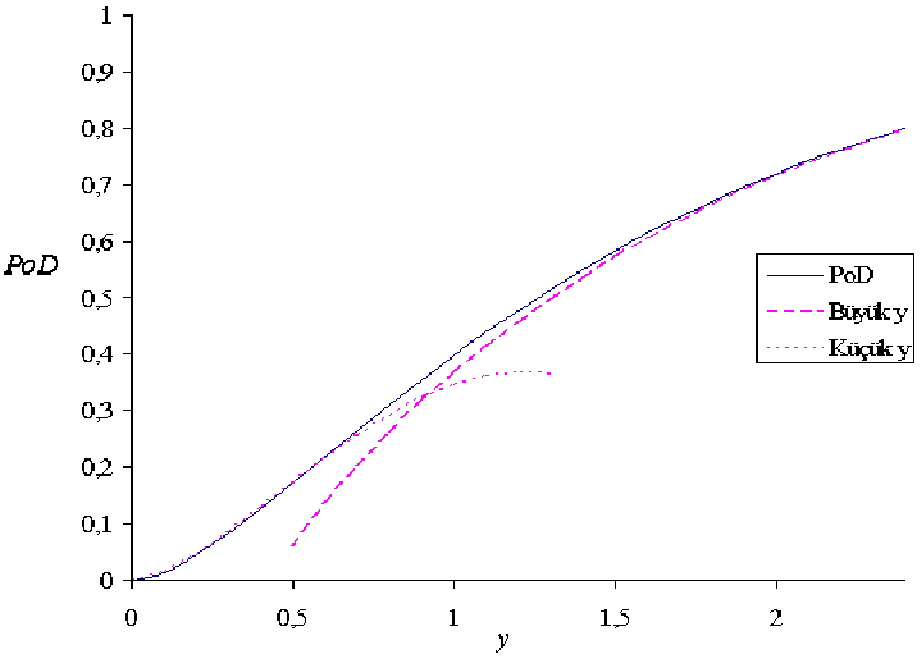
elde edilir. (5.12) denkleminde, $y = 2\sqrt{st}$ ve $K_1(y)$ ise 1.dereceden modifiye edilmiş Bessel fonksiyonudur (Microsoft Excel™'de BESSELK(y,1)). Bu durumda hedef tespit olasılığı, $PoD(y)$ aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$PoD(y) = 1 - Q = 1 - yK_1(y) \tag{5.13}$$

(5.13) denkleminde de görüldüğü üzere multistatik sistemlerde hedef tespit olasılığı "çaba yoğunluğu" olarak isimlendirilebilecek y parametresine bağlıdır. $PoD(y)$, Abramovitz ve Stegun'un [82] çalışması kullanılarak yakınsanacak olursa, y'nin küçük $(y \tilde{\leq} 0,9)$ ve büyük $(y \tilde{>} 0,9)$ olma durumlarına göre iki ayrı formül elde edilebilir.

$$PoD(y) \approx \begin{cases} -\dfrac{y^2}{2}\ln\left(\dfrac{y}{2}\right) & , y \text{ küçük} \\ 1 - \sqrt{\dfrac{\pi y}{2}}\, e^{-y}\left(1 + \dfrac{3}{8y}\right) & , y \text{ büyük} \end{cases} \tag{5.14}$$

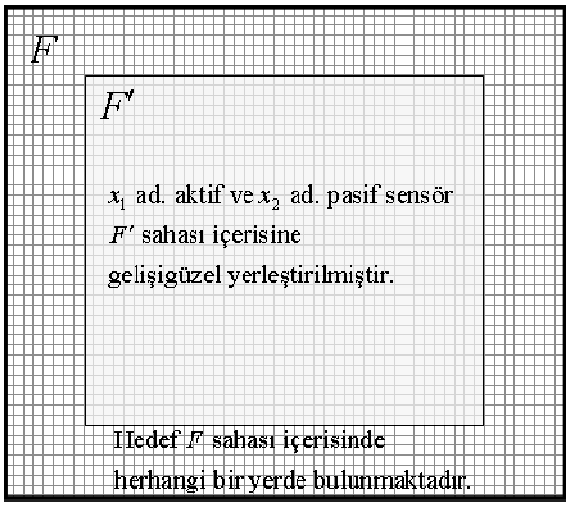
Şekil 5.6'da $PoD(y)$, y'nin küçük ve büyük değerlerine ait yakınsamaları ile birlikte görülmektedir.



Şekil 5.6: $PoD(y)$'nin küçük ve büyük y yakınsamaları

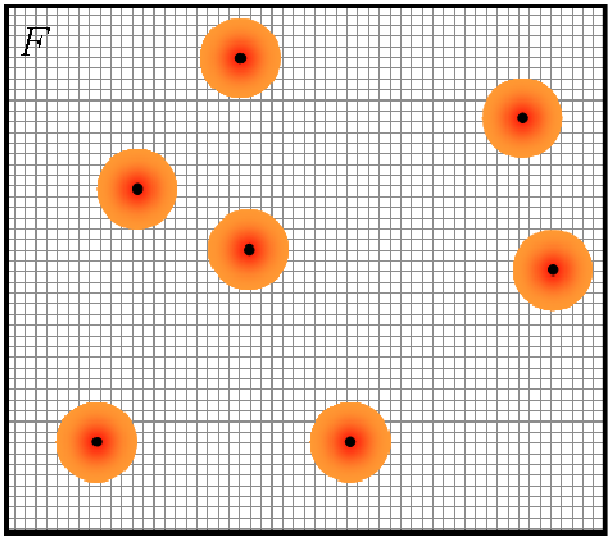
5.2.3. Optimum saha büyüklüğünün tespiti

Bu bölümde x_1 adet kaynak ve x_2 adet alıcının F' sahasına, F' sahasının kendisinden daha büyük bir F sahası içine yerleştirildiği, hedefin ise F sahası içinde herhangi bir konumda bulunduğu varsayılmıştır. Bu varsayım altında hedef tespit olasılığını en büyütecek F' sahası genişliğinin analitik yöntemlerle hesaplanması amaçlanmıştır.



Şekil 5.7: F ve F' sahaları

Bu problem öncelikle monostatik sistemler için incelenecek olursa, F' için en uygun seçimin F sahası içinde seçilecek en büyük saha, yani F'nin kendisi olduğu görülür. Bu şekilde sensörler tüm sahaya rastgele yayılarak disk şeklindeki tespit bölgelerinin birbirleri ile çakışması sonucu ortaya çıkabilecek saha kaplaması kayıpları en küçüklenir (Bkz. Şekil 5.8). Ancak, y'nin küçük değerleri için $PoD(y)$ konveks bir fonksiyon değildir. Multistatik sistemlerde, Cassini ovali ile ifade edilen tespit bölgeleri, sensörler arasındaki mesafeye bağlı olarak farklı şekil ve alanlara sahip olduğundan, bazı durumlarda sensörlerin tüm F sahasına yayılması yerine bu sahanın belirli bir bölgesinde yoğunlaştırılması kaplanan sahayı ve dolayısı ile hedef tespit olasılığını artırabilir. Bu da monostatik sistemler için önerilen çözümün multistatik sistemler için her zaman geçerli olmayacağı anlamına gelir.



Şekil 5.8: Monostatik sensörlerin F sahasına rastgele yerleştirilmesi

Bu bölümdeki diğer iki varsayım: hedef F' sahasının dışında ise hiçbir zaman tespit edilemeyecek, F' sahasının içinde ise $g=\frac{x_1}{A_{F'}}$ ve $h=\frac{x_2}{A_{F'}}$ olmak üzere iki farklı Poisson sahası ile karşı karşıya kalacaktır. Bu varsayımlardan ilki, gerçek durumda hedef eğer F' sahasına çok yakınsa tespit edilebileceğinden iyimser, ikincisi ise, F' sahasının içinde olup kenarlara yakın bulunan hedef tam anlamıyla bir Poisson sahası ile karşı karşıya kalmadığından kötümser olarak nitelendirilebilir. Özellikle F' sahasının büyük olduğu durumlarda söz konusu varsayımların birbirini nötrlemesi muhtemel olup bu husus göz ardı edilebilir olduğundan hesaplamalara dahil edilmemiştir.

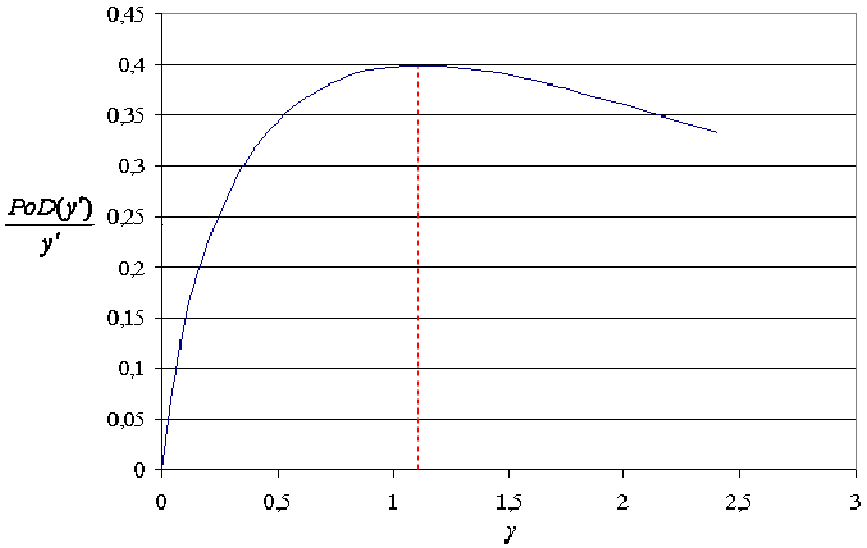
Hedefin F' içinde olma olasılığı $\frac{A_{F'}}{A_F}$, F' içindeki kaynak ve alıcı yoğunluklarının çarpımı $gh=\frac{x_1x_2}{(A_{F'})^2}$ ise F' dahilindeki çaba yoğunluğu $y'=\frac{2\pi b^2}{A_{F'}}\sqrt{x_1x_2}$ olarak hesaplanır. Koşulsuz tespit olasılığı:

$$PoD=\frac{A_{F'}}{A_F}PoD(y')=\frac{2\pi b^2\sqrt{x_1x_2}}{A_F}\cdot\frac{PoD(y')}{y'}\equiv y\frac{PoD(y')}{y'} \tag{5.15}$$

olarak hesaplanır. Amacımız $\frac{PoD(y')}{y'}$ oranını en büyütecek $A_{F'}$ değerini belirlemektir. Şekil 5.9'da sözkonusu oranı en büyüten y' değerinin 1,1, en büyütülen oranın ise 0,4 olduğu görülmektedir. $A_{F'}$, A_F'den büyük olamayacağından y' değeri de y'den büyük olamayacaktır. Bu durumda en büyütülen tespit olasılığı (5.14) fonksiyonu yardımıyla elde edilebilir. Optimize edilmiş tespit olasılığına $PoD^*(y)$ dersek;

$$PoD^*(y) \equiv \begin{cases} 0,4\,y & , y \le 1.1 \\ PoD(y) & , y > 1.1 \end{cases} \tag{5.16}$$

elde edilir.



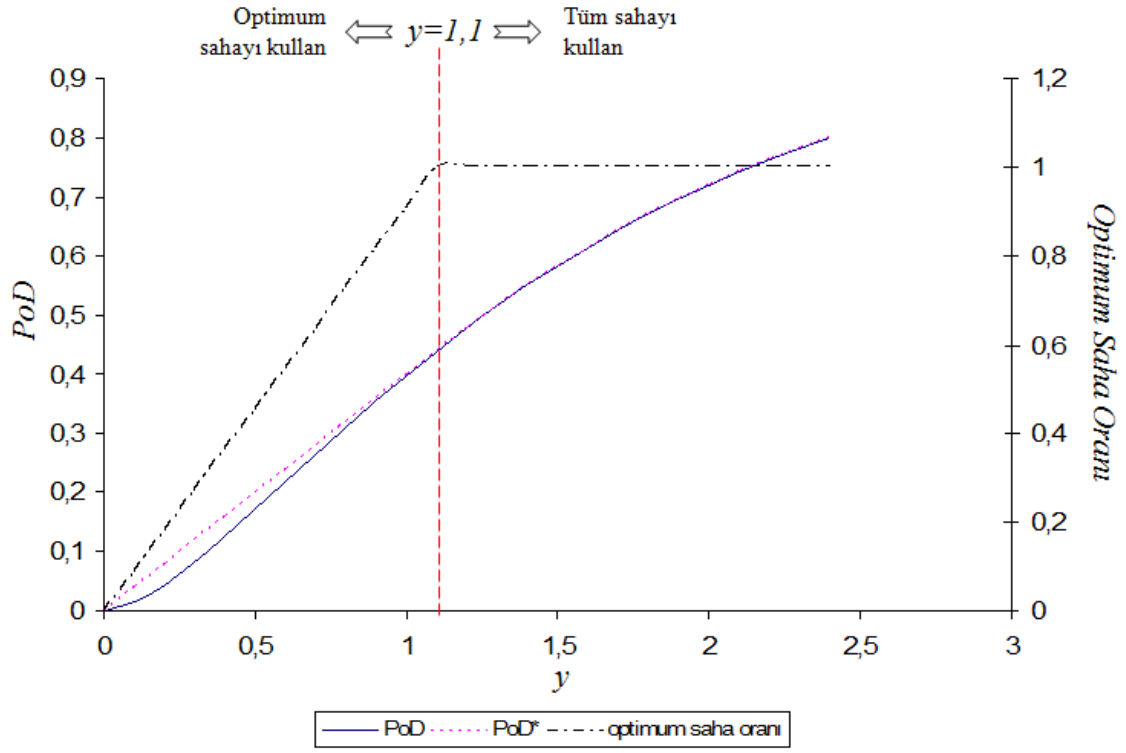
Şekil 5.9: $PoD(y')/y'$ grafiği, birim çaba için elde edilen tespit olasılığı

Örnek: Eşdeğer monostatik tespit mesafesi b=1 km ve arama yapılacak F sahası alanı $A_F = 200\ \text{km}^2$ olarak belirlenmiştir. Sahada $x_1 = 20$ adet kaynak ve $x_2 = 40$ adet alıcı ile arama icra edilecek ise $y = \frac{2\pi b^2}{A_F}\sqrt{x_1 x_2} = 0,89 < 1,1$ olarak hesaplanır.

(5.16) fonksiyonuna göre optimum tespit olasılığı, sensörlerin F sahasının içindeki $\frac{0,89}{1,1}=0,80$'lik kısma yerleştirilmesiyle $PoD^*(0,89)=0,36$ olarak hesaplanır.

Alıcı adedi $x_2=160$'ya çıkartılırsa $y=1,78>1,1$ elde edilir ve sensörlerin tüm F sahasına yerleştirilmesi sonucunda $PoD^*(1,78)=0,67$ olarak hesaplanır.

Benzer şekilde bu kez alıcı adedi $x_2=10$'a düşürülürse, $y=0,44<1,1$ elde edilir ve sensörlerin F sahasının $\frac{0,44}{1,1}=0,40$'lık kısmına yerleştirilmesiyle $PoD^*(0,44)=0,18$ olarak hesaplanır. Eğer sensörler sahanın tümüne yayılırsa tespit olasılığı $PoD(0,44)=0,15$'e düşer.



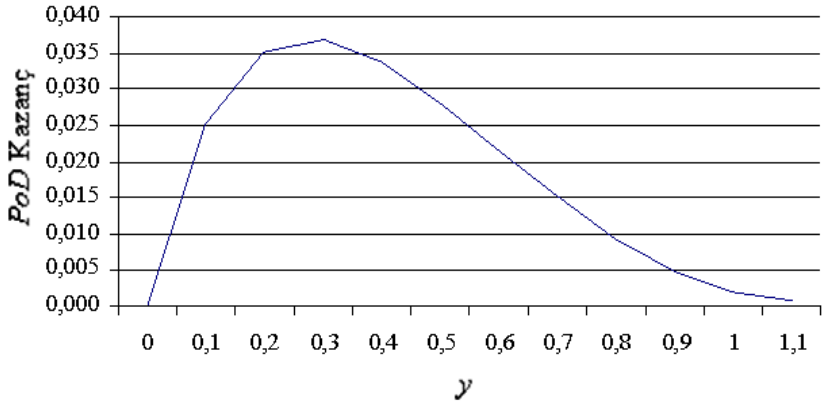
Şekil 5.10: y çaba yoğunluğu parametresine göre PoD, PoD^* ve Optimum Saha Oranı

Şekil 5.10'da sol eksen üzerinde, sensörlerin tüm sahaya yayılması ile elde edilecek hedef tespit olasılığını gösteren *PoD* fonksiyonu, sensörlerin optimum orandaki sahada kullanılması sonucu elde edilecek hedef tespit olasılığını gösteren PoD^* fonksiyonu, sağ eksen üzerinde ise y değerine göre kullanılması gereken optimum saha oranı görülmektedir. y çaba yoğunluğu parametresinin 1,1'den küçük olması durumunda kullanılması gereken $A_{F'}/A_F$ oranı sola doğru doğrusal olarak azalmaktadır. $A_{F'}/A_F$ oranının uygulanması sonucunda her zaman için $PoD^* \geq PoD$ olmaktadır. $y < 1{,}1$ için Şekil 5.10'da gösterilen *PoD* ve PoD^* fonksiyonlarına ilişkin değerler ve aralarındaki fark Tablo 5.2'de belirtilmiştir.

Tablo 5.2: y çaba yoğunluğu parametresine göre *PoD*, PoD^*, *PoD* Kazanç ve Optimum Saha Oranı Değerleri

y	PoD	PoD*	PoD Kazanç	Optimum Saha Oranı
0	0,000	0,000	0,000	0,00
0,1	0,015	0,040	0,025	0,09
0,2	0,045	0,080	0,035	0,18
0,3	0,083	0,120	0,037	0,27
0,4	0,126	0,160	0,034	0,36
0,5	0,172	0,200	0,028	0,45
0,6	0,218	0,240	0,022	0,55
0,7	0,265	0,280	0,015	0,64
0,8	0,311	0,320	0,009	0,73
0,9	0,355	0,360	0,005	0,82
1	0,398	0,400	0,002	0,909
1,1	0,439	0,440	0,001	1,000

Optimum saha oranının kullanılması sonucunda tespit olasılığının artışı Şekil 5.11'deki *PoD* kazanç fonksiyonu ile gösterilmiştir. En büyük kazancın y=0,3 için 0,037 olduğu görülmektedir.



Şekil 5.11: $y \le 1{,}1$ için optimum F'/F oranı kullanılması durumunda elde edilecek *PoD* kazanç değerleri

5.2.4. Eşdeğer saha kaplaması

F sahasındaki herhangi bir (*x,y*) noktasında bulunan hedefin tespit edilme olasılığı, söz konusu noktanın sensörlerin tespit bölgesi, *C*, içinde olup olmama olasılığı, $P\{(x,y) \in C\}$'ye bağlıdır. (*x,y*) noktası için geçerli olan bu olasılık tüm düzlem için toplanır ve bu toplama "Eşdeğer Saha Kaplaması (Equivalent Area Coverage-EAC)" denirse, tespit olasılığı, *PoD*;

$$PoD = \frac{EAC}{A_F} \tag{5.17}$$

olarak ifade edilir. Bu durumda sabit bir A_F değeri için *EAC*'nin en büyütülmesi hedef tespit olasılığını da en büyütecektir. Monostatik sistemler için *EAC*'nin en büyütülmesi çok pratik bir şekilde, sensörlerin sahaya kaplama bölgeleri birbirleri ile çakışmayacak şekilde yayılması ile elde edilir. Multistatik sistemlerde ise *EAC*,

$$\begin{aligned} EAC = PoD.A_F &= \frac{2\pi b^2 \sqrt{x_1 x_2}}{A_F} \cdot \frac{PoD(y')}{y'} \cdot A_F \\ &= 2\pi b^2 \sqrt{x_1 x_2} \cdot \frac{PoD(y')}{y'} \end{aligned} \tag{5.18}$$

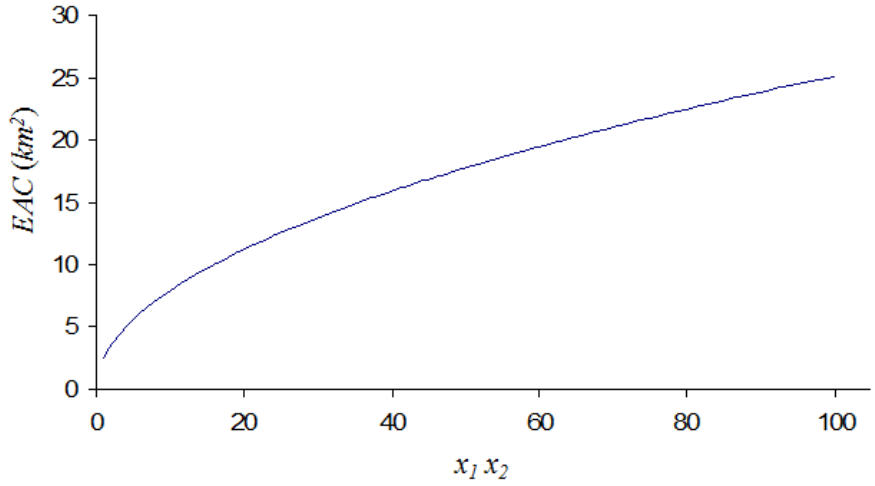
olarak tespit edilir. Sahanın kaplanan kısmındaki çaba yoğunluğu 1,1 olarak optimize edilir ise o sahaya ilişkin *EAC*, (5.16) denklemi kullanılarak:

$$EAC = (0,4)2\pi b^2 \sqrt{x_1 x_2} \tag{5.19}$$

olarak hesaplanır. Bu durumda *F* sahasında, istenen düzeyde bir kaplama sağlamak için ihtiyaç duyulan sensör sayısı (5.20) denklemi ile belirlenebilir.

$$x_1 x_2 = \frac{EAC^2}{(0,64)\pi^2 b^4} \tag{5.20}$$

Kaynak ve alıcı sayılarının çarpımına $(x_1 x_2)$ göre elde edilebilecek eşdeğer saha kaplaması (*EAC*) Şekil 5.12'de görülmektedir.



Şekil 5.12: Sensör sayısı ve *EAC* ilişkisi

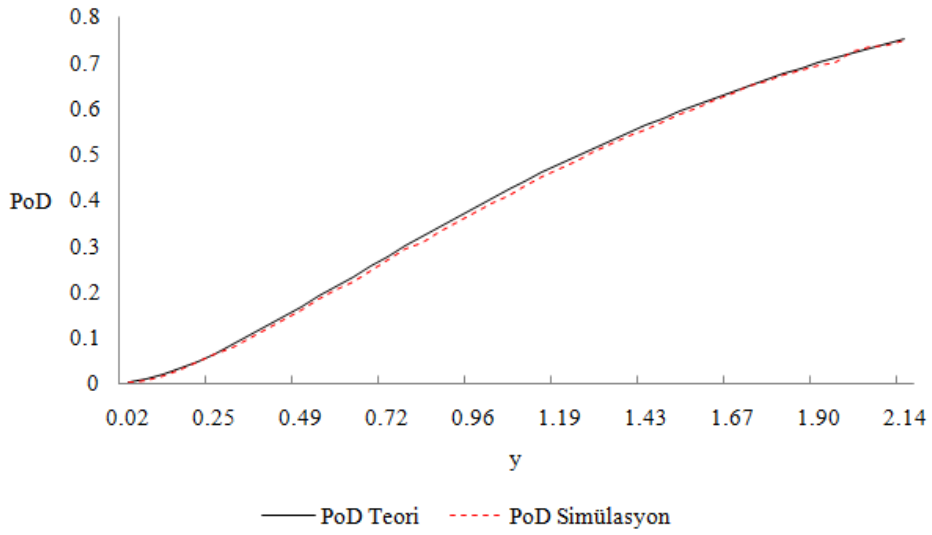
5.2.5. Simülasyon sonuçları

Yapılan ilk grup simülasyonda A_F alanına sahip *m*, *n* boyutlarındaki dikdörtgen şeklindeki *F* sahası içine yerleştirilen hedefler ile *F* sahası içindeki $A_{F'}$ alanına sahip

m-2b, n-2b boyutlarındaki dikdörtgen şeklindeki F' sahasına rastgele yerleştirilen multistatik sensörler ile elde edilen PoD değeri hesaplanmış, elde edilen sonuçlar (5.14) denklemi ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon başlangıcında $n_F \sim Poisson(\lambda)$, $\lambda = 10^6$ adet$/A_F$ olacak şekilde n_F adet hedef, $x_T \sim U[0,m]$ ve $y_T \sim U[0,n]$ dağılımıyla rastgele olarak (x_T, y_T) koordinatlarında oluşturulmuştur. $y = 0,(0,1),(0,2),...,(2,2)$ değerleri için belirlenen sayıda sensör F' sahasına her y değeri için rastgele olarak 10^3 kez yerleştirilmiştir. Her deneme için tespit edilen hedef sayısı n_C ve yapılan 10^3 denemede tespit edilen ortalama hedef sayısı $\overline{n}_C$ ise simülasyon sonucu elde edilen tespit olasılığı değeri, PoD_{sim},

$$PoD_{sim} = \frac{\overline{n}_C}{n_F} \cdot \frac{A_F}{A_{F'}} \tag{5.21}$$

formülü ile hesaplanır. Elde edilen simülasyon sonuçları ile teorik değerler Şekil 5.13'te gösterilmiştir.



Şekil 5.13: Rastgele multistatik sensör sahaları için elde edilen teorik ve simülasyon PoD değerleri

İkinci grup simülasyonda ise F sahası içindeki optimum büyüklükteki F' sahasına rastgele yerleştirilen multistatik sensörler ile elde edilen EAC'ye ilişkin (5.19) fonksiyonunun doğruluğunun test edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, değişik saha boyutları ve sensör adetleri için altı ayrı senaryo oluşturulmuş, her senaryo için optimum saha oranı $y/1{,}1$ ile, teorik EAC değeri ise (5.19) fonksiyonu kullanılarak hesaplanmış, elde edilen değerler Tablo 5.3'te sunulmuştur.

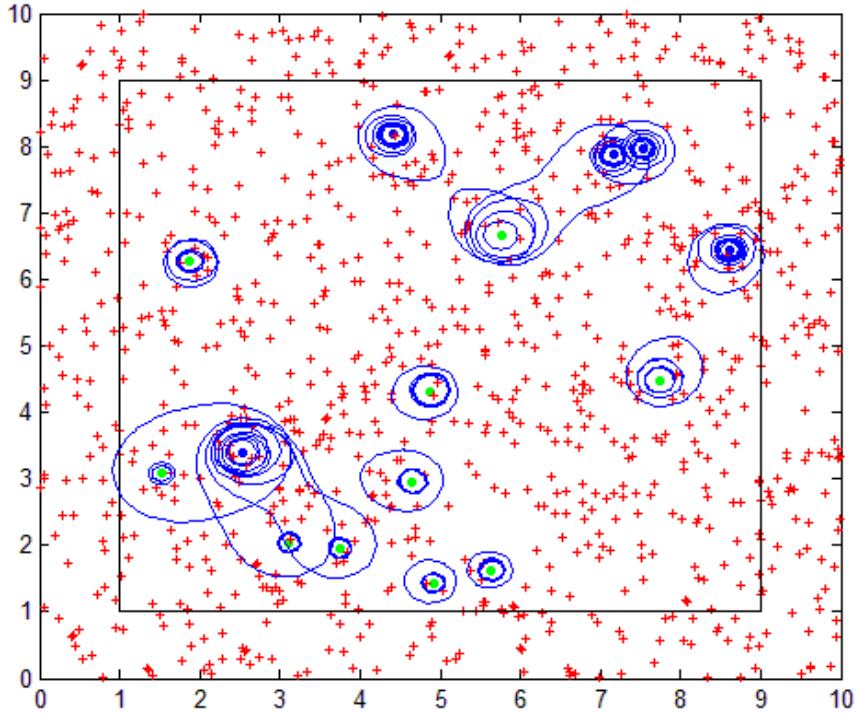
Tablo 5.3: Rastgele multistatik sensör sahaları simülasyonu için oluşturulan senaryo bilgileri ve teorik EAC değerleri

Deneme No	#1	#2	#3	#4	#5	#6
x_1 (adet)	1	3	20	1	4	2
x_2 (adet)	3	6	20	3	8	20
A_F (km^2), $(m=n=\sqrt{A_F})$	9	16	100	25	64	100
Y	1,20	1,66	1,25	0,43	0,55	0,39
Opt. Saha Oranı	1	1	1	0,39	0,50	0,36
EAC (km^2)	4,35	10,66	50,26	4,35	14,21	15,89

Simülasyon başlangıcında $n_F \sim Poisson(\lambda)$, $\lambda = 10^6$ adet$/A_F$ olacak şekilde n_F adet hedef, $x_T \sim U[0,m]$ ve $y_T \sim U[0,n]$ dağılımıyla rastgele (x_T, y_T) koordinatlarında oluşturulmuştur. Sensörler her senaryo için belirlenen optimum büyüklükteki sahalara rastgele şekilde 10^3 kez yerleştirilmiştir. Her deneme için tespit edilen hedef sayısı n_C ve yapılan 10^3 deneme kapsamında tespit edilen ortalama hedef sayısı $\overline{n}_C$ ise simülasyon sonucu elde edilen EAC değeri, EAC_{sim};

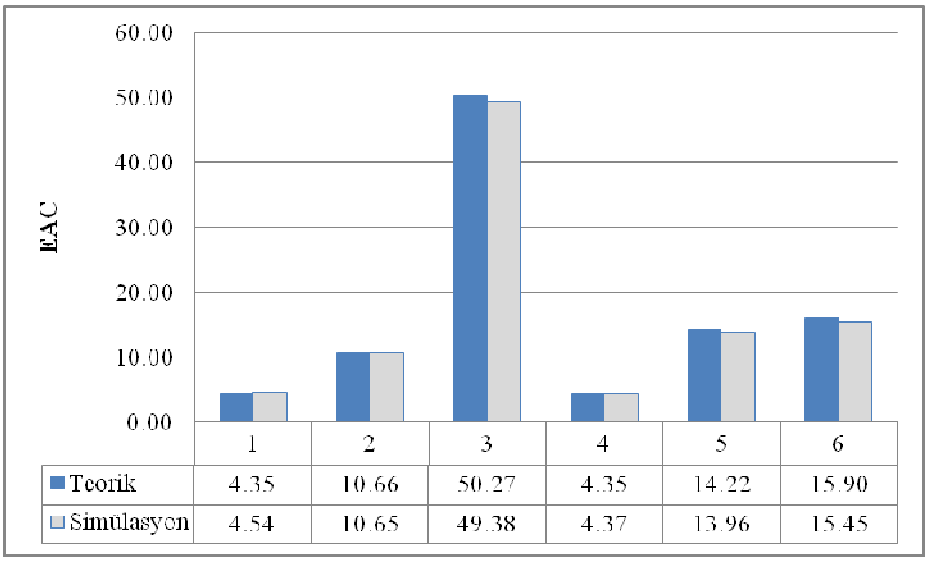
$$EAC_{sim} = \frac{\overline{n}_C}{n_F} \cdot mn \tag{5.22}$$

formülü ile hesaplanır. Şekil 5.14'te $x_1 = 5$ ve $x_2 = 10$ adet sensör ile 10^3 adet hedefin m,n=10 boyutlarındaki saha içinde belirlenen bölgede rastgele yerleştirilmesi ile oluşturulan örnek bir simülasyon görülmektedir.



Şekil 5.14: $x_1 = 5$ ve $x_2 = 10$ adet sensör ile 10^3 adet hedefin *m*,*n*=10 boyutlarındaki sahada rastgele yerleştirilmesi

Yapılan simülasyonlar sonucunda her senaryo için elde edilen teorik ve simülasyon *EAC* değerleri Şekil 5.15'te sunulmuştur.



	1	2	3	4	5	6
Teorik	4.35	10.66	50.27	4.35	14.22	15.90
Simülasyon	4.54	10.65	49.38	4.37	13.96	15.45

Şekil 5.15: Rastgele multistatik sensör sahaları simülasyonu için oluşturulan altı senaryo için elde edilen teorik ve simülasyon *EAC* değerleri

Her iki grup simülasyon sonucunda elde edilen değerlerin teorik değerler ile uyumlu olduğu, bu kapsamda (5.14) ve (5.19) denklemlerinin rastgele multistatik sahalarda elde edilen *PoD* ve *EAC* hesaplamalarında kullanılabileceği tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışma sayesinde; hedefin bulunduğu sahanın büyüklüğü, eşdeğer monostatik tespit menzili ve sensör adedi parametrelerinin bilinmesi şartı ile sahada elde edilebilecek kaplama değeri simülasyona veya fiili denemelere gerek kalmadan geliştirilen formüller ile teorik olarak hesaplanabilecektir. Ayrıca en yüksek kaplamanın sağlanması için sensörlerin hedefin bulunduğu sahanın ne kadarlık bir bölümünde kullanılması gerektiği problemine analitik bir çözüm oluşturulmuştur.

6. BİSTATİK VE MULTİSTATİK SENSÖRLERİN OPTİMİZASYONU

Bir önceki bölümde SATS'nin etkinliği, sensörlerin sahaya rastgele yerleştirildiği varsayımına dayanarak stratejik boyutta incelenmiş, sensör adedi, saha büyüklüğü ve tespit olasılığı arasındaki ilişki analiz edilerek istenen tespit olasılığına veya saha kaplamasına ulaşmak için ihtiyaç duyulan sensör sayısı belirlenmiştir. Bu bölümde ise sensör yerleşiminin rastgele şekilde yapılmadığı, yerleşim düzeninin planlayıcı tarafından oluşturulduğu varsayılmıştır. Bu kapsamda ilk önce bistatik sistemler için hareketli ve hareketsiz hedef modelleri için en yüksek tespit olasılığını sağlayan sensör ayrım mesafeleri araştırılmıştır. Daha sonra multistatik sistemler için en büyük saha kaplamasını sağlayan sensör yerleşim düzenleri incelenmiştir.

6.1. Bistatik Sensör Optimizasyonu

Bu bölümde biri hareketsiz ve ikisi hareketli olmak üzere üç farklı hedef modeli için bistatik sensörlerin optimum yerleşim düzenleri araştırılmış ve her model için ayrı analitik çözüm geliştirilmiştir. Eşdeğer monostatik tespit mesafesi (b), çevre ve ortam koşullarına göre belirlenmekte olduğundan planlayıcının kontrolünde olan tek değişken sensörler arasındaki mesafedir. Geliştirilen çözümlerde sensörler arası mesafe, a/b oranı esas alınarak incelenmiş, hedef tespit olasılığını en büyüten oranın tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Bu kapsamda; $b > 0$ eşdeğer monostatik tespit mesafesine sahip bistatik sensörü oluşturan bir kaynak ve alıcının P_F çevre uzunluğu ile A_F alanına sahip kapalı $F \subset \mathbb{R}^2$ sahasına aralarındaki mesafe $2a \geq 0$ olacak şekilde yerleştirildiği varsayılmıştır. Sensörler, P_C çevre uzunluğu ile $A_C \ll A_F$ alanına sahip Cassini ovali şeklindeki bistatik tespit bölgesi $C \subset \mathbb{R}^2$ içindeki tüm hedefleri tespit edebilmekte, bu kapsamda C içindeki her nokta sensörler tarafından kaplanmaktadır. Her iki sensörü birbirine

bağlayan doğrunun orta noktası O ve sensörlerin O noktasına göre oryantasyonları $C \subset F$ olacak şekilde rastgele belirlenmektedir. $a/b > 1$ durumu için C sırasıyla P_C' ve P_C'' $(P_C' = P_C'')$ çevre uzunluklarına sahip birbirlerinden ayrı, eş C' ve C'' ovallerine bölünmektedir.

6.1.1. Hareketsiz hedefler

F sahasında hareketsiz halde bulunan hedefin bistatik sensörler ile tespit edilmesi olayı, hedefin bulunduğu noktanın C bölgesi içinde olması olayına denktir. Buradan yola çıkarak hem hedefin hem de sensörlerin hareketsiz olduğu bu durumda, hedef tespit olasılığı, *PoD*, kaplanan sahanın tüm sahaya oranı olarak ifade edilebilir.

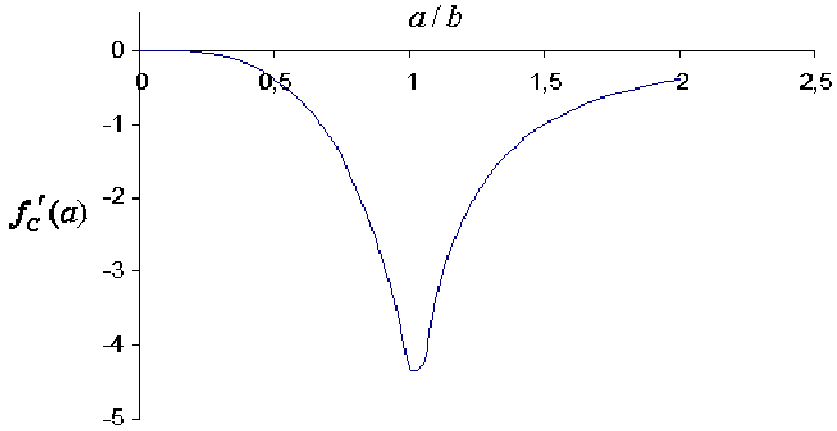
$$PoD = \frac{A_C}{A_F} \tag{6.1}$$

Sabit bir A_F değeri için *PoD*'nin en büyütülmesi A_C'nin en büyütülmesiyle, dolayısı ile *a*/*b* oranı optimizasyonu ile sağlanabilir. Şekil 4.6'da (4.11) denkleminin monostatik tespit alanı referans alınarak normalize edilmiş hali görülmektedir. $a/b = 0$ değeri için A_C en büyük değerine ulaşmakta, sensör ayrım mesafesinin artmasıyla birlikte azalmaktadır.

Willis'in (4.12) denkleminde belirtilen A_C yakınsaması $f_C(a)$ ile simgelenirse, ayrım mesafesine göre alanın değişim hızı $f_C'(a)$ ile hesaplanır.

$$f_C'(a) = \begin{cases} -\pi a^3 \left(\dfrac{1}{b^2} + \dfrac{3a^4}{8b^6} \right) & , a/b \le 1 \\ -\pi b^4 \left(\dfrac{1}{a^3} + \dfrac{3b^4}{8a^7} + \dfrac{15b^8}{64a^{11}} + \dfrac{175b^{12}}{1024a^{15}} \right) & , a/b > 1 \end{cases} \tag{6.2}$$

$f_C'(a)$'nın a/b oranına göre değişimi Şekil 6.1'de görülmektedir. Alandaki azalma ivmesi $0 \le a/b < 0,5$ bölgesi için düşük, $0,5 \le a/b < 1,5$ bölgesinde ise yüksek seviyededir.



Şekil 6.1: $f_C'(a)$ değişimi

Özetle, sabit hedefler için kaynak ve alıcının aynı konumda bulunması sahada kaplanan alanı, dolayısıyla hareketsiz hedeflerin tespit olasılığını en büyütecektir. Bir başka deyişle, bistatik sensörlerin monostatik sensör mantığıyla kullanılarak b yarıçaplı bir daire içinde kaplama sağlanması teorik açıdan en iyi stratejidir. Ancak bu durumda bistatik sistemlerin avantajlarından yararlanılamayacağından sensör ayrım mesafesinin $0 \le a/b < 0,5$ aralığında tutulması, böylelikle yüksek kaplama sağlarken bistatik sistemlerin avantajlarından da faydalanılması stratejisi planlayıcılar tarafından göz önünde bulundurulmalıdır.

6.1.2. Hareketli hedefler

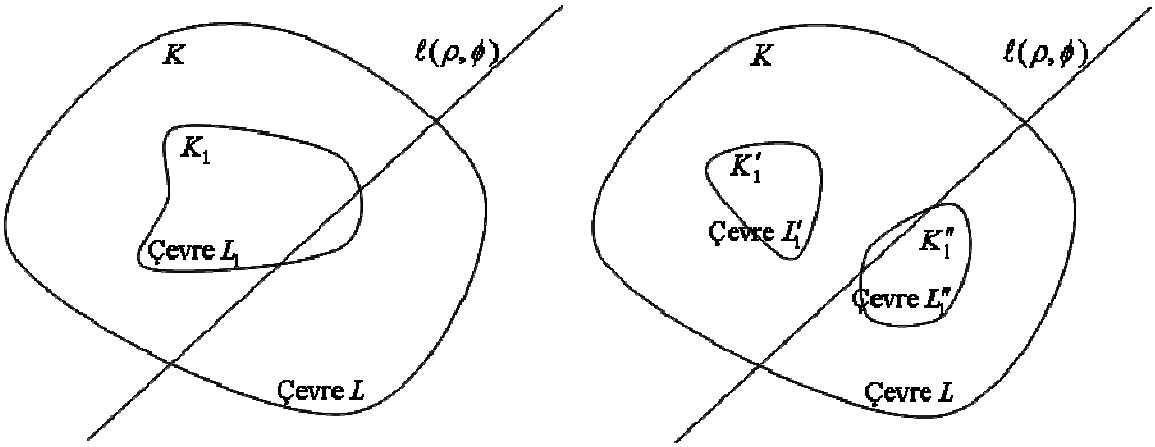
6.1.2.1. Senaryo-1

Bu senaryoda hedefin F düzlemini her yönden eşit olasılıkla kesen doğrusal T izi üzerinde ilerleyerek düzgeçiş yaptığı ve $T \cap C \neq \varnothing$ olması durumunda tespit edildiği varsayılmıştır. Bu hareket modeli varsayımı altında hedefin tespit olasılığını en

büyütecek sensör ayrım mesafesini bulmak için problem doğru-küme kesişim problemine haritalanmıştır.

6.1.2.1.1. Doğru-küme kesişim problemi

Doğru-küme kesişim problemi iki durum için tanımlanmıştır. Bunlardan ilki, L çevre uzunluğuna sahip K kümesini kesen ℓ doğrusunun aynı zamanda L_1 çevre uzunluğuna sahip $K_1 \subset K$ kümesini kesme olasılığının hesaplanması, diğeri ise ℓ doğrusunun K kümesi ile birlikte sırasıyla L_1' ve L_1'' çevre uzunluklarına sahip K_1' ve K_1'' konveks kümelerinden en az birisini kesme olasılığının hesaplanmasıdır.



Şekil 6.2: Doğru-küme kesişim problemleri

6.1.2.1.2. Problemin haritalanması

F, çevre uzunluğu L olan K kapalı kümesine; C, çevre uzunluğu L_1 olan K_1 kapalı kümesine ve T, düzlemdeki $\ell(\rho,\phi)$ doğrusuna haritalanmıştır. ρ parametresi ℓ'nin koordinat sistemi merkezine olan en kısa mesafesi, ϕ ise ℓ'ye dik olan doğrunun x-ekseninden itibaren ölçülen açısıdır. C'nin çevre uzunlukları P_C' and P_C'' olan C' ve C'' ovallerine ayrıldığı durum için C' ve C'', çevre uzunlukları sırasıyla L_1' ve L_1'' olan K_1' ve K_1'' kapalı kümelerine haritalanmıştır.

Tablo 6.1: Hareketli hedeflerin bistatik sensörler tarafından tespit edilmesi probleminin doğru-küme kesişim problemine haritalanması

Hareketli hedef ve bistatik sensör tespit problemi	**Doğru-küme kesişim problemi**
P_F çevre uzunluğuna sahip F sahası	L çevre uzunluğuna K kümesi
P_C çevre uzunluğuna sahip bistatik sensör tespit bölgesi C	L_1 çevre uzunluğuna sahip K_1 kümesi
P_C' ve P_C'' çevre uzunluklarına sahip C' ve C'' tespit bölgeleri	L_1' ve L_1'' çevre uzunluklarına sahip K_1' ve K_1'' kümeleri
T Hedef izi	ℓ doğrusu
Rastgele Bistatik Sensör Yerleşimi Tek konveks tespit sahası Tek konveks olmayan tespit sahası İki ayrı konveks tespit sahası	**Rastgele Küme Yerleştirilmesi** Tek konveks küme Tek konveks olmayan küme İki ayrı konveks küme
Hedefin; konveks C sahası, konveks olmayan C sahası, konveks C' ve/veya C'' sahasını tarafından tespit edilmesi.	ℓ doğrusunun; konveks L_1 kümesini, konveks olmayan L_1 kümesini, konveks L_1' ve/veya L_1'' kümesini kesmesi.

6.1.2.1.3. Analitik çözüm

Bu probleme analitik bir çözüm getirebilmek için Lazos ve diğerleri [83], Santalo [84] ve Solomon [85]'un yaptıkları çalışmalarda belirtilen bazı integral geometrisi ve geometri olasılığı teorilerinden faydalanılmıştır.

TANIM-1

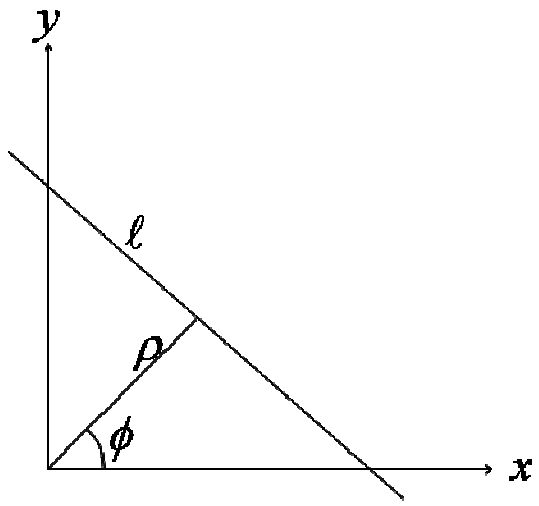
$\ell(\rho,\phi)$ doğru kümesinin ölçüsü m, $d\ell = d\rho \wedge d\phi$ doğru yoğunluğunun integrali olarak tanımlanmakta olup ρ parametresi ℓ'nin koordinat sistemi merkezine olan en kısa mesafesi, ϕ ise ℓ'ye dik olan doğrunun x-ekseninden itibaren ölçülen açısıdır ($\wedge$ sembolü dış çarpım (exterior product) işlemini simgelemektedir.) [84].

$$m(\ell) = \int \partial\rho \wedge \partial\phi \tag{6.3}$$

K kapalı konveks kümesini kesen doğru kümesinin ölçüsü:

$$m(\ell;\ell \cap K \neq \varnothing) = \int_{\ell \cap K \neq \varnothing} \partial\rho \wedge \partial\phi = \int_0^{2\pi} \rho \partial\phi = L \tag{6.4}$$

olup *L*, *K* kümesinin çevre uzunluğudur.



Şekil 6.3: ℓ'nin koordinat düzleminde gösterimi

TANIM-2

L çevre uzunluğuna sahip bir parçalı diferansiyel eğri olan *K*'yı *n* defa kesen tüm ℓ doğrularının ölçüsü;

$$\int n\partial\ell = 2L \tag{6.5}$$

olarak hesaplanır.

(6.4) ve (6.5) denklemlerinin ispatı Santalo'nun [84] çalışmasında bulunmaktadır.

TEORİ-1

Çevre uzunluğu L_1 olan K_1 kapalı konveks kümesi, çevre uzunluğu L olan kapalı K kümesi içerisine rastgele yerleştirilirse, K kümesini kesen ℓ doğrusunun aynı zamanda K_1 kümesini de kesme olasılığı, PoD_{K_1}, aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$PoD_{K_1} = \frac{L_1}{L} \tag{6.6}$$

K_1 konveks olmayan bir küme ise formüldeki L_1 uzunluğu L_1^e olarak ifade edilen K_1 kümesinin konveks yüzey uzunluğu ile değiştirilmelidir.

İSPAT-1

TANIM-1'den yola çıkılarak bu olasılık K_1 kümesini kesen doğru miktarının K kümesini kesen doğru miktarına oranı olarak ifade edilebilir. K konveks ise

$$PoD_{K_1} = \frac{m(\ell \bigcap K \bigcap K_1 \neq \varnothing)}{m(\ell \bigcap K \neq \varnothing)} = \frac{m(\ell \bigcap K_1 \neq \varnothing)}{m(\ell \bigcap K \neq \varnothing)} = \frac{L_1}{L} \tag{6.7}$$

Eğer K_1^e, K_1'in konveks yüzeyi ise K_1^e'yi kesen her doğrunun aynı zamanda K_1'i de kestiği gözlenir. Bu nedenle K_1'in konveks olmadığı durum için L_1, L_1^e olarak değiştirilir.

$$PoD_{K_1} = \frac{m(\ell \bigcap K \bigcap K_1^e \neq \varnothing)}{m(\ell \bigcap K \neq \varnothing)} = \frac{L_1^e}{L} \tag{6.8}$$

(6.7) denklemi, $a/b \le \sqrt{2}/2$ durumu için bistatik tespit olasılığı problemine haritalandığında;

$$PoD = \frac{P_C}{P_F} \tag{6.9}$$

(6.8) denklemi, $\sqrt{2}/2 < a/b < 1$ durumu için haritalandığında;

$$PoD = \frac{P_C^e}{P_F} \tag{6.10}$$

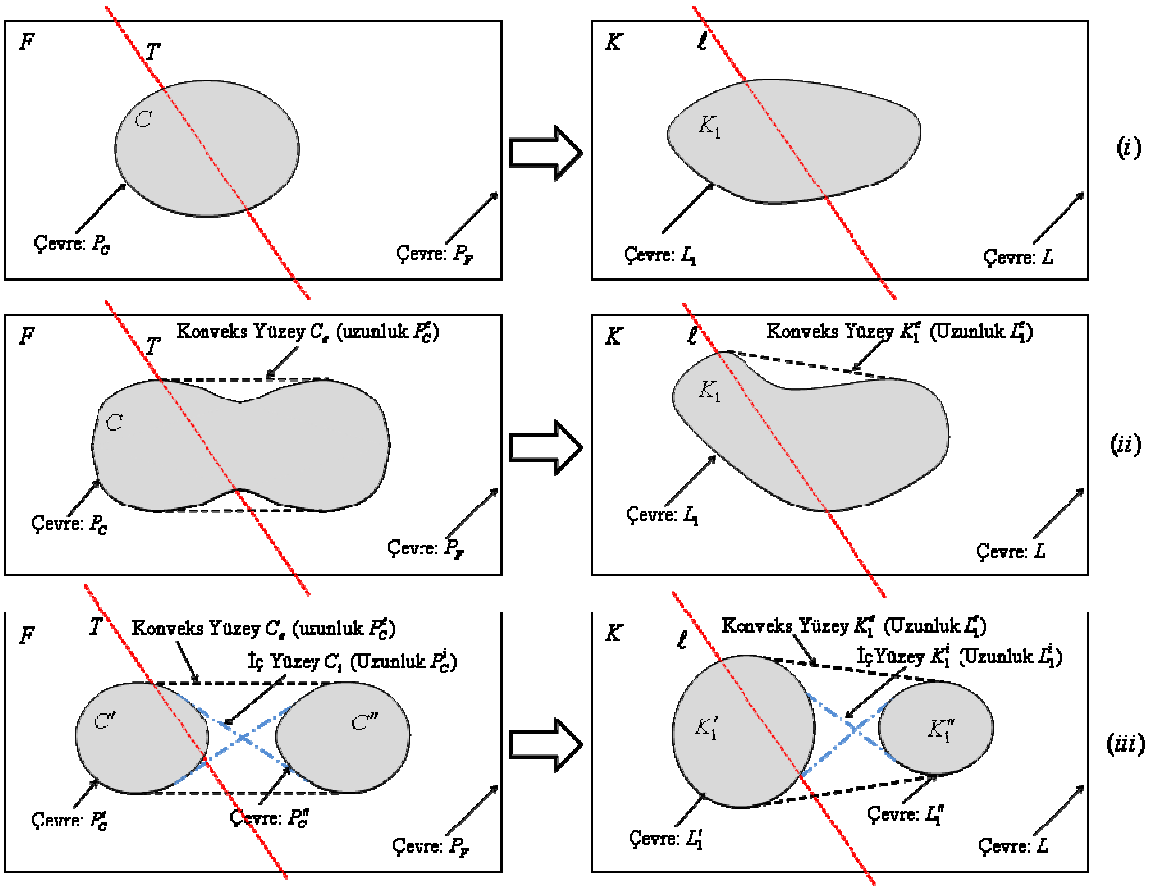
olmaktadır. Yukarıdaki denklemlerde P_C^e, C'nin konveks dış yüzey uzunluğudur. Bistatik tespit probleminin doğru-küme kesişim problemine haritalanması işlemi TEORİ-2'den yararlanılarak tamamlanmıştır.

TEORİ-2

$K_1' \bigcap K_1'' = \varnothing$ olacak şekilde K_1' ve K_1'' sırasıyla L_1' ve L_1'' çevre uzunluklarına sahip iki kapalı konveks küme, K_1^e, $K_1' \bigcup K_1''$'nün konveks dış yüzeyi, K_1^i, K_1' ve K_1'''nin arasındaki O noktasından geçen iç yüzey (Bkz. Şekil 6.4(*iii*)), L_1^e ve L_1^i sırasıyla K_1^e ve K_1^i'nin çevre uzunlukları ise, ℓ doğrusunun K_1' ve K_1'' kümelerini ayırma olasılığı, $PoS_{K_1',K_1''}$;

$$PoS_{K_1',K_1''} = P(\ell \cap K_1' = \varnothing, \ell \cap K_1'' = \varnothing, \ell \cap K_1^e \neq \varnothing) = \frac{L_1^i - (L_1' + L_1'')}{L_1^e} \tag{6.11}$$

olarak hesaplanır.



Şekil 6.4: Hareketli hedeflerin bistatik sensörler ile tespiti probleminin doğru-küme kesişim problemine haritalanması. (*i*) Tek konveks tespit sahası (*ii*) Tek konveks olmayan tespit sahası (*iii*) İki ayrı konveks tespit sahası için haritalama

İSPAT-2

$\partial K_1'$ ve $\partial K_1''$'ne sırasıyla K_1' ve K_1'' kümelerinin sınırları denirse, K_1' ve K_1'''nü kesen her doğru $\partial K_1'$, $\partial K_1''$ ve K_1^e ile iki, K_1^i ile dört olmak üzere toplam on noktada kesişir. Bu doğruların ölçüsü m_{10} olarak ifade edilsin.

K_1' veya K_1'''den sadece birisini kesen doğrular $\partial K_1'$, $\partial K_1''$, K_1^e ve K_1^i ile toplam altı noktada kesişmekte olup bu doğruların ölçüsü m_6 olarak ifade edilsin.

K_1' ve K_1'' kümelerini ayıran noktalar K_1^e ile iki, K_1^i ile iki olmak üzere dört noktada kesişir ve bu doğruların ölçüsü de m_4 olarak ifade edilsin.

Konveks bir kümeyi kesen doğruların ölçüsü o kümenin çevresine eşit olduğundan K_1'' kümesini kesmeyip sadece K_1''nü kesen veya tam tersi durumu sağlayan doğruların ölçüsü m_6' ve m_6'':

$$m_6' = L_1' - m_{10}, \qquad m_6'' = L_1'' - m_{10} \tag{6.12}$$

olur ve buradan yola çıkarak,

$$m_6' = m_6' + m_6'' = L_1' + L_1'' - 2m_{10} \tag{6.13}$$

yazılabilir. C_e kapalı bir konveks küme olduğundan,

$$m_4 + m_6 + m_{10} = L_1^e \tag{6.14}$$

ve TANIM-2 kullanılarak,

$$4m_4 + 6m_6 + 10m_{10} = 2(L_1' + L_1'' + L_1^e + L_1^i) \tag{6.15}$$

elde edilir. Buradan yola çıkarak,

$$\begin{aligned} m_4 &= L_1^i - (L_1' + L_1''), & m_6' &= L_1' - (L_1^i - L_1^e) \\ m_6'' &= L_1'' - (L_1^i + L_1^e), & m_{10} &= L_1^i - L_1^e \end{aligned} \tag{6.16}$$

bulunur. K_1' ve K_1'' kümelerini ayıran doğruların ölçüsü $L_1^i - (L_1' + L_1'')$, ℓ'nin K_1' ve K_1'' kümelerini ayırma olasılığı ise:

$$PoS_{K_1',K_1''} = P(\ell \bigcap K_1' = \varnothing, \ell \bigcap K_1'' = \varnothing, \ell \bigcap K_1^e \neq \varnothing) = \frac{L_1^i - (L_1' + L_1'')}{L_1^e} \tag{6.17}$$

olarak bulunur.

Eğer $PoD_{K_1',K_1''}$; K_1^e'yi kestiği bilinen ℓ doğrusunun K_1' ve/veya K_1'''nü kesme olasılığı olarak ifade edilirse,

$$PoD_{K_1',K_1''} = 1 - PoS_{K_1',K_1''} = \frac{L_1^e - L_1^i + (L_1' + L_1'')}{L_1^e} \tag{6.18}$$

elde edilir. Bu durumda K_1'i kesen doğru kümesinin ölçüsü $m_{K_1}(\ell)$:

$$m_{K_1}(\ell) = m(\ell; \ell \bigcap K_1^e \bigcap K_1 \neq \varnothing) = L_1^e . PoD_{K_1',K_1''} = L_1^e - L_1^i + (L_1' + L_1'') \tag{6.19}$$

ve

$$PoD_{K_1} = \frac{m_{K_1}(\ell)}{m(\ell; \ell \bigcap K \neq \varnothing)} = \frac{L_1^e - L_1^i + (L_1' + L_1'')}{L} \tag{6.20}$$

olarak hesaplanır. (6.20) denklemini probleme haritalarsak, $a/b > 1$ durumu için,

$$PoD = \frac{P_C^e - P_C^i + P_C}{P_F} \tag{6.21}$$

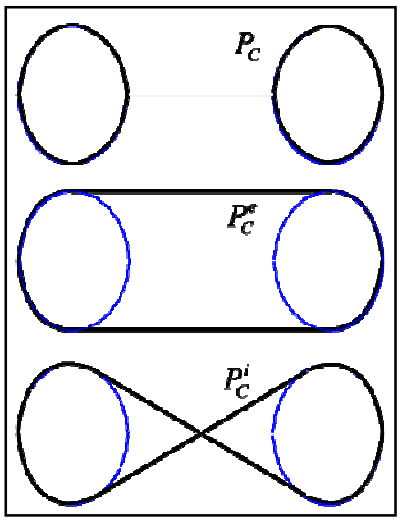
bulunur. Her üç durum için ortak bir formül yazabilmek için Cassini ovalinin etkin çevre parametresi adı altında P_C^{eff} sisteme tanıtılacak olursa;

$$P_C^{eff} = \begin{cases} P_C & ,a/b \le \sqrt{2}/2 \\ P_C^e & ,\sqrt{2}/2 < a/b \le 1 \\ P_C^e - P_C^i + P_C & ,a/b > 1 \end{cases} \quad (6.22)$$

ve

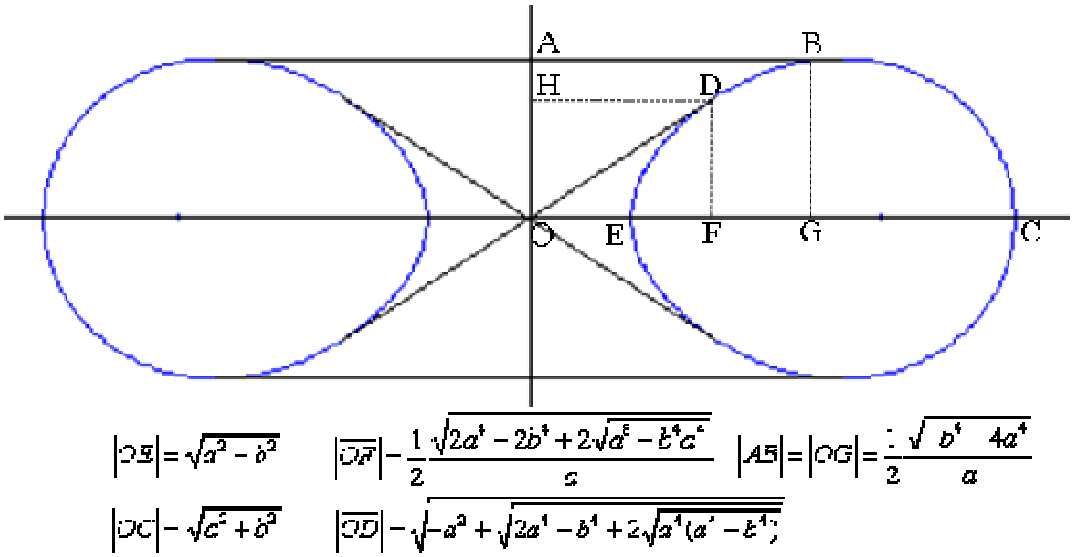
$$PoD = \frac{P_C^{eff}}{P_F} \quad (6.23)$$

yazılabilir. Etkin çevrenin hesaplanabilmesi için Şekil 6.5'te görülen P_C, P_C^e ve P_C^i değerlerinin hesaplanması gerekir.



Şekil 6.5: P_C, P_C^e ve P_C^i'nin $a/b>1$ için Cassini ovali üzerinde gösterimi

P_C^e ve P_C^i hesabı için kullanılacak uzunluklara ilişkin değerler hesaplanarak Şekil 6.6'da gösterilmiştir.Söz konusu değerler, sayısal integraller yardımıyla formül (6.24) ve (6.25)'te hesaplanmıştır.



Şekil 6.6: P_C^e ve P_C^i hesabı için kullanılacak uzunluk değerleri

P_C^e hesabı:

$$P_C^e = 4\left(\left|\overline{AB}\right| + \left|\widehat{BC}\right|\right)$$

$$= 4\left(\frac{\sqrt{-b^4+4a^4}}{2a} + \int_{\frac{1}{2}\frac{\sqrt{-b^4+4a^4}}{a}}^{\sqrt{a^2+b^2}} f_C^S(x)\partial x\right) \tag{6.24}$$

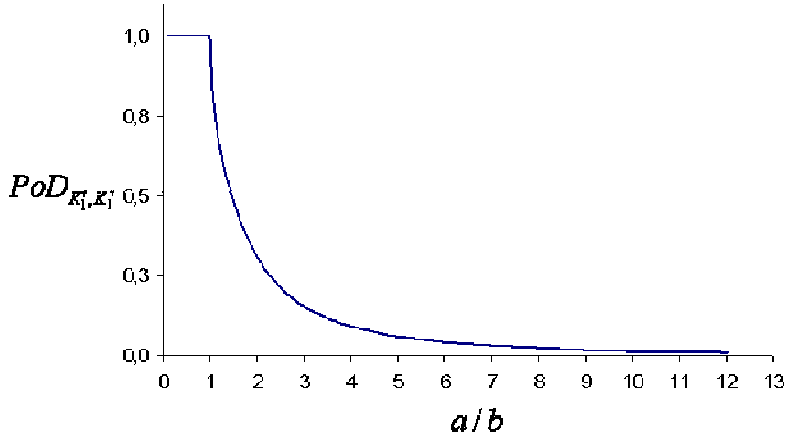
P_C^i hesabı:

$$P_C^i = 4\left(\left|\overline{OD}\right| + \left|\widehat{DC}\right|\right)$$

$$= \left(\sqrt{-a^2+\sqrt{2a^4-b^4+2\sqrt{a^4(a^4-b^4)}}} + \int_{\frac{1}{2}\frac{\sqrt{2a^4-2b^4+2\sqrt{a^8-b^4a^4}}}{a}}^{\sqrt{a^2+b^2}} f_C^S(x)\partial x\right) \tag{6.25}$$

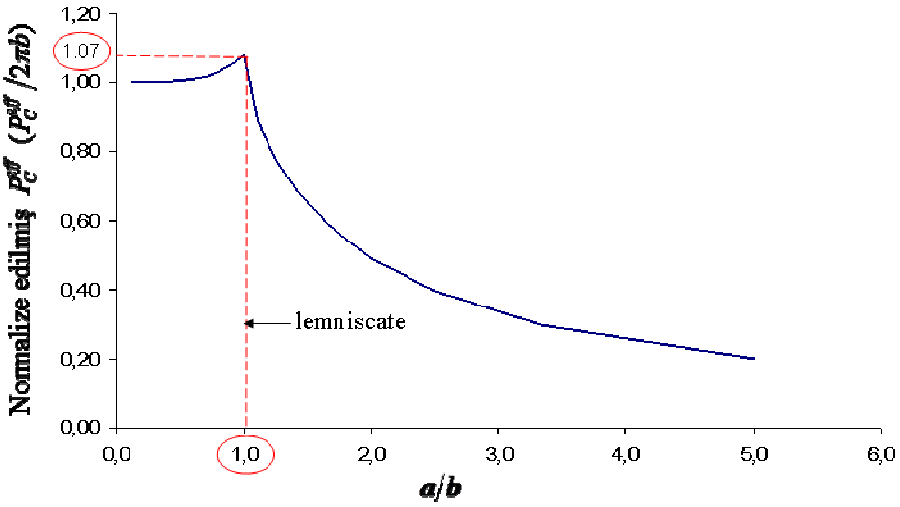
Yukarıdaki formüller kullanılarak P_C^e'yi kesen hedef izinin C' ve/veya C'''nü de kesme olasılığı $PoD_{K_1',K_1''}$ hesaplandığında, $a/b \le 1$ için C kümesi henüz C' ve C'' kümelerine bölünmediğinden hedef izi 1 olasılıkla C kümesini de kesmektedir. $a/b>1$ durumunda,

a/b oranı büyüdükçe T'nin C'yi kesme olasılığı da Şekil 6.7'de görüldüğü gibi azalmaktadır.



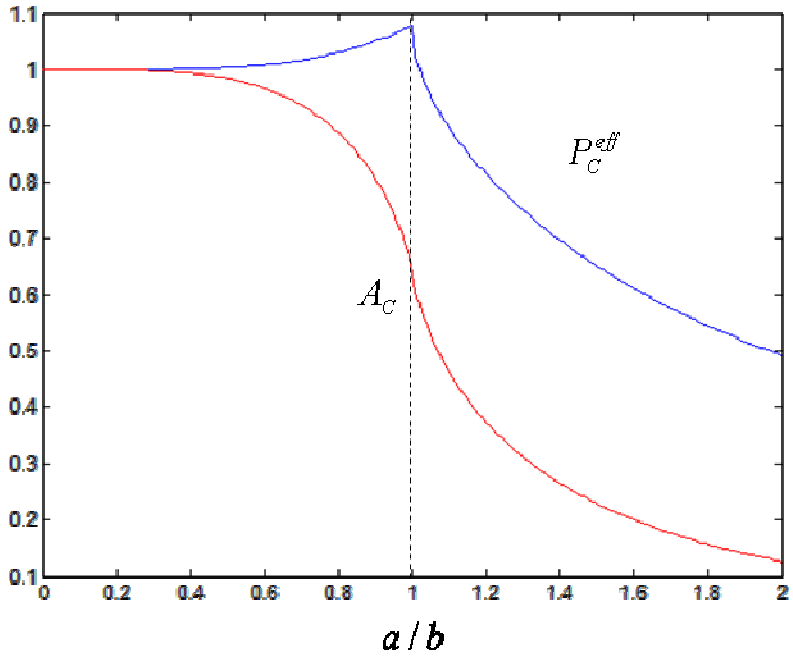
Şekil 6.7: P_C^e'yi kesen doğru kümesinin C' ve/veya C'''yi de kesme olasılığı $(PoD_{K_1',K_1''})$

PoD, (6.23) denklemi gereği, sabit bir P_F değeri için, P_C^{eff}'in uzunluğuna bağlıdır. P_C^{eff}'nin hesaplanarak monostatik tespit bölgesi çevre uzunluğu, $2\pi b$, referansına göre normalize edilmiş hali Şekil 6.8'de sunulmuştur. Bu kapsamda en büyük tespit olasılığına a/b=1 değerinde, yani tespit bölgesi lemniscate şeklinde iken ulaşılmaktadır. a/b=1 oranı ile aynı özelliklere sahip bir monostatik sensöre kıyasla %7'lik kazanç sağlamakta olup a/b>1 durumu için PoD'de keskin düşüş görülmektedir.



Şekil 6.8: Normalize edilmiş bistatik etkin çevre

Normalize edilmiş alan ve etkin çevreyi Şekil 6.9'da karşılaştırdığımızda, sabit ve hareketli hedeflerin bistatik sensörler ile tespit olasılığını en büyüten ayrım mesafelerinin farklı olduğu görülmektedir. Sabit hedefler için tespit olasılığına etki eden parametre A_C, optimum ayrım mesafesi a/b=0; düzgeçiş yapan hedefler için tespit olasılığına etki eden parametre P_C^{eff}, optimum ayrım mesafesi a/b=1'dir.



Şekil 6.9: Normalize edilmiş A_C ve P_C^{eff} değerleri

6.1.2.2. Senaryo-2

Bu senaryoda bistatik sensörlerin hedefin λ yoğunluğunda bulunduğu bir Poisson sahasına yerleştirildiği, hedefin düzlemde t süresi boyunca v hızı ile sabit rotada ilerlediği varsayılmıştır. Bu hareket modeli varsayımı altında hedefin tespit olasılığını en büyütecek sensör ayrım mesafesinin tespiti hedeflenmiştir. Yapılan hesaplamalarda kullanılan notasyon aşağıda belirtilmiştir.

λ : Hedef yoğunluğu (adet/km^2)

v : Hedef hızı (km/sa)

t : Arama süresi (sa)

N_0 : t_0 anında tespit edilen hedef sayısı (adet)

N_t : (0,t] aralığında tespit edilen hedef sayısı (adet)

N_C : tespit edilen toplam hedef sayısı (adet)

6.1.2.2.1. Poisson sahalarının süpürülmesi

λ hedef yoğunluğuna sahip bir Poisson sahasında v hızı ile sabit rotada hareket eden ve $p(x)$ tespit mesafesi eğrisine sahip bir sensör olduğu varsayılsın. Hedeflerin, arama sensörü ilerleme hattına dik bir ∂x aralığından geçiş hızı $v\lambda\partial x$'e eşittir. Bu hedeflerden her biri $p(x)$ olasılığı ile tespit edildiğinden toplam hedef tespit edilme hızı $\int_{-\infty}^{\infty} v\lambda p(x)\partial x$'dir. Bu değer (3.1) denklemi gereği $v\lambda W$'ye eşittir. Bu nedenle Poisson sahalarının taranmasında kullanılan sensörlerin etkinlikleri tarama genişlikleri ile ölçülür.

6.1.2.2.2. Analitik çözüm

t=0 anında tespit edilen hedef sayısı sensörlerin sahaya yerleştirildikleri anda C içerisinde bulunan hedef sayısına eşit olup Poisson sahası özelliği gereği aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$N_0 = \lambda.A_C \tag{6.26}$$

(0,t] aralığında tespit edilen hedef sayısı ise bu süre boyunca C bölgesine giren hedeflerin sayısına eşittir. Bu olay, $\frac{P_C^{eff}}{\pi}$ tarama genişliğine sahip bir sensörün, λ yoğunluğunda hareketsiz hedeflerden oluşan bir Poisson sahasını v hızı ile sabit rotada t süresince süpürmesine denktir [60].

$$N_t = \lambda \cdot \frac{P_C^{eff}}{\pi} \cdot v \cdot t \tag{6.27}$$

t=0 anında ve (0,t] aralığında tespit edilen hedef sayıları toplamının, yani N_C'nin en büyütülmesi amaçlanmaktadır.

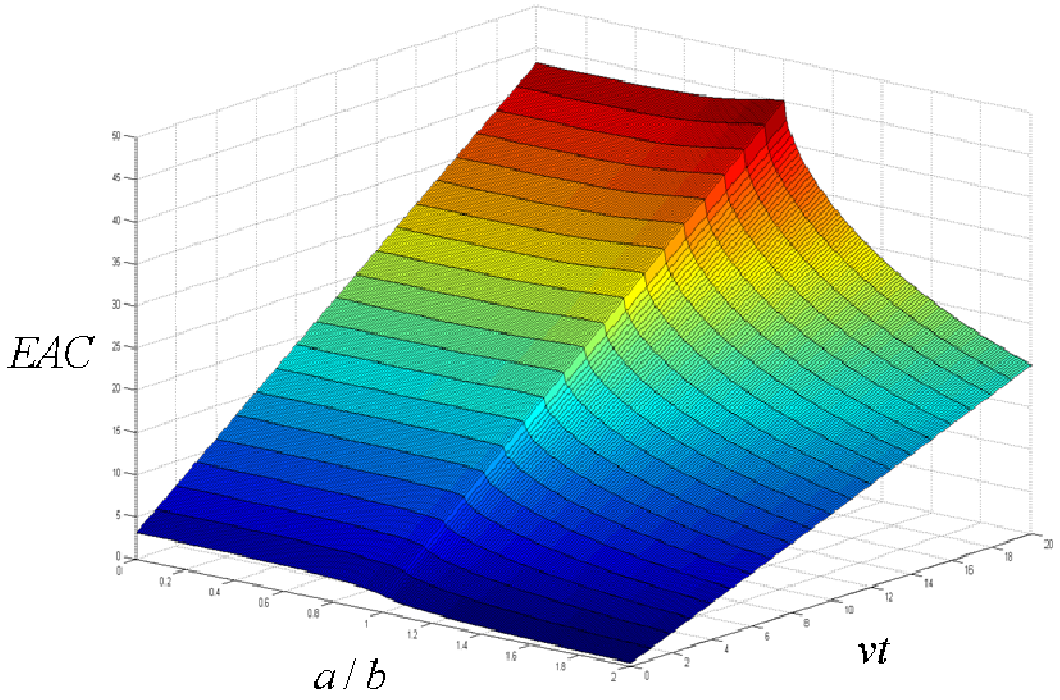
$$Max\ N_C = N_0 + N_t = \lambda \left(A_C + \frac{v \cdot t}{\pi} \cdot P_C^{eff} \right) \tag{6.28}$$

Bu durumda *EAC*, *F* sahasında N_C kadar hedef içeren alan olarak tanımlanacak olursa,

$$EAC = A_C + \frac{v \cdot t}{\pi} \cdot P_C^{eff} \tag{6.29}$$

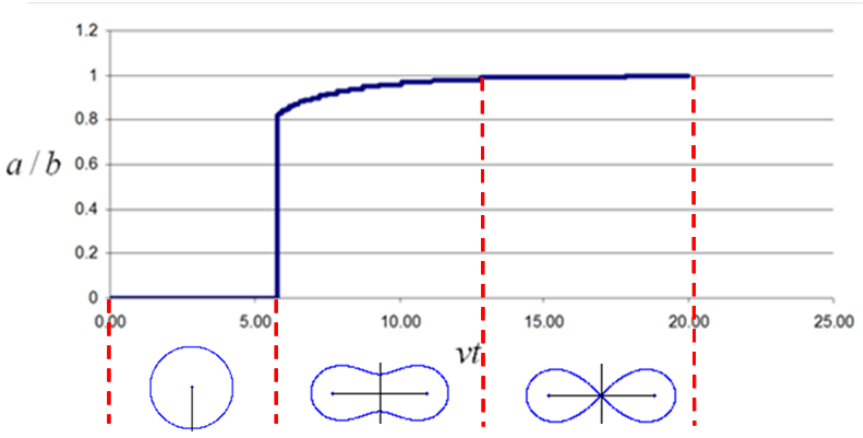
olarak ifade edilir. (5.17) denklemi esas alınarak tespit olasılığının en büyütülmesi için *EAC*'nin en büyütülmesi gerekmektedir.

EAC'nin *a*/*b* ve *vt* değerlerine göre değişimi aşağıdaki şekilde görülmektedir. Tespit olasılığını artırmak için *a*/*b* oranının *vt* değerine göre planlanması gerekmektedir. Sabit bir *a*/*b* oranı için *vt* değeri arttıkça *EAC*'nin de arttığı görülmektedir.



Şekil 6.10: Farklı *a*/*b* ve *vt* değerlerine göre *EAC*'nin aldığı değerler

Farklı *vt* değerlerine göre *EAC*'yi en büyüten *a*/*b* oranları aşağıdaki şekilde görülmektedir. $vt < 5,77$ için sensörlerin aynı konumda olması, $5,77 < vt < 17,8$ için *a*/*b*'nin 1 ile 0,82 arasında olması, $vt > 17,8$ için *a*/*b*=1 olması hedef tespit olasılığını en büyütmektedir.



Şekil 6.11: *vt* ve *a*/*b* değişimi

6.1.3. Simülasyon sonuçları

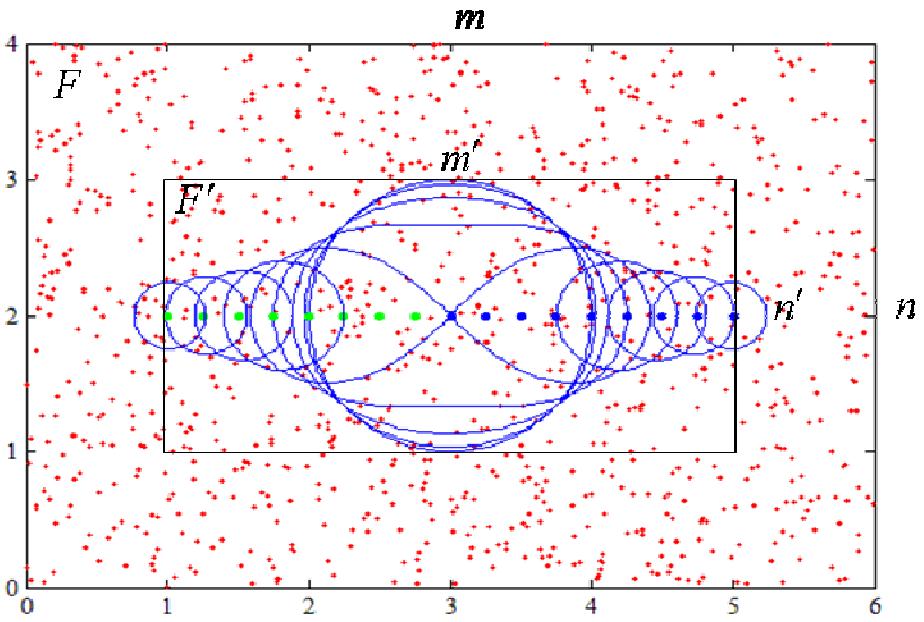
Bistatik sensörlerin hareketli ve hareketsiz hedefler için optimize edilmiş ayrım mesafeleri bir önceki bölümde hesaplanmış, bu kapsamda farklı hedef modelleri için tespit olasılığını en büyüten sensör yerleştirme stratejileri analitik yöntemlerle belirlenmiştir. Bu bölümde, bistatik sensörlerin sözkonusu hedef modellerine karşı etkinlikleri Monte Carlo simülasyonları ile test edilmiş, elde edilen teorik değerler simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Simülasyonlarda *b*=1 km kabul edilmiştir.

6.1.3.1. Hareketsiz hedef simülasyonu

Hareketsiz hedef simülasyonunda $m' = 4\,\text{km}$ ve $n' = 2\,\text{km}$ boyutlarına sahip F' sahası, $m = m' + 2b$ ve $n = n' + 2b$ boyutlarındaki F sahası içine Şekil 6.12'de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Oluşturulan $n_F = 10^6$ adet hedef $x_T \sim U[0, m]$ ve $y_T \sim U[0, n]$ olacak şekilde (x_T, y_T) koordinatlarında bulunmaktadırlar. Simülasyonda, kaynak ve alıcılar ilk olarak sırasıyla $(x_{C'}, y_{C'})$ ve $(x_{C''}, y_{C''})$ noktalarına $x_{C'}, y_{C'} = x_{C''}, y_{C''} = \left(\frac{m}{2}, \frac{n}{2}\right)$ olacak şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra $\kappa = (0,01), (0,02), ..., \frac{m'}{2}$ değerleri için $x_{C'}, y_{C'} = \left(\frac{m}{2} - \kappa, \frac{n}{2}\right)$ ve $x_{C''}, y_{C''} = \left(\frac{m}{2} + \kappa, \frac{n}{2}\right)$ noktalarına, yani F' sahasının karşı kenarlarına ulaşıncaya kadar her κ değeri için kaydırılmışlardır (Bkz. Şekil 6.12). Her konum değişimi sonrasında *C* içerisinde bulunan hedef sayısı, n_C, sayılmıştır.

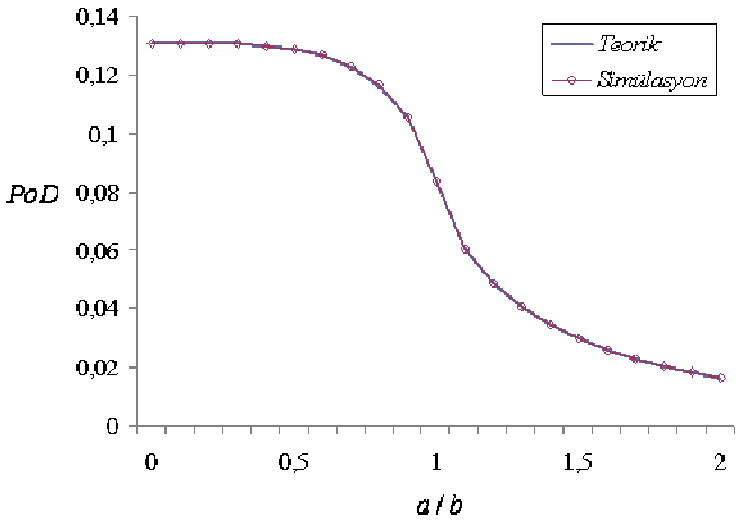
$$PoD = \frac{n_C}{n_F} \tag{6.30}$$

formülü kullanılarak $0 < \frac{a}{b} < 2$ aralığında elde edilen *EAC* hesaplanarak Şekil 6.13'te gösterilmiştir.



Şekil 6.12: $m' = 4$ km ve $n' = 2$ km ve b=1 km için hareketsiz hedef simülasyonu ve sensörlerin x-ekseni boyunca hareketleri

Yapılan simülasyonlar sonucunda en büyük hedef tespit olasılığının sensörler aynı konumda iken elde edildiği, sensörler arası mesafenin artmasıyla birlikte tespit edilen hedef sayısının azaldığı, elde edilen simülasyon sonuçlarının teorik değerlerle uyuştuğu görülmüştür.



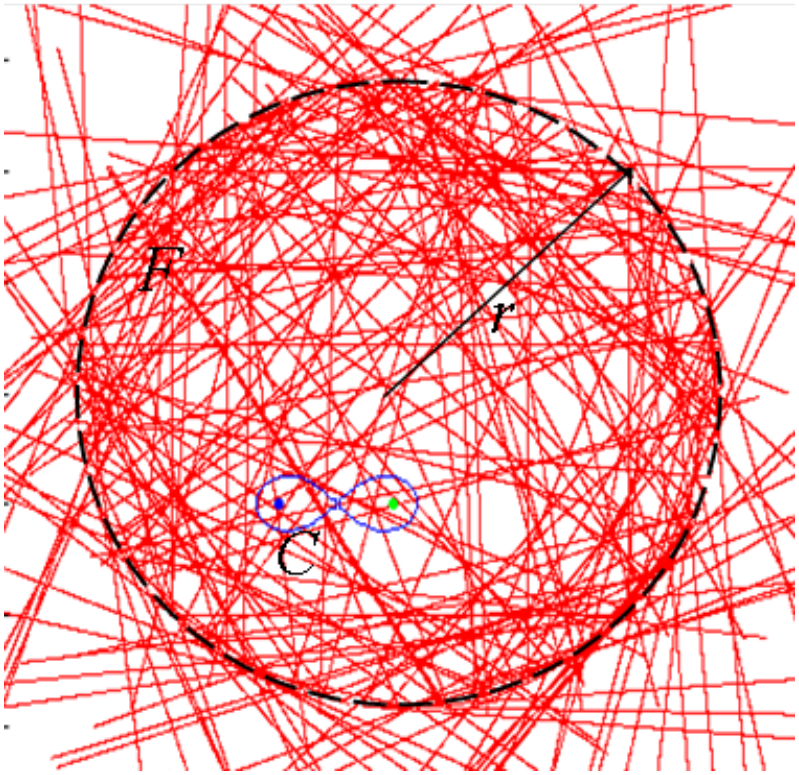
Şekil 6.13: $m' = 4$ km ve $n' = 2$ km, b=1 km ve $\kappa = (0,01),(0,02),....,\frac{m'}{2}$ için elde edilen simülasyon sonuçları.

6.1.3.2. Hareketli hedef simülasyonu - Senaryo 1

Düzgeçiş yapan hareketli hedef simülasyonu kapsamında F arama sahası r yarıçaplı bir daire olarak belirlenmiştir. Oluşturulan $n_F = 10^6$ adet hedefin her biri, F sahasının sınırlarını oluşturan çember üzerinde seçilen iki rastgele noktadan geçecek şekilde sahadan düzgeçiş yapmıştır (Bkz. Şekil 6.14). Sensörler, $\frac{a}{b} = 0, \frac{1}{10}, \frac{2}{10}, ..., 2$ değerlerinin her biri için 10^3 kez sahada rastgele konumlandırılmışlardır. Her deneme için C ile kesişen T hedef izlerinin sayısı n_C, her a/b değeri için 10^3 denemenin ortalaması $\overline{n}_C$ ise,

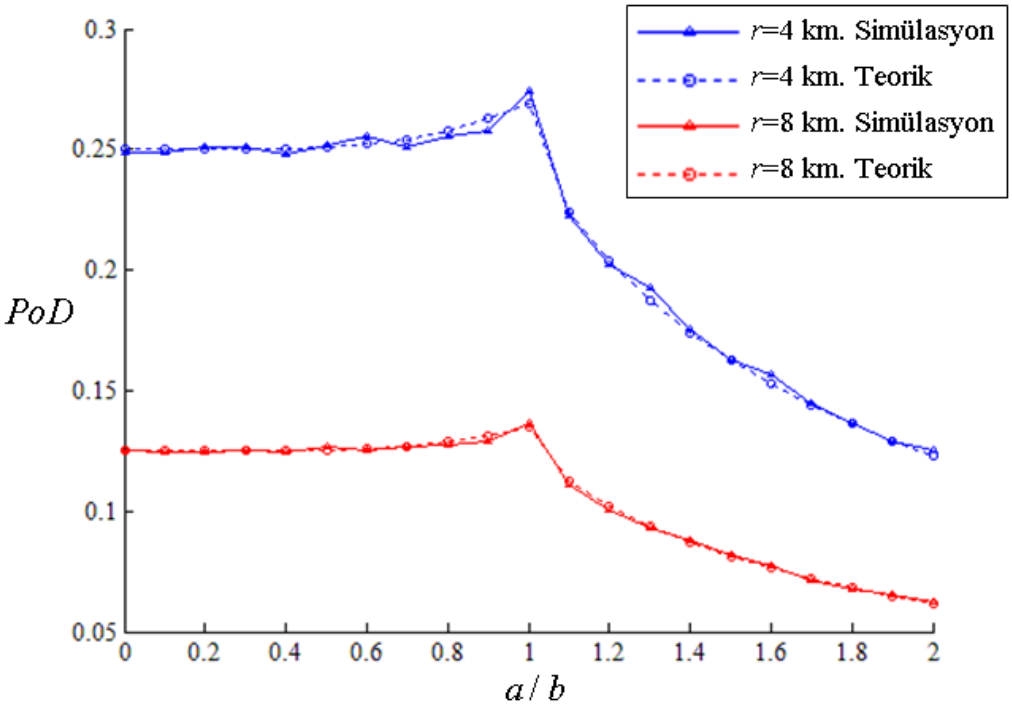
$$PoD = \frac{\overline{n}_C}{n_F} \tag{6.31}$$

olarak ifade edilebilir.



Şekil 6.14: Düzgeçiş yapan hedef simülasyonu

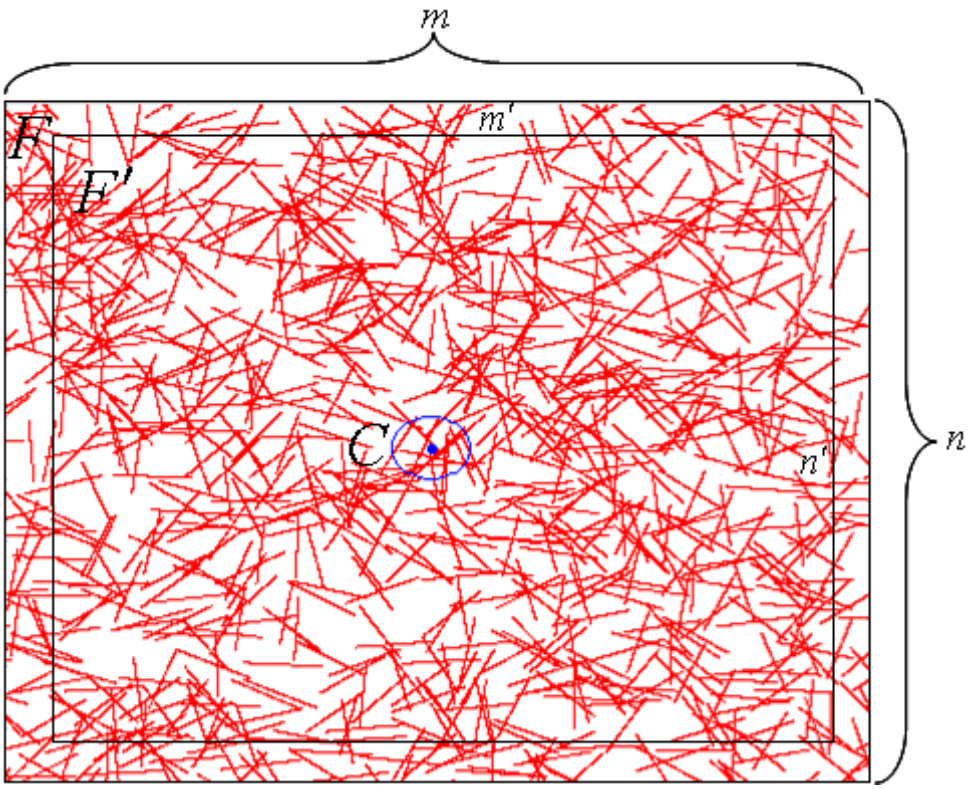
$r = 4$ km ve $r = 8$ km yarıçaplı F sahaları için elde edilen tespit olasılıklarına ait simülasyon sonuçları ile teorik sonuçlar Şekil 6.15'te görülmektedir. Simülasyon sonuçları ile teorik değerlerin uyuştuğu görülmektedir. Her iki simülasyonda da *PoD*, *a*/*b*=1 değeri için en büyük değere ulaşmaktadır.



Şekil 6.15: $r = 4$ km.,8 km. ve b=1 km için elde edilen simülasyon sonuçları.

6.1.3.3. Hareketli hedef simülasyonu - Senaryo 2

İkinci hareketli hedef simülasyonunda $m', n' \gg b$ boyutuna sahip F' sahası, $m = m' + 2b$ ve $n = n' + 2b$ boyutlarındaki F sahasının içine Şekil 6.16'da görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Hedefler $n_F \sim Poisson(\lambda)$, $\lambda = 10^6$ adet$/A_F$ yoğunlukta, $x_T \sim U[0, m]$ ve $y_T \sim U[0, n]$ olacak şekilde (x_T, y_T) koordinatlarında bulunmakta ve $\theta \sim U[0, 2\pi]$ yönünde v hızı ile t süresince hareket etmektedirler (Bkz. Şekil 6.16).

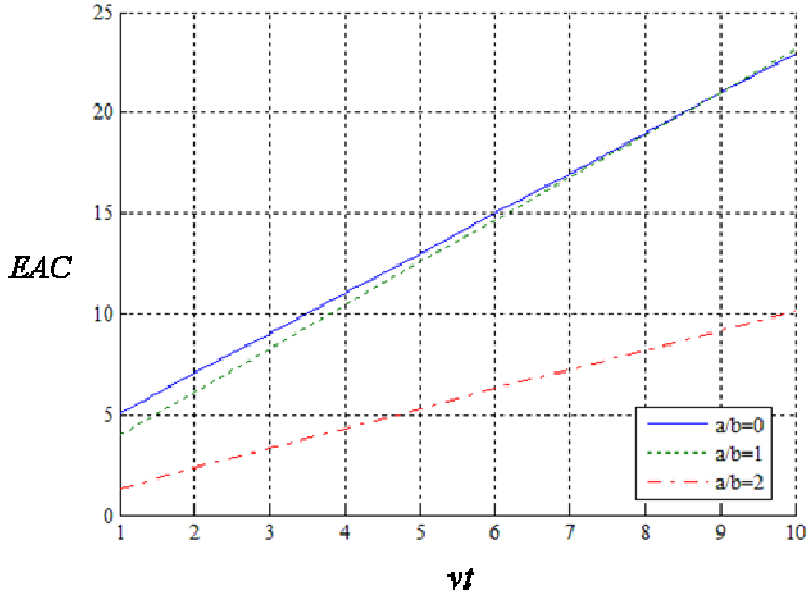


Şekil 6.16: m,n=22 km ve b=1 km için hareketli hedef simülasyonu

İlk grup simülasyonda sensörler sahaya, sırasıyla a/b=(0, 1, 2) sabit değerleri ile vt=(0,1,…,9) km için 10^3 kez rastgele yerleştirilmişlerdir. Her deneme için C ile kesişen T hedef izlerinin sayısı n_C, her vt değeri için 10^3 denemenin ortalaması $\overline{n}_C$ ise,

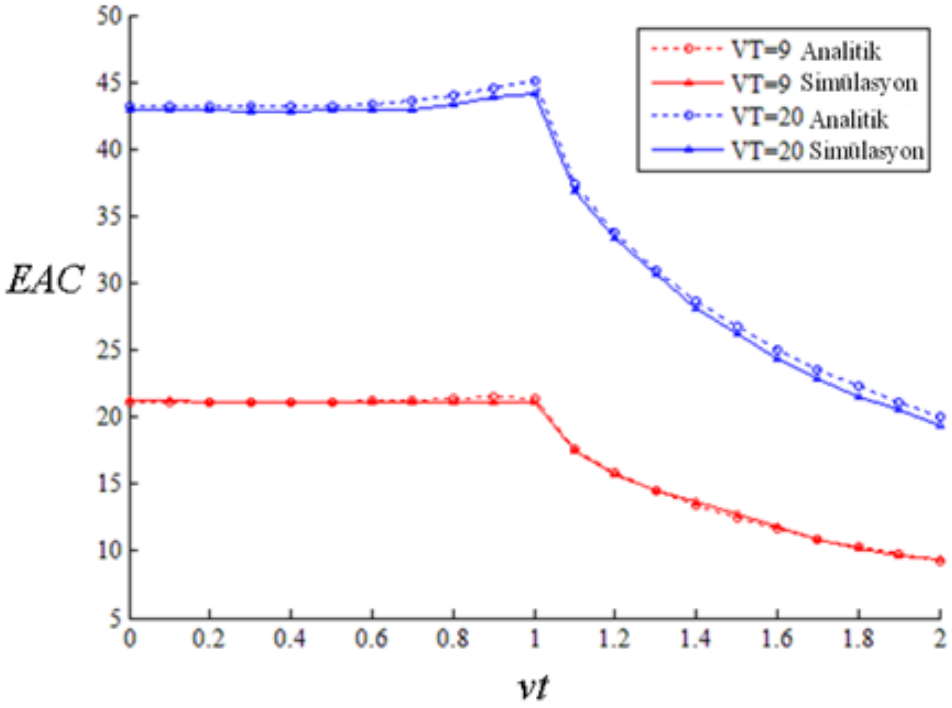
$$EAC = \frac{\overline{n}_C}{n_F} \cdot mn \tag{6.32}$$

olarak hesaplanmıştır. Sonuçta vt değerinin artması ile birlikte EAC'nin doğrusal olarak arttığı Şekil 6.17'de görülmektedir.



Şekil 6.17: *m,n*=22 km ve *a/b*=0, 1, 2 değerleri için hareketli hedef simülasyonu sonuçları

İkinci grup simülasyonda sensörler sahaya, *vt*=9 km ve 20 km değerleri ve $\frac{a}{b}=0,\frac{1}{10},\frac{2}{10},...,2$ oranları için 10^3 kez rastgele yerleştirilmişlerdir. Her deneme için *C* ile kesişen *T* hedef izlerinin sayısı n_C, her *a/b* değeri için yapılan 10^3 denemenin ortalaması $\overline{n}_C$ olarak belirlenmiş ve *EAC* (6.32) formülü ile hesaplanmıştır. Yapılan simülasyon sonucunda *vt*=9 için $\left(\frac{a}{b}\right)^* = 0,85$ ve *vt*=20 için $\left(\frac{a}{b}\right)^* = 1$ olarak tespit edilmiştir.



Şekil 6.18: *m,n*=22 km ve *vt*=9 km ve 20 km için hareketli hedef simülasyonu.

Hareketli hedefler için oluşturulan ikinci senaryo kapsamında yapılan simülasyon sonuçlarının, teorik değerler ile uyuştuğu tespit edilmiştir.

6.2. Multistatik Sensörlerin Optimizasyonu

Bu bölümde x_1 adet kaynak ve x_2 adet alıcıdan oluşan multistatik sistem ile en büyük *EAC* değerine ulaşmak için kullanılması gereken sensör yerleşim düzenlerinin 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 sonucunda sensörler arası mesafenin yanında sensör geometrisi, yani sensörlerin birbirlerine göre olan konumları da büyük önem kazanmaktadır.

Bu kapsamda; $b > 0$ eşdeğer monostatik tespit mesafesine sahip x_1 adet kaynak ve x_2 adet alıcı m' ve n' boyutlarına sahip $F' \subset \mathbb{R}^2$ sahasına yerleştirilmiştir. F' sahası, $m = m' + 2b$ ve $n = n' + 2b$ boyutlarındaki F sahası içinde Şekil 6.19'da görüldüğü gibi bulunmaktadır.

Optimum multistatik sensör yerleşim düzenlerinin belirlenmesi amacıyla iki ayrı yöntem kullanılmıştır. Bunlar sırasıyla "Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama (KTDOP)" ve "Genetik Algoritma (GA)" dır. Aşağıda her iki yöntem hakkında özet bilgi verilmiş ve elde edilen sonuçlar açıklanmıştır.

6.2.1. KTDOP yöntemi ile problemin çözümü

6.2.1.1. KTDOP yöntemi

Doğrusal olmayan bir fonksiyonun optimum değerinin elde edilmesi problemlerinin çözüm yöntemlerine Doğrusal Olmayan Programlama (DOP) denir. DOP'ta amaç fonksiyonu ya da kısıtlardan herhangi biri doğrusal değildir [86]. Doğrusal olmayan optimizasyon problemlerinin genel yapısı aşağıda görülmektedir [87,88].

$$\begin{aligned} &\min f(x) \\ &h_i(x) = 0 \quad i = 1,...,u \\ &g_j(x) \geq 0 \quad j = 1,...,v \\ &f : R^n \to R, h : R^n \to R^m \text{ ve } g : R^n \to R^p \end{aligned} \tag{6.33}$$

Yukarıda $f(x)$ amaç fonksiyonu, $h_i(x) = 0 \quad i = 1,...,u$ eşitlik kısıtı, $g_j(x) \geq 0 \quad j = 1,...,v$ ise eşitsizlik kısıtı olarak tanımlanır. Eğer problemde sadece bazı değişkenlerin tamsayı değerli olması gerekli iken diğer değişkenler, bölünebilirlik varsayımını karşılayan yani kesirli değerler alabilen değişkenler ise bu tür problemler, "Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama" problemleri olarak adlandırılır.

6.2.1.2. Model

Bu yöntemde problem ele alınırken F arama sahası kare şeklinde x_3 adet hücreye bölünmüş ve sahaya grid yapısı kazandırılmıştır. $k = 1, 2, ...x_3$ hücresinin orta noktası, $\left(\delta_k^x, \delta_k^y\right)$, C bölgesi içinde ise sözkonusu hücrenin kapsandığı varsayılmıştır. Bu varsayım altında KTDOP yöntemi formülasyonu aşağıda olduğu gibidir.

Parametreler

x_1 : kaynak adedi

x_2 : alıcı adedi

x_3 : sahadaki hücre adedi

b : eşdeğer monostatik tespit mesafesi (km)

m, n : F sahası eni ve boyu (km)

δ_k^x : k. hücre orta noktasının x-eksenindeki pozisyonu

δ_k^y : k. hücre orta noktasının y-eksenindeki pozisyonu

İndisler

i : $1, 2, ..., x_1$

j : $1, 2, ..., x_2$

k : $1, 2, ..., x_3$

Karar Değişkenleri

φ_i^x : i. kaynağın x-eksenindeki pozisyonu

φ_i^y : i. kaynağın y-eksenindeki pozisyonu

ψ_j^x : j. alıcının x-eksenindeki pozisyonu

ψ_j^y : j. alıcının y-eksenindeki pozisyonu

ρ_{ijk} : k. hücrenin i. kaynak ve j. alıcı ile kaplanmasına ilişkin kukla değişken

Amaç Fonksiyonu

$$\max\ z=\sum_{k=1}^{x_3}\left(1-\prod_{i=1}^{x_1}\prod_{j=1}^{x_2}\left(1-\rho_{ijk}\right)\right) \tag{6.34}$$

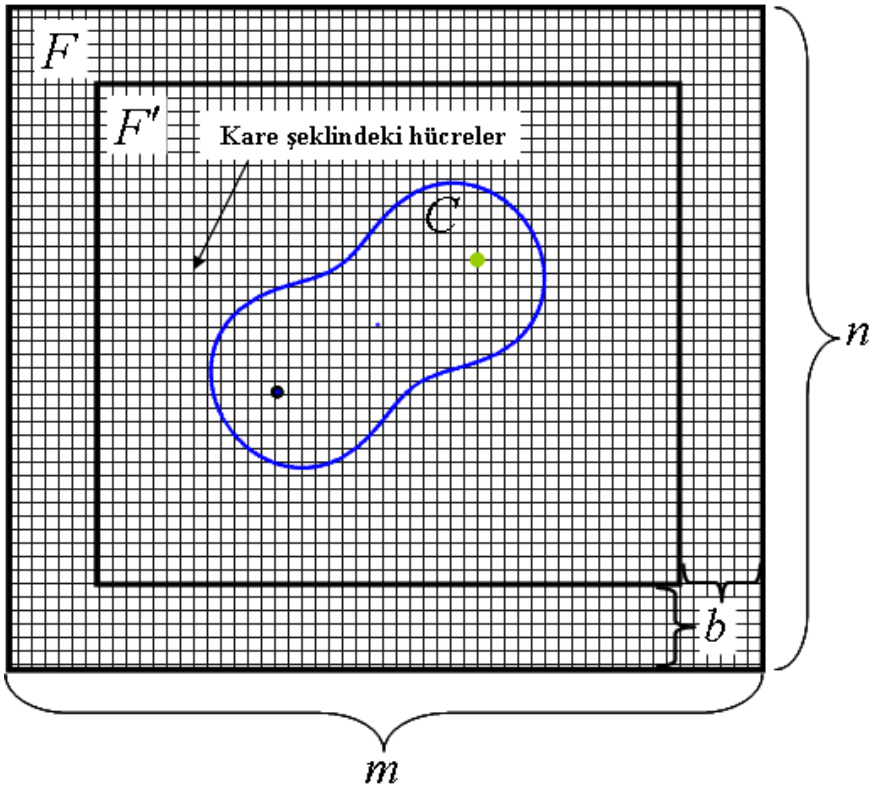
Kısıtlar

$$\rho_{ijk}\le\frac{b^4}{\left[(\varphi_i^x-\delta_k^x)^2+(\varphi_i^y-\delta_k^y)^2\right]\left[(\psi_j^x-\delta_k^x)^2+(\psi_j^y-\delta_k^y)^2\right]} \qquad \{1\}$$

$$m-b\ge\varphi_i^x,\psi_j^x\ge b \qquad \{2\} \tag{6.35}$$

$$n-b\ge\varphi_i^y,\psi_j^y\ge b \qquad \{3\}$$

$$\rho_{ijk}\in\{0,1\} \qquad \{4\}$$



Şekil 6.19: Kare şeklinde hücrelere bölünmüş F ve F' sahaları

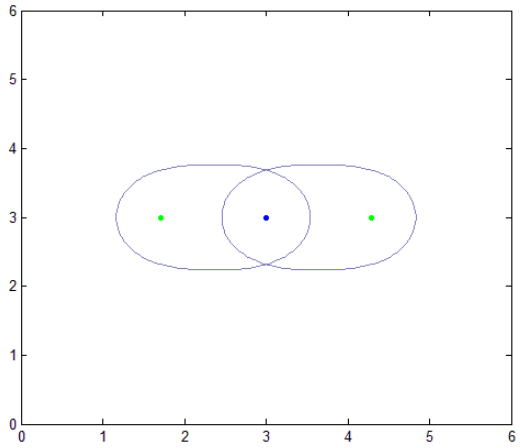
Hedef tespiti $R_1 R_2 \le b^2$ eşitsizliği sağlandığında meydana gelmektedir. Modeldeki {1} numaralı kısıt bu eşitsizlik dikkate alınarak oluşturulan hedef tespit kriteridir. $R_1 R_2 = \sqrt{\left[(\varphi_i^x - \delta_k^x)^2 + (\varphi_i^y - \delta_k^y)^2\right]\left[(\psi_j^x - \delta_k^x)^2 + (\psi_j^y - \delta_k^y)^2\right]}$ olarak ifade edilirse, $b^4 / (R_1 R_2)^2$ oranı ρ_{ijk}'nın 1'den küçük veya büyük olmasına etki etmektedir. {4} numaralı kısıt ile birleştiğinde ρ_{ijk}, 0 veya 1 değerini alabilmektedir. Herhangi bir hücrenin bir kaynak ve alıcı çifti tarafından kaplanıp kaplanmadığının kontrolü $b^4 / (R_1 R_2)^2$ oranının hesaplanması ile yapılmaktadır. Bu oran 1'den büyük ise ρ_{ijk}'nın 1 olma durumu *z*'yi artıracağından ρ_{ijk} {4} numaralı kısıt gereği 1 değerini alır. $b^4 / (R_1 R_2)^2$ oranının 1'den küçük olma durumunda ise ρ_{ijk} yine {4} numaralı kısıt gereği 0 değerini alır ve *z* değeri değişmez. Bu şekilde kapsanan her hücre için *z* amaç fonksiyonu değeri 1 artacak, kaplanmayan hücreler için bu değer 0 olacaktır. {2} ve {3} numaralı kısıtlar ise sensörlerin her zaman için *F* sahası içinde bulunmalarını kontrol etmektedir.

6.2.1.3. KTDOP ile elde edilen sonuçlar

Yukarıda açıklanan modelin, GAMS (General Algebraic Modeling System) [89] programının KTDOP için geliştirilmiş çözücüsü kullanılarak farklı sensör adetleri için çözülmesi sonucu elde edilen optimum sensör yerleşim düzenlerinin bazıları aşağıda belirtilmiştir.

6.2.1.3.1. Bir kaynak-iki alıcı

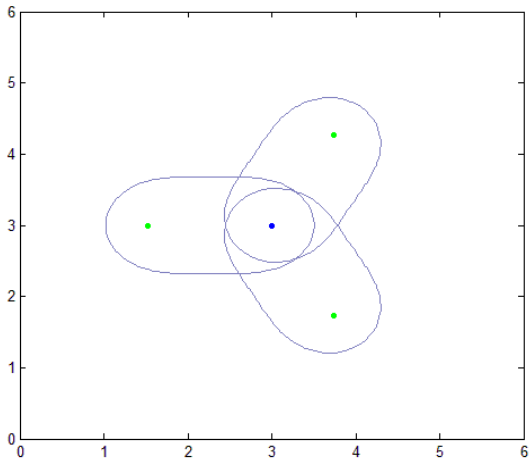
Alıcılar kaynağın zıt taraflarında kaynaktan olan mesafeleri eşit ve 1,29*b* olacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 6.20: Bir kaynak-iki alıcı için optimum sensör yerleşim düzeni

6.2.1.3.2. Bir kaynak-üç alıcı

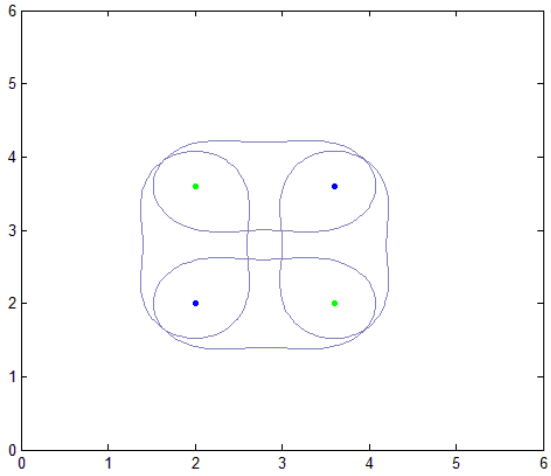
Alıcılar kaynağın etrafında 120'şer derece açı farkıyla ve kaynaktan olan mesafeleri eşit ve 1,47*b* olacak şekilde poligonal olarak yerleştirilmiştir.



Şekil 6.21: Bir kaynak-üç alıcı için optimum sensör yerleşim düzeni

6.2.1.3.3. İki kaynak-iki alıcı

Her kaynak aynı anda iki alıcı ile bistatik bir çift oluşturarak, sensörler arası mesafe 1,60*b* olacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 6.22: İki kaynak-iki alıcı için optimum sensör yerleşim düzeni

6.2.2. GA Yöntemi ile problemin çözümü

Sahada bulunan sensör sayısının artmasıyla birlikte KTDOP yöntemi yetersiz kaldığından, aynı problem sezgisel yöntemlerden Genetik Algoritma (GA) kullanılarak çözülmüş ve böylelikle çok sayıda sensörün bulunduğu durumlar için optimuma yakın yerleşim düzenleri oluşturulmuştur.

6.2.2.1. GA yöntemi

GA, karmaşık düzenli problemlerin çözümünü gerçekleştirmek amacıyla kromozomların yeni diziler üretme esasını temel alan, sezgisel bir araştırma yöntemidir [90]. GA matematiksel fonksiyonların global optimizasyonuna yaklaşmayı hedefler [91, 92]. GA bireylerden oluşan bir popülasyon üzerinde işlemektedir. Popülasyon problemin olası çözümlerini temsil eden bireylerden oluşmaktadır. Problemin olası çözümlerinin başlangıç popülasyonu ile başlanarak bundan daha iyi çözümler oluşturulmasına çalışılır. Popülasyon, zaman içerisinde değişir, ancak aynı sayıda elemana sahiptir [93]. Genetik algoritmanın genel yapısı içerisinde popülasyon içerisindeki her çözüme diğer çözümler ile karşılaştırıldığında ne kadar iyi bir çözüm olduğunu gösteren bir uyum değeri atanır. Doğal hayatta uyum değeri bireyin veya organizmanın yaşayabilmek için mücadele ederken ne kadar başarılı olduğunu gösterir. Uyum değeri ne kadar büyükse

bireyin veya organizmanın, sonraki nesilde yaşama şansı ve özelliklerini sonraki nesillere taşıma şansı o kadar fazla olur. [94]. İlk neslin oluşması için öncelikle belirli bir sayıda organizma seçildikten sonra yeni bir neslin yaratılması için mevcut nesilden seçilen ailelere bazı genetik operatörler uygulanır. Burada iyi çocuklar iyi aileden doğar fikrine uygun olarak mevcut nesil için yüksek uygunluk değerine sahip organizmaların aile olarak seçilme şansları da doğal olarak yüksektir [95]. Problemdeki parametreleri temsil eden kromozom yapısı içindeki genlerin dizilişinin gösterimi genel olarak ikili sistem (0-1 sistemi) kullanılarak gerçekleştirilir. Bir başka deyişle kromozomlar, 0'lar ve 1'lerden oluşan dizilerdir.

GA genel olarak optimizasyon problemlerinde başarılıdır. Bir optimizasyon problemi için GA oluşturmadaki ilk adım, aday çözümlerin oluşturulmasıdır. Basit bir genetik algoritmada aday çözümler aynı sayıda elemandan bir bit dizisi formunda oluşturulur. Genetik algoritma içerisinde problemin çözüm uzayı kromozomlardan oluşur ve bu kromozomlardan diziler ya da vektörler olarak söz edilir. Başlıca GA terimleri:

Gen: Kalıtsal molekülde bulunan ve organizmanın karakterlerinin tayininde rol oynayan kalıtsal birimlere denir. Yapay sistemlerde gen, kendi başına anlamlı bilgi taşıyan en küçük birim olarak tanımlanır.

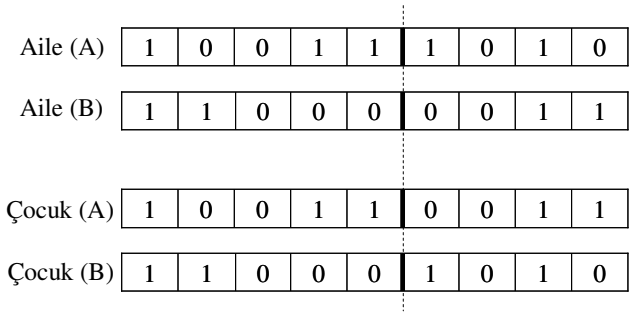
Kromozom (Birey): Birden fazla genin bir araya gelerek oluşturduğu diziye denir. Kromozomlar, alternatif aday çözümleri gösterirler.

Popülasyon: Kromozomlardan oluşan topluluğa denir. Popülasyon, geçerli alternatif çözüm kümesidir. Popülasyondaki birey sayısı (kromozom) genelde sabit tutulur. GA'da popülasyondaki birey sayısı ile ilgili genel bir kural yoktur. Popülasyondaki kromozom sayısı arttıkça çözüme ulaşma süresi (iterasyon sayısı) azalır.

Kromozomların kopyalanması işleminde üç farklı tür genetik operatör kullanılmaktadır. Bunlar [96]:

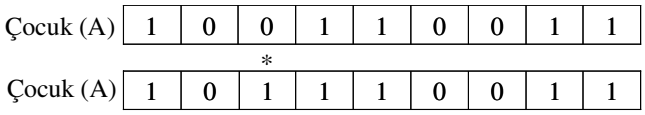
Tekrar Üreme (Reproduction): Her bireyi bir nesilden diğerine aynen kopyalama işlemidir. Uygunluk derecesi yüksek olan kromozomlar üstün nitelikli çocuk üretiminde kullanılmak üzere bu yöntemle çoğaltılır.

Çaprazlama (Crossover): İki veya daha fazla kromozomdan yeni bir kromozom meydana getirme işlemidir. Literatürde en çok kullanılan çaprazlama operatörleri, tek nokta çaprazlama, iki nokta çaprazlama, çok nokta çaprazlama ve tekbiçimli çaprazlamadır [97]. En yaygın kullanılan uygulama şekli, kromozom yapısı üzerinde rastgele bir ayrım noktası belirlenmesi ve bu ayrım noktası sonrasında kalan genlerin karşılıklı olarak değişimidir. Aşağıdaki örnekte ayrım sonrası genleri (1-0-1-0) ve (0-0-1-1) karşılıklı olarak yer değiştirmiştir.



Şekil 6.23: Çapraz değişim örneği

Mutasyon (Mutation): Kromozom yapısı içinde değişiklik yapma işlemidir. Kaybolan genetik materyalin yeniden elde edilmesini sağlayan bir operatördür. Genellikle rastgele şekilde belirlenen bir genin değiştirilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Aşağıdaki örnekte üçüncü gen rastgele olarak belirlenmiş ve değeri 0'dan 1'e değiştirilmiştir.



Şekil 6.24: Mutasyon örneği-1

Bazı durumlarda kromozom üzerinde rastgele iki gen seçilerek karşılıklı olarak yer değiştirmeleri sağlanır.

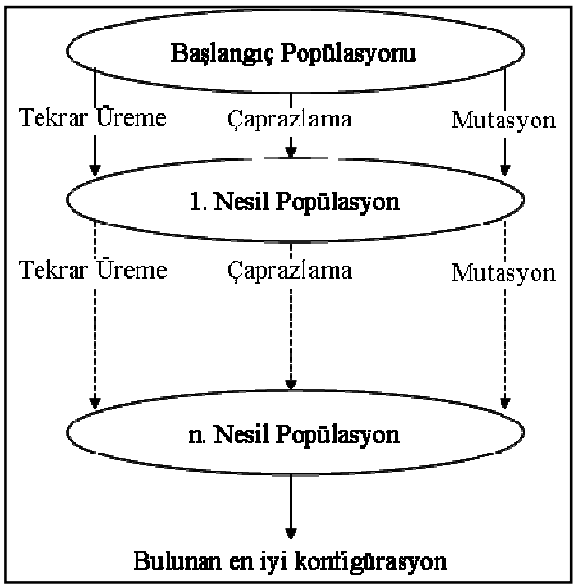
Çocuk (A)	4	7	1	9	2	6	8	5	3
			*						*
Çocuk (A)	4	7	3	9	2	6	8	5	1

Şekil 6.25: Mutasyon örneği-2

Mutasyonun yararlı değişimler yerine yararsız hatta bozucu değişimler yaratabilme olasılığı da vardır. GA'larda her çözümün her bitinin mutasyondan etkilenme olasılığı vardır. Bu olasılık P_M ile gösterilir. Popülasyondaki her dizinin her bir biti için 0 ile 1 arasında bir *r* rastgele sayısı yaratılır. Eğer $r < P_M$ ise ilgili bit değişikliğe uğrar. P_M mutasyon olasılığı küçük bir olasılıktır. Genellikle $P_M \in [0,001;0,01]$'dir.

Belirli sayıda çaprazlama ve mutasyon gerçekleştikten sonra, yeni popülasyondaki her bir dizinin uyumunun ölçülmesiyle başlayan süre yinelenir. Kabul edilebilir bir çözüm bulunana kadar ya da önceden belirlenen kuşak sayısı kadar işleyiş sürer [97].

GA yöntemi akış şeması Şekil 6.26'da gösterilmiştir. Sensör konumlarına ilişkin başlangıç popülasyonun oluşturulmasının ardından seçim ve genetik operatörler uygulanmakta ve bulunan en iyi sensör yerleşim düzeni kullanıcıya sunulmaktadır.



Şekil 6.26: GA akış şeması

6.2.2.2. Model

GA yönteminin multistatik sistemlerin optimizasyonuna uygulanması için MATLAB® programının "Genetik Algoritma Optimizasyon Araç Kutusu (The Genetic Algorithm Optimization Toolbox-GAOT)" arayüzünden yararlanılmıştır. Problemin GA ile formülasyonu aşağıda açıklanmıştır.

Parametreler

x_1 : kaynak adedi

x_2 : alıcı adedi

x_3 : hücre adedi

b : eşdeğer monostatik tespit mesafesi (km)

m, n : F sahası eni ve boyu (km)

δ_k^x : k. hücre orta noktasının x-eksenindeki pozisyonu

δ_k^y : k. hücre orta noktasının y-eksenindeki pozisyonu

İndisler

i : $1, 2, \ldots x_1$

j : $1, 2, \ldots x_2$

k : $1, 2, \ldots x_3$

Karar Değişkenleri

φ_i^x : i. kaynağın x-eksenindeki pozisyonu

φ_i^y : i. kaynağın y-eksenindeki pozisyonu

ψ_j^x : j. alıcının x-eksenindeki pozisyonu

ψ_j^y : j. alıcının y-eksenindeki pozisyonu

t_k : k. hücrenin herhangi bir kaynak ve alıcı çifti tarafından kaplanmasına ilişkin kukla değişken {0 veya 1}

Amaç Fonksiyonu

$$\min z = -\sum_{k=1}^{x_3} t_k \tag{6.36}$$

Kısıtlar

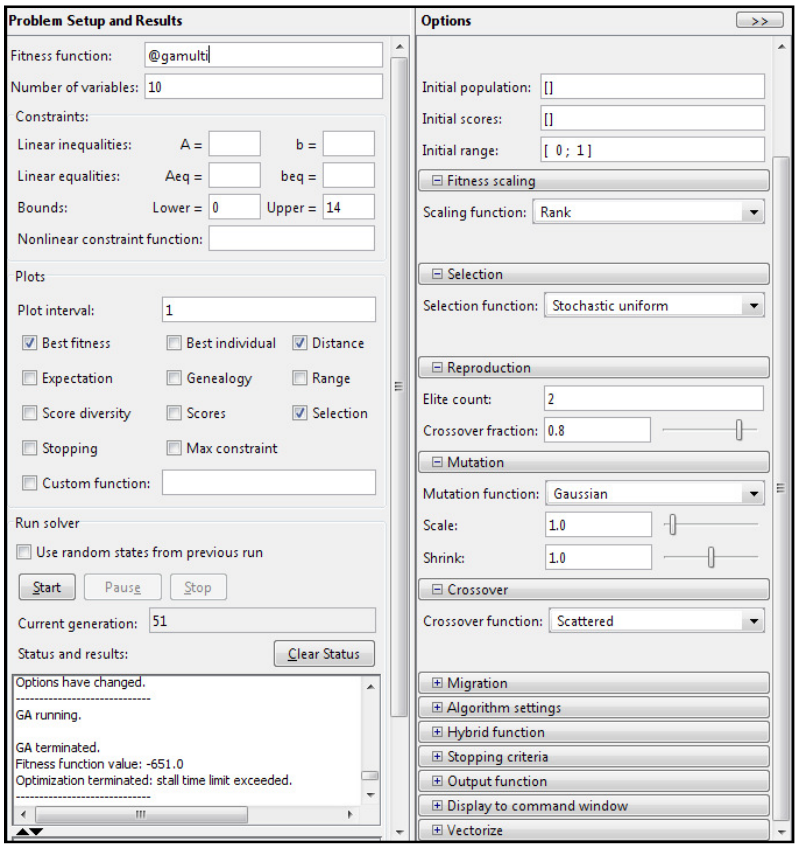
$$t_k = \begin{cases} 0 \ , \left[(\varphi_i^x - \delta_k^x)^2 + (\varphi_i^y - \delta_k^y)^2\right]\left[(\psi_j^x - \delta_k^x)^2 + (\psi_j^y - \delta_k^y)^2\right] > b^4 \\ 1 \ , \text{diğer} \end{cases} \quad \{1\}$$

$$m - b \geq \varphi_i^x, \psi_j^x \geq b \quad \{2\} \tag{6.37}$$

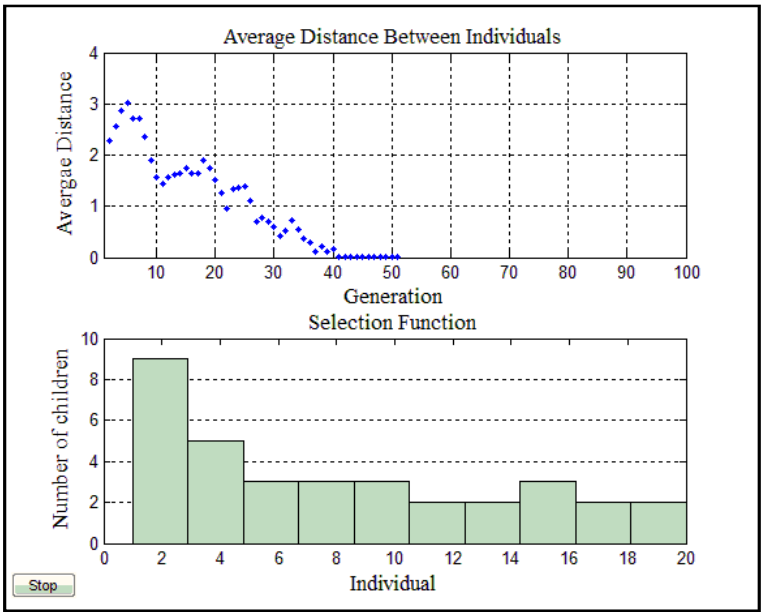
$$n - b \geq \varphi_i^y, \psi_j^y \geq b \quad \{3\}$$

Yukarıdaki modelde t_k kukla değişkeni toplamının en büyütülmesi veya toplamın -1 ile çarpılarak en küçüklenmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda ilk kısıt, {1}, olarak, *k* hücresi sensörlerin tespit bölgesinde ise t_k değişkeni 1, aksi takdirde 0 değerini almaktadır. Bu şekilde kapsanan her hücre için *z* amaç fonksiyonu değeri 1 artmaktadır. {2} ve {3} numaralı kısıtlar ise sensörlerin her zaman için *F* sahası içinde bulunmalarını sağlamaktadır.

GA modelinde her sensörün *x* ve *y*-eksenlerindeki konumları birer gen, tüm sensör konumlarının oluşturduğu çözüm kümesi ise kromozon olarak değerlendirilmiştir. Şekil 6.27'de MATLAB® GAOT arayüzü, Şekil 6.28'de ise söz konusu arayüz kullanarak tek kaynak ve dört alıcı için elde edilen sonuçlara ilişkin örnek grafikler görülmektedir. Bu örnekte tek kaynak ve dört alıcı için toplam beş konum, her konum için ise *x* ve *y*-eksenleri için iki ayrı değer olduğundan değişken sayısı 10 olarak ifade edilmiştir.



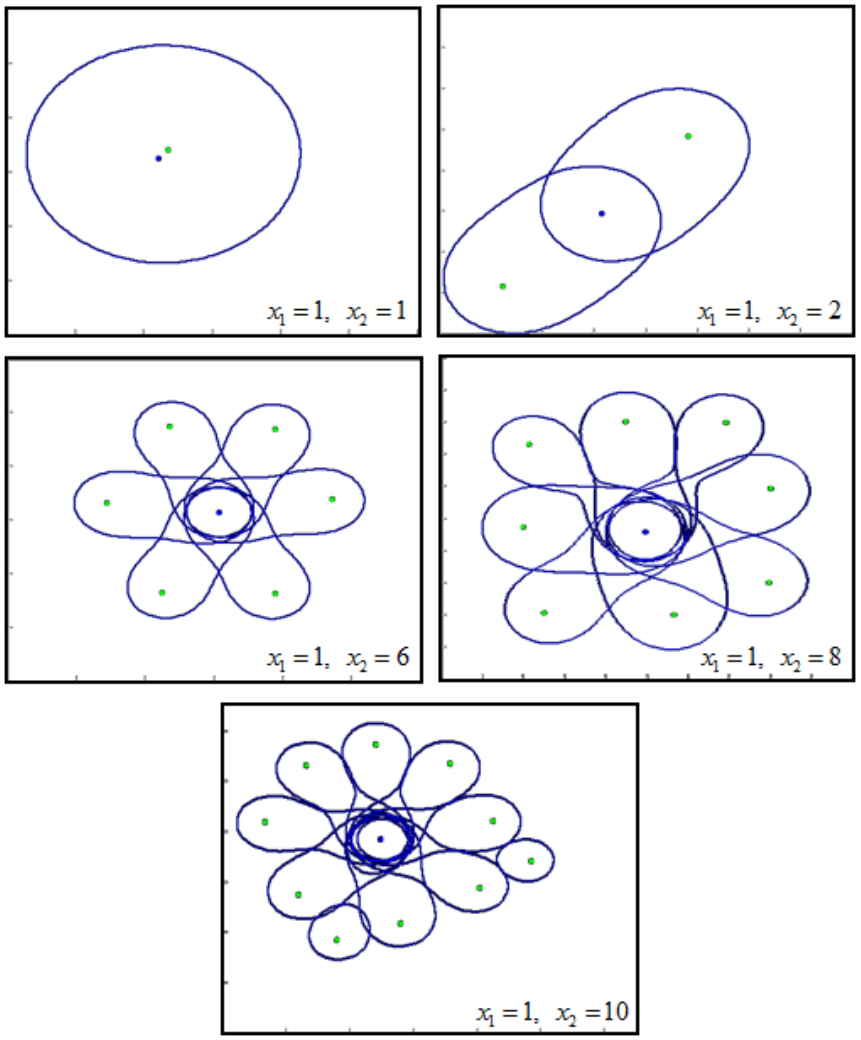
Şekil 6.27: MATLAB GAOT arayüzü ile tek kaynak ve dört alıcı parametre girişi



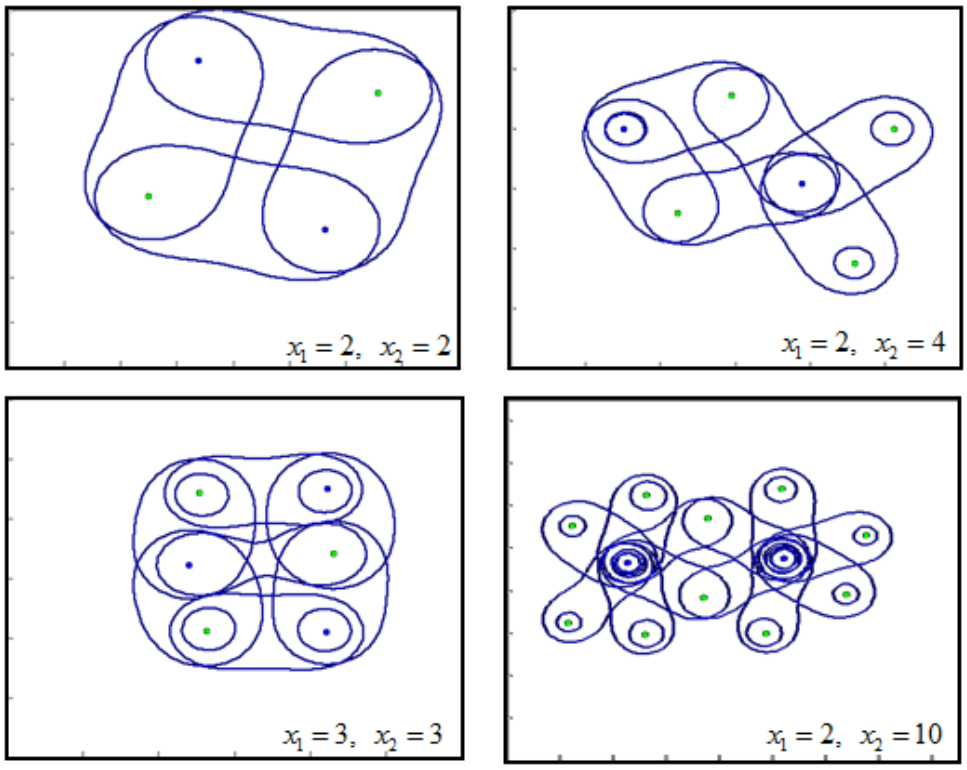
Şekil 6.28: Tek kaynak ve dört alıcı optimizasyonu problemi için elde edilen sonuçların MATLAB GAOT ile grafiksel gösterimi

6.2.2.3. GA ile elde edilen sonuçlar

GA kullanılarak elde edilen sonuçların KTDOP kullanılarak elde edilen sonuçlara oldukça yakın olduğu gözlenmiştir. Bu kapsamda, KTDOP yönteminde olduğu gibi, alıcıların kaynak etrafında poligonal şekilde yerleştirilmelerinin en uygun hareket tarzı olduğu, çok sayıda sensör olması durumunda ise aşağıda belirtilen yerleşim düzenleri ile en büyük kaplamanın sağlanacağı tespit edilmiştir. Tek kaynak içeren multistatik sistemler için elde edilen GA çözümleri Şekil 6.29'da, birden çok kaynak içeren multistatik sistemler için elde edilen GA çözümleri Şekil 6.30'da sunulmuştur. Şekillerde x_1 kaynak adedi, x_2 ise alıcı adedini simgelemektedir.



Şekil 6.29: Tek kaynak içeren multistatik sistemler için GA çözümleri



Şekil 6.30: Birden çok kaynak içeren multistatik sistemler için GA çözümleri

6.2.3. Simülasyon sonuçları

Multistatik sensörler ile sağlanabilecek *EAC*'nin en büyütülmesi için kullanılması gereken yerleşim düzenleri KTDOP ve GA yöntemleri ile belirlenmiştir. Bu bölümde, söz konusu yerleşim düzenlerinin etkinliği Monte Carlo simülasyonları ile test edilmiştir. Yapılan tüm simülasyonlarda b=1 km olarak kabul edilmiştir.

Simülasyonlar iki ana gruptan oluşmaktadır. İlk grup simülasyonda tek kaynak ve çok sayıda alıcı durumu ele alınmış, poligonal yerleşim düzenleri için kaynak alıcı mesafesinin doğruluğu test edilmiştir.

İkinci grup simülasyonda ise aynı sayıda sensörden oluşan ancak farklı yerleşim düzenlerine sahip sistemler ile elde edilen *EAC* değerleri ile KTDOP ve GA yöntemleri ile elde edilen *EAC* değerleri karşılaştırılmıştır.

6.2.3.1. Tek kaynak simülasyonu

Saha: Arama sahası *F*, kenar uzunlukları *m*,*n*=6 km ve alanı $A_F = m.n = 36 \text{ km}^2$ olan bir karedir.

Hedefler: Simülasyon kapsamında sahada $n_F = 10^6$ adet hedef rastgele noktalarda oluşturulmuştur. Oluşturulan her hedef sahada $x_F \sim U[0,m]$ ve $y_F \sim U[0,n]$ dağılımıyla rastgele belirlenen (x_F, y_F) noktalarına yerleştirilmiştir.

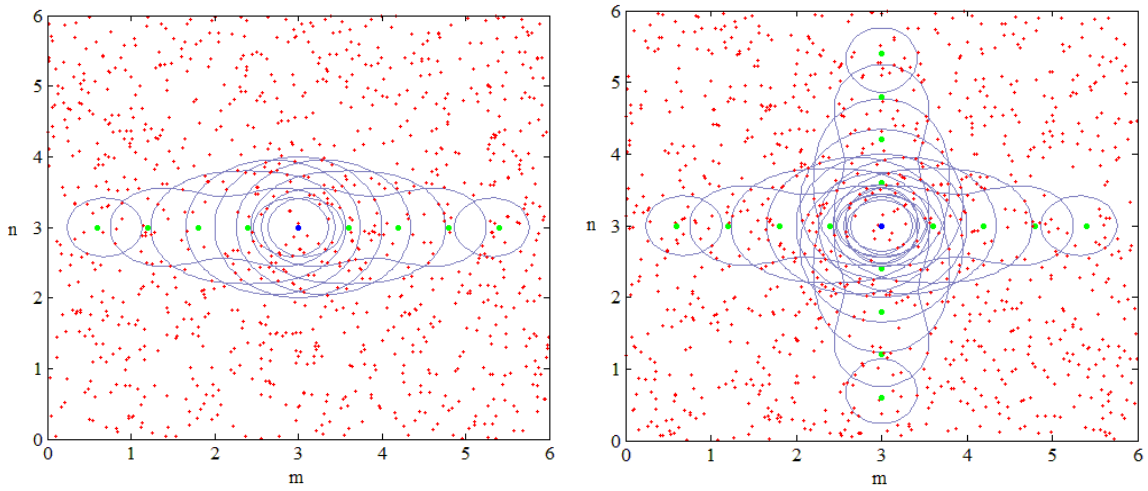
Sensörler: Simülasyon $x_1 = 1$ adet kaynak etrafında $x_2 = 2,..,6$ adet alıcının poligonal olarak yerleştirildiği durumlar için yapılmıştır. Simülasyon başlangıcında kaynak ve alıcılar sahanın orta noktasında bulunmakta, her simülasyon adımında alıcılar birbirleri ile $(2\pi/x_2)$ açı farkı yapacak şekilde kaynaktan $\kappa = 0,01$ km uzaklaştırılmakta, bu işlem alıcılar ile kaynak arasındaki mesafe, *d*=2 km olana kadar devam etmektedir. *d*=[0,2] km aralığındaki her adım için *C* içinde kalan hedef sayısı n_C sayılmakta, *EAC*,

$$EAC = PoD.A_F = \frac{n_C}{n_F} \cdot A_F \tag{6.38}$$

formülü ile hesaplanmaktadır.

6.2.3.1.1. Simülasyon sonuçları

Şekil 6.31'de $x_1 = 1$, $x_2 = 2$ ve $x_1 = 1$, $x_2 = 4$ için poligonal yerleşim düzeni simülasyonu görülmektedir. Kaynak sahanın merkezinde bulunmaktadır ve her simülasyon adımı için alıcıların konumları değişmektedir. Alıcıların konumlarının değişmesi ile değişen tespit bölgelerinin sınırları Cassini ovalleri ile belirtilmiştir.



Şekil 6.31: (*i*) $x_1 = 1$, $x_2 = 2$ için poligonal yerleşim düzeni simülasyonu
(*ii*) $x_1 = 1$, $x_2 = 4$ için poligonal yerleşim düzeni simülasyonu

En büyük *EAC*'yi sağlayan sensör ayrım mesafeleri için elde edilen simülasyon sonuçları ile teorik değerler Tablo 6.2'de karşılaştırılmış, sonuçta teorik ve simülasyon değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu görülmüştür.

Tablo 6.2: Poligonal yerleşim düzenleri için kaynak-alıcı optimum mesafelerinin KTDOP yöntemi ile ve simülasyon soucunda 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

6.2.3.2. Birden çok kaynak simülasyonu

Bu bölümde hem kaynak hem de alıcı sayısının birden fazla olduğu durumlar için KTDOP ve GA yöntemleri ile elde edilen yerleşim düzenlerinin etkinliği test edilmiştir.

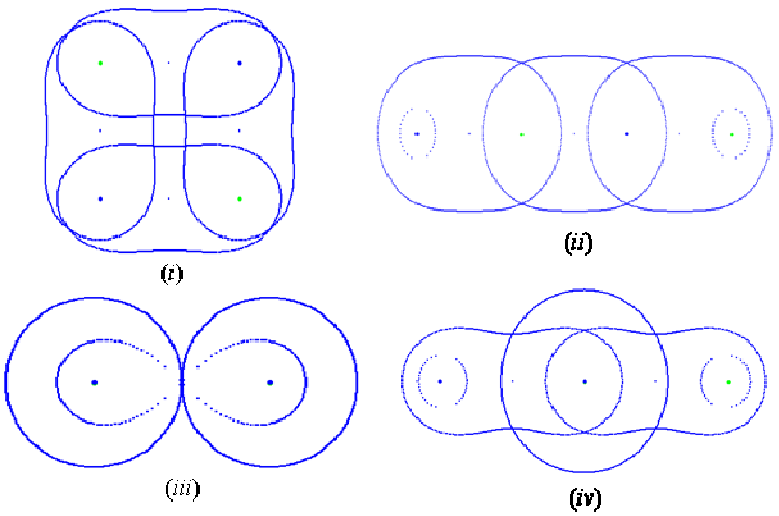
Saha: Arama sahası *F*, kenar uzunlukları *m*,*n*=12 km, alanı $A_F = m.n = 144$ km^2 olan bir karedir.

Hedefler: Simülasyon kapsamında sahada $n_F = 10^6$ adet hedef rastgele noktalarda oluşturulmuştur. Oluşturulan her hedef sahada $x_F \sim U[0,m]$ ve $y_F \sim U[0,n]$ dağılımıyla rastgele belirlenen (x_F, y_F) noktasına yerleştirilmiştir.

Sensörler: Simülasyonlar kapsamında $x_1, x_2 = 2, x_1, x_2 = 3$ ve $x_1, x_2 = 4$ adet sensörden oluşan multistatik sistemlerin *EAC* değerleri test edilmiştir. Her grup simülasyon için KTDOP ve GA yöntemi ile elde edilen yerleşim düzeni haricinde 4'er adet farklı yerleşim düzeni denenmiş, her yeni düzen için *EAC* değeri hesaplanarak karşılaştırma yapılmıştır.

6.2.3.2.1. Simülasyon sonuçları

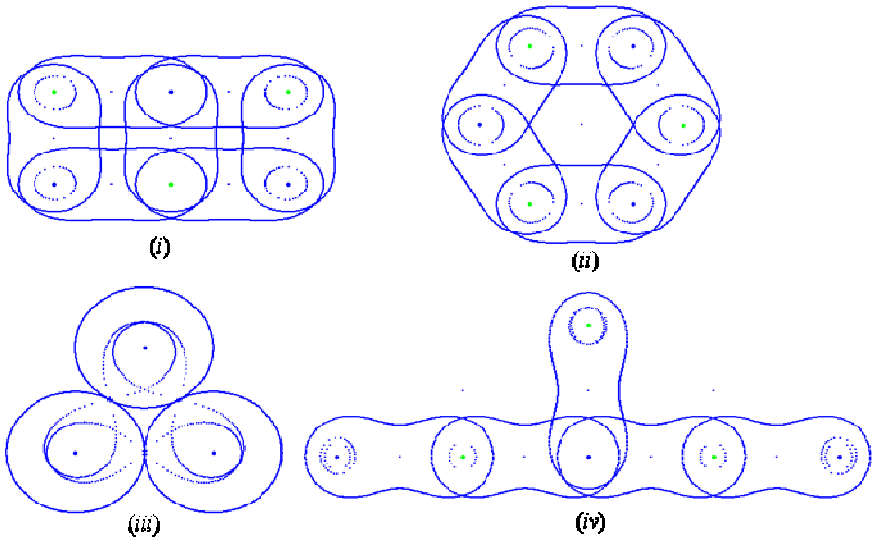
Her simülasyon grubu için belirlenen yerleşim düzenleri alternatifleri sırasıyla Şekil 6.32, Şekil 6.33 ve Şekil 6.34'te, yerleşim düzenlerine ilişkin elde edilen *EAC* değerleri ise Tablo 6.3, Tablo 6.4 ve Tablo 6.5'te özetlenmiştir.



Şekil 6.32: $x_1, x_2 = 2$ adet kaynak ve alıcı için belirlenen yerleşim düzeni alternatifleri

Tablo 6.3: $x_1, x_2 = 2$ adet kaynak ve alıcı için farklı alternatiflerin karşılaştırılması

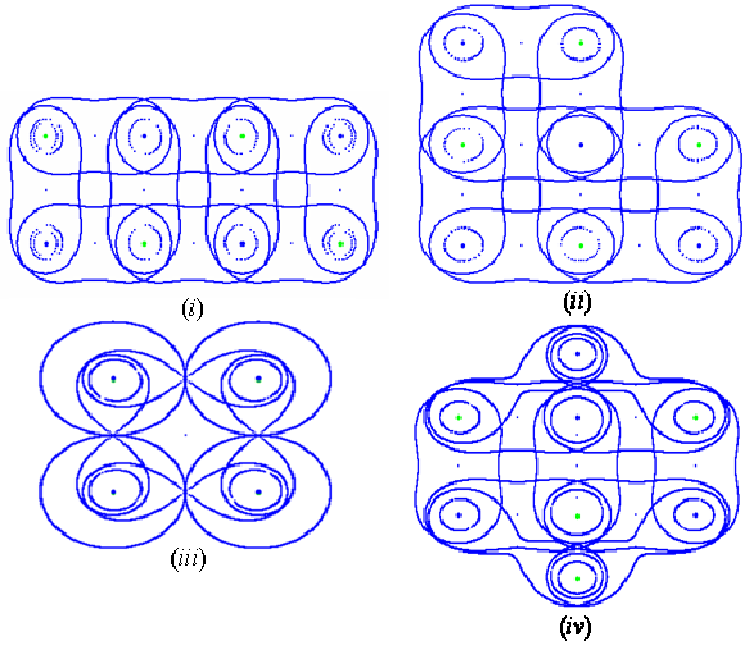
Alternatif	EAC (km^2)	Sıralama
(*i*)	7.23	(*i*)
(*ii*)	6.86	(*ii*)
(*iii*)	6.28	(*iii*)
(*iv*)	5.63	(*iv*)



Şekil 6.33: $x_1, x_2 = 3$ adet kaynak ve alıcı için belirlenen yerleşim düzeni alternatifleri

Tablo 6.4: $x_1, x_2 = 3$ adet kaynak ve alıcı için farklı alternatiflerin karşılaştırılması

Alternatif	EAC (km^2)	Sıralama
(*i*)	11.63	(*i*)
(*ii*)	11.44	(*ii*)
(*iii*)	9.42	(*iv*)
(*iv*)	10.37	(*iii*)



Şekil 6.34: $x_1, x_2 = 4$ adet kaynak ve alıcı için belirlenen yerleşim düzeni alternatifleri

Tablo 6.5: $x_1, x_2 = 4$ adet kaynak ve alıcı için farklı alternatiflerin karşılaştırılması

Alternatif	EAC (km^2)	Sıralama
(*i*)	16.04	(*i*)
(*ii*)	15.91	(*ii*)
(*iii*)	12.57	(*iv*)
(*iv*)	14.27	(*iii*)

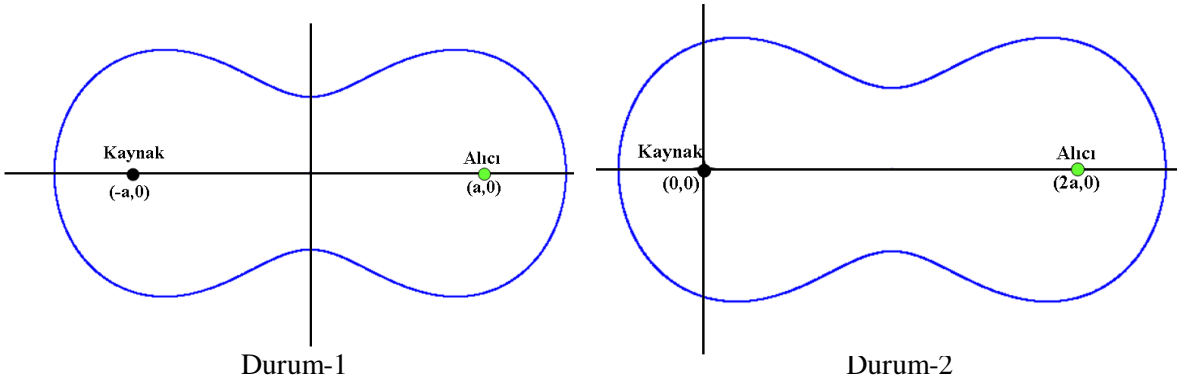
Yapılan simülasyonlar sonucunda KTDOP ve GA yöntemleri ile elde edilen ve Alternatif (*i*) ile belirtilen sensör yerleşim düzenlerinin en büyük *EAC*'yi veren düzenler olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca optimum düzenlerin genel olarak diğer alternatiflere kıyasla oluşturulmalarının daha kolay olduğu görülmüştür.

6.2.4. Poligonal yerleştirme stratejilerinin analitik olarak değerlendirilmesi

6.2.4.1. Bir kaynak-*n* alıcı poligonal yerleştirme

Bu bölümde bir kaynak etrafına poligonal şekilde yerleştirilmiş *n* adet alıcı ile elde edilecek kaplamanın analitik yöntemlerle hesaplanması açıklanmıştır. Bunun için

öncelikle Cassini ovalinin *x*-ekseni üzerinde, kaynak merkezde olacak şekilde pozitif yönde *a* mesafesi kadar kaydırılması sonucunda elde edilecek kartezyen denklemi oluşturulmuştur.



Şekil 6.35: Cassini ovalinin kartezyen düzleminde iki farklı durum için yerleştirilmesi

Cassini ovalinin kartezyen denklemi Durum-1 için (4.6) ile belirtilmiştir. Durum-2 için ise bu denklem:

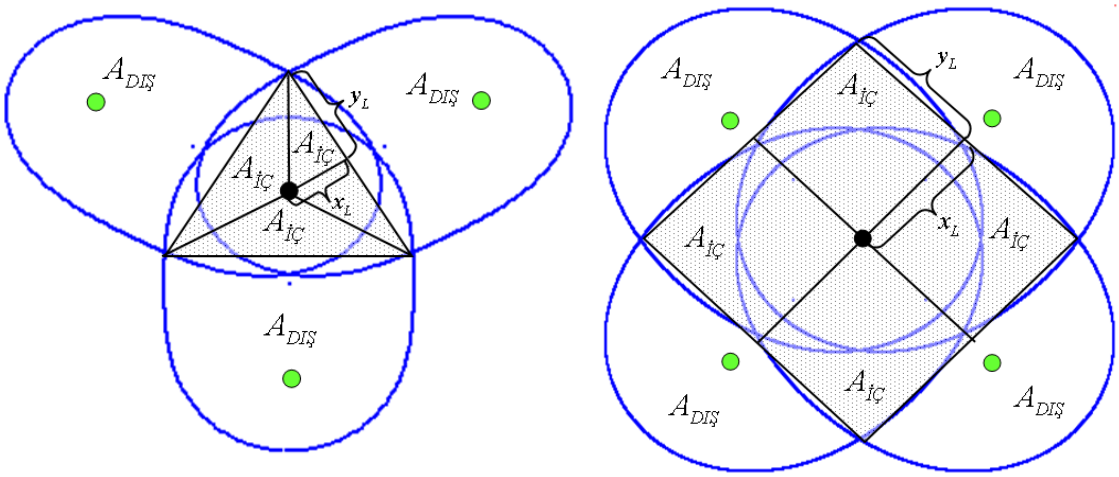
$$((x-2a)^2+y^2).(x^2+y^2)=b^4 \tag{6.39}$$

olarak yazılabilir. Buradan yola çıkarak (6.39) denklemi,

$$y=f_C(x)=\pm\sqrt{-2ax-2a^2-x^2\pm\sqrt{4x^2a^2-8xa^3+4a^4+b^4}} \tag{6.40}$$

olarak değiştirilmiştir.

Kaynak etrafında *n* adet alıcı poligonal şekilde yerleştirilir ise, *n*=3 ve *n*=4 için elde edilecek örnek kaplama bölgesi Şekil 6.36'daki gibi olacaktır.



(*i*) (*ii*)

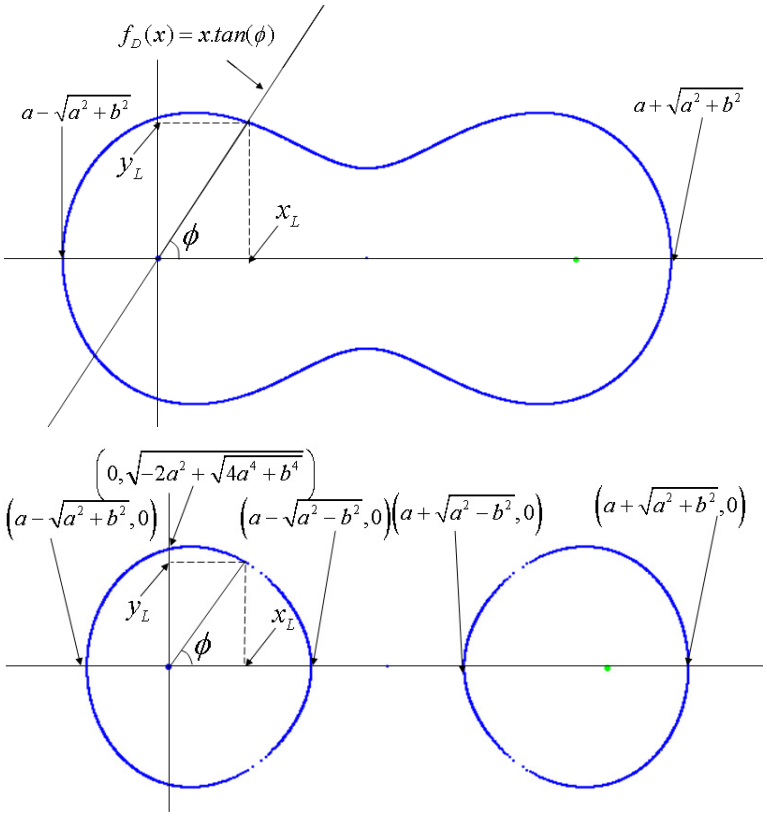
Şekil 6.36: (*i*) *n*=3 için poligonal yerleştirme (*ii*) *n*=4 için poligonal yerleştirme

Yukarıdaki şekillerde her bir Cassini ovali için $A_{İÇ}$ ve $A_{DIŞ}$ bölgeleri ile x_L ve y_L mesafeleri görülmektedir. Bu durumda $A_{DIŞ} = \int_{x_L}^{x_U} f_C(x)\partial x$ ve $A_{İÇ} = x_L.y_L$ ise;

$$EAC = n(A_{İÇ} + A_{DIŞ}) \tag{6.41}$$

olarak hesaplanır.

Kaynak konumu (0,0)'da sabit olacak şekilde, Cassini ovali koordinat merkezinde *x*-ekseni ile pozitif yönde ϕ derece yapacak şekilde döndürülürse, oval üzerindeki (x_L, y_L) noktası *y*-ekseni ile kesişen nokta olarak hesaplanabilir. Bu durumda *EAC*'nin hesaplanabilmesi için x_L mesafesinin belirlenmesi kritik önem taşımaktadır. x_L ve y_L noktalarının hesaplanabilmesi için $a/b \le 1$ ve $a/b > 1$ durumlarında kaynağın kartezyen koordinat düzlemi merkezinde iken Cassini ovalinin *x*-eksenini kestiği noktalar Şekil 6.37'de gösterilmiştir.



Şekil 6.37: $a/b \le 1$ ve $a/b > 1$ için kaynağın kartezyen koordinat düzlemi merkezinde bulunduğu durumda Cassini ovalinin *x*-eksenini kestiği noktalar

$f_D(x)$, *x*-ekseni ile ϕ derece açı ile kartezyen düzlemi merkezinden geçen doğru denklemi ise, $f_C(x) = f_D(x)$ eşitliği ile sözkonusu doğru ile Cassini ovalinin kesişim noktası koordinatları belirlenebilir. $f_D(x) = x.\tan(\phi) = x.k$ ve $k = \tan(\phi)$ ise,

$$\sqrt{2ax - 2a^2 - x^2 + \sqrt{4x^2a^2 - 8xa^3 + 4a^4 + b^4}} = x.k \qquad (6.42)$$

denkleminin çözülmesi sonucunda;

$$x_L = \frac{a.k^2 + a}{2k^2 + k^4 + 1} - \frac{\sqrt{6}.\sqrt{\Phi_2}}{6(1+k^2)} + \frac{1}{6(1+k^2)}$$

$$\left[\frac{\left(\begin{array}{l} 18.\sqrt{\Phi_2} b^4 k^{12} - 24\sqrt{\Phi_2}\sqrt{2}.a^4 k^{12} + 108.\sqrt{\Phi_2} b^4 k^{10} \\ -144\sqrt{\Phi_2}\sqrt{2}.a^4 k^{10} + 270.\sqrt{\Phi_2} b^4 k^8 - 360\sqrt{\Phi_2}\sqrt{2}.a^4 k^8 \\ +72a^3 k^6 \sqrt{6}.\sqrt[3]{\Phi_1} - 480\sqrt{\Phi_2}\sqrt{2}.a^4 k^6 - 48a^2 k^6 \sqrt{6}.\sqrt[3]{\Phi_1}\sqrt{\Phi_2} \\ +360\sqrt{\Phi_2}.b^4 k^6 - 360\sqrt{\Phi_2}.a^4 k^6 + 144a^3 k^4 \sqrt{6}.\sqrt[3]{\Phi_1} \\ -72a^2 k^4 \sqrt{6}.\sqrt[3]{\Phi_1}\sqrt{\Phi_2} + 270\sqrt{\Phi_2}.b^4 k^4 - 144\sqrt{\Phi_2}.a^4 k^2 \\ +72a^3 k^2 \sqrt{6}.\sqrt[3]{\Phi_1} - 108\sqrt{\Phi_2}.b^4 k^2 + 24a^2 \sqrt[3]{\Phi_1}\sqrt{\Phi_2} \\ +18\sqrt{\Phi_2}.b^4 - 24\sqrt{\Phi_2}.a^4 - 6\sqrt[3]{\Phi_1^2}\sqrt{\Phi_2} \end{array} \right)}{\sqrt[3]{\Phi_1}\sqrt{\Phi_2}\left(2k^2 + k^4 + 1\right)} \right] \quad (6.43)$$

ve

$$y_L = \sqrt{2ax_L - 2a^2 - x_L^2 + \sqrt{4x_L^2 a^2 - 8x_L a^3 + 4a^4 + b^4}} \quad (6.44)$$

bulunur. (6.43) denklemindeki Φ_1 ve Φ_2 değerleri;

$$\Phi_1 = \left(\begin{array}{l} 8a^6 k^2 + 18b^4 k^2 a^2 + 8a^6 - 9b^4 a^2 + \\ 3\sqrt{3}b^2 \sqrt{\begin{array}{l} 16a^8 k^4 + b^8 k^4 + 8a^4 k^4 b^4 + 16a^8 k^2 \\ -20a^4 k^2 b^4 + 2b^8 k^2 - a^4 b^4 + b^8 \end{array}} \end{array} \right) \quad (6.45)$$

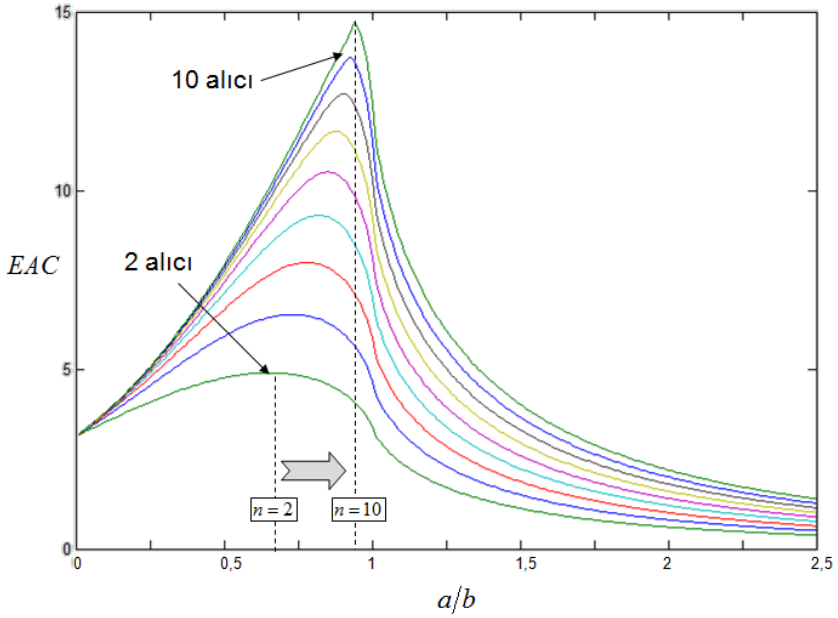
$$.\left(6k^4 + 4k^6 + 4k^2 + k^8 + 1\right)^2$$

$$\Phi_2 = \frac{\left(\begin{array}{l} -3b^4 k^{12} + 4a^4 k^{12} - 18b^4 k^{10} + 24a^4 k^{10} - 45b^4 k^8 \\ +60a^4 k^8 - 60b^4 k^6 + 80a^4 k^6 - 4a^2 k^6 \sqrt[3]{\Phi_1} \\ -6a^2 k^4 \sqrt[3]{\Phi_1} - 45b^4 k^4 + 60a^4 k^4 - 18b^4 k^2 \\ +24a^4 k^2 + 2a^2 \sqrt[3]{\Phi_1} + 4a^4 - 3b^4 + \sqrt[3]{\Phi_1^2} \end{array} \right)}{\sqrt[3]{\Phi_1}\left(2k^2 + k^4 + 1\right)} \quad (6.46)$$

Bu durumda;

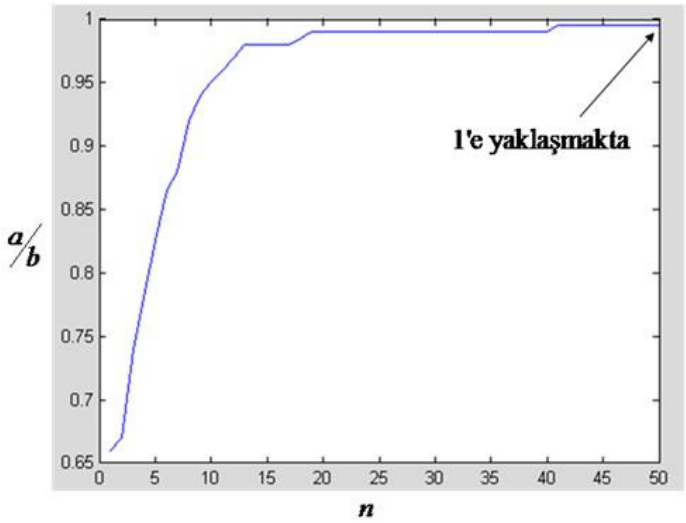
$$A_{DIŞ}=\begin{cases} 2\int_{x_L}^{a+\sqrt{a^2+b^2}}\sqrt{2ax-2a^2-x^2+\sqrt{4x^2a^2-8xa^3+4a^4+b^4}}\,\partial x & ,\dfrac{a}{b}\le 1 \\ \left[\begin{array}{l} 2\displaystyle\int_{x_L}^{a-\sqrt{a^2-b^2}}\sqrt{2ax-2a^2-x^2+\sqrt{4x^2a^2-8xa^3+4a^4+b^4}}\,\partial x \\ +2\displaystyle\int_{a+\sqrt{a^2-b^2}}^{a+\sqrt{a^2+b^2}}\sqrt{2ax-2a^2-x^2+\sqrt{4x^2a^2-8xa^3+4a^4+b^4}}\,\partial x \end{array}\right] & ,\dfrac{a}{b}>1 \end{cases} \tag{6.47}$$

olarak tespit edilir. Hesaplamaların n=2,3,…,10 için yapılması sonucunda a/b'ye göre elde edilen EAC değerleri ve optimum a/b oranları Şekil 6.38'de görülmektedir. Alıcı sayısı arttıkça optimum a/b oranının da arttığı görülmektedir.



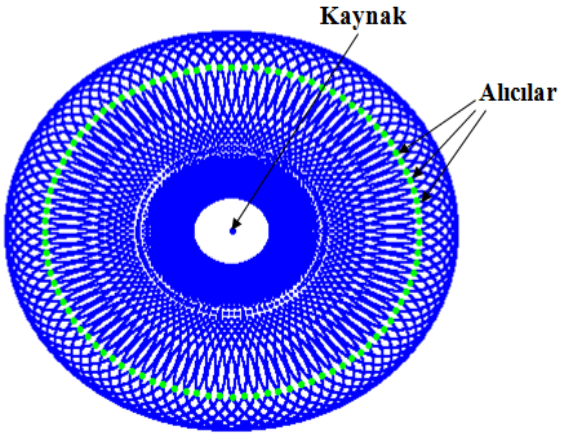
Şekil 6.38: Poligonal yerleştirmede n=2,3,…,10 için EAC'nin a/b oranına göre değişimi.

EAC hesaplamaları n=50'ye kadar yapılacak olursa optimum oranın limitte a/b=1 olduğu görülmektedir (Bkz. Şekil 6.39).



Şekil 6.39: n=2,3,...,50 için optimum a/b oranları

n'nin çok büyük olması durumunda oluşacak saha kaplaması, Şekil 6.40'ta belirtilen dairesel şekle ulaşacaktır.



Şekil 6.40: n=100 için elde edilen saha kaplaması

TEORİ-3

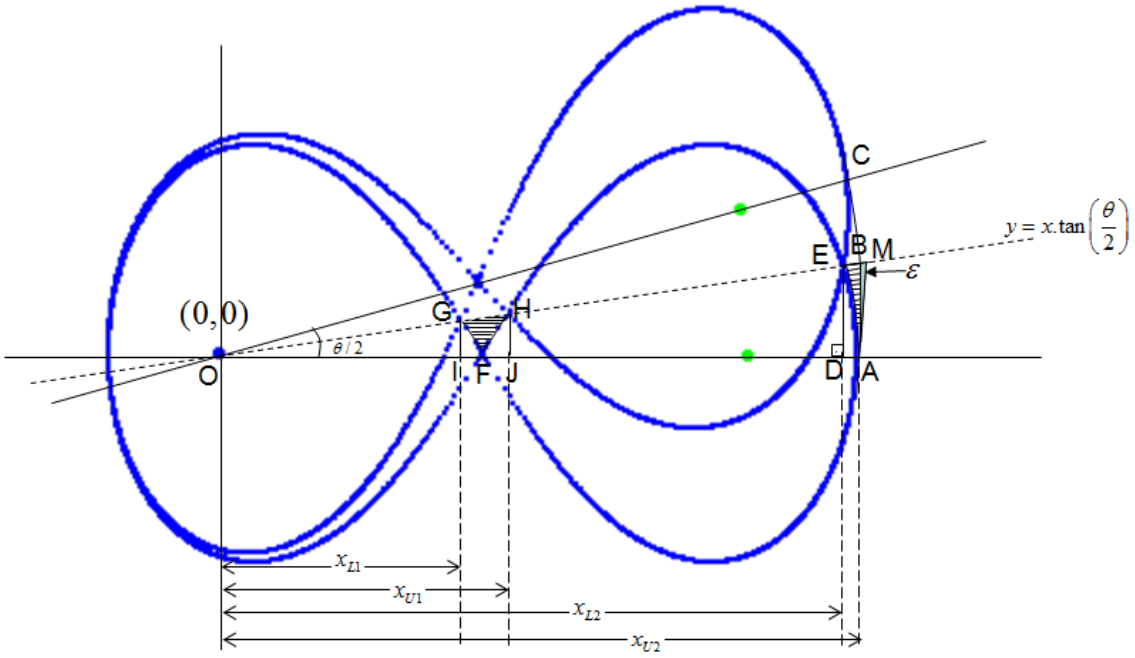
n adet alıcının bir kaynak etrafında poligonal şekilde yerleştirilmesi sonucu elde edilecek kaplama EAC_n^{poli} ise,

$$\lim_{n\to\infty} EAC_n^{poli} = \begin{cases} \pi(a+\sqrt{a^2+b^2})^2 & ,\frac{a}{b}\le 1 \\ \pi(a+\sqrt{a^2+b^2})^2 - 4\sqrt{a^2-b^2} & ,\frac{a}{b}>1 \end{cases} \tag{6.48}$$

olarak hesaplanır.

İSPAT-3

Şekil 6.41'de kaynağın kartezyen düzlemi merkezinde ve $a/b \le 1$ için Cassini ovalinin kartezyen düzlemi merkezi ekseninde θ° dönüşü sonucu oluşan iki oval görülmektedir.



Şekil 6.41: Cassini ovalinin kartezyen düzlemi merkezi ekseninde θ° dönüşü $a/b \le 1$

$a \le b$ için;

Şekil 6.41'de, $|OI| = x_{L1}$, $|OJ| = x_{U1}$, $|OD| = x_{L2}$, $|OA| = x_{U2}$ and $|DE| = y_{L2}$ ise;

$$EAC_n^{poli} = 2n\left[\frac{\theta}{2}\cdot\frac{1}{2\pi}\pi\left|OA\right|^2 - (A(FGH) + A(EBA))\right] \tag{6.49}$$

ve

$$A(FGH) = A(GHJI) - \int_{x_{L1}}^{x_{U1}} f(x).\partial x \tag{6.50}$$

$$A(GHJI) = \frac{\left|IG\right| + \left|JH\right|}{2}\cdot(x_{U1} - x_{L1}) \tag{6.51}$$

ise

$$A(FGH) = \left[\frac{\left|IG\right| + \left|JH\right|}{2}\cdot(x_{U1} - x_{L1})\right] - \int_{x_{L1}}^{x_{U1}} f(x).\partial x \tag{6.52}$$

olarak ifade edilir. Benzer şekilde;

$$A(EBA) = A(AMED) - \int_{x_{L2}}^{x_{U2}} f(x).\partial x - \varepsilon \tag{6.53}$$

$$A(GHJI) = \frac{\left|DE\right| + \left|AB\right|}{2}\cdot(x_{U2} - x_{L2}) \tag{6.54}$$

ise

$$A(EBA) = \left[\frac{\left|DE\right| + \left|AM\right|}{2}\cdot(x_{U2} - x_{L2})\right] - \int_{x_{L2}}^{x_{U2}} f(x).\partial x - \varepsilon \tag{6.55}$$

Buradan yola çıkarak EAC_n^{poli} genel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$
\begin{aligned}
EAC_n^{poli} &= 2n\left[\frac{\theta}{2}\cdot\frac{1}{2\pi}\pi\left|OA\right|^2-(A(FGH)+A(EBA))\right] \\
&= 2n\left[\frac{2\pi}{2n}\cdot\frac{1}{2\pi}\pi(a+\sqrt{a^2+b^2})^2-(A(FGH)+A(EBA))\right] \\
&= 2n\left[\frac{1}{2n}\pi(a+\sqrt{a^2+b^2})^2-(A(FGH)+A(EBA))\right] \\
&= 2n\left[\frac{1}{2n}\pi(a+\sqrt{a^2+b^2})^2-\left[\begin{array}{l}\left(\frac{\left|IG\right|+\left|JH\right|}{2}\cdot(x_{U1}-x_{L1})\right) \\ -\int_{x_{L1}}^{x_{U1}} f(x).\partial x \\ +\left(\frac{\left|DE\right|+\left|AM\right|}{2}\cdot(x_{U2}-x_{L2})\right) \\ -\int_{x_{L2}}^{x_{U2}} f(x).\partial x-\varepsilon\end{array}\right]\right]
\end{aligned}
\tag{6.56}
$$

Kesikli çizgi ile ifade edilen $\left|OM\right|$ doğrusunun lemniscate şeklindeki Cassini ovali ile kesişim noktaları belirlenecek olursa,

$$
x.\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)=\pm\sqrt{-2ax-2a^2-x^2\pm\sqrt{4x^2a^2-8xa^3+4a^4+b^4}} \tag{6.57}
$$

$$
\begin{aligned}
&\lim_{n\to\infty}\left[\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]=\lim_{n\to\infty}\left[\tan\left(\frac{360}{2n}\right)\right]=\tan(0)=0 \\
&0=\pm\sqrt{-2ax-2a^2-x^2\pm\sqrt{4x^2a^2-8xa^3+4a^4+b^4}}
\end{aligned}
\tag{6.58}
$$

eşitliği sağlanır. Bu durumda $x_{L1}=x_{U1}=b$ ve $x_{L2}=x_{U2}=a+\sqrt{a^2+b^2}$ ve $A(ABED)\to 0$ ise $\varepsilon\to 0$ olacaktır. Bunun sonucunda;

$$\lim_{n\to\infty}\sum EAC_n^{poly}$$

$$= \lim_{n\to\infty} 2n\left[\frac{1}{2n}\pi(a+\sqrt{a^2+b^2})^2 - \left[\begin{array}{l}\left(\frac{|IG|+|JH|}{2}\cdot(x_{U1}-x_{L1})\right)\\ -\int_{x_{L1}}^{x_{U1}} f(x).\partial x + A(EBA))\\ +\left(\frac{|DE|+|AM|}{2}\cdot(x_{U2}-x_{L2})\right)\\ -\int_{x_{L2}}^{x_{U2}} f(x).\partial x - \varepsilon\end{array}\right]\right]$$

$$= \lim_{n\to\infty} 2n\left[\frac{1}{2n}\pi(a+\sqrt{a^2+b^2})^2 - \left[\begin{array}{l}\left(\frac{0}{2}\cdot(b-b)\right)\\ -\int_{b}^{b} f(x).\partial x\\ +\left(\frac{0}{2}\cdot\begin{pmatrix}(a+\sqrt{a^2+b^2})\\ -(a+\sqrt{a^2+b^2})\end{pmatrix}\right)\\ -\int_{a+\sqrt{a^2+b^2}}^{a+\sqrt{a^2+b^2}} f(x).\partial x - 0\end{array}\right]\right] \qquad (6.59)$$

$$= \lim_{n\to\infty} 2n\left[\frac{1}{2n}\pi(a+\sqrt{a^2+b^2})^2 - [0]\right] = \lim_{n\to\infty} 2n\left[\frac{1}{2n}\pi(a+\sqrt{a^2+b^2})^2\right]$$

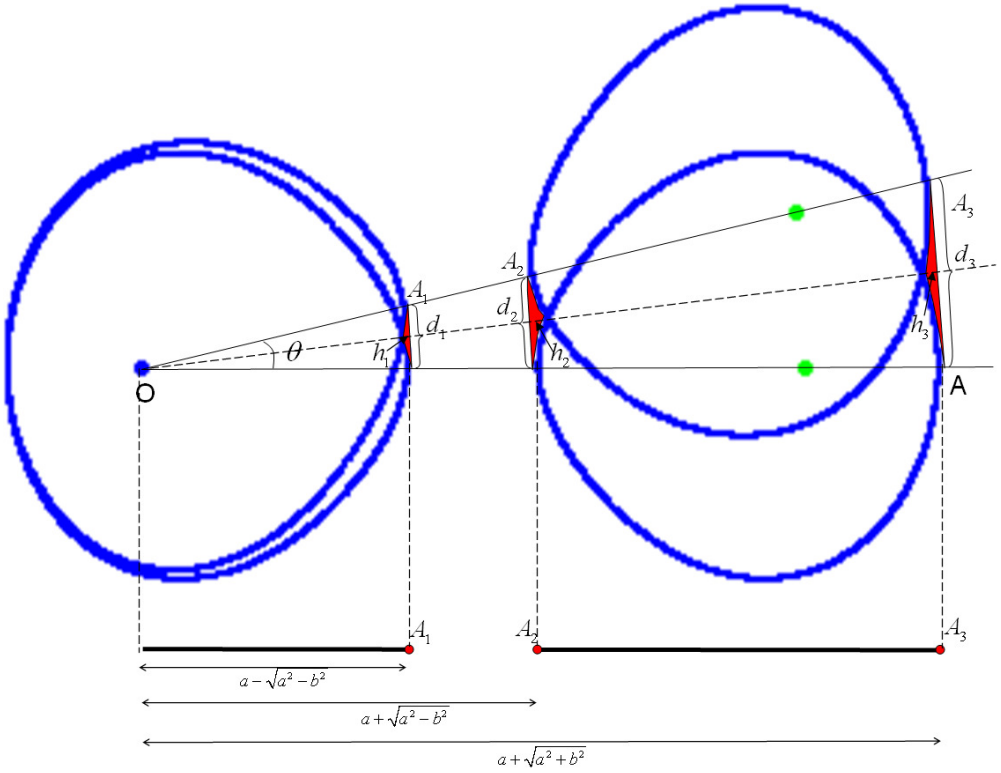
ve

$$\lim_{n\to\infty}\sum EAC_n^{poly} = \pi(a+\sqrt{a^2+b^2})^2 \qquad (6.60)$$

elde edilir.

Şekil 6.42'de kaynağın kartezyen düzlemi merkezinde ve $a/b>1$ için Cassini ovalinin kartezyen düzlemi merkezi ekseninde θ° dönüşü sonucu oluşan iki oval görülmektedir.

$a > b$ için;



Şekil 6.42: Cassini ovalinin kartezyen düzlemi merkezi ekseninde dönüşü, $a/b > 1$

$$\lim_{n\to\infty} \theta = \lim_{n\to\infty} \frac{2\pi}{n} = 0 \tag{6.61}$$

Bu durumda $\theta \to 0$ ise $d_1, d_2, d_3, h_1, h_2, h_3 \to 0$ ve sonuçta $|OA|$ doğrusu üzerinde $A_1, A_2, A_3 \to 0$ olacaktır. O noktasından başlamak üzere 360º boyunca ∞ sayıda doğru çizilebileceğinden,

$$\begin{aligned} \lim_{n\to\infty} EAC_n^{poly} &= \pi\left[(a+\sqrt{a^2+b^2})^2 - (a+\sqrt{a^2-b^2})^2 + (a-\sqrt{a^2-b^2})^2 \right] \\ &= \pi(a+\sqrt{a^2+b^2})^2 - 4\sqrt{a^2-b^2} \end{aligned} \tag{6.62}$$

elde edilecektir.

TEORİ-4

n adet alıcının tek kaynak etrafında poligonal şekilde yerleştirilmesi sonucu elde edilebilecek en büyük kaplama $\left(EAC_n^{poli}\right)^*$ ise,

$$\lim_{n\to\infty}\left(EAC_n^{poli}\right)^* = 18.31b^2 \tag{6.63}$$

ile elde edilir.

İSPAT-4

TEORİ-3 gereği;

$$\lim_{n\to\infty} EAC_n^{poli,} = \begin{cases} \pi(a+\sqrt{a^2+b^2})^2 & ,0<\dfrac{a}{b}\le 1 \\ \pi(a+\sqrt{a^2+b^2})^2 - 4\sqrt{a^2-b^2} & ,1<\dfrac{a}{b} \end{cases} \tag{6.64}$$

(6.64) fonksiyonu kesikli bir fonksiyondur. Fonksiyonun ilk kısmına $f_1(a)$ ve diğer kısmına $f_2(a)$ denirse,

$$f_1'(a) = \frac{d}{da}(a+\sqrt{a^2+b^2})^2 = 2(a+\sqrt{a^2+b^2})\left(1+\frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}}\right) \tag{6.65}$$

$$\begin{aligned} f_2'(a) &= \frac{d}{da}\left(2a^2+b^2+2\sqrt{a^2+b^2}-4\sqrt{a^2-b^2}\right) \\ &= 4\left[\frac{\left(a^2+a\sqrt{a^2+b^2}+\dfrac{b^2}{2}\right)\sqrt{a^2-b^2}+\sqrt{a^2+b^2}\,(b^2-2a^2)}{\sqrt{a^2+b^2}\sqrt{a^2-b^2}}\right] \end{aligned} \tag{6.66}$$

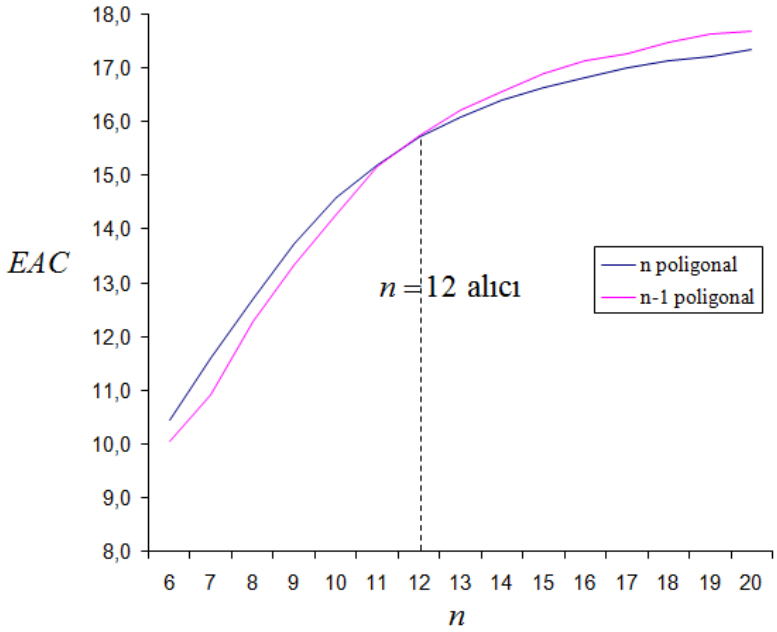
olacaktır. Bu durumda $a,b>0$ için a arttıkça $f_1'(a)$'da artacaktır. $a>b$ ise $f_1(a)-f_2(a)=4\sqrt{a^2-b^2}>0$ olacağından $a^*=b$ bulunacaktır. Bu durumda;

$$\lim_{n\to\infty}\left(EAC_n^{poli}\right)^*=18.31b^2 \tag{6.67}$$

elde edilir.

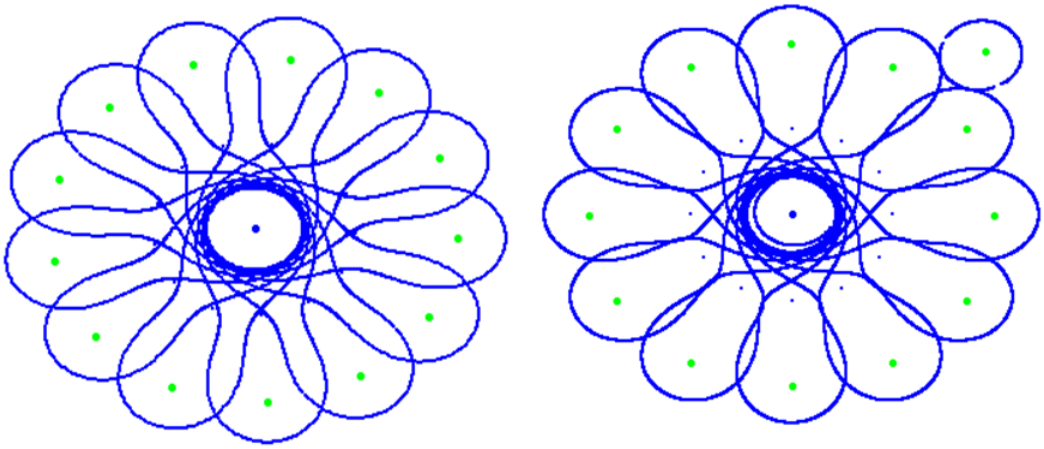
6.2.4.2. Bir kaynak-*n* alıcı ile tabaka oluşturma

Tek kaynak ile birlikte az sayıda alıcının kullanıldığı durum için poligonal yerleştirmenin optimum yerleşim düzeni olduğu KTDOP ve GA sonuçlarından elde edilmiştir. Bu bölümde bu stratejinin en fazla kaç adet alıcı için optimum olma özelliğini koruduğu sorgulanmış ve sensör sayısının artmasıyla birlikte optimum yerleşim düzenlerinin değişip değişmediği araştırılmıştır. Oluşturulan yerleşim düzenlerinin *EAC* değerini tespit edebilmek amacıyla Monte Carlo simülasyonlarından yararlanılmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucunda 12'nci alıcıdan sonra eklenecek sensörlerin mevcut 12 sensörün daha uzağında yeni bir tabaka oluşturacak şekilde ve kaplama alanları çakışmayacak şekilde yerleştirilmesinin daha yüksek kaplama sağlayacağı tespit edilmiştir. Şekil 6.43'te $n=6,7,...,20$ için tüm alıcıların poligonal yerleşimi ile *n*-1 alıcının poligonal, kalan alıcıların dış katmanda yerleştirilmesi ile elde edilen *EAC* değerleri görülmektedir. 12'nci alıcıdan itibaren dış katman oluşturulmaya başlanmasının *EAC* artışını hızlandırdığı görülmektedir.



Şekil 6.43: *n* adet ve *n*-1 adet alıcının poligonal yerleştirilmesi sonucu elde edilen EAC değerleri

Şekil 6.44 ve Şekil 6.45'te, 12'nci alıcıdan sonra eklenen yeni alıcıların tek tabaka halinde ve iki tabaka halinde yerleştirilmeleri sonucu elde edilen şekiller görülmektedir.



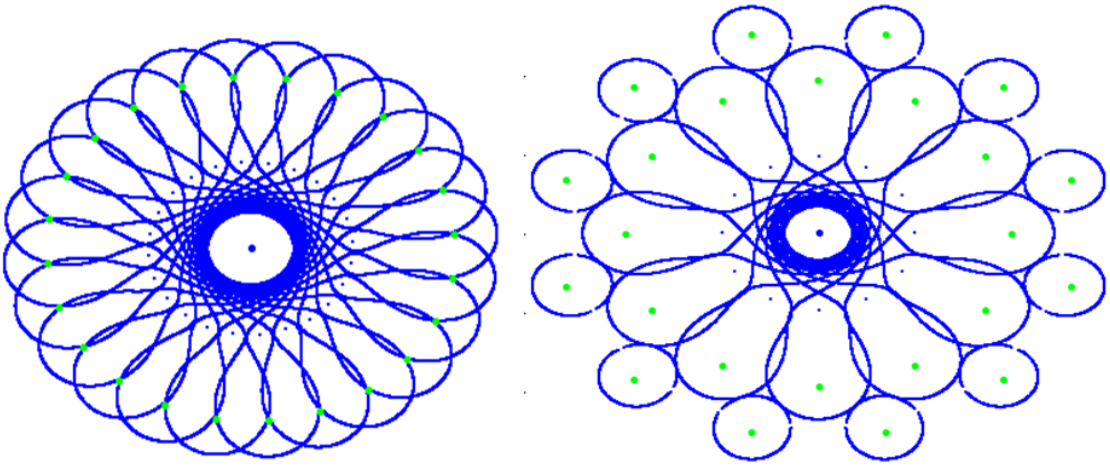
$n = 13$ alıcı

$EAC = 16,08$ km^2

$n = 13$ alıcı (12 iç, 1 dış katman)

$EAC = 16,21$ km^2

Şekil 6.44: Poligonal yerleştirmede dış halkanın oluşturulması (*n*=13)



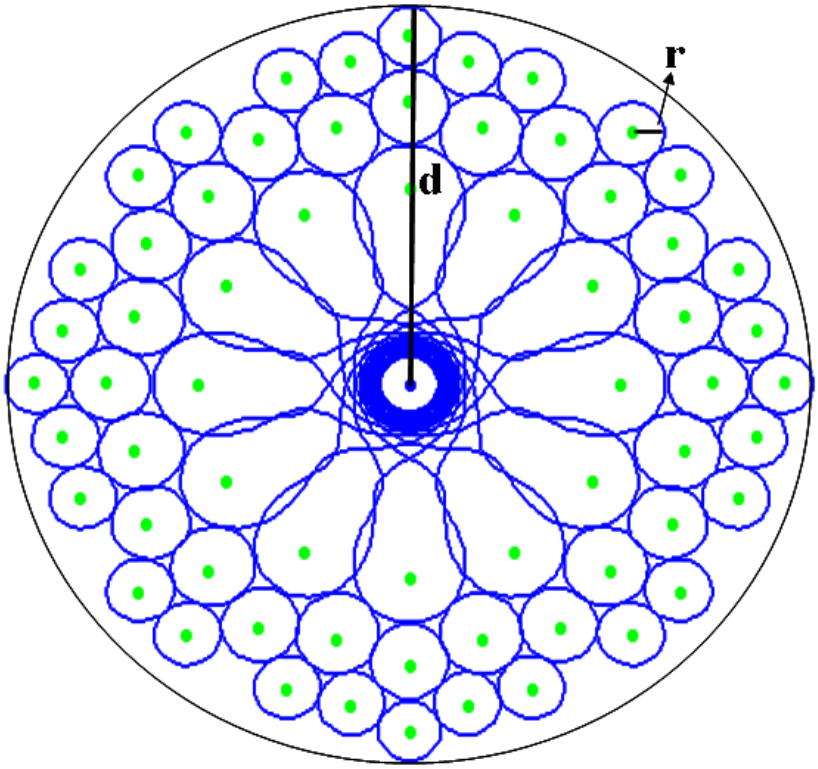
$n = 24$ alıcı
$EAC = 17,65$ km^2

$n = 13$ alıcı (12 iç, 12 dış katman)
$EAC = 21,57$ km^2

Şekil 6.45: Poligonal yerleştirmede dış halkanın oluşturulması (n=24)

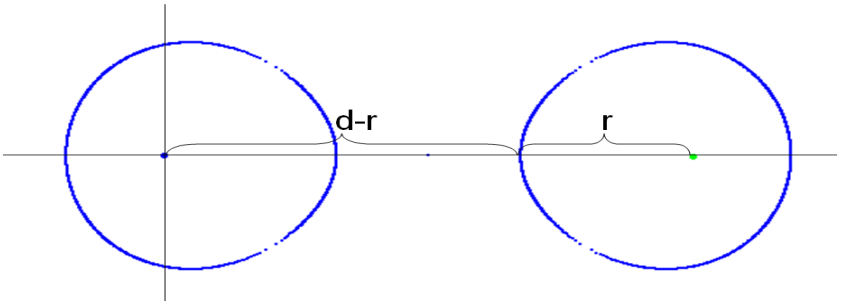
6.2.4.3. Bir kaynak-*n* alıcı ile daire paketleme problemi

Bu bölümde, sensör sayısı arttıkça sisteme yeni katmanlar ilave edildiği varsayılmış, alıcı sayısının çok büyük değerleri için *EAC*'nin analitik yöntemlerle yakınsanması hedeflenmiştir. Çok sayıda alıcı ile oluşturulan yeni katmanlarla birlikte poligonal bir multistatik sistem, Şekil 6.46'da belirtilen kaplama sahasına sahip olacaktır. Bu durumda $n \to \infty$ için bu problem literatürde daire paketleme (circle packing) olarak adlandırılan probleme benzetilebilir.



Şekil 6.46: Cassini ovalleri ile daire paketleme

EAC'yi yakınsayabilmek için öncelikle kaynaktan olan *d* mesafesi arttıkça küçülen *r* mesafesini Şekil 6.47'den yararlanarak yakınsayabiliriz.



Şekil 6.47: $a/b \gg 1$ için *r* mesafesi

$$\lim_{d\to\infty} r = \frac{b^2}{d-r} = \frac{b^2}{d} \tag{6.68}$$

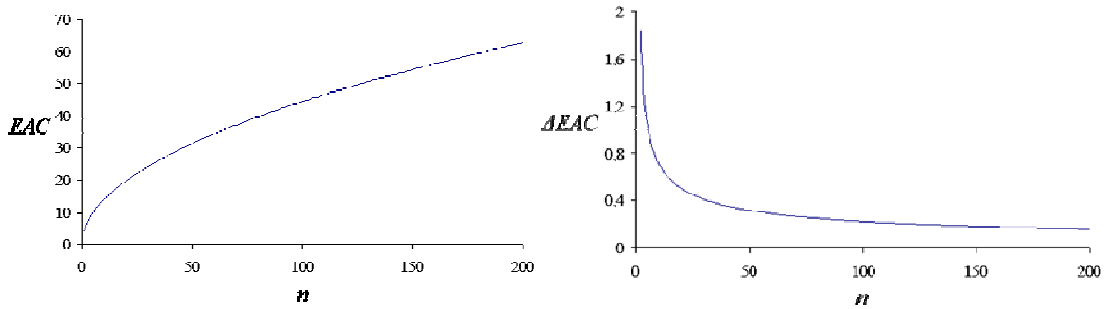
Dolayısı ile limitte, d mesafesinde bulunan bir sensör $r = \frac{b^2}{d}$ yarıçaplı bir daire kadar EAC'ye katkı sağlayacaktır. Buradan yola çıkarak kaynaktan d kadar uzaklıktaki bir bölgeyi kapsayan poligonal bir multistatik sistemde;

$$n = \int_0^d \frac{2\pi d}{\pi \frac{b^4}{d^2}} \partial d = \frac{2}{b^4} \int_0^d d^3 \partial d = \frac{d^4}{2b^4} \tag{6.69}$$

adet alıcı kullanılmıştır. Bu noktada $d^2 = b^2\sqrt{2n}$ olarak ifade edilirse;

$$\begin{aligned} EAC &= \pi d^2 \\ &= \pi b^2 \sqrt{2n} \\ &\cong 4.44 b^2 \sqrt{n} \end{aligned} \tag{6.70}$$

olarak yakınsanır. Şekil 6.48(*i*)'de (6.70) fonksiyonunun n=0,…,200 için aldığı değerler, Şekil 6.48(*ii*)'de ise sisteme eklenen her yeni alıcının EAC'ye katkısı, ΔEAC, görülmektedir. Alıcı sayısının artması ile birlikte EAC'nin de arttığı, ancak artış hızının azaldığı görülmektedir.



(*i*) (*ii*)

Şekil 6.48: (*i*) Daire paketleme için EAC'nin sensör sayısına göre değişimi
(*ii*) Toplam sensör sayısına bağlı olarak eklenen her yeni sensörün EAC'ye katkısı

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada, saha araması için kullanılan bistatik ve multistatik akustik sistemlerin farklı tipteki hedeflerin tespit olasılığına yönelik performanslarının analitik yöntemlerle tahmin edilmesi ve yerleşim düzenlerinin optimizasyonu amaçlanmıştır. Bu kapsamda öncelikle sensörlerin sahaya tekbiçimli dağılımla rastgele yerleştirilmesi durumunda elde edilecek tespit olasılığı, *PoD*, değeri hesaplanmış, daha sonra optimum sensör yerleşim düzenleri KTDOP (Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama) ve GA (Genetik Algoritma) yöntemleri yardımı ile belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen önemli analitik sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiş ve geleceğe yönelik önerilerde bulunulmuştur.

a. Urich [2] tarafından monostatik sistemler için geliştirilen temel aktif sonar formülünün bistatik sistemler için tekrar düzenlenmesi sonucunda, bistatik tespit bölgesinin $R_1 R_2 \le b^2$ koşulunu sağlayan noktaların oluşturduğu küme olan Cassini ovali olduğu görülmektedir. Cassini ovalleri sensörler arası yarı mesafe, *a*, ve eşdeğer monostatik tespit mesafesi, *b*, parametreleri kullanılarak kartezyen düzleminde (4.6) denklemi ile ifade edilmektedir. Oval $a/b = 0$ için daire, $a/b \le \sqrt{2}/2$ için tek bir konveks eğri, $\sqrt{2}/2 < a/b < 1$ için üst ve alt kısımlarından içeri doğru hafifçe bastırılmış konveks olmayan bir eğri, $a/b = 1$ için Bernoulli Lemniscate ve $a/b > 1$ için iki ayrı eş konveks oval şeklini almaktadır. Alanı, A_C, (4.11) veya (4.12) ile, çevresi, P_C, (4.29) ile hesaplanabilmektedir. A_C'nin *a*/*b*=0, P_C'nin ise *a*/*b*=1 için en büyük değerini aldığı gözlenmiştir.

b. Rastgele yerleştirilmiş bistatik sensörlerin performansının tahmin edilebilmesi için öncelikle sensörler arasındaki mesafenin beklenen değerinin bulunması problemi iki boyutlu düzlem üzerinde bulunan iki nokta arasındaki mesafenin beklenen değerini

bulma problemine haritalanmış, bunun sonucunda *m*, *n* boyutlarındaki *F* sahasına rastgele yerleştirilen kaynak ve alıcının tespit bölgesi alanının beklenen değerini hesaplamak üzere formül (5.7) geliştirilmiştir. Sahanın genişlemesiyle birlikte sensörler arası mesafenin arttığı ve kaplama alanının azaldığı görülmüştür.

c. Rastgele yerleştirilmiş x_1 adet kaynak ve x_2 adet alıcıdan oluşan bir multistatik sistemin hedef tespit olasılığı, $y = \frac{2\pi b^2}{A}\sqrt{x_1 x_2}$ çaba yoğunluğu parametresi kullanılarak (5.14) fonksiyonu ile yakınsanmıştır. $y < 1{,}1$ için sensörlerin yerleştirilmesi öngörülen optimum saha oranı A'/A'nın $y/1{,}1$ olduğu, bunun sonucunda elde edilen tespit olasılığının ise formül (5.16)'da belirtildiği üzere $0{,}4y$ olduğu tespit edilmiştir. Optimum saha oranının kullanılmaması durumunda tespit olasılığında *y* değerine bağlı olarak [0,001; 0,037] aralığında kayıp olacağı hesaplanmıştır. Her zaman optimum saha oranının kullanıldığı varsayıldığında elde edilecek *EAC* değerinin ise $EAC = (0,4)2\pi b^2\sqrt{x_1 x_2}$ ile hesaplanabileceği görülmştür. İstenen *EAC* değerine ulaşmak için ihtiyaç duyulan sensör sayıları formül (5.20) ile hesaplanmıştır.

ç. Bistatik sistemlerin optimizasyonu kapsamında biri hareketsiz ve ikisi hareketli olmak üzere üç farklı hedef modeli için analitik çözüm geliştirilmiştir.

Hareketsiz hedefler için tespit olasılığı alanlar oranına eşit olup, *a*/*b*=0 değerinin Cassini ovali özelliği gereği A_C'yi ve *PoD*'yi en büyüten değer olduğu görülmüştür.

F sahasından düzgeçiş yapan hedefler için, hareketli hedeflerin bistatik sensörler tarafından tespit edilmesi problemi doğru-küme kesişim problemine haritalanmıştır. TEORİ-1 ve TEORİ- 2 kullanılarak, tespit olasılığının Cassini ovali etkin çevresi P_C^{eff}'in *F* sahası çevresi P_F'e oranına eşit olduğu, P_C^{eff}'in ise çevre, konveks yüzey uzunluğu ve iç yüzey uzunluğunun hesaplanmasını takiben formül (6.22) yardımı ile hesaplanabileceği tespit edilmiştir. *PoD*'nin *a*/*b*=1 için en büyük değerine ulaştığı, bu

yerleşim düzeninin aynı özelliklere sahip bir monostatik sensöre göre %7 oranında kazanç sağladığı görülmüştür.

İkinci hareketli hedef senaryosunda sensörlerin hedefin λ yoğunluğunda bulunduğu bir Poisson sahasına yerleştirildiği, hedefin düzlemde *t* süresi boyunca *v* hızı ile sabit rotada ilerlediği varsayılmıştır. Farklı *vt* ve *a/b* değerleri için yapılan hesaplamalar sonucunda, $vt < 5,77$ için sensörlerin aynı konumda olmasının, $5,77 < vt < 17,8$ için *a/b*'nin 1 ile 0,82 arasında olmasının, $vt > 17,8$ için *a/b*=1 olmasının en iyi stratejiler olduğu tespit edilmiştir.

Her üç hedef modeli için elde edilen çözümler incelendiğinde, sabit hedefler için *a/b*=0, ilk hareketli hedef modeli için *a/b*=1 ve ikinci hareketli hedef modeli için $0 \le a/b \le 1$ değerlerinin optimum olduğu görülmektedir. Problemlerde ele alınan hedef modellerinin planlama açısından önemli olduğu görülmüş, ancak *a/b*=0,5 değerinin tüm problemler için optimuma oldukça yakın sonuç verdiği göz önüne alındığında, söz konusu oranın hedef modeli gözetmeksizin kullanılabilecek bir değer olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

d. Multistatik sistemlerin optimizasyonu kapsamında, x_1 adet kaynak ve x_2 adet alıcıdan oluşan sistem ile en büyük *EAC* değerine ulaşmak için kullanılması gereken sensör yerleşim düzenlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. KTDOP ve GA yöntemleri ile elde edilen yerleşim düzenleri incelendiğinde:

- Sistemde tek kaynak olduğu durumlarda alıcıların kaynak etrafında poligonal şekilde (eşit mesafede ve açı aralıklarında) konumlandırılmalarının en uygun hareket tarzı olduğu ve kaplamanın (6.41) yardımı ile hesaplanabileceği,

- *n* adet alıcının poligonal olarak yerleştirildiği varsayıldığında elde edilecek en büyük kaplamanın $\lim_{n\to\infty}\left(EAC_n^{poli}\right)^* = 18.31b^2$ olduğu,

- Alıcı sayısı arttıkça, alıcıların kaynaktan olan optimum mesafelerinin de arttığı, limitte a/b=1 olduğu,

- 12 adet alıcıdan sonra sisteme ilave edilen alıcıların yeni bir katman oluşturacak şekilde kaynaktan daha uzak mesafeye yerleştirilmesinin en uygun durum olduğu,

- Tüm alıcıların sırası geldikçe yeni bir katman oluşturacak şekilde yerleştirilmesi sonucunda elde edilecek kaplamanın daire paketleme yaklaşımı kullanılarak $EAC \cong 4.44b^2\sqrt{n}$ formülü ile hesaplanabileceği,

- Birden fazla kaynak olması durumunda alıcıların her kaynak için eşit sayıda paylaştırılmasının, bazılarının kaynaklar tarafından kaplamayı artıracak şekilde ortak kullanılmasının (Bkz. Şekil 6.30) *EAC*'yi en büyüteceği tespit edilmiştir.

Yukarıda özetlenen tüm teorik sonuçlar Monte Carlo simülasyonları ile test edilmiş, teorik sonuçların simülasyon sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, her ne kadar sabit ve hareketli hedeflerin bistatik sensörler ile tespit olasılığını en büyüten ayrım mesafelerinin farklı olduğu görülse de a/b oranının 0,4 ve 0,6 arasında seçilmesi her tip hedef için tespit olasılığının en büyük değerine yakın olmasını sağlayacaktır. Örneğin, eşdeğer monostatik tespit mesafesi 5000 m. olan bistatik bir sensör çifti arasındaki mesafenin 4000 m. ile 6000 m. arasında seçilmesi uygun bir hareket tarzı olacaktır. Böylelikle hedef tipi gözetmeksizin bistatik sensörlerin sahaya yerleştirilmesi süratli ve kolay şekilde yapılabilecektir.

Multistatik sistemlerin optimum konfigürasyonları incelendiğinde, yerleşim şekillerinin oluşturulmasının uygulama açısından oldukça kolay olduğu, alıcıların kaynak etrafında basit geometik şekiller oluşturacak şekilde poligonal olarak yerleştirilmesi ile en büyük kaplamanın sağlanabileceği görülmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında geniş deniz sahalarının gözlenmesi, aranması veya sualtında bilimsel araştırma yapılması amaçlarıyla kaynak ve alıcıların bir arada kullanılması durumunda ortaya çıkan bistatik ve multistatik sistemler ile hedef tespiti kavramları ele alınmış, sensör konumlarının rastgele olduğu durumlar için elde edilecek tespit olasılığı yakınsanmış, aynı zamanda hedef tespit olasılığını en büyütücü sensör yerleşim düzenleri geometrik olarak incelenmiş ve uygulamalara esas oluşturacak teorik sonuçlar elde edilmiştir.

Böylelikle, saha arama ve geniş deniz sahalarının gözetlenmesi maksatlarıyla kullanılan bistatik ve multistatik sistemlerin performanslarının değerlendirilmesi ve optimum sensör yerleşim planlarının oluşturulması konusunda teorik altyapı oluşturulmuş, elde edilen teorik sonuçlar ile SATS (Sualtı Akustik Tespit Sistemleri)'nin etkinliği ve hedef tespitine yönelik başarısı artırılmıştır. Ayrıca, monostatik sistemler için literatürde mevcut olan rastgele arama ve optimum sensör yerleşimi teorileri bistatik ve multistatik sistemler için de geliştirilerek arama ve tespit teorilerine katkı sağlanmıştır. Rastgele yerleştirilmiş sensörler ile elde edilen tespit olasılığı değeri ile planlayıcılara referans bir etkinlik ölçütü oluşturulmuş, bu sayede yürütülen saha arama veya gözetleme faaliyetlerinin bilimsel yöntemler ile planlanması ve analitik yöntemler kullanılarak değerlendirilmesi imkanı sağlanmıştır.

Özet olarak bu çalışma ile;

a. Bi-Multistatik sistemlerin teorik tespit olasılıkları incelenmiş,
b. Farklı tespit problemleri için analitik formüller geliştirilmiş,
c. Optimum sensör konfigürasyonları oluşturulmuş,
ç. Teorik sonuçlar simülasyonlar ile doğrulanmıştır.

Çalışmadan elde edilen sonuçların bistatik ve multistatik prensibiyle çalışan tüm sualtı sensör ağlarına uygulanabileceği gibi aynı prensiple çalışan radar ve benzeri sensörler için de kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, gelecek dönemde yapılacak çalışmalarda, bu tez kapsamında elde edilen teorik bilgiler esas alınarak problem farklı alanlara doğru genişletilebilecektir. Örneğin, sahada hareketli sensörlerin

kullanılması, ortamda kuvvetli akıntı, rüzgar, vb. çevresel faktörlerin olması, sensör ağı ömrünün en büyüklenmesi, farklı hedef modelleri için yeni çözümlerin geliştirilmesi, vb. hususları gelecekte ayrı birer araştırma konusu olarak ele alınabilecektir.

Bu tez tamamen yazarın bireysel görüşlerini yansıtmakta olup Türk Silahlı Kuvvetlerinin görüşlerini yansıtmamaktadır.

Bu tez Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir. (B.02.1.TBT.0.06.01-214-36-109)

KAYNAKLAR

[1] Akyıldız I.F., Pompili D., Melodia T., "Underwater acoustic sensor networks: research challenges", ***Ad Hoc Networks***, Volume 3, Issue 3, 257-279, (2005).

[2] Urick R.J., "Principles of Underwater Sound", 3rd Edition, ***McGraw-Hill Companies***, New York, (1983).

[3] Blackman S.S., "Multiple-Target Tracking with Radar Applications", ***Artech House***, Boston, (1986).

[4] Hall D.L., "Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion", ***Artech House***, Boston, (1992).

[5] McIntyre C.M., Roger W.A., "Data association in passive acoustic tracking", ***Signal and Data Processing of Small Targets***, O.E. Drummond (ed.), Proc. SPIE vol. 1954, 376-385, (1993).

[6] Peters S.D., "A relational perspective on the sonar contact management problem", ***DREA Technical Memorandum***, 90/206, (1991).

[7] Roger W.A., "Evaluation of the probabilistic data association filter in a realistic sonar environment", ***DREA Technical Memorandum*** 94/201, (1994).

[8] Garfield R.M., "An automated approach to passive sonar track segment association", ***7th ICCRTS***, (2002).

[9] Atlantic Fleet Training and Testing Environmental Impact Statement/Overseas Environmental Impact Statement, "Importance of Training and Testing Using Active Sonar and Explosives", ***US Fleet Forces Command***, (2010).

[10] Naval Underwater Systems Center, "Acoustic Measurements for Sonar Transducer Test Personnel Stuydent Guide", ***New London***, Connecticut, (1990).

[11] Coon A., "Spatial correlation of detections for impulsive echo ranging sonar", ***Johns Hopkins Apl. Technical Digest***, 18(1), 105-112, (1997).

[12] Kim S., Ku B., Hong W., Ko H., "Performance comparison of target localization for active sonar systems", ***IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems***, vol.44, no.4, 1371-1380,(2008).

[13] Yakubovskiy A., "A whole new vision underwater: bistatic sonar explained", ***Farsounder Inc.***, (2000).

[14] Cox H., “Fundamentals of Bistatic Active Sonar”, Underwater Acoustic Data Processing (Y. Chan, ed.), ***Kluwer***, 3-24, (1989).

[15] Benen S., Maiwald D., Schmidt-Schierhorn H., “Low Frequency Towed Active Sonar (LFTAS) in Multistatic Applications”, ***Springer***, (2009).

[16] Ehlers F., “Multi-Robot Teamwork in Multistatic Sonar”, ***IEEE ICRA2010 Workshop***: Search and Pursuit/Evasion in the Physical World: Efficiency, Scalability and Guarantees, (2010).

[17] Pompili D., Melodia T., Akyildiz I.F., "Deployment analysis in underwater acoustic wireless sensor networks," ***Proceedings of the 1st ACM international Workshop on Underwater Networks***, Los Angeles, CA, USA, WUWNet '06. ACM, New York, NY, 48-55, (2006).

[18] Partan J., Kurose J., Levine B.N., “A survey of practical issues in underwater networks”, ***Proceedings of the 1st ACM international Workshop on Underwater Networks***, Los Angeles, CA, USA, WUWNet '06. ACM, New York, NY, 17-24, (2006).

[19] Cardei M., Wu J., “Handbook of Sensor Networks”, chapter “Coverage in Wireless Sensor Networks”, ***CRC Press***, (2004).

[20] Danskin, J.M., “A helicopter versus submarine game”, ***Operations Research***, Vol 16, No 3, 509-517, (1968).

[21] Akyildiz I.F., Su W., Cayirci E., “A Survey on Sensor Networks”, ***IEEE Communications Magazine***, 102-114, (2002).

[22] Jourdan D.B., Weck O.L., “Layout optimization for a wireless sensor network using a multi-objective genetic algorithm”, ***Vehicular Technology Conference***. VTC 2004, 2466-2470, (2004).

[23] Meguerdichian S., “Coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks”, ***IEEE Infocom***, 1380-1387, (2001).

[24] Clouqueur T., “Sensor deployment strategy for detection of targets traversing a region”, ***Mobile Networks and Applications***, Vol 8, 453-461, (2003).

[25] Ghrist R., Muhammad A., “Coverage and hole-detection in sensor networks via homology”, ***Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks***, IPSN 2005, 254-260, (2005).

[26] Li X.Y., Wan P.J., Frieder O., “Coverage in wireless ad hoc sensor networks”, ***IEEE Transactions on Computers***, Vol 52, no 6, 753-763, (2003).

[27] Wu C.H., Lee K.C., Chung Y.C., "A delaunay triangulation based method for wireless sensor network deployment", ***12th International Conference on Parallel and Distributed Systems***, ICPADS, (2006).

[28] Iyengar R., Kar K., Banerjee S., "Low-coordination topologies for redundancy in sensor networks" ***Proceedings of the 6th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing***, Urbana-Champaign, IL, USA, May 25 - 27, MobiHoc'05. ACM, 332-342, (2005).

[29] Lin F.Y.S., Chiu P.L., "A near-optimal sensor placement algorithm to achieve complete coverage-discrimination in sensor networks" ***IEEE Communications Letters***, Vol 9, No 1, 43-45, (2005).

[30] Li S., Xu C., Pan W., Pan Y., "Sensor deployment optimization for detecting maneuvering targets", ***8th International Conference on Information Fusion***, 25-28 July, 1629-1635, (2005).

[31] Jain E., Qilian L., "Sensor placement and lifetime of wireless sensor networks: theory and performance analysis", ***Global Telecommunications Conference***, GLOBECOM '05, 28 Nov.-2 Dec., 173-177, (2005).

[32] Huang C., Tseng Y., "The coverage problem in a wireless sensor network", ***In Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications***, San Diego, CA, USA, September 19 WSNA '03, 115-121, (2003).

[33] Megerian S., Koushanfar F, Potkonjak M., Srivastava M.B., "Worst and Best-Case Coverage in Sensor Networks", ***IEEE Transactions on Mobile Computing***, Vol 4, Num 1, Jan/Feb, 84-92, (2005).

[34] Kar K., Banerjee S., "Node placement for connected coverage in sensor networks", Proc. of WiOpt 2003, ***Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks***, (2003).

[35] Meguerdichian S., Koushanfar F., Qu G., Potkonjak M., "Exposure in wireless ad hoc sensor networks", ***Procs. of 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*** (MobiCom '01), 139-150, (2001).

[36] Dhillon S.S., Chakrabarty K., Iyengar S.S., "Sensor placement for grid coverage under ımprecise detections", ***IEEE Transactions on Computers***, 51, (2002).

[37] Dhillon S.S., Chakrabarty K., "Sensor placement for effective coverage and surveillance in distributed sensor networks", ***Wireless Communications and Networking Conference***, (2003).

[38] Chakrabarty K., Iyengar S.S., Qi H., Cho E., "Grid coverage for surveillance and target location in distributed sensor networks", ***IEEE Transactions on Computer***, 51 (12), 1448-1453, (2002).

[39] Zou Y., Chakrabarty K., "Sensor deployment and target localization based on virtual forces", ***IEEE INFOCOM***, 1293-1303, (2003).

[40] Olariu S., Nickerson J.V., "Protecting with sensor networks: perimeter and axes" ***MILCOM***, (2005).

[41] Spanache S., Escobet T., Trave-Massuyes L., "Sensor placement optimisation using genetic algorithms" ***Proceedings DX-2004, 15th International Workshop on Principles of Diagnosis***, Carcassonne, France, (2004).

[42] Aitsaadi N., Achir N., Boussetta K., Pujolle G., "Differentiated Underwater Sensor Network Deployment", ***OCEANS 2007***, 18-21 June, 1-6, (2007).

[43] Barrett S.R., "Optimizing sensor placement for ıntruder detection with genetic algorithms", ***Intelligence and Security Informatics***, 23-24 May, 185-188, (2007).

[44] Erik F.G., "Intelligent deployment strategies for passive underwater sensor networks", Doktora Tezi, ***Rochester University***, NY, USA, (2009).

[45] Cayirci E., Tezcan H., Dogan Y., Coskun V., "Wireless sensor networks for underwater surveillance systems" ***Ad Hoc Networks***, Vol 4, Issue 4, July, 431-446, (2006).

[46] DelBalzo D.R., Kierstead D.P., Stangl K.C., "Oceanographic effects on optimized multistatic sonobuoy fields" ***OCEANS, Proceedings of MTS/IEEE***, Vol 2, 1319-1324, (2005).

[47] Walsh M.J., Wettergren T.A., "Search performance prediction for multistatic sensor fields", Technical Report, ***Naval Undersea Warfare Center***, Newport, RI, (2008).

[48] Tharmarasa R., Kirubarajan T., Lang T., "Joint path planning and sensor subset selection for multistatic sensor networks", ***Proc. of Symposium on Computational Intelligence in Security and Defence Applications***, (2009).

[49] Wang I.J., Lim J.H., Terzis A., "Energy-efficient sensor management in multi-static active sonar networks", ***IEEE Signals, Systems and Computers, 42nd Asilomar Conference***, 1611-1616, (2008).

[50] Saksena A., Wang I.J., "Dynamic ping optimization for surveillance in multistatic sonar buoy networks with energy constraints" ***Decision and Control, CDC 2008. 47th IEEE Conference***, 1109–1114, (2008).

[51] Coraluppi S., "Multistatic sonar localization", ***Oceanic Engineering, IEEE Journal***, Vol 31, Issue: 4, 964-974, (2006).

[52] Simakov S., "Localization in airborne multistatic sonars", ***Oceanic Engineering, IEEE Journal*** , Vol 33, Issue:3, 278 – 288, (2008).

[53] Erdinç O., Willet P., "Multistatic sensor placement: a tracking approach", ***Information Fusion, 2006 9th International Conference***, 1-8, (2006).

[54] Poikonen A., Mertsalmi P., Mattila P., "Multistatic sonar studies in shallow water environment in the gulf of Finland", ***UAM-Underwater Acoustics Measurements Seminar***, (2009).

[55] Casbeer D.W., Swindlehurst A.L., Beard R., "Connectivity in UAV multi-static radar network", ***American Institute of Aeronautics and Austronautics AIAA***, 6209, (2006).

[56] Schmidt H., Edwards J.R., Liu T.C., "GOATS: AUV-based Multi-static Sonar Concept for Littoral MCM", ***Fifth International Symposium Technology and the Mine Problem***, U.S. Naval Postgraduate School, Monterey, CA, (2002).

[57] Operations Analysis Study Group, "Naval Operations Analysis", Second Edition, ***Naval Institute Press***, Annapolis, MA, (1989).

[58] Koopman, B.O., "Search and Screening: General Principles With Historical Applications - Revised", ***Pergamon Press***, New York, (1980).

[59] Cooper D. C., Frost J. R., Quincy Robe R., "Compatibility of Land SAR Procedures with Search Theory", ***Potomac Management Group Inc***., (2003).

[60] Washburn A., "Search and Detection", Fourth edition, ***INFORMS Topics in Analysis series***, (2002).

[61] Franko S., "Sualtı Akustiği: Giriş", ***Technical report***, (2008).

[62] Mackenzie K.V., "Nine-term equation for the sound speed in the oceans", ***J. Acoust. Soc. Am.***,70(3), 807-812, (1981).

[63] Hodges R.P., "Underwater Acoustics: Analysis, Design and Performance of Sonar", ***John Wiley & Sons Ltd.***, (2010).

[64] Thorp W.H., "Analytic description of the low-frequency attenuation coefficient" ***J.Acoustics Society Am.***, 42, 270, (1967).

[65] Kinsler L. E., Frey A.R., Coppens A. B., Sanders J. V., "Fundamentals of Acoustics", 4th edition, ***Wiley New York***, 448-450, (2000).

[66] Tucholski E.J., "Angular dependence of target strength for simple geometric shapes", Physics Department, ***US Naval Academy***, Maryland, USA, (2008).

[67] Willis N.J., "Bistatic Radar", Radar Handbook, Skolnik M. I. (Editor in Chief), ***McGraw-Hill Professional***, 23.4, (2008).

[68] Hirst A.E., Lloyd E.K., "Cassini, his ovals and a space probe to Saturn", ***The Mathematical Gazette***, Vol. 81, No. 492, (1997).

[69] Hellmers J., Eremina E., Wriedt T., "Simulation of light scattering by biconcave Cassini ovals using the nullfield", ***Journal Of Optics A: Pure And Applied Optics***, Vol 8, 1–9, (2006).

[70] Angelov B., Mladenov I.M., "Geometry, Integrability and Quantization" First edition, ***Sofia: Coral Press***, 27–47, (1999).

[71] Mazeron P., Muller S., ***Journal Of Optics***, Vol 29, 68–77, (1998).

[72] Di Biasio A., Cametti C., ***Bioelectrochemistry***, Vol 65, 163–9, (2005).

[73] James G., James R. C., "Mathematics Dictionary", 5th ed., ***D. Van Nostrand Co. Inc.***, New York, 47, (1992).

[74] Gray A., "Cassinian Ovals, Modern Differential Geometry of Curves and Surfaces with Mathematica", 2nd ed., Boca Raton, ***FL: CRC Press***, 82-86, (1997).

[75] MacTutor, History of Mathematics Archive, "Cassinian Ovals", http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Curves/Cassinian.html, (**Ziyaret Tarihi: 04 Mart 2011**).

[76] Willis N. J., "Bistatic Radar", 2nd edition, ***SciTech Publishing Inc***., Raleigh, NC, 106, (2005).

[77] Matz F., "The Rectification of the Cassinian Oval by Means of Elliptic Functions", ***Am. Math. Monthly***, Vol 2, 221-223, (1895).

[78] Matz F., "The Rectification of the Cassinian Oval by Means of Elliptic Functions", ***Am. Math. Monthly***, Vol 2, 264-266, (1895).

[79] Matz F., "The Rectification of the Cassinian Oval by Means of Elliptic Functions", ***Am. Math. Monthly***, Vol 2, 355-357, (1895).

[80] Philip J., "The probability distribution of the distance between two random points in a box", ***Mathematics Subject Classification***, (1991).

[81] Washburn A., "Search and Detection", ***INFORMS***, 4th edition, 9-1, (2002).

[82] Abramovitz S., Stegun, I., "Handbook of Mathematical Functions", ***National Bureau of Standards***, Applied Mathematics Series 55, Washington, DC, 374-8, (1964).

[83] Lazos, L., Poovendran, R., Ritcey, J. A., "Probabilistic detection of mobile targets in heterogeneous sensor networks", ***IPSN '07 Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks***, 519-528,. NY, USA: ACM, (2007).

[84] Santalo L., "Integral Geometry and Geometric Probability", ***Addison-Wesley Publishing Company***, (1976).

[85] Solomon H., "Geometric Probability", ***CBMS-NSF***, (1978).

[86] Yazıcı A., "Doğrusal olmayan programlama yöntemlerinin sistem denetiminde kullanımı", Doktora Tezi, ***Eskisehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Eskişehir, (2005).

[87] Bazaraa M.S., Sherali H.D., Shetty C.M., "Nonlinear Programming: Theory and Algorithms", ***John Wiley and Sons Publishing***, ISBN 0-471-55793-5, N.Y, (1993).

[88] Erdem S., Çakır Ş., "Doğrusal Olmayan Kısıtlı Programlama ile Yapay Sinir Ağlarının Eğitilmesi" ***Bilimde Modern Yöntemler Sempozyumu BMYS'2005***, Kocaeli Üniversitesi, (2005).

[89] GAMS Development Corporation, ***General algebraic modeling system*** (GAMS), Retrieved December 15, 2007, http://www.gams.com, (2005).

[90] Lee C., Kim Y., Seok J., "Parallel genetic algorithm for the earliness-tardiness job scheduling problem with general penalty weights", ***Computers & Industrial Engineering***, Vol.28, No.2, (1995).

[91] Hahnert W.F., Ralston P.A.S., "Analysis of population size in accuracy and performance of genetic training for rule-based control systems", ***Computers & Operations Research***, Vol.22, No.1, (1994).

[92] Kumar A., Pathak R.M.,Grupta Y.P., "Genetic algorithm based approach for file allocation on distributed systems", ***Computers & Operations Research***, Vol.22, No.1, (1994).

[93] Murty, K.G., "Operation Research Deterministic Optimal Models", ***Prentice Hall***, NJ, 581-587, (1995).

[94] Coşkun A., "Genetik algoritma kullanılarak kimyasal maddelerin deriden geçiş katsayılarının ve molekül yapılarının bulunması", Doktora Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, (2006).

[95] Chen C.L., Nepalli R.V., Aljaber N., "Genetic algorithm applied to the continious flow shop problem", ***Computers & Operations Research***, Vol.30, No.4, (1996).

[96] Özçakar N., "Genetik algoritmalar", ***İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi***, C:27, S.1/Nisan, 69-82, (1998).

[97] Sutton P., Boyden S., "Genetic algorithms-a general search procedure", ***American Journal of Pysics***, 62:6, 549-552, (1994).

ÖZGEÇMİŞ

Mümtaz Karataş 1979 yılında Kocaeli'nde doğdu. İlk ve orta öğrenimini İzmir'de, liseyi Deniz Lisesi/İstanbul'da tamamladı. 2001 yılında lisans eğitimini Deniz Harp Okulu Endüstri Mühendisliği A.B.D'da tamamladı. 2001-2004 yılları arasında Hücumbot Filosu Komutanlığında teğmen rütbesi ile görev yapmasını takiben 2004-2006 yılları arasında University of Michigan/ABD'de Endüstri Mühendisliği ve Harekat Analizi A.B.D'da yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2008 yılında Kocaeli Üniversitesi'nde başladığı doktora eğitimi kapsamında bir yıl süreyle Naval Postgraduate School/ABD'de araştırmacı olarak bulundu. Müh. Yzb. Mümtaz Karataş halen Deniz Kuvvetleri Komutanlığı bünyesinde harekat analizi ve modelleme&simülasyon çalışmalarına devam etmektedir.