

## ONARILABİLİR ELEMANLARA ÖNLEYİCİ BAKIMIN ETKİSİ VE OPTİMİZASYONU

Yrd.Doç.Dr. Ayşe KAHVECİOĞLU

### ÖZET

Gelişen teknoloji ile birlikte, modern üretim yapan sistemler ve havacılık sektörü için, rekabet gereği maliyeti düşürmek önemli olduğundan, bakım ve onarım giderlerinden oluşan toplam maliyeti azaltmak en önemli hedeflerden birisidir. Genelde onarılabilir bir sisteme uygulanacak önleyici bakımın bozulmaların sıklığını ve dolayısıyla onarım giderlerini azaltmaya oldukça büyük bir etkisi vardır. Bir sisteme uygulanacak önleyici bakımın avantajlı olabilmesi için sistemin artan bozulma oranına sahip olması ve bakım maliyetinin onarım maliyetinden daha düşük olması gerekir. Bu özelliklere sahip sistemler için bakım ve onarım maliyetlerinden oluşan toplam maliyeti minimum yapacak optimum bakım periyodunun bulunması büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada genel olarak onarılabilir elemanlara önleyici bakımın etkisi incelendikten sonra, onarılabilir ve düzgün ömür dağılımına sahip elemanlar için, yenileme teorisine göre elde edilen maliyet fonksiyonu kullanılarak, farklı bakım-onarım maliyet oranları için, toplam maliyeti minimum yapacak optimum bakım periyodu bulunmaktadır. Bu konuda yapılan diğer çalışmalardan farklı olarak optimizasyon yöntemi olarak genetik algoritma tekniğinden faydalanılmaktadır.

### 1. GİRİŞ

Bakım faaliyetinin temel amacı, olabilecek muhtemel arızaların önlenmesi veya geciktirilmesidir. Bu sayede kazalar önlenerek olabilecek ölüm ve yaralanmaların yaşanmaması yanında, maddi hasarlarında önüne geçilmesi amaçlanmaktadır. Özellikle havacılıkta uçuş emniyetinin ön planda olması, bu sektördeki bakım faaliyetlerinin de önemini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla uçağı oluşturan sistemlerin güvenliği ve güvenilirliği çok büyük önem taşımakta olup, bunların üretiminde aranan standartlarda son derece yüksektir.

Bir ürün kullanıcı memnuniyeti açısından üç faktöre sahiptir. İlk faktör olan güvenilirlik; bir sistemin istenen şartlarda kendisinden beklenen fonksiyonları istenen zaman aralığı içinde yerine getirme olasılığıdır. İkinci faktör olan bakım yapılabilirlik; bir sistem arıza yaptığında tekrar çalışır duruma getirebilme kolaylığıdır ki bu özellikle havacılıkta önemli bir tasarım parametresidir. Üçüncü faktör olan minimum maliyet ise diğer iki faktörü gerçekleştirilmede ulaşılabilecek en az maliyet değeridir [1,2].

Güvenilirlik, sistemin performansını gösteren bir parametredir ve sistemin artan görev zamanına (ömrüne) bağlı olarak azalır. Bir sistemin güvenilirliği sistemin yapısına ve dolayısıyla sistemi oluşturan elemanların güvenilirliğine bağlıdır. Sistemi oluşturan elemanların ömrü ise sistem içindeki çalışma sürelerinin bir fonksiyonudur. Dolayısıyla bir sisteme uygulanan bakım işlemlerinin sistemin verimli ömrü üzerinde oldukça büyük etkisi vardır [3,4].

Bir ürünün güvenilirliği ilerleyen kullanım süresi boyunca başlangıçtaki kalitesini koruyabilmesidir. Fakat bir ürüne ne kadar bakım yapılırsa yapılsın, tasarım yapıldığı ilk güvenilirlik değerinin üzerine çıkılamaz. Ancak bu değer korunabilir ya da bu değere yaklaşılabılır.

Genelde sistemlere uygulanan bakım, düzeltici bakım, duruma bağlı bakım ve önleyici bakım olmak üzere üçe ayrılır [1].

Düzeltilici bakım ya da onarım, arızalar oluştuğundan sonra, sistemi mümkün olabilecek en kısa süre içinde tekrar çalışır duruma getirerek servise vermek için yapılan bakım işlemleridir. Bu tür bakımın ne sıklıkla

yapılacağı önceden bilinemediğinden plansız bakım olarak da adlandırılır. Bir sisteme uygulanan düzeltici bakım miktarı o sistemin güvenilirliğine bağlıdır.

Duruma bağlı bakım, sistemdeki titreşim, gürültü, yağdaki partikül miktarı, aşınma, korozyon, sıcaklık yükselmesi vb. gibi, arızanın yaklaştığını gösteren ikazları kullanarak arıza olmadan yapılan bakım işlemleridir. Bu bakım şekli önleyici bakım içinde de uygulanabilir.

Önleyici bakım, sistem çalışır durumda iken arızalar oluşmadan önce yapılan parça değişimi, yağ değişimi, ayar, kontrol vb. işlemlerden oluşan planlı bakımdır ve önceden belirlenen periyotlarda yürütülür. Önleyici bakımın amacı, kullanım süresi boyunca oluşan yıpranma, aşınma, yaşlanma, korozyon vb. etkileri minimuma indirerek sistemin güvenilirliğini arttırmak ve plansız bakımları en aza indirerek toplam bakım maliyetlerini azaltmaktır.

Bir sisteme uygulanacak bakımın şekli ve miktarı büyük ölçüde bakım ve onarım maliyetlerine bağlıdır. Örneğin; üretim yapan bir birimdeki elektrik motoru için uygulanacak bakımın belirlenmesinde, önleyici bakımın maliyeti ile bozulma sayısındaki azalmanın getireceği kazanç karşılaştırılmalıdır. Bakım maliyeti onarım maliyetinden büyük ya da yaklaşık aynı mertebede ise, önleyici bakım sistem için ekonomik bir alternatif değildir. Onarılabılır bir sisteme önleyici bakım uygularken bakım maliyetinin onarım maliyetine oranı oldukça önemli bir faktördür. Dikkate alınması gereken diğer bir faktör ise sistemin bozulma oranıdır (hazard). Sistemin herhangi bir bölümü azalan bozulma oranına sahipse, uygulanan önleyici bakım bozulma olasılığını artıracaktır. Bozulma oranı sabit olan sistemlerde ise önleyici bakımın sistemin bozulma olasılığı üzerinde herhangi bir etkisi olmaz. Fakat sistem artan bozulma oranına sahipse periyodik önleyici bakımın arıza sayılarının azalmasında oldukça büyük etkisi vardır [5,6,7].

Günümüzde gelişen teknoloji sayesinde, modern üretim yapan sistemler ve özellikle havacılıkta kullanılan sistemler son derece pahalı teknolojilerdir. Söz konusu alanlarda rekabet gereği maliyeti düşürmek önemli olduğundan emniyet sınırları içinde optimum güvenilirlikle bakım maliyetlerini azaltmak en önemli hedeflerden biridir. Bu nedenle yüksek güvenilirlik için çok sık bakım ve modifikasyonlar yaparak bakım maliyetlerini arttırmak yerine optimum güvenilirlik ile bakım maliyetlerini azaltmak daha yararlıdır.

## 2. ONARILABİLİR ELEMANLAR İÇİN İDEAL ONARIM VE ÖNLEYİCİ BAKIM

Onarılabılır elemanlara belli periyotlarla uygulanan önleyici bakımın bozulmaların sıklığını azaltmaya oldukça büyük bir etkisi vardır. Teorik olarak bir sistem ya da elemana uygulanan onarım için ideal onarım ve normal onarım olmak üzere iki modelden söz edilebilir. İdeal onarımda, onarım süresi sıfırdır ve her onarımdan sonra sistem ilk çalışma koşullarına geri döner. Bunun pratikteki anlamı bozulan bir elemanın yenisi ile değiştirilmesi olarak düşünülebilir. Normal onarımda ise ihmal edilemeyecek kadar büyük bir onarım süresi vardır. İdeal onarım ile önleyici bakım arasındaki temel fark, önleyici bakımın eleman çalışır durumda iken önceden belirlenen zaman aralıklarında yapılması, ideal onarımın ise sadece eleman bozulduğunda uygulanabilmesidir [8].

İdeal onarım modelinde ilgilenilen en önemli fonksiyon, bozulmaların olasılık yoğunluk fonksiyonudur. Bu yoğunluk  $L(t)$  ile gösterilir ve aşağıdaki gibi tanımlanır [8].

$$L(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P[(t, t + \Delta t) \text{ içinde bir bozulma}] \quad (1)$$

Bir elemanın  $L(t)$  yoğunluk fonksiyonu, olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF)  $f_T(t)$  ile hazard fonksiyonu  $h(t)$ 'nin genelleştirilmiş şeklidir. İlk bozulmaya kadar geçen sürenin PDF'i  $f_1(t)$  olarak kabul edilirse bu yoğunluk elemanın olasılık yoğunluk fonksiyonu olan  $f_T(t)$ 'ye eşittir. Benzer şekilde k'ncü bozulmaya kadar geçen toplam sürenin PDF'i de  $f_k(t)$  olarak gösterilebilir.  $f_k(t)$ 'yi bulmak

için  $(k-1)$ 'inci bozulmanın  $\tau < t$  komşuluğunda meydana geldiği kabul edildiğinde,  $f_k(t)$  yoğunluğu aşağıdaki gibi olur [8].

$$f_k(t) = \int_0^t f_{k-1}(\tau) f_1(t-\tau) d\tau \quad (2)$$

Burada  $f_k(t)$ , ve aynı zamanda  $L(t)$ ,  $f_T(t) = f_1(t)$  'ye bağlı olarak ifade edilebilir. Böylece, bozulmaların olasılık yoğunluk fonksiyonu,

$$L(t) = \sum_{k=1}^{\infty} f_k(t) \quad (3)$$

olur. Genellikle  $L(t)$  fonksiyonunun hesaplanması oldukça güçtür. Belli ömür dağılımlarına sahip elemanlar için  $L(t)$  fonksiyonu hesaplanabilmektedir. Ekspansiyel ömür dağılımına sahip bir eleman için,  $L(t)$  sabit bir değere eşit olduğu halde, düzgün ömür dağılımına sahip bir eleman için zamanla ekspansiyel olarak artan bir fonksiyon şeklindedir.

Çalışır durumda olan elemanlara belli aralıklarla uygulanan önleyici bakımın, elemanın ortalama bozulma zamanını (MTTF) artırmaya çok önemli bir etkisi vardır. Ayrıca önleyici bakımın güvenilirliğin artışı da mümkündür. Bakım uygulanmayan bir elemanın MTTF'si,

$$MTTF = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (4)$$

eşitliğinden elde edilir. İdeal onarım durumunda, artan bozulma olasılığına sahip bir elemana uygulanan düzenli önleyici bakım, onarım frekansını azaltmaktadır.

Sabit bir bakım periyodu ( $T_P$ ) ile bir elemana ideal ve mükemmel bakım uygulandığında eleman ilk çalışma koşullarına geri döner. Onarım frekansı  $f_R$ ,  $T_P$  süresi boyunca bozulmalar yoğunluğunun ortalama değerine eşittir. Sonuç olarak  $f_R$ ,

$$f_R = \frac{1}{T_P} \int_0^{T_P} L(t) dt \quad (5)$$

şeklinde yazılabilir. Onarılabılır bir elemanda, önleyici bakımın avantajlı olabilmesi için sağlanması gereken iki önemli koşul vardır: Bakım frekansı  $f_P$  arttığında onarım frekansının, bakım yapılmadığı durumdaki onarım frekansına göre azalması gerekir. Önleyici bakımın maliyeti onarım ya da yenisi ile değiştirilme maliyeti ile yaklaşık aynı mertebede olmamalıdır. Aksi takdirde bakım ekonomik bir alternatif olamaz. Bakım maliyeti onarım maliyetine göre oldukça düşük ise, periyodik bakımın sadece azalan hazard fonksiyona sahip elemanlara uygulanması gerekir. Buna göre, bakım maliyetinin onarım

maliyetine oranı belli olan bir eleman için, onarım ve bakım toplam maliyetini minimize edecek optimum bakım periyodu  $T_P$ 'in hesaplanması mümkündür.

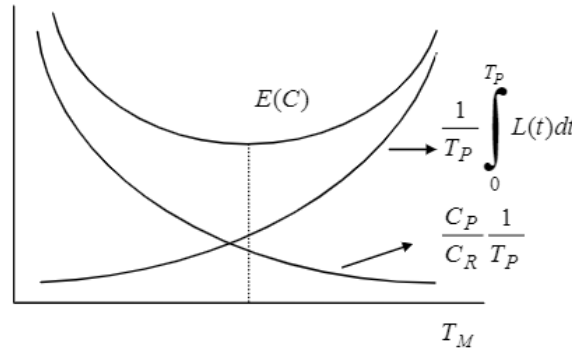
Onarılabılır bir eleman için , onarım maliyeti  $C_R$ , bakım maliyeti  $C_P$  olarak verildiğinde, birim zamandaki toplam maliyet  $K$ ,

$$E(C_{T_P}) = C_R f_R + C_P f_P \quad (6)$$

olarak elde edilir. Eşitliğin her iki tarafının  $C_R$ 'ye bölünmesi ile minimize edilecek yeni fonksiyon  $E(C)$ ,

$$E(C) = \frac{E(C_{T_P})}{C_R} = f_R + \frac{C_P}{C_R} f_P \quad (7)$$

şeklinde elde edilir. Bu fonksiyon Şekil 1'de gösterilmektedir [8].



Şekil 1. Önleyici bakım ve onarımın toplam  $E(C)$  maliyeti

Bakım maliyetinin onarım maliyetine oranı olan  $C_P/C_R$ , genellikle ortalama bakım ve onarım süreleri arasındaki oran olarak tanımlanır. Eşitlik (5) ve (7) kullanılarak maliyet fonksiyonunun minimizasyonu için,  $T_P$ 'ye türev alınarak sıfıra eşitlenen ifade,

$$\int_0^{T_P} L(t) dt + \frac{C_P}{C_R} - T_P L(T_P) = 0 \quad (8)$$

olarak elde edilir. Bu denklemin çözümünden elde edilecek  $T_P$  optimum bakım periyodunu vermektedir.

Optimum bakım periyodunun bulunması için kullanılan diğer bir maliyet fonksiyonu da yenileme teorisi (renewal theory) kullanılarak elde edilen ve güvenilirlik fonksiyonuna bağlı ifadedir [9,10]. Buna göre birim zamanda beklenen toplam maliyet;

$$E(C_{T_p}) = \frac{C_p R(T_p) + C_r F(T_p)}{T_p R(T_p) + \int_0^t tf(t)dt} \quad (9)$$

olarak görülebilir. Burada  $f(t), F(t)$  ve  $R(t)$  sırasıyla elemanın ömrünün, olasılık yoğunluk dağılım fonksiyonunu, kümülatif dağılım fonksiyonunu ve güvenilirlik fonksiyonunu göstermektedir. Eşitlik (9)'un  $C_p$  birimine bağlı ifade edilirse yeni maliyet fonksiyonu;

$$E(C) = \frac{E(C_{T_p})}{C_p} = \frac{R(T_p) + kF(T_p)}{T_p R(T_p) + \int_0^t tf(t)dt} \quad (10)$$

olarak elde edilir. Burada  $k = C_r / C_p$  eşitliği ile verilmektedir. Eşitlik (10)'nun optimal çözümü için  $E(C)$  fonksiyonunun  $T_p$ 'ye göre türevi alınıp sıfıra eşitlenir. Bu eşitliği sağlayan  $T_p$  maliyet fonksiyonunu minimum yapan optimum bakım periyodunu vermektedir. Farklı ömür dağılımları için bu fonksiyonun analitik çözümü yoktur ya da son derece karmaşıktır. Bu nedenle çözüm için genellikle nümerik analiz metotlarından faydalanılmaktadır (Newton-Raphson metodu, Yarı-aralık arama metodu vb.).

Bu çalışmada, düzgün ömür dağılımına sahip bir eleman için yenileme teorisine göre elde edilen maliyet fonksiyonu kullanılarak, farklı  $k$  değerlerinde optimum bakım periyodunun hesaplanmasında, genetik algoritma tekniğinden faydalanılmıştır. Oldukça geniş uygulama alanlarına sahip olan genetik algoritmalar daha çok bir optimizasyon yöntemi olarak görülmektedir.

### 3. GENETİK ALGORİTMALAR

Genetik algoritmalar evrim teorisinden esinlenerek türetilen hesaplama modelleridir. Bu algoritmalarda, belirlenen bir problemin potansiyel çözümleri, ikili (binary) ya da ikili olmayan sayı sistemlerine dayalı veri yapısında basit diziler olarak şifrelenir ve kritik bilgileri saklamak için bu dizilere birtakım özel işlemler uygulanır. Oldukça geniş uygulama alanına sahip olan genetik algoritmalar daha çok bir optimizasyon yöntemi olarak kullanılır. Genetik algoritmalar aynı zamanda oldukça geniş bir araştırma uzayında, bölgesel araştırma tekniklerinin uyguladığı birçok ihmali eleyen global optimizasyon teknikleri olarak da görülebilir [11].

Geleneksel optimizasyon metotlarında (gradient metodu, Newton metodu, değişik matematiksel programlar vb.) genellikle, çözüm uzayı içinde değerlendirilecek her nokta için, araştırmanın yönünü belirlemek için türev ve mümkünse ikinci türev bilgisine ihtiyaç vardır. Bu bilgilere analitik olarak ulaşılamayan fonksiyonlar için belirtilen optimizasyon yöntemleri ile verimli sonuç alınmamaktadır. Kolay uygulanabilirlik ve değişik problemleri çözme kabiliyeti, genetik algoritmaları diğer optimizasyon yöntemlerinden ayıran pek çok avantajdan bazılarıdır [12]

Genetik algoritmaların geleneksel optimizasyon yöntemlerinden farklılıkları genellikle dört ana başlık altında toplanabilir:

1-) Genetik algoritmalar, parametrelerin kendisiyle değil parametre setini kodlayarak çalışır: Genetik algoritmalar, sonlu bir alfabe üzerinden sonlu uzunlukta diziler kodlamak için, optimizasyon probleminin doğal parametre setini kullanır. Örneğin, herhangi bir  $f(x)$  fonksiyonu maksimize edilmek istendiğinde, diğer optimizasyon metotları  $x$  parametresini küçük küçük değiştirerek amaç fonksiyon ( $f(x)$ ) değerinin en yüksek olduğu yeri bulmaya çalışırlar. Genetik algoritmalarla optimizasyon işleminin yürütülmesinde ise ilk adım,  $x$  parametresinin sonlu uzunlukta dizi olarak değişik şekillerde kodlanması ve kodlanan parametre ile çalışılarak optimizasyonun sağlanmasıdır. Parametrelerin kodlanması sonucunda, diğer metotları sınırlayan birtakım özelliklerde de büyük ölçüde serbestlik sağlanmış olur (süreklilik, türevin varlığı, vb.).

2-) Genetik algoritmalar tek bir noktada değil bir noktalar kümesinde optimizasyon araştırması yapar: Birçok optimizasyon probleminde, tanım aralığı içindeki tek bir noktadan hareketle bazı geçiş kuralları göre bir sonraki inceleme noktası bulunur. Bu, noktadan noktaya yönelme metodu, çok sayıda tepe noktası bulunan araştırma uzayı için risklidir. Çünkü, bölgesel tepe değerine yaklaşma hatası oluşabilir. Genetik algoritmalarda, çok sayıda noktalardan oluşan bir veri tabanı ile (dizilerin nüfusu) çalışıldığından aynı anda pek çok tepe noktasına atlanabilir. Böylece noktadan noktaya geçme metodundaki yanlış tepe noktasının bulunması olasılığı azalır ve bölgesel optimuma yakınsama riski ortadan kalkarak global optimuma ulaşma olasılığı artar. Sonuç olarak, genetik algoritma dizilerden oluşan bir nüfus ile başlar ve bu dizilerden daha başarılı nüfuslar üretir.

3-) Genetik algoritmalar, türevler ya da diğer yardımcı bilgiler değil sadece amaç fonksiyon bilgisini kullanır:

Çoğu araştırma tekniklerinin, doğru bir şekilde çalışması için yardımcı bazı bilgilere ihtiyaçları vardır. Örneğin, gradient tekniklerinde, tepe değerine doğru yükselmenin olup olmadığını anlamak için, nümerik ya da analitik olarak hesaplanan türev bilgisi gereklidir. Ayrıca, farklı araştırma problemleri için de çok farklı yardımcı bilgilere ihtiyaç olabilir Bunun aksine, genetik algoritmalarda hiç bir yardımcı bilgiye ihtiyaç yoktur. Verimli bir araştırma yapmak için gerekli olan, her bir dizinin değerlendirileceği bir amaç fonksiyonudur. Optimizasyon sırasında problemle ilgili özel birtakım bilgilerin kullanılmaması, genetik algoritmaların performansını yükseltmede son derece etkilidir.

4-) Genetik algoritmalar kesin bilinen kuralları değil olasılığa dayalı kuralları kullanır:

Genetik algoritmalar araştırmaya yön vermek için, bir çok optimizasyon tekniğinin aksine, olasılığa dayalı geçiş kuralları kullanır. Bunun sonucunda araştırmacının, araştırma uzayının hangi bölgesine doğru yöneleceğine karar vermek için rasgele seçim tekniği kullanılır. Bahsedilen bu dört farklılığın bir arada bulunması, genetik algoritmaların gürbüzlüğüne ve sonuca ulaşma üstünlüğüne olumlu yönde katkıda bulunur.

Genetik algoritma, bir problemin olası çözümlerinden oluşan sabit büyüklükte bir nüfus içinde tekrarlanarak yürütülen işlemlerden oluşan bir yöntemdir. Tekrarlanan her basamak jenerasyon olarak adlandırılır. Her basamakta, mevcut nüfus içindeki çözümler belli bir uygunluk fonksiyonuna göre değerlendirilir. Bu değerlendirmeler, bir sonraki basamakta incelenecek aday çözümleri oluşturan nüfusu belirler. Genetik algoritmanın ilk basamağı için başlangıç nüfusu, aday çözümler arasından rasgele seçilir. Algoritmanın başında belirlenen başlangıç nüfus sayısı ise genetik algoritmaların performans ve verimliliğini etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Nüfus sayısının az seçilmesi, problemin çözümü için araştırma uzayından verimsiz sayıda örnek alınmasını sağlayacağı gibi, nüfus sayısının büyük seçilmesi de her jenerasyonda daha çok değerlendirme yapılacağından olası sonuca ulaşma hızını yavaşlatır.

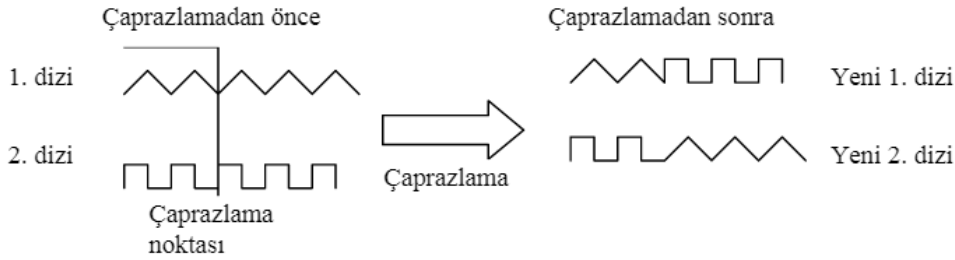
Bir çok problemin çözümünde iyi sonuçlar veren basit bir genetik algoritma üç genetik işlemin birleşiminden oluşur [13].

1. Üreme (Reproduction): Üreme, her bir dizinin amaç fonksiyon değerine ( $f$ ) göre, gelecek jenerasyona kopyalanmasını sağlayan bir işlemdir.  $f$  fonksiyonu maksimize edilmek istenen

uygunluk, yararlılık ya da iyiliğin bir ölçüsü olarak düşünülebilir. Uygunluk değerlerine göre dizilerin kopyalanması, yüksek değere sahip olan dizilerin gelecek jenerasyona bir ya da daha fazla ürün olarak katkıda bulunma olasılığının da yüksek olmasıdır. Bu işlem doğal seçimin yapay bir versiyonudur. Darwin'e göre de, varlıklar arasında en iyilerin yaşama şansı her zaman daha yüksektir.

Üreme işleminden sonra her jenerasyonda, mevcut nüfus dışında, aynı uzay içinde farklı noktalara ulaşmak ya da araştırma uzayının diğer noktalarını da incelemek için yeniden düzenleyici genetik işlemler (çaprazlama ve mutasyon) uygulanarak yeni nüfus içinde bazı değişimler ortaya çıkarılır.

2. Çaprazlama (Crossover): Algoritmanın başında belirlenen çaprazlama oranı ( $P_c$ ), bir dizi için uygulanacak çaprazlama işleminin olasılığını gösterir. Bu oran tüm algoritma boyunca sabit olabileceği gibi, jenerasyonlara göre de değişebilir. Bu oranın çok yüksek olması nüfus içinde yeni dizilerin daha hızlı oluşmasını sağlar. Dolayısıyla yüksek performanslı diziler de hızlı bir şekilde atılabilir. Diğer taraftan, çaprazlama oranı çok düşük olursa değişime uğrayacak dizi sayısı az olacağından araştırma durgunlaşıp yavaşlayabilir.[10]Basit bir çaprazlama işlemi iki adımda yürütülür. İlk olarak çaprazlama işlemine uğrayacak diziler rasgele belirlenir. İkinci adımda ise çaprazlama işlemi uygulamak için dizi üzerinde bir  $k$  tam sayı pozisyonu yine rasgele seçilir. Diziyi oluşturan karakterlerin sayısı ya da dizi uzunluğu  $l$  ise,  $k$  çaprazlama pozisyon değeri 1 ile  $l-1$  arasında olmalıdır. Buna göre rasgele seçilen bir dizi çiftinde,  $k+1$  ile  $l$  arasındaki bütün karakterler karşılıklı olarak yer değiştirilerek iki yeni dizi elde edilir. Yüksek başarılı dizilerin, nüfus içinden hızlı bir şekilde atılmaması için çaprazlama oranının uygun bir değerinde seçilmesi gerekir. Nüfus içindeki iki dizi arasındaki çaprazlama işlemi Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Çaprazlama işleminin şematik gösterimi

3. Mutasyon (Mutation): Araştırma uzayının diğer noktalarını da incelemek için uygulanan işlemlerden diğeri mutasyondur. Algoritmanın başında belirlenen mutasyon oranı  $P_m$ , tüm nüfus içinde değişime uğrayacak karakter oranını belirler. Bu oran tüm algoritma boyunca sabit alınabileceği gibi jenerasyonlara göre farklı değerlerde de seçilebilir. Bu işleme göre, bir jenerasyonda yaklaşık olarak  $P_m * n * l$  karakterde mutasyon meydana gelir. Burada  $n$  nüfus sayısı,  $l$  ise dizi uzunluğudur. Mutasyon tüm nüfus içinden rasgele seçilen bir karakterin değerinin değiştirilmesidir (ikili sayı sistemine göre kodlanmış dizilerde seçilen karakterin değeri 1 ise 0, 0 ise 1 olur). Araştırmanın tamamen rasgele olmasından kaçınmak için mutasyon oranının çok yüksek seçilmemesi gerekir. Yukarıda açıklanan üç işlem her bir jenerasyon boyunca yürütülür. Algoritma, jenerasyonlarda elde edilen optimal değerler arasındaki fark sıfırlandığında ya da belli bir değere yakınsadığında sonlandırılır. Ayrıca bir genetik algoritma, programın başında belirlenen bir jenerasyon sayısı kadar da tekrarlanıp bitirilebilir.

#### 4. MİNİMUM MALİYET İÇİN OPTİMUM ÖNLEYİCİ BAKIM PERİYODUNUN BULUNMASI

Onarılabilir sisteme ya da elemana uygulanan önleyici bakımın avantajlı olabilmesi için o sistem ya da elemanın artan bozulma oranına sahip olması gerekir. Aksi takdirde önleyici bakımın bozulmaların