

**NOKTA HAVA SAVUNMA SİSTEMLERİNİN KONUŞ
YERİ SEÇİMİ İÇİN ÇOK KRİTERLİ YAKLAŞIMLAR**

**MULTI-CRITERIA APPROACHES FOR LOCATION
SELECTION OF POINT AIR DEFENSE SYSTEMS**

SALİH TAŞDEMİR

DR. ÖĞR. ÜYESİ DİCLEHAN TEZCANER ÖZTÜRK

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

ÖZET

NOKTA HAVA SAVUNMA SİSTEMLERİNİN KONUŞ YERİ SEÇİMİ İÇİN ÇOK KRİTERLİ YAKLAŞIMLAR

Salih TAŞDEMİR

Yüksek Lisans, ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ Bölümü

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Diclehan TEZCANER ÖZTÜRK

Eylül 2021, 48 sayfa

Kritik tesislerin hava savunması mevcut nokta hava savunma sistemleri ile yapılmaktadır. Bu sistemlerin konuş yeri seçimi savunma etkinliği açısından büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmanın kapsamı, belirli sayıda (üç adet) kısa menzilli hava savunma sisteminin belirli bir bölge içinde üç kriter (kapsama, vuruş olasılığı, lojistik ağı mesafesi) gözetilerek en uygun şekilde konuşlanmasıdır. Bu sistemlerin sürekli alanda konumlanması kapasite, silah tipi, menzil ve prensip kısıtları göz önüne alınarak, belli bir zamandaki durum için yapılmıştır. Çözüm süresinin uzun sürmesi ve çözüm sayısının fazla olması sebebiyle, referans bazlı genetik algoritma kullanılmıştır. Ayrıca problem çözümünü hızlandırmak için belirli bir kapsama değeri için bir sezgisel yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmanın genetik algoritma sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Hava Savunma Optimizasyonu, Çok Kriterli Tesis Yeri Seçimi, Sürekli Alanda Tesis Yeri Seçimi, Genetik Algoritma

ABSTRACT

MULTI-CRITERIA APPROACHES FOR LOCATION SELECTION OF POINT AIR DEFENSE SYSTEMS

Salih TAŞDEMİR

Graduate, Department of INDUSTRIAL ENGINEERING

Supervisor: Dr. Diclehan TEZCANER ÖZTÜRK

September 2021, 48 pages

Air defense of critical facilities is carried out with existing point air defense systems. Location of these systems is of great importance in terms of defense efficiency. The scope of this study is the optimal deployment of a certain number (three systems) of short-range air defense systems within a certain region by considering three criteria (coverage, hit probability, logistics network distance). The positioning of these systems in the continuous area has been made for the situation at a certain time, considering the limitations of capacity, weapon type, range and principle. Due to the long solution time and the high number of solutions, reference based genetic algorithm was used. In addition, a heuristic algorithm has been developed for a certain coverage value to speed up the problem solution. It has been seen that the developed algorithm is compatible with the genetic algorithm results.

Keywords: Air Defense Optimisation, Multi-Criteria Facility Location Selection, Facility Location Selection in Continuous Area, Genetic Algorithm

TEŞEKKÜR

Tez alıőmam sũresi boyunca her tũrlũ desteğini esirgemeyen eőim Esra TAŞDEMİR'e teőekkũr ediyorum. Zaman mevhumu gœzetmeden tezimde ilerlememi sağlayan tez danıőmanım Dr.Diclehan TEZCANER ŐZTũRK'e ve lisansũstũ eğitimim boyunca her tũrlũ katkıyı sunan bœlũm hocalarıma teőekkũr ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
2.1. Askeri Alanda Yapılan Çalışmalar.....	3
2.1.1 Hava Savunma Sistemi Konuşlanması Üzerine Çalışmalar.....	3
2.1.2 Silah-Hedef Atama Problemi Üzerine Çalışmalar	5
2.2. Sivil Sektörde Yer Seçimi Problemi Üzerine Çalışmalar	5
2.3. Konumlandırma Yaklaşımları	6
3. PROBLEM TANIMI.....	7
3.1. Hava Savunma Sistemleri	7
3.2. Kriterler	8
3.2.1. Kapsama	8
3.2.2. Ortalama Vuruş Etkinliği	9
3.2.3. Lojistik Ağı Mesafesi	10
3.3. Değişkenler.....	11
3.4. Kısıtlar.....	12
3.5. Varsayımlar	15
4. ÇÖZÜM YÖNTEMİ.....	17
4.1. Enumerasyon ile Gözlemlerin Sonucu.....	17
4.2. NSGA-II İle Çözüm	23
4.2.1. Yöntem.....	24
4.3. r-NSGA-II Referans Tabanlı Yöntem İle Çözüm	26
4.3.1. Yöntem.....	27

4.4. Sezgisel Yöntem	28
5. SAYISAL SONUÇLAR	33
5.1. NSGA-II Sonuçları	33
5.2. r-NSGA-II Sonuçları.....	40
5.3. Farklı Referans Noktaları için Karşılaştırma	42
6. SONUÇ VE TARTIŞMA	44
7. KAYNAKLAR	46

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Hava savunma sistemleri	7
Şekil 2. Muhtemel taarruz istikameti	7
Şekil 3. Kapsama kriteri hesabı	8
Şekil 4. Kesişim alanı için vuruş olasılığı hesabı	10
Şekil 5. Lojistik Ağı	11
Şekil 6. Çepeçevre savunma.....	12
Şekil 7. Derinliğine savunma	13
Şekil 8. Merkez noktanın kapsanması.....	13
Şekil 9. A ve B sistemlerinin kesişmesi	13
Şekil 10. B sistemlerinin kesişmesi.....	14
Şekil 11. B ve C sistemlerinin kesişmesi	14
Şekil 12. C sistemlerinin kesişmesi.....	15
Şekil 13. Kısıtlara göre daraltılmış alan	18
Şekil 14. Tüm etkin çözümler için sonuçlar	19
Şekil 15. Simetrik yerleşim olası en dış sınır	19
Şekil 16. Asimetrik yerleşim B sistemi değişimi	21
Şekil 17. Asimetrik yerleşim C sistemi değişimi	21
Şekil 18. Açık-Kapsama ilişkisi	22
Şekil 19. Açık-Vuruş etkinliği ilişkisi.....	22
Şekil 20. C sistemleri ile kapsama ilişkisi.....	23
Şekil 21. Sıralama ve kalabalıklık oranına göre seçim (Deb vd., 2002)	25
Şekil 22. Farklı Rc değerleri için sezgisel yöntem ile bulunan etkin çözümler	31
Şekil 23. Sezgisel yöntem sonuçları.....	32
Şekil 24. NSGA-II sonuçlar	35
Şekil 25. NSGA-II beş adet sonuç	37
Şekil 26. Lojistik ağı-iterasyon grafiği.....	39
Şekil 27. r-NSGA-II sonuçlar.....	41

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1. Hava savunma sistemlerinin konuşlanması alanında yapılan çalışmalar	3
Çizelge 2. Parametre verileri	8
Çizelge 3. Problem verileri	17
Çizelge 4. Belirli aralıklar ile ölçülen iteratif sonuçlar.....	19
Çizelge 5. Artış yönleri tablosu	23
Çizelge 6. Hiperhacim göstergesi sonuçları	37
Çizelge 7. İyi bir sonuçtan sonra tüm olası durumlar için değişim tablosu.....	38
Çizelge 8. NSGA-II Beş Çalıştırma için Önerilen Çözümler	39
Çizelge 9. r-NSGA-II en yakın beş çözüm	42
Çizelge 10. r-NSGA-II referans tabanlı yöntem ile bulunan on adet iyi bir çözümün sezgisel yöntem ile karşılaştırılması	42

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

p_a	A Sisteminin Vuruş Olasılığı
p_b	B sisteminin Vuruş Olasılığı
p_c	C sisteminin Vuruş Olasılığı
R_a	A Sisteminin Merkez Noktadan Uzaklığı
R_b	B Sisteminin Merkez Noktadan Uzaklığı
R_c	C Sisteminin Merkez Noktadan Uzaklığı
A_i	i. A Sisteminin Konumu
B_i	i. B Sisteminin Konumu
C_i	i. C Sisteminin Konumu
A_m	A Sisteminin Menzili
B_m	B Sisteminin Menzili
C_m	C Sisteminin Menzili
M	Merkez Savunulacak Noktanın Konumu
<i>Lojistik Ağı (L)</i>	Tüm sistemlerin Merkez noktaya olan uzaklıklarının toplamı
<i>Vuruş Etkinliği (V)</i>	Tüm alanın ortalama vuruş etkinliği
<i>Kapsama (K)</i>	En az bir sistem menzili içinde kalan alanların birleşiminin toplam alana oranı
k_i^A	Bir noktanın A sistemlerinden kaç tanesi tarafından kapsandığı
k_i^B	Bir noktanın B sistemlerinden kaç tanesi tarafından kapsandığı
k_i^C	Bir noktanın C sistemlerinden kaç tanesi tarafından kapsandığı
n_a	A sistem sayısı
n_b	B sistem sayısı
n_c	C sistem sayısı

p_i i. noktadaki Vuruş Etkinliği

W_t Tüm alandaki nokta sayısı

N Popülasyon sayısı

Kısaltmalar

NSGA – II Non Dominated Sorting Genetic Algorithm

rNSGA – II Reference Point Based-Non Dominated Sorting Genetic Algorithm

HV Hiperhacim Göstergesi

1. GİRİŞ

Hava savunma sistemleri alçak irtifa (nokta), orta menzilli, yüksek irtifa hava savunma sistemleri olarak üçe ayrılmaktadır. Nokta hava savunma sistemleri kritik tesislerin savunmasını yaparken, orta menzilli ve yüksek irtifa hava savunma sistemleri geniş bir bölgenin hava savunmasını yapmaktadır.

Yüksek irtifa hava savunma sistemleri konumlandırılırken görüş açısı, ulaşım imkanları, uygun tesisler ve ikmal noktalarının durumu gibi kriterler göz önüne alınmaktadır. Bu silahlar envantere alınırken maliyet kriteri olarak incelenmektedir. Ancak yerleşiminde maliyet kriteri olarak düşünülemez.

Alçak irtifa hava savunma sistemleri konumlandırılırken, yüksek irtifa sistemlere benzer şekilde yerleştirilecek sistemlerin sayısı belli olduğu için, tahsis edilen nokta hava savunma silahlarının optimum yerleşiminde maliyet kriteri olarak düşünülmez. Uygulamalardaki problem çözümünde genellikle harita üzerinde görüş açısı uygun olan yerler belirlenerek kesikli olarak atama problemi çözülmeye çalışılmaktadır. Sistemlerin menzillerine göre belirli oranda Merkez noktadan uzak mesafeye konumlandırılarak boşluk kalmayacak şekilde kapsama yapılmaya çalışılmaktadır. Bu probleme çözüm arayan literatürdeki çalışmalarda, maksimum vuruş yüzdesi veya minimum tahrip edilme olasılığı (düşman durumu biliniyorsa) önemli bir kriter olarak ele alınmaktadır. Problemler genellikle sezgisel algoritmalar ile çözülmeye çalışılmaktadır.

Kritik tesislerin hava savunması nokta hava savunma sistemleri ile yapılmaktadır. Bu sistemlerin konuş yeri seçimi savunma etkinliği açısından büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada belirli sayıda, farklı tiplerde, farklı menzil ve kapsama özelliklerine sahip nokta hava savunma sistemlerinin sürekli alanda çok kriterli konuş yeri seçimi problemi ele alınmıştır. Nokta hava savunma sistemlerinin yerleşimi yapılırken üç kriter (kapsama, vuruş etkinliği, lojistik ağı mesafesi) gözetilmiş ve sistemler sürekli alanda yerleştirilmişlerdir.

Kapsama kriteri; toplam alanın yüzde kaçının en az bir sistem tarafından kapsandığını ifade eder. Lojistik ağı kriteri; merkez savunulacak nokta ile her bir sistem arası mesafenin toplamını ifade eder. Vuruş etkinliği kriteri ise; kapsanan alandaki ortalama vuruş olasılığını ifade etmektedir. Bu kriterleri aynı anda eniyileyen bir çözüm bulunmamakta, yani kriterler çelişmektedir. Sistemlerin kapsama alanlarını minimum

düzeyde kesiştirecek bir yerleşim planı ile maksimum kapsama elde edilmeye çalışılır. Maksimum vuruş olasılığı kriteri konusunda yapılan çalışmalarda ortak bir bakış açısının olmadığı görülmektedir. Farklı hava savunma sistemlerinin yakın konuşlanmasıyla vuruş etkinliği artarken, yeterince uzak olduklarında, belli bir alanda sadece bir sistem etkin olur. Bu kriteri iyileştirmek için de sistemlerin birbirleriyle yakın konuşlanması ve kesişim alanlarının artması gerekir. Üçüncü amacımız ise lojistik ağı mesafesinin minimize edilmesi, yani Merkez noktadan her sisteme gidiş mesafelerinin toplamının minimize edilmesidir. Kapsama kriteri, sistemleri daha ayrık şekilde yerleştirmeye çalışırken lojistik ağı mesafesi kriteri sistemleri merkeze daha yakına yerleştirmeye çalışacaktır. Maksimum vuruş etkinliği kriteri ise sistemlerin etkili alanlarının kesişimlerini arttırmaya çalışacaktır.

Üç kriter düşünülerek sürekli alanda yerleşim yapılırken sonsuz sayıda etkin çözüm bulunur. Çalışmada öncelikle bu problemin etkin çözümlerini bulmak ve etkin çözümlerin yapısını görebilmek için olası birçok yerleşim denenmiş ve üç kriter değerleri bulunmuştur. Etkin çözümlerin yapısı göz önünde bulundurularak etkin sınırı yakınsayan bir sezgisel yöntem geliştirilmiştir. Bu algoritma, üç kriteri gözeterek problemin etkin sınırına yakın çözümler bulur. Ayrıca, çözüm sayısının fazlalığından dolayı karar vericinin tercih edeceği çözümlere yönelik bir genetik algoritma da probleme uyarlanmıştır. Son olarak, problemin iki kriterli versiyonu için (kapsama ve vuruş etkinliği) bir genetik algoritma geliştirilmiş ve bu algoritma ile etkin çözümler yakınsanmıştır.

Bu çalışma sonucunda geliştirilen çözüm yönteminin nokta hava savunma sistemlerinin konuşlanmasında uygulanabileceği, dolayısıyla harekât etkinliğini arttırarak kuvvet tasarrufu sağlayabileceğinin yanında maliyetleri azaltabileceği görülmüştür.

Tezin ikinci bölümünde literatürde uygulanan yaklaşımlar anlatılmış, üçüncü bölümünde ise problemimizin özellikleri ile kriterler ve kısıtlar belirtilmiştir. Dördüncü bölümde problem çözüm yöntemleri anlatılmış ve beşinci bölümde sonuçların karşılaştırması yapılmıştır. Altıncı bölüm ile çalışma sonlandırılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Sürekli alan konum problemleri doğrusal olmayan optimizasyon problemleridir. Kesin sonuç veren modellerin yanında, probleme göre yaklaşık sonuç veren sezgisel algoritmalar da kullanılmaktadır. Tesis yeri sayısı arttıkça problem güçleşmektedir. Literatürün önemli bir kısmını etkili çözüm yaklaşımları bulmayı hedefleyen çalışmalar oluşturmaktadır.

2.1. Askeri Alanda Yapılan Çalışmalar

Askeri alanda yapılan çalışmaların genellikle silah-hedef atama problemleri üzerine olduğu görülmektedir. Konuşlanma çalışmaları ise görece azdır. Bu çalışmalar ilgili başlıklarda anlatılmıştır.

2.1.1 Hava Savunma Sistemi Konuşlanması Üzerine Çalışmalar

Hava savunma sistemleri konuşlanması üzerine çalışmalar Çizelge 1’de özetlenmiştir. Konuşlanma alanında çoğu çalışmanın tek kriter gözettiği görülmektedir. Bazı çalışmaların ise iki kriterli olarak incelendiği görülmüştür. Dört kriter inceleyen bir çalışmada ise amaç fonksiyonunun teke indirildiği ve tek amaç fonksiyonunu optimize eden bir çözüm arandığı görülmüştür.

Çizelge 1. Hava savunma sistemlerinin konuşlanması alanında yapılan çalışmalar

Hava Savunma Sistemlerinin Konuşlanması Alanında Yapılan Çalışmalar		
Tek Kriterli	İki Kriterli	İkiden Fazla Kriterli
*Beklenen Hasar (Pant ve Deep, 2006)	*Maliyet - Hedef Tahribi (Özdemir, 2019)	*Beklenen Hasar (Brown vd., 2005)
*Görüş (Franklin vd., 1994) (Pietkiewicz vd., 2017)	*Maliyet - Performans (Leibowitz ve Lieberman, 1960)	
*Hedef Tahribi (Pietkiewicz vd., 2017) (Ghose vd., 1993)		
*Kapsama (Ignizio ve Shannon, 1972)		

Pant ve Deep'in (2006) çalışmasında, genetik algoritmalar kullanarak hava savunma optimizasyonu yapılmıştır. Hava taarruzları ile beklenen hayatta kalma sürdürülebilirliği maksimize edilmeye çalışılmıştır. İnsan, silah vb. kısıtlar ile problem tek kriterli olarak incelenmiştir.

Franklin vd.'nin (1994) çalışmasında, hava savunma füze bataryalarının yerleştirilmesinde üç boyutlu olarak görüş açısını maksimize eden geometrik algoritma kullanılmıştır.

Pietkiewicz vd.'nin (2017) çalışmasında belirli bir alan için hava savunma planı optimizasyonu yapılmıştır. Değerlendirme kriteri olarak belirlenen maksimum hedef görüşü amaç fonksiyonuna göre sezgisel yöntem önerilmiştir. Nokta hava savunma sistemleri için farklı olasılıklara sahip muhtemel taarruz istikametlerinden gelecek yapay setler üzerinden sistemlerin konuşlanmasında görüşün maksimize edildiği durum test edilmiştir.

Pietkiewicz vd.'nin (2017) çalışmasında hava hedeflerini maksimum tahrip etme olasılığı kriterine göre sürekli alanda konumlandırma yapılmıştır. Arazi iki boyutlu olarak düşünülerek engebeli arazilerden kaynaklı görüş dışında kalan yerler de vuruş etkinliği hesabına dahil edilmiştir. Farklı istikametlerdeki vuruş olasılıklarının bilindiği duruma göre sezgisel bir algoritma kurulmuştur.

Ghose vd.'nin (1993) çalışmasında füze bataryalarının yerleşimi problemine dinamik programlama yaklaşımıyla bir model oluşturmuştur. Maksimum hedef vurma olasılığı kriteri temel alınmıştır. Toplam tehlike değeri minimize edilmeye çalışılmıştır.

Ignizio ve Shannon'un (1972) çalışmasında muhtemel taarruz istikametinden gelecek tehlide yönelik olarak radar kaplaması maksimize edilmiştir. Savunulacak bölge küçük alanlara bölünmüş ve görüş değerleri bu küçük alanlara atanarak problem çözülmüştür.

Özdemir (2019) bölgesel hava savunma için iki kriterli (minimum maliyet, maksimum hedef tahribi) konuşlanma modeli ortaya koymuştur. Parçacık sürüsü optimizasyonundan yararlanılarak sezgisel algoritma geliştirilmiştir.

Leibowitz ve Lieberman'in (1960) çalışmasında, farklı maliyet ve performanslara sahip hava savunma sistemlerinin seçimi ve bu sistemlerin muhtemel saldırılara karşı hava savunmasının etkinliği ele almıştır. Farklı adetlerde iki farklı hava savunma sistemi simetrik olarak yerleştirilmiş ve etkinlik ölçümü yapılmıştır. Düşmanın saldırısındaki mühimmat miktarı ile savunma sistemlerindeki füze sayısının, etkinlik ölçümünde

doğrusal olarak alındığı bir model ortaya konulmuştur. Düşman unsurlarının silah yetenekleri ile konum bilgilerinin bilindiği, ayrıca düşmanın seçeceği saldırı yönteminin bilindiği varsayımı ve oyun teorisi yaklaşımı ile problem çözülmüştür.

Brown vd.'nin (2005) çalışmasında, hava savunma sistemlerinin konuşlandırılmasında maksimum beklenen toplam hasarın minimize edildiği bir optimizasyon modeli sunulmuştur. Saldırı platformları ile savunma platformlarının tam olarak bilindiği varsayılmıştır. Problemdaki dört kriter (Hedefin öncelikli durumunun oranı, hedefin hangi savunma silahına hassas olduğunun oranı, hedefin tekrar angaje olabilirlik oranı ve hedeflerin tehdit oranı) eşit ağırlıklar ile bir amaç fonksiyonunda birleştirilmiştir. Matematiksel modeldeki çözümde sistemlerin yerleştirileceği her bölge için kriter değerleri hesaplanmıştır.

2.1.2 Silah-Hedef Atama Problemi Üzerine Çalışmalar

Lötter ve Vuuren (2016) hava savunma sistemleri için minimum toplam maliyet, maksimum vuruş olasılığı, maksimum tekrardan angaje olabilme zamanı olarak üç amaç gözeterek silah-hedef atama problemini incelemişlerdir. Dinamik olarak incelenen probleme genetik algoritma yaklaşımıyla çözüm geliştirmiştir.

Karasakal'ın çalışmasında (2008) gemiler üzerine yerleştirilmiş hava savunma silahlarının hava hedeflerine tahsisi ile gemilerin deniz üzerinde belirlenmiş sektörlere atama problemleri ele alınmıştır. Silah atama probleminde, her bir hava savunma sisteminin başarılı olma olasılığı maksimize edilmektedir. Sektör atama probleminde ise, toplam beklenen önleme olasılığı maksimize edilmektedir.

2.2. Sivil Sektörde Yer Seçimi Problemi Üzerine Çalışmalar

Farahani vd.'nin (2010) çalışmasında literatürdeki çok kriterli yer seçimi problemleri araştırılmıştır. İki kriterli, çok kriterli veya çok nitelikli olarak problemler üçe ayrılmıştır. Çözüm yöntemleri olarak sezgisel veya meta sezgisel yöntemler kullanıldığı belirtilmiştir. Genel olarak maliyet, risk, kapsama, etkinlik, kâr, fayda, zaman, mesafe, hizmet gibi kriterlerin dikkate alındığı belirtilmiştir. Çok nitelikli olarak incelenen problemlerde ise AHP, TOPSİS, ELECTRE vb. yöntemlerin kullanıldığı çalışmalar mevcuttur.

Özet olarak, literatürde askeri alanda yer alan yer seçimi problemleri üzerine çalışmaların sınırlı olduğu, genellikle problemin sivil sektörde uygulama alanı bulunduğu görülmektedir.

Toplam ağırlıklı mesafeyi minimize etmeye çalışan, toplam mesafeyi minimize etmeye çalışan, belirli bir seviyenin üstünde kapsama yapmaya çalışan problemler literatürde mevcuttur. Bunlar da sürekli, kesikli ve ağ modeller olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Hava savunma alanında gelen tehdide karşı füze ataması (tahsisi) ile ilgilenen bazı çalışmalara rastlanırken, hava savunma sistemlerinin bölgelere yerleşim optimizasyonuna ilişkin yapılan araştırmaların görece az olduğu, nokta hava savunma silahlarının yerleştirilmesi probleminin ise pek incelenmediği gözlemlenmiştir. Yapılan az sayıda çalışmada, genelde bölge hava savunma sisteminin birbirinden farklı kriterler düşünülerek yerleştirildiği, fakat yerleşimden sonrası için oluşturulacak lojistik ağı mesafesinin kriter olarak eklenmediği görülmüştür. Bizim problemimizde elimizdeki mevcut savunma silahları ile maliyet etkin (minimum maliyetli lojistik ağı), caydırıcı ve erken tespit yapabilen (maksimum kapsama) ve hedef tahrip oranı yüksek (vuruş etkinliği) olan daha etkin bir savunma planı oluşturulmasını sağlayacaktır.

2.3. Konumlandırma Yaklaşımları

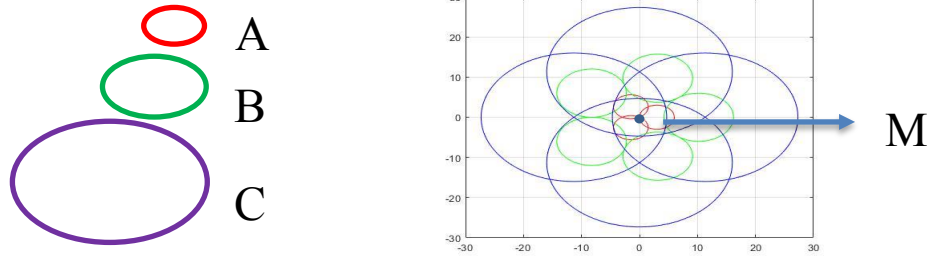
Sürekli alan problemlerinde optimum konumlandırma, problemin büyüklüğüne göre uzun zaman alabilmektedir. Bu tür problemlerin çözümü için mevcut bazı yaklaşımlar; Genetik Algoritmalar (Pant ve Deep, 2006), Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (Özsağlam ve Çunkaş, 2008), Yusufçuk Algoritması (Mirjalili, 2016), dinamik ve tam sayılı programlama (İgnizio ve Shannon, 1972 ve Ghose vd., 1993), Oyun Modelleri (Leibowitz vd., 1960), Memetik Algoritma (Knowles ve Corne, 2000), dağılım algoritmalarının çok amaçlı tahminine yönelik çalışmalar (Igel vd., 2007, Zhong vd., 2008, ve Cheng vd., 2015) ve Vekil modeli temeline dayalı çok amaçlı algoritmalar (Knowles, 2006, Ponweiser vd., 2008, Chugh vd., 2016, ve Akhtar ve Shoemaker, 2019) olarak listelenebilir.

3. PROBLEM TANIMI

3.1. Hava Savunma Sistemleri

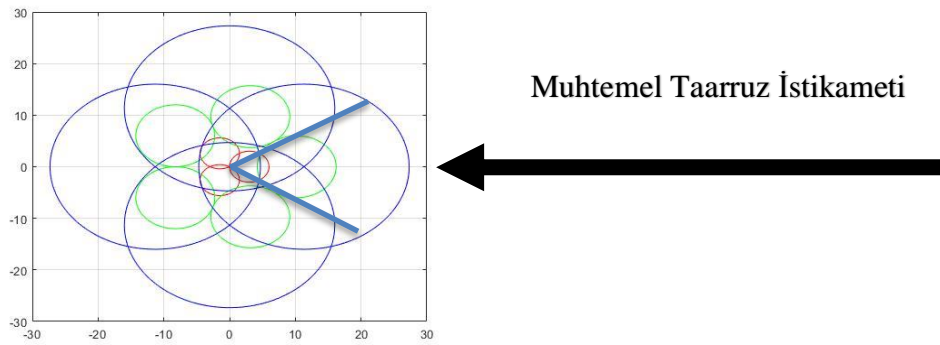
Bu çalışmada üç farklı tipte (A, B, C), farklı menzillere farklı sayılara ve farklı vuruş olasılıklarına sahip nokta hava savunma sistemlerinin yerleşimi üzerine çalışılmıştır. Yerleşim, iki boyutlu düzlemde yapılmış ve üç kriter (kapsama, vuruş etkinliği, lojistik ağı mesafesi) gözetilmiştir.

Nokta hava savunma sistemlerinin yerleşiminde Merkez nokta'nın (M) kapsanması ve savunulması amaçlanmıştır. Merkezden dışa doğru sırasıyla A, B ve C sistemlerinin örnek bir yerleşimi Şekil 1'de verilmiştir. Sistemler menzilleri (yani etki alanları) ile gösterilmekte ve A sisteminden C sistemine doğru etkin oldukları alanların arttığı görülmektedir.



Şekil 1. Hava savunma sistemleri

Muhtemel taarruz istikameti düşmanın hava araçlarının ağırlıklı olarak konuşlu olduğu istikamettir. Şekil 2'de muhtemel taarruz istikameti, Merkez noktanın tam doğusu olarak gösterilmiştir. Tüm sistemlerden bir tanesinin bu muhtemel taarruz istikametinde hizalanması ile, 3.4 Kısmında anlatılacak kısıtlardan biri olan uzaktan karşılama prensibi karşılanacaktır.



Şekil 2. Muhtemel taarruz istikameti

Problemimizde farklı türde ve özelliklerdeki sistemlerin Merkez noktadan ne kadar uzaklığa ve hangi açıda yerleştirileceğini bulmak asıl amacımız olacaktır. Bu yerleşim yapılırken, üç kriter gözetilmiştir. Çizelge 2’de üç farklı sistemin vuruş olasılıkları, menzilleri ve adet sayıları için kullandığımız gösterim verilmiştir.

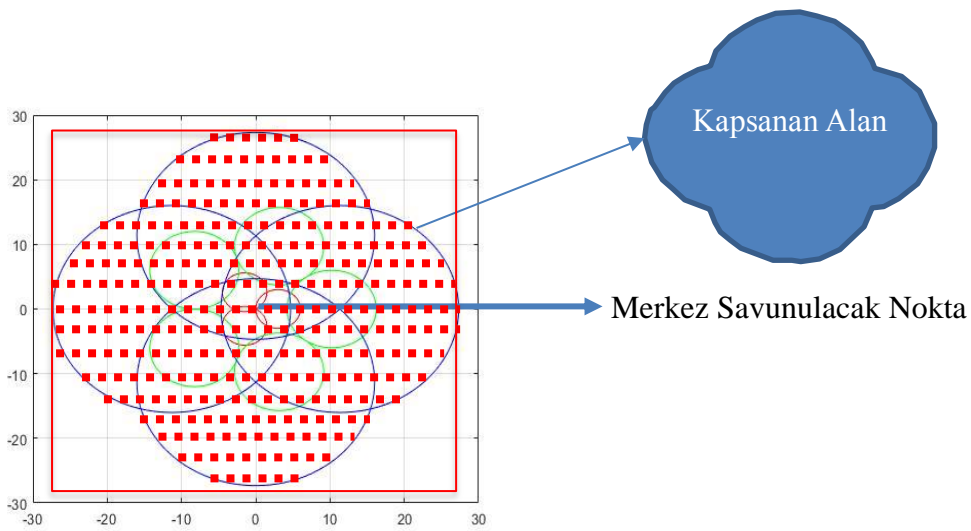
Çizelge 2. Parametre verileri

Sistem	Menzil	Adet	Vuruş Olasılığı
A	A_m	n_a	p_a
B	B_m	n_b	p_b
C	C_m	n_c	p_c

3.2. Kriterler

3.2.1. Kapsama

Kapsama, sistemlerin etkili oldukları alanların birleşiminin toplam alana oranı olarak hesaplanır. Şekil 3’te örnek olarak gösterildiği gibi her bir sistemin menzili yarıçap olacak şekilde kapsama bölgeleri oluşturulmuştur. Alanların birleşiminin matematiksel olarak hesaplanmasının zorluğu nedeniyle, kısıtları sağlayan olası en dış sınır tespit edilerek tüm alana onar metre aralıklarla noktalar yerleştirilmiştir. En az bir sistem tarafından kapsanan nokta sayısı bulunmuş ve bu sayı toplam nokta sayısına (yaklaşık 16.5 milyon nokta) bölünmüştür. Burada kapsamamız en az bir sistem tarafından kapsanan noktaların toplam sayısının tüm noktaların sayısına oranıdır. Denklem (1) ile hesaplanır.



Şekil 3. Kapsama kriteri hesabı

w_t : En az bir sistem tarafından kapsanan nokta sayısı

w : Alandaki toplam nokta sayısı

Şekil 3'te verilen bölgede toplam 16.469.214 nokta üretilmiştir.

$$Kapsama \approx \frac{w_t}{w} \quad (1)$$

3.2.2. Ortalama Vuruş Etkinliği

Bu kriter, kapsanan alandaki ortalama vuruş etkinliği hesaplanarak bulunur. Her sistemin etkili menzili içinde vuruş olasılığının sabit ve bilinir olduğu varsayılmıştır. Bu durumda, herhangi bir noktadaki vuruş etkinliği, o noktayı kapsayan sistemlerin en az birinin o noktada etkili olma olasılığı ile hesaplanır.

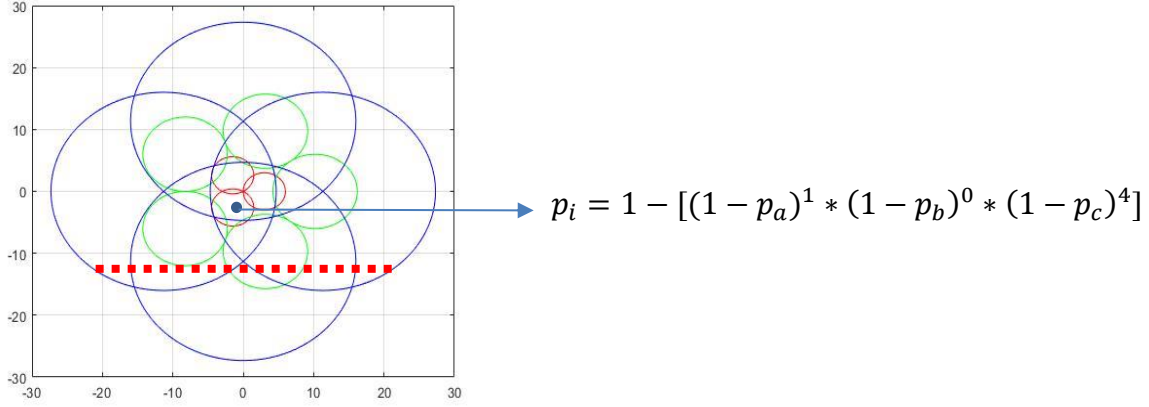
Literatürde vuruş olasılığı farklı yöntemlerle ifade edilmiştir. Lee ve Bake (2005) toplam vuruş yüzdesini maksimize etmiştir. Özdemir (2019) negatif vuruş olasılığının minimize etmiştir. Lee ve Kwak (2008) ağırlıklı vuruş olasılığını maksimize etmiştir. Jung vd. (2010) olasılık fonksiyonu bilindiğinde integral ile alan hesabı yapılarak ortalama vuruş olasılığını hesaplamıştır. Ghose (1993) kapsama alanı içerisindeki farklı sektörlerde vuruş olasılıklarının değiştiği durumda vuruş olasılığını hesaplamıştır. Bu çalışmada ise, vuruş etkinliği hesabı için kapsama hesabında üretilen noktalardan yararlanılmıştır. Kapsanan alandaki her noktadaki vuruş etkinliği hesaplanmış ve bu vuruş etkinliklerinin ortalaması alınarak ortalama vuruş etkinliği hesaplanmıştır. Aşağıdaki notasyon kullanılarak herhangi bir i noktasındaki vuruş etkinliği, denklem (2) ile hesaplanır. Ortalama vuruş etkinliği denklem (3) ile hesaplanır.

k_i^s : i noktasını kapsayan s sistemi sayısı

$$p_i = 1 - [(1 - p_a)^{k_i^A} * (1 - p_b)^{k_i^B} * (1 - p_c)^{k_i^C}] \quad (2)$$

$$Ortalama Vuruş Etkinliği = \frac{\sum_{i=1}^{w_t} p_i}{w_t} \quad (3)$$

Şekil 4'te bir A sistemi ve dört C sisteminin menzili içinde kalan bir noktanın vuruş etkinliği hesabı verilmiştir.

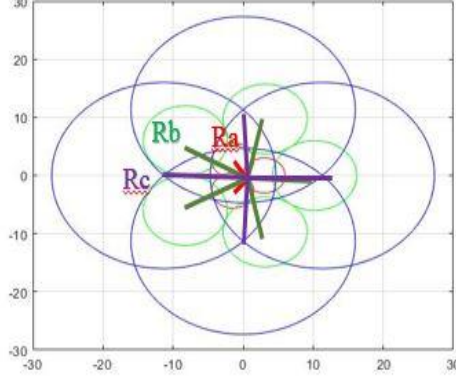


Şekil 4. Kesişim alanı için vuruş olasılığı hesabı

Bu çalışmada, ortalama vuruş etkinliği hesabında, sadece kapsanan alandaki noktadaki ortalama vuruş etkinliği hesaplanır. Bölge savunmasında kapsanmayan alanların da vuruş etkinliği hesabına katıldığı çalışmalar bulunmaktadır. Ancak nokta hava savunmada kapsanmayan alanın savunması önemli değildir. Dolayısıyla kapsanmayan noktaların vuruş olasılıkları problemimizde hesaba katılmamıştır. Çalışmada ayrıca kapsanmayan alanların da hesaba katıldığı durumlar incelenmiş, bu durumda sistemlerin kısıtlarımızı sağlayan olası en dış sınırlara yerleştirildiği görülmüştür. Bunun sebebi, kapsanmayan alanların etkinlik hesabına katıldığı durumda, vuruş etkinliğinin kapsama kriteri ile çelişmemesi ve iki kriterin de sistemleri olabildiğince fazla alan kapsanacak şekilde yerleşime zorlamasıdır.

3.2.3. Lojistik Ağı Mesafesi

Bu kriter, uzun dönemde bakım ve idameden kaynaklı maliyetleri gözetir. Merkez noktadan periyodik olarak her sisteme gidilmesi ve geri Merkez noktaya dönülmesinden kaynaklı maliyettir. Bu maliyet başlangıçta görülmeyen bir maliyettir. Ancak uzun dönemde denetlemeler, atış ve tatbikatlar ile personel ve malzeme nakli nedeniyle oluşan maliyettir. Şekil 5'te görüldüğü üzere burada Merkez noktadan her bir sisteme doğrusal gidiş ve doğrusal geliş mesafelerinin toplamı ile bu kriter denklem (4) ile hesaplanmaktadır. Burada, A_i , B_j , C_k ($i = 1, \dots, n_a$, $j = 1, \dots, n_b$, $k = 1, \dots, n_c$) sistemlerin koordinatlarını belirtmektedir. Lojistik ağı maliyetini minimize etmek için sistemlerin merkeze yakın yerleştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 5. Lojistik Ağı

$$\text{Lojistik Ağı Maliyeti} \approx \sum_{i=1}^{n_a} \|A_i - M\| + \sum_{j=1}^{n_b} \|B_j - M\| + \sum_{k=1}^{n_c} \|C_k - M\| \quad (4)$$

Sistemlerin bakımı yapılırken, merkezden çıkan birimin tüm sistemlere sırayla uğrayıp en son Merkez noktaya geri döndüğü de düşünülebilir. Bu durumda, mevcut yerleşim için her sisteme giden rotaların belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada ise sistemlere direk gidiş-gelişler düşünülmüştür.

Üstte anlatılan üç kriter birbirleri ile çelişmektedir ve hepsini aynı anda optimize eden bir çözüm bulunmamaktadır. Bu nedenle problem çözümünde *etkin çözümler* aranacaktır. Bir çözümün etkin çözüm olması için, kriter değerlerinin hepsinde daha iyi olan bir çözümün olmaması gerekir. Bir çözüm x 'in üç kriter değerinin (kapsama, vuruş etkinliği, lojistik ağı) (x_k, x_v, x_l) ile gösterildiğini varsayalım. Bu çözümün etkin olması için (y_k, y_v, y_l) değerlerine sahip ve $y_k \geq x_k$, $y_v \geq x_v$, $y_l \leq x_l$ koşullarını sağlayan ve $y_k > x_k$, $y_v > x_v$, $y_l < x_l$ koşullarından en az birini sağlayan farklı bir çözüm y 'nin bulunmaması gerekir.

3.3. Değişkenler

Bu problemdeki amaç, verilen sistemlerin merkez çevresinde yerleşecekleri konumları bulmaktır. Bunun için, kutupsal koordinatların ya da kartezyen koordinatların belirlenmesi gerekmektedir. Sistem s 'nin i . üyesinin kutupsal koordinatlarından, (R_s^i, Q_s^i) , kartezyen koordinatlarına, (x_s^i, y_s^i) , aşağıdaki denklemler (5) ve (6) ile geçilebilir.

$$x_s^i = R_s^i * \cos(Q_s^i) \quad (5)$$

$$y_s^i = R_s^i * \sin(Q_s^i) \quad (6)$$

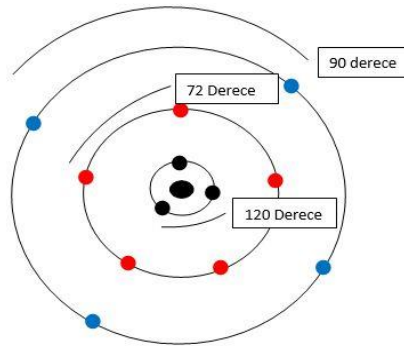
Aşağıdaki kısımlarda, bir sistemin tüm üyelerinin merkezden uzaklığının aynı olduğu, $R_s^i = R_s, \forall i, s$, varsayılarak gösterimler yapılmıştır. Farklı olduğu durumlar ayrı olarak incelenmiştir.

3.4. Kısıtlar

Problemimizde dört prensip dikkate alınmıştır. Dördüncü prensip altı kısıt ile ifade edilmiştir.

1. *Uzaktan karşılama prensibi* dikkate alınacaktır. Bu prensiple, tehdit reaksiyon süresini arttırabilmek için en dış halkada bulunan sistemin taarruz istikametinde en uzağa konuşlanabilmesi sağlanacaktır. Bu prensip, amaç fonksiyonunda kriter (maksimum kapsama) olarak temsil edilmiştir.
2. *Silah ailesi prensibi* dikkate alınacaktır. Farklı tür silah sistemleri bir arada ve eksiksiz kullanılacaktır.
3. *Çepeçevre savunma* yapılacaktır. Tehdidin her yönden gelebileceği dikkate alınarak sistemler yerleştirilecektir. Aynı tür sistemler 360 derecelik alanı eşit açılarla bölecek şekilde yerleştirilecek ve boşluk kalmayacaktır. Üç A, beş B ve dört C sisteminden oluşan bir nokta savunma sisteminin yerleşimi Şekil 6'da gösterilmiştir.

Hedeflerin muhtemel taarruz istikametleri bilindiği durumda, çepeçevre savunma prensibi ile sistemlerin hangi açılara yerleşeceği bulunmuş olur. Bu sayede karar değişkenlerinden biri olan yerleşim açısına, $Q_s^i, s = A, B, C$, tüm sistemler için karar verilmiş olur. Karar değişkeni olarak, sistemlerin merkeze olan uzaklıkları, $R_s, s = A, B, C$, kalır.



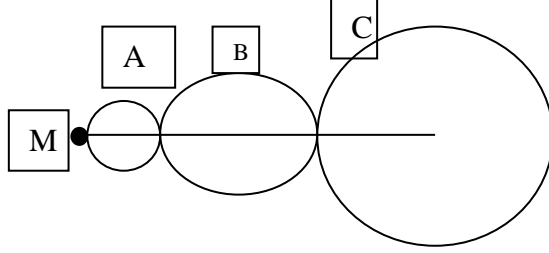
Şekil 6. Çepeçevre savunma

Simetrik yerleşim için lojistik ağı maliyeti denklem (7) ile bulunur.

$$\text{Lojistik Ağı Maliyeti} \approx n_a * R_a + n_b * R_b + n_c * R_c \quad (7)$$

4. *Derinliğine savunma prensipleri* dikkate alınacaktır. Yani düşman doğrusal bir hat boyunca Şekil 7’de görüldüğü gibi farklı tür hava savunma sistemleri ile karşı karşıya kalmalıdır. Bunun için;

a. Sistemler menzilleri artacak şekilde Merkez noktadan uzaklaşmalıdır.



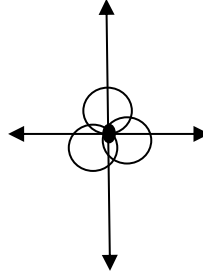
Şekil 7. Derinliğine savunma

Denklem (8) ve denklem (9) ile ifade edilmiştir.

$$\|A_i - M\| \leq \|B_j - M\| \leq \|C_k - M\| \quad \forall i, j, k \quad (8)$$

$$R_a \leq R_b \leq R_c \quad (9)$$

b. A sistemleri Şekil 8’de görüldüğü gibi Merkez noktayı kapsamalıdır.



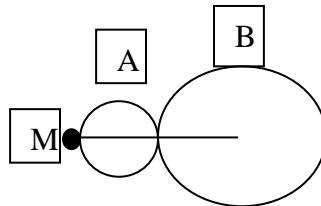
Şekil 8. Merkez noktanın kapsanması

Denklem (10) ve denklem (11) ile ifade edilmiştir.

$$0 \leq \|A_i - M\| \leq A_m \quad \forall i \quad (10)$$

$$R_a \leq A_m \quad (11)$$

c. Muhtemel taarruz istikametine yerleştirilen B sistemi Şekil 9’daki gibi bir A sistemi ile en az bir noktada kesişmeli ve arada boşluk kalmamalıdır. B sisteminin merkezden en uzağa konumlanacağı yer için aşağıdaki eşitsizlik bulunmuştur. Denklem (12) ve denklem (13) ile ifade edilmiştir.



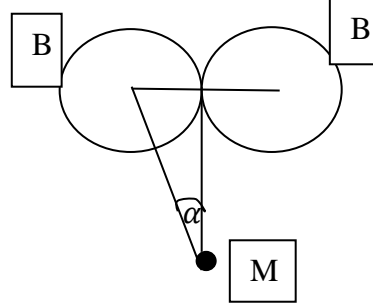
Şekil 9. A ve B sistemlerinin kesişmesi

$$\|A_i - M\| \leq \|B_j - M\| \leq 2 * A_m + B_m \quad \forall i, j \quad (12)$$

A sisteminin konumu bilinirken ise,

$$R_b \leq R_a + A_m + B_m \quad (13)$$

- d. B sistemleri arasında Şekil 10'da gösterildiği gibi boşluk kalmayacak şekilde yerleşim olmalıdır. B sisteminin merkezden en uzağa konumlanacağı yer için aşağıdaki eşitsizlik bulunmuştur. Denklem (15) ve denklem (16) ile ifade edilmiştir.



Şekil 10. B sistemlerinin kesişmesi

$$\alpha = \frac{360}{2 * n_b} \quad (14)$$

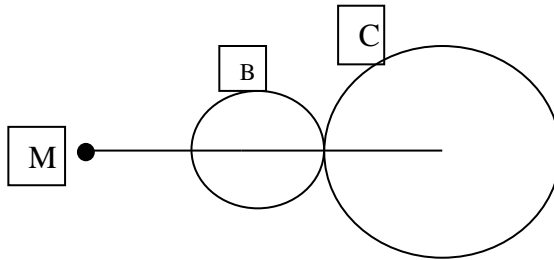
$$\|B_j - M\| \leq \frac{B_m}{\sin(\alpha)} \quad \forall j \quad (15)$$

$$R_b \leq \frac{B_m}{\sin\left(\frac{360}{2 * n_b}\right)} \quad (16)$$

Üstteki iki kısıt göz önüne alınarak, R_b için aşağıdaki eşitsizlik bulunur:

$$R_b \leq \min \left\{ 2 * A_m + B_m; R_a + A_m + B_m; \frac{B_m}{\sin\left(\frac{360}{2 * n_b}\right)} \right\} \quad (17)$$

- e. Muhtemel taarruz istikametine yerleştirilen C sistemi Şekil 11'de gösterildiği gibi bir B sistemi ile en az bir noktada kesişmeli ve arada boşluk kalmamalıdır. C sisteminin merkezden en uzağa konumlanacağı yer için aşağıdaki eşitsizlik bulunmuştur. Denklem (18) ve denklem (19) ile ifade edilmiştir.

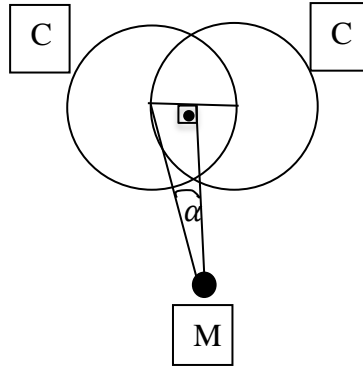


Şekil 11. B ve C sistemlerinin kesişmesi

$$\|C_k - M\| \leq 2 * (A_m + B_m) + C_m \quad \forall k \quad (18)$$

$$R_c \leq R_b + B_m + C_m \quad (19)$$

- f. C sistemleri arasında boşluk kalmayacak şekilde yerleşim olmalıdır. Ayrıca menzili büyük olan ve dış sınırdaki bulunan C sistemleri Şekil 12’de görüldüğü gibi birbirlerini desteklemeli, yani bir C sistemi en az iki başka C sisteminin menzili içinde kalmalıdır. C sisteminin merkezden en uzağa konumlanacağı yer için aşağıdaki eşitsizlik bulunmuştur. Denklem (21) ve denklem (22) ile ifade edilmiştir.



Şekil 12. C sistemlerinin kesişmesi

$$\alpha = \frac{360}{2 * n_c} \quad (20)$$

$$\|C_k - M\| \leq \frac{C_m}{2 * \sin(\alpha)} \quad \forall k \quad (21)$$

$$R_c \leq \frac{C_m}{2 * \sin\left(\frac{360}{2 * n_c}\right)} \quad (22)$$

Üstteki iki kısıt göz önüne alınarak, R_c için aşağıdaki eşitsizlik bulunur:

$$R_c \leq \min \left\{ 2 * (A_m + B_m) + C_m; R_b + B_m + C_m; \frac{C_m}{2 * \sin\left(\frac{360}{2 * n_c}\right)} \right\} \quad (23)$$

3.5. Varsayımlar

Geliştirilen çalışmada bazı varsayımlarda bulunulmuştur. Arazi iki boyutlu düşünölmüş, üç boyutlu olarak engebeli arazilerden kaynaklı görüşümüzü oluşturan radar kaplaması göz ardı edilmiştir. Yani vuruş etkinliği veya kapsama hesabında menzil içinde olup engebeli arazilerden kaynaklı görüş açımız dışında bulunan durumlar göz ardı edilmiştir. Arazi ve yol durumunun, merkez ve sistemler arasında direk gidiş-gelişe izin verdiği varsayılmıştır. Düşman kabiliyetleri (uçakların adet sayısı, performansı ve hareketleri)

göz ardı edilmiş sadece olası taarruz istikameti çözümde kullanılmıştır. Ayrıca hava savunma sistemlerinin menzil içindeki vuruş olasılıkları eşit varsayılmıştır.

4. ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Problemin boyutunun büyüklüğü nedeniyle etkin çözümlere ulaşabilmek için farklı çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Bu kısımda, sırasıyla enumerasyon sonuçlarından, tüm etkin çözümleri ve karar vericinin tercihlerine yakın etkin çözümler bulan yöntemlerden bahsedilmiştir.

4.1. Enumerasyon ile Gözlemlerin Sonucu

Kriterlerin birbirleri ile olan ilişkilerini ve kriterlerin sistemlerin yerleşiminden nasıl etkilendiğini görebilmek için öncelikle farklı sistem yerleşimleri üretilmiştir. Bunun için, problem verileri rastgele üretilen ve bu verilerin değerleri Çizelge 3'te verilen savunma sistemleri kullanılmıştır.

Çizelge 3. Problem verileri

Sistem	Menzil (km)	Adet	Vuruş Olasılığı
A	3	3	0,2
B	6	5	0,9
C	16	4	0,8

Enumerasyon yapılmadan önce, sistemlerin yerleşebileceği alan belirlenirken, C sisteminin yerleşebileceği en uç nokta bulunmuş ve bu noktayı kapsayacak bir alan kullanılmıştır. Dış alanın güneybatı $(-x, -y)$ ve kuzeydoğu köşelerinin (x, y) koordinatları, sırasıyla denklem (24) ve (25) ile bulunmuştur.

$$(-x, -y) = (-(2 * A_m + 2 * B_m + 2 * C_m), -(2 * A_m + 2 * B_m + 2 * C_m)) \quad (24)$$

$$(x, y) = ((2 * A_m + 2 * B_m + 2 * C_m), (2 * A_m + 2 * B_m + 2 * C_m)) \quad (25)$$

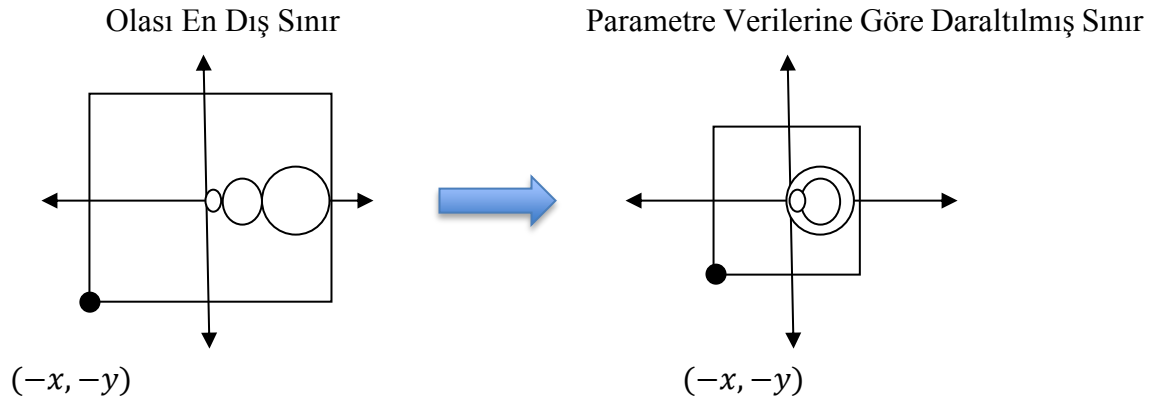
R_a, R_b, R_c değerleri kısıtları sağlayacak şekilde sıfır ile her bir sistemin üst limitleri (sırasıyla, denklem 11, 16 ve 22) arasında belirli aralıklar ile arttırılmıştır. Çepeçevre savunma prensibi nedeniyle, her sistem, 360 dereceyi eşit aralıklarla bölecek şekilde konuşlanmıştır. Her farklı R_a, R_b, R_c dizilimindeki A, B, C sistemleri denklem (5) ve denklem (6) ile kartezyen denklemlere çevrilerek konumlandırılmıştır.

Dizilimlerin kapsama ve vuruş etkinliği kriter değerleri hesaplanırken, köşeleri, denklem (24) ve (25) ile tanımlanmış yerleşim alanı içine onar metre aralıklar ile noktalar

yerleştirilmiştir. Kapsama kriteri denklem (1) ile, vuruş etkinliği denklem (3) ile, ve Lojistik Ağı mesafesi denklem (4) ile hesaplanır.

Sonuçlara bakıldığında, yerleşim alanının çok geniş tutulduğu gözlemlenmiş ve alan daraltılmıştır. Denklem (26) daraltılmış alanın güney batı köşesini temsil eder ve Şekil 13 daraltılmış alanı gösterir.

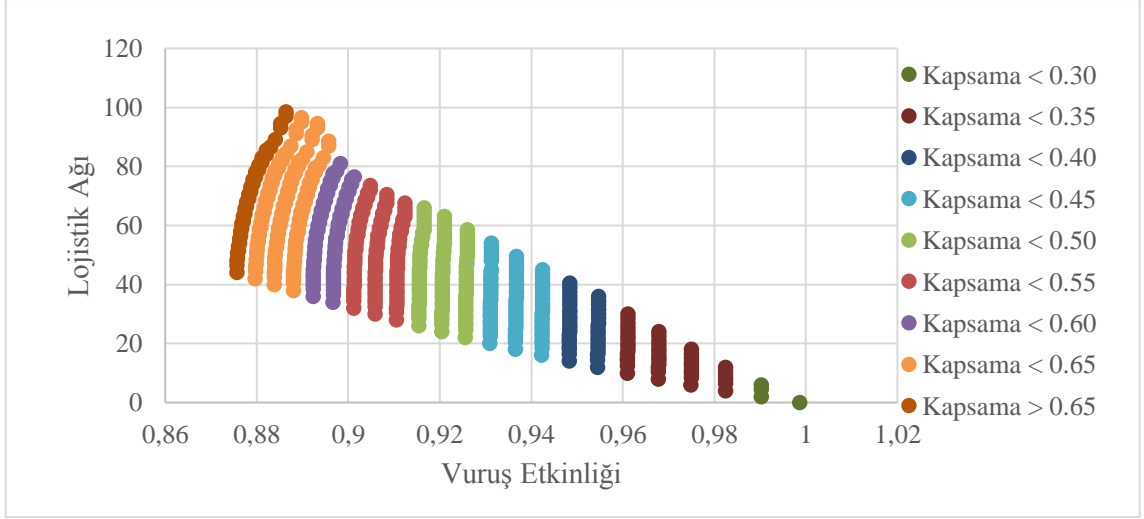
$$(-x, -y) = \left(-\frac{C_m}{2 \cdot \sin\left(\frac{360}{2 \cdot n_c}\right)} + C_m, -\frac{C_m}{2 \cdot \sin\left(\frac{360}{2 \cdot n_c}\right)} + C_m \right) \quad (26)$$



Şekil 13. Kısıtlara göre daraltılmış alan

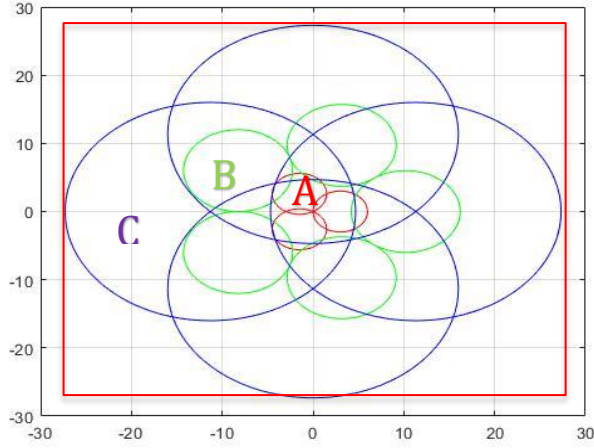
Sistematik bir şekilde A, B, C sistemlerinin yerleri değiştirilerek, her sistemin merkezden uzaklığı (R_s) 500'er metre aralıklar ile yerleştirilmiştir. Kısıtları sağlayan tüm noktalara ait dizilerin ortalama vuruş etkinliği, kapsama oranı ve lojistik ağı mesafesi hesaplanmıştır. Elde edilen tüm kombinasyonlardan domine edilenler çıkarılarak etkin sınırda olan durumlar tespit edilmiştir.

Çözülen problemin etkin çözümleri Şekil 14'te verilmiştir. Kapsama arttıkça vuruş etkinliğinin azaldığı, kapsama arttıkça lojistik ağının maliyetinin arttığı, belirli bir kapsama değeri için (her kapsama aralığı Şekil 14'te farklı renklerde gösterilmiştir) vuruş etkinliği arttıkça lojistik ağının maliyetinin arttığı görülmüştür.



Şekil 14. Tüm etkin çözümler için sonuçlar

Tüm çözümler geniş yerleşim alanı ile 7.2 saatte, Şekil 15 ile gösterilen daraltılmış alan ile ise 4.5 saatte elde edilmiştir.



Şekil 15. Simetrik yerleşim olası en dış sınır

Etkin çözümler içinden her vuruş etkinliği değeri için lojistik ağı boyutunun minimum ve maksimum olduğu yerleşim planlarının detayları Çizelge 4'te gösterilmiştir.

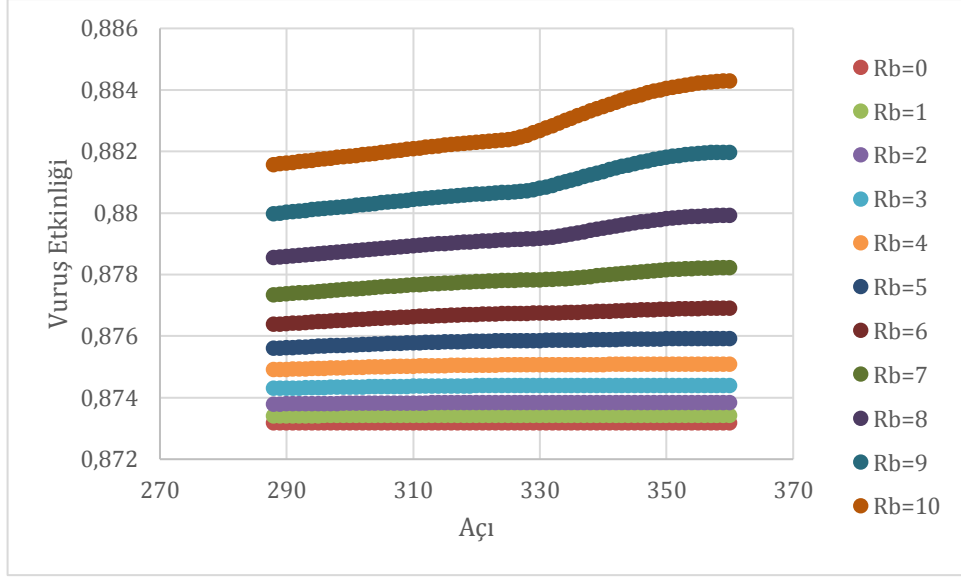
Çizelge 4. Belirli aralıklar ile ölçülen iteratif sonuçlar

Ortalama Vuruş Etkinliği	Lojistik Ağı	A sisteminin merkezden uzaklığı (km)	B sisteminin merkezden uzaklığı (km)	C sisteminin merkezden uzaklığı (km)	Kapsama
0,87	42	0	0	10,5	0,65

0,87	76,5	0	6,5	11	0,67
0,88	38	0	0	9,5	0,61
0,88	96,5	1,5	10	10,5	0,65
0,89	34	0	0	8,5	0,57
0,89	94,5	1,5	10	10	0,63
0,90	30	0	0	7,5	0,53
0,90	70,5	1	7,5	7,5	0,53
0,91	26	0	0	6,5	0,49
0,91	66	2,5	6,5	6,5	0,49
0,92	22	0	0	5,5	0,45
0,92	63	3	6	6	0,47
0,93	18	0	0	4,5	0,42
0,93	54	3	5	5	0,44
0,94	14	0	0	3,5	0,38
0,94	45	3	4	4	0,40
0,95	12	0	0	3	0,36
0,95	36	3	3	3	0,36
0,96	8	0	0	2	0,33
0,96	30	2,5	2,5	2,5	0,35
0,97	6	0	0	1,5	0,32
0,97	18	1,5	1,5	1,5	0,32
0,98	4	0	0	1	0,30
0,98	12	1	1	1	0,30
0,99	0	0	0	0	0,27
0,99	6	0,5	0,5	0,5	0,28

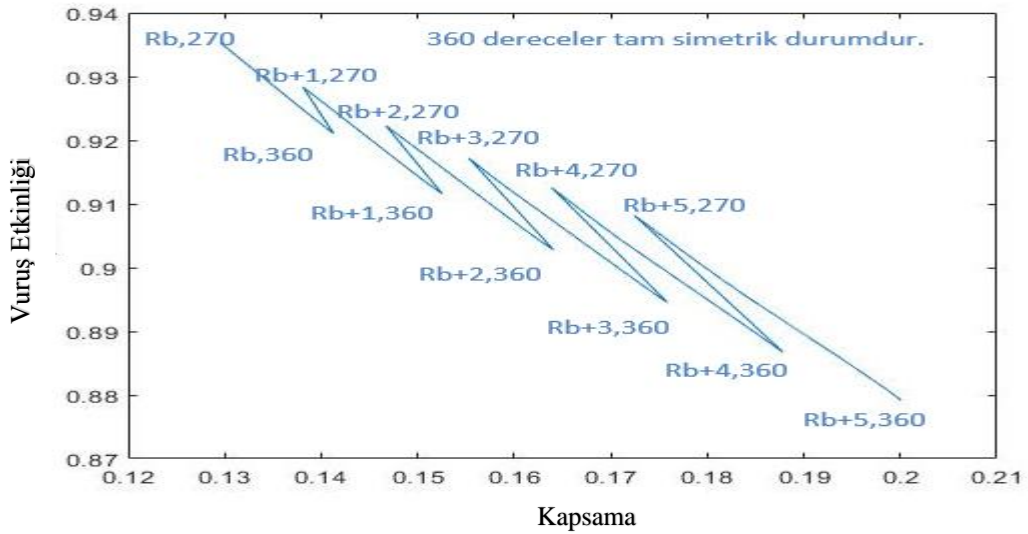
Çizelge 4'te görüldüğü gibi; A ve B sistemlerinin Merkez noktaya yaklaşması ile lojistik ağı mesafesinin azaldığı, C sistemlerinin merkezden uzaklaşması ile kapsama değerinin arttığı, B ve C sistemlerinin birbirine yaklaşması ile ortalama vuruş etkinliği değerinin arttığı görülmüştür.

Başlangıçta kısıt olarak verilen sistemlerin simetrik (yani 360 dereceyi eşit aralıklarla paylaşacak şekilde) yerleşimi kısıtının olmadığı durum incelenmiştir. Sistemlerin asimetrik yerleşiminde $R_a = 0$ ve $R_c = \text{olası en dış sınır}$ olmak üzere sabit tutulmuş, farklı R_b değerleri için B sistemlerinden 360 dereceye yerleştirilen sistemin açısı birer derece aralıklar ile 270 dereceye kadar değiştirilmiştir. Sonuçlar Şekil 16'da gösterilmiştir. R_b değeri bir km aralıklar ile arttırılmış ve R_b 'nin R_c 'ye en yakın olduğu durum ($R_b = 10$) ile tam simetrik (360 derecelerde) durumda vuruş etkinliğinin arttığı görülmüştür.



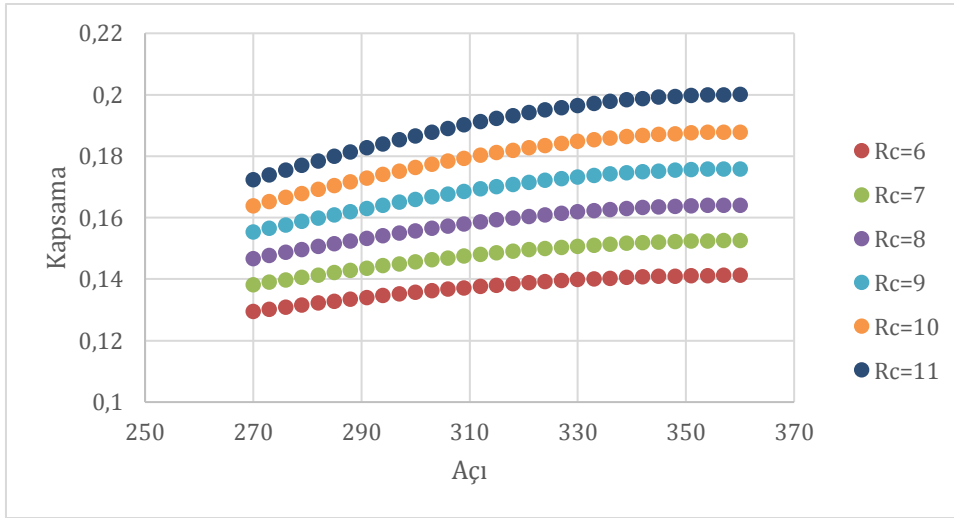
Şekil 16. Asimetrik yerleşim B sistemi değişimi

Sistemlerin asimetrik yerleşimine bir örnek de $R_a = 0$ ve $R_b = 6$ olarak sabit tutulurken, farklı R_c değerleri için C sistemlerinden bir tanesinin açısı değiştirilerek elde edilmiştir. Sonuçlar Şekil 17’de gösterilmiştir. R_c değeri bir km aralıklar ile R_b ’nin bulunduğu konumdan itibaren arttırılmış ve bir adet sistemin konumu birer derecelik aralıklar ile değiştirilmiştir. 360 derecelerde (tam simetrik durumda) maksimum kapsama elde edilmiştir. Ancak C sistemlerinin asimetrik yerleşimde (270 derecelerde) vuruş etkinliğinin arttığı görülmüştür. Kapsama aynı iken; kapsama alanları büyük olan sistemlerin kesişiminin artması vuruş etkinliğini arttırmaktadır.



Şekil 17. Asimetrik yerleşim C sistemi değişimi

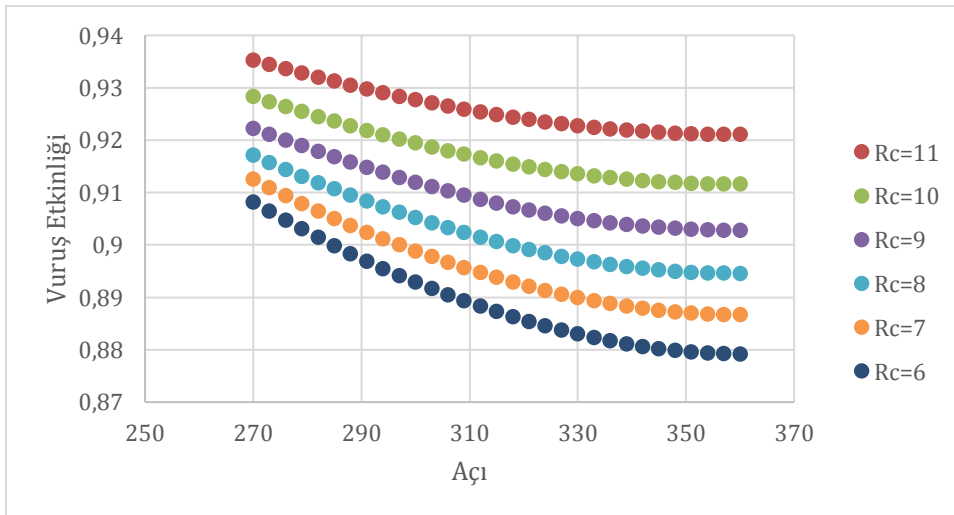
Tüm C sistemleri için konumları, yani R_c değeri, R_b değerinden itibaren olası en dış sınıra kadar arttırılmış ve C sistemlerinden 360 dereceye yerleştirilenin açısı, yanında bulunan sistem konumu olan 270 dereceye kadar değiştirildiğindeki sonuçlar Şekil 18’de gösterilmiştir.



Şekil 18. Açı-Kapsama ilişkisi

Şekil 18’e göre 360 derecelerde (tam simetrik durumda) maksimum kapsama olduğu görülmüştür. Buna göre en dış halkada bulunan sistemler simetrik olmak zorundadır. Aksi taktirde kapsama azalacaktır. Şekil 19’a göre ise döngüye sokulan sistem yanındaki sistem ile aynı yerde olduğu durumda vuruş etkinliği en yüksek değeri almıştır.

Sonuç olarak, çepeçevre savunma prensibi gereği simetrik yerleştirilen sistemler ile kapsama kriterinin arttığı, asimetrik duruma geçildiğinde ise sistemlerin daha çok kesişerek vuruş etkinliğinin arttığı görülmüştür.



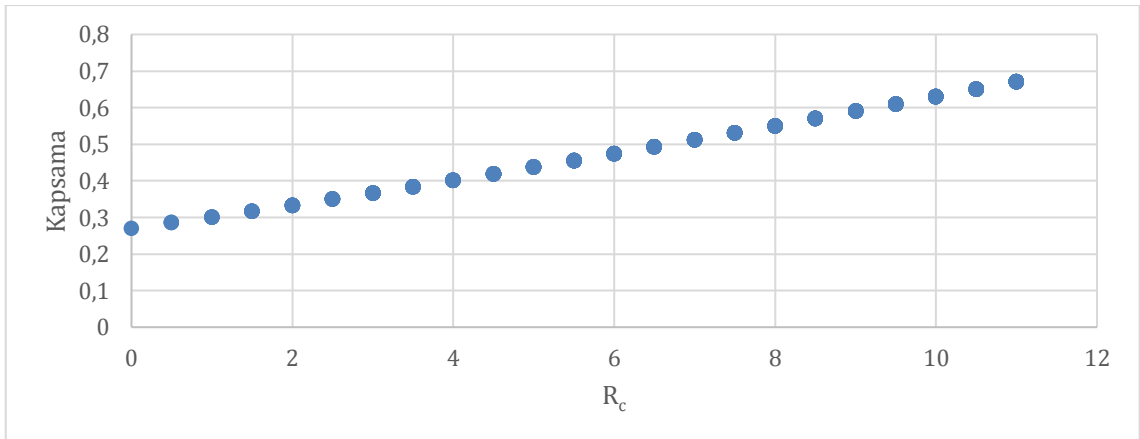
Şekil 19. Açı-Vuruş etkinliği ilişkisi

Çizelge 5’te belirtildiği üzere; enumerasyon ile A, B, C sistemlerinin konumlarını belirli aralıklarla Merkez noktadan uzaklaştırdığımızdaki sonuçlarda; A sistemlerinin vuruş etkinliği ve kapsamaya kayda değer etkisi olmaz iken, B sistemlerinin Merkez noktaya uzaklığının artış ya da azalışı vuruş etkinliğini arttırabilmekte ve kapsamaya etkisi olmamaktadır. C sistemlerinin Merkez noktaya uzaklıklarının azalışında vuruş etkinliği artarken, Merkez noktaya uzaklıklarının artışında kapsamanın arttığı görülmüştür.

Çizelge 5. Artış yönleri tablosu

	R_a	R_b	R_c
Vuruş Etkinliği ↑	○	↕	↓
Kapsama ↑	○	○	↑

Şekil 20’de görüldüğü üzere; C sistemlerinin Merkez noktadan uzaklığı ile kapsama arasında doğrusal bir ilişki görülmüştür.



Şekil 20. C sistemleri ile kapsama ilişkisi

$R_a = 0, R_b = 0$ değeri verilerek R_c ’nin istenen kapsamadaki değeri denklem (27) ile bulunur. R_c için limit kontrolü denklem (28) ile yapılır.

$$Kapsama = Kapsama(R_c = 0) + R_c * \frac{Kapsama(R_c = Max R_c) - Kapsama(R_c = 0)}{Max R_c} \quad (27)$$

$$R_c \geq Max R_c \rightarrow R_c = Max R_c \quad (28)$$

4.2. NSGA-II İle Çözüm

Problem için tüm çözümlerin listelenmesi çok uzun zaman aldığı için iyi bir çözüme daha hızlı ulaşabilmek için genetik algoritmadan (Deb vd., 2002) yararlanılmıştır. Genetik

algoritmalar evrimsel mekanizmaya dayalı iyileşme modeli olarak tanımlanabilir. Genetik kromozomların bir önceki nesile göre daha iyi bir sonuç vermesi temeline dayanır.

Problemin büyüklüğü ve tüm çözümlerin bulunmasının zorluğu nedeniyle, bu kısımda ilk olarak iki kriter; kapsama, vuruş etkinliği, gözetilmiştir. Bu iki kriterin seçilmesinin sebebi, lojistik ağı mesafesine göre bu kriterlerin daha önemli olmasıdır.

4.2.1. Yöntem

Her birey üç farklı sistemin merkezden uzaklık değerlerini (R_a, R_b, R_c) tutmaktadır. Bu değerlerin değişimine göre kriter değerleri hesaplanarak iyileşme sağlanmıştır. “N” popülasyon sayımızı ifade etmektedir.

Başlangıç: Sınırlamalara uyarak popülasyon (N) adedinde rasgele (R_a, R_b, R_c) oluşturulur. Önce kısıtları sağlayan limitler içinde rasgele R_a üretilir. R_a 'nın üst sınırı, A_m , ile $[0,1]$ aralığında rasgele üretilen sayı çarpılır. Aşağıdaki denklem (29) ile belirlenir.

$$R_a = A_m * Random() \quad (29)$$

Üretilen R_a ile R_b 'nin kısıtları sağlayan üst sınırı arasında rasgele bir değer üretilir. Aşağıdaki denklem (30) ile belirlenir.

$$R_b = R_a + \left[\min \left\{ R_a + A_m + B_m; \frac{B_m}{\sin\left(\frac{360}{2*n_b}\right)} \right\} - R_a \right] * Random() \quad (30)$$

Üretilen R_b ile R_c 'nin kısıtları sağlayan üst sınırı arasında rasgele bir değer üretilir. Aşağıdaki denklem (31) ile belirlenir.

$$R_c = R_b + \left[\min \left\{ R_b + B_m + C_m; \frac{C_m}{2*\sin\left(\frac{360}{2*n_c}\right)} \right\} - R_b \right] * Random() \quad (31)$$

Çaprazlama: Ebeveyn popülasyonu seçildikten sonra, kümedeki üyeler ikili eşleştirilir. Her ebeveynden iki çocuk üretecek şekilde çaprazlama yapılır. Çaprazlamada maskelemeden yararlanır.

Maskeleme: (100, 010, 001, 110, 101, 011, 111, 000)

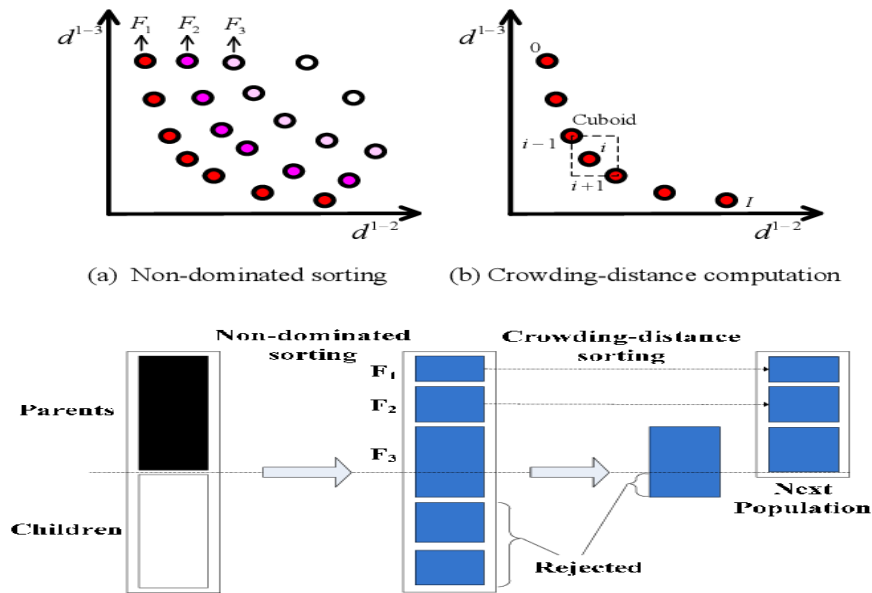
Örnek olarak (100) diziliminde ebeveynlerin sadece birinci kromozomun değiştirilmesiyle birer adet çocuk oluşturulur. Her bir dizilimin olma olasılığı eşit

varsayılmıştır. (111, 000) durumları değişiklik olmadığı ve çocukların birebir ebeveynin kopyası olduğu anlamına gelmektedir.

Mutasyon: Mutasyon işleminde enumerasyon ile elde ettiğimiz iyileşme yönlerinde her bir kromozom belirli olasılıklar ile artış ve azalış işlemine tabi tutulmuştur. R_a değeri 0,5 olasılıkla $-0,1$ ile $+0,1$ değiştirilmiştir. R_b değeri 0,5 olasılıkla $-0,3$ ile $+0,4$ değiştirilmiştir. R_c değeri 0,5 olasılıkla $-0,4$ ile $+0,4$ değiştirilmiştir.

Onarım: Yeni popülasyonun kısıtları sağlamayanları iyileşme yönlerinde onararak kısıtlar sağlanır hale getirilir. Kısıt kontrolünde sırasıyla A, B, C sistemlerinin kısıt kontrolü yapılır.

Sıralama ve Kalabalıklık Oranına Bakılarak Seçim: Çocuk popülasyonu ile ebeveyn popülasyonunun birleşimi ile oluşan popülasyonda ($2 * N$) domine edilmeyenler belirlenir. Burada iki kritere (maksimum kapsama, maksimum vuruş etkinliği) göre etkin sınırlar hesaplanır. Şekil 21’de gösterildiği gibi aynı etkin sınırdaki olanlar kalabalıklık oranına göre büyükten küçüğe sıralanır. Bu sıralama öncekinin sonrakini domine ettiğini gösterir. Başlangıç popülasyonu oluşturulana kadar kalabalıklık oranı yüksek olanlar dahil edilir. Domine edilmeyenlerin sayısı yeni oluşturulacak popülasyon sayısından fazla ise kalabalıklık oranı etkin sınırdakilerden büyükten küçüğe doğru istenilen popülasyon sayısı kadar dahil edilir.



Şekil 21. Sıralama ve kalabalıklık oranına göre seçim (Deb vd., 2002)

İterasyon Sonu Uygunluk Kontrolü: Belirli iterasyon sayısına ulaşıldığında algoritma durdurulur.

Elde edilen çözümlerin fazlalığı nedeniyle karar vericiye tercihlerini gözeten daha küçük bir küme çözüm gösterilebilir. Örneğin, vuruş etkinliği ve kapsama değerleri belli bir değerin üstünde ve lojistik ağı küçük olan çözüm en iyi çözüm olarak sunulabilir.

Algoritma basamakları kısaca şu şekilde özetlenebilir;

NSGA-II Yöntemi

- 1: N adet başlangıç popülasyonu üret
- 2: Çözümleri sınırlara ayır
- 3: Seçim için turnuva yap
- 4: Çocuk popülasyon üret
- 5: Çaprazlama ve mutasyon işlemini yap
- 6: Çocuk ve asıl popülasyonda bulunan tüm çözümler için:
 - 7: Çözümleri sınırlara ayır
 - 8: Kalabalıklık oranını hesapla
 - 9: N sayıda popülasyon oluştur
- 10: İterasyon sonu uygunluk kontrolü yap, gerekirse tekrar 3. basamağa dön

Öncelikle iki kriterli olarak çözümler alınmıştır. Çözümlerin vuruş etkinliği sonuçlarının yüksek noktalara yakınsayamadığı görülünce, o kısımları da tarayacak ve üç kriteri birden gözetecek r-NSGA-II yöntemine geçilmiştir.

4.3. r-NSGA-II Referans Tabanlı Yöntem İle Çözüm

Çözüm sayısının fazla olması sebebiyle, probleme referans bazlı genetik algoritma (Deb ve Sundar, 2006) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin NSGA-II yönteminden farkı, aynı etkin sınırdaki olanların kalabalıklık oranı yerine referans noktasına olan Öklid mesafesine göre sıralanmalarıdır. Referans noktası parametre olarak belirlenir. Seçim yapılırken öncelikle en iyi sınırdan çözümler seçilir. Popülasyon sayısına ulaşana kadar diğer en iyi sınırlar seçilir. Eğer etkin sınırdakiler popülasyon sayısından fazla ise belirlenen referans noktasına olan uzaklığı yakın olanlar popülasyon sayısı tamamlanıncaya kadar seçilir. Aşağıda referans noktasına olan uzaklık formülü denklem (32) ile belirtilmiştir (Deb ve Sundar, 2006). Burada, i kriterleri göstermektedir. Kriter

ağırlıkları (w_i) eşit varsayılmıştır. Etkin sınırdaki i kriterinin maksimum (f_i^{max}) ve minimum değerleri (f_i^{min}) belirlenmiştir. Üç kriter için hesaplama yapıldığı için $M = 3$ 'tür. $f_i(x)$, x çözümünün i . kriterdeki değerini, z_i ise referans noktasının i . kriterdeki değerini temsil etmektedir.

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^M w_i \left(\frac{f_i(x) - z_i}{f_i^{max} - f_i^{min}} \right)^2} \quad (32)$$

4.3.1. Yöntem

Üst kısımda anlatılan NSGA-II ile benzer işlemler uygulanır.

Başlangıç: Sınırlamalara uyarak Rasgele N adet (R_a, R_b, R_c) oluşturulur.

Çaprazlama: Ebeveyn popülasyonu seçildikten sonra, kümedeki üyeler ikili eşleştirilir. Her ebeveynden iki çocuk üretecek şekilde çaprazlama yapılır. Çaprazlamada maskelemeden yararlanılır.

Maskeleme: (100, 010, 001, 110, 101, 011, 111, 000)

Mutasyon: Mutasyon işleminde enumerasyon ile elde ettiğimiz iyileşme yönlerinde her bir kromozom belirli olasılıklar ile artış ve azalış işlemine tabi tutulmuştur. R_a değeri 0,5 olasılıkla $-0,1$ ile $+0,1$ değiştirilmiştir. R_b değeri 0,5 olasılıkla $-0,3$ ile $+0,4$ değiştirilmiştir. R_c değeri 0,5 olasılıkla $-0,4$ ile $+0,4$ değiştirilmiştir.

Onarım: Yeni popülasyonun kısıtları sağlamayanları iyileşme yönlerinde onararak kısıtlar sağlanır hale getirilir. Kısıt kontrolünde sırasıyla A, B, C sistemlerinin kısıt kontrolü yapılır.

Sıralama ve Referans Noktasına Olan Uzaklığına Bakılarak Seçim: Toplam oluşan popülasyonda ($2 * N$) domine edilmeyenler belirlenir. Burada üç kritere (maksimum kapsama, maksimum vuruş etkinliği, minimum mesafeli lojistik mesafesi) göre etkin sınırlar belirlenir. Aynı etkin sınırdaki sonuçlardan popülasyon sayısı N olana kadar referans noktasına olan Öklid mesafesi düşük olanlar dahil edilir.

İterasyon Sonu Uygunluk Kontrolü: Belirli iterasyon sayısına ulaşıldığında algoritma durdurulur.

Algoritma basamakları kısaca şu şekilde özetlenebilir:

r-NSGA-II Yöntemi

- 1: N adet başlangıç popülasyonu üret
- 2: Çözümleri sınırlara ayır
- 3: Seçim için turnuva yap
- 4: Çocuk popülasyon üret
- 5: Çaprazlama ve mutasyon işlemini yap
- 6: Çocuk ve asıl popülasyonda bulunan tüm çözümler için:
 - 7: Çözümleri sınırlara ayır
 - 8: Referans noktalarına olan Öklid mesafeleri hesapla
 - 9: N sayıda popülasyon oluştur
- 10: İterasyon sonu uygunluk kontrolü yap, gerekirse tekrar 3. basamağa dön

Çözüm süreleri r-NSGA-II için de uzun olunca üç karar değişkeninin değerini iyi bir şekilde belirleyecek bir yöntem düşünülerek sezgisel yöntem oluşturulmuştur.

4.4. Sezgisel Yöntem

Kriterlerin karar değişkenleri ile ilişkileri değerlendirilerek, sistemlerin konumlarına hızlı bir şekilde karar veren bir sezgisel yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen sezgisel yöntem her kapsama değeri için vuruş etkinliği ile lojistik ağı arasında etkin sınırı yakınsamaktadır. Bu algoritmanın genel hatları aşağıdaki gibidir.

Sezgisel Yöntem Basamakları

Basamak 1. Bir kapsama değeri belirle. Belirlenen kapsama değerine ulaşmak için C sisteminin yerleşmesi gereken merkezden uzaklığı, R_c bul.

Basamak 2. Belirlenen R_c değeri için B ve A sistemlerinin yerleşebileceği minimum ve maksimum aralığı belirle.

Basamak 3. Lojistik ağı mesafesinin alabileceği değer aralığını bul.

Basamak 4. Lojistik ağı mesafesi değer aralığı içinden bir değer seç. Bu değere denk gelen maksimum vuruş etkinliğini sağlayan A ve B sistemlerinin yerleşmesi gereken konumları bul. Bu basamağı olası tüm lojistik ağı mesafe değerleri için yinele.

Üç kriterde etkin çözümleri bulmak için her basamak için geliştirilen adımlar aşağıda detaylandırılmıştır.

Basamak 1. Kapsama değeri belirlenir ve Denklem (27) ile belirtilen doğrusal denklem ile bu kapsamaya denk gelen R_c değeri bulunur.

Basamak 2. Her R_c değeri için R_b ve R_a değer aralıkları bulunur.

$$R_b \in [Min R_b, Max R_b] \quad (33)$$

$$\forall R_b \text{ için } R_a \in [Min R_a, Max R_a] \quad (34)$$

$$Max R_b = Min \left\{ \frac{B_m}{\sin \frac{360}{2 * n_b}}; 2 * A_m + B_m; R_c \right\} \quad (35)$$

$$Min R_b = Max \{0; R_c - C_m - B_m\} \quad (36)$$

R_b bilinirken, R_a değer aralıkları aşağıdaki gibi bulunur.

$$Max R_a = Min \{A_m; R_b\} \quad (37)$$

$$Min R_a = Max \{0; R_b - B_m - A_m\} \quad (38)$$

Basamak 3. Lojistik ağı mesafesi için değer aralığı bulunur.

$$Minimum \text{ Lojistik ağı} = n_c * R_c + n_b * Min R_b + n_a * Min R_a \quad (39)$$

Sadece R_c cinsinden, minimum lojistik ağı Denklem (40) ile bulunur.

$$Minimum \text{ Lojistik ağı} = n_c * R_c + n_b * Max \{0; R_c - C_m - B_m\} + n_a * Max \{0; Max \{0; R_c - C_m - B_m\} - B_m - A_m\} \quad (40)$$

$$Maksimum \text{ Lojistik ağı} = n_c * R_c + n_b * Max R_b + n_a * Max R_a \quad (41)$$

Sadece R_c cinsinden, maksimum lojistik ağı Denklem (42) ile bulunur.

$$Maksimum \text{ Lojistik ağı} = n_c * R_c + n_b * Min \left\{ \frac{B_m}{\sin \frac{360}{2 * n_b}}; 2 * A_m + B_m; R_c \right\} + n_a * Min \left\{ A_m; Min \left\{ \frac{B_m}{\sin \frac{360}{2 * n_b}}; 2 * A_m + B_m; R_c \right\} \right\} \quad (42)$$

Basamak 4. Limitler arasında belirlenen bir lojistik ağı değeri (L) için A ve B sistemlerinin yerleşmesi gereken konumlar bulunur. Bunun için öncelikle bu lojistik ağına ulaşacak R_b değer aralığı bulunur. R_b değeri kendi minimum ve maksimum değerleri arasında belli aralıklarla değiştirilir ve her R_b değeri için, belirlenen lojistik ağı değerine ulaşacak R_a değeri hesaplanır. Bulunan (R_a, R_b, R_c) değerleri için vuruş etkinliği hesaplanır. Maksimum vuruş etkinliğini veren (R_a, R_b) değer çifti bulunur.

L değeri bilinirken, R_b ve R_a için aşağıdaki denklem sağlanmalıdır.

$$L - n_c * R_c = n_b * R_b + n_a * R_a = K \quad (43)$$

Eğer $K = 0$ ise, $R_a = R_b = 0$ denir. Eğer $K > 0$ ise, aşağıdaki denklemlerle R_b için limit bulunur.

Denklem (43), eşitsizlik (13), ve $R_a \geq 0$ eşitsizliği kullanılarak ve R_a yerine $\frac{K - n_b * R_b}{n_a}$ konularak R_b için üst limit belirlenir.

$$R_b \leq \text{Min} \left\{ R_c, \frac{K + n_a * A_m + n_a * B_m}{n_a + n_b}, \frac{K}{n_b} \right\} \quad (44)$$

Denklem (43) ve eşitsizlik (9) kullanılarak R_b için alt limit belirlenir.

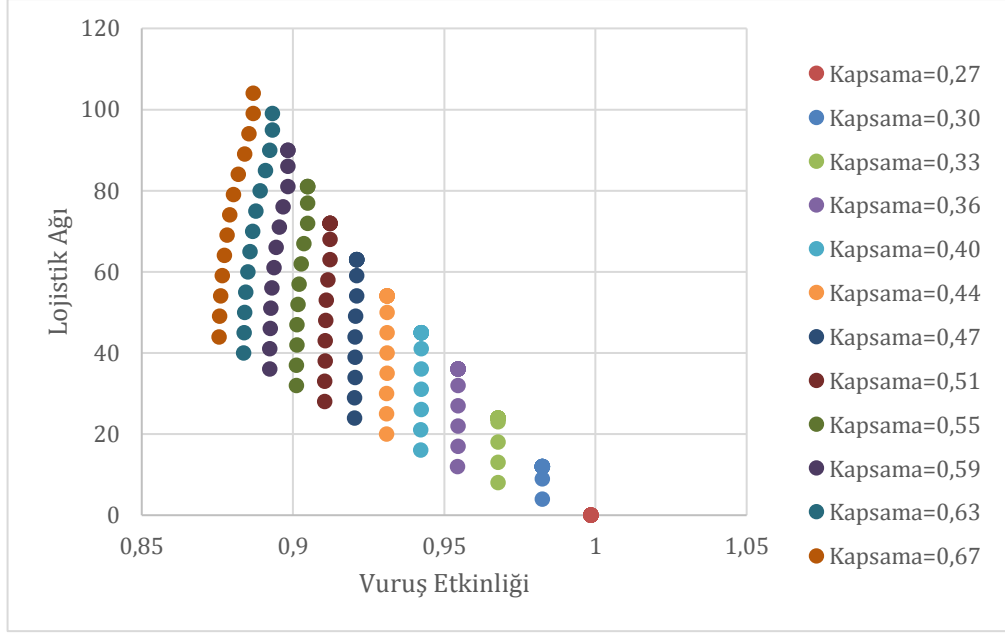
$$R_b \geq \frac{K}{n_a + n_b} \quad (45)$$

R_b bilinirken, R_a aşağıdaki gibi bulunur.

$$R_a = \frac{K - n_b * R_b}{n_a} \quad (46)$$

Enümerasyon yapılan problem için sezgisel yöntem uygulanmıştır. R_c değerleri 0 ve Max R_c arasında birer km aralıkla değiştirilmiş ve her R_c 'ye denk gelen kapsama değeri için lojistik ağı ve vuruş etkinliği kriterleri arasındaki etkin sınır üzerinde çözüm bulunmuştur. Lojistik ağı mesafe değerleri ise, kendi minimum ve maksimum değerleri arasında beşer km aralıklarla değiştirilmiştir. Bulunan etkin çözümler Şekil 22'de gösterilmiştir.

Buradaki çözümlerde, 4. basamakta R_b , her zaman maksimum değerine eşit bulunmuştur. Bunun sebebi, vuruş etkinliği en yüksek olan iki sistemin (B ve C sistemleri) çakıştığı alanların artırılması ile toplam vuruş etkinliğini artırmaktır.

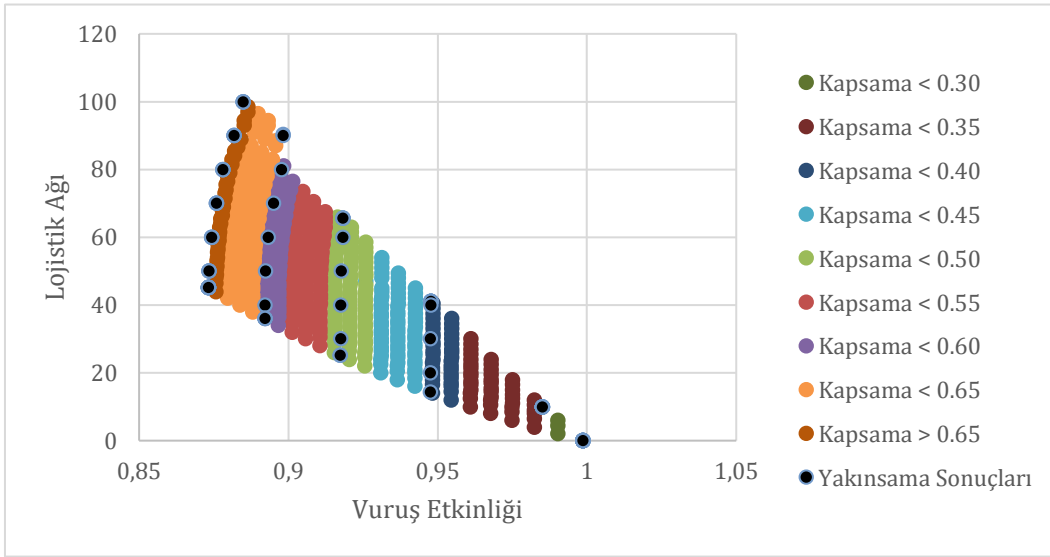
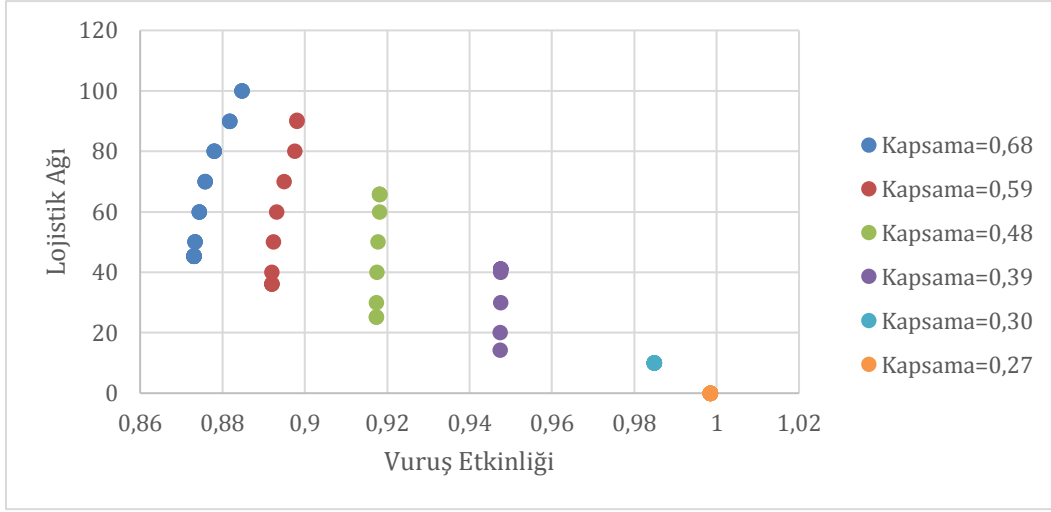


Şekil 22. Farklı R_c değerleri için sezgisel yöntem ile bulunan etkin çözümler

Sonuç olarak geliştirilen sezgisel yöntem ile problem çözümüne çok hızlı bir şekilde ulaşılabilmektedir. Öncelikle kapsama değeri belirlenir. Bu kapsamaya ulaşmak için C sisteminin yerleşmesi gereken merkezden uzaklık bulunur. Lojistik ağı mesafesi sınırı belirlenir. Lojistik ağı mesafesine göre maksimum vuruş oranını sağlayan A ve B sistemlerinin yerleşmesi gereken konumlar bulunur.

Yukarıda verilen sezgisel yöntem, kapsama ve lojistik ağı mesafesi kriterlerinin değerleri belli iken vuruş etkinliğini maksimum yapan çözümü bulmak için de kullanılabilir. Bunun için, Basamak 4'te sadece belirlenen değer kullanılarak hesaplamalar yapılır. Eğer belirlenen Lojistik Ağı değeri Basamak 3'te bulunan limitlerin dışında ise, maksimum değerine eşitlenir.

Şekil 23'te kapsama değerlerinin $[0,27 - 0,68]$ aralığında ve lojistik ağı değerlerinin $[0 - 100]$ aralığında onar onar artırılarak (100 adet için) sezgisel yöntem ile bulunan etkin çözümler gösterilmiştir. Lojistik ağı ile kapsama uyumlu olmadığında lojistik ağı değeri kapsama ile uyumlu olacak şekilde maksimum değerine eşitlenmiştir.



Şekil 23. Sezgisel yöntem sonuçları

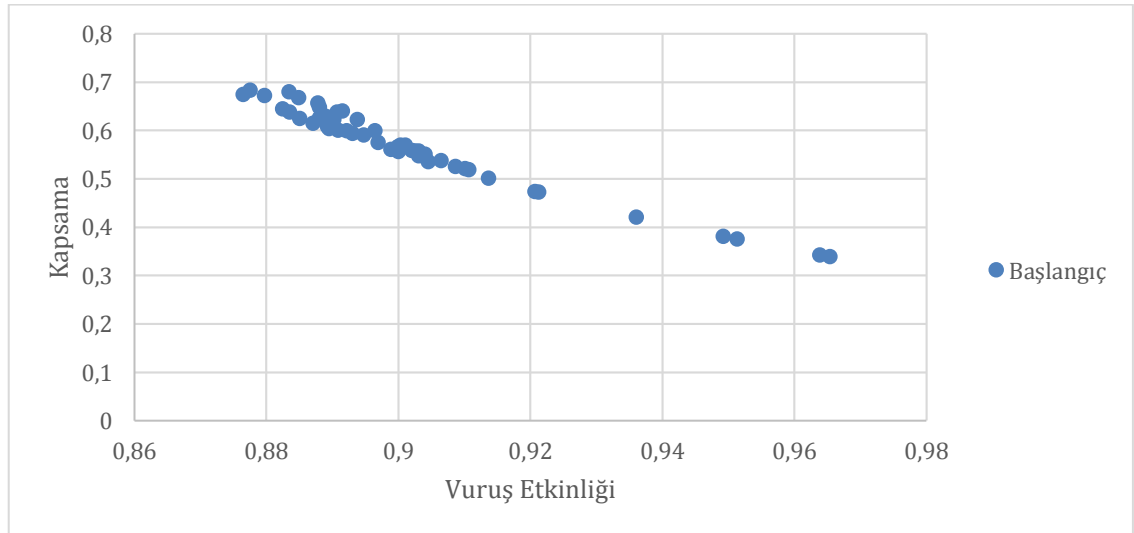
Sezgisel yöntem sonuçlarının, enumerasyon ile elde edilen sonuçlar ile görsel olarak uyumlu olduğu Şekil 23'te görülmüştür. Sezgisel yöntem çözümlerinin enumerasyon çözümleri tarafından domine edilmediği, fakat bazı enumerasyon sonuçlarının sezgisel yöntem sonuçları tarafından domine edildiği görülmüştür. Bunun sebebi, enumerasyon yapılırken olası tüm yerleşim alternatiflerinin denenememesidir.

5. SAYISAL SONUÇLAR

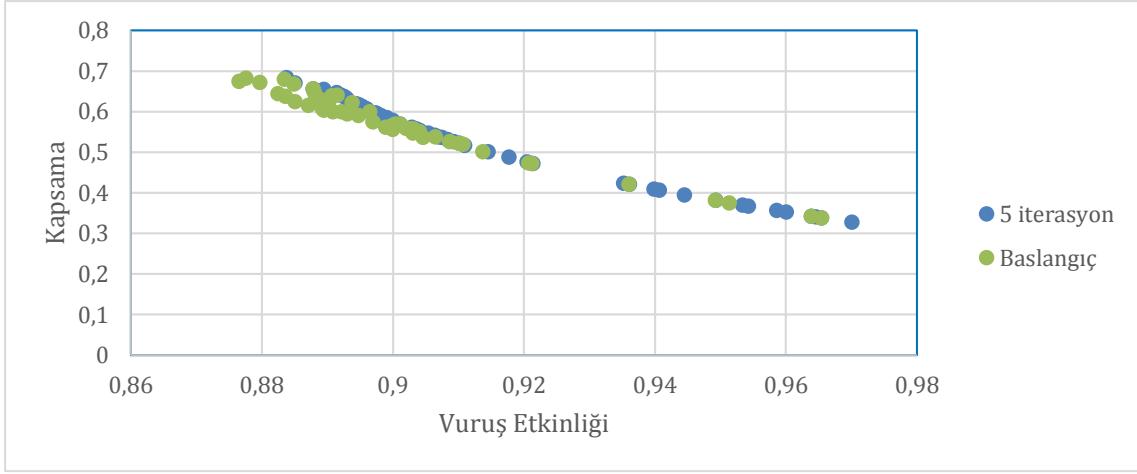
Bu kısımda, ilk olarak iki kriterli NSGA-II sonuçları verilecektir. İkinci kısımda referans noktası bazlı r-NSGA-II sonuçları, sezgisel yöntem kullanılarak değerlendirilecektir.

5.1. NSGA-II Sonuçları

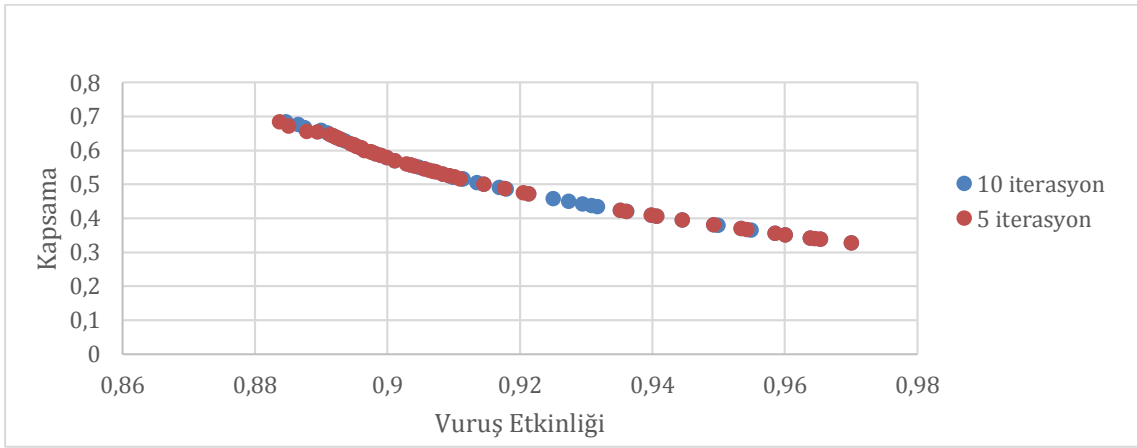
Bu kısımda Çizelge 3'te detayları verilen problem iki kriter gözetilerek çözülmüştür. Popülasyon boyutu 10, 20, 30, 40, 50 için denemeler yapılmıştır. Popülasyon boyutu arttıkça daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Popülasyon sayısı arttıkça çözüm süresinin çok uzaması nedeniyle ve etkin sınır ile daha iyi karşılaştırma yapabilmek için popülasyon boyutu 50 olarak belirlenmiştir. Algoritma, 20 jenerasyon sonunda durdurulmuştur. Maskeleme için tüm olası durumlar; (100,010,001,110,101,011,111,000) eşit olasılıkla değiştirilmiştir. Her bir durumun oluşma olasılığı 0,125 olarak belirlenmiştir. Çaprazlama olasılığı 0,75'tir. Her bir kromozom farklı şekilde mutasyon işlemine tabi tutulmuştur. R_a 0,5 olasılıkla $-0,1$ ile $+0,1$ km ötelenmiş, R_b 0,5 olasılıkla $-0,3$ ile $+0,4$ km ötelenmiş, ve R_c 0,5 olasılıkla $-0,4$ ile $+0,4$ km ötelenmiştir. Bir çözüme $1 - (0,5 * 0,5 * 0,5) = 0,875$ olasılıkla mutasyon işlemi uygulanmıştır. 50 adet popülasyon örneğinde Şekil 24'de gösterildiği gibi iterasyon sayısı arttıkça sonuçlarda iyileşme görülmüştür. Enumerasyon ile belirli aralıklar ile A, B, C sistemlerinin konuşlandırılmasında enumerasyon ile elde edilen etkin sınıra yaklaştığı görülmüştür.



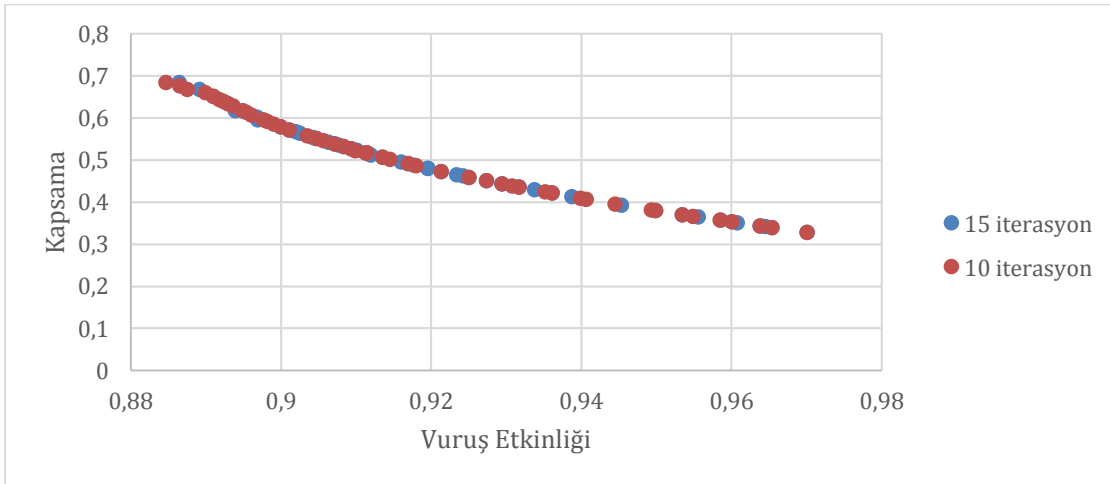
(a) NSGA-II başlangıç popülasyonu



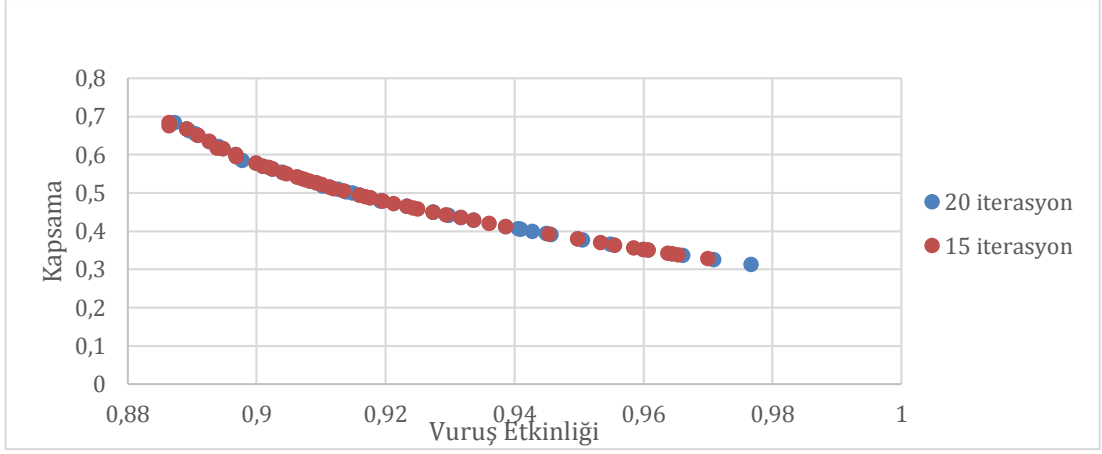
(b) NSGA-II beş iterasyon sonucu



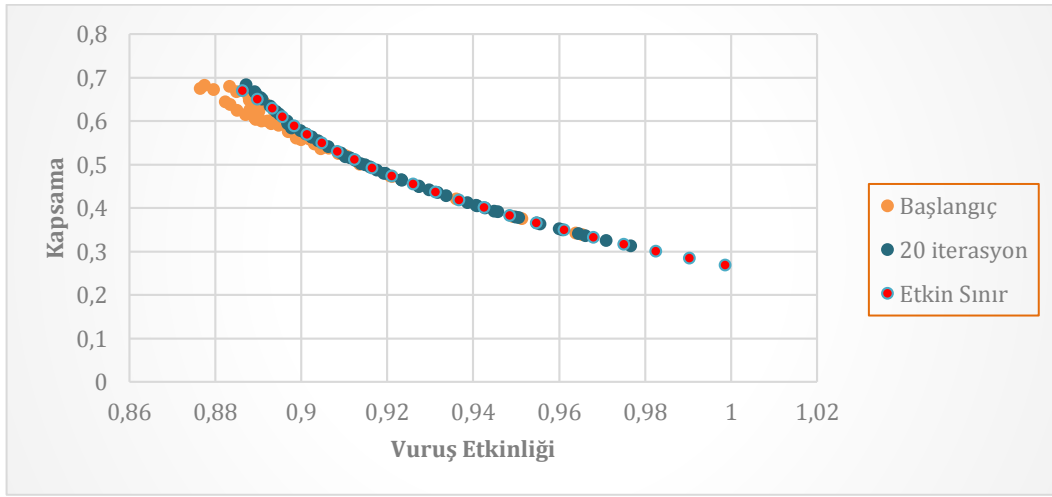
(c) NSGA-II on iterasyon sonucu



(ç) NSGA-II onbeş iterasyon sonucu



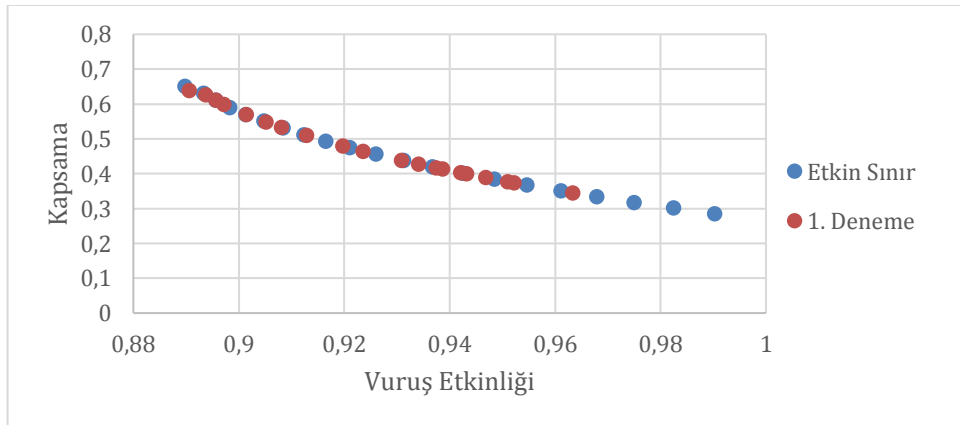
(d) NSGA-II yirmi iterasyon sonucu



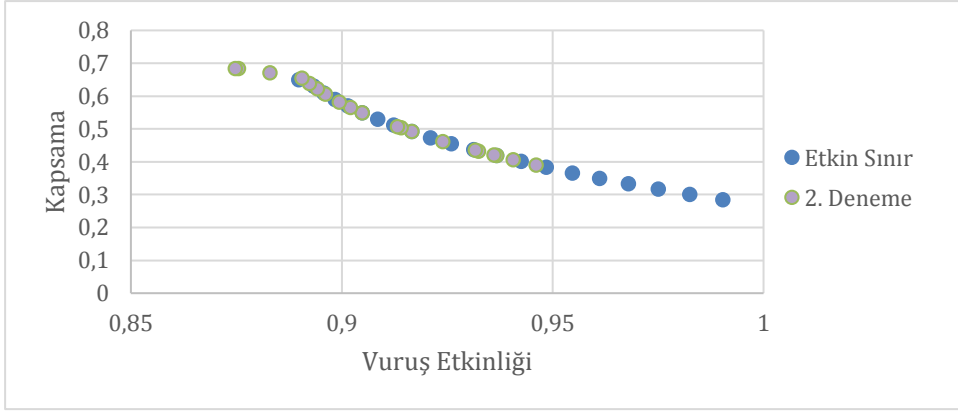
Şekil 24. NSGA-II sonuçlar

Algoritma, beş farklı başlangıç tohumu ile çalıştırılmıştır. Sonuçlar Şekil 25'te gösterilmiştir.

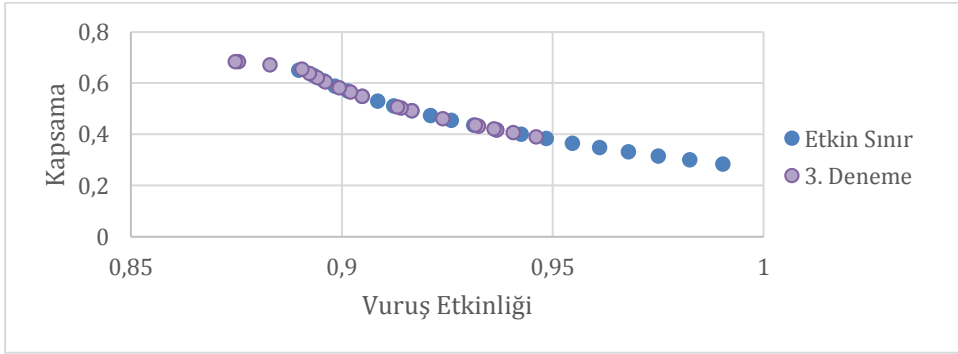
Enümerasyon ile elde edilen sonuçlara oldukça yakın sonuçlar bulunmuştur.



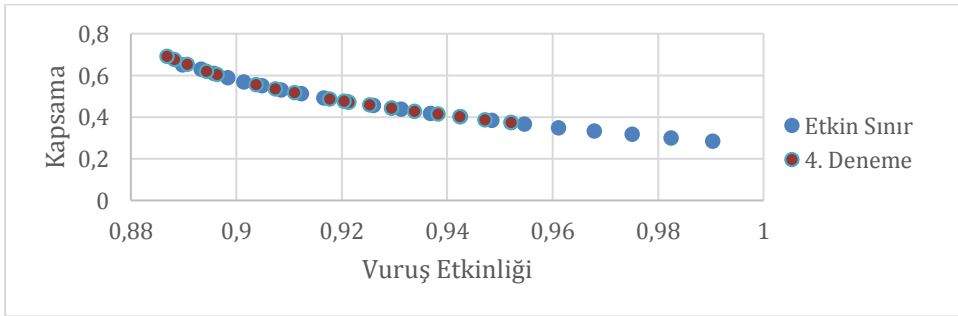
(a) 1. Deneme



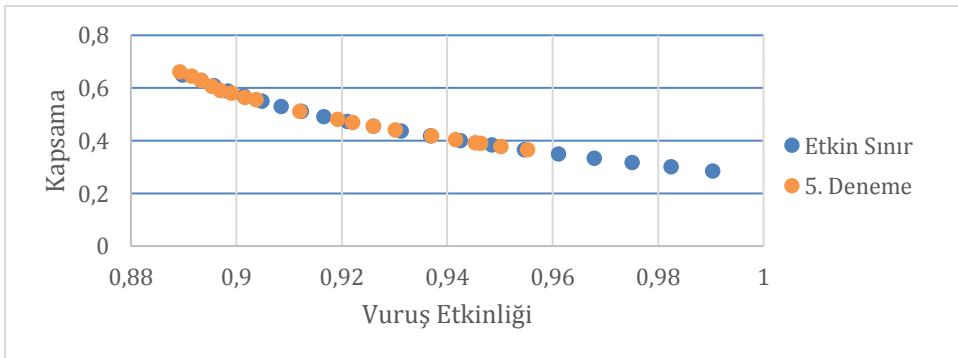
(b) 2. Deneme



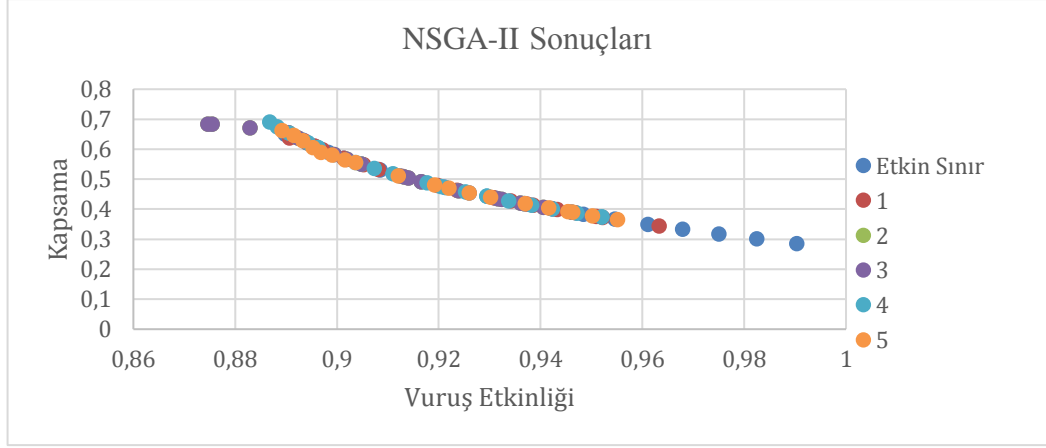
(c) 3. Deneme



(ç) 4. Deneme



(d) 5. Deneme



Şekil 25. NSGA-II beş adet sonuç

Hiperhacim Göstergesi: NSGA-II ile elde edilen çözümler ile etkin sınır sonuçlarını karşılaştırmak için kullanılır. Zitzler ve Thiele (1999) tarafından önerilen hiperhacim (HV), bir referans noktasına kadar bir cephenin çözümlerinin hakim olduğu alanın hacmini göstermektedir. HV değerleri [0,1] arasındadır. Kriter değerleri normalize edilerek bulunmaktadır. Van Veldhuizen (1999), yaklaşık cephenin HV'sinin Pareto optimal cepheye oranı olan hiperhacim oranını (HVR) önermektedir. Yaklaşık sonuçların performansını görebilmek için HVR kullanılmaktadır. Daha büyük HV ve HVR değerleri yöntemin daha iyi olduğu anlamına gelmektedir. Yaklaşık çözümler kesin çözümlere yaklaştıkça HV göstergesi 1 değerine yakınsar ki bu yaklaşık ve kesin çözümlerin birbirine eşit olduğu ideal durumdur. Çizelge 6'da beş farklı çalıştırmanın HV değerleri verilmiştir.

Çizelge 6. Hiperhacim göstergesi sonuçları

	Hiperhacim Göstergesi
Minimum	0,8994962
Maksimum	0,9500652
Ortalama	0,9281750

Çizelge 7'de NSGA-II ile bulunan iyi bir sonuçtan daha iyi bir sonuç elde edilebilmesinin mümkün olup olmadığını gözlemlemek için her sistemin merkezden uzaklığı çok küçük oranda azaltılıp artırılmıştır. Yerleşimi ($R_a = 0,7651, R_b = 7,6286, R_c = 8,2924$) ve kriter değerleri (0,9020, 0,5613, 73,681) olan bir sistem kullanılmıştır. Örnek olarak; (1-2), (1,4), (1,3) diziliminde bir adet A sisteminin konumu azaltılmış, iki adet A

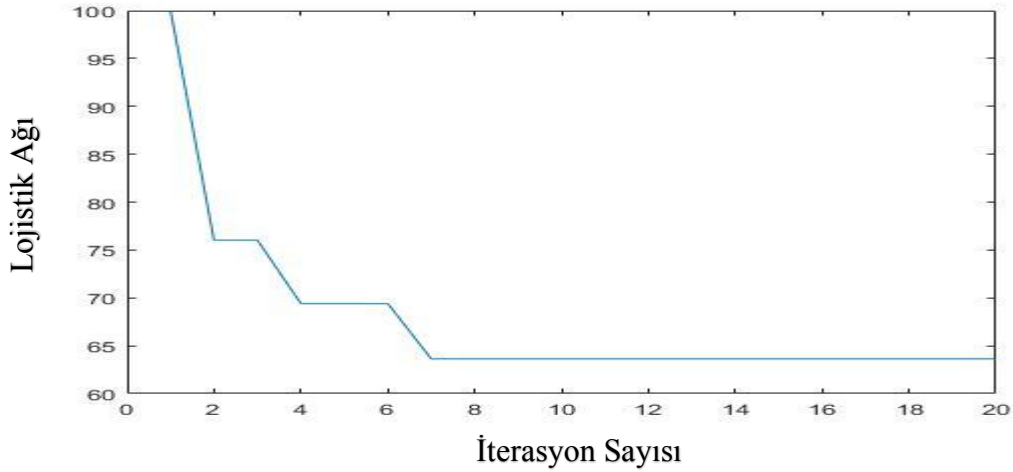
sisteminin konumu arttırılmış, bir adet B sisteminin konumu azaltılmış, dört adet B sisteminin konumu arttırılmış, bir adet C sisteminin konumu azaltılmış, üç adet C sisteminin konumu arttırılmıştır. Tüm kombinasyonlar denenmiştir. Üç değer aynı anda arttırılıp azaltılmasında enumerasyon gözlemlerinde üç kriterde domine eden bir sonuç bulunamadığı için tekrar deneme yapılmamıştır.

Çizelge 7. İyi bir sonuçtan sonra tüm olası durumlar için değişim tablosu

(Azaltılacak, arttırılacak miktar)	Vuruş Etkinliği	Kapsama	Lojistik ağı	İlk iki kriterde iyileşme
Çözüm: (0,7651; 7,6286; 8,2924)	0,9020	0,5613	73,681	
(1-2), (1-4), (1-3)	0,8984	0,5795	76,5	x
(1-2), (1-4), (2-2)	0,9004	0,5697	75,5	x
(1-2), (1-4), (3-1)	0,9024	0,5598	74,5	x
(1-2), (2-3), (1-3)	0,8982	0,5795	75,5	x
(1-2), (2-3), (2-2)	0,9002	0,5697	74,5	x
(1-2), (2-3), (3-1)	0,9022	0,5598	73,5	x
(1-2), (3-2), (1-3)	0,8979	0,5795	74,5	x
(1-2), (3-2), (2-2)	0,8999	0,5697	73,5	x
(1-2), (3-2), (3-1)	0,9019	0,5598	72,5	x
(1-2), (4-1), (1-3)	0,8977	0,5795	73,5	x
(1-2), (4-1), (2-2)	0,8997	0,5697	72,5	x
(1-2), (4-1), (3-1)	0,9017	0,5598	71,5	x
(2-1), (1-4), (1-3)	0,8984	0,5795	76	x
(2-1), (1-4), (2-2)	0,9004	0,5697	75	x
(2-1), (1-4), (3-1)	0,9024	0,5598	74	x
(2-1), (2-3), (1-3)	0,8982	0,5795	75	x
(2-1), (2-3), (2-2)	0,9002	0,5697	74	x
(2-1), (2-3), (3-1)	0,9022	0,5598	73	x
(2-1), (3-2), (1-3)	0,8979	0,5795	74	x
(2-1), (3-2), (2-2)	0,8999	0,5697	73	x
(2-1), (3-2), (3-1)	0,9019	0,5598	72	x
(2-1), (4-1), (1-3)	0,8977	0,5795	73	x
(2-1), (4-1), (2-2)	0,8997	0,5697	72	x
(2-1), (4-1), (3-1)	0,9017	0,5598	71	x

Vuruş etkinliği ve kapsamayı aynı anda iyileştiren bir çözüm bulunmamıştır. Yeni çözümlerde, lojistik ağı mesafesi daha düşük olan çözümler bulunmuştur. Algoritmanın önereceği çözümün, kapsama ve vuruş etkinliğinin hedef değerleri aştığı

çözümlerden lojistik ağı mesafesinin en küçük olduğu çözüm olabileceği algoritma anlatım kısmında belirtilmiştir. Şekil 26’da her iterasyonda, belirli bir kapsama (0,55) ve vuruş etkinliği (0,90) üzerindeki çözümler arasından lojistik ağı mesafesi minimum olan çözümün lojistik ağı mesafesi değeri verilmiştir. İhtiyaca göre bu değerler değiştirilebilmektedir. En küçük lojistik ağı mesafeli çözüme yedinci iterasyonda ulaşıldığı gösterilmiştir. Bu şekilde, beş farklı çalıştırma sonucu önerilen çözümler Çizelge 8’de gösterilmiştir. Her çalıştırmada yaklaşık 85 dakikada çözümlere ulaşılmıştır.



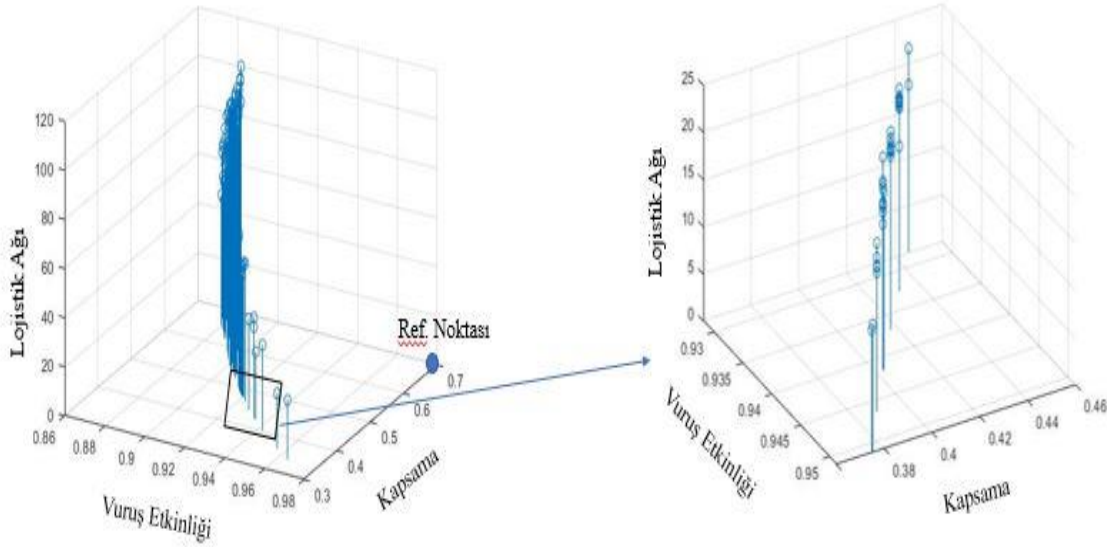
Şekil 26. Lojistik ağı-iterasyon grafiği

Çizelge 8. NSGA-II Beş Çalıştırma için Önerilen Çözümler

	Çalıştırma				
	1	2	3	4	5
R_a	2,3263	1,8481	0,5580	1,2340	0,2657
R_b	7,3893	7,1079	1,9254	6,9646	6,0391
R_c	8,0939	8,2401	4,6219	8,1140	8,1601
Vuruş Etkinliği	0,9034	0,9018	0,9001	0,9027	0,9015
Kapsama	0,5535	0,5592	0,5580	0,5543	0,5561
Lojistik Ağı	76,3011	74,0449	61,7171	70,9809	63,6330

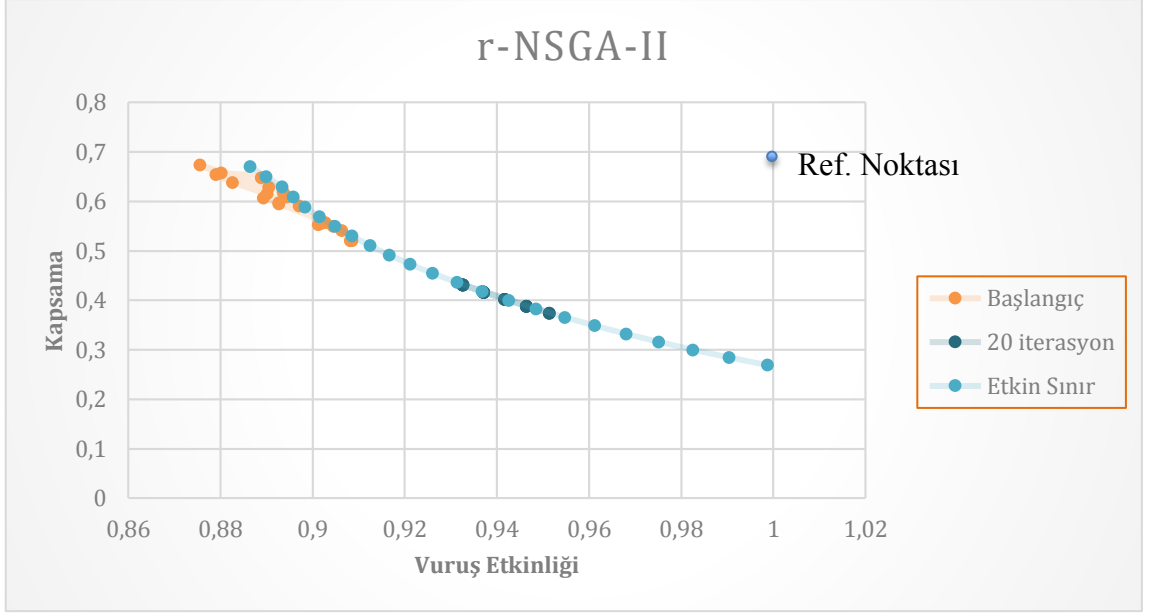
5.2. r-NSGA-II Sonuçları

Çözüm yöntemi, detayları Çizelge 3’te verilen problem üzerinde denenmiştir. Çözüm süresi açısından popülasyon boyutu 20 olarak belirlenmiştir. Yaklaşık 50 dakikada çözümlere ulaşılmıştır. Algoritma, iyileşme hızının yavaşladığı 20 jenerasyon sonunda durdurulmuştur. Maskeleme için tüm olası durumlar; (100,010,001,110,101,011,111,000) eşit olasılıkla değiştirilmiştir. Her bir durumun oluşma olasılığı 0,125 olarak belirlenmiştir. Çaprazlama olasılığı 0,75’tir. Her bir kromozom farklı şekilde mutasyon işlemine tabi tutulmuştur. R_a 0,5 olasılıkla $-0,1$ ile $+0,1$ km ötelenmiş, R_b 0,5 olasılıkla $-0,3$ ile $+0,4$ km ötelenmiş, ve R_c 0,5 olasılıkla $-0,4$ ile $+0,4$ km ötelenmiştir. Bir çözüme $1 - (0,5 * 0,5 * 0,5) = 0,875$ olasılıkla mutasyon işlemi uygulanmıştır. Karar vericinin belirlediği referans noktası için algoritmanın referans noktasına yakınlığı Şekil 27’de gösterilmiştir. Referans noktası olarak $kapsama = 0,68$, $vuruş\ etkinliği = 1$, $lojistik\ ağı = 0$ olarak belirlenen sonuç Şekil 27 (a)’da gösterilmiştir. Kapsama ve vuruş etkinliği değişimi Şekil 27 (b)’de gösterilmiştir. Lojistik ağı ve vuruş etkinliği değişimi Şekil 27 (c)’de gösterilmiştir.

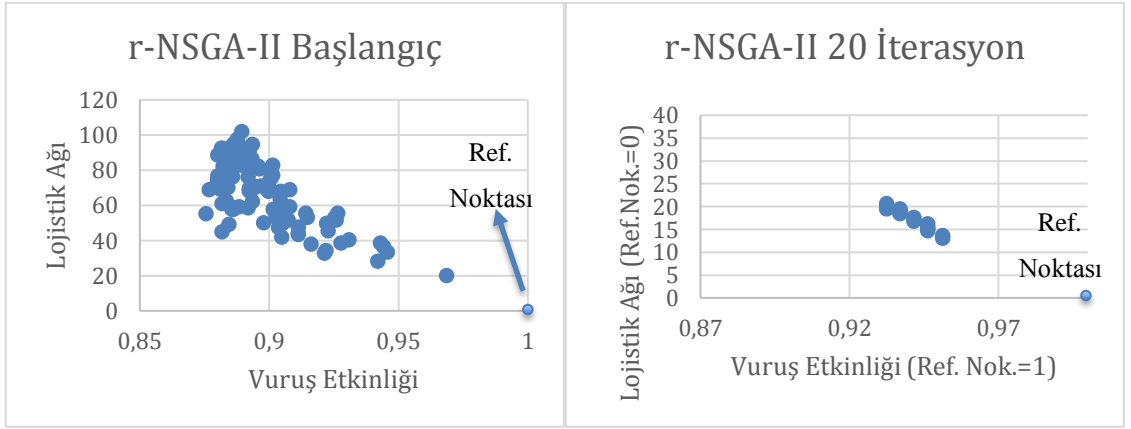


Referans Noktası: (Kapsama=0,68, Vuruş Etkinliği=1, Lojistik Ağı=0)

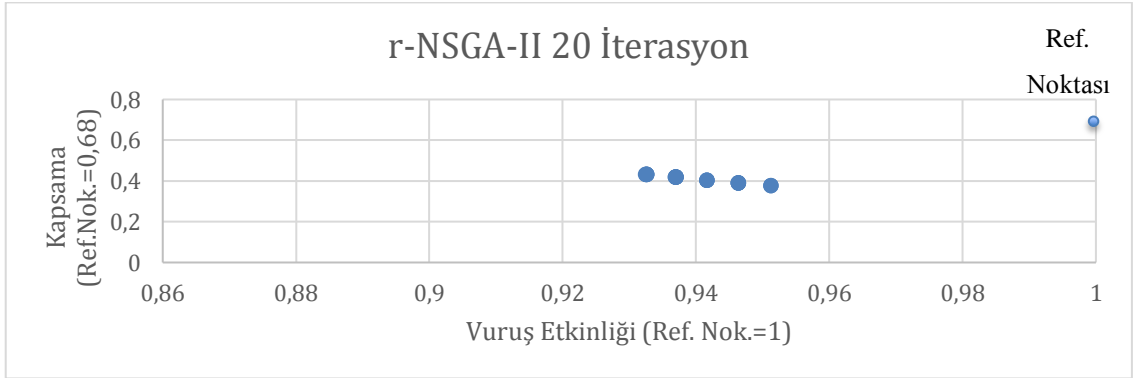
(a) Referans noktalarına göre üç kriterde değişim



(b) Yirmi iterasyon sonucu



(c) Yirmi iterasyon sonucu



Şekil 27. r-NSGA-II sonuçlar

Hedef noktasına yakın yerde toplanma yönünde iyileşme görülmüştür. Yirmi iterasyon sonucunda elde edilen iyi çözümlerden en yakın beş adedi Çizelge 9'da gösterilmiştir.

Çizelge 9. r-NSGA-II en yakın beş çözüm

	1.Çözüm	2.Çözüm	3.Çözüm	4.Çözüm	5.Çözüm
R_a	0	0	0,071152	0	0,1
R_b	0	0,113014	0,071152	0	0,1
R_c	3,656469	4,056469	3,656469	3,256469	3,656469
Vuruş Etkinliği	0,946385	0,941646	0,946389	0,951285	0,946390
Kapsama	0,388847	0,402868	0,388847	0,375006	0,388847
Lojistik Ağı Mesafesi	14,62588	16,79095	15,19510	13,02588	15,42588

r-NSGA-II ile, NSGA-II'ye göre daha hızlı çözüme ulaşılabilmektedir. Çünkü kalabalıklık oranı yerine, referans noktasına olan Öklid mesafesini bulmak daha az işlem gerektirmektedir.

5.3. Farklı Referans Noktaları için Karşılaştırma

Bu kısımda, farklı referans noktaları için r-NSGA-II ile bulduğumuz en yakın çözüm değerlendirilecektir. Bunun için, bulunan en yakın çözümün kapsama ve lojistik ağı mesafesi değerleri girdi olarak sezgisel yöntemle verilmiş ve algoritma ile en yüksek vuruş etkinliğine sahip çözüm bulunmuştur. Çizelge 10'da on farklı referans noktası için sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çizelge 10. r-NSGA-II referans tabanlı yöntem ile bulunan on adet iyi bir çözümün sezgisel yöntem ile karşılaştırılması

Ref. Noktası (K, V, L)	Yöntem	R_a	R_b	R_c	Kapsama (K)	Lojistik Ağı (L)	Vuruş Etkinliği (V)
(0,68, 1, 0)	r-NSGA-II	0	0	3,656469	0,388847	14,625876	0,946385
	Sezgisel Yöntem	0	0,000013	3,656453	0,388847	14,625876	0,946386
(0,55, 1, 0)	r-NSGA-II	0,360279	0,597772	2,563435	0,351458	14,323437	0,960207
	Sezgisel Yöntem	0	0,813941	2,563433	0,351458	14,323437	0,960219
(1, 0,95, 0)	r-NSGA-II	0,260279	0,360279	8,050779	0,551819	34,785350	0,900787
	Sezgisel Yöntem	0	0,516424	8,050807	0,551819	34,785350	0,900792
	r-NSGA-II	0	0	4,708399	0,426094	18,833597	0,934211

(0,55, 0,95, 0)	Sezgisel Yöntem	0	0	4,708428	0,426094	18,833597	0,934211
(0,68, 0,95, 0)	r-NSGA-II	0	0,227563	4,764697	0,428118	20,196603	0,933597
	Sezgisel Yöntem	0	0,227564	4,764695	0,428118	20,196603	0,933597
(1, 1, 0)	r-NSGA-II	0	0	6,563771	0,494586	26,255085	0,914822
	Sezgisel Yöntem	0	0	6,563778	0,494586	26,255085	0,914822
(0,55, 0,95, 40)	r-NSGA-II	0,127563	3,650343	5,564697	0,457276	40,893191	0,925141
	Sezgisel Yöntem	0	3,726870	5,564710	0,457276	40,893191	0,925145
(0,68, 0,95, 40)	r-NSGA-II	0,638413	1,875514	7,158336	0,517235	39,926157	0,909140
	Sezgisel Yöntem	0	2,258578	7,158317	0,517235	39,926157	0,909157
(0,55, 1, 40)	r-NSGA-II	1,587342	3,593131	3,593131	0,386641	37,100207	0,947352
	Sezgisel Yöntem	1,587330	3,593135	3,593135	0,386641	37,100207	0,947352
(0,68, 1, 40)	r-NSGA-II	0	3,926882	5,293002	0,447299	40,806420	0,928034
	Sezgisel Yöntem	0	3,926891	5,292992	0,447299	40,806420	0,928034

Sezgisel yöntem ile, r-NSGA-II referans bazlı yöntem ile bulduğumuz referans noktasına en yakın çözümden ya daha iyi bir çözüme ya da aynı çözüme ulaşılmıştır. Benzer kapsama, vuruş etkinliği ve lojistik ağı değerlerinde A ve B sistemlerinin farklı konumlanma mesafelerinde de aynı etkiyi gösterebileceği görülmüştür. Virgülden sonra altı basamak alınan sonuçlar arası farklarda minimum 0 ve maksimum fark 0,000016 bulunmuştur. Farkların ortalaması ise 0,0000038 olarak bulunmuş, ve r-NSGA-II yöntemiyle elde edilen sonuçların da etkin çözümlere oldukça yakın olduğu görülmüştür.

Ayrıca r-NSGA-II yöntemi farklı iterasyon sayıları (5-10-20-50-100) için çalıştırılmış ve sonuçta bulunan çözümlerin iyileşmesi gözlenmiştir. İterasyon sayısı arttıkça çözümlerin iyileştiği ve sezgisel yöntem ile ulaştığımız sonuca yakınlığı görülmüştür. Sezgisel yöntem diğer yöntemlere göre daha iyi ve hızlı sonuç vermiştir.

6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada farklı menzil ve kapsama özelliklerine sahip nokta hava savunma sistemlerinin sürekli alanda çok kriterli konuş yeri seçimi problemi ele alınmıştır. Yer seçimi kararı için üç kriter; kapsama, vuruş etkinliği ve lojistik ağı boyutu, dikkate alınmıştır.

Birbiriyle çelişen üç kriter düşünülmüştür. Bunlardan kapsama kriteri sistemleri merkezden oldukça uzağa yerleştirip kapsanan alanı artırırken, vuruş etkinliği kriteri sistemlerin ortak alanlarını artırmaya çalışır. Lojistik ağı kriteri ise sistemleri merkeze yaklaştırarak gidiş geliş mesafelerini kısaltmaya çalışır.

Bahse konu problem için geliştirilen sezgisel yöntem, sabit olarak belirlenen kapsama değeri için vuruş etkinliği ve lojistik ağı boyutu arasındaki etkin sınırı yakınsamaktadır. Etkin çözüm adedinin az olmaması nedeniyle, karar vericinin tercihlerine yönelik bir genetik algoritma da probleme uyarlanmıştır. Çözüm yöntemleri bir problem üzerinde denenmiştir. Karar vericinin belirlediği farklı referans noktaları için algoritmanın farklı bölgelere yöneldiği ve geliştirilen algoritma ile bu noktalara benzer çözümler bulunduğu görülmüştür. Ayrıca gayri faal duruma gelmiş bir ya da birkaç sistem olduğunda geliştirilen sezgisel yöntem ile hızlı bir şekilde sistem kaydırması yapılarak savunma etkinliği devam ettirilebilecektir.

Bahse konu yöntemler ile envantere alınacak hava savunma sistemlerinin gerçekçi ihtiyaç miktarları belirlenerek, kaynak tasarrufu sağlanabilir. Ayrıca sistemlerin hangi kombinasyonlarda ve hangi mesafelere konuşlanması gerektiği problemi çözülerek daha etkin savunma planı yapılabilecektir. Görsel senaryolarla da karşılaştırma imkânı olabilecektir. Bu alanda yapılan konumlanma çalışmasının hedef tehditleri ile beraber değerlendirilerek füze ve mürettebat atama problemlerinin de dahil edileceği yaklaşımlarla geliştirilebilir. Lojistik ağı kriteri genişletilerek harita tabanlı gerçek arazi üzerindeki yollar kullanılabilir ve Merkez nokta ve sistemler arası en kısa yol problemi de dahil edilebilir. Yeni kriterler (telsiz irtibat mesafesi, üç boyutlu düzlemde maksimum görüş vb.) ekleyerek ve kriterlerin Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemi ile ağırlıklandırılması yapılarak tek sonuç elde edilmesine yönelik problem geliştirilebilir. Kısıtlı bölgelerin de tanımlanması yapılabilir. Menzil içinde farklı vuruş olasılıkları dahil edilebilir. Farklı mesafelere ve irtifalara göre vuruş yüzdelerinin değiştiği modellerin kurulması probleme daha gerçekçi çözümler üretecektir. Hava savunma sistemlerinin

arıza ya da vurulma nedeniyle görev dışı kalma durumlarını dikkate alan senaryo tabanlı bir yaklaşım geliştirilebilir. Ayrıca, oyun tabanlı yaklaşımlar geliştirilebilir. Sistem sayıları karar değişkeni olarak düşünülebilir.

Bu çalışma sonucunda geliştirilen çözüm yönteminin nokta hava savunma sistemlerinde uygulanabileceği, dolayısıyla harekât etkinliğini artırarak kuvvet tasarrufu sağlayabileceğinin yanında maliyetleri azaltabileceği, farklı amaç fonksiyonları, farklı kriterler, farklı kısıtlar ve farklı silah sistemler için parametreler değiştirilerek yöntemin kolayca düzenlenebileceği, bu alanda yapılacak çalışmalar için temel bir çalışma olabileceği değerlendirilmektedir.

7. KAYNAKLAR

- [1] Lötter, D.P., Vuuren J.H., “A tri-objective, dynamic weapon assignment model for surface-based air defence”, *ORiON Journal*, 32, 1-22, **2016**.
- [2] Özdemir, Z., “Bölgesel hava savunma için çok amaçlı konuşlanma modeli”, *Başkent Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi*, **2019**.
- [3] Leibowitz, Martin L., ve Lieberman, Gerald J., “Optimal Composition and Deployment of a Heterogeneous Local Air-Defense System”. *Operations Research*, sy 8: 324-37, **1960**.
- [4] Gerald Brown, Matthew Carlyle, Douglas Diehl, Jeffrey Kline, ve Kevin Wood., “A Two-Sided Optimization for Theater Ballistic Missile Defense”. *Operations Research*, sy 53: 745-63, **2005**.
- [5] Karasakal, O., “Air defense missile-target allocation models for a naval task group”. *Computers & Operations Research*, sy 35: 1759-70, **2008**.
- [6] Franklin, R., Ray, C.K., ve Mehta, S., “Geometric Algorithms for Siting of Air Defense Missile Batteries”, **1994**.
- [7] Pietkiewicz, T., Kawalec, A., Wajszczyk, B., “Heuristic Method of Air Defense Planning for an Area Object with the Use of Very Short Range Air Defense”, *Intelligent Decision Technologies*, sf. 228-235, **2017**.
- [8] Pietkiewicz, T., Kawalec, A., Wajszczyk, B., “An Optimization Problem of Air Defense Planning for an Area Object”, *Intelligent Decision Technologies*, sf. 236-245, **2017**.
- [9] Ghose, D., Prasad, U.R., Guruprasad, K., “Missile battery placement for air defense: A dynamic programming approach” *Appl. Math. Modelling*, Bölüm 17, **1993**.
- [10] Pant, M., Deep, K., “Building a better air defence system using genetic algorithms”, Gabrys, B., Howlett, R.J. ve Jain, L.C., *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, KES 2006. LNCS*, bölüm 4251, sf. 951–959. Springer, Heidelberg, **2006**.

- [11] Ignizio, J. P. and Shannon, R. E., “Deployment of radars in air defense simulations. In *The Mathematics of Large-Scale Simulation*”, P. Brock, Simulation Councils Inc., La Jolla, California, **1972**.
- [12] Coğrafi Koordinatlardan Kartezyen Koordinatlara Çevrim, http://www.ktu.edu.tr/dosyalar/ormanamenajmani_99bb0.pdf, **2019**.
- [13] Zhou, A., Qu B.Y., Li H., Zhao S.Z., Suganthan PN ve Zhang Q, “Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art”, *Swarm Evol Comput*, 1(1), 32–49, **2011**.
- [14] Deb, K., “*Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*.” Wiley, Chichester, UK, **2001**.
- [15] Özsağlam, E., Çunkaş, M., “Optimizasyon Problemlerinin Çözümü için Parçaçık Sürü Optimizasyonu Algoritması”, *Politeknik Dergisi*, 11 (4), 299-305, **2008**.
- [16] Mirjalili, S., (2016), “Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems”, *Neural Comput and Applic* 27:1053–1073, **2016**.
- [17] Knowles, J. D., Corne, D. W., “M-PAES: A memetic algorithm for multiobjective optimization,” in *Proceedings of the 2000 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 325–332, **2000**.
- [18] Igel, C., Hansen, N., Roth, S., “Covariance matrix adaptation for multi-objective optimization,” *Evolutionary computation*, vol. 15, no. 1, pp. 1–28, **2007**.
- [19] Zhang, Q., Zhou, A., Jin, Y., “RM-MEDA: A regularity model-based multiobjective estimation of distribution algorithm,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 12, no. 1, pp. 41–63, **2008**.
- [20] Cheng, R., Jin, Y., Narukawa, K., and Sendhoff, B., “A multiobjective evolutionary algorithm using Gaussian process based inverse modeling,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, **2015**.
- [21] Knowles, J., “ParEGO: A hybrid algorithm with on-line landscape approximation for expensive multiobjective optimization problems,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 10, no. 1, pp. 50–66, **2006**.

- [22] Ponweiser, W., Wagner, T., Biermann, D., Vincze, M., “Multiobjective optimization on a limited budget of evaluations using model-assisted S-metric selection,” in Proceedings of the International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, pp. 784–794, **2008**.
- [23] Chugh, T., Jin, Y., Miettinen, K., Hakanen, J., Sindhya, K., “A surrogate-assisted reference vector guided evolutionary algorithm for computationally expensive many-objective optimization,” IEEE Transactions on Evolutionary Computation, **2016**.
- [24] Akhtar, T., Shoemaker, C.A., “Efficient Multi-Objective Optimization through Population-based Parallel Surrogate Search” Member, IEEE, **2019**.
- [25] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T., “A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-2”, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, No. 2, **2002**.
- [26] Deb, K., Jain, H., “An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-point Based Non-dominated Sorting Approach, Part 1: Solving Problems with Box Constraints”, IEEE, **2013**.
- [27] Deb, K., Sundar, J., “Reference Point Based Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms” Department of Mechanical Engineering Indian Institute of Technology Kanpur, **2006**.
- [28] Lee, J. Y., Kwak, K., “The Optimal Allocation Model for SAM Using Multi-Heuristic Algorithm: Focused on Theater Ballistic Missile Defense” IE Interfaces Vol. 21, No. 3, pp. 262-273, **2008**.
- [29] Lee, S.H., Baek, J.U., “Efficient Simulated Annealing Algorithm for Optimal Allocation of Additive SAM-X Weapon System” IE Interfaces Vol. 18, No. 4, pp. 370-381, **2005**.
- [30] Jung, C.Y., Lee, J.Y., Lee, S.H., “An Optimal Missile Allocation Problem for Maximizing Kill Probability”, **2010**.
- [31] Farahani, R.Z., Steadie Seifi, M., Asgari, N., “Multiple criteria facility location problems: A survey”, 2010.