



**T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HABERLEŞME UYDULARINDA
GÜVENİRLİĞİN OPTİMİZASYONU**

TAHA TETİK

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**DANIŞMANLAR
Doç. Dr. Gülesin Sena DAŞ
Prof. Dr. Burak BİRGÖREN**

KIRIKKALE 2023



**T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HABERLEŞME UYDULARINDA
GÜVENİRLİĞİN OPTİMİZASYONU**

TAHA TETİK

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**DANIŞMANLAR
Doç. Dr. Gülesin Sena DAŞ
Prof. Dr. Burak BİRGÖREN**

KIRIKKALE 2023

ONAY SAYFASI

Taha TETİK tarafından hazırlanan “HABERLEŞME UYDULARINDA GÜVENİRLİĞİN OPTİMİZASYONU” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Gülesin Sena DAŞ

İmza.....

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Danışman: Prof. Dr. Burak BİRGÖREN

İmza.....

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Ahmet Kürşad TÜRKER

İmza.....

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Prof. Dr. Banu SOYLU

İmza.....

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Erciyes Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Doç. Dr. Hakan Çerçioğlu

İmza.....

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 19/06/2023

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Recep ÇALIN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Taha TETİK

19/ 06/ 2023

ÖZET

HABERLEŞME UYDULARINDA GÜVENİRLİĞİN OPTİMİZASYONU

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Gülesin Sena DAŞ,

Ortak Danışman: Prof. Dr. Burak BİRGÖREN

Haziran 2023, 69 sayfa

Bir haberleşme uydusunun geliştirilmesi oldukça karmaşık ve maliyetli olup, uzaydaki görevine bağlı olarak birkaç yüz milyon dolara mal olmaktadır. Bir uydu yörüngeye fırlatıldıktan sonra radyasyon, güneş aktiviteleri, meteorlar ve aşırı hava koşulları gibi zorlu çevre koşullarında çalışmak zorundadır. Bu karmaşık sistemin uzayda fiziksel bakımı mümkün olmadığından, güvenilirlik tüm uzay ve uydu projeleri için kritik bir öneme sahiptir. Yörüngede oluşabilecek olası bir arıza durumunda işlevsellik kaybını önlemek için, çok pahalı bir sistem olan uydunun tasarım aşamasında güvenilirlik ve yedeklilik arasındaki etkileşim dikkate alınarak tasarım yapılır.

Bu çalışmanın amacı; müşteri güvenilirlik gereksinimlerini, ekipman güç tüketimlerini ve maliyetini eşzamanlı göz önünde bulundurarak bir haberleşme uydusunun güvenilirliğini optimize etmektir. Bu amaçla geliştirilen modeller güvenilirlik ve yedeklilik stratejisi arasındaki ilişkiyi dikkate almaktadır.

Tez kapsamında ilk geliştirilen model doğrusal olmayan 0-1 tam sayılı programlama modelidir. Önerilen bu model, geliştirilen İki Aşamalı Çözüm Yaklaşımı (İAÇY) ile çözülmüştür. Bu yöntemin ilk adımında, uydunun her bir alt sistemi için aktif ve pasif bileşenleri içeren bir dizi olası ekipman konfigürasyonu tanımlanmıştır. Sonrasında bu konfigürasyonlar ikinci aşamadaki matematiksel modele girdi olarak sağlanmıştır. İkinci aşamada, ise önerilen 0-1 tam sayılı programlama modeli kullanılarak olası konfigürasyonların bulunduğu kümeden optimum uydu konfigürasyonu seçilmiştir. Bu yaklaşımla, deterministik yöntemler kullanılarak optimal yedekliliği sağlayan bir sistem çözümüne ulaşılmıştır. Ulaşılan sonuçların, endüstride uygulanan pratiklerle ve uzmanların tecrübeleri ile uyumlu olduğu değerlendirilmiştir.

Geliştirilen ikinci model ise doğrusal olmayan çok amaçlı bir optimizasyon modelidir. Bu modelin amacı, uydu sistem güvenilirliği, maliyeti ve güç tüketim hedeflerini eş zamanlı olarak eniyilemektir. Önerilen model, Uzlaşık Programlama (CP) ile ele alınmıştır. Söz konusu problemin NP-Zor olması ve doğrusal olmayan denklemler içermesinden dolayı, Tavlama Benzetimi (SA) algoritması kullanılmıştır. Geliştirilen model farklı isterleri olan haberleşme uyduları dikkate alınarak test edilmiş ve duyarlılık analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, güvenilirlik değerindeki hafif azalışa karşın maliyet tarafında önemli ölçüde tasarrufun mümkün olabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, uydunun görevinin çok önemli olduğu

durumlarda, geliştirilen model güvenilirlik iyileştirmesi açısından sistem maliyeti ile güç tüketim değeri arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır.

Önerilen her iki yaklaşımda uydu tasarımında güvenilirlik ve yedeklilik stratejisinin dikkate alınarak tasarım yapılmasını sağlayacak olması açısından önemlidir. Dahası bu çalışma vesilesiyle uydu tasarımı sürecinde kullanılabilir sistemik yaklaşımlar geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Uydu Tasarımı, Güvenirlik ve Yedeklilik Tahsisi Problemi, Uzlaşık Programlama, Tavlama Benzetimi



ABSTRACT

RELIABILITY OPTIMIZATION OF A COMMUNICATION SATELLITE

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Industrial Engineering, Ph. D. Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Gülesin Sena DAŞ,

Co-Supervisor: Prof. Dr. Burak BİRGÖREN

June 2023, 69 pages

The development of a communication satellite is highly complex and costly, typically costing several hundred million dollars, depending on its mission in space. Once a satellite is launched into orbit, it is operated under challenging environmental conditions such as radiation, solar activities, meteoroids, and extreme weather conditions. Since physical maintenance of this intricate system is not feasible in space, reliability holds critical importance for all space and satellite projects. To prevent the loss of functionality in the event of a possible failure in orbit, the design of the satellite, which is an expensive system, takes into consideration the interaction between reliability and redundancy during the design phase.

The aim of this study is to optimize the reliability of a communication satellite by simultaneously considering customer reliability requirements, equipment power consumption, and cost. The models developed for this purpose take into account the relationship between reliability and redundancy strategy.

Within the scope of the thesis, the initially developed model is a non-linear 0-1 integer programming model. This proposed model was solved using a developed Two-Stage Solution Approach (TSSA). In the first step of this method, a set of potential equipment configurations, including active and passive components for each subsystem of the satellite, was defined. These configurations were then provided as inputs to the mathematical model in the second stage. In the second stage, the proposed 0-1 integer programming model was used to select the optimal satellite configuration from the set of potential configurations. With this approach, a system solution providing optimal redundancy was achieved using deterministic methods. The obtained results were evaluated to be consistent with industry practices and experts' experiences.

The second developed model is a non-linear multi-objective optimization model. The aim of this model is to simultaneously optimize satellite system reliability, cost, and power consumption objectives. The proposed model was addressed using Compromise Programming (CP). Due to the NP-hard nature of the problem and the presence of non-linear equations, the Simulated Annealing (SA) algorithm was employed. The developed model was tested and subjected to sensitivity analyses, considering communication satellites with different requirements. The obtained results indicate that significant cost savings are achievable, despite a slight decrease in reliability. Additionally, in cases where the mission of the satellite is of utmost importance, the

developed model reveals the relationship between system cost and power consumption in terms of reliability improvement.

The significance of both proposed approaches lies in their ability to incorporate reliability and redundancy strategy into satellite design, ensuring a systematic approach that can be utilized in the satellite design process. Furthermore, this work has led to the development of systematic approaches that can be employed in the satellite design process.

Key Words: Satellite Design, Reliability and Redundancy Allocation Problem, Compromise Programming, Simulated Annealing



TEŞEKKÜR

Bu doktora tezini tamamlamamda katkılarından dolayı tüm destek verenlere minnettarlığımı ifade etmek istiyorum.

Öncelikle, tez danışmanlarım Sayın Doç. Dr. Gülesin Sena DAŞ ve Sayın Prof. Dr. Burak BİRGÖREN'e derin Őükranlarımı sunmak istiyorum. Değerli rehberlikleri, akademik yönlendirmeleri ve sürekli teşvikleri bu çalışmanın başarıyla tamamlanmasında önemli rol oynamıştır.

Ayrıca, bu süreçte kıymetli değerlendirmeleri ve yönlendirmeleriyle bana destek olan Tez İzleme Komitesi hocalarıma da teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

EŐim, çocuklarım ve tüm aile bireylerim başta olmak üzere desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevdiklerime içten teşekkürlerimi iletmek istiyorum. Sizin sonsuz destekleriniz, sabrınız ve anlayışınız sayesinde bu yoğun çalışma sürecini başarıyla tamamlayabildim. Sizin sevgi dolu desteğiniz benim için paha biçilmez bir değere sahiptir.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
KISALTMALAR DİZİNİ	xii
SEMBOLLER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Önemi	4
1.2. Tezin İçeriği	6
2. GÜVENİRLİK	8
2.1. Literatürde Güvenirlik Problemleri	8
2.2. Sistemlerde Güvenirlik.....	11
2.3. Uydu Tasarımında Güvenirlik.....	16
2.4. Haberleşme Uydularında Güvenirlik.....	19
3. TEK AMAÇLI GÜVENİRLİK OPTİMİZASYON MODELİ	24
3.1. Problem ve Model Tanımı.....	24
3.2. İki Aşamalı Çözüm Yaklaşımı	27
3.3. Sayısal Durum Çalışması	30
4. ÇOK AMAÇLI GÜVENİRLİK OPTİMİZASYON MODELİ	34
4.1. Problem ve Model Tanımı.....	36
4.2. Uzlaşık Programlama (CP) Yöntemi.....	39
4.3. Tavlama Benzetimi (SA) Algoritması.....	41
4.4. Sayısal Durum Çalışması	48
4.4.1. Tek Amaçlı Modelin SA Yöntemi ile Çözülmesi.....	48
4.4.2. Çok Amaçlı Modelin SA Yöntemi ile Çözülmesi	50
5. SONUÇ ve DEĞERLENDİRMELER	58
KAYNAKLAR	61
ÖZ GEÇMİŞ	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

2.1. Uydu güvenilirlik optimizasyonuna ilişkin çalışmaların özet tablosu	11
2.2. Uydu sistem seviyesi örnek güvenilirlik tahsisi	22
2.3. Uydu alt sistem örnek güvenilirlik tahsisi	22
3.1. k:n yedekli s_{i_1} alt sistemi (standart kanal)model parametreleri	31
3.2. k:n yedekli s_{i_2} alt sistemi (öncelikli kanal)model parametreleri	31
3.3. k:n yedekli s_{i_3} alt sistemi (B1 altsistemi)model parametreleri.....	32
3.4. SOP modeli İAÇY sonuçları	32
4.1. Uydu alt sistemlerine ilişkin bilgiler	51
4.2. Uzlaşık programlama modelinin ağırlıklandırma stratejisi	52
4.3. MOP amaç fonksiyonları arasındaki ödünleşme.....	52
4.4. Uydu-A MOP model sonuçları	53
4.5. Uydu-B MOP model sonuçları.....	53
4.6. Uydu MOP modeli farklı w ve p değerleri için elde edilen sonuçlar	54

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Haberleşme uydusu alt sistemleri görüntüsü.....	2
1.2. Haberleşme uydusu görev yükü basitleştirilmiş tekrarlayıcı alt sistemi blok diyagramı	3
1.3. Haberleşme uydusu tekrarlayıcı alt sistem görüntüsü	3
2.1. Arıza hız fonksiyonu kuvvet eğrisi (Ref: Kuo & Zuo, 2003).....	14
2.2. Cihaz türlerine göre arıza hız fonksiyonu (Ref: Kuo & Zuo, 2003).....	15
2.3. Güvenirlilik blok diyagramı örneği	17
2.4. Seri-Paralel bağlı sistem güvenirlilik blok diyagramı	17
2.5. Uydu faydalı yük modülü blok diyagramı.....	20
2.6. Uydu sistem seviyesi ve faydalı yük alt sistemi güvenirlilik blok diyagramları	21
2.7. Amplifikasyon kanalları blok diyagramı.....	21
3.1. SOP model $k: n$ yedekli haberleşme uydusu güvenirlilik blok diyagramı	26
4.1. MOP model $k: n$ yedekli haberleşme uydusu güvenirlilik blok diyagramı.....	37
4.2. SA algoritması.....	46
4.3. Probleme özgü komşu SA çözüm oluşturma algoritması.....	47
4.4. SOP modeli SA algoritması çözüm grafikleri	49
4.5. SOP modeli SA algoritması sonuçlar	50
4.6. MOP modeli güvenirlilik optimizasyon sonuçları.....	55
4.7. MOP modeli SA algoritması sonuçlar.....	56
4.8. MOP modeli SA algoritması çözüm grafikleri.....	57

KISALTMALAR DİZİNİ

AOCS	:	Yörünge ve Konum Kontrol Alt Sistemi (Attitude and Control Subsystem)
CP	:	Uzlaşık Programlama (Compromise Programming)
DHS	:	Veri Kotarma Alt Sistemi (Data Handling Subsystem)
ECSS	:	Avrupa Birliği Uzay Standardizasyonu (European Cooperation for Space Standardization)
EPC	:	Elektronik Güç Düzenleyici (Electronic Power Conditioner)
EPS	:	Elektriksel Güç Alt Sistemi (Electrical Power Subsystem)
FIT	:	Başarısızlık Oranı (Failure In Time)
GA	:	Genetik Algoritması (Genetic Algorithm)
GEO	:	Eşzamanlı Dünya Yörüngesi (Geosynchronous Earth Orbit)
HPI	:	Yüksek Güç İzolatörü (High Power Isolator)
İAÇY	:	İki Aşamalı Çözüm Yaklaşımı
LEO	:	Alçak Dünya Yörüngesi (Low Earth Orbit)
MEO	:	Orta Dünya Yörüngesi (Medium Earth Orbit)
MIL-HDBK	:	ABD Savunma Bakanlığı Askeri El Kitapları (USA Military Handbooks)
MODM	:	Çok Amaçlı Karar Verme (Multi-Objective Decision-Making)
MOP	:	Çok Amaçlı Optimizasyon Problemi (Multi-Objective Optimization Problem)
NP-Zor	:	Deterministik Olmayan Polinom Zamanlı Zor (Non-deterministic Polynomial-time Hard)
PS	:	İtki Alt Sistemi (Propulsion Subsystem)
PSO	:	Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)
RAP	:	Yedeklilik Tahsis Problemi (Redundancy Allocation Problem)
ReAP	:	Güvenirlilik Tahsis (Reliability Allocation Problem)
RRAP	:	Yedeklilik-Güvenirlilik Tahsis Problemi (Redundancy-Reliability Allocation Problem)

SA	:	Tavlama Benzetimi (Simulated Annealing)
SOP	:	Tek Amaçlı Optimizasyon Problemi (Single-Objective Optimization Problem)
SSO	:	Basitleştirilmiş Sürü Optimizasyonu (Simplified Swarm Optimization)
STR	:	Yapısal Alt Sistemi (Structural Subsystem)
TCR	:	Uzölçüm, Uzkontrol ve Uzaklık Ölçüm Alt Sistemi (Telemetry, Telecommand and Ranging Subsystem)
TCS	:	Termal Kontrol Alt Sistemi (Thermal Control Subsystem)
TS	:	Tabu Arama (Tabu Search)
TSSA	:	İki Aşamalı Çözüm Yaklaşımı (Two-Stage Solution Approach)
TWT	:	Yürüyen Dalga Tüpü (Travelling Wave Tube)

SEMBOLLER DİZİNİ

c_i	:	i alt sistemi yedek ekipman maliyeti
C_i^*	:	maliyet amaç fonksiyonu ideal değeri
C_i'	:	maliyet amaç fonksiyonu anti-ideal değeri
k_i	:	i alt sisteminde bulunması gereken fonksiyonel ekipman sayısı
n_i	:	i alt sistemi bulunan toplam ekipman sayısı
n_i^l	:	i alt sisteminde kullanılacak yedek ekipman sayısı alt sınırı
n_i^u	:	i alt sisteminde kullanılacak yedek ekipman sayısı üst sınırı
n_{max}	:	sistemde kullanılmasına izin verilen maksimum yedek ekipman sayısı
n_{bi}	:	i alt sisteminde kullanılabilir toplam ekipman sayısı
m_i	:	i alt sistemi yedek ekipman sayısı
P_i	:	i alt sistemi yedek ekipman güç tüketim değeri (Watt)
P_i^*	:	güç tüketim amaç fonksiyonu ideal değeri (Watt)
P_i'	:	güç tüketim amaç fonksiyonu anti-ideal değeri (Watt)
P_{red}	:	sistemde yedek ekipmanlar için ayrılan güç bütçesi (Watt)
R_i	:	i alt sistemi güvenilirlik değeri
$R_{i_{min}}$:	i alt sistemi minimum güvenilirlik değeri
R_i^*	:	güvenirlik amaç fonksiyonu ideal değeri
R_i'	:	güvenirlik amaç fonksiyonu anti-ideal değeri
$R_{sys_{min}}$:	sistem minimum güvenilirlik değeri
s	:	alt sistem sayısı
W_i	:	amaç fonksiyonu ağırlıkları
$x_i = n_i - k_i$:	i alt sistemindeki yedek ekipman sayısı
$x_{i_1}, y_{i_2}, z_{i_3}$:	İAÇY ilgili konfigürasyon setini seçip seçmeme durumu

1. GİRİŞ

Geçtiğimiz yüzyılda uzay teknolojilerinde yaşanan etkili ilerlemeler ve ilişkili teknolojilerin gelişmesine imkân veren önemli projeler insanlık için bir tutku ve ilham kaynağı olmuştur. Bu gelişmeler çerçevesinde, farklı türlerde uydular geliştirilmiş ve kullanımları birçok sektörde yaygınlaşmıştır.

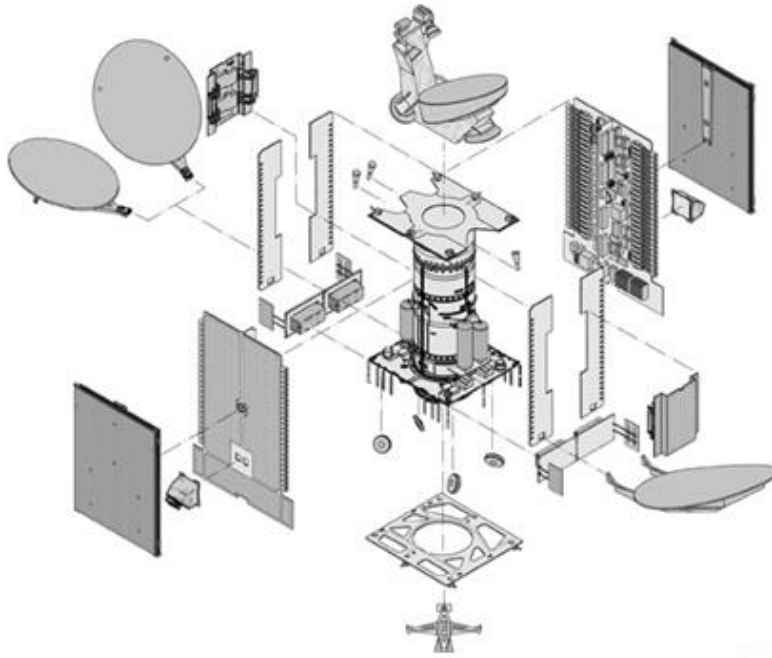
Uydu sistemleri uygulama alanlarına göre; Haberleşme, Gözlem, Keşif, Navigasyon ve Bilimsel uyduları şeklinde sınıflandırılmaktadır. Uyduların yörüngelerine göre bir diğer sınıflandırma çeşidi ise; Alçak Dünya Yörüngesi (LEO), Orta Dünya Yörüngesi (MEO), Jeosenkron Dünya Yörüngesi (GEO) ve Eliptik Yörünge uyduları şeklinde olmaktadır. Bu uyduların kütleleri, bir kilogramdan birkaç tona kadar geniş bir yelpazede çeşitlilik göstermektedir. Uyduların hizmet ömrü, görevlerine bağlı olarak, küçük uydular için birkaç yıldan başlayıp jeosenkron haberleşme uyduları için ise 15 yıla kadar uzanmaktadır. Kayıtları tutulan uyduların veri tabanı (Database, 2022) bilgilerine göre, 1 Mayıs 2022 itibariyle yörüngede 5.465'ten fazla aktif durumda olan uydu bulunmakta olup önümüzdeki on yıl içerisinde yaklaşık 17.000 uydunun daha fırlatılması beklenmektedir (Euroconsult, 2022).

Haberleşme uyduları fikri, İngiliz bilim adamı ve bilim kurgu yazarı Arthur C. Clarke'ın 1945 yılında Wireless World dergisinde yayınlanan makalesiyle gündeme gelmiştir (Evans, 1999). Takip eden süreçte, 1957 yılında SSCB tarafında Sputnik adlı ilk uydu uzaya gönderilerek, insanlık tarihinin ilk yapay uydusu olarak tarihe geçmiştir. Sonrasında ABD, ilk denemelerindeki başarısızlarının ardından 1958 yılında ilk uydusunu uzaya gönderebilmeyi başarmıştır.

Haberleşme uyduları, karasal hatların ulaşamadığı yerlerde, kıtalararası kablo sistemlerinin devamı olarak ve televizyon/radyo yayıncılığı gibi sivil alanlarda kullanılmaktadır. Televizyon yayıncılığında; merkezden uyduya gönderilen sinyaller, frekansları değiştirildikten ve sinyal seviyeleri güçlendirildikten sonra geniş alanlara yeniden dağıtılır (Braun, 2012). Bu tür uydular Dünya ile aynı dönüş hızına sahip olan yaklaşık 35.786 km yükseklikte Jeosenkron adı verilen yer ile eş zamanlı yörüngede görev yaparlar.

Haberleşme uyduları, temel olarak faydalı yük modülü (payload) ve servis modülü (Platform) adı verilen ana kısımdan oluşmaktadır. Genel olarak faydalı yük modülü; tekrarlayıcı, anten ve telekomut, telemetri ve uzaklık ölçüm alt sistemlerinden oluşmaktadır. Servis modülünde ise; yörünge ve konum kontrol, uydu komuta kontrol, elektriksel güç, veri kotarma, itki, termal kontrol ve yapısal alt sistemleri bulunmaktadır.

Bir haberleşme uydusunu oluşturan alt sistemleri ve bileşenlerinin patlatılmış genel görüntüsü Şekil 1.1’de verilmektedir.

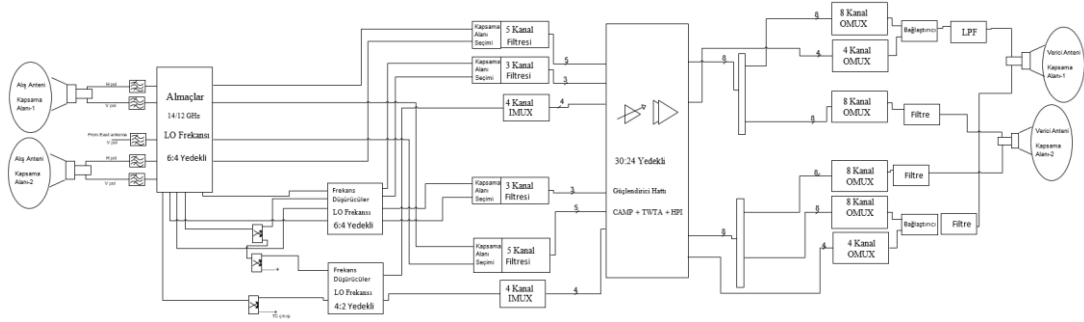


(Ref: Space System Loral)

Şekil 1.1. Haberleşme uydusu alt sistemleri görüntüsü

Standart bir haberleşme uydusu faydalı yük modülünü oluşturan tekrarlayıcı alt sistemi; giriş test bağlaştırmacı, giriş filtresi, dalga kılavuzu anahtarları, koaksiyal kablo anahtarları, almaçlar, frekans düşürücüler, kanal filtreleri, giriş kanal çoklayıcıları, kanal amplifikatörleri, yüksek güçlü izolatör ve çıkış kanal çoklayıcıları gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Anten alt sistemi; yansıtıcı yüzey olan reflektör, sinyallerini almak veya göndermek için kullanılan besleyici ve anten açma mekanizmalarından oluşmaktadır. Telekomut, Telemetri ve Uzaklık Ölçüm Alt Sisteminde ise telemetri anteni, dalga klavuzu bağlaştırmacı, telekomut alıcısı, telemetri vericisi, filtreler, dalga kılavuzu anahtarları ve koaksiyal kablo anahtarları

bulunmaktadır. Bir haberleşme uydusu görev yükü basitleştirilmiş tekrarlayıcı alt sistemi blok diyagramı Şekil 1.2’de verilmektedir.



Şekil 1.2. Haberleşme uydusu görev yükü basitleştirilmiş tekrarlayıcı alt sistemi blok diyagramı

Üretimleri temiz oda şartlarında oldukça yüksek hassasiyette yapılan uyduların, tekrarlayıcı alt sistem entegrasyon faaliyetlerine ilişkin bir görsel Şekil 1.3’te verilmektedir.



(Ref: https://cleanroomtechnology.com/news/article_page/Contamination_control_in_satellite_production/144932)

Şekil 1.3. Haberleşme uydusu tekrarlayıcı alt sistem görüntüsü

Bir uydunun uzaya fırlatılmasının ardından yeryüzünden bakım ve onarımları mümkün olmadığından, hedeflenen görevlerin başarılı olarak tamamlanabilmesi için uydunun güvenirliliği kritik bir rol oynamaktadır.

Güvenirlilik, bir sistem veya bileşenin, belirli koşullar altında ve istenen performansta, belirli bir süre boyunca işlevlerini yerine getirme yeteneği olarak tanımlanmaktadır (O'Connor & Kleyner, 2012) (Elsayed, 2012). Güvenirlilik, herhangi bir kusurlu birimin fiziksel erişimle müdahalenin imkânsız olduğu uzay ortamında, uydular için oldukça

önemli bir tasarım parametresi olarak kabul edilmektedir. Hedeflenen güvenilirlik değeri, çoğu zaman müşteri isteri veya sistem seviyesi gereksinimi olarak tanımlanmaktadır. Sistemlerde hedeflenen güvenilirlik değerini sağlayabilmenin iki yöntemi bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, yüksek güvenilirlik değerine sahip bileşenlerin kullanılması, ikinci ise sistemdeki yedeklilik seviyesinin artırılmasıdır. Uydularda çoğunlukla uzay kalifiye olan yüksek standartlarda bileşenler kullanıldığından, belirtilen güvenilirlik gereksinimi önemli ölçüde maliyet etkisi olan yedek birimler aracılığıyla sağlanabilmektedir. Yüksek teknoloji ürünlerinin karmaşık sistem mimarilerinde güvenilirlik, tasarımın erken safhalarından itibaren başlayan titiz bir süreç snucunda optimize edilmektedir.

1.1. Tezin Önemi

Bu tez çalışması ile günümüzde yüksek teknoloji ürünü olan haberleşme uydularında, müşteri güvenilirlik gereksinimleri, güç tüketimi sınırlamaları ve maliyetler eşzamanlı dikkate alınarak, güvenilirliğin optimize edilmesi amaçlanmaktadır.

Güvenirlik değeri, uzaya fırlatılan uyduların her biri için en önemli parametreler arasında yer almaktadır. Bu nedenle, sistem tasarımı ve güvenilirliğinin optimizasyonu, uydular açısında oldukça önemli bir süreç olup her bir uydu için hassasiyetle gerçekleştirilmektedir. Güvenirlik optimizasyonu, büyük sistemlerde fazla sayıda bileşen ve farklı yedeklilik stratejilerinden dolayı daha karmaşık ve zorlu olmaktadır. Bu çalışma kapsamında, uydu türleri arasında daha ağır ve karmaşık bir sınıf olan haberleşme uyduları incelenmiştir.

Genel olarak orta büyüklükte bir haberleşme uydusunun bütçesi birkaç yüz milyon dolar civarında olup bu uydular ağırlıklarına göre yüksek maliyetlerle uzaya gönderilmektedirler. Uyduların, uzaya fırlatılmalarının ardından radyasyon, yüksek sıcaklık farkları, güneş aktiviteleri, meteorlar gibi zorlu uzay ortamında oluşabilecek herhangi bir arıza durumunda, yerden tamir müdahale imkânı bulunmamaktadır. Olası arıza durumlarında işlevsellik kaybını önlemek için, tasarım aşamalarında dikkate alınan yedeklilik felsefesi ve güvenilirlik yaklaşımlarına dair stratejiler uygulanmaktadır (Rausand & Hoyland , 2004). Bu nedenle güvenilirlik, uzay sistemleri için kritik bir özellik olmakla birlikte, uzay aracı tasarımı ve optimizasyonunda önemli bir parametre olarak da kabul edilmektedir (Castet & H.Saleh, 2009).

Bir uyduda fazladan yer alan her bir yedek ekipman, arıza durumunda kullanılabilirdikleri için güvenilirliği artırmaktadır. Öte yandan, mimaride fazladan bulundurulmuş ekipmanlar, genel olarak sistemin hem maliyetini hem de karmaşıklığını artıran ilave hacim, kütle, güç gereksinimi ve fazladan kablolama ihtiyaçları doğurmaktadır. Bu tip ödünleşme ve kısıtların olduğu bir tasarım sürecinde sistemin güvenilirliğini ve yedekliliğini optimize etmek için iyi yapılandırılmış bir yaklaşıma ihtiyaç vardır. Ancak bu şekilde maliyet etkin ve kaynak verimli bir uydu tasarım süreci yürütülebilir.

Uydu tasarımındaki yedek ekipman sayısı ve ilgili yedeklilik stratejisine ilişkin mevcut endüstriyel uygulamalar, bilindiği kadarıyla müşteri güvenilirlik gereksinimleri doğrultusunda iteratif denemeler yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. Güvenirlik tasarımı ve tahmini için, ABD Savunma Bakanlığı Askeri El Kitaplarında (MIL-HDBK-338B, 1998), (MIL-HDBK-217F, 1991) ve Avrupa Birliği Uzay Standardizasyonu (ECSS) dökümanlarında (ECSS, 2011) önemli yönergeler bulunmaktadır. Sektörde güvenilirlik blok diyagramlarını ve güvenilirlik analizini modellemek için, kalite ve güvenilirlik yönetiminde kullanılan PTC Windchill Quality Solution gibi ticari yazılımlar da bulunmaktadır. Ancak bu yazılımlar, güvenilirlik optimizasyonunu sağlamamaktadırlar. Kamuya açık olmamasına ve literatürde bulunmamasına karşın, dünyada önde gelen endüstriyel şirketlerin sistem ve güvenilirlik optimizasyonu için kendi bünyelerinde geliştirdikleri araç setlerinin bulunması ihtimaller dâhilinde olduğu değerlendirilmektedir. Sistemik bir yaklaşımın bulunmadığı durumlarda, uydunun her bir alt sistemindeki en iyi yedeklilik stratejisi ve yedekli birim sayısının belirlenmesi, müşteri güvenilirlik gereksinimine göre farklı denemeler gerçekleştirilmesi yoluyla sağlanmaktadır. Bu şekilde, değerlendirilen minimum sayıda ekipman kombinasyonu ile gerekli güvenilirlik rakamına ulaşılmaya çalışılmaktadır.

Uydu tasarım sürecinde ele alınan alternatif tasarımlar farklı parametrelerden etkilenmektedir. Bu parametrelerden başlıcaları; güvenilirlik, sistem maliyeti, hacim, güç tüketimi ve ısı dağıtım kapasitesi olup bunlar arasında önemli ödünleşmeler bulunmaktadır. Yüksek sistem güvenilirliği, kullanılan ekipman sayısını artıracığından güvenilirliği artırmak maliyeti de arttırmaktadır. Ayrıca istenilen güvenilirlik değerine erişebilmek için kullanılan yedek ekipmanlar uydu üzerinde ilave kütle ve hacim talebi doğurmaktadır. Bunun yanında yüksek güvenilirlik için yedek olarak sistemde açık

tutulan ekipmanlar ilave güç talebi ve ısı atım kapasite ihtiyacını da beraberinde getirmektedir. Bu ödünleşmeler, uydu tasarım sürecinde karar verilmesi gereken birçok karara işaret eder. Tasarımcılar, projenin hedeflerine ve gereksinimlerine en uygun çözümü bulmak için sisteme farklı oranlarda etki eden bu faktörleri dikkate alarak uygun bir çözüm veya çözü kümesi bulmaya çalışmaktadırlar.

Tasarım sürecinde yedeklilik stratejisi ve yedek ekipman sayısı belirlemesi esnasında, uydu üzerindeki kaynak kısıtlarının da dikkate alınması gerekmektedir. Sistem seviyesi tasarım ve güvenilirlik optimizasyon sürecinde, sistematik bir yaklaşımın olmadığı durumlarda, ilgili parametreler arasındaki ödünleşme ve korelasyonların değerlendirilmesi oldukça güç olmaktadır. Bu çalışma çerçevesinde önerilen yaklaşımlar sayesinde, uyduların tasarım sürecinde sistem güvenilirlik optimizasyonunun sistematik olarak gerçekleştirilmesi sağlanmıştır.

1.2. Tezin İçeriği

Bu tez çalışması kapsamında, uydu tasarım sürecinde maliyet etkin yedeklilik ve güvenilirlik optimizasyonu hedeflenmektedir. Söz konusu güvenilirlik optimizasyonu, hem Tek Amaçlı bir Optimizasyon Problemi (Single-Objective Optimization Problem - SOP) hem de Çok Amaçlı bir Optimizasyon Problemi (Multi-Objective Optimization Problem MOP) şeklinde modellenerek çözülmüştür.

Önerilen SOP modeli tez kapsamında Bölüm 3.2’de sunulan İki Aşamalı Çözüm Yaklaşımı (İAÇY) ile çözülmüştür. Bu yöntemin ilk adımında, her bir alt sistem için aktif ve pasif bileşenleri içeren bir dizi olası ekipman konfigürasyonu tanımlanmaktadır. Her konfigürasyonda farklı sayıda yedekli ekipman bulunmaktadır. Bu konfigürasyonlar ikinci aşamadaki matematiksel modele girdi olarak sağlanmaktadır. İkinci aşamada, önerilen 0-1 tam sayılı programlama modeli kullanılarak olası konfigürasyonların bulunduğu kümeden optimum konfigürasyon seçilmektedir.

Bölüm 4.1’de sunulan MOP modeli ise uydu sistemi güvenilirliği, maliyeti ve güç tüketim hedeflerini eş zamanlı olarak optimize etmeyi amaçlamaktadır. Önerilen model, çok amaçlı bir optimizasyon yaklaşımı olan Uzlaşık Programlama (Compromise Programming - CP) ile ele alınmıştır. Söz konusu MOP modeli NP-Zor (NP-Hard) karakteristiği ve doğrusal olmayan denklemler içermesinden dolayı, meta-

sezgisel algoritmalarından Tavlama Benzetimi (Simulated Annealing - SA) yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Geliştirilen modeli test etmek için farklı isterleri olan haberleşme uyduları dikkate alınarak amaç fonksiyonları farklı ağırlıklar ile denenmiş ve duyarlılık analizleri yapılmıştır.



2. GÜVENİRLİK

Bu bölümde önce literatürde karşılaşılan güvenilirlik problemleri tanıtılmış, ardından karmaşık sistemlerde ve uydularda kullanılan güvenilirlik yaklaşımları detaylandırılmıştır.

2.1. Literatürde Güvenirlik Problemleri

Bir sistemin güvenirligi, iki temel yöntem olan, bileşenlerin özgül güvenirliginin artırılması ve yedek birimler kullanması suretiyle geliştirilebilir (Kuo & Zuo, 2003). Bir sistem üzerinde yedekli birimlerin bulundurulması, bileşen güvenirligini geliştirmekten daha uygun maliyetli olmaktadır. Bu nedenle uygun sayıda yedekliligin bulunması için ortaya çıkan problem, literatürde son yıllarda büyük ilgi gören Yedeklilik Tahsis Problemi (Redundancy Allocation Problem -RAP) olarak adlandırılmaktadır (Yeh, 2017), (Biolini, 2013), (Fyffe, Hines, & Lee, 1968), (Coit & Smith, 1996), (Kim, Bae, & Park, 2006), (Agarwal, Gupta, Ramirez-Marquez, & Coit, 2004), (Kulturel-Konak, Smith, & Coit, 2003), (Kuo & Wan, 2007). Bununla birlikte, ilave bileşenlerin tahsis edilmesi yoluyla güvenirligin iyileştirilmesi, sistemin maliyetinde kayda değer bir artışa neden olmaktadır (Mellal & Salhi, 2021).

Güvenirlik optimizasyonu kapsamında, RAP'a ilave olarak literatürde Güvenirlik Tahsis Problemi (Reliability Allocation Problem - ReAP) ve Güvenirlik-Yedeklilik Tahsis Problemleri (Redundancy Reliability Allocation Problem - RRAP) de bulunmaktadır. RAP'da temel amaç, güvenirlik ve maliyet gereksinimlerini karşılayan en iyi bileşen kombinasyonunu ve yedeklilik düzeylerini bulmaktır (Coit and Smith, 1996). ReAP ise bir sistemin bileşenlerine veya alt sistemlerine güvenirligi en iyi şekilde dağıtmayı hedefleyen ve belirli kısıtlar altında genel sistem güvenirligini maksimize etmeyi veya sistem maliyetini minimize etmeyi amaçlayan bir optimizasyon problemini ele almaktadır (Twum, 1996, Thesis). Öte yandan, RRAP bu iki problemin birleşimini temsil eder. Bu nedenle, RRAP'ler, bileşen güvenirliklerinin yanı sıra yedeklilik düzeylerinin optimizasyonu ile ilgilenmektedir (Wanga, vd.,

2020). Bu problemlere ilişkin literatürde yapılan çalışmalar (Kuo & Prasad, 2000) ve (Kuo W. , Prasad, Tillman, & Hwang, 2001) makalelerinde detaylı bir şekilde tartışılmaktadır.

Literatürde RAP ve RRAP problemlerinin çözümü için yaklaşık çözüm yöntemleri, kesin çözüm veren yöntemler ve meta-sezgisel algoritmalar kullanılmıştır.

Yaklaşık çözüm yöntemlerinden; Aralık Optimizasyonu (Munoz & Pierre, 2004), Geometrik Programlama (Federowicz & Mazumdar, 1968) ve Diferansiyel Dinamik Programlama (Murray & Yakowitz, 1984) metotları kullanılmıştır.

Kesin çözüm veren yöntemlerden ise; Lagrangian ve Dinamik Programlama (Ashrafi & Berman, 1992), Dal-Sınır ve Kesme Düzlemi yöntemleri (Coit & Liu, 2000), Lexicographic sıralama algoritması (Prasad & Kuo, 2000), Geliştirilmiş Vekil Kısıt Metodu (Improved Surrogate Constraint Method) (Onishi, James, & Nakagawa, 2007) ve karma tamsayı programlama (Misra & Sharma, 1991) kullanılmıştır.

RAP, ReRAP ve RRAP problemlerinin NP-Zor olduğu bilindiğinden (Chern, 1992), problemin çözümü için çeşitli meta-sezgisel algoritmalar tercih edilmiştir. Bu kapsamda; Tavlama Benzetimi (Simulated Annealing-SA); (Atiqullah & Rao, 1993), (Wattanapongsakorn & Levitan, 2001), (Kim, Bae, & Park, 2006), Genetik Algoritma (Genetic Algorithms - GA); (Coit & Smith, 1996), (Deeter & Smith, 1997), (Konak, Coit, & Smith, 2006), Basitleştirilmiş Sürü Optimizasyonu (Simplified Swarm Optimization SSO); (Lai & Yeh, 2016) ve Tabu Arama (Tabu Search -TS); (Kulturel-Konak, Smith, & Coit, 2003) yöntemleri bu problemin çözümünde yaygın olarak kullanılmıştır.

Geçmiş çalışmalar ve çözüm yaklaşımları hakkında detaylı bilgi Kuo & R. Wan, (2007), Kuo & Prasad (2000), Kuo W. vd. (2000), Misra (1986) ve Tillman vd. (1977) tarafından yapılan tarama çalışmalarında da bulunmaktadır. Kuo ve R.Wan (2007), optimal güvenilirlik tahsisi problemleri üzerinde kapsamlı bir tarama çalışması sunmuştur. Kuo ve Prasad (2000) ise sistem yapıları ve çözüm yöntemleri temelinde sistem güvenilirlik optimizasyonunu problemlerini incelemiştir. Kuo vd. (2000) sistem güvenilirlik optimizasyonu için kullanılan yöntemlere genel bir bakış sunmuşlardır.

Soltani (2014) ise çoğunlukla 2000 yılından sonra yayınlanan çalışmalara odaklanan makalesinde, literatürde RAP, ReRAP ve RRAP problemleri için kullanılan modelleri ve yaklaşımlarını sunan detaylı bir tarama çalışması yapmıştır.

Literatürde bu alanda yapılan çalışmalara genel olarak bakıldığında, deterministik yöntemlerle kesin çözüme odaklanan nispeten az sayıda çalışma bulunduğu görülmüştür. Buna karşın sezgisel ve meta-sezgisel yöntemlerin yaygın kullanımı tespit edilmiştir. RAP, ReRAP ve RRAP problemlerinin doğrusal olmayan amaç fonksiyonları ve/ veya kısıtlar içermelerinde dolayı sezgisel ve meta-sezgisel yaklaşımların sıklıkla tercih edildiği görülmüştür. Ancak, karmaşık gerçek hayat problemlerini modelleyebilen ve çözebilen paket programların (CPLEX, GAMS, LINGO, vb.) varlığı, meta-sezgisel ve sezgisel yöntemlerin, kullanımları etkilenmektedir (Khalili-Damghani & Amiri, 2012).

Yapılan literatür taramasında, uydu tasarımı ve güvenilirlik optimizasyonu konuları ile ilgili az sayıda çalışma bulunduğu görülmüştür. Hassan ve Crossley (2003), toplam fırlatma kütesinin minimizasyonu ve uzay aracının genel güvenilirliğinin maksimizasyon problemini bir MOP olarak ele alarak problemin çözümü için GA kullanmıştır (Hassan & Crossley, 2003).

Hassan ve Crossley (2008), yaptığı diğer bir çalışmada ise uydu sistemlerinin olasılıksal güvenilirliğe dayalı tasarım optimizasyonu için Monte Carlo örneklemeli bir GA geliştirmişlerdir (Hassan & Crossley, 2008).

Nefes vd. (2018) ise farklı arıza oranları altında bir haberleşme uydusu faydalı yük modülünün güç yükselteçlerinin yedeklik yapısını geliştirilen analitik bir yaklaşımla belirlemişlerdir. (Nefes, Demirel, Ertok, & Sen, 2018).

Li vd. (2020) çalışmasında; üstel olmayan bileşenleri kullanan ve karma yedeklilik stratejisine sahip aşamalı görev sistemlerinin yedeklilik tahsisleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında bir uzay aracının itki alt sisteminin güvenilirlik ve kütle optimizasyonu, geliştirilmiş GA yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Li, Li, & Huang, 2020). Uydu tasarımı ve güvenilirlik optimizasyonu ile ilgili literatürde yer alan çalışmaların özeti Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Uydu güvenilirlik optimizasyonuna ilişkin çalışmaların özet tablosu

Yazar, Yıl	Amaç Fonksiyonu	Yöntem
Hassan & Crossley, 2003	- Kütle minimizasyonu - Güvenirliğin maksimizasyonu	- Genetik Algoritma
Hassan & Crossley, 2008	- Kütle minimizasyonu	- Monte Carlo örneklemeli Genetik Algoritma
Nefes vd. 2018	- Güvenirliğin maksimizasyonu - Maliyet minimizasyonu	- Matlab'da Analitik Yöntem
Li, vd., 2020	- Kütle minimizasyonu - Güvenirliğin maksimizasyonu	- Yarı Markov Süreci - Genetik Algoritma

Yapılan literatür taramasında, haberleşme uyduları sistem güvenilirliği ve yedeklilik optimizasyonu ile ilgili kesin yöntemlere dayanan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ayrıca bilğimiz dahilinde uydularda güvenilirlik ve yedeklilik tahsisi problemini, çok amaçlı bir optimizasyon problemi olarak ele alan herhangi bir çalışmaya da rastlanmamıştır.

2.2. Sistemlerde Güvenirlik

Güvenirlik, bir sistem veya bileşenin tanımlanan şartlar ve belirlenen süre boyunca istenen performansta fonksiyonlarını yerine getirebilme kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır (Elsayed 2012; O'Connor 2012).

Güvenirlik tanımı itibariyle;

- Bir sistemin ya da bileşenlerinin belirli bir işlevi istikrarlı bir şekilde gerçekleştirme yeteneğini ifade eder.
- Sistemin hatasız olarak beklenen fonksiyonlari çalışması veya operasyonun yerine getirilmesinin tahmin edilmesine dayanır. Bir parçanın arızalanması durumunda, tüm sistemde etki gösterir.
- Belirli şartlar altında tanımlanan çalışma koşulları ile sınırlandırılmıştır. Sistem her şart ve koşulda mükemmel olarak çalışmaz.
- Tanımlanan hizmet ömrü süresince geçerlidir. Bir süre sonra hatalar kaçınılmaz olmaktadır.

Güvenirlik arıza yapma, hata veya başarısızlık olasılığı veya kullanılabilirlik ihtimali olarak Denklem (2.1)'deki haliyle ifade edilir.

$$R(t) = P\{T > t\}, t = 0 \quad (2.1)$$

Güvenirlilik, $R(t)$ bir cihazın veya sistemin tanımlanan performans isterlerinde t süre boyunca çalışma olasılığı veya cihazın/sistemin t süre sonra arızalanması ihtimali olarak tanımlanır ve Denklem (2.2) ile ifade edilir.

$$R(t) = P\{T > t\} = \int_t^{\infty} f(x)dx = 1 - \int_0^t f(x)dx \quad (2.2)$$

Bu denklemde T sistem veya bileşenin ömrünü temsil eden rassal bir değişkeni, t ise beklenen hizmet ömrünü ifade etmektedir. Beklenen hizmet ömrü müşteri veya üretici tarafından tanımlanan bir değer olup, haberleşme uyduları için bu değer genellikle 15 yıl (131490 saat) olarak tanımlanmaktadır.

Birikimli dağılım fonksiyonu olan arıza zamanı dağılımı $F(t)$ ile, olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(t)$ arasındaki ilişki Denklem (2.3) ve Denklem (2.4) ile ifade edilmektedir.

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - P\{T > t\} \quad (2.3)$$

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt \quad (2.4)$$

Herhangi bir zaman aralığı olarak t_1 ve t_2 arasındaki hata olasılığı güvenirlilik fonksiyonu Denklem (2.5) ifade edildiği şekilde gösterilmektedir (MIL-HDBK-338B, 1998);

$$\int_{t_1}^{\infty} f(t)dt - \int_{t_2}^{\infty} f(t)dt = R(t_1) - R(t_2) \quad (2.5)$$

t_1 ve t_2 zaman aralığındaki hata oranı (hızı), $\lambda(t)$ ile ifade edilmekte olup Denklem (2.6) ve Denklem (2.7) verildiği şekilde gösterilmektedir.

$$\lambda(t) = \frac{R(t_1) - R(t_2)}{(t_2 - t_1)R(t_1)} = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t R(t)}, \quad (2.6)$$

$$t_1 = t, \quad t_2 = t + \Delta t$$

$$t_1 = t, \quad t_2 = t + \Delta t \rightarrow \Delta t \rightarrow 0 \quad h(t) = \lambda(t) \quad (2.7)$$

Bozulma oranı veya anlık arıza oranı $h(t)$ ile tanımlanmakta olup, Denklem (2.8)-(2.12) kullanılarak ifade edilmektedir. Birikimli dağılım fonksiyonu olan arıza oranı ise $H(t)$ ile ifade edilmektedir.

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[\frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t R(t)} \right] = \frac{-1}{R(t)} \left[\frac{dR(t)}{dt} \right] = \frac{1}{R(t)} \left[\frac{-dR(t)}{dt} \right] \quad (2.8)$$

$$f(t) = \frac{-dR(t)}{dt} \quad (2.9)$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.10)$$

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} Pr(T \leq t + \Delta t | T > t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.11)$$

$$H(t) = \int_0^t h(t) dt \quad (2.12)$$

Bozulma oranı veya anlık arıza oranı $h(t)$ ile güvenilirlik $R(t)$ arasındaki ilişki Denklem (2.13)-(2.16) ile ifade edilmektedir;

$$\lambda(t) = \int_0^t h(t) dt \quad (2.13)$$

$$R(t) = \int_t^\infty f(t) dt = \exp \left[- \int_0^t h(t) dt \right] \quad (2.14)$$

$$h(t) = -\frac{d}{dt} \ln R(t) \quad (2.15)$$

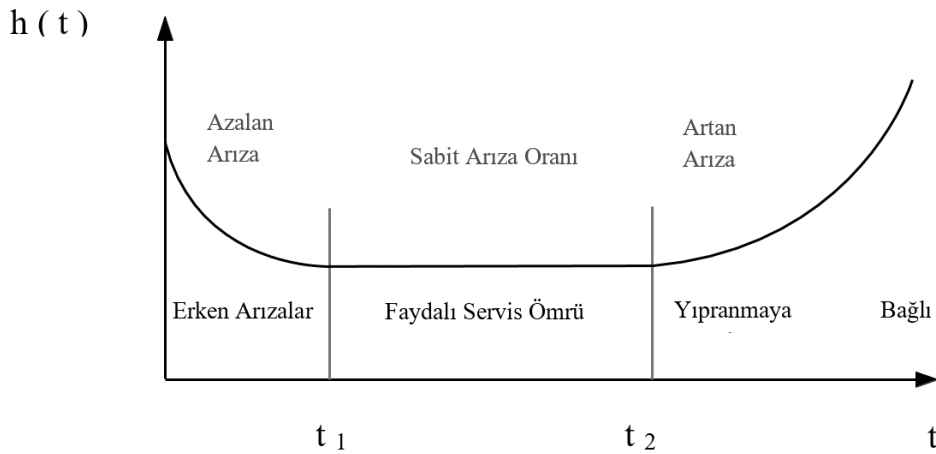
$$R(t) = e^{-h(t)} \quad (2.16)$$

Birçok elektronik ekipman için $h(t)$ nin sabit arıza oranına (λ) sahip olduğu düşünüldüğünde güvenilirlik $R(t)$, Denklem (2.17)'de verildiği şekilde ifade edilir (MIL-HDBK-217F, 1991), (MIL-HDBK-338B, 1998).

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.17)$$

MIL-HDBK-338B Elektronik Güvenirlik Tasarım El Kitabı 5.3 bölümünde, güvenilirlik modellerinde kullanılan istatistiksel dağılım yöntemleri detaylı olarak ele alınmıştır (MIL-HDBK-338B, 1998).

Farklı türde cihazlar için “küvet eğrisi (bathtub curve)” olarak bilinen arıza hız fonksiyonu $h(t)$ karakterizasyonu Şekil 2.1’de verilmektedir (Kuo & Zuo, 2003).



Şekil 2.1. Arıza hız fonksiyonu küvet eğrisi (Ref: Kuo & Zuo, 2003)

Şekil 2.1’de verilen bölgeler detaylı olarak incelendiğinde, üç farklı dönem göze çarpmaktadır. Bunlar;

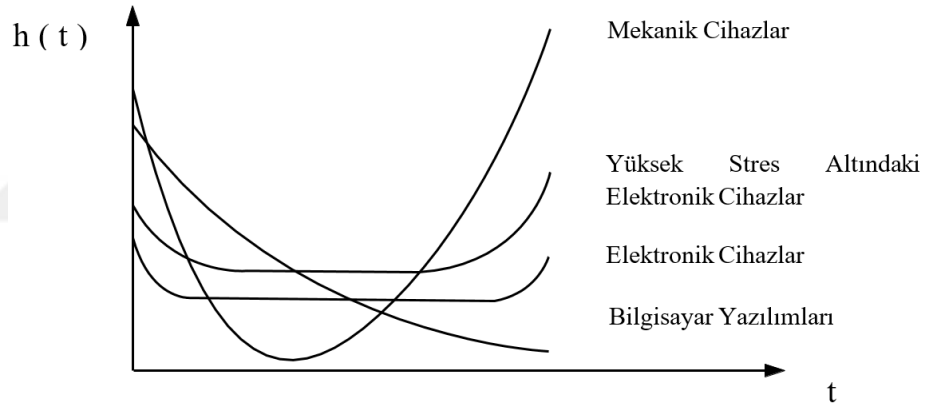
$(0, t_1)$ aralığı; Azalan arıza oranı; erken arıza dönemi, daha ziyade üretim kusurlarından dolayı oluşan arızaların meydana geldiği dönemdir. Genellikle zayıf tasarımlarda, standart olmayan parçaların kullanımında, üretim kontrol aşamalarında

yaşanan zafiyetler sonucunda oluşur. Erken arızalar, burn-in adı verilen deneme testleri ile tespit edilebilmektedir.

(t_1, t_2) aralığı; Sabit arıza oranı; faydalı servis ömrü döneminde, rastgele meydana gelen arızalardan oluşur. Beklenmedik ve aşırı yüklenme sonucu arızalar ile birden fazla konunun dâhil olduğu karmaşık fiziksel arıza mekanizmaları bu dönemde görülür. Arıza oranı sabit olduğu için, temel olarak arızaya kadar geçen sürede üstel dağılım uygulanabilir (MIL-HDBK-217F, 1991).

(t_2, ∞) aralığı; Yükselen arıza oranı; yıpranma, yaşlanma ve yüksek düzeyde performans kaybına bağlı arızaların görüldüğü dönemdir.

Küvet eğrisi şekli, cihazların yapısına göre değişiklik gösterebilmektedir. Çeşitli cihaz türlerine göre arıza hızlarına ilişkin grafik Şekil 2.2’de verilmektedir (Kuo & Zuo, 2003).



Şekil 2.2. Cihaz türlerine göre arıza hız fonksiyonu (Ref: Kuo & Zuo, 2003)

Uydu gibi karmaşık sistemlerde güvenilirliğin artırılması aşağıdaki yöntemlerle mümkün olmaktadır (Kuo & Zuo, 2003);

- Sistem performans isterlerini uygun şekilde mümkün olduğunca basit tutarak,
- Sistem içerisindeki bileşenlerin güvenilirliğini artırarak,
- Düşük güvenilirliğe sahip bileşenler için paralel yedekliliği artırarak,
- Bileşen arıza durumunda, sistemde bulundurulmuş hazırda bekletilen yedek bileşenlerle,
- Arızalanan bileşenin, bakım ve onarım faaliyetleri ile değiştirilmesi yöntemiyle,

- Önleyici bakım ve onarım faaliyetleri ile bileşen arızalanmadan önce yenisi ile değiştirilmesiyle,
- Sistemde değiştirilebilir bileşenlerin alternatif daha iyi bir konfigürasyonu aracılığıyla,
- Daha yüksek güvenlik faktörleri kullanarak,
- Erken dönem arızaların görüldüğü bileşenlerin burn-in testlerine tabii tutulmasıyla.

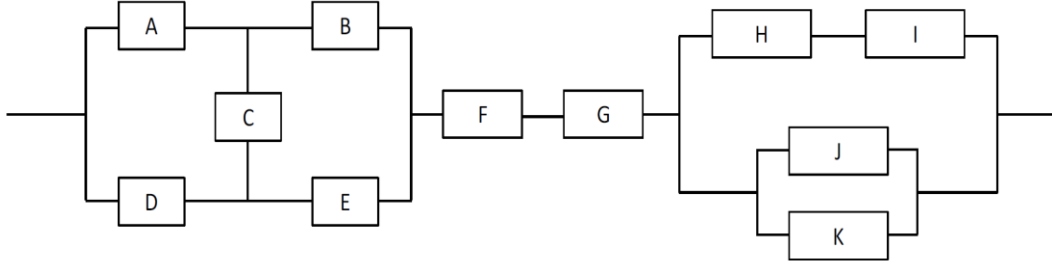
2.3. Uydu Tasarımında Güvenirlik

Uydularda güvenirlik; uydunun belirlenen servis ömrü boyunca, bulunacağı yörünge şartları altında, istenen performans isterlerini başarılı olarak sağlayabilme olasılığı olarak tanımlanır.

Uydularda güvenirlik, kavramsal tasarım aşamasından başlayarak; üretim, test ve yörünge operasyonları süresince göz önünde bulundurulur. Bu kapsamda farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Uydu endüstrisinde uygulanan niteleyici güvenirlik yaklaşımları; Hata Modları Etkileri ve Kritiklik Analizleri (FMEA) ve Hata Ağacı Analizleridir. Uydu endüstrisinde uygulanan niceleyici güvenirlik yaklaşımları ise; Hata Oranları, Güvenirlik Tahmini, Güvenirlik Blok Diyagramları olarak tanımlanmaktadır.

Uyduların tasarım aşamasında, tasarım modelleme tekniğinden hareketle fonksiyonel blok diyagramlar ve ardından Güvenirlik Blok Diyagramları oluşturulur. Güvenirlik Blok Diyagramları, karmaşık sistemlerin; tasarım değerlendirmeleri, güvenirlik tahsisleri ve sistem güvenirlik tahminlerinde kullanılır.

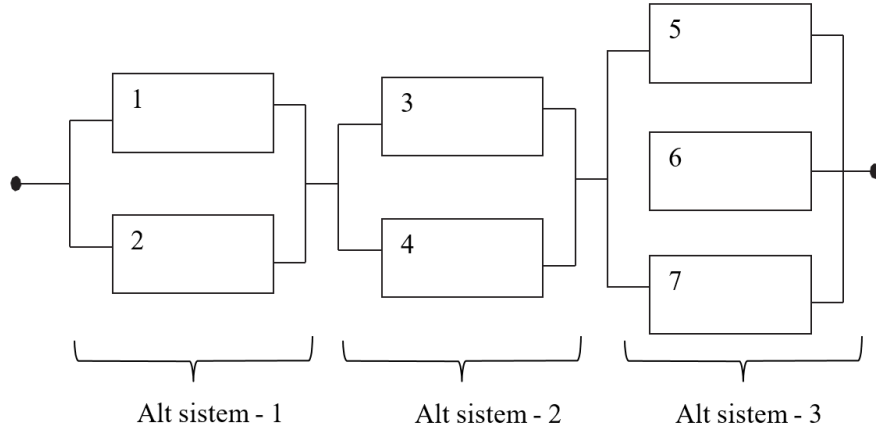
Aşağıda Şekil 2.3'te örnek bir güvenirlik blok diyagramı verilmektedir. Görüldüğü üzere bu diyagramda birbirine hem seri hem de paralal olarak bağlanmış ekipmanlar bulunmaktadır.



Şekil 2.3. Güvenirlik blok diyagramı örneği

Kompleks sistemler genellikle birbirine paralel bağlı ekipmanlardan oluşan farklı alt sistemlerin seri olarak bağlanması ile modellenirler.

Şekil 2.4’de seri-paralel bağlı bir sisteme ilişkin örnek bir güvenirlilik blok diyagramı verilmiştir. Bu sistemde birbirine seri olarak bağlanmış 3 alt sistem bulunmaktadır. Alt sistemdeki ekipmanlar ise birbirlerine paralel olarak bağlanmıştır.



Şekil 2.4. Seri-Paralel bağlı sistem güvenirlilik blok diyagramı

Seri-Paralel sistemlerde güvenirlilik Denklem (2.18)’de verildiği şekilde hesaplanmaktadır (Elsayed, 2012).

$$R_{sp}(t) = \prod_{j=1}^s R_j(t) = \prod_{j=1}^s \left(1 - \prod_{i=1}^{m_j} (1 - r_{ij}(t)) \right) \quad (2.18)$$

Denklem (2.18)’de s alt sistem sayısını, m_j j . altsistemdeki bileşen sayısını, $R_j(t)$ j . alt sisteminin güvenirliliğini ve $r_{ij}(t)$ j . alt sistemdeki i . bileşenin güvenirliliği ifade

etmektedir. Şekil 2.4'te verilen örnek model için; $s = 3$, $m_1 = 2$, $m_2 = 2$ ve $m_3 = 3$ olmaktadır.

Literatürde $k:n$ yedekli (k -out of- n) olarak adlandırılan sistemler; birden fazla ekipman veya bileşenin, belirli bir hedefin sağlanması için gereken işlevselliği sürdürmek amacıyla yedekli olarak kullanıldığı sistemlerdir. Bu sistemler genellikle güvenilirlik ve sürekli çalışma gerektiren kritik sistemlerde kullanılır. $k:n$ yedekli sistemler, n adet bileşenden oluşur ve bunlardan en az k tanesi aynı anda aktif olmaktadır. Eğer bir bileşen arızalanırsa veya hatalı çalışırsa, diğerleri sistem işlevselliğini sürdürmek için devreye girer. Bu sistemler, arıza toleransı sağlamak, sistem güvenilirliğini artırmak ve kesintisiz çalışmayı sağlamak amacıyla kullanılmaktadır.

$k:n$ yedekli sistemlerde; soğuk yedeklilik, sıcak yedeklilik ve ılık yedeklilik olmak üzere üç tip yedeklilik stratejisi bulunmaktadır (Elsayed, 2012). Soğuk yedeklilik (cold standby), sistemde etkin olmayan bileşenlerin sıfır arıza oranına sahip olduğu durumları ifade etmektedir. Soğuk yedekli sistemlerde, tüm yedekli bileşenler çevrimdışı durumdadır. Özellikle tamir edilebilir sistemlerde, yedek parçalar soğuk yedek üniteler olarak kabul edilmekte olup, bir arıza durumunda sistemin işleyişini en hızlı şekilde geri sağlamak için arızalı bileşen yedek ünite ile değiştirilmektedir. Sıcak yedeklilik (hot standby) durumunda ise, etkin olmayan bileşenlerin etkin bileşenlerle aynı arıza oranına sahip olup, bu durum aynı zamanda aktif yedeklilik olarak da adlandırılır. Sıcak yedekli sistemlerde, sistemdeki yükün tamamı n bileşene aynı anda dağıtıldığı tüm ekipmanlar aktif çalışma durumundadır. Ilık yedeklilik (warm standby), etkin olmayan bileşenlerin soğuk ve sıcak bekleme durumları arasında bir arıza oranına sahip olduğu durumları göstermekte olup bu durum durağan arıza oranı (dormant failure rate) olarak adlandırılır. Ilık yedekli sistemlerde ise sadece k adet bileşen aktif durumda bulunmakta olup sistemdeki yükü üstlenmektedir. $n - k$ adet bileşen ise çevrimiçi durumda bulunmakta ve yükü aktif olarak paylaşmamaktadır. Sıcak ve soğuk bekleme durumları, ılık beklemenin özel durumlarıdır (Jin, 2018).

Aktif yedekli $k:n$ sistemlerde; kullanılan bileşenler özdeş ve bağımsız oldukları göz önüne alındığında, güvenilirlikleri binom dağılımı gösterir ve sistem güvenilirlik fonksiyonu Denklem (2.19)- (2.21)'de verildiği şekilde ifade edilirler (Birolini, 2013).

$$R_1(t) = R_2(t) = \dots = R_n(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.19)$$

$$R(t) = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} (1 - R_i(t))^{n-i} (R_i(t))^i \quad (2.20)$$

$$R_s(t) = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} (1 - e^{-\lambda_o t})^{n-i} (e^{-\lambda_o t})^i \quad (2.21)$$

İlık yedekli $k:n$ sistemlerde ise; tüm bileşenlerin bağımsız ve özdeş dağılımlı olduğunu ve her bir bileşenin ömrünün, aktif operasyonel ekipmanlar için λ_o parametresi ve durağan ekipmanlar için λ_d parametresi ile üstel dağılımı takip ettiği varsayıldığında, sistem güvenilirlik fonksiyonu Denklem (2.22)'de verilen kapalı formda ifade edilir (She & Pecht, 1992).

$$R_s(t) = \frac{1}{(n-k)! \lambda_d^{n-k}} \sum_{i=0}^{n-k} (-1)^i \binom{n-k}{i} \left[\prod_{j=0, j \neq i}^{n-k} (k\lambda_o + j\lambda_d) \right] e^{-(k\lambda_o + i\lambda_d)t} \quad (2.22)$$

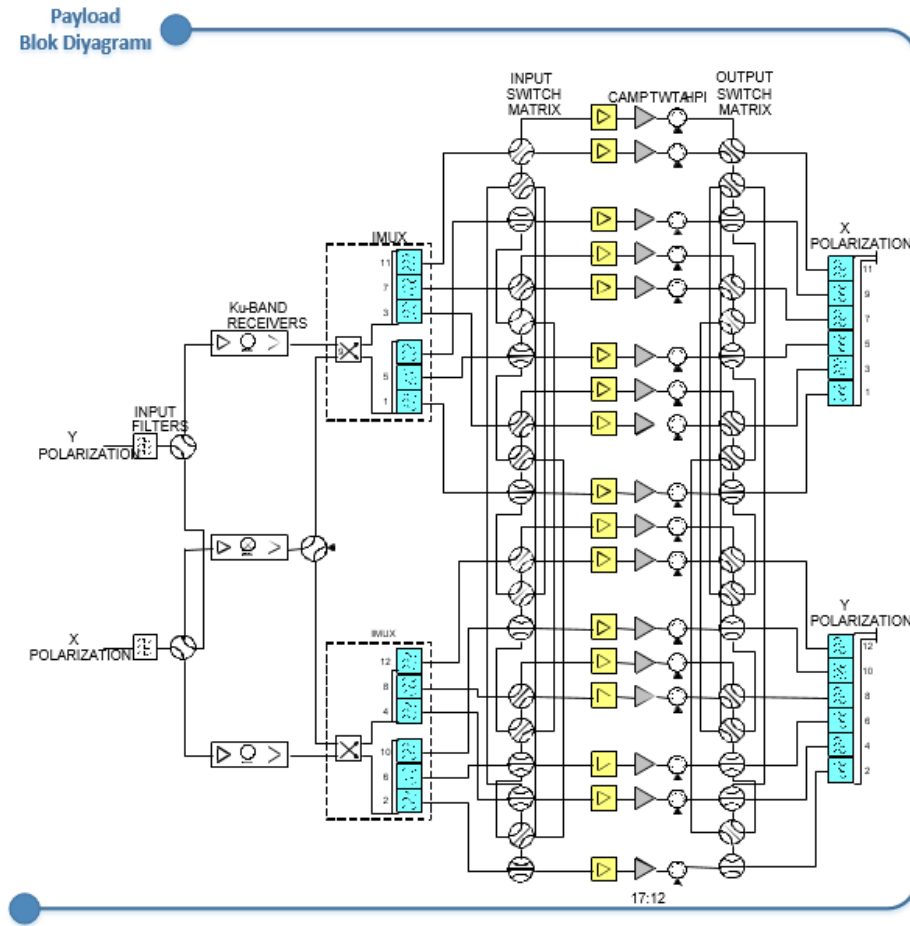
$\lambda_d = 0$ olduğunda ise; sistem güvenilirlik fonksiyonu için ölçek parametresi λ ve şekil parametresi n olan Gama Dağılımı ile Denklem (2.23)'te verilen ifade elde edilmektedir.

$$R_s(t) = e^{-k\lambda t} \sum_{j=0}^{n-k} \frac{(k\lambda t)^j}{j!} \quad (2.23)$$

2.4. Haberleşme Uydularında Güvenirlik

Uydu sistem mimarisinde, ilgili alt sistemleri birbirine seri bağlı olarak bulunmaktadır. Uyduyu oluşturan her bir alt sistem ise, sistem düzeyinde güvenilirlik gereksinimlerini karşılamak için gerekli yedeklilik yaklaşımına göre paralel bağlanan ekipman zincirlerinden oluşmaktadır. Bu bakış açısıyla, uydular literatürde kullanılan $k:n$ yedekli sistemler olarak tanımlanabilir.

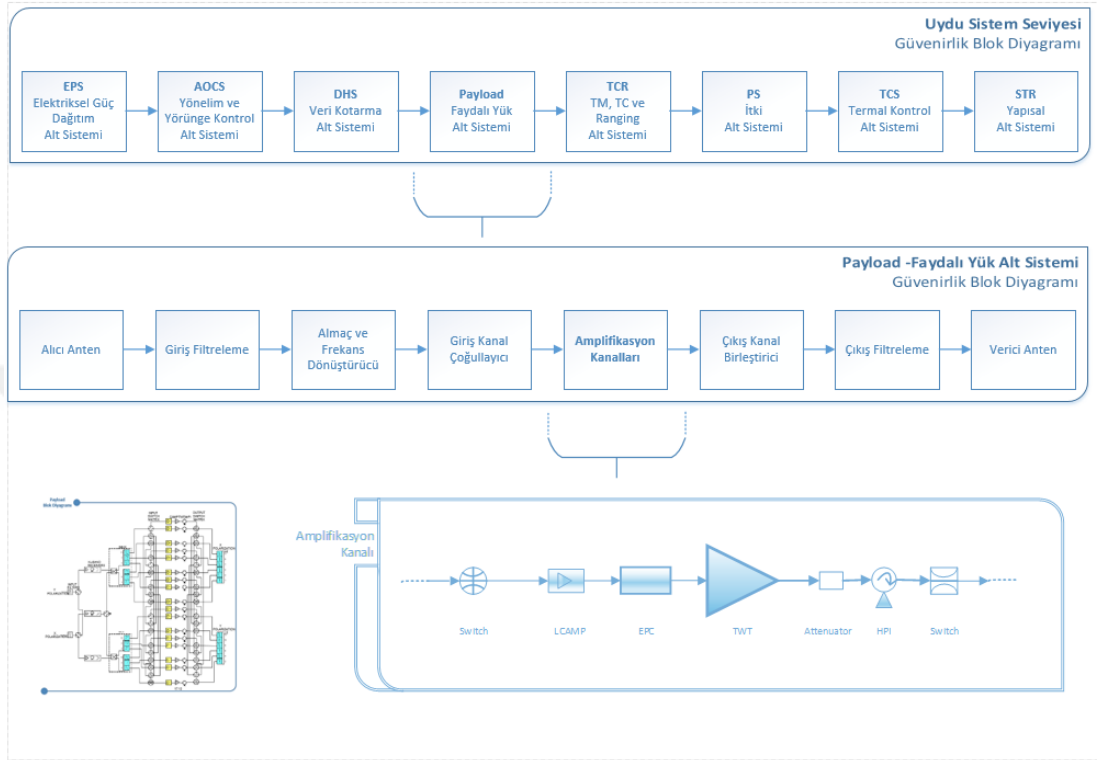
Tez çalışması kapsamında incelenen haberleşme uydusunun farklı ekipman serilerinden oluşan örnek bir faydalı yük fonksiyonel blok diyagramı Şekil 2.5'te verilmektedir. Bu blok diyagramda standart bir haberleşme uydusu faydalı yük modülünü oluşturan bileşenler (Giriş Test Bağlaştırmacısı, Giriş Filtresi, Dalga Kılavuzu Anahtarları, Koaksiyal Kablo Anahtarları, Almaçlar, Frekans Düşürücüler, Kanal Filtreleri, Giriş Kanal Çoklayıcıları, Kanal Amplifikatörleri, Yüksek Güçlü İzolatör ve Çıkış Kanal Çoklayıcıları) birbirine seri ve paralel bağlı olarak bulunan ekipman zincirleri olarak modellenmiştir. Bu blok diyagramda, uydu tasarımında, sistem entegrasyonunda ve performans analizinde kullanılan uydu faydalı yük modülünün genel yapısını ve farklı bileşenler arasındaki ilişkiler görselleştirilmiştir.



Şekil 2.5. Uydu faydalı yük modülü blok diyagramı

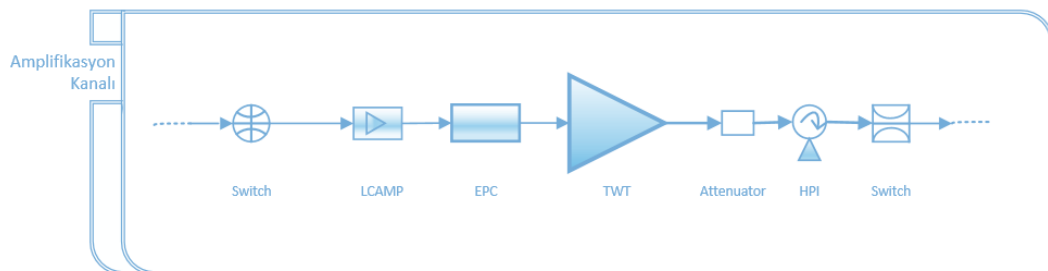
Söz konusu haberleşme uydu sistem seviyesine ve faydalı yük alt sistemine ilişkin güvenilirlik blok diyagramları Şekil 2.6'da verilmektedir. Güvenirlik blok diyagramları

uydu sistemlerinin güvenilirliğini analiz etmek, hata toleransını artırmak ve sistem performansını analiz etmek için kullanılan önemli araçlardır. Sistem bileşenleri arasındaki ilişkilerin görselleştirilmesi, tasarım sürecinde güvenilirlik stratejilerinin uygulanmasına da yardımcı olmaktadır.



Şekil 2.6. Uydu sistem seviyesi ve faydalı yük alt sistemi güvenilirlik blok diyagramları

Faydalı yük alt sisteminde, yüksek hata oranına ve yüksek güç tüketimine sahip amplifikasyon kanallarına ilişkin fonksiyonel blok diyagramı Şekil 2.7'de verilmektedir. Bu kanalların sayısı müşteri isterlerine ve uydunun büyüklüğüne bağlı olarak arttırılabilmektedir.



Şekil 2.7. Amplifikasyon kanalları blok diyagramı

Müşteri isterleri doğrultusunda şekillenen uydu sistem seviyesi güvenilirlik değeri, ticari haberleşme uyduları sektöründe genellikle 0,7 ile 0,8 arasında tanımlanmaktadır. Uydu üretici firmalar, müşterinden gelen üst düzey sistem seviyesi isterini kullanarak, öncelikle servis ve faydalı yük modülleri seviyesinde alt sistemlere güvenilirlik tahsisinde bulunmaktadır. Ardından herbir ilgili alt sisteme ve ekipmana doğru isterler kırılarak tasarım ve analiz döngüleri için hedef değerler belirlenmektedir. Bir haberleşme uydusunda sistem seviyesi güvenilirlik isterinin 0,8 olduğu durumda servis modülü ile faydalı yük modülleri için yapılan güvenilirlik tahsisine ait bir örnek Çizelge 2.2’de verilmiştir. Görüldüğü üzere, asgari 0,8 olarak verilen sistem seviyesi güvenilirliğine erişmek için; faydalı yük modülünün güvenciliği 0,9355 ve servis modülü güvenciliğinin ise 0,8555 olduğu bir yaklaşım ile erişilebilmektedir.

Çizelge 2.2. Uydu sistem seviyesi örnek güvenilirlik tahsisi

Uydu Güvenirlik	
<i>Servis Modülü</i>	0,8555
<i>Faydalı Yük Modülü</i>	0,9355
Sistem	0,8003

Söz konusu uydu sistemi için altsistemler seviyesinde güvenilirlik tahsislerine ilişkin örnek değerler ise Çizelge 2.3’te verilmektedir.

Çizelge 2.3. Uydu alt sistem örnek güvenilirlik tahsisi

Alt Sistem Güvenirlik Tahsisi		
<i>Servis Modülü</i>	Elektriksel Güç Alt Sistemi - EPS	0,9700
	Yörünge ve Konum Kontrol Alt Sistemi - AOCS	0,9500
	TM, TC ve Uzaklık Ölçüm Alt Sistemi - TCR	0,9950
	Veri Kotarma Alt Sistemi - DHS	0,9600
	İtke Alt Sistemi - PS	0,9900
	Termal Kontrol Alt Sistemi - TCS	0,9900
	Yapısal Alt Sistemi - STR	0,9990
Servis Modülü Toplam		0,8575
<i>Faydalı Yük Modülü</i>	Misyon-1 (Ku Band)	0,9550
	Misyon-2 (X Band)	0,9950
	Misyon-3 (Ka/C Band)	0,9850
Faydalı Yük Modülü Toplam		0,9360
Sistem Toplam		0,8026

Sistem ve alsistem seviyesinde yapılan bu tahsisler neticesinde, her bir altsistem ve sonrasında ekipman seviyesine kadar indirgenecek hedef güvenilirlik değerleri oluşmaktadır. Altsistem tasarımcıları için sağlanması gereken bu hedef değerler tasarım aşamalarında ve yapılan analizlerde dikkate alınmaktadır.



3. TEK AMAÇLI GÜVENİRLİK OPTİMİZASYON MODELİ

Uydu tasarımı, çok disiplinli mühendislik uzmanlığı gerektiren karmaşık ve yinelemeli bir süreçtir. Uydu tasarımında optimum noktaya, görev gereksinimleri mümkün olan en düşük kütle, en yüksek güvenilirlik değeri ve en düşük maliyetle ulaşıldığı kabul edilir (Hassan & Crossley, 2001). Kavramsal uydu tasarımında çoğu zaman sistematik bir yaklaşım mevcut değildir. Bu tip durumlarda, müşteri gereksinimleri uygun maliyetli bir çözümle karşılayan uygun bir tasarıma ulaşmak için deneme yanılma yoluyla çeşitli konfigürasyonlar değerlendirilir. Yinelemeli şekilde yapılan bu denemeler hem önemli ölçüde zaman almaktadır hem de optimum tasarımı garanti edemezler.

Bu bölümde, uydu güvenilirlik optimizasyonu için geliştirilen iki aşamalı bir çözüme dayanan yaklaşım anlatılmaktadır. Uydu tasarımındaki endüstriyel uygulamalarda karşılaşılan yinelemeli ve zaman alıcı olan yaklaşıma alternatif olarak önerilen sistematik yöntemle; maliyet, yedek ekipman sayısı ve ekipman güç tüketimine ait kısıtları göz önünde bulundurularak en düşük maliyetle uydu güvenilirliğinin optimizasyonu hedeflenmiştir. Önerilen çözüm yaklaşımı ve bu kapsamda geliştirilen doğrusal olmayan programlama modeli ilerleyen bölümlerde detaylandırılmaktadır.

3.1. Problem ve Model Tanımı

Bu tez çalışması kapsamında, uydu üzerindeki kısıtlı kaynakları dikkate alarak optimum yedeklilik tahsisi yoluyla güvenilir ve uygun maliyetli bir jeosenkron haberleşme uydusunun tasarlanması hedeflenmektedir.

Bir haberleşme uydusu, faydalı yük modülü (veya iletişim modülleri: antenler ve tekrarlayıcı altsistemleri) ve servis modülü (ilgili diğer alt sistemleri içeren) olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır. Tekrarlayıcı alt sistemleri, iletişim sinyalleri üzerinde bir dizi işlevi yerine getiren çeşitli elektronik ekipmanlardan oluşur. Tekrarlayıcı alt sistemleri, faydalı yük frekans bandı içindeki alt bantlara ayrı ayrı

tahsis edilmiş belirli kanallardan (aynı zamanda transponder olarak da adlandırılır) oluşmaktadır (Maral & Bousquet, 2009). Söz konusu tekrarlayıcı alt sistemleri; seri bağlı anahtarlar, amplifikasyon üniteleri (Elektronik Güç Düzenleyici-EPC ve Yürüyen Dalga Tüpü-TWT), zayıflatıcı ve yüksek güç izolatörü (HPI) gibi çeşitli aktif ve pasif bileşenlerden oluşmaktadır.

Platform modülünü oluşturan alt sistemler ise; faydalı yük modülünün görevini icra etmesi ve uydunun idamesi için gerekli olan, Konum ve Kontrol Alt Sistemi (AOCS), Uydu Komuta ve Kontrol Alt Sistemi (SCS), Elektrik Güç Alt Sistemi (EPS), Veri İşleme Alt Sistemi (DHS), İtke Alt Sistemi (PS), Termal Kontrol Alt Sistemi (TCS) ve Yapısal Alt Sistem (STR) olarak tanımlanabilir (J. Larson & R. Wertz, 1999). Söz konusu platform alt sistemlerinde, genellikle mimarileri gereği az sayıda ekipman bulunmaktadır. Bu durum birebir yedeklilik gerektirdiğinden, yedeklilik tahsisi açısından bu modülde çok sınırlı iyileştirme fırsatı bulunmaktadır. Bundan dolayı, bu tez çalışması kapsamında, endüstrideki uygulama ve pratiklerde dikkate alınarak, platform alt sistemleri çalışma kapsamına alınmamıştır.

Bu çalışmada ele alınan faydalı yük modülü haberleşme alt sistemleri, yüksek arıza oranları, yoğun güç tüketimi ve ısı dağılımına sahip çok sayıda aktif bileşenden oluşmaktadır. Platform modülü alt sistemleri ile karşılaştırıldığında, faydalı yük alt sisteminde kullanılan aynı türde çok fazla sayıda ekipman bulunmaktadır. Bu nedenle yüksek düzeyde yedeklilik sağlamak mümkün değildir. Herhangi bir ekipmanın arızalanması durumunda yedek havuzdan faydalanılarak fonksiyonelite ve performans kaybı önlenmeye çalışılmaktadır.

Uydu sistem mimarisinde, alt sistemlerin çalışma moduna ve kritikliğine bağlı olarak genellikle aktif yedeklilik gerektiren alt sistemlerde sıcak yedeklilik, pasif yedeklilik gerektiren alt sistemlerde ise ılık yedeklilik kullanılmaktadır. Bu çerçevede, uydu tasarım süreci yedeklilik mimarisinde, aktif yedekli faydalı yük kanalları yüksek önceliğe sahip haberleşme kanalları için, pasif yedekli olanlar ise standart haberleşme kanalları için düşünülebilir.

k:*n* yedeklilik konfigürasyonunda üç alt sistemden oluşan orta büyüklükteki bir haberleşme uydusuna ait güvenilirlik blok diyagramı Şekil 3.1'de verilmiştir. Şekil 3.1'de görüldüğü üzere, Görev Yüğü-1 olarak adlandırılan birinci alt sistem kapsamında, aktif veya pasif yedekli faydalı yük kanalları bulunabilir. Görev Yüğü -2

olarak adlandırılan ikinci alt sistemde ise aktif yedekli faydalı yük kanalları bulunmaktadır. B1 Altsistemi olarak adlandırılan üçüncü alt sistemde ise aktif yedekli ekipmanlar mevcuttur.



$$k_1 : n_1 (k_1 + x_{i_1})$$

$$k_2 : n_2 (k_2 + x_{i_2})$$

$$k_3 : n_3 (k_3 + x_{i_3})$$

Şekil 3.1. SOP model $k:n$ yedekli haberleşme uydusu güvenilirlik blok diyagramı

Önerilen modelin amacı, bahsedilen her bir altsistem için uygun olan yedekliliğin belirlenmesidir. Bu kapsamda, güç tüketimi ve ekipman sayısı kısıtlamaları altında, yedekli ekipman maliyetin en aza indirecek optimum yedekliliği belirlemektir. Yukarıda tanımlanan bu problemi çözmek için aşağıda sunulan matematiksel model önerilmiştir.

$$\min Z = \sum_{i=1}^s x_i c_i \quad (3.1)$$

$$st. \quad \prod_{i=1}^s \sum_{j=k_i}^{k_i+x_i} \binom{k_i+x_i}{k_i} R_i^j (1-R_i)^{k_i+x_i-j} \geq R_{sys_min} \quad (3.2)$$

$$\sum_{i=1}^s x_i \leq n_{max} \quad (3.3)$$

$$n_i^l \leq x_i \leq n_i^u, \quad \forall i \quad (3.4)$$

$$\sum_{i=1}^s x_i P_i \leq P_{red} \quad (3.5)$$

$$x_i \geq 0 \text{ ve tamsayı}, \quad \forall i \quad (3.6)$$

Modelin amacı, Denklem (3.1)'de ifade edildiği şekilde sistemin yedeklilik maliyetinin en azlanmasıdır. İlk kısıt Denklem (3.2), sistem güvenilirliğinin gereken minimum değerden daha büyük olmasını sağlar. Denklem (3.3) ise sistemde bulunmasına izin verilen toplam yedek ekipman sayısının üst sınırını göstermektedir. Denklem (3.4) ise her bir alt sistemdeki yedek ekipman sayısının alt ve üst sınırlarını ifade etmektedir. Yedek ekipmanların kendileri için ayrılan güç kaynağı sınırları içerisinde kalması ise Denklem (3.5) ile sağlanmıştır.

Bu model, Denklem (3.2)'den dolayı doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir. Söz konusu problemi çözmek için daha basit eşdeğer bir tam sayılı model geliştirilmiştir.

3.2. İki Aşamalı Çözüm Yaklaşımı

Önerilen İki Aşamalı Çözüm Yaklaşımı (İAÇY)'nin ilk adımında, ele alınan haberleşme uydusunun her bir alt sistem için aktif ve pasif bileşenleri içeren bir dizi olası ekipman konfigürasyonu tanımlanır. Her konfigürasyonda farklı sayıda yedekli

ekipman bulunur. Bu konfigürasyonların güvenilirliği hesaplanarak her bir konfigürasyona ait bilgiler bir sonraki aşamaya girdi olarak sağlanır.

İkinci aşamada ise önerilen 0-1 tam sayılı programlama modeli (SOP modeli) kullanılarak bir önceki aşamada elde edilen ekipman konfigürasyonları kümesinde kısıtları sağlayan en uygun konfigürasyon seçilir. Yukarıda sunulan modelden farklı olarak karar değişkenleri $x_{i_1}, y_{i_2}, z_{i_3}$ her bir alt sistem için seçilecek uygun konfigürasyonu ifade etmektedir.

$$\text{SOP:} \quad \min Z = \sum_{i_1=1}^{nb_{i_1}} x_{i_1} c_{i_1} + \sum_{i_2=1}^{nb_{i_2}} y_{i_2} c_{i_2} + \sum_{i_3=1}^{nb_{i_3}} z_{i_3} c_{i_3} \quad (3.7)$$

$$\text{st.} \quad \left[\sum_{i_1=1}^{nb_{i_1}} x_{i_1} R_{i_1} \right] \cdot \left[\sum_{i_2=1}^{nb_{i_2}} y_{i_2} R_{i_2} \right] \cdot \left[\sum_{i_3=1}^{nb_{i_3}} z_{i_3} R_{i_3} \right] \geq R_{sys_min} \quad (3.8)$$

$$\sum_{i_1=1}^{nb_{i_1}} x_{i_1} m_{i_1} + \sum_{i_2=1}^{nb_{i_2}} y_{i_2} m_{i_2} + \sum_{i_3=1}^{nb_{i_3}} z_{i_3} m_{i_3} \leq n_{max} \quad (3.9)$$

$$n_{i_1}^l \leq \sum_{i_1=1}^{nb_{i_1}} x_{i_1} m_{i_1} \leq n_{i_1}^u \quad (3.10)$$

$$n_{i_2}^l \leq \sum_{i_2=1}^{nb_{i_2}} y_{i_2} m_{i_2} \leq n_{i_2}^u \quad (3.11)$$

$$n_{i_3}^l \leq \sum_{i_3=1}^{nb_{i_3}} z_{i_3} m_{i_3} \leq n_{i_3}^u \quad (3.12)$$

$$\sum_{i_1=1}^{nb_{i_1}} x_{i_1} m_{i_1} P_{i_1} + \sum_{i_2=1}^{nb_{i_2}} y_{i_2} m_{i_2} P_{i_2} + \sum_{i_3=1}^{nb_{i_3}} z_{i_3} m_{i_3} P_{i_3} \leq P_{red} \quad (3.13)$$

$$\sum_{i_1=1}^{nb_{i_1}} x_{i_1} = 1 \quad (3.14)$$

$$\sum_{i_2=1}^{nb_{i_2}} y_{i_2} = 1 \quad (3.15)$$

$$\sum_{i_3=1}^{nb_{i_3}} z_{i_3} = 1 \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} x_{i_1} &\in \{0,1\}, \quad \forall i_1 \\ y_{i_2} &\in \{0,1\}, \quad \forall i_2 \\ z_{i_3} &\in \{0,1\}, \quad \forall i_3 \end{aligned} \quad (3.17)$$

Önerilen modelin amacı, Denklem (3.7) ile sistemin yedeklilik maliyetini minimize etmektir. Modelde bulunan ilk kısıt Denklem (3.8) ile sistemin güvenilirliğinin gerekli minimum değerden büyük olmasını sağlar. Denklem (3.9) ile (3.12) arasında ifadelerle gösterilen kısıtlar ise seçilen konfigürasyonların alt sistemlerdeki yedek ekipman sayısını için tanımlanan sınırları sağlamasını garanti eder. Denklem (3.13)'te verilen kısıt ise seçilen konfigürasyonların uydu için ayrılan mevcut güç kaynağından fazla tüketim yapmadığını güvence altına almaktadır. Denklem (3.14) ile (3.16) arasında ifade edilen kısıtlar ise her bir alt sistem için mevcut konfigürasyonlardan birinin seçilmesini temin etmektedir. Denklem (3.17) ise söz konusu konfigürasyonların seçilip seçilmediğini ifade etmektedir.

Modeldeki minimum sistem seviyesi güvenilirlik gereksinimi kısıtının Denklem (3.8) doğrusal olmayan bir formda bulunması problemin çözümünü güçleştirmektedir. Bu kısıtın çözümünü kolaylaştırmak için, Denklem (3.18)'de gösterildiği gibi her bir terimin logaritmaları alınarak ayrıştırma yaklaşımı kullanılmıştır;

$$\log \left[\sum_{i_1}^{nb_{i_1}} x_{i_1} R_{i_1} \right] + \log \left[\sum_{i_2}^{nb_{i_2}} y_{i_2} R_{i_2} \right] + \log \left[\sum_{i_3}^{nb_{i_3}} z_{i_3} R_{i_3} \right] \geq \log R_{sys_min} \quad (3.18)$$

Bu haliyle kısıt GAMS tarafından çözülebilecek bir forma dönüştürülmüştür.

3.3. Sayısal Durum Çalışması

İAÇY yaklaşımı ile ulaşılan sonuçlar, endüstride uygulanan pratiklerle ve uzmanların tecrübeleri ile uyumlu olduğu değerlendirilmiştir. Bu yaklaşımla, deterministik yöntemler kullanılarak optimal yedekliliği sağlayan bir çözüme ulaşılmıştır.

Önerilen İAÇY yöntemini test etmek için uydu tasarım parametrelerinin gerçek değerlerinin ölçüldüğü bir sayısal durum çalışması yapılmıştır. Şekil 3.1'de gösterilen alt sistem konfigürasyonunda; Misyon-1, Misyon-2 ve B1 alt sistemleri dikkate alınmıştır. İlk aşamada Misyon-1 alt sistemi için 20:21'den 20:30'a kadar, Misyon-2 alt sistemi için 6:7'den 6:12'a kadar ve B1 alt sistemi için 4:5'den 4:8'e kadar olan konfigürasyonlar oluşturulmuştur. Toplamda 20 farklı alternatif konfigürasyon elde edilmiştir. Bu önceden belirlenmiş konfigürasyonlardaki güvenilirlik değerleri, aktif ve pasif yedekli ekipmanların Bölüm 2.2'de verilen formüller kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.1, Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te; yedekli ekipman sayısı dikkate alınarak oluşturulan her bir alternatif konfigürasyon için ilgili maliyet ve güvenilirlik değerleri verilmektedir.

Çizelge 3.1. k:n yedekli s_{i_1} alt sistemi (standart kanal) model parametreleri
($R_{\text{ekipman}}=0,8884$)

Konf.	Aktif(A)/ Pasif(P)	k	n	m_{i_1} (yedek ekip.)	R_{i_1} (güvenirlilik)	c_{i_1} (maliyet)	P_{i_1} (güç tük.)
1	P	20	21	1	0,3144	750	1
2	P	20	22	2	0,5753	1500	2
3	P	20	23	3	0,7820	2250	3
4	P	20	24	4	0,9053	3000	4
5	P	20	25	5	0,9646	3750	5
6	P	20	26	6	0,9884	4500	6
7	P	20	27	7	0,9966	5250	7
8	P	20	28	8	0,9991	6000	8
9	P	20	29	9	0,9998	6750	9
10	P	20	30	10	1,0000	7500	10
11	A	20	21	1	0,3031	750	50
12	A	20	22	2	0,5484	1500	100
13	A	20	23	3	0,7492	2250	150
14	A	20	24	4	0,8780	3000	200
15	A	20	25	5	0,9470	3750	250
16	A	20	26	6	0,9791	4500	300
17	A	20	27	7	0,9924	5250	350
18	A	20	28	8	0,9975	6000	400
19	A	20	29	9	0,9992	6750	450
20	A	20	30	10	0,9998	7500	500

Çizelge 3.2. k:n yedekli s_{i_2} alt sistemi (öncelikli kanal) model parametreleri
($R_{\text{ekipman}}=0,8943$)

Konf.	Aktif(A)/ Pasif(P)	k	n	m_{i_1} (yedek ekip.)	R_{i_1} (güvenirlilik)	c_{i_1} (maliyet)	P_{i_1} (güç tük.)
1	A	6	7	1	0,5114	750	50
2	A	6	8	2	0,8359	1500	100
3	A	6	9	3	0,9560	2250	150
4	A	6	10	4	0,9898	3000	200
5	A	6	11	5	0,9979	3750	250
6	A	6	12	6	0,9996	4500	300

Çizelge 3.3. k:n yedekli s_{i_3} alt sistemi (B1 altsistemi) model parametreleri
($R_{\text{ekipman}}=0,9677$)

Konf.	Aktif(A)/ Pasif(P)	k	n	m_{i_1} (yedek ekip.)	R_{i_1} (güvenirlilik)	c_{i_1} (maliyet)	P_{i_1} (güç tük.)
1	A	4	5	1	0,8768	200	10
2	A	4	6	2	0,9902	400	20
3	A	4	7	3	0,9994	600	30
4	A	4	8	4	1,0000	800	40

Her konfigürasyon için güvenirlilik değerleri MS Excel'de yazılan makrolar aracılığıyla hesaplanmıştır. İkinci aşamada, ilk aşamada elde edilen konfigürasyon bilgisi Denklem (3.7) - (3.18) ile ifade edilen modele girdi olarak sağlanmıştır. Söz konusu model GAMS paket programında Intel Core i7-7600 CPU @ 2.80 GHz ile 0,93 saniyede başarıyla çözülerek optimal bir çözüm elde edilmiştir.

SOP modelin GAMS programı çözümü neticesinde elde edilen sonuçlara ilişkin özet bilgiler Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. SOP modeli İAÇY sonuçları

Alt Sistem	Yedek Ekipman Sayıları	Aktif(A)/Pasif(P)
s_{i_1}	6	P
s_{i_2}	4	A
s_{i_3}	2	A
Amaç Fonksiyon Değeri	7900	

Çizelge 3.4'te görüldüğü üzere, birinci altsitem için 6, ikinci altsitem için 4 ve üçüncü alt sistem için 2 yedek ekipman seçilmiştir. Bu durumda sistem güvenirlilik değeri 0,9857 olmuş ve sistemin yedeklilik maliyeti 7900 olarak hesaplanmıştır. Önerilen model, birinci alt sitem için aktif ve pasif ekipmanların bulunduğu konfigürasyonlardan pasif yedekliliği seçmiştir.

Önerilen yaklaşım, güvenirlilik gereksinimlerini karşılayan ve aynı zamanda maliyet etkin bir şekilde tasarlanmış sistemlerin elde edilmesine yönelik sistematik bir yaklaşım sunmaktadır. Bu sistematik yaklaşım, özellikle büyük ölçekli ve karmaşık mühendislik projelerinde, sistem performansının ve güvenirliliğinin uzun süreler boyunca garanti altına alınması gereken durumlarda büyük fayda sağlamaktadır.

Önerilen yöntem, tasarım sürecine güvenilirlik faktörlerini dâhil ederek, elde edilen sistemlerin yalnızca maliyet etkin olmasını değil, aynı zamanda gereken güvenilirlik seviyelerini de karşılayabilmesini sağlar. Güvenilirlik ile maliyet arasındaki dengeyi sağlayarak, tasarımcıların bilinçli kararlar almasını ve gerekli iyileştirmeleri yapmasına imkân sağlamaktadır.



4. ÇOK AMAÇLI GÜVENİRLİK OPTİMİZASYON MODELİ

Bu bölümde, uydu güvenilirlik optimizasyonu için önerilen MOP modeli tanıtılmıştır. Önerilen model sistem güvenirligi, güç tüketimi ve maliyet amaç fonksiyonlarını birlikte eş zamanlı olarak dikkate almaktadır. Söz konusu amaçlar doğası gereği birbirleriyle çelişmekte olup bu durum karar vericiler için durumu güçleştirmektedir. Bu çerçevede önerilen MOP modelinin, gerçek durumu daha doğru yansıtabileceği düşünülmektedir.

Çok amaçlı bir problem Denklem (4.1)-(4.3)'te verildiği şekilde tanımlanabilir (Marler & Arora, 2004).

$$\min F(x) = [F_1(x), F_2(x), \dots, F_k(x)]^T \quad (4.1)$$

$$g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4.2)$$

st.

$$h_l(x) \leq 0, \quad l = 1, 2, \dots, e \quad (4.3)$$

Burada k amaç fonksiyonu, m eşitsizlik kısıtı ve e eşitlik kısıtı bulunmaktadır. Birden fazla amaç fonksiyonunun aynı anda ele alındığı MOP'da temel amaç, bu çelişkili hedefleri en iyi şekilde dengelemek ve mümkün olan en iyi çözümleri bulmaktır. Bu durumda, bir çözümün tüm amaç fonksiyonlarını aynı anda en iyi duruma getirmesi beklenemez. Bu durumda genellikle bir amaç fonksiyonunun iyileştirilmesi diğer amaç fonksiyonunun kötüleşmesine yol açmaktadır. Zira çok amaçlı optimizasyonda ele alınan amaç fonksiyonları, birbirleriyle çelişen yapıda bulunmaktadır.

MOP gerçek hayattaki karmaşık problemleri modellemek ve optimize etmek için kullanılan bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, birden fazla amaç fonksiyonunun ve/veya amacın aynı anda dikkate alınması gereken durumlarda karar vericilerine değerli bir

araç sağlar. Bu sayede karar vericilere daha tutarlı ve dengeli çözümler sunabilmektedir.

MOP'da sıklıkla kullanılan Pareto optimalite kavramı, Vilfredo Pareto tarafından geliştirilmiş olup Ekonomi, Mühendislik, Yöneylem Araştırması gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Pareto optimalite, bir çözüm herhangi bir amaç fonksiyonunu iyileştirirken diğer bir amaç fonksiyonunun kötüleştirdiği durumu ifade eder. Yani, bir Pareto optimal çözüm, diğer bir Pareto optimum çözümlerle kıyaslandığında tüm amaç fonksiyonlarında aynı anda iyileşme olmadığı gözlemlenir. Pareto yüzey (Pareto front) olarak adlandırılan çözüm kümesi, tüm Pareto optimal çözümleri içerir. Pareto optimal çözümler, çelişkili hedeflere sahip problemlerde karar vericilere seçenekler sunar. Bu sayede karar vericilere en uygun çözümü seçmeleri için bir referans noktası sağlanır.

Uzlaşık çözüm ise, ütopyik/ideal noktaya mümkün olduğunca yakın olan tek bir çözümdür (Marler & Arora, 2004). İdeal nokta F^0 , her i . amaç fonksiyonu için ulaşılamaz bir nokta durumundadır, $F_i^0 = \text{minimum} \{F_i(x) \mid x \in X\}$.

Bu bölümde önerilen MOP modeli, uydu erken tasarım aşamasında maliyet, güç tüketimi ve sistem güvenilirliği parametreleri arasındaki ödünleşmeyi dikkate almaktadır. Önerilen MOP modelini çözmek için, CP yöntemi kullanılmıştır. CP ile çözülecek MOP modelinin NP-Zor özellikleri ve doğrusal olmayan yapısı nedeniyle, meta-sezgisel yöntemlerden SA algoritması kullanılmıştır.

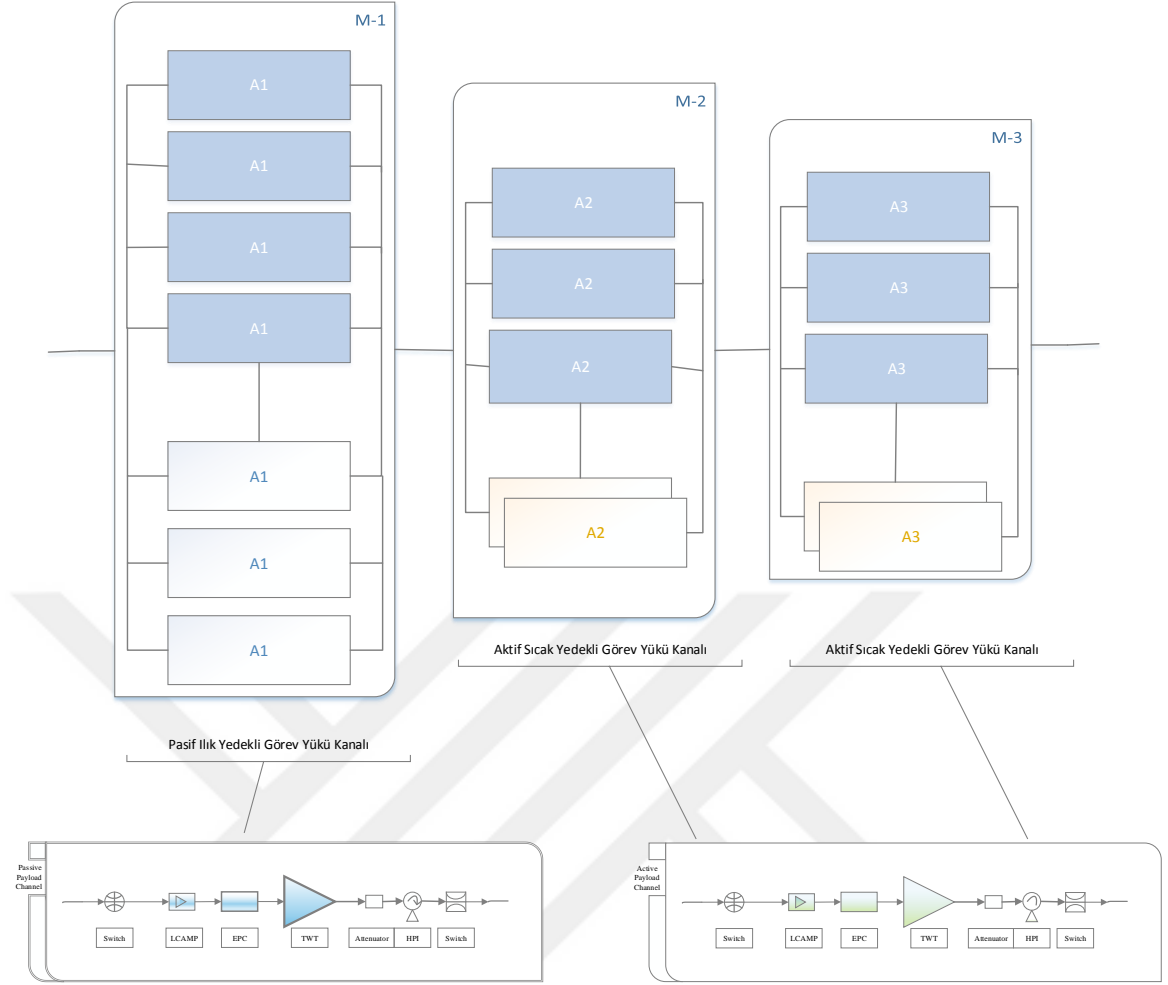
CP yöntemi literatürde birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. Abrishamchi vd. (2005), çalışmasında içme suyu tüketici eğilimleri analizinde sıralama yöntemine dayalı bir çözüm yöntemi olarak CP yöntemini önermiştir. MJ & SP (2000), Zarghami (2006) ve Fattahi & Fayyaz (2010)'da su yönetimi araştırmaları için CP yöntemini kullanmışlardır. Poff vd. (2021), çalışmasında niceliksel ve niteliksel olarak birden çok faktörü içeren bir orman ekosistemi arazi yönetimi planlama süreci analizi için Çok Amaçlı Karar Verme yöntemi olarak CP yöntemini uygulamıştır. Ngo vd. (2022), ise araç yönlendirme problemine CP yöntemine dayalı bir yaklaşım önermiştir. Ngo (2021) ise çalışmasında öğretim elemanı zaman çizelgeleme problemini de CP yöntemi ile çözmüştür. Osmani, Kochov, & Ilazi (2021), makalesinde elektrik üretim sistemindeki maliyeti ve CO2 emisyonları gibi birbiriyle çelişkili amaçları ele almak için CP yöntemini kullanmıştır.

Literatürde CP yöntemi, güvenilirlik ve yedeklilik optimizasyon problemleri kapsamında; Mahapatra (2009), Sadjadi, Tofigh ve Soltani (2014) ve Soltani, Sadjadi ve Tavakkoli-Moghaddam (2015) çalışmalarında kullanılmıştır. Uydularda güvenilirlik optimizasyonu için ise CP yöntemi daha önce kullanılmamıştır. Bu bölümde sunulan MOP modeli hem literatürde kullanılanlarda farklı amaç fonksiyonları içermesi nedeniyle hem de uydu özelinde geliştirilmiş olması nedeniyle özgündür. İlerleyen bölümlerde uydu özelinde geliştirilen bu model ve kullanılan çözüm yaklaşımları tanıtılmıştır.

4.1. Problem ve Model Tanımı

Bölüm 2.3. ve 2.4.'te detaylı olarak anlatıldığı üzere; uydu sistem mimarisinde, ilgili alt sistemleri birbirine seri bağlı olarak bulunmaktadır. Her bir alt sistem ise, sistem düzeyinde güvenilirlik gereksinimlerini karşılamak için gerekli yedeklilik yaklaşımına göre paralel bağlanan ekipman zincirlerinden oluşmaktadır. Bu bağlamda, paralel bağlı ekipman konfigürasyonları, literatürde kullanılan k:n yedekli sistemler olarak tanımlanabilmektedir.

Şekil 4.1'de sunulan MOP modeli kapsamında ele alınan problemde; M-1 alt sistemi için 32:33'ten 32:48'e, M-2 alt sistemi için 16:17'den 16:26'ya ve M-3 alt sistemi için 10:11'den 10:18'e kadar olan endüstride büyük uydu sınıfına giren ekipman konfigürasyonları dikkate alınmıştır.



$$k_1 : n_1 (k_1 + x_{i_1})$$

$$k_2 : n_2 (k_2 + x_{i_2})$$

$$k_3 : n_3 (k_3 + x_{i_3})$$

Şekil 4.1. MOP modeli $k:n$ yedekli haberleşme uydusu güvenilirlik blok diyagramı

Geliştirilen MOP modeli; tanımlanan kaynak kısıtları dahilinde, sistem düzeyinde tanımlanan güvenilirlik gereksinimlerini optimum sayıda yedeklilik ile karşılanmaya çalışılırken, seçilen alt sistemlerinde yedekli ekipman maliyeti ile güç tüketim değerinin en azlanması ve güvenilirlik değerinin en çoklanması amaçlanmaktadır. Bu problem aşağıda verilen Denklem (4.4)-(4.11) ile gösterilen MOP modeli ile ifade edilmektedir.

$$\text{MOP:} \quad \min g_1(x) = \left(\sum_{i=1}^s x_i c_i \right) \quad (4.4)$$

$$\min g_2(x) = \left(\sum_{i=1}^s x_i P_i \right) \quad (4.5)$$

$$\max g_3(x) = \left(\prod_{i=1}^s \sum_{j=k_i}^{k_i+x_i} \binom{k_i+x_i}{k_i} R_i^j (1-R_i)^{k_i+x_i-j} \right) \quad (4.6)$$

$$\text{st.} \quad \prod_{i=1}^s \sum_{j=k_i}^{k_i+x_i} \binom{k_i+x_i}{k_i} R_i^j (1-R_i)^{k_i+x_i-j} \geq R_{\text{sys_min}} \quad (4.7)$$

$$\sum_{i=1}^s x_i \leq n_{\text{max}} \quad (4.8)$$

$$\sum_{j=k_i}^{k_i+x_i} \binom{k_i+x_i}{k_i} R_i^j (1-R_i)^{k_i+x_i-j} \geq R_{i_min} \quad (4.9)$$

$$\sum_{i=1}^s x_i P_i \leq P_{red} \quad (4.10)$$

$$x_i \geq 0 \text{ ve tamsayı,} \quad \forall i \quad (4.11)$$

Modeldeki birinci amaç fonksiyonu Denklem (4.4) sistem güvenilirlik değerini en çoklarken, ikinci amaç fonksiyonu Denklem (4.5) yedekli birimler nedeniyle sistemin maliyetini en azlamayı, üçüncü amaç fonksiyonu Denklem (4.6) ise güç tüketimini en azlamayı amaçlamaktadır. Denklem (4.7)'de tanımlanan kısıt, sistem güvenilirliğinin gereken minimum değerden büyük olmasını sağlar. Denklem (4.8) ise, sistemdeki yedek ekipman sayısı için izin verilen üst sınırı garanti altına almaktadır. Denklem (4.9)'daki kısıt, her bir alt sistemin güvenilirliğinin istenen minimum değerden daha büyük olmasını sağlar. Denklem (4.10)'daki kısıt, yedek ekipmanlar için güç

kullanımını kısıtlamaktadır. Denklem (4.11)'deki kısıt ise alt sistemdeki yedekli ekipman sayısını gösteren karar değişkenlerinin tamsayı olduğu ifade edilmiştir.

4.2. Uzlaşık Programlama (CP) Yöntemi

CP yöntemi, Zeleny (1973), Yu (1973), Zeleny (1974), Zeleny (1982) ve Yu (1985) tarafından geliştirilen, alternatifler ve ideal nokta olarak adlandırılan bir referans nokta arasındaki mesafeyi en aza indirmek suretiyle en iyi çözümü bulmak için kullanılan bir Çok Kriterli Karar Verme tekniğidir (Escobar & Moreno-Jimenez, 1997).

Global Kriter Metodu olarak da bilinen CP, MOP literatüründe kullanılan yöntemlerdendir. CP'nin temel amacı, karar verici tercihlerine göre ütöpik nokta olarak da adlandırılan ideal çözüm noktasına yakın bir çözüm kümesi aramaktır. Bu amaca ulaşmak için analizde mesafe tabanlı bir fonksiyon kullanılmaktadır (Romer & Rehman, 2003).

CP yöntemi, karar vericinin önceden belirlenmiş tercih verilerine ihtiyaç duymamaktadır. Problem kısıtları ve hedefleri belirlendikten sonra, karar vericilerden herhangi bir sübjektif tercih bilgisi gerektirmez.

CP yönteminde karar verici tercihleri bir yakınlık ölçüsü olarak, her bir çözüm ile ideal nokta arasındaki mesafeyi ölçmek için $L - norm$ olarak ifade edilen Denklem (4.12) ile gösterilmektedir. $L - norm$ CP'de kullanılan amaç fonksiyonlarının ağırlıklarını belirlemek için kullanılan bir norm türünü ifade eder. Bu norm birden fazla amacın optimize edildiği bir uzlaşma çözümünün bulunmasına yardımcı olmaktadır.

$$L_p(x) = \left[\sum_{i=1}^l w_i^p \left| \frac{f_i^* - f_i(x)}{f_i^* - f_i'} \right|^p \right]^{1/p} \quad (4.12)$$

Bu formülasyonda f_i^* ve f_i' ; $f_i(x)$ 'in minimum ve maksimum amaç fonksiyon değerine karşılık gelen ilgili ideal ve anti-ideal değerlerini belirtir. w_i^p parametresi, karar vericinin, i 'inci amaç fonksiyonuna verdiği görelî önemi, p üstel parametresi ise karar vericilerin maksimum sapma ile ilgili hassasiyetini göstermektedir (Fattahi & Fayyaz, 2010). Bu parametreler karar vericinin amaç ve önceliklerine bağlı olarak belirlenebilir.

$L_p(x)$ olarak ifade edilen L – normu, çok boyutlu bir uzayda iki vektör arasındaki mesafenin bir ölçüsüdür. CP yönteminde, genellikle bir amaç fonksiyonunun gerçek ve istenen değerleri arasındaki sapmanın bir ölçüsü olarak kullanılır. L_p mesafesi, p 'nin kuvvetine yükseltilmiş iki vektörün elemanları arasındaki mutlak farkların toplamının p 'inci kökü olarak tanımlanır. p 'nin değeri, L_p mesafesinin türünü belirler ve farklı p değerleri farklı mesafe ölçülerine karşılık gelir. Örneğin; L_1 mesafesi (Manhattan mesafesi veya taksi mesafesi olarak da bilinir) $p = 1$ 'e karşılık gelir. İki vektörün elemanları arasındaki mutlak farkların toplamıdır. L_2 mesafesi (Öklid mesafesi olarak da bilinir) $p = 2$ 'ye karşılık gelir. İki vektörün elemanları arasındaki farkların karelerinin toplamının kareköküdür. L_∞ uzaklığı (Chebyshev uzaklığı veya maksimum norm olarak da bilinir) ise, $p = \infty$ 'a karşılık gelir. İki vektörün elemanları arasındaki mutlak farkların maksimumudur. L_p mesafesi daha sonra birden fazla çelişkili hedefi karşılayan ödünleşilmiş çözümleri bulmak için optimizasyon sürecinin bir parçası olarak minimize veya maksimize edilir.

En düşük $L_p(x)$, ideal noktaya en yakın mesafeye karşılık geldiği için alternatifler arasında en iyi uzlaşmış çözümdür. Görüleceği üzere, w_i ağırlık ve p parametresinin değerlerine bağlı olarak, elde edilen çözüm değişebilmektedir. Bu parametrelerin farklı değerleri kullanılarak, karar vericinin tercih ve önceliklerine bağlı olarak en uygun çözüm kümeleri için duyarlılık analizinin yapılması mümkün olmaktadır.

Bölüm 4.1 'de sunulan MOP modelinde, CP metodunu kullanılarak, Denklem (4.4) ile (4.6)'da ifade edilen amaç fonksiyonları birleştirilerek, Denklem (4.13)'te verilen amaç fonksiyonu elde edilmektedir.

$$\min Z = \left\{ W_1^p \left[\frac{(\sum_{i=1}^s x_i c_i) - C_{i^*}}{C'_i - C_{i^*}} \right]^p + W_2^p \left[\frac{(\sum_{i=1}^s x_i P_i) - P_{i^*}}{P'_i - P_{i^*}} \right]^p + W_3^p \left[\frac{R_i^* - \left(\prod_{i=1}^s \sum_{j=k_i}^{k_i+x_i} \binom{k_i+x_i}{k_i} R_i^j (1 - R_i)^{k_i+x_i-j} \right)}{R_i^* - R'_i} \right]^p \right\}^{1/p} \quad (4.13)$$

Bireysel sapmalar arasındaki en yüksek sapma, $p \rightarrow \infty$ olduğundan minimize edilir. Bu durumda $p = \infty$ için en iyi çözüm, Denklem (4.14) ile (4.17) arasında verilen doğrusal programlama denklemleri ile ifade edilmektedir (Romer & Rehman, 2003).

$$\min Z = d \quad (4.14)$$

$$st. \quad W_1 \frac{(\sum_{i=1}^s x_i c_i) - C_i^*}{C_i' - C_i^*} \leq d \quad (4.15)$$

$$W_2 \frac{(\sum_{i=1}^s x_i P_i) - P_i^*}{P_i' - P_i^*} \leq d \quad (4.16)$$

$$W_3 \frac{R_i^* - \left(\prod_{i=1}^s \sum_{j=k_i}^{k_i+x_i} \binom{k_i+x_i}{k_i} R_i^j (1 - R_i)^{k_i+x_i-j} \right)}{R_i^* - R_i'} \leq d \quad (4.17)$$

Denklem (4.7) - (4.11)

CP ile ele alınan yukarıda sunulan MOP modeli $p = 1$ ve $p = \infty$ dışındaki p değerleri için doğrusal olmadığında kesin çözüm yöntemleri ile çözümü mümkün değildir. Bu nedenle sonraki bölümde sunulan SA algoritması kullanılarak önerilen model çözülmüştür.

4.3. Tavlama Benzetimi (SA) Algoritması

Meta-sezgisel yöntemler, doğal olgulardan veya topluluklardaki davranışlardan esinlenerek tasarlanmış ve karmaşık optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan bulgusal tabanlı yöntemlerdir. Bu yöntemler, doğal olaylardaki kolektif akıllılık ve adaptasyon özelliklerinden esinlenerek, optimize edilmesi zor problemleri çözmeye çalışırlar. Meta-sezgisel yöntemler, NP-Zor optimizasyon problemlerinde kısmi arama algoritmaları ile yeterince iyi bir çözüm sağlayabilmek için tasarlanmış üst düzey buluşsal algoritmalar olarak ön plana çıkmaktadırlar (C Blum, 2003).

Literatürde Meta-sezgisel yöntemler Popülasyon Tabanlı, Yerel Arama Tabanlı ve Doğal Sürü Tabanlı şekilde sınıflandırılabilirler.

Popülasyon Tabanlı Yöntemler, bir popülasyon içindeki bireyler aracılığıyla çözüm alanını araştırmaktadır. Popülasyon tabanlı yöntemlerde, bireylerin birlikte çalışması veya etkileşimi, daha iyi çözümleri bulmak için kullanılmaktadır. Örneğin GA ve PSO popülasyon tabanlı yöntemlerdendir. GA, biyolojik evrim prensiplerinden ilham alan bir yöntemdir. Popülasyon tabanlı bir yaklaşım kullanarak, birçok çözüm adayını

genetik operatörlerle birleştirir ve en iyi çözümleri seçmektedir. Parçacık sürüsü optimizasyonu, kuş sürülerinin uçuş davranışından esinlenmektedir. Bu yöntemde, bir çözüm alanında parçacıklar adı verilen bireyler yer almaktadır. Her parçacık, kendi konumu ve hızı aracılığıyla çözüm alanını araştırır. Parçacıklar, kendi başlarına en iyi çözümleri bulurken, topluluk içindeki diğer parçacıklardan ilham alarak daha iyi çözümlere ulaşmaya çalışmaktadırlar.

Yerel Arama Tabanlı Yöntemler, çözüm alanında yerel bir arama stratejisi kullanarak çözümü iyileştirmeye çalışmaktadır. Yerel arama tabanlı yöntemler, bir başlangıç noktasından başlayarak çözüm alanında adım adım ilerler ve en iyi yerel çözümü bulmaya odaklanmaktadır. SA ve TS yerel arama tabanlı yöntemler arasında yer almaktadır. SA yöntemi, metalurjideki tavlama sürecinden esinlenen bir yöntemdir. Başlangıçta yüksek sıcaklıkta başlayan bir süreçte, rastgele çözüm değişiklikleri yapılmaktadır. Sıcaklık azaldıkça, olumsuz çözümlerin kabul edilme olasılığı azalmakta ve açgözlü arama odaklı bir arama gerçekleştirilmektedir. TS yöntemi ise, mevcut çözüm alanında adım adım hareket ederken, geçmişte ziyaret edilen çözümleri ve hareketleri "tabu" listesinde tutarak tekrarlanan adımları önlemektedir. Optimize edilmesi gereken hedef fonksiyonunu iyileştirmek için tabu listesi ve çeşitli hafıza stratejileri kullanılmaktadır.

Doğal sürü tabanlı yöntemler ise popülasyon tabanlı olmaklar beraber, NP-Zor problemleri doğal sürülerin davranışlarından esinlenerek çözmeye çalışmaktadır. Bu yöntemlerde, bireylerin birlikte hareket etmesi ve bilgi paylaşımı yoluyla daha iyi çözümler bulunabilmektedir. Karınca Kolonisi Optimizasyonu ve Arı Kolonisi Optimizasyonu doğal sürü tabanlı yöntemlerdendir. Karınca kolonisi optimizasyonu, gerçek yaşamda karıncaların yiyecek kaynaklarını bulmak için kullandıkları feromon maddesi ve toplu davranışlarından ilham almaktadır. Arı Kolonisi Optimizasyonu ise doğal arı kolonilerinin yiyecek kaynaklarını bulma, eşleşme gibi davranışından esinlenerek geliştirilmiş algoritmalarıdır.

Literatürde kullanılan meta-sezgisel yöntemler incelendiğinde SA yönteminin bazı avantajlar sağladığı değerlendirilmiştir. Bu avantajlardan en önemlisi yerel optimum çözümlerden kaçınma olasılığıdır. SA algoritması, bazen kötü çözümleri kabul etme olasılığına sahip bir mekanizma ile yerel minimumlarda sıkışıp kalmadan daha geniş bir çözüm uzayında arama yapılabilmesini sağlamaktadır. Kabul olasılığı, kötü çözümlerin kabul edilme olasılığının sıcaklıkla birlikte azalması fikrine

dayanmaktadır. Bu sayede, zamanla sıcaklık düşerken daha iyi çözümlere yönelik arayış artar. Diğer bir avantajı ise, çözüm uzayında rastgele arama yaparken küresel optimuma yakınsama ihtimalidir. Yüksek sıcaklıkta başladığında daha fazla keşif yapabilen algoritma, sıcaklık zamanla azaldıkça daha yakın çözümlere yönelmektedir. Bu sayede, SA algoritmasının çözüme yakınsama ve küresel optimuma ulaşma olasılığı yüksek bulunmaktadır. Ayrıca SA yöntemi, diğer meta-sezgisel yöntemlere göre daha basit uygulanabilen bir algoritmadır. İlk başta bir başlangıç çözümü seçilerek ardından iteratif olarak çözüm değişiklikleri yapılmaktadır. Algoritma çözüm alanının matematiksel yapısına veya kısıtlarına bağlı kalmadan uygulanabilir. Bu da SA yönteminin farklı optimizasyon problemlerine kolayca uyarlanabilmesini sağlamaktadır. Bu avantajlarından dolayı bu tez çalışması kapsamında SA yöntemi kullanılmıştır.

SA, cam ve metal üretiminde kullanılan tavlama sürecinden ilham alınan bir algoritmadır. Algoritmanın adı, bir malzemenin fiziksel özelliklerini değiştirmek için ısıtma ve kontrollü soğutmayı içeren bir teknik olan tavlama gelir.

Tavlama, maddeyi yüksek enerjili halden düşük enerjili hale geçirme sürecidir. Yüksek enerji (sıcaklık) durumunda, parçacıklar hareket edebilir veya kendilerini kolayca yeniden düzenleyebildiklerinden farklı konfigürasyonlara geçiş yapabilir. Tavlama işlemindeki temel husus, malzemeyi düşük enerji durumuna getirmek için en iyi şekilde nasıl soğutulacağına belirlenmesidir. Katı çok hızlı soğutulursa, madde yarı kararlı veya optimal olmayan bir konfigürasyonda düzenlenecektir. Buna göre, bir tavlama işlemindeki önemli unsurlardan biri her sıcaklıkta optimum duruma ulaşılması, diğeri ise işlemin soğutulma hızıdır.

Olasılıksal bir arama tekniği olan SA algoritması, farklı türdeki optimizasyon problemlerini çözmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. İlk olarak Metropolis vd. (1953) tarafından önerilen SA algoritması, sonrasında Kirkpatrick vd. (1982) tarafından yinelemeli bir optimizasyon yöntemi olarak tanıtılmıştır (Uysal & Ozcan, 2019).

Literatürde SA yöntemi; güvenilirlik ve yedeklilik optimizasyon problemleri kapsamında (Kim, Bae, & Park, 2004), (Zafiroopoulos & Dialynas, 2004), (Kim, Bae, & Park, 2006) ve (Chambari, Rahmati, & Najafi, 2012) çalışmalarında kullanılmıştır.

SA yöntemi, belirli bir fonksiyonun global optimumuna yaklaşmak için kullanılan olasılıksal algoritması sayesinde özellikle geniş bir arama uzayında global optimizasyona yaklaşmak için kullanılan meta-sezgisel bir yöntem olarak ön plan çıkmaktadır. SA yöntemi, yüksek kaliteli çözümler elde etmek için sistematik olarak yerel optimumun üstesinden gelme konusunda tutarlı bir yetenek göstermektedir. Genellikle, arama uzayının kesikli olduğu problemlerde (örneğin gezgin satıcı problemi) sıklıkla kullanılır.

SA yöntemi, kesin algoritmaların başarısız olduğu çok zor hesaplamalı optimizasyon problemleri için kullanılmaktadır. Genellikle global minimuma yaklaşık bir çözüm sağlayarak, birçok pratik sorun için tatmin edici sonuçlar verebilmektedir.

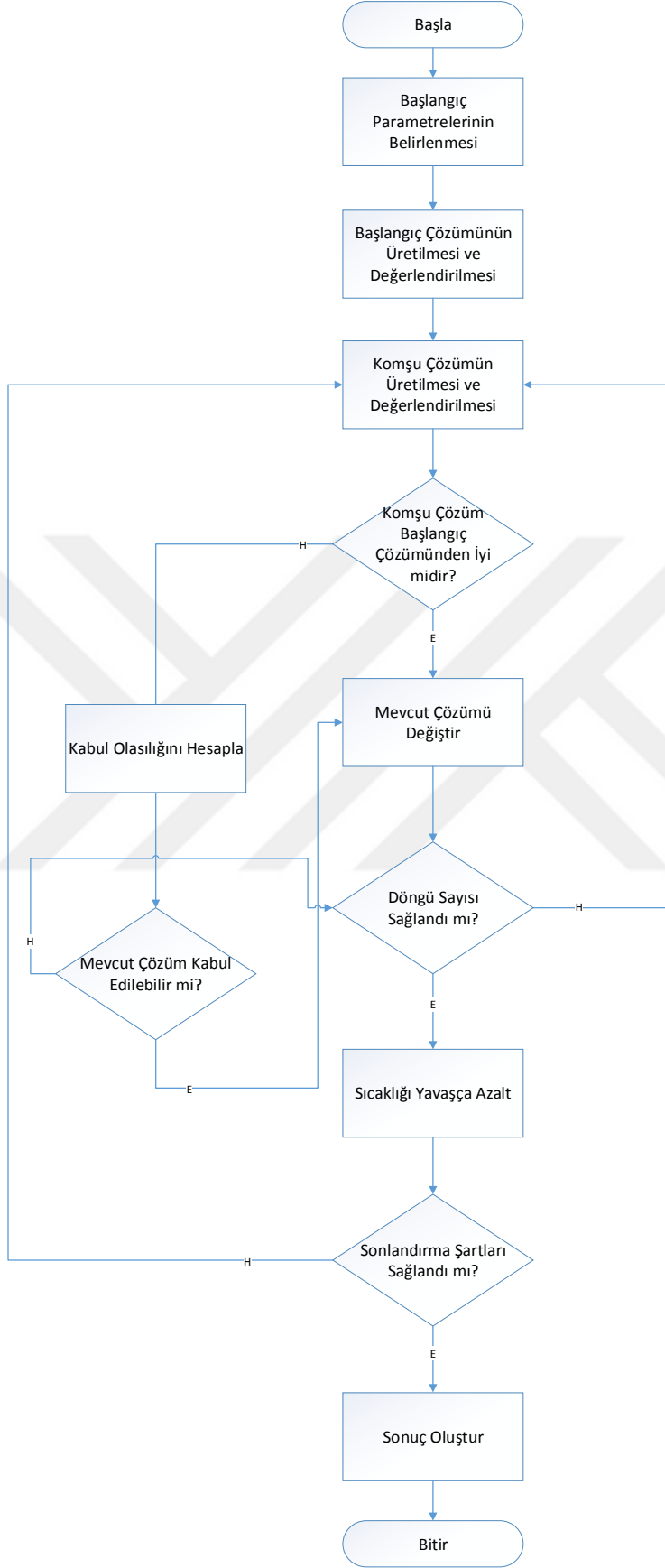
SA algoritmasında uygulanan yavaş soğutma kavramı, çözüm uzayı keşfedildikçe daha kötü çözümlerin kabul edilme olasılığındaki yavaş bir azalma olarak yorumlanır. Daha kötü çözümleri kabul etmek, arama uzayında daha kapsamlı bir aramaya izin verir. Genel olarak SA algoritmasında sıcaklık, kademeli olarak bir başlangıç değerinden sıfıra düşürülür. Her adımda, algoritma bir komşu çözüm üretir ve bu çözümün kalitesini ölçer. Bu çözümün kalitesine göre eldeki çözümle veya komşu çözümle aramaya devam edilir.

SA yönteminde, optimizasyon sürecine başlamadan önce, bir başlangıç çözümü veya durumu belirlenmektedir. Başlangıç durumu, çözümün bir başlangıç noktasını temsil eder ve algoritmanın optimize etmeye çalışacağı ilk çözümü temsil etmektedir. SA algoritmasında Başlangıç Sıcaklığı olan (T_0) değeri, başlangıçta yüksek bir değer olarak 1000'den başlar ve iterasyonlar ilerledikçe azaltılır. Algoritmadaki diğer bir parametre olan soğutma oranı α ise incelenen problem özelinde 0,9 olarak alınan soğutma oranıdır. Soğutma oranı, sıcaklığın iterasyonlar arasında nasıl azalacağını kontrol eder. Algoritma, belirlenen bir sıcaklığa erişildiğinde veya belirli bir sayıda iterasyon yapıldığında (durdurma kriterine ulaşıldığında) sonlanır.

Bu çalışma kapsamında kullanılan SA algoritması Şekil 4.2'de verilmektedir. SA algoritması başlangıç koşulları olarak belirlenen bir başlangıç sıcaklık değeri ile başlatılmaktadır. Rassal değişkenler ile üretilen bir başlangıç çözümü, ilk ve aynı zamanda geçerli en iyi çözümü oluşturmaktadır. Başlangıç çözümünün amaç fonksiyonu değeri, geçerli ve en iyi çözümün amaç fonksiyonu değeri olmaktadır. Geçerli çözümden bir değişiklik ile Şekil 4.3'te verilen probleme özgü olarak

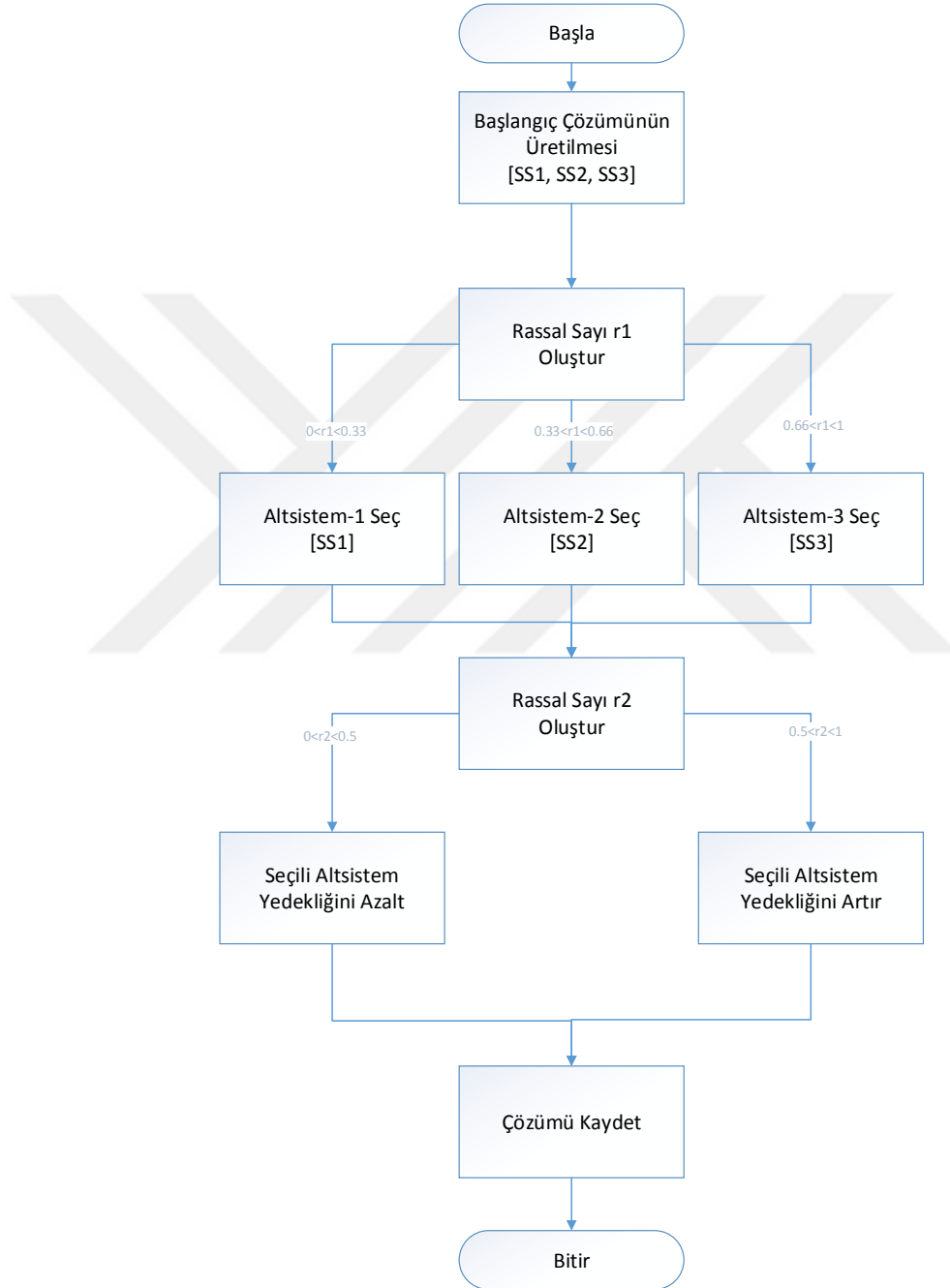
geliştirilen komşu çözüm oluşturma algoritması ile bir komşu çözüm oluşturulur. Sonrasında geçerli çözümün aldığı amaç fonksiyon değeri hesaplanır. Eğer komşu çözümün amaç fonksiyonu değeri, geçerli çözümün amaç fonksiyon değerinden daha iyiye, komşu çözüm yeni geçerli çözüm olarak kabul edilir. Ancak tersi durum söz konusu ise, belirli bir olasılık fonksiyonu ile komşu çözüm yeni geçerli çözüm olarak kabul edilir, aksi takdirde komşu çözüm reddedilir. Sıcaklık parametresi bir soğutma fonksiyonu ile kademeli olarak azaltılmakta ve belirlenen asgari sıcaklık değerine ulaşılanaya kadar yinelemeli olarak devam edilmektedir. SA algoritması bu şekilde belirli bir olasılıkla kötü çözümleri kabul ederek, yerel optimum noktalardan kurtulma özelliğine sahiptir.





Şekil 4.2. SA algoritması

Şekil 4.3'te ise probleme özgü olarak geliştirilen komşu çözüm oluşturma yaklaşımına ait akış şeması sunulmuştur. Bu kapsamda ilk olarak $[0,1]$ arasında iki rassal sayı oluşturulmaktadır. Oluşturulan ilk rassal sayının aldığı değere bağlı olarak ilgili alt sistemi seçimi yapılmaktadır. Ardından oluşturulan ikinci rassal sayı ile seçilen alt sistemin yedeklilik değeri bir artırılmakta veya azaltılmaktadır.



Şekil 4.3. Probleme özgü komşu SA çözüm oluşturma algoritması

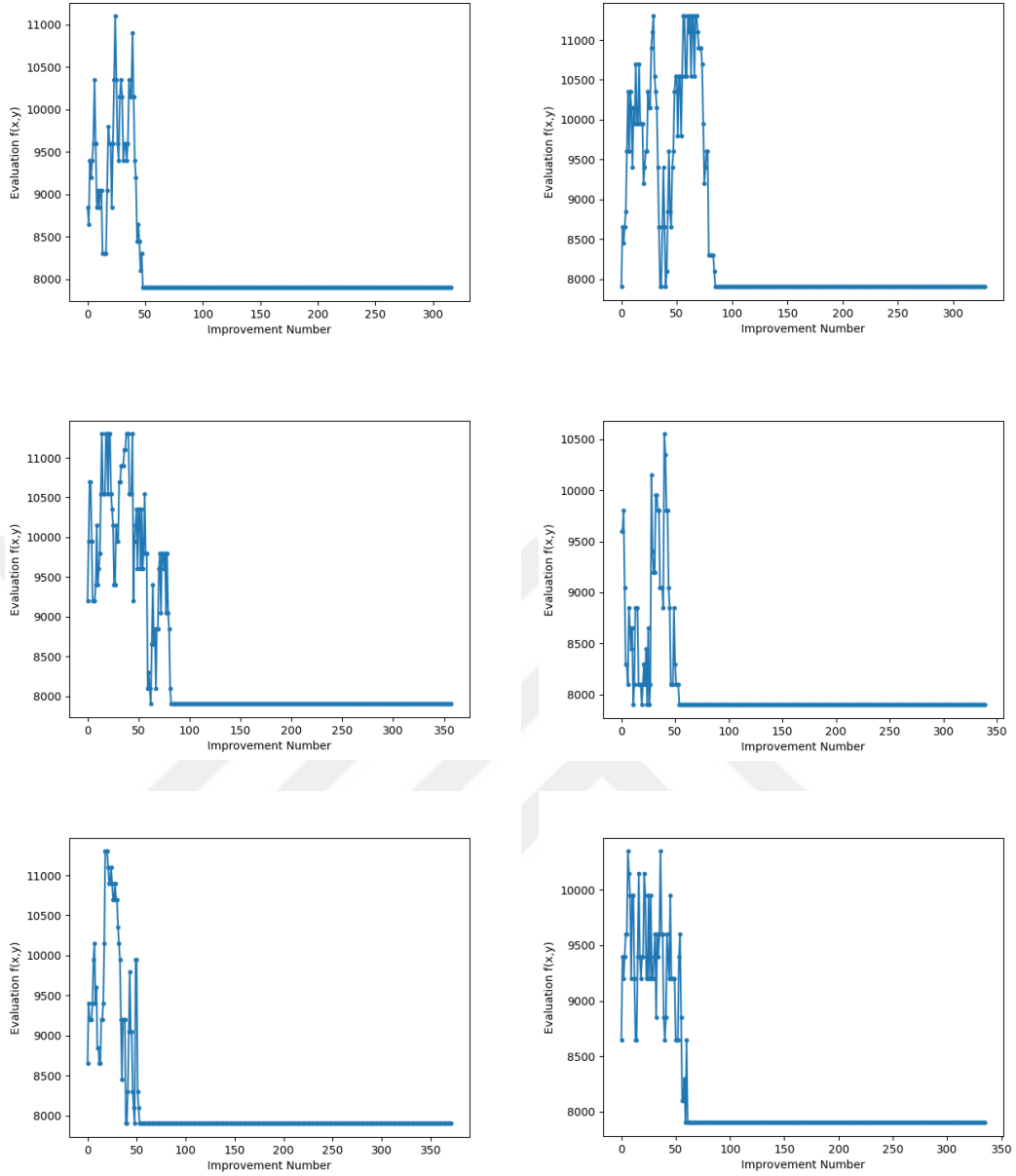
4.4. Sayısal Durum Çalışması

Probleme özgün olarak geliştirilen SA Algoritması, öncelikle SOP modeli üzerinden uygulanarak elde edilen sonuçları, Bölüm 3.2’de sunulan İAÇY ile karşılaştırılmıştır. Ardından Bölüm 4.1’de sunulan model SA algoritması ile çözümlenerek sonuçlar analiz edilmiştir.

4.4.1. Tek Amaçlı Modelin SA Yöntemi ile Çözülmesi

Bölüm 3.1’de tanımlanan, orta ölçekli bir haberleşme uydusu dikkate alınarak oluşturulan model, SA algoritması kullanılarak Python dilinde kodlanmış ve çözülmüştür.

SA algoritması farklı çalıştırmalarda elde edilen çözümler için Şekil 4.4’te verilen grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 4.4. SOP modeli SA algoritması çözüm grafikleri

SA algoritması ile elde edilen çözümlere ilişkin ekran görüntüleri Şekil 4.5'te verilmektedir. Çözüm, s_{i_1} ekipman zincirinden 6 veya 7 adet yedek, s_{i_2} ekipman zincirinden ise 4 veya 3 adet yedek ve s_j ekipman zincirinden 2 adet yedek ekipman seçildiğini göstermiştir. Bu çözümün Amaç Fonksiyon değerini 7900 olarak bulmuştur. SA ile SOP modeli için alternatif bir çözüme daha ulaşılmıştır. Diğer yandan ilk modelde elde edilen sonucun da sağlaması yapılmıştır.

```
iteration: 9430, best_solution: [6 4 2], best_fitness: 7900
--> attempt: 4, best_solution: [7 3 2], best_fitness: 7900
iteration: 9437, best_solution: [7 3 2], best_fitness: 7900
--> attempt: 0, best_solution: [7 3 2], best_fitness: 7900
iteration: 9438, best_solution: [7 3 2], best_fitness: 7900
--> attempt: 2, best_solution: [7 3 2], best_fitness: 7900
iteration: 9438, best_solution: [7 3 2], best_fitness: 7900
--> attempt: 2, best_solution: [6 4 2], best_fitness: 7900
iteration: 9440, best_solution: [6 4 2], best_fitness: 7900
--> attempt: 3, best_solution: [6 4 2], best_fitness: 7900
iteration: 9478, best_solution: [6 4 2], best_fitness: 7900
--> attempt: 0, best_solution: [6 4 2], best_fitness: 7900
iteration: 9485, best_solution: [6 4 2], best_fitness: 7900
final temperature: 2.5e-323

Process finished with exit code 0
```

(a)

```
iteration: 9700, best_solution: [7 3 2], best_fitness: 7900
--> attempt: 0, best_solution: [6 4 2], best_fitness: 7900
iteration: 9724, best_solution: [6 4 2], best_fitness: 7900
--> attempt: 0, best_solution: [6 4 2], best_fitness: 7900
iteration: 10071, best_solution: [6 4 2], best_fitness: 7900
--> attempt: 0, best_solution: [6 4 2], best_fitness: 7900
iteration: 10075, best_solution: [6 4 2], best_fitness: 7900
--> attempt: 0, best_solution: [7 3 2], best_fitness: 7900
iteration: 10279, best_solution: [7 3 2], best_fitness: 7900
--> attempt: 0, best_solution: [7 3 2], best_fitness: 7900
iteration: 10282, best_solution: [7 3 2], best_fitness: 7900
--> attempt: 4, best_solution: [7 3 2], best_fitness: 7900
iteration: 10337, best_solution: [7 3 2], best_fitness: 7900
final temperature: 2.5e-323

Process finished with exit code 0
```

(b)

Şekil 4.5. SOP modeli SA algoritması sonuçlar

4.4.2. Çok Amaçlı Modelin SA Yöntemi ile Çözülmesi

Bölüm 4.1’de tanımlanan MOP modeli (Denklem (4.4)-(4.11)), SA algoritması kullanılarak Python dilinde kodlanmış ve çözülmüştür. Başlangıç sıcaklığı $T_0 = 1000$, soğutma oranı $\alpha = 0,9$ ve iterasyon sayısı 1000 olarak deneme-yanılma yoluyla belirlenmiştir.

Önerilen MOP model nispeten büyük ölçekte bir uydu konfigürasyonuna uygulanmıştır. Bu kapsamda, Şekil 4.1’de verilen alt sistem konfigürasyonunda,

Misyon-1 alt sistemi için 32:33'ten 32:48 'a kadar konfigürasyonlar belirlenmiştir. Benzer şekilde, Misyon-2 alt sistemi için 16:17'den 16:26'ya kadar olan konfigürasyonlar ve Misyon-3 (B1 alt sistemi) için 10:11'den 10:18'e kadar olan konfigürasyonlar oluşturulmuştur. Her bir misyonun söz konusu konfigürasyonlar için güvenilirlik değerleri, aktif ve pasif yedekli ekipmanlar dikkate alınarak Bölüm 2.3'te verilen formüller kullanılarak hesaplanmıştır.

Her bir misyonun ilgili maliyet, güç tüketimi ve güvenilirlik değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Uydu alt sistemlerine ilişkin bilgiler

	M-1	M-2	M-3
Maliyet (Milyon USD)	0,750	0,850	0,800
Güç Tüketimi (Watt)	1	50	40
Ekipman Güvenirlik Değeri	0,8826	0,8943	0,8884
Sistem Güvenirlik Gereksinimi	0,90	0,95	0,92
Yedeklilik Stratejisi	Pasif Ilık	Aktif Sıcak	Aktif Sıcak

Bölüm 4.2'de açıklandığı üzere, CP yönteminde kullanılan w_i parametresi karar vericinin değerlendirmesinden i . amaç fonksiyonun göreceli önemine karşılık gelen ağırlığı ifade etmektedir. CP yöntemini kullanırken, farklı türdeki uydu tasarımlarının ele alınabilmesine imkân sağlamak için farklı ağırlıklar kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında, uzman görüşlerine başvurularak; ilk ağırlık seti Uydu-A olarak adlandırılan ticari uydu segmentinde yer alan ürünler, ikinci ağırlık seti ise Uydu-B olarak adlandırılan daha ziyade sınıflandırılmış ve askeri görevler segmentinde yer alan ürünler için belirlenmiştir. Her iki uydu tipi için belirlenen ağırlık değerleri Çizelge 4.2'de sunulmuştur. Ticari uydularda, maliyeti oldukça yüksek bu projelerin yatırım geri dönüş zamanı her zaman ön planda olmaktadır. Bu nedenle ticari uydu için maliyet amaç fonksiyonun ağırlığı diğer parametrelere göre daha yüksektir. Sınıflandırılmış güvenlik amacıyla geliştirilen Uydu-B'nin görevi, arızaların kabul edilemeyeceği stratejik ihtiyaçlarla ilgili olduğundan, güvenilirlik amaç fonksiyonu ağırlığı, maliyet amaç fonksiyonuna göre daha yüksektir.

Çizelge 4.2. CP modelinin ağırlıklandırma stratejisi

w_i	Uydu-A	Uydu-B
w_1 (maliyet)	0,1	0,6
w_2 (güç tüketimi)	0,1	0,2
w_3 (güvenirlilik)	0,8	0,2

Denklem (4.4) ile (4.11) arasında sunulan MOP modeli, her bir amaç fonksiyonu için ayrı ayrı çalıştırıldığında, Çizelge 4.3'te verilen sonuç tablosu elde edilmektedir. Aynı zamanda Çizelge 4.3'te verilen sonuçlar amaç fonksiyonları arasındaki ödünleşmeleri de ifade etmektedir.

Çizelge 4.3. MOP amaç fonksiyonları arasındaki ödünleşme

		Minimum Maliyet	Minimum Güç Tüketimi	Maksimum Güvenirlilik	İdeal Nokta	Anti-İdeal Nokta
Maliyet (Milyon USD)		13,450	14,900	22,250	13,450	22,250
Güç Tüketimi (Watt)		418	410	742	410	742
Güvenirlilik		0,945	0,9404	0,9994	0,9994	0,945
Yedek Ekipman Sayısı	M-1	8	10	12		
	M-2	5	4	9		
	M-3	4	5	7		

Çizelge 4.3 amaçlar arasındaki çatışma derecelerini açıkça göstermektedir. Maliyet minimize edildiğinde, 13,45 milyon USD ile 418 watt güç tüketimine ve 0,945 güvenirlilik değerine sahip alternatif bir tasarım elde edilmektedir. Öte yandan, güç tüketimi minimize edildiğinde maliyette önemli bir artış (13,45'ten 14,90 milyon USD'ye) ve güvenirlilikte bir düşüş gözlemlenmektedir. Güvenirlilik maksimize edildiğinde, maliyetin minimize edildiği duruma kıyasla maliyette %65'lik bir artış (13,45'ten 22,25 milyon USD'ye) ve güç tüketiminde %81'lik bir artış (410 Watt'dan 742 Watt'a) gözlemlenmektedir. Bu durumda güvenirlilikteki düşüş %5,4 ile sınırlı kalmaktadır (0,9994'ten 0,945'e). İdeal çözüm; Çizelge 4.3'de gösterildiği gibi maliyetin 13,45 milyon dolar, güç tüketiminin 410 Watt ve güvenirliliğin 0,9994 olduğu noktadır. Bu kapsamda çok amaçlı bir yaklaşımın, yukarıda anlatıldığı gibi amaçlar arasında çelişkinin olduğu durumda gerekli olduğu görülmüştür.

MOP modeli, Denklem (4.13)'te verilen formda, p değerleri 1 ve 2 için çalıştırılmıştır. $p = \infty$ olduğu durumunda ise LP problemi, bir min-max problemine dönüşmüştür. Bu durumda, Denklem (4.7) - (4.11) ve Denklem (4.14) ile (4.17) arasında verilen denklemler ile ifade edilir. Söz konusu modeller çözüldüğünde, Uydu-A ve Uydu-B için sırasıyla Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'te verilen sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.4. Uydu-A MOP model sonuçları

p	Maliyet (Milyon USD)	Güç Tüketimi (Watt)	Güvenirlilik	Yedek Ekipman Sayısı		
				M-1	M-2	M-3
1	19,750	602	0,9969	12	7	6
2	19,000	601	0,9962	11	7	6
∞	19,000	601	0,9962	11	7	6

Çizelge 4.5. Uydu-B MOP model sonuçları

p	Maliyet (Milyon USD)	Güç Tüketimi (Watt)	Güvenirlilik	Yedek Ekipman Sayısı		
				M-1	M-2	M-3
1	13,450	418	0,945	8	5	4
2	14,200	419	0,9585	9	5	4
∞	15,000	459	0,9689	9	5	5

Geliştirilen MOP modeli, değişik ağırlık w değerleri için çalıştırılmış ve duyarlılık analizi yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.6'da gösterilmiştir. Görüldüğü farklı ağırlık setleri için farklı sonuçlara ulaşılmıştır.

Çizelge 4.6. Uydu MOP modeli farklı w ve p değerleri için elde edilen sonuçlar

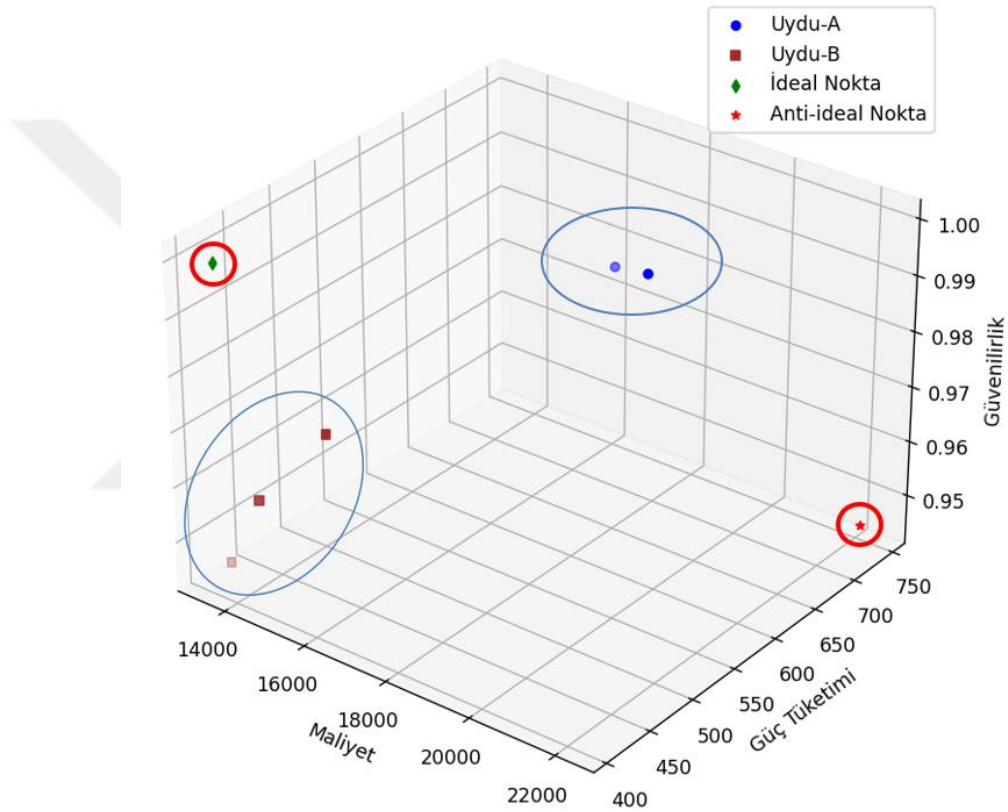
#	p	W Setleri			Maliyet (Milyon USD)	Güç Tüketimi (Watt)	Güvenirlilik	Yedek Ekipman Sayısı		
		w_1 (Maliyet)	w_2 (Güç Tüketimi)	w_3 (Güvenirlilik)				M-1	M-2	M-3
1	1	0,1	0,1	0,8	19,75	602	0,9969	12	7	6
2		0,2	0,2	0,6	17,35	511	0,9891	11	6	5
3		0,33	0,33	0,34	14,95	420	0,9640	10	5	4
4		0,6	0,2	0,2	13,45	418	0,9450	8	5	4
5		0,7	0,2	0,1	13,45	418	0,9450	8	5	4
6		0,8	0,1	0,1	13,45	418	0,9450	8	5	4
7	2	0,1	0,1	0,8	19,00	601	0,9962	11	7	6
8		0,2	0,2	0,6	17,35	511	0,9891	11	6	5
9		0,33	0,33	0,34	15,85	509	0,9813	9	6	5
10		0,6	0,2	0,2	14,20	419	0,9585	9	5	4
11		0,7	0,2	0,1	14,20	419	0,9585	9	5	4
12		0,8	0,1	0,1	13,45	418	0,9450	8	5	4
13	∞	0,1	0,1	0,8	19,00	601	0,9962	11	7	6
14		0,2	0,2	0,6	17,45	560	0,9891	10	7	5
15		0,33	0,33	0,34	15,85	509	0,9813	9	6	5
16		0,6	0,2	0,2	15,00	459	0,9689	9	5	5
17		0,7	0,2	0,1	14,20	419	0,9585	9	5	4
18		0,8	0,1	0,1	14,20	419	0,9585	9	5	4

Aynı ağırlıklar kullanıldığında, p değeri arttıkça ideal çözüme olan uzaklık azalmaktadır. Benzer şekilde, her bir amaç fonksiyonu için ağırlıklar değiştiğinde, elde edilen sonuçlar çoğu durumda değişmektedir. p değeri 1 olduğunda ve maliyet amaç fonksiyonunun ağırlığı kademeli olarak artırıldığında, altı denemenin dördünde maliyet değişmektedir. Yukarıda farklı uydu tipleri için test edilen deneme#1 ve #2 sonuçları karşılaştırıldığında; deneme #3'te (ağırlıkların neredeyse birbirine eşit olarak ayarlandığı durumda) farklı bir yedekleme politikasının elde edildiği görülmüştür. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere, güvenirlilik skorundaki değişim milyonlarla ölçülen büyük tasarruflarla sonuçlanmaktadır.

p değeri 2 olarak ayarlandığında ve maliyet hedefinin ağırlığı kademeli olarak artırıldığında, ilk duruma kıyasla daha yüksek güvenirliliğe sahip çözümler elde edilmektedir. Eşit ağırlıklara sahip deneme#9 sonucu deneme#3 ile karşılaştırıldığında, güvenirlilik açısından daha iyi bir sonuç elde edilmektedir. Ancak

güvenirlikteki bu iyileşme maliyette artış ve güç tüketiminde keskin yükselişe neden olmaktadır.

Şekil 4.6'da; Uydu-A ve Uydu-B için MOP modeli ile elde edilen sonuçlar, ideal ve anti-ideal noktalarla birlikte grafik üzerinde gösterilmektedir. Uydu-A için elde edilen çözüm yüksek güvenilirlik, maliyet ve güç tüketimi bölgesinin üst aralığında görülürken, Uydu-B için elde edilen çözümler grafiğin alt tarafında nispeten düşük güvenilirlik, maliyet ve güç tüketimi bölgesinde yer almaktadır. İdeal ve anti-ideal noktalar ise grafiğin en uç köşelerinde bulunmaktadır.



Şekil 4.6. MOP modeli güvenilirlik optimizasyonu sonuçları

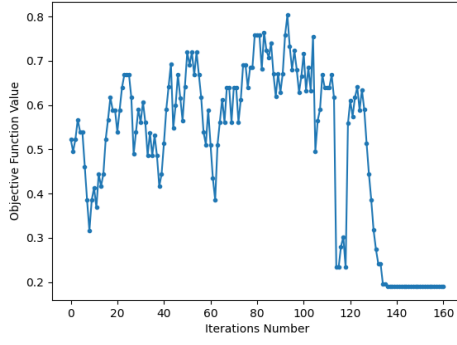
MOP modeli için Python kodu ile elde edilen sonuç ekranı Şekil 4.7'de sunulmuştur.

```
      ss_1      ss_2      ss_3      systm
solutn      8.0000      5.0000      4.0000      17.000
reliab      0.9772      0.9814      0.9854      0.945
cost      6000.0000    4250.0000    3200.0000    13450.000
pwr_cn      8.0000      250.0000     160.0000     418.000
=====
-->counter_j_nb_attempt_Temp: 9, best_solution: [8 5 4], best_fitness: 0.0922348711399257
counter_i: 137117, best_solution: [8 5 4], best_fitness: 0.0922348711399257
=====
      p_i  w1(c)  w2(p)  w3(r)  cling  obj.func.
value  2.0   0.8   0.1   0.1   0.98   0.09223
-----
      ss_1      ss_2      ss_3      systm
solutn      8.0000      5.0000      4.0000      17.000
reliab      0.9772      0.9814      0.9854      0.945
cost      6000.0000    4250.0000    3200.0000    13450.000
pwr_cn      8.0000      250.0000     160.0000     418.000
=====
final temperature: 1.2e-322

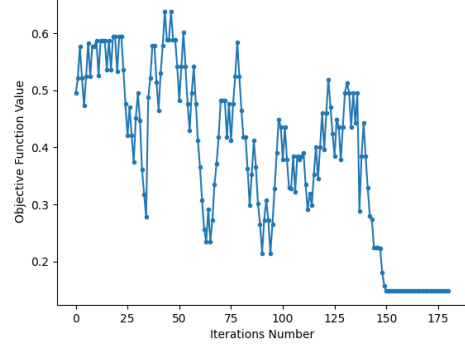
Process finished with exit code 0
```

Şekil 4.7. MOP modeli SA algoritması sonuçlar

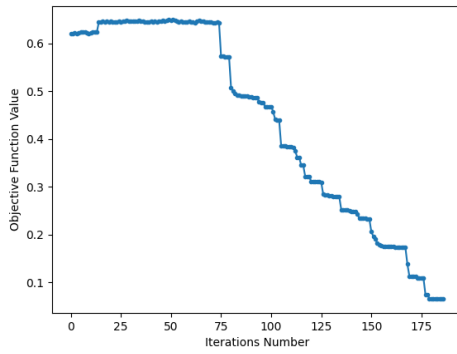
MOP modelin, farklı w ve p değerleri dikkate alınarak, Uydu-A ve Uydu-B için çözümlenmesiyle elde edilen grafikler Şekil 4.8’de verilmektedir.



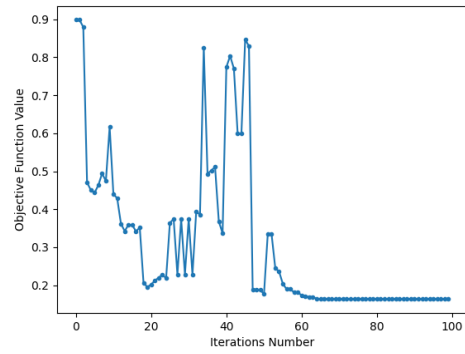
Uydu-A p:1 $w_1:0,1-w_2:0,1-w_3:0,8$



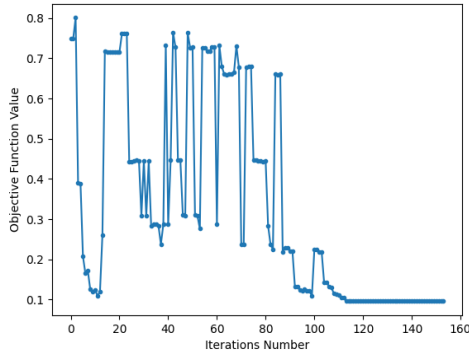
Uydu-A p:2 $w_1:0,1-w_2:0,1-w_3:0,8$



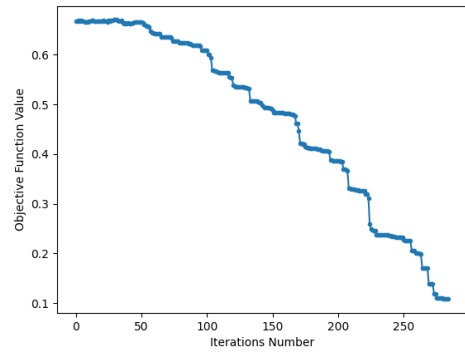
Uydu-A p:∞ $w_1:0,1-w_2:0,1-w_3:0,8$



Uydu-B p:1 $w_1:0,6-w_2:0,2-w_3:0,2$



Uydu-B p:2 $w_1:0,6-w_2:0,2-w_3:0,2$



Uydu-B p:∞ $w_1:0,6-w_2:0,2-w_3:0,2$

Şekil 4.8. MOP modeli SA algoritması çözüm grafikleri

5. SONUÇ ve DEĞERLENDİRMELER

Bu tez çalışması kapsamında; jeosenkron bir haberleşme uydu sisteminin, müşteri güvenilirlik gereksinimleri, güç tüketimi sınırlamaları ve maliyeti göz önünde bulundurularak güvenilirlik optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Birbirleriyle çelişkili amaç fonksiyonları ve tasarım kısıtlamaları göz önünde bulundurularak, en iyi yedeklilik stratejisini belirlemek suretiyle uydu güvenilirlik tasarımında kullanılabilecek sistematik yaklaşımlar geliştirilmiştir.

Uydu güvenilirlik optimizasyonu problemi hem SOP hem de MOP olarak ele alınarak ilgili modeller geliştirilmiştir. Vaka analizi çalışmaları kapsamında, aktif ve pasif yedeklilik stratejisine sahip haberleşme uydu sistemi tasarımı üzerinde uygulamalar gerçekleştirilmiştir.

SOP modeli kapsamında; maliyet etkin bir sistem tasarımına ulaşmak için, birimlerin güvenilirlik gereksinimleri ve güç tüketimi kısıtları göz önünde bulundurularak optimum yedeklilik seviyeleri elde edilmiştir. Yedeklilik tahsis probleminin doğrusal olmayan doğası nedeniyle, literatürde meta-sezgisel yöntemleri yoğun olarak kullanıldığı bu alanda kesin çözüme dayalı bir yaklaşım geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında oluşturulan tamsayılı doğrusal olmayan programlama modelini, tamsayılı programlama modeline dönüştüren bir İAÇY geliştirilmiştir. Söz konusu yaklaşım ile sistem güvenilirliği ve yedeklilik tahsisi problemi çözülebilmektedir. İlk adımda, NP-Zor olarak bilinen Yedeklilik Tahsis Problemi yapısı çerçevesinde doğrusal olmayan bir model oluşturulmuştur. Daha sonra, nispeten daha basit bir eşdeğer model elde etmek için İAÇY önerilmiştir. Bu yaklaşımda, birinci aşamada aktif ve pasif bileşenleri içeren çeşitli ekipmanları dikkate alan konfigürasyonların güvenilirlik değeri hesaplanmıştır. İkinci aşamada ise tam sayılı bir programlama modeli kullanılarak oluşturulan kombinasyon kümesinden her alt sisteme ait optimum konfigürasyonlar seçilmiştir. Sayısal vaka çalışması olarak model, tipik bir orta ölçekli haberleşme uydusundan esinlenen bir örnek ile test edilmiştir. Bu örnek uydu, aktif ve pasif yedekli iki görevden (Misyon-1 ve Misyon-2) ve ölçeklenmiş gerçek parametre değerlerine sahip ek bir aktif ekipman alt sisteminden (B1 alt sistemi) oluşmaktadır.

Sonuçlar, önerilen İAÇY'nin sistem düzeyinde güvenilirlik gereksinimi ve verilen kaynak kısıtları uyarınca optimum sayıda yedekli ekipman içeren konfigürasyonlar seçtiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçların endüstriyel uygulamalarla uyumlu makul sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

MOP kapsamında; doğaları gereği birbiriyle çelişen amaç fonksiyonları olan sistem güvenilirliği, birimlerin güç tüketimi ve projenin yedeklilik maliyeti eş zamanlı olarak optimize edilmiştir. MOP modeli sonuçları, SOP modeli çıktılarına göre daha efektif çözümler ortaya koymuştur. Önerilen MOP modeli yaklaşımı ile uydunun erken tasarım aşamasında aktif birimlerin güç tüketimi ve maliyeti en aza indirilmeye çalışılırken sistemin güvenilirliğin en üst düzeye çıkarılmıştır. Uzay ortamında bulunan uydu üzerindeki kaynaklar sınırlı olduğundan, modelde verilen uydu kaynak limitleri dikkate alınmıştır. Önerilen yöntem aynı zamanda uydu tasarımının ve güvenilirlik optimizasyonu için etkili bir duyarlılık analizinin yapılabilmesini sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, güvenilirlik değerindeki yüzde birler mertebesinde hafif azalışa karşın maliyet tarafında milyon dolarlar mertebesinde tasarrufun mümkün olabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, uydunun görevinin çok önemli olduğu durumlarda, geliştirilen model sayesinde sistem maliyeti ile güç tüketim değeri arasındaki ilişkiyi dikkate alarak güvenilirliğin iyileştirilmesinin mümkün olduğunu göstermektedir.

MOP modeli kapsamında, uygun çözümler elde etmek için CP yöntemi kullanılmıştır. CP modelinde yer alan ağırlık setleri ile farklı öncelikler göz önünde bulundurularak ticari ve savunma alanı gibi farklı ürün segmentlerinde yer alan ürünlerin ele alınması mümkün olmaktadır. Böylece önerilen model ve çözüm yaklaşımının, farklı karar vericiler ve farklı uydu segmentleri için kullanılabilirliğini göstermektedir.

Tez çalışması kapsamında global optimal çözüme ulaşma yeteneği ve uygulama kolaylığı açısından avantajlı olan SA algoritması kullanarak literatürde NP-Zor olarak bilinen güvenilirlik optimizasyon problemi çözülmüştür.

Önerilen yaklaşım, uyduların tasarımı esnasında maliyet, güç tüketimi ve güvenilirlik değerleri arasında önemli ödünleşimlerin olduğunu ve bu etkileşimlerin uyduların erken tasarım aşamalarında dikkate alınması gerektiğini göstermiştir. Örneğin, Uydu-A için gerçekleştirilen optimizasyon çerçevesinde; 19 milyon dolar maliyet ve 601 watt güç tüketimi ile 0,9960 güvenilirlik değerine ulaşmıştır. Buna karşılık, güvenilirlik

maksimizasyonunu hedefleyen tek amaçlı optimizasyon ile; 22,25 milyon dolar maliyet ve 704 watt güç tüketimine karşın 0,9994 güvenilirlik değeri ile yalnızca biraz daha yüksek bir güvenilirlik değerine ulaşılmıştır.

Bu çalışma, literatürde uydu tasarımının optimizasyonuna yönelik ilk çalışmalar arasındadır. Önerilen yöntemler, oldukça pahalı aktif ve pasif yedek üniteleri içeren bir uydu sisteminin güvenilirliğinin optimizasyonunu sağlamaktadır. Önerilen yöntemler her ne kadar uydu özelinde test edilmiş olmakla birlikte nükleer sistemler, enerji üretim sistemleri, kimya tesisleri, petrol ve gaz rafinerileri, havacılık ve uzay endüstrileri ve büyük ölçekli bileşik üretim tesisleri gibi çeşitli endüstriyel alanlardaki karmaşık onarılamaz sistemler için de uygundur.

Geliştirilen sistematik yaklaşımlar, özellikle sistem performansının ve güvenilirliğinin uzun bir süre boyunca garanti edilmesi gereken büyük ölçekli ve karmaşık mühendislik projelerinde güvenilirlik gereksinimlerini dikkate alırken, uygun maliyetli bir sistem tasarımı elde etmek için etkili bir şekilde uygulanabilir. Ayrıca önerilen yöntemler sistemin toplam maliyeti ve güvenilirlik değerinin göz önünde bulundurulduğu karmaşık sistemlerin tasarımı esnasında duyarlılık analizlerinin de kolaylıkla yapılabilemesine imkân sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

- Abrishamchi, A., Ebrahimian, A., M, T., & A., M. M. (2005). Case study: application of multicriteria decision making to urban water supply. *Water Resour Plan Manage*, 326–335.
- Agarwal, M., Gupta, R., Ramirez-Marquez, J. E., & Coit, D. (2004). A heuristic for solving the redundancy allocation problem for multi-state series-parallel systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 341-349.
- Ashrafi, N., & Berman, O. (1992). Optimization Models for Selection of Programs Considering Cost and Reliability. *IEEE Transactions on Reliability*, 281-287.
- Atiqullah, M., & Rao, S. (1993). Reliability Optimization of Communication Networks using Simulated Annealing,. *Microelectron Reliability*, 1303-1319.
- Birolini, A. (2013). *Reliability Engineering Theory and Practice*. Springer Science & Business Media.
- Braun, T. M. (2012). *Satellite Communications Payload and System*. New Jersey: JohnWiley & Sons.
- C Blum, A. R. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys, Volume 35, Issue 3*, 268-308.
- Castet, J.-F., & H.Saleh, J. (2009). Satellite and satellite subsystems reliability: Statistical data analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 1718–1728.
- Chambari, A., Rahmati, S. H., & Najafi, A. A. (2012). A bi-objective model to optimize reliability and cost of system with a choice of redundancy strategies. *Computers & Industrial Engineering*, 63(1), 109-119.
- Chern, M. (1992). On the computational complexity of reliability redundancy allocation in a series system. *Operations Research Letters*, 309–315.
- Coit, D., & Liu, J. (2000). Reliability Optimization with k-of-n Subsystems. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 129-142.
- Coit, D., & Smith, A. (1996). Reliability optimization of series-parallel systems using a genetic algorithm. *IEEE Transactions on Reliability*, 254 - 260.

- Database, U. S. (2022, 11 27). *UCS Satellite Database*. UCS Satellite Database: <https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database> adresinden alındı
- Deeter, D., & Smith, A. (1997). Heuristic Optimization of Network Design Considering All-Terminal Reliability. *Proceedings Annual reliability and Maintainability Symposium*, 194-19.
- E.Ramirez-Marquez, J., & W.Coit, D. (2004). A heuristic for solving the redundancy allocation problem for multi-state series-parallel systems. *Reliability Engineering & System Safety*, Reliability Engineering & System Safety.
- ECSS, T. E. (2011). *ECSS-Q-HB-30-08A – Space Product Assurance, Components Reliability Data Sources and Their Use*. Noordwijk, Netherlands: ESA-ESTEC Requirements & Standards Division.
- Elsayed, E. A. (2012). *Reliability Engineering*. Willey Series.
- Euroconsult. (2022). *Satellites to be Built & Launched, 24th edition*. Euroconsult .
- Evans, B. (1999). *Satellite Communication Systems*. London: The Institution of Engineering and Technology.
- Fattahi, P., & Fayyaz, S. (2010). A Compromise Programming Model to Integrated Urban Water Management. *Water Resour Manage* 24, 1211–1227.
- Federowicz, A. J., & Mazumdar, M. (1968). Use of Geometric Programming to Maximize Reliability Achieved by Redundancy. *Operations Research Society of America*, 948-954.
- Fyffe, D. E., Hines, W. W., & Lee, N. K. (1968). System Reliability Allocation and a Computational Algorithm. *IEEE Transactions on Reliability* , 64 - 69.
- Hassan, R. A., & Crossley, W. A. (2001). Conceptual Design of Communication Satellites with A Genetic Algorithm. *American Institute of Aeronautics & Astronautics*.
- Hassan, R. A., & Crossley, W. A. (2003). Comparison of Sampling Techniques for Reliability-Based Optimization of Communication Satellites Using Genetic Algorithms. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*.
- Hassan, R. A., & Crossley, W. A. (2003). Multi-objective optimization of communication satellites with two-branch tournament genetic algorithm. *Journal Of Spacecraft and Rockets*, 266-272.
- Hassan, R. A., & Crossley, W. A. (2003). Multi-Objective Optimization of Communication Satellites with Two-Branch Tournament Genetic Algorithm. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 266-272.

- Hassan, R., & Crossley, W. (2008). Spacecraft Reliability-Based Design Optimization Under Uncertainty Including Discrete Variables. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 394-405.
- Hassan, R., & Crossley, W. (2008). Spacecraft Reliability-Based Design Optimization Under Uncertainty Including Discrete Variables. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 394-405.
- J. Larson, W., & R. Wertz, J. (1999). *Space Mission Analysis and Design*. California: Microcosm Press and Kluwer Academic Publishers.
- Jin, T. (2018). *Reliability Engineering and Services*. Wiley Series in Quality & Reliability Engineering.
- K.Wayer, J., Castet, J.-F., & H.Saleh, J. (2013). Spacecraft attitude control subsystem: Reliability, multi-state analyses, and comparative failure behavior in LEO and GEO. *Acta Astronautica*, 83-92.
- Khalili-Damghani, K., & Amiri, M. (2012). Solving binary-state multi-objective reliability redundancy allocation series-parallel problem using efficient epsilon-constraint, multi-start partial bound enumeration algorithm, and DEA. *Reliability Engineering and System Safety*, 35-44.
- Kim, H., Bae, C., & Park, D. (2006). Reliability- redundancy optimization using simulated annealing algorithms. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 354-363.
- Kim, H., Bae, C., & Park, S. (2004). Simulated Annealing Algorithm for Redundancy Optimization with Multiple Component Choices. *In Advanced Reliability Modeling, Proceedings of the Asian International Workshop, World Scientific*, 237-244.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Veechi, M. P. (1982). Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220, 671-679.
- Konak, A., Coit, D. W., & Smith, A. (2006). Multi-objective Optimization using Genetic Algorithms: A tutorial. *Reliability Engineering and System Safety*, 992-1007.
- Kulturel-Konak, S., Smith, A., & Coit, D. (2003). Efficiently solving the redundancy allocation problem using Tabu search. *IIE Transactions*, 515-526.
- Kuo, W., & Prasad, V. (2000). An annotated overview of system-reliability optimization. *IEEE Transactions on Reliability*, 487-493.
- Kuo, W., & R. Wan. (2007). Recent advances in optimal reliability allocation. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics - Part A Systems and Humans*, 143-156.

- Kuo, W., & Wan, R. (2007). Recent Advances in Optimal Reliability Allocation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 143 - 156.
- Kuo, W., & Zuo, M. (2003). *Optimal reliability modeling: principles and applications*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Kuo, W., Prasad, V., Tillman, F., & Hwang, C. (2000). *Optimal Reliability Design: Fundamentals and Applications*. Cambridge University Press.
- Kuo, W., Prasad, V., Tillman, F., & Hwang, C. L. (2001). *Optimal reliability design: fundamentals and applications*. Cambridge University Press.
- Lai, C.-M., & Yeh, W.-C. (2016). Two-stage simplified swarm optimization for the redundancy allocation problem in a multi-state bridge system. *Reliability Engineering & System Safety*, 148-158.
- Li, X.-Y., Li, Y.-F., & Huang, H.-Z. (2020). Redundancy allocation problem of phased-mission system with non-exponential components and mixed redundancy strategy. *Reliability Engineering and System Safety*, 106903.
- Mahapatra, G. S. (2009). Reliability optimization of entropy based series-parallel system using global criterion method. *Intelligent Information Management*, 145-149.
- Maral, G., & Bousquet, M. (2009). *Satellite Communications Systems; Systems, Techniques and Technology*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd,.
- Marler, R., & Arora, J. (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Struct Multidisc Optim* 26, 369–395.
- Mellal, M. A., & Salhi, A. (2021). System reliability-redundancy allocation by the multiobjective plant propagation algorithm. *International Journal of Quality & Reliability Management*.
- MIL-HDBK-217F, D. o. (1991). *Reliability Prediction of Electronic Equipment*. Department of Defense, USA.
- MIL-HDBK-338B, D. o. (1998). *Electronic Reliability Design Handbook*. Department of Defense of USA.
- Misra, K. (1986). On optimal reliability design: a review. *System Science* 12, 5-30.
- Misra, K., & Sharma, U. (1991). An Efficient Algorithm To Solve Integer-Programming Problems Arising In System-Reliability Design. *IEEE Transactions on Reliability*, 81-91.
- MJ, B., & SP, S. (2000). A fuzzy compromise approaches to water resource systems planning under uncertainty. *Fuzzy Sets Syst* 115:, 35-44.

- Munoz, H., & Pierre, E. (2004). Interval Arithmetic Optimization Technique For System Reliability with Redundancy. *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, 227-231.
- Murray, A. T., & Church, R. L. (1996). Applying simulated annealing to location-planning models. *Journal of Heuristics*, 31-53.
- Murray, D. M., & Yakowitz, S. J. (1984). Differential dynamic programming and Newton's method for discrete optimal control problems. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 395-414.
- Nefes, M., Demirel, S., Ertok, H. H., & Sen, C. (2018). Reliability and Cost Focused Optimization Approach for a Communication Satellite Payload Redundancy Allocation Problem. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electronics and Communication Engineering*, 361-366.
- Neogy, R., & Abrahamson, S. (1984). Optimizing Communications Satellite Reliability. *10th Communication Satellite Systems Conference* (s. 404-412). New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Ngo, S. T. (2021). A compromise programming for multi-objective task assignment problem. *Computers*, 10(2).
- Ngo, T. S., Jaafar, J., Aziz, I. A., M. U., Nguyen, H. G., & Bui, N. A. (2022). Metaheuristic Algorithms Based on Compromise Programming for the Multi-Objective Urban Shipment Problem. *Entropy*.
- O'Connor, P., & Kleyner, A. (2012). *Practical Reliability Engineering*. John Wiley & Sons.
- Onishi, J. K., James, R., & Nakagawa, Y. (2007). Solving the Redundancy Allocation Problem With a Mix of Components Using the Improved Surrogate Constraint Method. *IEEE Transactions on Reliability*, 94-101.
- Osmani, F., Kochov, A., & Ilazi, M. (2021). Application of Compromise Programming in the Energy Generation Planning. *TECHNICAL JOURNAL 15*, 150-155.
- Poff, B., Teclé, A., Neary, D. G., & Geils, B. (2021). Compromise Programming in Forest Management. *Journal of the Arizona-Nevada Academy of Science*, 44-60.
- Prasad, V., & Kuo, W. (2000). Reliability Optimization of Coherent Systems. *IEEE Transactions on Reliability*, 323-330.
- Rausand, M., & Hoyland, A. (2004). *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications, 2nd Edition*. New Jersey: Wiley Series in Probability and Statistics.

- Romer, C., & Rehman, T. (2003). Chapter five Compromise programming. C. Romer, & T. Rehman içinde, *Developments in Agricultural Economics* (s. 63-78). Elsevier.
- Sadjadi, S. J., Tofigh, A. A., & Soltani, R. (2014). A New Nonlinear Multi-objective Redundancy Allocation Model with the Choice of Redundancy Strategy Solved by Compromise Programming Approach. *International Journal of Engineering*, 1025-2495.
- She, J., & Pecht, M. G. (1992). Reliability of a k-out-of-n Warm-Standby System. *IEEE Transactions on Reliability*, 72 - 75.
- Soltani, R. (2014). Reliability optimization of binary state non-repairable systems: A state of the art survey. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 339–364.
- Soltani, R., Sadjadi, S. J., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2015). Entropy based Redundancy Allocation in Series-Parallel Systems with Choices of a Redundancy Strategy and Component Type: A Multi-Objective Model. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 1049-1058.
- Tillman, F., Hwang, C., & Kuo, W. (1977). Optimization techniques for system reliability with redundancy- a review. *IEEE Transactions on Reliability*, 148-152.
- Uysal, M., & Ozcan, U. (2019). Süpermarket Yerleşim Problemi İçin Tavlama Benzetimi Algoritması. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 58-69.
- Uysal, M., & Ozcan, U. (2019). Süpermarket Yerleşim Problemi İçin Tavlama Benzetimi Algoritması Yaklaşımı. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 58-69.
- Wanga, W., Linb, M., Fua, Y., Luoa, X., & Chena, H. (2020). Multi-objective optimization of reliability-redundancy allocation problem for multi-type production systems considering redundancy strategies. *Reliability Engineering and System Safety*.
- Wattanapongsakorn, N., & Levitan, S. (2001). Reliability Optimization Models for Fault-Tolerant Distributed Systems. *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 193-199.
- Yeh, W.-C. (2017). A new exact solution algorithm for a novel generalized redundancy allocation problem. *Information Sciences*, 182-197.
- Yu, P. (1973). A Class of Solution for Group Decision Problems. *Management*, 936-946.
- Yu, P. (1985). *Multiple Criteria Decision Making: Concepts, Techniques and Extensions*. New York: Plenum Press.

- Zafiroopoulos, E. P., & Dialynas, E. N. (2004). Reliability and cost optimization of electronic devices considering the component failure rate uncertainty. *Reliability Engineering & System Safety* 84(3), 271-284.
- Zarghami, M. (2006). Integrated water resources management in Polrud irrigation system in Polrud irrigation system. *Water Resour Manag* 20:215–225., 215-225.
- Zeleny, M. (1973). Compromise Programming. *Multiple Criteria Decision Making*, 262-301.
- Zeleny, M. (1974). A Concept of Compromise Solutions and the method of the Displaced Ideal. *Computers and Operations Research*, 479-496.
- Zeleny, M. (1982). *Multiple Criteria Decision Making*. New York: McGraw-Hill.



ÖZ GEÇMİŞ

Adı Soyadı : Taha Tetik
Doğum Tarihi :
Yabancı Dil :
İletişim :

Eğitim Durumu

Lisans : İstanbul Üniversitesi
Elektrik – Elektronik Mühendisliği
Yüksek Lisans : Türk Hava Kurumu Üniversitesi
Mühendislik Yönetimi, İngilizce
Doktora : Kırıkkale Üniversitesi
Endüstri Mühendisliği

Çalıştığı Kurumlar :

1. Türksat Uydu Haberleşme Kablo TV ve İşletme A.Ş.
2. TUSAŞ - Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.

Yayınları (Diğer) :

1. A Two-Phase Approach for Reliability-Redundancy Optimization of a Communication Satellite, Taha Tetik, G. Sena Daş, Burak Birgoren, Gazi University Journal of Science, 2023
2. Comparing Crisp and Fuzzy DEA Approaches for The Launch Vehicle Selection Problem of A Communication Satellite Operator, G. Sena Daş, Taha

Tetik, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, GU J Sci, Part C, 5(1): 21-30, 2017

3. Launch Vehicle Selection for a Geostationary Communication Satellite using Data Envelopment Analysis, Taha Tetik, G. Sena Daş, IEEE RAST 2017
4. Determination of the Evaluation Criteria Weights for a Commercial Communication Satellite Program by Using AHP Method, M.Mehmet Nefes, M.Mustafa Zor, Taha Tetik and Dr. Şenol Gülgönül, International Symposium on Critical and Analytical Thinking, 2015

Araştırma Alanları :

Uydu Tasarımı, Güvenirlik Optimizasyonu, Tek Amaçlı ve Çok Amaçlı Optimizasyon, Çok Kriterli Karar Verme, Proje/Program Yönetimi, Sistem Mühendisliği