



Optimization of the redundancy allocation problem: Genetic algorithm and Monte Carlo simulation with discrete events

Merve Uzuner Şahin^{1*}, Orhan Dengiz², Berna Dengiz¹

¹Industrial Engineering Department, , Engineering Faculty, Başkent University, 06790, Ankara, Türkiye

²Industrial Engineering Department, Engineering Faculty, Nuh Naci Yazgan University, 38040, Kayseri, Türkiye

Highlights:

- Optimization of the redundancy allocation problem considering repairs
- Considering the increasing failure and repair rates
- System designs with higher reliability at lower cost

Keywords:

- System reliability
- Redundancy allocation problem
- Repairable component
- Discrete event simulation
- Genetic algorithm

Article Info:

Research Article

Received: 07.05.2022

Accepted: 19.03.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1107901

Correspondence:

Author: Merve Uzuner Şahin
e-mail:
muzuner@baskent.edu.tr
phone: +90 312 246 6666 /
2197

Graphical/Tabular Abstract

The reliability optimization of a system with various problem-specific constraints is an important problem. The Redundancy Allocation Problem (RAP) is the design of new systems with higher reliability using redundant components in parallel arrangement. While improving the system's reliability, the cost is also on the upswing. It has been ensured that system designs with higher reliability at lower costs, where failure and repair are considered, can be obtained (Table A). The reliability of the system with nonrepairable components is lower than the reliability of the system with repairable components. Furthermore, the cost of the system with nonrepairable components is higher than the cost of the system with repairable components.

Table A. Impact of using repairable components on system reliability and cost

Problem No	System with nonrepairable components		System with repairable components	
	System Reliability	Cost	System Reliability	Cost
P1	0.9868	130	0.997333	118
P4	0.9854	130	0.997333	121
P6	0.9842	129	0.996667	118
P8	0.983	130	0.997333	109
P10	0.9815	127	0.995333	122
P13	0.9795	126	0.992667	118
P15	0.9776	126	0.993333	110
P17	0.9754	125	0.994667	115
P20	0.973	123	0.992667	111
P22	0.9708	120	0.988667	104
P24	0.9681	119	0.988667	109
P27	0.9637	117	0.987333	111
P28	0.9624	115	0.984	112
P30	0.9592	115	0.981333	100
P33	0.9546	110	0.982667	102

Purpose:

The aims of this study are modeling the dynamic behavior of a system considering increasing failure and repair rates, and finding the optimal repairable system design.

Theory and Methods:

This paper presents a Discrete Event Simulation (DES) model to estimate the system reliability considering increasing failure and repair rates, and a Genetic Algorithm (GA) to find the optimal repairable system design.

Results:

According to the results, system designs with higher reliability at lower costs, where failure and repair are considered, can be obtained. It has been found that systems with repairable components are more reliable and cheaper than systems with nonrepairable components.

Conclusion:

It is obtained that the optimal repairable system design with higher reliability at lower cost than the nonrepairable system design.



Yedek bileşen tahsis probleminde eniyileme: Genetik algoritma ve kesikli olaylı Monte Carlo benzetimi

Merve Uzuner Şahin^{1*}, Orhan Dengiz², Berna Dengiz¹

¹Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06790, Ankara, Türkiye

²Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 38040, Kayseri, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Tamir edilebilir yedek bileşen tahsis probleminin eniyilemesi
- Artan arızalanma ve tamir oranının dikkate alınması
- Yüksek güvenilirliğe sahip daha düşük maliyetli sistemlerin tasarlanması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 07.05.2022

Kabul: 19.03.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1107901

Anahtar Kelimeler:

Sistem güvenilirliği,
yedek bileşen tahsis
problemi,
tamir edilebilir bileşen,
kesikli olay benzetimi,
genetik algoritma

ÖZ

Sistem güvenilirliği, iletişim ve elektronik sistemler gibi ileri teknolojiye sahip modern mühendislik sistemlerinin tasarımı ve analizinde yaygın olarak kullanılan önemli ölçütlerden biridir. Günlük hayatımıza giren, çoğu çalışma alanında ve sosyal yaşamda kullandığımız uygulamaları doğrudan etkileyen altyapı tasarım problemlerinin bir kısmı güvenilirlik ölçütünü dikkate alan eniyileme problemi olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle bu tür problemlerin çözümü, farklı disiplinlerde çalışan birçok araştırmacının yoğun ilgisini çekmektedir. Alan yazında yaygın olarak kullanılan Yedek Bileşen Tahsis Problemi (YBTP), sistemde yer alan bileşenlere paralel olarak yerleştirilen kullanıma hazır uygun bileşenler ile sistem güvenilirliğinin eniyilendiği sistem tasarımı olarak tanımlanabilir. Böylece, güvenilirlik başarımları ölçütü dikkate alınarak daha yüksek güvenilirlik değerine sahip sistem tasarımlarının elde edilmesi sağlanabilmektedir. Sistem özelliklerine bağlı olarak seçilen uygun yöntemle sistemin güvenilirlik değeri elde edilir. Bu çalışmada, artan arıza ve tamir oranlarının dikkate alındığı YBTP’de sistem güvenilirliğini gerçekçi bir yaklaşımla tahmin etmek için Kesikli Olaylı Benzetim (KOB) modeli, sistemin eniyilenmesi için ise Genetik Algoritma (GA) geliştirilmiştir. KOB modelinin geçerliliği test problemleri üzerinde gösterilmiştir. Önerilen yaklaşımla, YBTP için daha yüksek güvenilirliğe sahip sistem tasarımları daha düşük maliyetlerle elde edilebilmiştir.

Optimization of the redundancy allocation problem: Genetic algorithm and Monte Carlo simulation with discrete events

HIGHLIGHTS

- Solution of the redundancy allocation problem considering repairable components
- Considering the increasing failure and repair rates of system components
- System design with higher reliability at lower cost

Article Info

Research Article

Received: 07.05.2022

Accepted: 19.03.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1107901

Keywords:

System reliability,
redundancy allocation
problem,
repairable component,
discrete event simulation,
genetic algorithm

ABSTRACT

System reliability is one of the performance criteria commonly used in the literature to design and analyze complex engineering systems such as communication networks or server infrastructures and electronic devices. Some of the infrastructure designs that affect industrial processes or even social life are formulated as optimization problems with reliability criteria among the objectives. Such design problems have attracted the attention of many researchers in different disciplines. One commonly studied problem of this group in the literature is the Redundancy Allocation Problem (RAP), which can be defined as the design of a system targeting a high reliability using redundant components in a series-parallel arrangement. The system reliability is obtained with an appropriate method depending on the system characteristics. In this study, a method is proposed for system reliability optimization with a Genetic Algorithm (GA) that uses a Discrete Event Simulation (DES) model to estimate system reliability considering increasing failure and repair rates, reflecting realistic scenarios. The validity of the DES model has been demonstrated on the test problems that are commonly used in the RAP literature. Results show that system designs with higher reliability values at lower costs, where failure and repair scenarios are considered, can be obtained with this realistic approach.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *muzuner@baskent.edu.tr, orhan.dengiz@gmail.com, bdengiz@baskent.edu.tr / Tel: +90 312 246 6666 / 2197

1. Giriş (Introduction)

Modern mühendislik ve hizmet sistemlerinin karmaşıklaşan yapısı ve yüksek teknolojiye endüstriyel sistemler ve süreçleri, sistemlerin daha etkin bir şekilde değerlendirilmesinin önemini artırmıştır. Sistem güvenilirliği, karmaşık yapıdaki bu tür sistemlerin analizi ve tasarımında yaygın olarak kullanılan başarımlar ölçütlerinden birisidir. Sistem güvenilirliği, genel anlamda bir sistemin amacına uygun olarak çalışmasını ifade etmektedir. Genellikle mekanik, elektrik ve elektronik sistemlerde güvenilirlik probleminin önemli olduğu bilinmektedir. Bu nedenle alan yazında güvenilirlik kriterine göre en iyi sistem tasarımlarının elde edildiği çok sayıda çalışma vardır [1–3]. Günümüzde, bu tür karmaşık yapıdaki sistemlerin altyapılarının kurulduğunda, çeşitli sistem kısıtları altında sistem güvenilirliğinin eniyelenmesi önemli ve güncel bir problemdir. Sistem güvenilirliğinin eniyelenmesi için en yaygın olarak kullanılan problem tipi, yedek bileşen/alt sistem/sistemin kullanılmasına dayanan Yedek Tahsis Problemi (YTP)'dir. YTP, genellikle maliyet, ağırlık gibi çeşitli sistem kısıtları altında en yüksek güvenilirliğe sahip sistem tasarımındaki yedek sayısı ve özelliği ile ilgilenebilir. Sistem güvenilirliğindeki en büyük artış bileşen düzeyinde yedekleme yaklaşımının kullanımı ile sağlanmaktadır [4, 5]. Yedek Bileşen Tahsis Problemi (YBTP), sistemde yer alan bileşenlere paralel olarak yerleştirilen bileşenler ile daha yüksek güvenilirliğe sahip yeni sistem tasarımının belirlenmesi olarak tanımlanabilir.

Sistem güvenilirliğini eniyelemek amacıyla YBTP tanımını kullanan çalışmalarda, analitik, sezgisel ve metasezgisel yaklaşımlar kullanılmaktadır. Çeşitli sistem kısıtları altında, alt sistem sayısının ve alt sistemlerde bulunan bileşen sayısının artışına bağlı olarak olası alternatif sistem tasarımlarının sayısı üstel artış göstermektedir. Bu nedenle YBTP NP-zor bir problemdir [6]. Alan yazında mevcut çalışmalar çoğunlukla, sadece sabit arızalanma oranları ile arızalar dikkate alınmıştır. Çok az sayıda çalışmada ise arıza ve tamir durumu birlikte ele alınmış ancak yine sabit arızalanma ve tamir oranlarıyla çalışılmıştır [7–9]. Busacca vd. [7], Zoulfaghari vd. [8], ve Hadipour vd. [9] çalışmalarında, sabit arızalanma ve tamir oranlarını dikkate alarak bileşen kullanılabilirliğini analitik yöntemle hesaplamışlardır. Arızalanma ve tamir oranlarının sabit olduğu varsayımı sistem güvenilirliğinin analitik yöntemlerle kolay hesaplanabilmesinden kaynaklanmaktadır. Ancak bu varsayım arıza ve tamirlerin sistem güvenilirliği üzerindeki gerçek etkisini ortaya koyamamaktadır.

Gerçek hayat sistemlerinde, bir bileşenin arızalanması ve tamir edilene kadar devre dışı kalması sistemin güvenilirliğini negatif yönde etkilerken, aynı bileşenin tamir edilerek çalışır duruma dönmesi sistemin güvenilirliğini pozitif yönde etkilemektedir. Alan yazında yer alan çalışmalarda YBTP'lerin çözümlerinde bileşenlerin arızalandıktan sonra tamir edilmediği ve dolayısıyla devre dışı kaldığı varsayımının kullanılıyor olması, yani bu varsayım ile sistemlerin tasarlanması gerçekçi bir yaklaşım olmayıp maliyeti artırmaktadır. Oysa, gerçek hayat problemlerinde sistemi oluşturan bileşenler bozulduklarında tamir edilebilmektedir. Ayrıca, kullanımdan kaynaklanan yıpranmaya bağlı olarak artan arızalanma oranı (daha sık arıza) ile bozulmakta, tamiri yapan kişinin zaman içinde deneyim kazanmasına bağlı olarak da artan tamir oranı (daha kısa sürede tamir) ile tamir edilmektedir. Daha da önemlisi bileşenlerin arızalanma ve tamir edilme zamanları dikkate alınarak sistemin durum değişikliklerinin zamana bağlı olarak incelenmesi, sistemin doğal yapısına uygun olarak modellenmesini sağlar. Sistemlerin yaşam ömrü boyunca gerçeğe uygun yapıda dinamik davranışları dikkate alındığında güvenilirliğin en yüksek olacağı başlangıç tasarımları, yani hangi alt sistemde hangi tür bileşenden kaç adet yedek bulunmalı kararı, gerçekçi bir yaklaşımla elde edilebilecektir. Böylece yüksek

güvenilirliğe sahip tasarımlar daha düşük maliyetlerle elde edilebilecektir.

Bu çalışmada, alan yazından farklı olarak; i) bileşenlerin tamir edilerek kullanılması, ii) arıza ve tamir olaylarının artan arıza ve artan tamir oranları ile ortaya çıkması durumları dikkate alınarak YBTP için KOB ve GA'nın birlikte kullanıldığı yeni bir algoritma önerilmiştir. Sistem güvenilirliği KOB modeline dayalı Monte Carlo (MC) benzetimi ile tahmin edilmiştir. Kesikli Olaylı Monte Carlo Benzetim modelinin geçerliliği YBTP alan yazınında yaygın olarak kullanılan test problemleri üzerinde gösterilmiştir. Önerilen yaklaşımla arıza ve tamirlerin dikkate alındığı YBTP için daha yüksek güvenilirliğe sahip sistem tasarımları daha düşük maliyetlerle elde edilebilmiştir.

Çalışmanın geri kalan kısmı aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde YBTP'ye ait alan yazın taraması sonuçlarına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde sistem güvenilirliği ile ilgili temel kavramlar ve sistem güvenilirliğinin hesaplanmasında kullanılan yöntemler açıklanmıştır. Dördüncü bölümde ise GA ve KOB modeline dayalı Monte Carlo Benzetimi detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Beşinci bölümde deneysel sonuçlar, altıncı bölümde ise sonuç ve ileride yapılabilecek çalışmalar tartışılmıştır.

2. Alan Yazın Taraması (Literature Review)

Sistem güvenilirliğini artırmak amacıyla kullanılan yaklaşımlar dört ana başlık altında toplanabilir [4]. Bu yaklaşımlar; i) daha yüksek güvenilirliğe sahip bileşen kullanmak, ii) yedek bileşen/alt sistem/sistem kullanmak, iii) ilk iki yöntemi bir arada kullanmak, iv) değiştirilebilir bileşenleri yeniden atamaktır.

Güvenilirlik tahsis problemi, çeşitli sistem kısıtları altında en yüksek güvenilirliğe sahip sistem tasarımındaki bileşenlerin güvenilirlik değerleri ile ilgilendirilir. YTP, çeşitli sistem kısıtları altında en yüksek güvenilirliğe sahip sistem tasarımında, bileşenlere veya alt sistemlere paralel olarak yerleştirilen yedek sayısı ve özelliği ile ilgilendirilir. Bir diğer yöntem olan güvenilirlik ve yedek tahsis problemi, hem bileşenlerin güvenilirlik değerleri hem de yedek sayısı ve özelliği ile ilgilendirilir. Değiştirilebilir bileşenlerin yeniden atanması problemi ise çeşitli sistem kısıtları altında güvenilirlik değerinin en yüksek olduğu sistem tasarımındaki birbiriyle aynı işlevi yapabilen bileşenlerin uygun şekilde atanması problemidir.

Yedek bileşen kullanımı, sistemde yaşanan arıza sıklığının azalmasıyla daha yüksek güvenilirliğe sahip yeni sistemlerin elde edilmesini sağlamaktadır. Yedek bileşen kullanımı nedeniyle sistem güvenilirliği artarken maliyetlerde de artış olmaktadır. Bu durumda, sistemin ilk kurulum maliyeti ve arızalardan kaynaklanan maliyetler göz önünde bulundurularak sistem güvenilirliğini arttıran sistem tasarımı seçilmelidir.

Alan yazında sistem güvenilirliğini eniyeyen YBTP ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar, analitik yaklaşım kullananlar ([10–12]), sezgisel ([13]) ve metasezgisel yaklaşım kullananlar ([14–17]) olmak üzere çözüm yöntemi açısından 2 grup altında incelenebilir. Alan yazında yer alan ilk çalışmalarda küçük boyutlu sistemler için kesin çözüm sunan analitik yaklaşımlar kullanılmıştır. YBTP'nin NP-zor bir problem [6] olması nedeniyle, klasik eniyeleme yöntemleri ile büyük boyutlu problemlerin çözülmesi mümkün değildir. 1990'lı yılların sonlarından itibaren tek veya çok amaçlı YBTP çözümünde sezgisel ve metasezgisel yöntemlerden yararlanılmaktadır [18–21]. Sezgisel ve metasezgisel yöntemlerin kullanıldığı YBTP çalışmaları ile ilgili daha detaylı bilgi yukarıda belirtilen kaynaklarda ve Kuo ve Prasad [4], Coit ve Zio [22] ve Uzuner Şahin vd. [23]'te verilmektedir.

Matematiksel olarak sistem güvenilirliğinin hesaplandığı eniyileme yaklaşımlarında çözüm kolaylığı sağlanması amacıyla gerçek sistem tasarımlarından uzaklaşarak problemi basitleştirici çeşitli varsayımlar kullanılmıştır. Mısra ve Sharma [24], Gen vd. [25], Hsieh [26], Ramirez-Marquez vd. [27] ve Billionnet [28]'in çalışmalarında kullandıkları bu çok önemli ve etkili olan yöntemler güvenilirlik eniyilemesi araştırmalarının temelini oluşturmasına rağmen elde edilen çözümler gerçek tasarım sorunlarını çözmekten uzaktır. Öyle ki alan yazında yer alan çoğu çalışmada, bileşenlerin arızalandıktan sonra tamir edilmediği varsayımı kullanılmıştır. Ancak gerçek hayat problemlerinde arızalanan bileşenler tamir edildikten sonra sistem içinde görevini yeniden üstlenerek çalışmaya devam eder. Alan yazındaki bileşen arızasını dikkate alan birkaç çalışmada sabit arıza oranları dikkate alınmıştır ([29–31]). Oysa bir bileşenin çalışma zamanına yani kullanım yaşına bağlı olarak arıza sıklığının arttığı bilinmektedir [32]. Dolayısıyla, sistemler tasarlanırken bu gerçekçi yaklaşım dikkate alınırsa daha düşük maliyetlerle daha yüksek güvenilirliğe sahip sistemler tasarlanabilecektir.

Juang vd. [29], tamir edilebilir özellikte bileşenlerin yer aldığı problemde en ekonomik sistem tasarımını araştırmışlardır. Sistemin ekonomikliğini, kullanılabilirliğinin toplam maliyete bölünmesiyle hesaplanmıştır. Çalışmada, bileşenlerin kullanılabilirlik değerleri sabit arızalanma ve tamir oranları ile analitik olarak hesaplanmıştır. Jiansheng vd. [30], belirsiz arızalanma ve tamir oranlarını dikkate almış ve en yüksek kullanılabilirliğe ve en düşük maliyete sahip sistem tasarımlarını elde etmişlerdir. Bu çalışmalarda sabit arızalanma ve tamir oranları varsayımı kullanıldığı için bileşen güvenilirliği analitik yöntemle hesaplanmıştır. Zoulfaghari vd. [8], bileşenlerin tamir edilebilir özellikte olduğu durumu dikkate almış ve onlar da sabit arızalanma ve tamir oranları kullanarak bileşen kullanılabilirliğini analitik olarak hesaplamışlardır. Çalışmada ağırlık ve hacim kısıtları altında en yüksek kullanılabilirliğe ve en düşük maliyete sahip sistem tasarımları araştırılmıştır. Kayedpour vd. [31], bileşenlerin farklı stratejilerle yedeklenebildiği problem için, ağırlık kısıtı altında en yüksek kullanılabilirliğe ve en düşük maliyete sahip sistem tasarımlarını araştırmışlardır. Hadipour vd. [9], bileşenlerin tamir edilebilir özellikte olduğu durumu dikkate almış ve sabit arızalanma ve tamir oranlarını kullanmışlardır. Bileşenlerin farklı stratejilerle yedeklenebildiği bu çalışmada, ağırlık ve hacim kısıtları altında en yüksek ortalama arızalanma süresine ve en düşük maliyete sahip sistem tasarımları araştırılmıştır.

Tamir edilebilir bileşenlerin kullanıldığı sistem tasarımlarında, sistem bileşenlerinin sabit arıza ve/veya tamir oranlarına sahip olduğu varsayımının kullanılmasının önemli bir nedeni, sistem güvenilirliğinin analitik yöntemlerle kolay hesaplanabiliyor olmasıdır. Artan arızalanma oranının kullanılması durumunda ise sistem güvenilirliği fonksiyonunun analitik yöntemlerle hesaplanması mümkün değildir. Guilani vd. [32] çalışmalarında, bileşen arızalanmalarının yıpranmaya bağlı olarak zamanla artış gösterdiği gerçeğine değinmişlerdir. Ancak bu çalışmada sadece artan arızalanma oranı ile çalışılmış, tamir dikkate alınmamıştır. Bu nedenle, bileşen güvenilirlikleri MC benzetimi ile arızalanma verilerine dayalı olarak hesaplanmıştır. Oysa, gerçek hayat sistemlerinde arızalanan bileşenler tamir edilerek çalışmaya devam etmektedir. Bosse vd. [33], internet teknolojileri için tamir kaynaklarının kısıtlı olduğu durumda, arıza ve tamir durumlarındaki bağımlılığı dikkate alarak internet teknolojileri için YBTP'yi tanımlamışlardır. Çalışmalarında, Petri Ağları ve MC benzetimi ile sistem güvenilirliğini tahmin etmişlerdir. Ancak tanımladıkları kullanılabilirlik, durum uzayında durumlar arası geçiş önerilerinin özel bilgiye dayalı olarak çıkarılması gerekliliği ve kullanımının pratik olmaması yöntemin tercih edilebilirliğini tartışmalı duruma sokmaktadır. Uzaktan eğitim, sağlık uygulamaları gibi uygulama alanları binlerce bileşenin bulunduğu alt yapı sistemleri olup, sistem

bileşenlerinin olası durumlar arası geçişler ile ilgili gerçekçi değerlerin elde edilmesinin mümkün olmayacağı açıkça ortadadır. Bileşen durum geçişlerinin birbirlerini nasıl etkileyeceğinin belirlenmesi çok zor olup sadece varsayımlara dayalı olarak dikkate alınabilir.

Lins ve Droguett [34], arıza ve tamir işlemini dikkate alan çalışmalarında sabit zaman aralıkları sonunda sistemin çalışır/çalışmaz durumda olmasını dikkate alarak MC benzetimi ile güvenilirliği tahmin etmişlerdir. Bileşenlerin arızalanma zamanı ve tamir süreleri genelleştirilmiş yenileme sürecine (Renewable Process) dayalı olarak elde edilmiş olup, her bir zaman aralığının sonunda sistemin çalışır durumda olup olmadığı ikili karar ağacı diyagramı ile belirlenmiştir. Bu çalışmada önerilen algoritma alan yazında verilen problemlerin çözümünde kullanılmamış, sadece iki küçük örnek problem üzerinde denenmiştir ve herhangi bir başarımlı kriterine göre analiz edilmemiştir.

Çalışmamızda ise artan arızalanma ve tamir oranlarının dikkate alındığı sistem tasarımları için en yakın olay zamanına göre KOB modeli kullanılarak MC yaklaşımı ile sistem güvenilirliği tahmin edilmiş ve böylece gerçekçi bir tahmin modeli önerilmiştir. Ayrıca, hem sistem güvenilirliği tahmini için önerilen MC benzetiminin, hem de YBTP eniyilemesi için önerilen GA metasezgiselinin başarımlı alan yazında verilen problemler üzerinde gösterilmiştir.

3. Yedek Bileşen Tahsis Problemi (Ybtp) ve Matematiksel Model (Redundancy Allocation Problem (Rap) and Mathematical Model)

3.1. Güvenilirlik ile İlgili Temel Kavramlar (Fundamentals of Reliability)

Güvenilirlik, belirlenen çalışma koşulları altında, belirlenen zaman diliminde, bir sistemin kendisinden beklenen fonksiyonların yerine getirilmesi olasılığıdır [35]. Diğer bir deyişle, t rassal değişkeni arızalanma anını belirttiğinde, t anındaki güvenilirlik fonksiyonu, güvenilirliğin birikimli dağılım fonksiyonu olarak Eş. 1'deki gibi gösterilir:

$$R(t) = P(t > T) \quad (1)$$

Bu durumda arızaların birikimli dağılım fonksiyonunu, $F(t)$,

$$F(t) = P(t \leq T) \quad (2)$$

olduğu bilindiğinden, arızaların birikimli dağılım fonksiyonu, $F(t)$, $R(t)$ 'nin tümlayicisidir.

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (3)$$

Arızalanma zamanı t 'nin olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(t)$ ise, güvenilirlik fonksiyonu, güvenilirlik birikimli dağılım fonksiyonu Eş. 4'te verilmiştir.

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(s) ds \quad (4)$$

Sistem bileşenlerinin arızalanma eğilimleri, sistem güvenilirliği üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Arızalanma/Başarısızlık, belirli bir t zamanına kadar herhangi bir arızalanmanın olmadığı bilindiğinde bileşenin $(t+dt)$ zaman aralığında arızalanma olasılığıdır [36]. Arızalanma/Başarısızlık oranı olarak adlandırılan bu olasılık, dt zaman aralığının bir fonksiyonudur.

T , bir bileşenin arızalandığı zaman olmak üzere başarısızlık fonksiyonu Eş. 5'te verilmiştir.

$$h_T(t)dt = P(t < T \leq t + dt | T > t) = \frac{P(t < T \leq t + dt)}{P(T > t)} = \frac{f_T(t)dt}{R(t)} \quad (5)$$

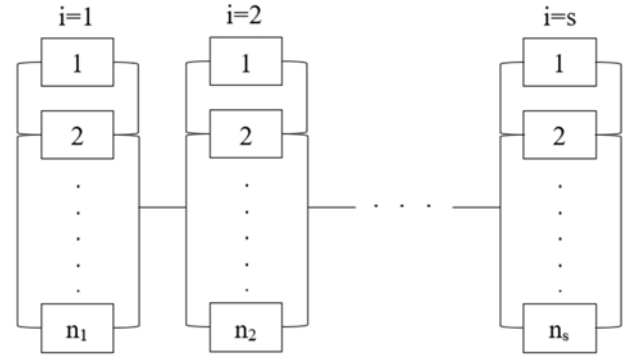
Başarısızlık fonksiyonu, bir bileşenin ömrünü, genel olarak, üç farklı aşamadan oluşan 'banyo küveti' eğrisi şeklinde gösterir (Şekil 1). Eğri üzerindeki her bir bölgenin uzunluğu, bileşenin özelliğine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Eğrinin ilk bölgesi, bileşenlerin henüz yeni olduğu erken yaşam sürecini gösterir. Bu sürecin başlangıcında arızalanma oranı yüksektir, ancak hatalı aksam, kötü lehim gibi potansiyel arıza nedenleri giderilerek zaman içinde arızalanma olasılığı azaltılır. İkinci bölgede bileşenler sabit arızalanma oranına sahiptir; arızalar bileşenin kullanım süresinden bağımsız olarak rassal zamanlarda ortaya çıkar. Eğrinin üçüncü bölgesi, bileşenlerin zaman içinde kullanımdan kaynaklı yıpranmalarına bağlı olarak artan arızalanma oranına sahip olduğunu gösterir.

Tamir edilebilen bileşenler çalışma süreleri boyunca çalışma – arıza – çalışma döngüsü içerisinde devam ederler. Bir bileşenin çalışır durumda olmadığı yani arızalı olduğu süreye etki eden çok sayıda faktör bulunmaktadır. Bunlardan bazıları yedek parça stoğu, tamir ekibinin varlığı, insan faktörü ve çevre faktörü gibi sistemin fiziksel özellikleridir. Arıza süresi bu faktörlere bağlı olarak iki bölüme ayrılabilir. *Bekleme süresi*; henüz tamir işlemine başlanılmayan, yedek parça vb. temini için beklenen süre olup operasyonel süreçlere bağlıdır. *Tamir Süresi* ise bileşenin fiili olarak tamir edildiği yani tamir personelinin tamir için geçirdiği süredir. Bu süre doğrudan insan faktöründen yani tamiri yapan kişinin bilgi ve deneyiminden etkilenmektedir [37]. Arızalanma sıklığına bağlı olarak tamir personelinin bileşen arızaları üzerinde deneyim kazanmakta olup arızalanan bileşenlerin zamanla daha kısa sürede tamir edilebilmektedir.

3.2. Problemin Tanımı (Problem Definition)

YBTP, sistemde yer alan bileşenlere paralel olarak yerleştirilen bileşenler ile daha yüksek güvenilirliğe sahip yeni sistemlerin tasarlanması olarak tanımlanabilir. Belirli kısıtlar altında, alt sistem ve alt sistemlerde bulunan bileşen sayısının artışına bağlı olarak olası alternatif sistem tasarımlarının sayısı üstel olarak artış göstermektedir. Bu nedenle YBTP NP-zor bir problemdir [13]. s adet seri bağlı her bir alt sisteminde paralel bileşenlerin bulunduğu örnek bir sistem yapısı Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Yedek bileşenli sistem tasarımı [38] (System Design with Redundant Component)

Alan yazında yer alan çalışmalarda YBTP aşağıda verilen varsayımlar kullanılarak modellenmektedir.

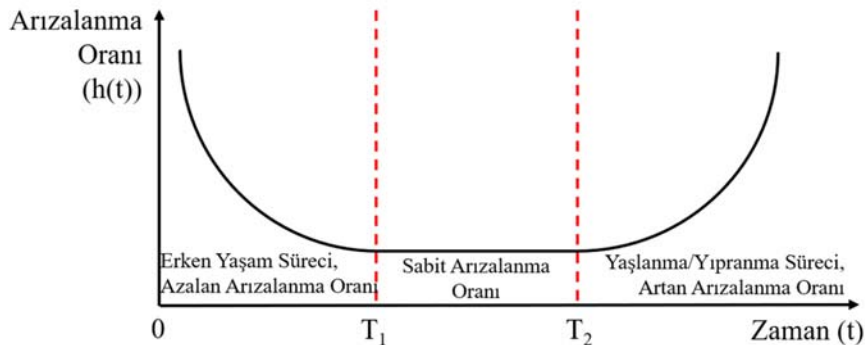
Varsayımlar;

1. Her bir alt sistemde k veya daha çok sayıda bileşenin arızalanması sistemin arızalanmasına neden olur (n 'den k 'lı sistem).
2. Bileşenlerin arızalanmaları birbirinden bağımsızdır.
3. Bileşenler sabit arızalanma oranına sahiptir.
4. Sistemde önleyici bakım planlaması yapılmamaktadır.
5. Bileşenler sistemde çalışır veya arızalı durumda bulunabilir.
6. Bileşenler arızalandığında tamir edilmemektedir.
7. Sistem ağırlığı ve maliyeti, bileşen ağırlık ve maliyetlerinin doğrusal bir fonksiyonudur.

Bu çalışmada dikkate alınan YBTP ise artan arıza ve tamir oranları dikkate alınarak gerçekçi yaklaşımla çözülmüştür. Bu nedenle 3 ve 6 numaralı varsayımlar aşağıdaki şekilde değiştirilmiş ve 8,9,10 numaralı yeni varsayımlar eklenerek problem aşağıdaki şekilde yeniden tanımlanmıştır.

Varsayımlar;

1. Her bir alt sistemde k veya daha çok sayıda bileşenin arızalanması sistemin arızalanmasına neden olur (n 'den k 'lı sistem).
2. Bileşenlerin arızalanmaları birbirinden bağımsızdır.
3. Bileşenler artan arızalanma ve tamir oranlarına sahiptir.
4. Sistemde önleyici bakım planlaması yapılmamaktadır.
5. Bileşenler sistemde çalışır veya arızalı durumda bulunabilir.
6. Bileşenler arızalandığında tamir edilmektedir.
7. Sistem ağırlığı ve maliyeti, bileşen ağırlık ve maliyetlerinin doğrusal bir fonksiyonudur.
8. Bileşenler tamir sonrası çalışmaya devam etmektedir.



Şekil 1. Başarısızlık fonksiyonu [35] (Hazard Function)

9. Tamir için sistemde yeterli sayıda görevli bulunmaktadır.
10. Bileşenlerin tamir edilme maliyeti ihmal edilmektedir.

Problemin karar değişkeni, parametreleri aşağıda açıklanmış ve matematiksel modeli Eş. 6'da verilmiştir.

Karar Değişkeni

x_{ij} i'inci alt sistemde bulunan j'inci tür bileşenin sayısı

Parametreler:

- R : sistem güvenilirliği
 C : sistem maliyeti
 W : sistem ağırlığı
 r_{ij} : i'inci alt sistemde bulunan j'inci tür bileşenin güvenilirliği
 c_{ij} : i'inci alt sistemde bulunan j'inci tür bileşenin maliyeti
 w_{ij} : i'inci alt sistemde bulunan j'inci tür bileşenin ağırlığı
 m_i : i'inci alt sistemdeki alternatif bileşen sayısı (bileşen türü sayısı)
 s : alt sistem sayısı
 k : her bir alt sistemde, arızalandığında sistemin arızalanmasına neden olan minimum bileşen sayısı
 n_i : i'inci alt sistemde bulunan toplam bileşen sayısı,
 $n_i = \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij}$
 $n_{max,i}$: i'inci alt sistemde toplamda bulunabilecek en fazla bileşen sayısı ($n_i \leq n_{max,i} \forall i$)

Matematiksel Model:

$$\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^{m_i} c_{ij} x_{ij} \leq C$$

$$\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^{m_i} w_{ij} x_{ij} \leq W$$

$$\sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} \geq (n_{max,i} - k + 1), \quad i = 1, 2, \dots, s \quad (6)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1, 2, \dots\}$$

k.a.

$$enb R = \prod_{i=1}^s \prod_{j=1}^{m_i} [1 - (1 - r_{ij})^{x_{ij}}]$$

Eş. 6'da görülen tek amaçlı doğrusal programlama modelinde amaç R-sistem güvenilirliğini enbüyüklemektir. Bu model ile istenen maliyet ve ağırlık kısıtlarını aşmayacak ve her bir alt sistemde çalışması gereken minimum bileşen sayısını (n 'den k 'li sistem) sağlayacak en yüksek güvenilirliğe sahip sistem tasarımı seçilir.

Tamir edilebilir ve artan arızalanma oranına sahip bileşenlerin dikkate alındığı durumda sistem güvenilirliğinin Eş. 6'da verilen matematiksel modelle hesaplanması mümkün değildir. Bu nedenle, sistem çalışırken ortaya çıkan arıza ve tamir olayları en yakın olay zamanına göre ilerletilen KOB modeli ile modellenerek sistem güvenilirliği MC benzetimi ile tahmin edilmiştir. NP-zor bir problem olan [6] YBTP'nin eniyilenmesi için ise GA geliştirilmiştir.

4. Çözüm Yaklaşımı (Solution Approach)

4.1. Genetik Algoritmalar (Genetic Algorithm)

Genetik Algoritmalar, doğada gözlemlenen evrimsel mekanizmalara benzer mekanizmaları taklit eden algoritmik bir yaklaşımdır. 1975 yılında John Holland tarafından geliştirilmiş ve önerilmiştir [39]. Eniyi çözümü bulmayı garanti etmeyen GA, çözüm zamanı problemin büyüklüğü ile üstel artan problemlerde eniyiye çok yakın sonuçlar vermektedir. Genetik algoritmalar farklı çözümlerden oluşan bir yığın ile çalışır. GA'yı diğer sezgisel arama yöntemlerinden ayıran en önemli özellik, parametrenin kendisi yerine parametreleri temsil eden dizilerin kullanılmasıdır. GA'da gösterim (kodlama) gerekli bilgiyi tutma ve çözümü dizi halinde sunma işlemidir. Dizi içerisinde yer alan her değer çözüme ilişkin bir bilgiyi saklamaktadır.

GA'yı diğer sezgisel arama algoritmalarından ayıran bir diğer önemli özellik ise noktadan noktaya değil, noktaların oluşturduğu bir yığın içinde aramayı gerçekleştirmesidir [39]. Klasik eniyileme yöntemlerinin aksine GA, başlangıç yığını (nesil) sayesinde çok yönlü arama yapabilir ve kullanılan yığın yaklaşımı sayesinde yerel en iyide düşme tehlikesi oldukça azalır. Bu durum, her yeni nesilde görece iyi çözümlerin yeniden üretilmesi ve kötü çözümlerin ölmesi şeklinde sağlanır. GA'nın ilk adımı başlangıç yığınının oluşturulmasıdır.

Algoritmanın her iterasyonunda, bir olasılıklı seçim süreci ile mevcut yığının dizileri arasından yeni yığının dizileri seçilir. Kullanılan farklı seçim mekanizmaları ile arama, yüksek uygunluğa sahip bölgelere doğru yönlendirilir. Bu bölgelerdeki yeni çözüm noktalarına ulaşmada ise genetik operatörler (çaprazlama ve mutasyon operatörleri) kullanılır. Genetik operatörler, yığının genetik bilgilerini kullanarak yeni çözüm elde eder ve algoritmanın performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Doğadaki yığınların uygunluğu, bireyin büyümesi ve çoğalmasında engellere karşı koyma yeteneği ile belirlenir. Bu doğal seçim, bir dizinin yaşaması yani sonraki yığına geçebilmesi ya da elenmesinde karar verici olarak değerlendirme fonksiyonunun kullanılmasıyla yapay olarak gerçekleştirilir. Uygunluk değeri, bir sonraki yığını oluşturacak yeni aday çözümlerin elde edilmesi için mevcut yığından hangi aday tasarımların kullanılacağına belirlenmesinde rol oynamaktadır. Yığındaki dizilerin bir değerlendirme fonksiyonuyla uygunluk değerleri hesaplanır. Yüksek uygunluk değerine sahip diziler, yeni dizilerin yani yeni çözümlerin elde edilmesinde yüksek olasılığa sahiptir [40]. GA'da kısıtları sağlamayan, yani uygun olmayan çözümler dikkate alınarak daha iyi çözümlere ulaşma şansı artırılabilir. Bu durumda değerlendirme fonksiyonu, amaç fonksiyonu ile ceza fonksiyonundan oluşur [41].

GA, ilgilenilen problemi çözmek için farklı şekillerde uygulanabilir. Geleneksel GA yaklaşımına alternatif olarak sunulan durağan GA yaklaşımında her iterasyonda yığının tamamı yerine küçük bir bölümü güncellenmektedir [42,43]. Durağan GA, bireylerin uygunluğu ve değerlendirilmesinin hesaplama açısından pahalı olduğu durumlarda daha iyi bir seçim olmaktadır [44].

Bu çalışmada ele alınan problem için oluşturulan GA'da kullanılan özellikler aşağıda açıklanmaktadır: Başlangıç yığını rassal olarak oluşturulmuştur. Yığındaki her dizi bir aday sistem tasarımı göstermektedir. Problemin kısıtlarını sağlayan en yüksek güvenilirliğe sahip sistem tasarımı elde etmek amaçlanmaktadır. Her dizinin uzunluğu, alt sistem sayısı ve her bir alt sistemde bulunabilecek maksimum bileşen sayısının çarpımına (sxn) eşittir. Dizideki her eleman, ilgili konumda bulunan bileşen türünü göstermektedir. Her aday tasarım tamsayı kodlama ile gösterilmiştir [45]. Dizi içerisinde bileşen bulunmayan/kullanılmayan elemanlar

“0” ile kodlanmıştır. Dizi içinde ilgili alanda bileşen bulunup bulunmadığı ve varsa bileşenin türü rassal olarak belirlenmektedir. İlgili alanda bileşenin varlığı ve varsa türü eşit olasılıkla üretilmiştir. Bu çalışmada kullanılan değerlendirme fonksiyonu, problemin amaç fonksiyonu ile ceza fonksiyonundan oluşmaktadır. Amaç fonksiyonu, aday tasarımın sistem güvenilirliğini hesaplamaktadır. Sistem güvenilirliği bu çalışmada geliştirilen KOB modeli kullanılarak MC Benzetimi ile tahmin edilir. KOB-MC benzetimi Bölüm 4.2’de detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Algoritmanın işleyişi sırasında kısıtları sağlamayan yani uygun olmayan çözümlerin de dikkate alınmasını sağlamak üzere Feizabadi ve Jahromi’nin [46] önerdiği ceza fonksiyonu kullanılmıştır. Böylece uygun olmayan çözüm alanında da araştırma yapılarak arama uzayında çeşitliliğin sağlanması yoluyla sonraki iterasyonlarda daha iyi çözümler elde edilebilmektedir. $g_1(x) \leq b_1$ ve $g_2(x) \leq b_2$ sistem kısıtları ve m_1 ve m_2 yeterince büyük sayılar iken ceza fonksiyonu Eş. 7’de verilmiştir. Bu sayede, sadece kısıtlar ihlal edildiğinde karşılık gelen ceza terimi sıfırdan daha büyük bir değer alır ve amaç fonksiyonunun değeri azalır. Yapılan ön denemeler sonucunda ceza katsayıları, m_1 ve m_2 , sırasıyla 1.0 ve 1.5 olarak belirlenmiştir.

$$f(t) = R(t) - m_1 \times \text{Maks} \left\{ 0, \frac{g_1(x)}{b_1} - 1 \right\} - m_2 \times \text{Maks} \left\{ 0, \frac{g_2(x)}{b_2} \right\}, \quad m_1, m_2 > 0 \quad (7)$$

Bu çalışmada, makul sürelerde çözüme ulaşabilmek için her iterasyonda az sayıda çocuk ($N-k$ kadar) oluşturulan ve bu az sayıdaki

çocuğun ebeveynlerle rekabet ettiği durağan GA kullanılmıştır. Çalışmada geliştirilen GA’da seçim mekanizması olarak grup genişliği iki olan Turnuva yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca, düzgün (uniform) çaprazlama operatörü ve dizi elemanlarından rassal seçilen bir tanesinin değerinin -mümkün değerleri içerisinde- rassal olarak değiştirilerek yeni dizinin elde edildiği mutasyon operatörü kullanılmıştır. Fyffe vd. [47] tarafından oluşturulan ve Nakagawa ve Miyazaki [12] tarafından farklı ağırlık kısıtlarıyla genişletilen test problemleri üzerinde yapılan ön denemelerde GA’nın ortalama 1000 iterasyonda tüm problemler için iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu nedenle GA’nın 1000 iterasyon çalıştırılması durdurma koşulu olarak seçilmiştir. Arıza ve tamirlerin dikkate alınarak sistem güvenilirliğinin Kesikli Olaylı Monte Carlo Benzetimi ile tahmin edilmesi ve yedekliğin kullanıldığı sistem güvenilirliğinin durağan GA ile eniylenmesi için oluşturulan sözde kod Şekil 3’te verilmiştir.

4.2. Kesikli Olaylı Monte Carlo Benzetimi (Discrete Event Simulation)

Sistem güvenilirliğinin hesaplanması amacıyla kullanılan analitik yöntemler daha önceki bölümlerde detaylı olarak verilmiştir. Yüksek güvenilirliğe sahip sistemler tasarlanırken, bileşenler arızalandığında tamir edilebilir durumlarının da dikkate alınması daha gerçekçi bir yaklaşım olup araştırmacıların dikkate alması gereken önemli bir problemdir.

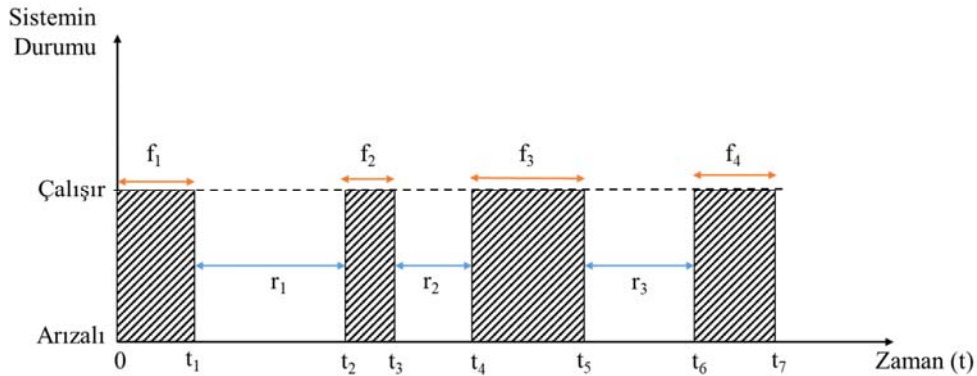
Tamir edilebilen bileşenler çalışma süreleri boyunca çalışma-arıza-çalışma döngüsü içerisinde devam ederler (Şekil 4). Burada f_1, f_2, \dots

```

N bireyden oluşan başlangıç yığınınını oluştur
For i= 1 to N (yığındaki tüm bireyler için)
    Kesikli Olaylı Monte Carlo Benzetimi
    Bireylerin uygunluk değerini (=Sistem güvenilirliği-Ceza fonksiyonu değeri) hesapla
End for
Uygunluk değerine göre büyükten küçüğe doğru sırala
While not {bitirme koşulu} do
    En iyi ilk “P” adet bireyi yeni yığına taşı (I: Doğrudan taşınan birey sayısı)
    For i= I to N (Kalan (N-I) bireyden oluşan kuşak aralığına ulaşana kadar oluşturulan yeni çocuk sayısı)
        İkili turnuva seçim mekanizması ile ebeveyn seç
        Düzgün çaprazlama ile çocuk oluştur
        Mutasyon ile çocukları değişime uğrat
        Çocukları yeni yığına ekle
    End for
    Bireylerin uygunluk değerini hesapla
    Uygunluk değerine göre büyükten küçüğe doğru sırala
End while

```

Şekil 3. Artan arıza ve tamir oranının dikkate alındığı YBTP için Durağan GA (Steady-state GA for the RAP considering increasing failure and repair rate)



Şekil 4. Bir bileşene ait durum uzayı diyagramı (State space diagram of a component)

ile gösterilen süreler bileşenin arızalanmasına kadar geçen süreleri, r_1, r_2, \dots ile gösterilen süreler ise bileşenin tamir edilene kadar geçen süreleri ifade etmektedir. Bu durumda, durum değişkenlerinin değişiminin sistem başarımını nasıl etkilediğini modelleyen bir araçla sistem güvenilirliği hesaplanmalıdır.

Bu çalışmada önerilen KOB modelinde; alan yazında KOB modelinin kullanıldığı tek çalışma olan Lins ve Droguett [34]'ten farklı olarak olayların ortaya çıkışına dayalı yaklaşım kullanırken, benzetim zamanı en yakın olay zamanına göre ilerletilmiştir. Her bir bileşenin arızalanma ve tamir süreleri uygun dağılıma göre belirlenerek alt sistemlerin çalışıyor olup olmama durumları sırasıyla kontrol edilmiştir. Güvenilirlik alanında bileşen ömrü için yaygın olarak kullanılan dağılımlardan biri Weibull dağılımıdır [48]. Bu dağılım bileşenler artan, azalan veya sabit arızalanma oranlarına sahip olduğunda ilgili parametrelerle kullanılabilir [32]. Weibull artan arızalanma fonksiyonu Eş. 8'de verilmiştir.

$$h(t) = \frac{B}{A} \left(\frac{t}{A} \right)^{B-1} ; A > 0, B > 0, t > 0 \quad (8)$$

Ölçek ve şekil parametreleri sırasıyla A ve B ile gösterildiğinde güvenilirlik fonksiyonu Eş. 9'da görüldüğü gibidir.

$$R(t) = e^{-(t/A)^B} \quad (9)$$

Artan arızalanma ve tamir oranları ile çalışıldığı için her bir bileşenin arızalanma zamanları ve tamir süreleri Weibull dağılımdan üretilmiştir. Arızalar için dağılım parametreleri, alan yazında ilgili problemler için verilen güvenilirlik değerleri kullanılarak elde edilmiştir [49]. Tamir süreleri için Weibull dağılım parametreleri rassal olarak belirlenmiştir. KOB modeli, her bir alt sistem durumunu dikkate alarak sistemin çalışıyor/çalışmıyor durumunda olma kararını verirken MC benzetimi ile genel sistem güvenilirliği tahmin

edilmiştir. Bu çalışmada önerilen Kesikli Olaylı Monte Carlo Benzetimi algoritmasının sözde kodu Şekil 5'te verilmiştir. Arıza ve tamirlerin dikkate alınarak sistem güvenilirliğinin Kesikli Olaylı Monte Carlo benzetimi ile tahmin edildiği ve yedekliğin kullanıldığı sistem güvenilirliğinin GA ile eniyilenmesi için önerilen yöntemin akış şeması Şekil 6'da verilmiştir.

5. Deneysel Analiz (Experimental Analysis)

5.1. Kesikli Olaylı Monte Carlo Benzetim Modelinin Doğrulanması ve Geçerliliği (Verification and Validation of the Discrete Event Simulation)

Kesikli Olaylı Monte Carlo Benzetim modelinin doğrulanması, problemin akış şeması ve program kodunun uygunluk kontrolü ile sağlanmıştır. Kesikli Olaylı Monte Carlo Benzetim modelinin geçerliliği ise alan yazından alınan 25 test problemi üzerinde gösterilmiştir. Bileşen tamirlerinin dikkate alınmadığı sistemlerden oluşan bu test problemlerinin analitik yöntemle hesaplanan güvenilirlikleri alan yazındaki çalışmalardan bilinmektedir [50–54].

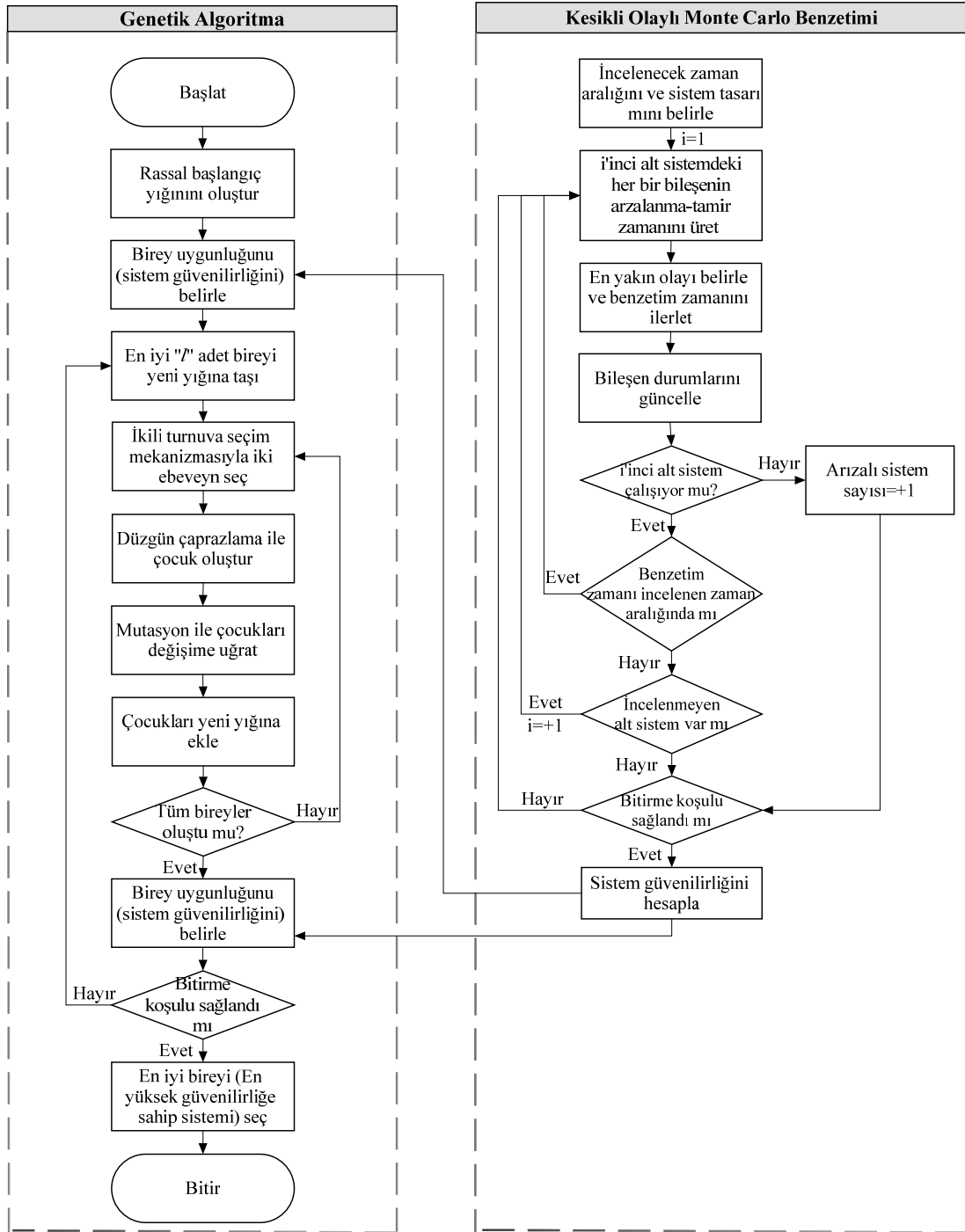
Bu çalışma kapsamında geliştirilen ve önerilen Kesikli Olaylı Monte Carlo Benzetim modeli alan yazından alınan Tablo 1'de verilen bu test problemleri için, tamirlerin dikkate alınmadığı durumda çalıştırılmış ve %95 güvenlik düzeyinde güven aralıkları 30 tekrar ile hesaplanmıştır. Test problemlerinin, analitik yöntemle elde edilmiş bilinen güvenilirlik değerleri, yakınsama için gerekli Kesikli Olaylı Monte Carlo Benzetim deneme sayıları ve sistem güvenilirlik değerlerinin güven aralıkları Tablo 1'de verilmektedir. Problem tipine ve boyutuna bağlı olarak yakınsama için gerekli Kesikli Olaylı Monte Carlo Benzetim tekrar sayılarının 100-800 aralığında değiştiği görülmektedir. Tablo 1'de görülen güven aralıklarının tümü ilgili problemler (sistemler) için bilinen güvenilirlik değerlerini kapsamaktadır. Böylece bu çalışmada önerilen Kesikli Olaylı Monte Carlo tahmin modelinin geçerliliği gösterilmiştir.

```

sayaç ← 0
For rep=1 to Rep
  Sistemde yer alan altsistem ve bileşenlerini belirle
  For i=1 to s
    While not {  $t_{benzetim} > t_{son}$  } do
       $t_{benzetim} \leftarrow 0$ 
      j "eleman" 1 to  $n_i$ 
      Bileşen durumları ← çalışır
      Bileşenlerin arızalanma zamanlarını  $F_A(X)$ 'den üret
       $t_{benzetim} \leftarrow t_{enyakın}$  (En erken arızalanan bileşenin zamanı)
      While not {altsistem arızalı} do
        Bileşen durumlarını güncelle ve en yakın olay
        (arızalanma/tamir) zamanlarını  $F_A(X)/F_T(X)$ 'den üret
         $t_{benzetim} \leftarrow t_{enyakın}$  (En yakın olay zamanına sahip bileşenin
        zamanı)
        break if { $t_{benzetim} > t_{son}$ }
      End while
      if altsistem arızalı
        sayaç ← sayaç +1
         $t_{benzetim} \leftarrow t_{son}$ 
         $i \leftarrow i+1$ 
      End if
    End while
  End for
End for
Sistem güvenilirliği ← (Rep-sayaç)/Rep raporla

```

Şekil 5. Sistem güvenilirliğinin tahmini için Kesikli Olaylı Monte Carlo Benzetimi
(Discrete Event Simulation for the system reliability)



Şekil 6. Arıza ve tamirin dikkate alınarak yedekliğin kullanıldığı sistem güvenilirliğinin GA ile eniylenmesi akış şeması (Flow chart of the proposed DES+GA)

5.2. Genetik Algoritma Sonuçları (Results of the Genetic Algorithm)

Bu bölümde, Fyffe vd. [47] tarafından oluşturulan ve Nakagawa ve Miyazaki [12] tarafından farklı ağırlık kısıtlarıyla genişletilen bazı test problemleri bu çalışmada önerilen GA ile çözülmüş ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

Fyffe vd. [47] tarafından oluşturulan ve en iyi sonuçları bilinen on dört adet seri bağlı her bir alt sistemde üç veya dört alternatif bileşen bulunan test problemleri Tablo 2'de görülmektedir. Bu test

problemlerinde maliyet sınırı 130 birim, ağırlık sınırı 159-191 arasında değişmektedir [12].

Tablo 2'de r_{ij} bileşenin güvenilirliği, c_{ij} bileşenin maliyeti, w_{ij} ise bileşenin ağırlığıdır. Belirlenen t zaman ($t=10$) değerinde bileşen güvenilirlikleri kullanılarak arızalar arası zaman dağılımı için elde edilen ilgili Weibull dağılım parametreleri Tablo 3'te verilmiştir [49]. Tablodaki kesik çizgi içeren hücreler o alt sistem için o bileşenin olmadığını göstermektedir. Her bir bileşenin tamir süresi için kullanılan Weibull dağılım parametreleri ise Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 1. Kesikli Olaylı Monte Carlo Benzetim Modelinin Geçerlilik Analizi
(Verification of the Discrete Event Simulation)

Alan Yazından Problemler	Alan Yazında		Önerilen Yöntem Sonuçları	
	Bilinen Sistem	Güvenilirliği	Kesikli Olaylı Monte Carlo Benzetim	Güven Aralığı (%95)
			Tekrar Sayısı	
1 Berman ve Ashrafi [50]	0,7144		200	[0,7106, 0,7194]
2	0,9467		500	[0,9451, 0,9469]
3	0,9700		300	[0,9689, 0,9711]
4	0,9657		700	[0,9656, 0,9664]
5 Coit [51]	0,9716		600	[0,9711, 0,9722]
6	0,9682		100	[0,9667, 0,9733]
7	0,9702		200	[0,9683, 0,9717]
8	0,9710		700	[0,9710, 0,9719]
9	0,9702		100	[0,9667, 0,9733]
10 Tillman ve Liittschwager [52]	0,9850		800	[0,9849, 0,9851]
11	0,9135		200	[0,9123, 0,9177]
12	0,9500		400	[0,9489, 0,9511]
13	0,8671		600	[0,8663, 0,8677]
14 Coit [51]	0,9501		700	[0,9494, 0,9506]
15	0,9423		800	[0,9419, 0,9431]
16	0,9504		500	[0,9491, 0,9509]
17	0,9343		400	[0,9338, 0,9362]
18	0,9501		200	[0,9479, 0,9521]
19 Tillman vd. [38]	0,6970		100	[0,6910, 0,7090]
20 Fyffe vd. [47]	0,9665		200	[0,9632, 0,9668]
21 Luus [53]	0,9447		700	[0,9436, 0,9449]
22 Yun vd. [54]	0,6640		800	[0,6638, 0,6662]
23	0,7887		600	[0,7870, 0,7897]
24 Coit ve Konak [55]	0,9409		100	[0,9353, 0,9447]
25	0,8478		800	[0,8466, 0,8484]

Tablo 2. Test probleminin özellikleri (Features of the Test Problem)

Alt sistem (i)	Bileşen Türü (j)											
	1			2			3			4		
	r_{ij}	c_{ij}	w_{ij}	r_{ij}	c_{ij}	w_{ij}	r_{ij}	c_{ij}	w_{ij}	r_{ij}	c_{ij}	w_{ij}
1	0,9	1	3	0,93	1	4	0,91	2	2	0,95	2	5
2	0,95	2	8	0,94	1	10	0,93	1	9	-	-	-
3	0,85	2	7	0,9	3	5	0,87	1	6	0,92	4	4
4	0,83	3	5	0,87	4	6	0,85	5	4	-	-	-
5	0,94	2	4	0,93	2	3	0,95	3	5	-	-	-
6	0,99	3	5	0,98	3	4	0,97	2	5	0,96	2	4
7	0,91	4	7	0,92	4	8	0,94	5	9	-	-	-
8	0,81	3	4	0,9	5	7	0,91	6	6	-	-	-
9	0,97	2	8	0,99	3	9	0,96	4	7	0,91	3	8
10	0,83	4	6	0,85	4	5	0,9	5	6	-	-	-
11	0,94	3	5	0,95	4	6	0,96	5	6	-	-	-
12	0,79	2	4	0,82	3	5	0,85	4	6	0,9	5	7
13	0,98	2	5	0,99	3	5	0,97	2	6	-	-	-
14	0,9	4	6	0,92	4	7	0,95	5	6	0,99	6	9

Kaynak: Fyffe vd. [47]

GA'nın performansının genel olarak seçilen parametre değerlerine bağlı olduğu alan yazında gösterilmiştir. Bu çalışmada dikkate alınan gerçekçi varsayımlarla tanımlı YBTP için probleme özgü geliştirilen GA'nın performansı ise yığın genişliği, iterasyon sayısı, turnuva genişliği ve genin mutasyona uğrama olasılığı parametrelerinin farklı kombinasyonları ile yapılan ön denemelerle belirlenmiştir. Tamirin dikkate alınmadığı durum için elde edilen GA sonuçları, alan yazında bilinen sonuçlarla karşılaştırılarak bulunabilecek en iyi sonuçların (analitik sonuçlara yakınsayan sonuçların) yığın genişliği (N)=100, iterasyon sayısı=1000, turnuva genişliği=2 ve genin mutasyona uğrama olasılığı=0,002 olan parameter kombinasyonu ile elde edildiği belirlenmiştir. Diğer parametreler olan kuşak aralığı (çocuk oranı),

çaprazlama ve mutasyon operatörleri istatistikî deney tasarımı ile elde edilmiştir. Bu amaçla 3^k faktöriyel tasarım uygulanmıştır. Kuşak aralığı için 0,10, 0,20, 0,30; çaprazlama operatörü için 0,75, 0,85, 0,95 ve mutasyon operatörü için 0,35, 0,65, 0,95 düzeyleri yine ön denemelerle seçilmiştir. Her faktör kombinasyonu için 5'er deneme yapılmış ve toplamda 135 (=5x27) adet deneme gerçekleştirilmiştir. Varyans analizi (ANOVA) ile faktörlerin başarımlı ölçütü üzerinde etkili olup olmadığı, DUNCAN çoklu aralık testi ile faktör düzeyleri arasında anlamlı bir farklılığın olup olmadığı test edilmiştir. SPSS paket programı ile yapılan analizlerde başarımlı ölçütü olarak sistem güvenilirliğinin tahmin edilen değeri dikkate alınmıştır. Varyans analizi (ANOVA) ile faktörlerin başarımlı ölçütü üzerinde etkili olup

Tablo 3. Arızalar için Weibull dağılımının parametre değerleri (The parameter values of Weibull Distribution for failures)

Alt sistem (i)	Bileşen Türü (j)							
	1		2		3		4	
	A	B	A	B	A	B	A	B
1	85,27	1,05	89,00	1,20	85,55	1,10	132,34	1,15
2	169,24	1,05	112,42	1,15	121,62	1,05	-	-
3	45,45	1,20	70,77	1,15	60,03	1,10	106,55	1,05
4	40,56	1,20	55,53	1,15	52,16	1,10	-	-
5	112,42	1,15	121,62	1,05	118,84	1,20	-	-
6	546,05	1,15	347,17	1,10	208,21	1,15	210,36	1,05
7	71,54	1,20	86,74	1,15	141,56	1,05	-	-
8	36,61	1,20	70,77	1,15	85,55	1,10	-	-
9	208,21	1,15	799,25	1,05	143,74	1,20	77,93	1,15
10	49,54	1,05	45,45	1,20	77,35	1,10	-	-
11	141,56	1,05	132,34	1,15	143,74	1,20	-	-
12	35,13	1,15	43,50	1,10	56,43	1,05	70,77	1,15
13	347,17	1,10	546,05	1,15	278,02	1,05	-	-
14	77,35	1,10	79,27	1,20	169,24	1,05	654,94	1,10

Tablo 4. Tamir süreleri için Weibull dağılımının parametre değerleri (The parameter values of Weibull Distribution for repair times)

Alt Sistem No (i)	Alternatif Bileşenler (j)							
	1		2		3		4	
	A	B	A	B	A	B	A	B
1	8,53	1,05	8,90	1,20	8,55	1,10	13,23	1,15
2	16,92	1,05	11,24	1,15	12,16	1,05	-	-
3	4,55	1,20	7,08	1,15	6,00	1,10	10,65	1,05
4	4,06	1,20	5,55	1,15	5,22	1,10	-	-
5	11,24	1,15	12,16	1,05	11,88	1,20	-	-
6	54,61	1,15	34,72	1,10	20,82	1,15	21,04	1,05
7	7,15	1,20	8,67	1,15	14,16	1,05	-	-
8	3,66	1,20	7,08	1,15	8,55	1,10	-	-
9	20,82	1,15	79,93	1,05	14,37	1,20	7,79	1,15
10	4,95	1,05	4,55	1,20	7,74	1,10	-	-
11	14,16	1,05	13,23	1,15	14,37	1,20	-	-
12	3,51	1,15	4,35	1,10	5,64	1,05	7,08	1,15
13	34,72	1,10	54,61	1,15	27,80	1,05	-	-
14	7,74	1,10	7,93	1,20	16,92	1,05	65,49	1,10

olmadığı faktörler ve etkileşimlerinin etkileri incelenerek belirlenmiştir. Kuşak aralığı ve mutasyon olasılığı $\alpha=0,05$ düzeyinde anlamlı iken, çaprazlama olasılığının performans ölçütü üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Faktör etkileşimleri incelendiğinde hiçbir faktör etkileşiminin performans ölçütü üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür.

Performans ölçütü üzerinde anlamlı etkiye sahip olan faktörlerin düzeyleri arasında anlamlı bir farklılık olup olmadığının belirlenmesi için Duncan çoklu aralık testi yapılmıştır. Kuşak Aralığı için seçilen tüm düzeyler arasında anlamlı bir farklılık olduğu görülmüştür. Düzey ortalamaları incelendiğinde, kuşak aralığı yani üretilen çocuk sayısı arttıkça algoritma ile elde edilen çözümün, güvenilirlik değerinin tahmininin arttığı görülmüştür. Mutasyon Olasılığı için bireylerin mutasyona uğrama olasılığı 0,95 olduğunda, elde edilen düzey ortalamasının diğer iki düzey ortalamasından anlamlı bir farklılığa sahip olduğu görülmüştür. Ancak, mutasyon olasılığı 0,35 ve 0,65 olduğunda bu düzeyler arasında ortalamalar arası anlamlı bir farklılığın olmadığı, her iki düzey için de başarımlar ölçütünün olumlu yönde etkilendiği görülmüştür. Yapılan analiz sonucunda kuşak aralığı=30, çaprazlama olasılığı=0,95 ve mutasyon olasılığı=0,35 olarak seçilmiştir.

Geliştirilen GA, Dev-C++ ortamında, C programlama dilinde kodlanmıştır. Denemeler, Intel Core i7 3 GHz hızında işlemciye, 32 GB RAM ara belleğe sahip Win10 Education işletim sistemi ile çalışan bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. GA'nın başarısı; tamirlerin olmadığı durumda alan yazındaki en iyi sonuçları bilinen problemler için çalıştırılarak gösterilmiştir.

Bu çalışmada, tamirlerin dikkate alındığı gerçekçi kısıtlarla çalışılması durumunda elde edilecek sistem tasarımlarıyla yüksek sistem güvenilirliğinin daha düşük maliyetlerle elde edilebileceği öngörüsü ile yola çıkılmıştır. Çalışmada önerilen yaklaşımla elde edilen ve Tablo 5'te verilen sonuçlar incelendiğinde bu öngörünün gerçekleştiği görülmektedir. İlk ana sütunda tamir edilmeyen bileşenler varsayımının kullanıldığı durumda elde edilen sistemin güvenilirliği ve maliyeti, ikinci ana sütunda ise tamir edilen bileşen varsayımı altında elde edilen sistem güvenilirliği ve maliyeti görülmektedir. Öngörüldüğü üzere, tüm problemler için tamir edilen bileşen varsayımı ile daha yüksek güvenilirliğe sahip sistemler daha düşük maliyetlerle elde edilebilmiştir. Örneğin, P17 ve P24 problemleri incelendiğinde tamir edilen bileşen varsayımı ile sistem güvenilirliğinde %2'lik artış (güvenilirlik değerinde önemli bir artıştır), maliyette %8'lik kazanç sağlandığı görülmektedir. P33

Tablo 5. Tamir edilebilen bileşen kullanmanın sistem güvenilirliği ve maliyeti üzerindeki etkisi
(Impact of using repairable components on system reliability and cost)

Problem No	Tamir Edilmeyen Bileşen Varsayımı Kullanıldığında		Tamir Edilen Bileşen Varsayımı Kullanıldığında	
	Sistem Güvenilirliği	Maliyet	Sistem Güvenilirliği	Maliyet
P1	0,9868	130	0,997333	118
P4	0,9854	130	0,997333	121
P6	0,9842	129	0,996667	118
P8	0,983	130	0,997333	109
P10	0,9815	127	0,995333	122
P13	0,9795	126	0,992667	118
P15	0,9776	126	0,993333	110
P17	0,9754	125	0,994667	115
P20	0,973	123	0,992667	111
P22	0,9708	120	0,988667	104
P24	0,9681	119	0,988667	109
P27	0,9637	117	0,987333	111
P28	0,9624	115	0,984	112
P30	0,9592	115	0,981333	100
P33	0,9546	110	0,982667	102

probleminde ise tamir edilen bileşen varsayımı ile sistem güvenilirliğinde %3'lük artış, maliyette %7'lik kazanç sağlandığı görülmektedir.

6. Sonuçlar (Conclusions)

Sistem güvenilirliği, iletişim ve elektronik sistemler gibi karmaşık yapıdaki mühendislik ve hizmet sistemlerinin analizi ve tasarımında yaygın olarak kullanılan başarımlı ölçütlerinden biridir. Buna bağlı olarak, çeşitli sistem kısıtları altında sistem güvenilirliğinin eniyelenmesi güncel bir problem olarak önemini sürdürmektedir. Sistem güvenilirliğinin eniyelenmesi için alan yazında yaygın olarak kullanılan YBTP, sistemde yer alan bileşenlere paralel olarak yerleştirilen kullanıma hazır yedek bileşenler ile daha yüksek güvenilirliğe sahip yeni sistemlerin tasarlanması olarak tanımlanabilir. Gerçek hayat problemlerinde, sistemi oluşturan bileşenler kullanımdan kaynaklanan yıpranmaya bağlı olarak artan arızalanma oranına sahiptir ve arızalandıklarında tamir edilerek sistem içindeki görevlerine devam ederler. Bileşenlerin arızalanma ve tamir edilme zamanları dikkate alınarak sistemin durum değişikliklerinin zamana bağlı olarak incelenmesi sistemin doğal yapısına uygun olarak modellenmesini sağlar.

Bu çalışmada, sistemlerin doğal yapısı gerçek varsayımlarla dikkate alınarak sistem güvenilirliği KOB modeli ve MC ile tahmin edilmiş, artan arıza ve tamir oranının dikkate alındığı YBTP'nin eniyelenmesi amacıyla probleme özgü GA geliştirilmiştir. Kesikli Olaylı Monte Carlo Benzetim modelinin geçerliliği alan yazında yaygın olarak kullanılan test problemleri üzerinde gösterilmiştir. Çalışma kapsamında seçilen örnek test problemleri GA ile çözülmüş ve arıza ve tamirlerin dikkate alındığı YBTP için daha yüksek güvenilirliğe sahip sistem tasarımlarının daha düşük maliyetlerle elde edildiği gösterilmiştir (Tablo 4).

Bu çalışmanın devamında, GA'nın başarısını artırmak için; çözüm kurucu sezgisel algoritmalar ile melezleştirilerek algoritmanın başarısına etkisi incelenebilir. Artan arıza ve tamir oranının dikkate alındığı YBTP'nin eniyelenmesi amacıyla farklı metasezgisel algoritmalar geliştirilebilir. Ayrıca, YBTP çok amaçlı bir problem olarak ele alınarak farklı algoritmalar geliştirilebilir.

Kaynaklar (References)

1. Uzgören N., Eleveli S., Nonhomogeneous Poisson Process: Reliability Analysis of a Mining Equipment, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 25 (4), 827–837, 2010.
2. Koyun A., Kaymakçı Ö.T., Reliability Analysis of a Tram Line, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30 (4), 615–626, 2015.
3. Ilhan D.C., Baskaya S., Numerical Investigation of Thermal Behavior of AlGaIn/GaN HEMTs on SiC, Si and Sapphire Substrates, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (4), 2125–2134, 2020.
4. Kuo, W., Prasad, V.R., An Annotated Overview of System-Reliability Optimization, IEEE Trans. Reliab., 49 (2), 176–187, 2000.
5. Samaniego, F.J., System Signatures and Their Applications in Engineering Reliability, International Series in Operations Research & Management Science, vol. 110, Springer-Verlag US, 2007.
6. Chern, M.S., On the Computational Complexity of Reliability Redundancy Allocation in a Series System, Oper. Res. Lett., 11 (5), 309–315, 1992.
7. Busacca, P.G., Marseguerra, M., Zio, E., Multiobjective Optimization by Genetic Algorithms: Application to Safety Systems, Reliab. Eng. Syst. Saf., 72 (1), 59–74, 2001.
8. Zoufaghari, H., Zeinal Hamadani, A., Abouei Ardakan, M., Bi-objective Redundancy Allocation Problem for a System with Mixed Repairable and Non-Repairable Components, ISA Trans., 53 (1), 17–24, 2014.
9. Hadipour, H., Amiri, M., Sharifi, M., Redundancy Allocation in Series-Parallel Systems Under Warm Standby and Active Components in Repairable Subsystems, Reliab. Eng. Syst. Saf., 192, 106048, 2019.
10. Bellman, R., Dreyfus, S., Dynamic Programming and the Reliability of Multicomponent Devices, Oper. Res., 6 (2), 200–206, 1958.
11. Nakagawa, Y., Miyazaki, S., Surrogate Constraints Algorithm for Reliability Optimization Problems with Two Constraints, IEEE Trans. Reliab., 30 (2), 175–180, 1981.
12. Ng, K.Y., Sancho, N.G.F., A Hybrid 'Dynamic Programming/Depth-First Search' Algorithm, with an Application to Redundancy Allocation, IIE Trans., 33 (12), 1047–1058, 2001.
13. Kulturel-Konak, S., Smith, A.E., Coit, D.W., Efficiently Solving the Redundancy Allocation Problem Using Tabu Search, IIE Trans., 35 (6), 515–526, 2003.
14. Coit, D.W., Smith, A.E., Reliability Optimization of Series-Parallel Systems Using a Genetic Algorithm, IEEE Trans. Reliab., 45 (2), 254–260, 1996.
15. Coit, D.W., Smith, A.E., Penalty Guided Genetic Search for Reliability Design Optimization, Comput. Ind. Eng., 30 (4), 895–904, 1996.
16. Salazar, D., Rocco, C.M., Galván, B.J., Optimization of Constrained Multiple-Objective Reliability Problems Using Evolutionary Algorithms, Reliab. Eng. Syst. Saf., 91 (9), 1057–1070, 2006.
17. Chambari, A., Najafi, A.A., Rahmati, S.H.A., Karimi, A., An Efficient Simulated Annealing Algorithm for the Redundancy Allocation Problem with a Choice of Redundancy Strategies, Reliab. Eng. Syst. Saf., 119, 158–164, 2013.
18. Peiravi, A., Ardakan, M.A., Zio, E., A New Markov-Based Model for Reliability Optimization Problems with Mixed Redundancy Strategy, Reliab. Eng. Syst. Saf., 201, 106987, 2020.

19. Eslami Baladeh, A., Taghipour, S., Reliability Optimization of Dynamic k-out-of-n Systems with Competing Failure Modes, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 227, 108734, 2022.
20. Sharifi, M., Taghipour, S., Redundancy Allocation Problem of a Multi-State System with Binary-State Continuous Performance Level Components, *Expert Syst. Appl.*, 200, 117161, 2022.
21. Zhang, J., Lv, H., Hou, J., A Novel General Model for RAP And RRAP Optimization of k-out-of-n:G Systems with Mixed Redundancy Strategy, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 229, 108843, 2023.
22. Coit, D.W., Zio, E., The Evolution of System Reliability Optimization, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 192, 106259, 2019.
23. Uzuner Şahin, M., Arıza ve Tamir Durumunda Sistem Güvenilirliği: Genetik Algoritmalar, Doktora Tezi, Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2021.
24. Misra, K.B., Sharma, U., An Efficient Algorithm to Solve Integer-Programming Problems Arising in System-Reliability Design, *IEEE Trans. Reliab.*, 40 (1), 81–91, 1991.
25. Gen, M., Ida, K., Lee, J.-U., A Computational Algorithm for Solving 0-1 Goal Programming with GUB Structures and Its Application for Optimization Problems in System Reliability, *Electron. Commun. Jpn. (Part III: Fundamental Electronic Science)*, 73 (12), 88–96, 1990.
26. Hsieh, Y.C., A Two-Phase Linear Programming Approach for Redundancy Allocation Problems, *Yugoslav Journal of Operations Research*, 12 (2), 227–236, 2002.
27. Ramirez-Marquez, J.E., Coit, D.W., Konak, A., Redundancy Allocation for Series-Parallel Systems Using a Max-Min Approach, *IIE Transactions* 36 (9), 891–898, 2004.
28. Billionnet, A., Redundancy Allocation for Series-Parallel Systems Using Integer Linear Programming, *IEEE Trans. Reliab.*, 57 (3), 507–516, 2008.
29. Juang, Y.S., Lin, S.S., Kao, H.P., A Knowledge Management System for Series-Parallel Availability Optimization and Design, *Expert Syst. Appl.*, 34 (1), 181–193, 2008.
30. Jiansheng, G., Zutong, W., Mingfa, Z., Ying, W., Uncertain Multiobjective Redundancy Allocation Problem of Repairable Systems based on Artificial Bee Colony Algorithm, *Chin. J. Aeronaut.*, 27 (6), 1477–1487, 2014.
31. Kayedpour, F., Amiri, M., Rafizadeh, M., Shahryari Nia, A., Multi-Objective Redundancy Allocation Problem for a System with Repairable Components Considering Instantaneous Availability and Strategy Selection, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 160, 11–20, 2017.
32. Guilani, P.P., Azimi, P., Niaki, S.T.A., Niaki, S.A.A., Redundancy Allocation Problem of a System with Increasing Failure Rates of Components based on Weibull Distribution: A Simulation-based Optimization Approach, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 152, 187–196, 2016.
33. Bosse, S., Splieth, M., Turowski, K., Multi-objective optimization of IT Service Availability and Costs, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 147, 142–155, 2016.
34. Lins, I.D., Droguett, E.L., Redundancy Allocation Problems Considering Systems with Imperfect Repairs Using Multi-Objective Genetic Algorithms and Discrete Event Simulation, *Simul. Modell. Pract. Theory*, 19 (1), 362–381, 2011.
35. Elsayed, E.A., *Reliability Engineering*, Addison Wesley Longman, 1996.
36. Zio, E., *An Introduction to the Basics of Reliability and Risk Analysis*, Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, 13, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2007.
37. B. S. Dhillon, *Engineering Maintainability*, Gulf Publishing Company, 1999.
38. Tillman, F.A., Hwang, C.-L., Kuo, W., *Optimization of Systems Reliability*, M. Dekker, 1980.
39. Goldberg, D., *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
40. Austin, S., *An Introduction to Genetic Algorithms*, *AI Expert*, 5 (3), 49–53, 1991.
41. Smith, A., Coit, D.W., *Penalty Functions*, Handbook of Evolutionary Computation, IOP Publishing Ltd., 1995.
42. Luke, S., *Essentials of Metaheuristics*, second edition, Lulu, 2009.
43. Agapie, A., Wright, A.H., *Theoretical Analysis of Steady State Genetic Algorithms*, *Appl. Math.*, 59 (5), 509–525, 2014.
44. Altıparmak, F., Gen, M., Lin, L., Karaoglan, I., A Steady-State Genetic Algorithm for Multi-Product Supply Chain Network Design, *Comput. Ind. Eng.*, 56 (2), 521–537, 2009.
45. Dengiz, O., Smith, A.E., Altıparmak, F., Dengiz, B., A Pareto Fed Multi-objective Genetic Algorithm for the Redundancy Allocation Problem, 14th Annual Industrial Engineering Research Conference, IEE-IERC-USA, 1-7, January 5-8, 2005, 2005.
46. Feizabadi, M., Jahromi, A.E., A New Model for Reliability Optimization of Series-Parallel Systems with Non-Homogeneous Components, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 157, 101–112, 2017.
47. Fyffe, D.E., Hines, W.W., Lee, N.K., System Reliability Allocation and a Computational Algorithm, *IEEE Trans. Reliab.*, R-17 (2), 64–69, 1968.
48. Li, J., Chen, Y., Zhang, Y., Huang, H., Availability Modeling for Periodically Inspection System with Different Lifetime and Repair-Time Distribution, *Chin. J. Aeronaut.*, 32 (7), 1667–1672, 2019.
49. Coit, D.W., Smith, A.E., Redundancy Allocation to Maximize a Lower Percentile of the System Time-To-Failure Distribution, *IEEE Trans. Reliab.*, 47 (1), 79–87, 1998.
50. Berman, O., Ashrafi, N., Optimization Models for Reliability of Modular Software Systems, *IEEE Trans. Software Eng.*, 19 (11), 1119–1123, 1993.
51. Coit, D.W., Optimization of Reliability Design Problems Considering Uncertainty in Component Reliability and Time-To-Failure, Dissertation, University of Pittsburgh, 1996.
52. Tillman, F.A., Liittschwager, J.M., Integer Programming Formulation of Constrained Reliability Problems, *Manage. Sci.*, 13 (11), 887–899, 1967.
53. Luus, R., Optimization of System Reliability by a New Nonlinear Integer Programming Procedure, *IEEE Trans. Reliab.*, R-24 (1), 14–16, 1975.
54. Coit, D.W., Konak, A., Multiple Weighted Objectives Heuristic for the Redundancy Allocation Problem, *IEEE Trans. Reliab.*, 55 (3), 551–558, 2006.

