



ESKİŞEHİR İKTİSADİ VE TİCARİ İLİMLER AKADEMİSİ  
ENDÜSTRİ BİLİMLERİ FAKÜLTESİ

1981

E  
174

T. C.  
ANADOLU ÜNİVERSİTESİ  
MERKEZ KÜTÜPHANESİ

# BAKIM PLANLAMASININ BOYUTLARI VE PLANLAMA İÇİN MODELLER.

Anahat Dizel Lokomotif Tekerleklerine İlişkin Uygulama

( Doktora Tezi )

T. C.  
ANADOLU ÜNİVERSİTESİ  
MERKEZ KÜTÜPHANESİ

**Ass. Nihat YÜZÜGÜLLÜ**  
İstatistik ve Uygulamalı Matematik  
Kürsüsü Asistanı

## İKİNCİ BÖLÜM

### BAKIM PLANLAMASI BOYUTLARININ BELİRLENMESİ İÇİN RASTNAL YAKLAŞIM VE ÇÖZÜMLEMELER

#### I- GÜVENİRLİLİK ÇÖZÜMLEMESİ

- 1- Güvenirlilik Çözümlemesine Duyulan Gereksinme .... 20
- 2- Güvenirliliği Etkileyen Olaylar: Arızalar ..... 21
  - A- Erken Arızalar ..... 24
  - B- Şans Arızaları ..... 25
  - C- Aşınma Arızaları ..... 26
- 3- Arızalara İlişkin Olasılık Yoğunluk Fonksiyonları. 27
- 4- Arıza Olasılık Yoğunluk Fonksiyonlarının Parametrelerinin Bulunması ..... 29
  - A- Enküçük Kareler Yöntemi ..... 30
  - B- Momentler Yöntemi ..... 30
  - C- Enbüyük Benzerlik Yöntemi ..... 32
- 5- Arızaların Ortaya Çıkışını Eniyi Temsil Eden Arıza Olasılık Yoğunluk Fonksiyonunun Seçilmesi... 34
- 6- Güvenirlilik Fonksiyonunun Elde Edilmesi ..... 35
- 7- Sistemlerin Yapı Modellerine Göre Güvenirlilik Fonksiyonları ..... 35
  - A- Seri Sistemlerin Güvenirlilik Fonksiyonları ... 36
  - B- Paralel Sistemlerin Güvenirlilik Fonksiyonları. 38
  - C- Karma Sistemlerin Güvenirlilik Fonksiyonları... 39
    - a- Yedeklemesiz Karma Sistemler..... 39
    - b- Yedeklemeli Karma Sistemler..... 40

## II- BAKIM YAPILABİLİRLİK ÇÖZÜMLEMESİ

- 1- Bakım Yapılabilirlik Çözümlemesine Duyulan Gereksinme.42
- 2- İşletimsi Süre ve Bakım Yapılabilirlik Fonksiyonu..43
  - A- Rastnal Değişken Olarak İşletimsi Süre ve Öğeleri ..... 44
  - B- Bakım Yapılabilirlik Fonksiyonunun Elde Edilmesi.. 45
- 3- Güvenirlilik ve Bakım Yapılabilirlik İlişkisi:  
Elverişlilik ..... 46

## III-LOJİSTİK DESTEK ÇÖZÜMLEMESİ

- 1- Lojistik Desteğe ve Çözümlemesine Duyulan Gereksinme. 49
  - A- Güvenirlilik Açısından..... 50
  - B- Bakım Yapılabilirlik Açısından ..... 51
- 2- Lojistik Desteğin Öğeleri ..... 51
  - A- İnsan Gücü ..... 51
  - B- Tezgah ve Donatılar ..... 52
  - C- Yedek Parça ..... 53
- 3- Lojistik Desteğin Rastnal Niteliği ..... 54
  - A- Sistem Açısından..... 54
  - B- Çevre Açısından ..... 55
- 4- Lojistik Desteğin Maliyeti ..... 56

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### ANAHAT DİZEL LOKOMOTİF TEKERLEKLERİNİN BAKIM PLANLAMASI

#### I- SORUNUN TANIMI VE ÇÖZÜMLEMESİ

- 1- Anahat Dizel Lokomotif Tekerleklerinin Bakımı  
Sorununun Tanımı ..... 59

2- Güvenirlilik Çözümlemesi .....	63
A- Geçmiş Dönemlerde Bandaj Kalınlığının Azalması Şeklinde Ortaya Çıkan Arızaların İncelenmesi.....	63
B- Arızalarla İlgili Parametrelerin Kestirimi.....	64
3- Bakım Yapılabilirlik Çözümlemesi .....	66
A- Bakım Yerlerinin İncelenmesi .....	66
B- İzlenen Bakım Politikasının İrdelenmesi .....	67
C- Bakım Yapılabilirliğin Belirlenmesi .....	67
D- Bakımla İlgili Parametrelerin Kestirimi .....	68
4- Maliyet Parametreleri .....	68

## II- KESTİRİM VE KARAR MODELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

1- Modellerin Varsayımları .....	70
2- Planlama Döneminde Beklenen Arızalı Lokomotif Sayısının Kestirimi İçin Markov Modeli .....	72
A- Markov Yaklaşımı Hakkında Genel Bilgiler .....	73
B- Geçiş Olasılıkları Matrisinin Belirlenmesi .....	74
C- Arızalı Lokomotif Sayısının <b>Kestirimi</b> .....	76
3- Bakım Planlamasında Karar Modeli.....	76
A- Kuyruk Modelleri .....	79
B- Uygun Kuyruk Modelinin Seçimi ve Eylem Seçeneklerinin Belirlenmesi .....	81
a- Kuyruk Modelinin Seçimi.....	81
b- Eylem Seçeneklerin Belirlenmesi.....	81
C- Karar Modelinin Yazılımı .....	82

## III-MODELLERİN ÇÖZÜMÜ

1- Arıza ve Bakımla İlgili Parametrelerin Sayısal Değerleri .....	85
--	----

2- Planlama Dönemindeki Arızalı Lokomotif Sayılarının Kestirimi .....	95
A- Kestirim Modelinin Yazılımı .....	95
B- Kestirim Modelinin Çözümü .....	98
3- Karar Modeli .....	100
A- Model Parametrelerinin Belirlenmesi.....	100
B- Modelin Yazılımı .....	101
C- Modelin Çözümü.....	102
4- Lojistik Destek Kestirimleri .....	103
SONUÇ VE ÖNERİLER .....	106
EKLER .....	111
YARARLANILAN KAYNAKLAR .....	119

## SUNUŞ

Sistemler bireylerin ve toplumların çeşitli gereksinmelerinin karşılanması amacıyla tasarlanır ve gerçekleştirilir. Çağımızda bilim ve teknolojinin hızla gelişmesi, sözkonusu sistemlerin sayısını her geçen gün çoğaltmaktadır. Bunun sonucunda kişilerin yaşamları ve örgütlerin işlevleri sistemlere daha fazla bağımlı duruma gelmektedir.

Sistemlerde ortaya çıkan arızalar, ilgili işlevlerin gerçekleştirilmesinde önemli aksamalara yol açabilmekte, sözkonusu arızaların koşulların elverdiğince kısa bir sürede giderilmemesi, aksaklıkları daha da çoğaltmaktadır. Bu durum, sistemlerdeki arızaları giderecek bakım ve onarımları gerçekleştirmek için gerekli önlemlerin önceden alınması zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır. Sözü edilen önlemlerin başında sistemlerin bakımlarının planlanması gelmektedir. Planlamada gözönünde bulundurulacak üç temel öge olan insangücü, tezgah ve yedek parçalar ise bakım planlamasında lojistik desteği oluşturmaktadır.

Tüm sosyal sistemlerde olduğu gibi, fiziksel sistemlerde de yönetimin temel işlevi, ilgili sistemin varoluş nedeni doğrultusunda eniyi (optimum) şekilde çalışmasını sağlamaktır. Sistemin eniyi şekilde çalıştırılması, yalnızca işletimdeki durumun değil, işletim dışındaki, başka bir deyişle arızalı olduğu durumdaki çabaları da içerir. Bakım planlamasının önemi bu noktada ortaya çıkmaktadır. Bakım planlaması yapılırken bakım için gerekli lojistik desteğin nitelik ve niceliklerinin eniyi bir şekilde belirlenmesi, yönetim için önemli bir sorundur. Bu tür bir planlama sorunuyla karşı karşıya kalan yöneticinin bir dizi seçeneği gözönüne alarak, sistemin amaçlarına dönük bakım politikasını belirlemesi gerekir.

Bakım planlamasının tutarlılığı ve uygulanabilirliği, ilgili soruna dönük tüm seçeneklerin incelenerek eniyisinin seçilmiş olmasına bağlıdır. Parça sayısı ve ilgili lojistik destek öğeleri giderek artan ve böylece karmaşıklaşan sistemlerin bakım planlaması evresinde, tüm seçeneklerin sezgisel yöntemle, ya da deneme yanılma yoluyla gözden geçirilmesi mümkün görülmemektedir.

Yukarıda öz olarak belirtilen gelişim ve gerekçeler doğrultusunda, "Bakım Planlamasının Boyutları ve Planlama İçin Modeller-~~Anahat~~ Anahat Dizel Lokomotif Tekerleklerine İlişkin Uygulama" başlığı altında toplanan bu araştırmada;

- Sistemlerin yönetiminde bakım ve bakım planlaması yaklaşımları, buna bağlı olarak yapılması gereken ayrıntılı çözümlerinin incelenmesi ve bu çözümlerinin önemi ile yerlerinin belirlenmesi,

- Bakım planlamasının temel bileşenlerine bağlı olarak belirlenen lojistik desteğe ilişkin karar sorunlarının boyutlarının tartışılıp, bir sistem olarak anahat dizel lokomotif tekerleklerinin bakım planlaması sorunlarının kesti-

rim ve karar modelleri çerçevesinde ele alınarak eniyi çözümün bulunması, böylece gerçek hayattan alınan bir sistemde bakım planlaması sorunları bütünüyle gözönünde tutularak tutarlı ve uygulanabilir planlama için matematiksel yaklaşımlar kullanımının örneklenmesi

amaçlanmıştır.

Amacı yukarıda belirlenen çalışma üç ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde "Bakım Planlaması" başlığı altında önce sistemler hakkında genel bilgiler verilerek, bunların bakım ve onarımları üzerinde durulmuştur. İzleyen kesimde ise bakım planlaması ve bakım planlamasındaki yaklaşımlar genel çizgileriyle ele alınmış, daha sonra bakım planlamasına rastnal yaklaşım gereği vurgulanmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde bakım planlamasında rastnal yaklaşım için gerekli çözümler ve bunların irdelenmesi üç alt kesimde **ele** alınmıştır.

İlk kesimde güvenilirlik çözümlemesi için önce arıza türleri incelenmiş, arızalara ilişkin olasılık yoğunluk fonksiyonları üzerinde durulmuştur. Daha sonra sözkonusu fonksiyonların parametrelerinin bulunması ele alınmış ve arızaların ortaya çıkış zamanını eniyi temsil eden arıza olasılık yoğunluk fonksiyonunun seçilmesi incelenmiştir. Bu kesimde son olarak, farklı yapı modellerine sahip sistemlerin güvenilirlikleri de farklı olduğundan, sistemlerin yapılarına göre güvenilirlikleri ele alınmıştır.

"Bakım Yapılabilirlik Çözümlemesi" başlığını taşıyan ikinci kesimde bakımların gerçekleştirildiği işletim dışı **süre** açıklanarak, bu **sürenin** bir fonksiyonu olarak bakım yapılabilirlik fonksiyonu incelenmiştir; İşletim dışı **sürenin** rastnal niteliği bu tür yaklaşımı gerektirmektedir.

İzleyen kesimde lojistik destek çözümlemesi ele alınarak, lojistik desteğin öğeleri ve bunların maliyetleri üzerinde durulmuştur.



Çalışmanın son bölümünde anahat dizel lokomotif tekerleklerinin bakım planlaması için kestirim ve karar modelleri geliştirilerek, sayısal çözümler yapılmıştır. Bu amaçla önce ilgili sorun tanımlanmış ve gerekli çözümler simgesel olarak gerçekleştirmiştir.

İkinci kesimde, yöneticinin tutarlı karar verebilmesinin sağlanması amacıyla, arızalı lokomotif sayılarının bulunması ve bakımlarının **planlanması** için kestirim ve karar modelleri geliştirilmiştir.

Ele alınan soruna dönük modellerin geliştirildiği bölümün son kesiminde modellerde kullanılacak parametrelerin kestirimi için gerekli sayısal çözümler yapılmıştır. Parametrelerin kestirimi ve uygunluk testlerinin yapılmasından sonra, kestirim modeli çözülmüştür. Son olarak kestirim modeli sonuçlarından yararlanılarak karar modelinin çözümü yapılarak, elde edilen çözümler değerlendirilmiştir.

Sonuç ve öneriler bölümünde kuramsal ve uygulamaya ilişkin olarak elde edilen sonuçlar ortaya konmuş ve bu konuda yapılabilecek çalışmalar için öneriler geliştirilmiştir.

BİRİNCİ BÖLÜM

BAKIM PLANLAMASI

## I- SİSTEMLERDE BAKIM

### 1- Sistemler Hakkında Genel Bilgiler

Son yıllarda sistemlerden söz etmek oldukça yaygınlaşmıştır. 1930'larda Ludwig Von Bertalanfy tarafından düzenli bir şekilde ortaya atılan Genel Sistem Kuramının da bu yaygınlaşmaya önemli derecede katkısı olmuştur(1).

"Sistem", temel olarak parçalar arasında düzenli ilişkilerin varlığı anlamına gelen ve eskiden beri kullanılan bir kavramdır (2). Bu kavramın, özde aynı olmakla birlikte biçimde farklılıklar gösteren çeşitli tanımları yapılmıştır.

---

(1) İlhan Atilla DİCLE, "Sistem Kuramı ve Toplumsal Örgütlere Uygulanışı", Amme İdaresi Dergisi, Cilt 2, Sayı 4, Aralık 1969, s.87.

(2) s. 86.

Ünlü sistem bilimcisi R.L.Açkoff sistemi "birbirine bağımlı parçalardan oluşan fiziksel veya kavramsal bir varlık" olarak nitelendirmiştir (3). Başka bir kaynakta sistem, öğelerinin arasındaki ilişkiler belirlenmiş olan varlıklar (nesneler) kümesi olarak tanımlanmıştır (4).

Yukarıda belirtildiği şekillerde tanımlanan sistemin amaçları varlığını sürdürme, kararlılık ve etkileşimdir. Bu amaçları taşıyan sistemlerde ise aşağıdaki nitelikler gözlenmektedir (5).

- Sistem bir bütündür;
- Daha küçük parçaların birleşmesinden ortaya çıkmıştır;
- Sistemi oluşturan parçalar sisteme göre birer alt sistem, kendilerini oluşturan daha küçük parçalara göre de birer sistemdir;
- Bir sistemi oluşturan parçalar bağımsız olmayıp, karşılıklı dayanışma durumundadır;
- Sistemin parçaları arasında sistematik ve dinamik ilişkiler vardır;
- Her sistemin bir çevresi olup aralarında dinamik ilişkiler vardır;

---

(3) R.L.ACKOFF, "Systems, Organizations and Interdisciplinary Research" Systems Thinking, Edited by F.E.EMERY Penguin Books Limited, Harmonds-Worth, Middlesex, England, 1960, s. 332.

(4) C.McMILLAN and R.F.GONZALES, Systems Analysis, R.D.Irwing Inc., United States, 1965, s. 4.

(5) DİCLE, S. 90-91.

- Çizilen sınırlar içinde sistemin parçaları arasındaki dayanışma ve ilişkiler, onların çevreleriyle olanından daha kuvvetlidir;
- Sistemlerin yer aldığı toplumsal çevre sürekli e-  
liştiğinden, sistemler de olumlu yönde değişmelidir.

Amaçları ve nitelikleri böylece ortaya konan sistemler çeşitli şekillerde olabilir (6). Ancak çalışmamızın amaçları doğrultusunda, bireyler ve toplumlar tarafından çeşitli gereksinmelerin karşılanmasında kullanılan ve bakımı yapılabilir türden sistemler ele alınacağından, diğer sistemlere yer verilmeyecektir (7).

Bakımlarının planlanması gereken sistemler elektronik ve/veya mekanik parçalardan oluşabilir. Bu parçalar önceden belirlenen işlevleri gerçekleştirmek üzere değişik sayıda ve şekillerde biraraya getirilirler. Söz konusu işlevler çeşitli mal veya hizmet üretimi şeklinde olabilir. Bu tür sistemlere birey ve toplum yaşamlarının hemen hemen her kesiminde rastlamak mümkündür. En basitinden karmaşığına, bir-iki parçalısından binlerce parçalısına kadar değişik nitelikte olan sistemler bireylerin ve giderek toplumların yaşamında çok önemli işlevleri yerine getirmektedir.

- 
- (6) Ayrıntılı bilgi için bkz. İ.KARA, "Yöneylem Araştırması ve İşletmecilikteki Yeri", ESADER, Cilt IX, Sayı 2, Haziran 1973, s. 87-89.
- (7) Bundan sonraki kısımlarda "sistem" terimi bu şekliyle gözönüne alınacaktır.

Yukarıda genel çizgileriyle açıklanan sistemlere eşya ve yolcu taşıyarak servis üreten bir sistem olarak lokomotifini örnek olarak gösterebiliriz. Sözkonusu sistem binlerce elektronik ve mekanik parçaların anlamlı bir şekilde birleşmesinden ortaya çıkmıştır. Bu sistem kullanıcılarıyla birlikte düşünüldüğünde, bir insan-makina sistemi oluşacaktır.

## 2- Bakım Türleri

Gerçekleştirildikleri amaçlar doğrultusunda sürekli veya aralıklarla kullanılan sistemlerin belirli zamanlarda çeşitli bakımlara gereksinimleri vardır (8). Bu bakımlar aşağıdaki çeşitli amaçlara yöneliktir (9):

- Mal veya hizmet üretiminde kullanılan sistemlerden koşulların elvereceği en iyi biçimde yararlanmak;
- Aşınma ve bozuşma (deterioration) oranını en küçük yaparak (minimisation) sistemin değerini korumak;
- Yukarıdaki amaçları uzun dönemde elverdiğince ekonomik olarak gerçekleştirmek.

Bakım genelde, planlanmış ve planlanmamış olarak iki kısma ayrılabilir (10). Planlanmamış bakım, önceden hiç bir önlem alınmadığında ortaya çıkan arızaların giderilmesi için

---

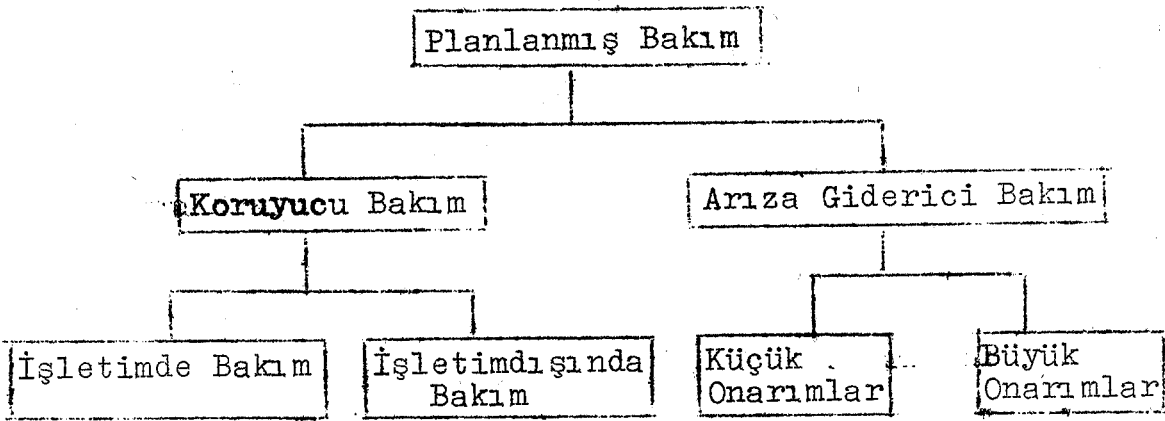
(8) Igor BAZOVSKY, Reliability Theory and Practice, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1961, S. 65.

(9) E.T. NEWBROUGH, Effective Maintenance Management, McGraw-Hill Book Company, London, 1967, s. 8.

(10) A.D.S. CORDER, Maintenance Management Techniques, McGraw-Hill Book Company, London, 1976, s. 5.

yapılan bakımdır. Bir kaza sonucu arızalanan sistemler için gerekli bakım bu türdendir. Planlanmış bakım ise belli dönemlerde koruyucu ve arızanın ortaya çıkabileceği dönemlerde de arıza giderici olarak yapılmaktadır.

Genelde, yukarıda belirtildiği şekilde iki sınıfa ayrılan bakım türlerinden planlanmış bakım yapılış amacına göre sınıflandırılmaktadır. Söz konusu amaç, sistemde ortaya çıkan arızanın giderilmesi veya arızanın ortaya çıkmasının önlenmesi şeklindedir. Bunlar arasındaki ilişkiler Şekil:1'de görülmektedir.



**ŞEKİL-1: Planlanmış Bakım Türleri ve Aralarındaki İlişkiler**

Bu çalışmamızda, sunuşta ortaya konan amaçlar doğrultusunda yalnızca planlanmış bakımlar ele alınacaktır.

#### A- Koruyucu Bakım

Koruyucu bakımlar belirli aralıklarla yapılan, tür

ve nicelikleri üretimini veya yapımını gerçekleştirenlerce belirlenen bakım türüdür (11). Koruyucu bakımın tür ve niceliklerinin tasarım veya yapımcılar tarafından belirlenmesinin nedeni, sistemin tüm özelliklerinin ancak onlar tarafından en iyi şekilde bilinmesidir. Kullanıcılara düşen görev belirlenen koruyucu bakımları gerektiği şekilde yapmaktır. Bununla birlikte, sistemin gerçek kullanımdaki aşınmaları nedeniyle yeni koruyucu önlemler gerekebilir. Bu amaçla sistem üzerindeki gözlem sonuçlarına göre belirlenecek dönemlerde kontroller yapılarak, onarım yapıp yapmama konusunda karar verilir.

Gözlem sonuçlarına göre belirlenecek olan koruyucu bakımların ekonomik olması zorunludur. Bunun sağlanabilmesi için koruyucu bakım oranının bulunması gereklidir. Söz konusu koruyucu bakım oranı, sistemin onarım ve onarım için kontrol sayıları toplamının işletimde ve onarımda geçen toplam süreye oranıdır (12).

#### B- Arıza Giderici Bakım

Arıza giderici bakımların sıklığı veya yapılış zamanları, koruyucu bakımlarinkinden farklılık gösterir. Bu

---

(11) Belirleme konusunda ayrıntılı bilgi için bkz; Toshio NAKASAWA Shunji, "Reliability Analysis of One-Unit System with Unrepairable Spare Unite and its Optimization Applications", Op.Res.Q. C.27, Sayı:1, 1976, s. 101-110

(12) Ayrıntılı bilgi için bkz. A.M.POLOVKO, Fundamentals of Reliability Theory, Academic Press, New York, 1968, s. 52.



farklılığın nedeni, arıza giderici bakımla giderilmek istenen arızaların rastnal bir nitelik göstermesi ve beklenmedik zamanlarda ortaya çıkmasıdır. Ancak sistemde geçmiş dönemlerde ortaya çıkan arızalar üzerinde incelemeler yapılarak bu tür arızaları giderecek bakımlara yönelik hazırlanacak planlar için temel oluşturulabilir. Söz konusu incelemelerde ise istatistik ve olasılık kuramlarından önemli ölçüde yararlanılabilir. Bu yararlanma arızaların ortaya çıkış şekillerine ilişkin bazı göstergelerin elde edilmesi şeklinde olacaktır. Bu konudaki geniş boyutlu açıklamalar çalışmamızın ikinci bölümünde ele alınacaktır.

## II- BAKIM PLANLAMASI YAKLAŞIMLARI

Mal veya hizmet üretiminde kullanılan sistemlerin gün geçtikçe gelişmesi, onların yapım (veya üretim) maliyetlerinin artışına yol açmaktadır. Bu nedenle sözkonusu sistemlerden koşulların elverdiğince daha fazla yararlanmak ekonomik bir zorunluluktur; Bu durumda bakım ve giderek bakımların planlaması ve yapılan planların gereğine uymak karar vericiler açısından önem kazanmaktadır. Bu derece önemli olan sistem bakımları, onların işletim dışı **sürelerini** enküçüklemeyi amaçlayarak bakım işlevinin enküçük maliyetle ve en etkili şekilde gerçekleştirilmesini sağlar. Bakıma böylesine önem kazandıran faktörler ise şu şekilde sıralanabilir (13):

---

(13) NEWBROUGH, s. 1-2.

- Mekanizasyonun artması,
- Donatıların artan karmaşıklığı,
- Parça ve gereç envanter sayılarındaki artış,
- Üretimi yapılan mal ve hizmetlerin nitelik ve niceliklerinde daha az sapmalar için çaba gösterilmesi,
- Mal ve hizmet sunum programlarında ortaya çıkabilecek sapmalara karşı daha fazla duyarlı olmak,
- Artan kalite gereksinimleri,
- Artan maliyetler,

Bakım planlamasının gerçekleştirilmesi için önceden tutulacak yol ve davranışlar belirlenmelidir. Sözkonusu yol ve davranışların belirlenmesi ise planlama olarak tanımlanmaktadır (14). Çeşitli nedenlerle bakıma alınacak sistemlerin bakımlarının gerçekleştirilmesi, yapılacak bakım planlamasının bütün boyutlarıyla ele alındığında mümkündür. Ancak bu konuda ayrıntılı incelemelere geçmeden önce, bakım planlamasında karşılaşılan sorunların ele alınması gerekmektedir.

#### 1- Bakım Planlamasında Karşılaşılan Sorunlar

Mal veya hizmet üretiminde yararlanılan sistemlerin bakımlarının planlanması, yönetim için önemli sorunlar

---

(14) D.SİNDİREN, Ş.ÖZ-ALP, İ.C.AŞKUN, İşletme Politikası, Emel Matbaası, Ankara, 1971, s. 15.

taşımaktadır. Bu sorunları iki grupta toplamak mümkündür. Bunlar bakımların yapılaş zamanlarının ve yapılmaları için gerekli çeşitli kaynakların nitelik ve niceliklerinin belirlenmesinde karşılaşılan sorunlardır.

İlk gruptaki sorunların kökeninde özellikle arızaların ortaya çıkış zamanlarının bilinmemesi yatmaktadır. Öte yandan, planlamanın zaman boyutuna ilişkin olarak ortaya çıkan ve yönetimin belirsizlik ortamında karar vermesine yol açan bu durum, ikinci bölümde ele alınacak çözümler sonucunda bulunacak göstergelerle çözüme daha tutarlı bir yaklaşım yapılabilecektir. Sözkonusu göstergeler arızaların planlama döneminde ortaya çıkma zamanına ilişkin parametrelerdir; Bunlar ikinci bölümde incelenecektir.

Bakım planlamasında karşılaşılan diğer sorun, bakıma ayrılacak kaynakların gerekli ve yeterli nitelik ve niceliklerinin belirlenmesidir. Bu sorunun zamanlama sorunuyla iç içe olması doğaldır. Bu nedenle çözümü arızaların ortaya çıkış zamanlarının kestirimine bağlıdır. Böylece karar verici, sistemlerin çeşitli nitelik ve nicelikteki bakımlara gereksinme duyacağı dönemleri kestirebildiğinde bunlara ilişkin gerekli kaynakları da belirleyebilecektir. Ancak bu belirleme sırasında sözkonusu bakım işlevinin endüyük maliyetle gerçekleştirilme gereği gözönünde tutulmalıdır. Öte yandan yönetim bir başka karar sorunuyla karşı karşıya gelmektedir, çünkü karar vericinin gerekli ve yeterli bakım işlevlerini zamanında gerçekleştirmesi için bir dizi eylem seçeneği bu-

lanabilmektedir. Bu nedenle, tutarlı bir bakım politikası izleyebilmesi için, sistemin belirlenen amaçları doğrultusunda en uygun eylem biçimini saptama durumundadır.

## 2- Bakımların Planlanması

Bakımların planlanması, yapılışına göre üç şekilde olmaktadır. Bunlar aşağıda incelenmektedir.

### A- Sezgisel Planlama

Yöneticilerin geçmiş dönemlerdeki deneyimlerine dayanarak yaptıkları bakım planlaması sezgisel planlamadır. Bakımlardan sorumlu olanlar bu konuda yeterince deneyimli ve kişisel yargıları tutarlı ise, küçük boyutlu sistemlerin bakım planlamasında başarılı olabilirler. Bununla birlikte bakımının planlanması amaçlanan sistem çok parçadan oluşuyor ve karmaşık ise, sezgisel planlamanın yetersiz kalacağı bir gerçektir.

### B- Belirlilik Ortamında Planlama

Sistemlerin bakımları bazı durumlarda belirlilik ortamında planlanmaktadır. Bu tür planlama genellikle sistemin yapımcıları tarafından belirlenen koruyucu nitelikteki bakımlar için yapılmaktadır. Sistemin içinde bulunduğu durumun koşullarına bakılmaksızın önceden belirlendiği şekilde bakımlar planlanmaktadır. Ancak planlamanın zaman boyutu-

nun yanı sıra başka boyutlarının varlığı, ve bu boyutların belirli olmama olasılığı sözkonusu planlamanın yetersizliğine yol açabilmektedir.

### C- Rastnal Planlama

Mal veya hizmet üretiminde kullanılan sistemlerin bakımlarının sezgisel planlamayla veya belirlilik ortamında planlama ile gerçekleştirilmesi genellikle mümkün olmamaktadır. Bunun nedeni hem sistemin çalıştığı hem de bakımların gerçekleştirileceği ortamdaki rastnal olayların varlığıdır. Bu tür ortamda yapılacak bakımların planlanmasının tutarlı ve uygulanabilir olması, sözkonusu olabilecek rastnal olayların gözönüne alınmasıyla mümkündür. Ancak böyle bir yaklaşım sistemlerin bakıma gereksinme duyacakları dönemlerde, zaman boyutundaki arıza olaylarının gözlem sonuçlarına göre gelecekteki davranışların kestirimiyle gerçekleştirilebilir. Ayrıca bakımın gerçekleştirilmesinde yararlanılacak kaynakların nitelik ve niceliklerinin rastnal olaylara bağlı oluşu da rastnal planlamayı gerektirmektedir.

### 3- Bakım Planlaması Sorununa Rastnal Yaklaşım Gereği

Sistemlerin arızalarının ortaya çıktığı, başka bir deyişle bakıma gereksinme duydukları dönemlerin, durumun koşullarına göre değişik rastnal nitelikler taşıdıkları bir gerçektir. Bu durumda sistemin işleyişini engelleyecek bir

arızanın ortaya çıkış zamanını kesin bir şekilde önceden belirlemek mümkün değildir. Ancak istatistik ve olasılık kuramından yararlanarak, yönetime kabul edilebilir güven seviyesine göre sözkonusu arızaların ortaya çıkış zamanlarının kestirimi yapılabilir. Sorunun bu şekilde ele alınması, rastnal yaklaşımı gerektirir.

Arızaların ortaya çıkış zamanlarının rastnal niteliğinin yanı sıra, bakımların gerçekleştirilme süreleri de rastnal nitelik taşıyabilmektedir. Bakımı gerçekleştirecek olan işgücünün aynı işlevi farklı sürelerde yapabilme durumu, bakım sorununun bu boyutunun da rastnal nitelik taşıyabileceğini ortaya çıkarmaktadır.

Böylece, hem arızaların ortaya çıkış zamanlarının, hem bakımın gerçekleştirilme sürelerinin rastnal nitelik taşıması nedeniyle, bakım planlaması sorununa rastnal yaklaşım gerekmektedir.

Bakım planlaması sorununa rastnal yaklaşımın gerçekleştirilebilmesi, bakım sorunun bütün boyutlarıyla incelenmesine bağlıdır; izleyen bölümde güvenirlilik, bakım yapılabirlik ve lojistik destek olarak ele alınacak çözümler sonucunda bakım planlamasına rastnal yaklaşım yapılabilecektir.

## İKİNCİ BÖLÜM

BAKIM PLANLANMASI BOYUTLARININ BELİRLENMESİ  
İÇİN RASTNAL YAKLAŞIM VE ÇÖZÜMLEMELER



## I- GÜVENİRLİLİK ÇÖZÜMLEMESİ

### I, Güvenirlilik Çözümlemesine Duyulan Gereksinme

Sistemlerin bakım planlamasında karşılaşılan en önemli sorun sistemdeki arızaların hangi dönemlerde ortaya çıkacağıının belirlenmesidir. Mal ve hizmet üretiminde yararlanılan sistemlerin ~~değişik~~ ortamlarda kullanılmaları nedeniyle arızaların ortaya çıkış dönemlerinde veya belli dönemlerde gözlenen arıza sayılarında farklılıklar görülmektedir. Bununla birlikte, sistemin önceden belirlenen koşullar altında kullanılması halinde, amaçlanan bir işletim dönemi içinde işlevlerini doyurucu bir şekilde yerine getirme olasılığı olarak tanımlanan güvenirlilik hesaplanabilir. Söz konusu güvenirlilik yardımıyla da belli dönemlerdeki arızalarınma ola-

sılıklarını kestirmek mümkün olabilmektedir (1).

Sistemdeki ve parçalarındaki arızaların belli dönemlerde ortaya çıkma olasılıklarını kestirebilmek güvenilirlik fonksiyonuyla mümkündür. Söz konusu fonksiyonun elde edilebilmesi güvenilirliği etkileyen olayların ve bunların zamana bağlı olarak ortaya çıkışlarının incelenmesini, başka bir deyişle güvenilirlik çözümlemesini gerektirmektedir.

## 2- Güvenirliliği Etkileyen Olaylar: Arızalar

İyi bir şekilde tasarlanmış, mühendislik işlemleri tam anlamıyla yerine getirilmiş, bütünüyle test edilmiş ve uygun bir şekilde kurulmuş sistemlerin kuramsal olarak işletim sırasında asla arıza yapmamaları beklenir. Bununla birlikte deneyler en iyi tasarım, yapım ve bakım çabalarının arızaların oluşmasını bütünüyle ortadan kaldıramadığını göstermektedir (2). Bu arızalar sistemin güvenirliliğini etkiler. Bu nedenle arızalar, güvenirliliği etkileyen olaylar olarak tanımlanır.

Sistemlerin güvenirliliklerinin somut olarak belirlenebilmesi belli dönemlerde ortaya çıkan arıza sıklıklarının bilinmesiyle mümkündür. Bu nedenle zaman içinde arıza

---

(1) ADS CARTER, Mechanical Reliability, The MacMillan Press. Ltd., London, 1972, s. 1.  
(2) BAZOVSKY, s. 3.

sayısını veya sıklığını gösteren bir fonksiyona gerek vardır. Zaman değişkenine bağlı olarak sistemin arıza yapmaksızın çalışabilme olasılığını bulmaya yarayan fonksiyon ise sözkonusu gereksinmeyi karşılayacak olan güvenilirlik fonksiyonudur.

Uygulamada genel olarak iki tür arıza ile karşılaşılmaktadır. Bunlardan birinci grubun kökeninde kullanım ve depolanma koşullarına uymama nedenleri yatmaktadır. Güvenirlik fonksiyonunun bulunması için gözönüne alınacak olan ve ikinci grubu oluşturan arızalar uygun kullanım koşulları altında ortaya çıkan arızalardır.

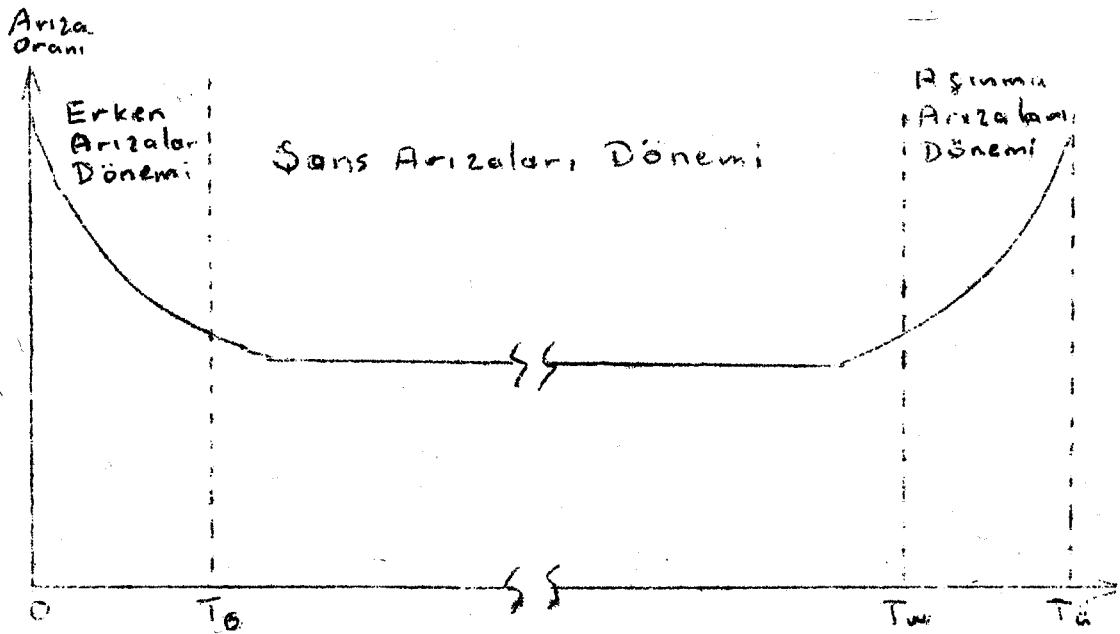
Güvenirlik fonksiyonunun elde edilmesi için ele alınacak arızalar niteliklerine göre farklı dönemlerde ortaya çıkarlar. Bu nedenle parçanın yaşamı üç döneme ayrılır. Birinci dönemde şans arızalarının çok az olmasına karşılık, büyük çoğunlukla erken arızalar kendini gösterir. İkinci dönemde yalnızca şans arızalarıyla karşılaşılır. Son dönemde ise, az sayıda şans arızasının yanı sıra aşınma arızaları büyük çoğunlukla kendini göstermektedir. Şekil 2'de arızaların ortaya çıkış oranının zaman boyutundaki değişimi görülmektedir (3).

Aşağıda çizilen eğri çok sayıda tekdüze(=homogen) parçadan oluşan bir kütlenin yaşam süresi içindeki arıza oranı-

---

(3) K.SARKADI-I.VINCZE, Mathematical Methods of Statistical Quality Control, Academic Press, Hungary, 1974, S. 360.

nın değişimini göstermektedir. Sistemin çalışmaya başlama-  
sıyla birlikte, çok sayıda aynı çeşit parça işleme konmak-  
tadır. Kütledeki standarda uymayan ve zayıf yapıllı parçalar  
nedeniyle, başlangıçtaki arıza oranı yüksek olmaktadır. Za-  
yıf parçalar arızalandıkça, sağlam olanlarıyla değiştiril-  
mekte ve bunların tamamı değiştirildikten sonra  $T_B$ 'den baş-  
layarak arıza oranı uzunca bir süre yaklaşık olarak sabit  
kalmaktadır. Bu dönemde parçadan eniyi şekilde yararlanıl-  
maktadır. Bu dönemin bitimiyle arıza oranı aşınmalar nede-  
niyle artmaktadır. Bu dönem aşınma arızaları dönemi olmakta-  
dır.



ŞEKİL 2: Zamana Bağlı Olarak Parçaların Arıza Oranının Değişim Grafiği

Yukarıda belirtilen dönemlere isimlerini veren arızalar aşağıdaki paragraflarda ayrıntılı olarak incelenmiştir.

#### A- Erken Arızalar

Erken arızalar parçanın yaşamının başlangıcında ortaya çıkar. Ortaya çıkış oranı başlangıçta yüksektir. Bu oran daha sonra giderek azalmaktadır (4).

Erken arızalar üretim sürecindeki kötü yapım ve yetersiz kalite kontrolü sonucunda ortaya çıkmaktadır. Üretimi yapılan parçaların büyük çoğunluğu belirlenen ölçülere uygun olduğu halde, bunların yanısıra birkaç ölçü dışı parça gözden kaçabilir. Aynı zamanda çeşitli parçaların sistemi oluşturmak üzere bağlanması sırasında da bazı bağlantılar yetersiz yapılmış olabilir (5).

Başlangıçta ortaya çıkan erken arızaların giderilmesi için sistemler genellikle deneme işletimine alınır. Böylece gerçek işletimde ortaya çıkabilecek arızalar önceden belirlenir ve giderilmesi için önlem alınır. Çoğu zaman erken arızaların öncelikle ortaya çıkarılması için, sistem olağan işletim koşullarından daha ağırında işletime konur. Sistemin işlevini aksatan parçalar arızanın niteliğine göre ya onarılır ya da değiştirilir. Böylece olağan koşullardan daha ağırında

---

(4) E. PIERUSCHKA, Principles of Reliability, Prentice-Hall, Inc., Englewood-Cliffs, New Jersey, 1963, S. 67.

(5) M.L. SHOOMAN, Probabilistic Reliability: An Engineering Approach, McGraw-Hill Book Company, New York, 1968, S.70.

çalışan parçalar, olağan koşullarda işlevini fazla sayıda erken arıza yapmaksızın yerine getirebilir. Bununla birlikte erken arızalar bütünüyle ortadan kaldırılamaz.

### B- Şans Arızaları

Sistem ve onu oluşturan parçaların tasarım ve yapımları ne kadar iyi olursa olsun, arıza yapmayacağı kesin değildir. Erken arızalar dönemini izleyen dönemde farklı bir biçimde ortaya çıkan ve en iyi bakım teknikleriyle dahi önlenemeyen bazı arızalar vardır. Bu arızalar düzensiz olarak ve beklenmedik bir şekilde ortaya çıkarlar. Bu dönemin her anında arızaların ortaya çıkma olasılıkları eşittir. Ortaya çıkışları zamana bağlı olmayan ve sabit bir oranda rastlanılan bu tür arızalar şans arızaları olarak isimlendirilirler (6). Bu tür arızaların dönemin hangi anında ortaya çıkacağı önceden kestirilemez, fakat ortaklaşa davranışın kesin kurallarına uyduklarından, yeterince uzun dönemde oluş sıklıkları yaklaşık olarak sabittir. Bazı kaynaklarda şans arızalarına aynı zamanda "beklenmedik son" (catastrophic) arızaları denilmektedir. Bazı durumlarda erken ve daha sonra incelenecek olan aşınma arızalarına da aynı isim verildiğinden, bu isimlendirme yanlışdır (7).

---

(6) PIERUSCHKA, s. 67.

(7) BAZOVSKY, s. 4.

Parçaların güvenilirlik çözümlemesini en çok ilgilendiren iki dönemden biri şans arızalarının ortaya çıktığı dönemdir.

### C- Aşınma Arızaları

Parçaların yaşamlarının sonlarında arızaların yoğunluğu artmaya başlar (8). Bunun nedeni mekanik bozuşma ve metalürjik **yorgunluk** süreci sonucunda aşınma arızalarının ortaya çıkmasıdır (9). Eğer parçanın **yapım gereği** olan bakımı uygun bir şekilde gerçekleştirilirse, aşınma arızalarının ortaya çıkması mümkün olduğu kadar geciktirilebilir. Sistemin güvenilirliğinin bozulmaması için aşınan parçaların gerektiği zaman değiştirilmesi zorunludur. Eğer aşınmaya uğrayacak parçaların değiştirilme olanağı yoksa, bu parçalar sistemin değiştirilebilir parçalarından daha fazla dayanıklı olmalıdır; Parçanın işlevini yapamaz bir duruma gelmesiyle sistemin de işlevini yapamaz duruma düşmesi doğaldır.

Deneme işletimi sonucu giderilen erken arızalar dışında kullanım sırasında karşılaşılan iki arıza türünden şans arızalarının ortaya çıkış oranının zamana bağlı olmamasına karşın, aşınma arızalarında bunun tam tersi bir durum söz konusu olmaktadır. Bu durum parçanın niteliğine göre önceleri

---

(8) I.B.GERTSBAKH-K.H.B.KORDONSKY, Models of Failure, Springer Verlag, Inc., New York, 1969, s. 28.

(9) R.L.LANDERS, Reliability and Product Assurance, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1963, s. 390

yüksek oranda aşınma, daha sonra düşük oranda aşınma, veya önceleri düşük, sonraları yüksek oranda aşınma şeklinde kendini göstermektedir. Bu nedenle şans arızalarının ortaya çıkış oranı sabit bir sayı ile gösterilebilirken, aşınma arızalarının ortaya çıkış oranı zamana bağlı bir fonksiyonla ifade edilmektedir.

Aşınma arızaları ile şans arızaları her zaman ayrı dönemlerde ortaya çıkmazlar. Özellikle aşınma olayına sık rastlanan mekanik sistemlerde iki tür arızanın aynı dönemde ortaya çıkmaları mümkündür. Sürekli olarak sürtünmeye uğrayan parçalarda aşınma olayı parçanın kullanıma girdiği andan itibaren ortaya çıkar. Bunun yanı sıra bazı şans arızaları da görülmekle birlikte, egemen olan arıza türü aşınma arızasıdır ve incelemelerde bu arıza türü gözönüne alınmaktadır.

Aşınma arızalarının ortaya çıkış oranı zamana bağlı olarak değiştiğinden, arızaların giderilmesi için alınacak önlemlerde planlama dönemindeki zaman boyutunda değişik nitelikler göstermektedir. Bu nedenle bu tür arızaların zaman boyutunda ortaya çıkışları istatistik yöntemlerle incelenmeli ve gelecekteki davranışları en iyi biçimde kestirilmelidir.

### 3- Arızalara İlişkin Olasılık Yoğunluk Fonksiyonları

Güvenirlilik, sistemlerin belirlenen sürede arıza yapmaksızın çalışma olasılığı olarak da tanımlanabilir. Bu tanımda belirtildiği gibi, arızaların ortaya çıkış zamanları



rastnal niteliktedir. Sözkonusu nedenle arızaların ortaya çıkış zamanını veya belli zaman aralığındaki arızalı sayısını ve şeklini subjektif olarak güvenilir bir biçimde belirlemek olanaksızdır. Buna karşın matematiksel istatistik ve olasılık kuramından yararlanarak arızaların ortaya çıkış zaman ve biçimini incelemek mümkün olacaktır.

Arızalara ilişkin olasılık yoğunluk fonksiyonunun tanımlanmasından önce sözkonusu fonksiyonun rastnal değişkeninin tanımlanması gerekmektedir. Bu amaçla ilk kez kullanıma alınan bir parçanın arızalanma zamanı  $Z$ , rastnal değişken olarak tanımlanmıştır. Sözkonusu rastnal değişkenin değer kümesi,

$$0 \leq Z \leq T_{\bar{u}} \quad (1)$$

olarak belirlenmiştir. Bu eşitsizlikteki üst sınır  $T_{\bar{u}}$ , parçanın ömrünü göstermektedir.

$f(z)$  : Çalışan bir parçadaki arızaların ortaya çıkış zamanlarının olasılık yoğunluk fonksiyonu olacaktır.

Bu fonksiyondan hareketle arızalara ilişkin birikimli olasılık yoğunluk fonksiyonu

$$F(Z) = \int_0^Z f(t)dt \quad (2)$$

şeklinde tanımlanır.

Böylece  $Z_0$  anına kadar çalışan bir parçanın,  $Z_0 + \Delta Z$  zaman aralığında arızalanma olasılığı,

$$P\{Z_0 < Z < Z_0 + \Delta Z\} = \int_{Z_0}^{Z_0 + \Delta Z} f(z) dz \quad (3)$$

şeklinde bulunabilir.

Benzer şekilde, sağlam bir parçanın verilen bir anda (zaman) arızalanma olasılığı,

$$P\{Z \leq Z_0\} = \int_0^{Z_0} f(z) dz \quad (4)$$

veya

$$P\{Z \leq Z_0\} = F(Z_0) \quad (5)$$

şeklinde bulunabilir.

Erken, şans ve aşınma arızalarına ilişkin olasılık yoğunluk fonksiyonları çeşitli şekillerde olabilir. Bununla birlikte en sık rastlanılanları şu şekilde sıralanabilir:

- Binom dağılımı
- Poisson dağılımı
- Üstel dağılım
- Rayleigh dağılımı
- Weibull dağılımı
- Gamma dağılımı
- Normal dağılım.

#### 4- Arıza Olasılık Yoğunluk Fonksiyonlarının Parametrelerinin Bulunması

Güvenirliliği etkileyen olaylar olan arızaların zamana bağlı olarak veya **erken arızalarda** olduğu gibi belli bir dönemde ortaya çıkışlarını incelemeye kullanılacak fonk-

siyonlar açıklanarak, bunlardan en yaygın rastlananları sıralandı. Diğer taraftan hem bu fonksiyonları belirlemek, hem de incelenen olayla ilgili ölçülebilir karakteristikler olan parametreleri bulmak gereklidir (10). Bu amaçla kullanılan kestirim yöntemleri hakkında bilgiler aşağıda verilmektedir.

#### A- En Küçük Kareler Yöntemi

İstatistikte sık kullanılan parametre kestirim yöntemlerindedir. Regresyon çözümlenmesi olarak da isimlendirilmektedir. Doğrusal ve doğrusal olmayan fonksiyonların parametrelerinin kestiriminde kullanılmaktadır. Regresyon eşitlikleri yardımıyla çözüme gidilmektedir (11). Fonksiyonun çizilen grafiğinden dikey veya yatay uzaklıkların kareleri toplamının enaz olmasını sağlayacak şekilde parametreler hesaplanmaktadır (12).

#### B- Momentler Yöntemi

Momentler yöntemi parametrelerin nokta kestiriminde kullanılan en basit yöntemdir (13). Bu yöntemin dayandığı ilke, parametrelere bağlı dağılımın momentlerini, gözlemler yardımı-

- 
- (10) W.J.DIXON-F.J.MASSER, Jr.Introduction to Statistical Analysis, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, s.464.  
(11) SHOUMAN, s. 464.  
(12) N.UZGÖREN, İstatistik Analizi, (Teksir), İstanbul, 1970, s. 212.  
(13) SHOUMAN, S. 84.

mıyla bulunan momentlere eşitlemektir (14). Bilinmeyen parametre sayısına eşit olarak elde edilen momentler ve bunların birbirlerine karşılık eşitlenmesiyle bir denklem sistemi elde edilir. Bu denklem sisteminin çözülmesiyle parametrelerin değerlerinin hatasız kestirimleri yapılabilir.

Momentler yönteminin matematiksel işlemleri şu şekilde olmaktadır (15):  $f(z; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$  k tane parametresi olan bir olasılık yoğunluk fonksiyonu olsun. Sıfır orijinine göre i'inci moment,

$$\mu'_i = \int_0^{\infty} z^i f(z; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) dz \quad i=1,2,\dots,k \quad (6)$$

olarak yazılabilir. Genelde  $\mu'_i$ , parametrelerin bir fonksiyonudur.

$z_j (j=1,2,\dots,n)$ 'ler örneklerden elde edilen gözlem sonuçları ve  $m'_i$  ler örnek momentleri olduğunda, i'inci örnek momentini,

$$m'_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j^i \quad i=1,2,\dots,k \quad (7)$$

olarak yazılır. Bu durumda,

$$m'_i = \mu'_i \quad i=1,2,\dots,k \quad (8)$$

- 
- (14) B.V.GNEDENKO-Y.U.K.BELYAYEV-A.D.SOLOVYEV, Mathematical Methods of Reliability Theory, Academic Press, New York, 1969, S. 53.
- (15) A.M.MOOD-F.A.GRAYBILL, Introduction to the Theory of Statistics, McGraw-Hill Book Company, New York, 1963, s. 186.

denklem sistemlerine çözüm olan  $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_k$  'ler parametrelerin kestirimleri olacaktır.

### C- Enbüyük Benzerlik Yöntemi

Olasılık yoğunluk fonksiyonlarının parametrelerinin bulunması için yararlanılan bir başka yöntem de enbüyük benzerlik yöntemidir. Diğer yöntemlere göre daha yeni olan ve genellikle momentler yönteminden daha üstün olduğu kabul edilen enbüyük benzerlik yönteminde hesaplama daha fazla işlem gerektirebilir. Bununla birlikte dayandığı temeller daha uygun ve güçlüdür(16).

Enbüyük benzerlik yönteminin kuramsal temeli matematiksel olarak şu şekilde açıklanabilir:

$Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n$  ana kütle değerleri ve  $z_1, z_2, z_3, \dots, z_n$  gözlenen örneğe ait değerler olduğunda,  $Z_i = z_i$  olma olasılığını gösteren n tane marjinal yoğunluk fonksiyonu,

$$\int_0^{z_i} f(z_i; \theta_k) dz_i = P(Z_i \leq z_i) \quad (9)$$

şeklinde yazılabilir.

$Z_i$ 'ler bağımsız olduğundan, birleşik (joint) yoğunluk fonksiyonu marjinal yoğunluk fonksiyonlarının çarpımı olarak,

$$\begin{aligned} \phi(z_1, z_2, \dots, z_n; \theta_k) &= L(z_1, z_2, \dots, z_n; \theta_k) \\ &= f(z_1; \theta_k) \cdot f(z_2; \theta_k) \dots f(z_n; \theta_k) \dots \end{aligned} \quad (10)$$

şeklinde yazılabilir (10) no.lu ifadede verilen fonksiyon benzerlik (likelihood) fonksiyonudur (17). Bu fonksiyon kapalı olarak,

$$L(z_1, z_2, \dots, z_n; \theta_k) = \prod_{i=1}^n f(z_i; \theta_k) \quad (11)$$

şeklinde gösterilebilir.

Enbüyük benzerlik yönteminde amaç benzerlik fonksiyonunu enbüyükleyen  $\theta$  parametresini (veya parametrelerini) kestirmektir. (18). Ancak çarpımın türevi sonucunda ortaya çıkacak olan ifadenin çözümü çok zor olacağından, başka bir yöntem izlenmelidir. Fonksiyonla logaritması arasındaki bire bir ilişkiden yararlanarak, bu sorun çözülebilir (19). Bu amaçla, benzerlik fonksiyonunun logaritması

$$\log L(z_i; \theta_k) = \mathcal{L}(z_i; \theta_k) \quad (12)$$

elde edilerek,  $\theta_k$ 'lere göre türevleri alınıp, sıfıra eşitlenmelidir. Elde edilen

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_k} = 0 \quad (13)$$

---

(17) MOOD-GRAYBILL, s.180.

(18) GNEDENKO, ..., s.52.

(19) N.H.ROBERTS, Mathematical Methods of Reliability, Engineering, McGraw-Hill Book Company, New York, 1964, s.63.

denklem sistemleri çözümlenerek aşağıdaki özelliklere sahip parametreler bulunabilir (20):

- Eğer sorun için yeterli bir kestirim varsa, enbüyük benzerlik kestirimi yeterlidir.
- Çok sayıda birimden oluşan örneklerden enbüyük benzerlik kestirimi en tutarlı kestirimdir.
- Enbüyük benzerlik kestirimi sapmazlık özelliğine sahiptir.
- $n \rightarrow \infty$  olduğunda, parametrelerinin varyansı hesaplanıp, dağılımı belirlenebilir.

5- Arızaların Ortaya Çıkışını Eniyi Temsil Eden Arıza Olasılık Yoğunluk Fonksiyonunun Seçilmesi

İnceleme konusu olan arızaların gelecekteki ortaya çıkış biçimlerini kestirebilmek amacıyla derlenen verileri eniyi şekilde temsil edebilecek dağılım aşağıdaki iki şıktan birine uygun olarak seçilebilir (21):

- Sistemin fiziksel yapısı bazı varsayımlar altında genellikle arızaların ortaya çıkışını temsil amacıyla geliştirilmiş belirli dağılımlara uygundur.
- Gözlem sonucu elde edilen verilere dayanarak uygun bir dağılım fonksiyonu araştırılır. Bunun için Pearson eğrilerinden yararlanılabilir (22). Bu amaçla aşağıdaki işlemlerin yapılması gereklidir (23):
- Veriler sınıflanır;
- Bölünme serisi için momentler hesaplanır ve Sheppard düzeltilmesi uygulanır;

---

(20) SHOOMAN, §.89-90

(21) SHOOMAN, §.45.

(22) Bu konuda bkz. W.P. ELDERTON, Frequency Curves and Correlation, (3B), London, 1938, §.38-28.

(23) A.F. YÜZER, İşletme Yönetiminde Kâr-Zarar Bütçesine Olasılıklı Yaklaşım, (Basılmamış Doktora Tezi), İTİA, Eskişehir, 1978, §.9.

- Momentler yardımıyla dağılım fonksiyonu tipinin seçilmesinde kullanılacak ölçütler belirlenir;
- Kullanılacak eğri tipine karar verilir;
- Uygunluk sınaması yapılır.

#### 6- Güvenirlilik Fonksiyonunun Elde Edilmesi

Sistemin arıza yapmama olasılığını bulmaya yarayan güvenirlilik fonksiyonu, birikimli arıza yoğunluk fonksiyonunun tamlayanıdır. (24). Bu ilişki matematiksel olarak,

$$R(z) + F(z) = 1 \quad (14)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadeden güvenirlilik fonksiyonu,

$$R(z) = 1 - F(z) \quad (15)$$

olarak elde edilir. Bunun yanısıra, arıza olasılık yoğunluk fonksiyonundan hareketle güvenirlilik fonksiyonu

$$R(z) = \int_z^{\infty} f(x) dx \quad (16)$$

olarak yazılabilir.

#### 7- Sistemlerin Yapı Modellerine Göre Güvenirlilik Fonksiyonları

Bir sistemin güvenirliliği, sistemi oluşturan parçaların güvenirliliklerine ve bu parçaların birbirleriyle olan seri ve/veya paralel bağlantılarına göre belirlenir. Bu belirlemede olasılığın çarpım ve toplam kuralından aşağı-

---

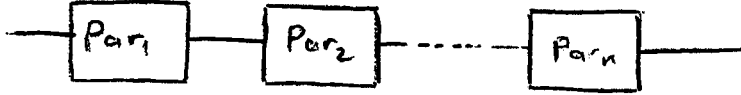
(24) A.K.S.JARDİNE, Maintenance, Replacement and Reliability, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1973, s.18.



da açıklanacağı şekilde yararlanılmaktadır.

#### A- Seri Sistemlerin Güvenirlilik Fonksiyonları

Birden fazla parçanın amaçlanan işlevleri gerçekleştirmek üzere birbirleri ardısına dizilmesiyle oluşan sistemler, seri sistemler olarak adlandırılır. n parçadan oluşan bir seri sistem Şekil: 3'de olduğu gibi gösterilebilir:



ŞEKİL:3 n Parçadan oluşan seri sistem

Seri olarak birbirine bağlanmış parçalardan oluşan bir sistemin işlevini sürdürebilmesi, parçaların hepsinin de arıza yapmadan işlemesine bağlıdır (25). Sistemi oluşturan parçalardan yalnızca bir tanesinin arıza yapması bile sistemin işlevinin aksamasına ve daha sonra da bütünüyle bozulmasına neden olur.

Güvenirlilik çözümlemesi yapılan seri sistemin arıza yapmaması olayı S, sistemi oluşturan parçaların arıza yapmama olayları ise  $(S_i (i=1,2,\dots,n))$  ile gösterildiğinde, aşağıdaki bağıntı kurulabilir (26).

$$S = S_1 \cap S_2 \cap \dots \cap S_n \quad (17)$$

Buna göre S olayının çıkma olasılığı

$$P(S) = P(S_1 \cap S_2 \cap \dots \cap S_n) \quad (18)$$

şeklinde hesaplanabilir. Koşullu olasılıktan yararlanıldığında, yukarıdaki ilişki şöylece yazılabilir:

---

(25) GNEDENKO....., §.120.

(26) SHOUMAN, §.121.

$$P(S) = P(S_1/S_2 \cap S_3 \dots \cap S_n) P(S_2 \cap S_3 \dots \cap S_n) \quad (19)$$
$$= P(S_1/S_2 \cap \dots \cap S_n) P(S_2/S_3 \cap \dots \cap S_n) P(S_3 \cap \dots \cap S_n)$$

S olayının ortaya çıkma olasılığı genel olarak aşağıdaki şekilde gösterilir:

$$P(S) = \prod_{i=1}^{n-1} P(S_i/S_{i+1} \cap \dots \cap S_n) P(S_n) \quad (20)$$

Seri sistemlerin güvenilirlikleri çözümlenirken, sistemi oluşturan parçaların arızalanma olaylarının karşılıklı bağımsız olduğu varsayımı yapıldığında, sistemin herhangi bir parçasının arıza yapmama olasılığı aşağıdaki şekilde ifade edilir (27):

$$P(S_i/S_{i+1} \cap \dots \cap S_n) = P(S_i) \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (21)$$

Bu durumda sistemin arıza yapmama olasılığı

$$P(S) = \prod_{i=1}^n P(S_i) \quad (22)$$

olarak ifade edilebilir. Sistemin arıza yapmama olasılığı güvenilirliği göstereceğinden,

$$R(Z) = \prod_{i=1}^n R_i(Z) \quad (23)$$

olarak yazılabilir. Eğer sistemi oluşturan parçaların güvenilirlikleri birbirine eşitse, sistemin güvenilirliği herhangi bir parçanın güvenilirliğinin n'inci kuvvetine eşit olacaktır ve,

$$R(Z) = R_i^n(Z) \quad (24)$$

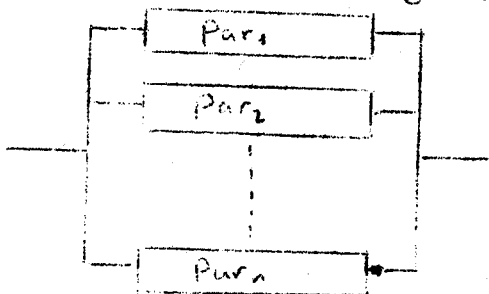
şeklinde bulunacaktır.

---

(27) D.K.LLOYD-M.LIPOW, Reliability: Management, Methods, and Mathematics, (2.Baskı); Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1964, §.222.

B- Paralel Sistemlerin Güvenirlilik Fonksiyonları

Sistemi oluşturan parçaların aynı işlev süreci kanalında değil, farklı kanallarda olması halinde paralel sistemler söz konusu olur. Paralel sistemlerde sistemi oluşturan parçalardan bir veya birden fazlası arıza yapsa da, sistemin işlerliğini sürdürmesi olasılığı vardır. Bu durumlarda sistem amaçlanan işlevlerini tam anlamıyla olmasa bile, belli bir düzeye kadar gerçekleştirebilecektir (28). n parçadan oluşan bir paralel sistem Şekil: 4'de görülmektedir.



ŞEKİL:4 n parçadan oluşan paralel sistem

Paralel sistemlerin güvenirliliği seri sistemlere göre daha yüksektir; Seri sistemlerde parça sayısı arttıkça güvenirliliğin azalmasına karşılık, paralel sistemlerde parça sayısı arttıkça güvenirlilikte yükselmektedir.

Paralel sistemlerin güvenirliliği araştırılırken önce güvenilmezliği belirlenir. Paralel sistemlerde bütün parçaların arıza yapması halinde sistem işlemez hale geleceğinden, olasılıktaki çarpım kuralından yararlanılır;  $U_i$ , i'inci parçanın güvenilmezliğini gösterdiğinde, paralel sistemin güvenilmezliği,

$$U(z) = \prod_{i=1}^n U_i(z) \quad (25)$$

---

(28) BAZOVSKÝ, §.97.

olacaktır. Buradan

$$R(Z) = 1 - U(Z) \quad (26)$$

elde edilir. Eğer bütün parçaların arıza yapma olasılıkları birbirine eşit ise,

$$U(Z) = U_i^n(Z) \quad (27)$$

olduğundan,

$$R(z) = 1 - U_i^n(Z) \quad (28)$$

yazılabilir.

### C- Karma Sistemlerin Güvenirlilik Fonksiyonları

Uygulamada bütünüyle seri veya paralel olan sistemlerle karşılaşmak genellikle mümkün değildir. Karşılaşılan sistemlerin çoğunluğu seri ve paralel olarak bağlanmış parçalardan oluşmaktadır. Bu şekilde oluşan sistemler iki türdür. Bunlar yedeklemesiz ve yedeklemeli karma sistemlerdir.

#### a- Yedeklemesiz Karma Sistemler

Sistemdeki bazı parçaların bağlantıları sistemin yapısı gereği paralel ise, yedeklemesiz karma sistemler söz konusu olmaktadır. Bunların güvenirlilik fonksiyonlarının belirlenebilmesi için öncelikle sistemin yapısının, başka bir deyişle işlevsel ilişkilerinin açık bir şekilde ortaya konması gerekmektedir.

Sistemdeki işlevsel ilişkiler belirlendikten sonra parçalar gruplandırılarak alt sistemler oluşturulur. Alt sistem-

lerinröluşturulması sonucunda, her alt sistemde bulunan parçalar birbirleriyle seri veya paralel bağlanmış olmalıdır. Daha sonra alt-sistemlerin güvenilirlik fonksiyonları elde edilir. Aynı gruplandırmaya sistemin güvenilirlik fonksiyonu bulununcaya kadar devam edilir (29).

#### b- Yedeklemeli Karma Sistemler

Karma sistemlerdeki ikinci tür paralel bağlantılar yedekleme şeklindedir. Sistemleri daha güvenilir yapmak için arıza yapma olasılığı yüksek olan parçalara paralel olarak yedekleme parçaları bağlanır (30). Bu tür sistemlere yedeklemeli karma sistemler denir. Özellikle seri sistemlerde parça sayısındaki artış sistemin güvenilirliğini azaltmaktadır. Bu sakıncayı gidermek için seri parçaların yanlarına paralel bağlantılar yapılmaktadır (31).

Yedeklemeli karma sistemler, karma sistemlerin özel bir türü olduğundan, karma sistemlerin güvenilirlik fonksiyonlarının bulunması için izlenen yol bunlar için de geçerlidir. Aralarında farklı olan tek nokta şudur: Bu tür sistemlerde işletme sürecine kendiliğinden giren yedekleme parçasının bu sürece girmesini sağlayan parçanın güvenilirliğinin de gözönünde bulundurulması gerekir; Bu parçanın da arıza yapabileceği unutulmamalıdır. Bu nedenle sözkonusu parçanın güvenilirliği de hesaplamaya katılmalıdır.

Bu kesimde yapılan tanımlamalar ve çözümlenmeler doğrultusunda sistemin tümünün veya parçalarının belli dönem-

---

(29) Bu konuda bkz: E.Y.CHANG-W.E.THOMPSON, Bayes Analysis of Reliability, for Complex Systems, Operations Research, C.24, s.1, Jan-Feb., 1976, s.156-167.

(30) CARTER, a.g.k. s.6.

(31) G.KIVENSON, Durability and Reliability in Engineering Design Hayden Book Company, Inc., New York, 1971, s.106.

lerde arıza yapma olasılıkları belirlenebilecektir. Böylece bakım planlaması için yapılacak çalışmalara temel olacak veriler elde edilebilecektir.

## II. BAKIM YAPILABİLİRLİK ÇÖZÜMLEMESİ

### 1- Bakım Yapılabilirlik Çözümlemesine Duyulan Gereksinme

Sistemdeki tüm parçaların arıza giderici ve koruyucu bakımları için gerekli süre, parçaların sistemdeki yerlerine ve fiziksel karakteristiklerine göre değişmektedir. Bununla birlikte aynı parçaların bakımı için gerekli bakım süresinde de değişiklikler olabilir. Bu durumda, bakımların belli bir sürede gerçekleştirilebilme olasılığını bulmak için çözümlemelere gerek vardır; Söz konusu çözümlmeye bakım yapılabilirlik çözümlemesi denilmektedir.

Bakım yapılabilirlik, bakımı yapılacak bir sistemin önceden belirlenen bir işletim dışı sürede (down time) bakımınının gerçekleştir-

leştirilmesi olasılığıdır (32).

Sistemlerin işletim dışındaki durumlarını belirleyen bakım yapılabilirliğin çözümlenmesi yönetim açısından çok önemlidir. Yöneticiler, arızalı olduğunda mal veya hizmet üretiminde darboğaz yaratabilecek sistemlerin önceden belirlenmiş bir sürede işler duruma getirilme olasılığını öncelikle bilmek zorundadırlar. Böylece sözkonusu soruna ilişkin karar verme ortamı, bakım yapılabilirlik çözümlenmesi yardımıyla belirsizlikten risk ortamına kaydırılır.

Bakım yapılabilirlik çözümlenmesinin gerçekleştirilmesi, bakıma ayrılacak kaynaklar ve süre açısından da önemlidir (33). Yöneticiler daha üst düzeyde bakım yapılabilirlik elde etmek ve bakımı daha kısa sürede gerçekleştirebilmek için fazladan kaynak tahsis edebilirler.

## 2- İşletim dışı Süre : ve Bakım Yapılabilirlik Fonksiyonu

Sistemlerin önceden belirlenmiş sürede bakımlarının gerçekleştirilme olasılığını bulmaya yarayan bakım yapılabilir-

- 
- (32) H.V.VON ALVEN, Reliability Engineering, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs; New Jersey, 1964, s. 9.  
(33) C.E.CUNNINGHAM-W.COX, Applied Maintainability Engineering, John Wiley and Sons, New York, 1972, s. 228.



liğin işletim dışı sürenin bir fonksiyonu olduğu belirtildi. Öte yandan, politika içeren değişken olan işletim dışı sürenin yönetimce doğrudan hesaplanması önemli bir sorun yaratmaktadır. Bu soruna çözüm bulunması rastnal nitelik taşıyan işletim dışı sürenin ayrıntılı bir biçimde incelenmesiyle mümkündür. Daha sonra bu bilgilerden hareketle bakım yapılabilirlik fonksiyonu elde edilebilir.

#### A- Rastnal Değişken Olarak İşletim Dışı Süre ve Öğeleri

Kullanım sırasında arızalanan veya başka bir nedenle bakıma gelen sistemlerin anında bakıma alınması genellikle mümkün değildir. En azından bakım yerinde başka bir sistemin bakımda bulunması nedeniyle, sonradan gelen sistemin beklemesi gerekebilir. Öte yandan, sistemin işletimden alıkonmasıyla birlikte işletim dışı zaman süreci başlamaktadır. Sistemin böylece işletimden alıkonulduğu süre, durumun koşullarına göre farklı uzunluklarda olmakta ve rastnal nitelik taşımaktadır.

İşletim dışı süre üç grupta incelenmektedir. Bunlar aktif onarım süresi, lojistik süre ve yönetsel süredir.

İşletim dışı sürenin en önemli ögesi olan aktif onarım süresinde yalnızca onarımla ilgilenilir. Bakımla görevli kişilerin sistemdeki arızayı gidermek için çalıştıkları süreyi kapsar. Bu ögenin rastnal niteliği, çalışan kişilerin farklı nitelikte olmasındandır.

Lojistik süre, sistemin bakımına gerek duyulduğunda, bakımın gerçekleştirilmesi için gerekli olan işgücü, tezgahlar ve yedek parçaların sağlanmasında geçen süredir. Örgütün yapısı ve içinde bulunduğu ortam nedeniyle de lojistik süre rastnal niteliktedir.

Yönetsel süre, işletim dışı sürede aktif onarım ve lojistik sürenin dışında kalan süreyi kapsar. Kapsamında bakımla ilgili yönetsel işlemlere harcanan süre ve boşa geçen zaman vardır.

Yukarıda sıralanan öğelerin tümü rastnal olayların etkisi altındadır. Bunun sonucunda toplamları da rastnal nitelikte olmaktadır.

#### B- Bakım Yapılabilirlik Fonksiyonunun Elde Edilmesi

Belli bir sürede bakımın gerçekleştirilme olasılığı olarak tanımlanan bakım yapılabilirlik, bir olasılık yoğunluk fonksiyonuyla ifade edilebilir (34). Sözkonusu fonksiyonu ifade etmeden önce rastnal değişkenin tanımlanması gerekmektedir.

Rastnal değişken

$\xi$  : İşletim dışı süre

olarak tanımlanmıştır. Rastnal değişkenin değer kümesi ise, ba-

---

(34) JARDINE, s. 23.

kımın gerçekleştirebileceği en uzun süre  $\xi$  ü olduğunda,

$$0 < \frac{1}{\xi} < \frac{1}{\xi_u} \quad (29)$$

olarak ifade edilebilir. Bu durumda,

$f(\frac{1}{\xi})$  işletimdişı sürenin olasılık yoğunluk fonksiyonu olacaktır.

Bu fonksiyondan hareketle sistemin belli bir sürede bakımını gerçekleştirme olasılığı

$$P(0 < \frac{1}{\xi} \leq a) = \int_0^a f(\frac{1}{\xi}) d\xi \quad (30)$$

ifadesiyle bulunabilir. Bu ifade aynı zamanda bakım yapılabilirlik olarak isimlendirilmektedir.

### 3- Güvenirlilik ve Bakım Yapılabilirlik İlişkisi:

#### Elverişlilik

Güvenirlilik ve bakım yapılabilirlik arasında önemli bir ilişki vardır. Bu ilişkiyi iyi bir şekilde ortaya koyan ve aynı zamanda ölçülebilen kavram elverişliliktir. Elverişlilik, sistemin işletim süresinin işletim ve işletimdişı süreler toplamına oranı olarak tanımlanabilir. Bu kavram yardımıyla yönetici, sistemin işletim ve işletim<sup>dişı</sup> süreleri toplamı içinde işletimde kalacağı süreyi oransal olarak bilebilir. Böylece toplam işletim süresi A, işletimdişı süre D ile gösterildiğin-

de, elverişlilik

$$E = \frac{A}{D+A} \quad (31)$$

şeklinde yazılabilir.

Elverişlilik, işletim süresi oranı olarak da isimlendirilmektedir. Durağan hale (steady-state) gelmiş sistemlerin elverişliliğini, arızalar arası ortalama zamanı (m) ve bakımların ortalama zamanı ( $\mu$ ) açısından şu şekilde yazmak mümkündür (35):

$$E = \frac{m}{m+\mu} \quad (32)$$

Güvenirlilik ve bakım yapılabilirlik, sistemin sırasıyla işletim ve işletim dışındaki durumları hakkında ayrı ayrı bilgi vermelerine karşın, toplam süredeki çalışır halde olmaya ilişkin bilgi sağlamamaktadır. Ancak elverişliliğin belirlenebilmesi için güvenirlilik ve bakım yapılabilirlik çözümlenmeleri yapılmalıdır.

Sistemin tam anlamıyla elverişli olması halinde  $E = 1$  olacaktır. Bunun gerçekleşmesi işletim dışı sürenin sıfır olması veya başka bir deyişle bakıma hiç gerek duyulmamasıyla mümkün-

---

(35) S.R.CALABRO, Reliability Principles and Practices, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1962, s. 134.

dür. Böyle bir sistem kurmak ve bunun varlığını sürdürmek hemen hemen olanaksızdır. Sistemler hiç arıza yapmasalar bile, enazından belli dönemlerde koruyucu bakımlar için işletimden alıkonulmaları gerekmektedir.

Elverişlilik özellikle düşük güvenilirlikli ve sık sık arıza yapan sistemler için önemli bir gösterge olmaktadır. Bu tür sistemlerin sık arızalanmalarının yanı sıra işletim dışı sürelerinin de uzun olması elverişliliklerinin az olmasına yol açacaktır. Ancak politika içeren bir değişken olarak da tanımlanabilen işletim dışı sürenin uzunluğunu dolaylı olarak kontrol altında tutmak yönetim için bazı durumlar dışında genellikle mümkün olabilmektedir. Eğer durumun koşulları yönetimin bakım için fazla kaynak tahsis etmesiyle, işletim dışı sürenin kısalmasını sağlayabiliyorsa, bu yönde bir çaba harcanabilir. Ancak, sağlanacak fazla kaynağın maliyeti ile, işletim dışı sürenin kısalması sonucu sistemin yaratacağı faydanın karşılaştırılması ve buna göre tutarlı bir bakım politikasının izlenmesi gereklidir.

Güvenirlilik çözümlemesinden yararlanılarak belli dönemlerde beklenen arızalı sistem sayısını kestirebilecek olan yönetim, bakım yapılabilirlik çözümlemesiyle bunların bakımını belli sürede gerçekleştirme olasılığını hesaplayabilecektir. Ayrıca, yapılacak olan lojistik destek çözümlemesiyle de bakım için gerekli kaynakların nitelik ve niceliklerini izleyen kesimde belirtildiği şekilde belirlenebilmesi mümkün olacaktır.

### III. LOJİSTİK DESTEK ÇÖZÜMLEMESİ

#### 1- Lojistik Desteğe ve Çözümlemesine Duyulan Gereksinme

Sistemlerin bakımlarının yapılabilmesi bazı gereksinmelerinin karşılanmasıyla mümkündür. Bu gereksinmeler bakım planlamasında gözönüne alınacak üç temel öğeden oluşmaktadır; Bu öğeler tezgahlar, insangücü ve yedek parçadır. Bakımı gerçekleştirecek olan bu öğeler zamanında ve yeterince karşılanamayacak olursa, bakım ve onarımda gecikmeler olacaktır. Bu gecikmeleri önleyecek olan işlev lojistik destektir (36).

---

(36) LANDER, s. 429; J.de S.COUNTINHO, "Program Management", Reliability Control in Aerospace Equipment Development," Society of Automotive Engineers, Technical Progress Series, C. 4, 1963, s. 121-122.

## B- Bakım Yapılabilirlik Açısından

Sistemin taşınması gereken niteliklerden olan bakım yapılabilirlik, en az güvenilirlik kadar önemlidir. Bunun yanısıra bakımların en azından öngörülen sürede gerçekleştirilmesi sistemin elverişliliğini yükseltecektir (38).

Bakımların gerçekleştirilmesi, gerekli kaynakların sağlanmasıyla mümkündür. Ayrıca sözkonusu kaynakların nitelik ve niceliği, bakım yapılabilirlik düzeyini doğrudan etkileyecektir. Böylece lojistik desteği yeterli olan sistemlerin bakım yapılabilirlik düzeyi de yüksek olacaktır.

## 2- Lojistik Desteğin Öğeleri

### A- İnsan Gücü

Kendi bakımını gerçekleştiren sistemlerin henüz yapılamamış olması ve bunun gerçekleştirilmesinin çok uzun yıllar gerektirmesi, bakımda insan gücünün önemini ortaya koymaktadır (39). Bakım için gerekli olan insan gücü, lojistik desteğin bir öğesidir.

---

(38) SHOOMAN, s. 336.

(39) CUNNINGHAM-COX, s. 387.

İnsan gücü ve bunun oluşturacağı bakım örgütü çeşitli etmenlere göre belirlenir. Bu etmenler işletmenin tipi ve büyüklüğü, bakım bölümünün sorumlulukları ve işgörenlerin eğitim durumu olarak sıralanabilir (40).

İnsan gücü ögesi yeterli olarak sağlanmazsa, bakımın tam anlamıyla gerçekleştirilmesi mümkün olamaz.

### B- Tezgah ve Donatılar

Teknolojinin gelişmesi sonucu bakımlarda insan gücüne olan gereksinimin bütünüyle ortadan kalkmamasına rağmen, tezgahlar insan gücünün yerini giderek yoğunlaşan bir şekilde almaktadır. Günümüzde çeşitli sistemlerin bakımını gerçekleştirmek için özel amaçlı tezgahlar ve donatılar geliştirilmiş ve yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca çeşitli mal ve hizmet üretiminde kullanılan sistemlerin hızla çoğalması, bu tür tezgah ve donatıların geliştirilmesine önem kazandırmıştır. Söz konusu tezgah ve donatılar, bakımı gerçekleştirecek lojistik desteğin ikinci ögesini oluşturmaktadır.

---

(40) B.OYMAN, "Bakım İşlevinde Personel Sorunları" Bakım ve Tamir Sorunları Sempozyumu, MPM Yayınları, No. 112, Ankara, 1972, s. 124.



C- Yedek Parça

Sistemlerin bakımları gerçekleştirilirken gerekli olacak yedek parçaların zamanında değiştirilebilmesi ve bunun için önlemlerin alınması, bakımın gerektiği şekilde yapılabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle bakımda kullanılacak yedek parçalar gerekli zamanda ve yeterince bakım yerinde bulundurulmalıdır. Bunun sağlanması lojistik destekle mümkündür.

Bakımların planlandığı biçimde gerçekleşmesine olanak sağlayacak yedek parçalara ilişkin lojistik destek, amaçlar doğrultusunda oluşturulmuş bir stok politikası izlenmesini gerektirmektedir. Bu gerekçeyle stoklanacak yedek parçaların ilk satın alma (veya imal etme) nicelikleri, stok düzeyleri, stok yenileme noktaları ve nicelikleri bazı etmenlere göre belirlenmektedir; Bu etmenler arıza oranları, birim satınalma (veya imal etme) maliyetleri, stok yenileme maliyetleri, depolanma süresi ve yedek parçaları elde tutma maliyeti olarak sıralanabilir (41).

Temelde yedek parçalara ilişkin stok politikasının belirlenmesinde güvenilirlik fonksiyonundan yararlanılabilir. Bu ya-

---

(41) LANDERS, s. 431.

rarlanma, güvenilirlik fonksiyonlarından hareketle planlama dönemindeki arızalı parça sayılarının kestirimiyle mümkün olmaktadır. Böylece zaman boyutunda gerekli yedek parça sayılarına ilişkin veriler mevcut olduğunda, geleceğe dönük yedek parça istekleri olasılıklı bir yaklaşımla kestirilerek, tutarlı bir stok politikası oluşturulabilecektir (42).

### 3- Lojistik Desteğin Rastnal Niteliği

Lojistik desteğin öğelerine olan gereksinimleri belirlilik ortamında saptamak çoğunlukla olanaksızdır. Bu nedenle soruna çözüm bulmak için rastnal bir yaklaşım yapılmalıdır. Söz konusu rastnal yaklaşıma gereksinme sistem ve çevresinden ileri gelmektedir; Bunlar aşağıda ele alınmıştır.

#### A- Sistem Açısından

Lojistik desteğin sistem açısından rastnal niteliği, sistemdeki arızaların rastnal nitelikte oluşundan ileri gelmektedir. Bu konudaki ayrıntılı incelemeler "Güvenirlilik Çözümlemesi" başlığı altında daha önce ~~ele alınmıştır.~~

---

(42) R.G.BROWN, Statistical Forecasting for Inventory Control, McGraw-hill Book Company, New York, 1959, s.81.

Sistemin geçmiş dönemlerdeki arızalanmalarına ilişkin olasılık yoğunluk fonksiyonları belirlenebilirse, belli bir güven derecesine göre tezgah ve donatılar, insan gücü ve özellikle yedek parçaya ilişkin istek kestirimleri yapılabilir (43).

#### B- Çevre Açısından

Lojistik desteğin rastnal niteliği çevreden de ileri gelmektedir. Bunun nedeni, etken çalışması amaçlanan sistemin gerçekte bir insan-makine sisteminin alt-sistemi olmasıdır. Bunun sonucunda en azından bazı rastnal niteliklere sahip olarak insan devreye girmektedir. Bakımla görevli bir insanın bile her olay karşısında aynı davranışı gösterememesi, lojistik desteğe rastnal nitelik vermektedir.

Ayrıca sistemin içinde bulunduğu çevrenin açık sistem olma zorunluluğu, onun diğer sistemlerle de etkileşimini gerektirecektir. Bunun sonucunda diğer sistemlerdeki ve çevredeki rastnal olaylar, sistem için gerekli lojistik desteğe rastnal nitelik kazandıracaktır.

---

(43) M.K.STARR-D.MILLER, Inventory Control: Theory and Practice Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1962, s. 20.

#### 4- Lojistik Desteğin Maliyeti

Bakımların yapılmasında gerek duyulan lojistik desteğin sistemin içinde bulunduğu işletmeye bazı maliyetler yükleyeceği açıktır. Söz konusu maliyetleri iki grupta ele almak mümkündür; Bunlar lojistik desteğin elde bulundurulma ve bulundurulmama maliyetleridir.

Lojistik desteğin elde bulundurulma maliyeti daha ziyade yedek parçalar için söz konusu olmaktadır; Stoklarda tutulacak yedek parçaların depo maliyetleri, sigorta giderleri, bozuşma (deterioration) gibi nedenlerden işletmeye yükleyeceği maliyetler vardır. Bu maliyetler birim zamandaki birim parçanın stok maliyeti olarak ele alınmaktadır.

Tezgahlar ve insan gücü için de fazla karşılaşılmamakla birlikte, elde bulundurulma maliyetleri söz konusu olabilir. Bu maliyetler söz konusu öğelerin bakım bölümü dışından sağlandığından ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte bu tür maliyetler sabit niteliktedir.

Lojistik desteğin elde bulundurulmama maliyeti, gerekli öğelerin bazılarının veya tümünün yetersizliği nedeniyle sistemin işleme konulamaması sonucu ortaya çıkan maliyetlerdir. Bu maliyetlerin nedeni, sistemin bakımının zamanında gerçekleştirilememesi sonucu bu süredeki işletimde sağlayacağı yararları işletmenin elde edememesidir. Sonuçta kaybedilen yararlar işletme için maliyet olarak ortaya çıkmaktadır.

- 57 -

Yukarıda ele alınan maliyetlerin bir kısmı sabit, kalan kısmı ise değişken nitelikte olabilir. Ancak bu çalışmada değişken maliyetler ele alınacaktır.

- 58 -

Yukarıda ele alınan maliyetlerin bir kısmı sabit, kalan kısmı ise değişken nitelikte olabilir. Ancak bu çalışmada değişken maliyetler ele alınacaktır.

Yükseköğretim Kurulu Başkanlığı  
Eğitim Araştırma ve Geliştirme Genel Müdürlüğü

### ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

ANAHTAR DİZEL LOKOMOTİF TEKERLEKLERİNİN  
BAKIM PLANLAMASI

## I- SORUNUN TANIMI VE ÇÖZÜMLEMESİ

### 1- Anahat Dizel Lokomotif Tekerleklerinin Bakım Sorununun Tanımı

Günümüz ekonomisi ulaştırma sektörüne bağımlı durumdadır. Sözkonusu ulaştırma sektöründe ise demiryolu ulaştırmacılığı büyük bir yer tutmaktadır (1). Özellikle demiryolu birim taşıma maliyetlerinin karayolu taşımacılığına göre daha az olması, demiryollarının önemini daha da arttırmaktadır.

Demiryolu taşımacılığının en önemli öğelerinden birisi lo-

---

(1) D.F.PEGRUM, Transportation: Economics and Public Policy, Richard D.Irwin, Inc., Homewood, Illinois, 1963, s. 31-32.

komotifdir. Buhar, petrol veya elektrik enerjisiyle çalışan lokomotiflerden yurdumuzda ençok kullanılan ve aynı zamanda üretimi yapılabilen türü " Anahat Dizel Lokomotif " leridir. Eskişehir Lokomotif ve Motor Sanayii Müessesesi (ELMS) tarafından yapılan üretimle yurdumuz lokomotif (2) gereksinmesinin ancak bir kısmı karşılanabilmektedir. Bu durumda mevcut lokomotiflerden koşulların elverdiğince eniyi şekilde yararlanmak, yurdumuzun kıt kaynaklarını değerlendirmek açısından kaçınılmaz bir gerçek olmaktadır.

Lokomotiflerden yeterince yararlanmak, onların koruyucu ve arıza giderici bakımlarını zamanında ve gerektiği şekilde yapmakla mümkündür. Bakım işlevinden sorumlu kişiler için koruyucu bakım planlamasında önemli bir sorun ortaya çıkmamaktadır. Çünkü, koruyucu bakımlar tasarım sırasında belirlendiği şekilde yapılmaktadır. Buna karşın arızalar restnal nitelik taşıdığından, bunları giderici bakımların yapılış zamanları hakkında belirlilik ortamında karar verilememektedir. Bağlı olarak, lokomotiflerin rasyonel bir şekilde kullanılması ve böylece gerekli faydanın yeterince sağlanabilmesi için,

---

(2) Çalışmanın bundan sonraki kısmında " Anahat Dizel Lokomotif" i yerine yalnızca "lokomotif" denilecektir.



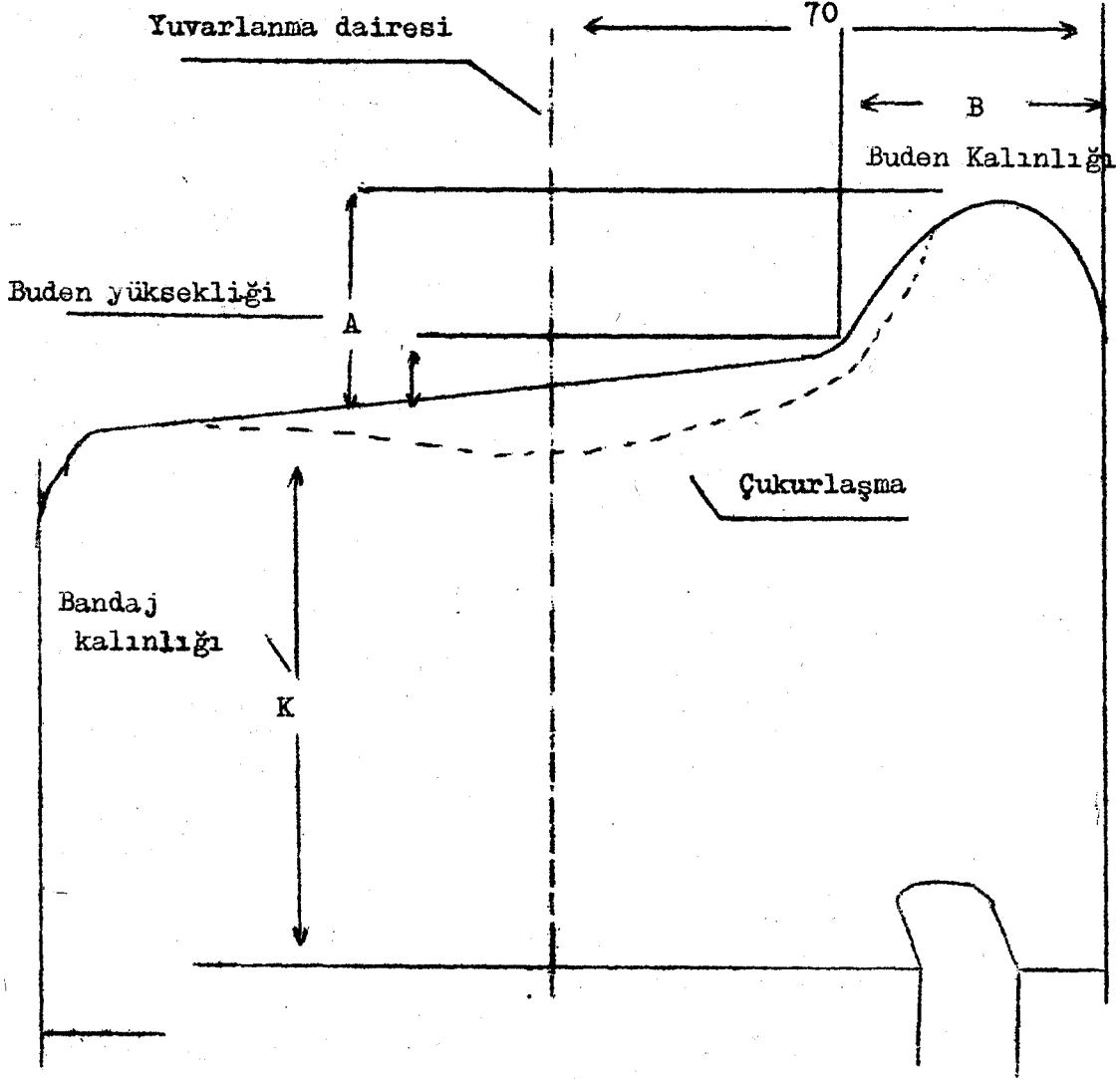
arıza giderici bakım planlaması, arızaların rastnal niteliği gözönüne alınarak yapılmalıdır.

Lokomotiflerin bakım planlamasının olması gerektiği şekilde eniyi yapılabilmesi, ancak ve ancak rastnal nitelikte arızaları sözkonusu olabilen tüm parçaların gözönüne alınıp, bu çalışmanın önceki bölümlerinde belirtilen genellemeler doğrultusunda yapılacak yaklaşımlarla mümkündür. Araştırmamızda bakım planlamasında matematiksel model kullanımını örneklemek amaçlandığından, lokomotif tekerleklerinin "Bandaj Aşınması" ismi verilen arızası ele alınarak, bakımın planlamasına rastnal yaklaşım yapılacaktır. Bu amaçla, planlama dönemi için arızalı lokomotif sayılarının kestirimi yapılarak, bakımlar planlanacak ve bu planlamaya gereği olan lojistik desteğin nitelik ve nicelikleri belirlenecektir. Daha sonra, sorunun çözümü için simgesel olarak geliştirilecek karar ve kestirim modellerinin sayısal çözümleri yapılacaktır.

Yukarıdaki açıklamalar ışığında ele alınacak sorun şu şekilde tanımlanabilir:

Şekil 5' de bandaj kesiti görülen lokomotif tekerlekleri kullanıldıkça aşınan parçalardır. Tekerleklerdeki bu aşınma sonucunda bandaj kalınlığı 75 milimetreden 35 milimetreye inerek işletim sınırı dışına çıkmaktadır. Öte yandan, aşınmalar, gidilen yolun niteliği, lokomotifin çektiği yükün ağırlığı ve hava koşulları nedeniyle rastnal bir nitelik göstermektedir. Bu nedenle, karar vericiler hangi dönemlerde kaç adet lokomo-

T C D D	BANDAJ SINIR ÖLÇÜLERİ	İzahname No: 213-8 Sayfa adedi: 6 Sayfa No : 4
---------	-----------------------	--



	A	B	C	D
Esas Ölçü	28.25	33 <sup>(+)</sup>	0	75
İşletme Sınır Ölçüsü	Azami 36 Asgari 25	26	2	Frenli 35 Frensiz 25

(+) Bu ölçü normal profil içindir. Esas konstrüksiyonda budeni ince olan bandajlarda asgari buden kalınlığı 5 mm. buden aşınmasına tekabül edecek şekilde bulunur.

Şekil 5: Dizel Lokomotif Tekerlek Bandaj Kesiti ve İşletme Sınır Ölçüleri

tifin yukarıda tanımlanan arıza sonucunda bakıma geleceğini bilememektedir. Gerçekte arızaların ortaya çıkış zamanlarına ilişkin olasılık yoğunluk fonksiyonundan hareketle, planlama dönemindeki zaman birimlerinde arızalanabilecek lokomotif sayılarının beklenen değerlerini bulmak mümkündür. Böylece söz konusu beklenen değerler elde edilerek, lokomotif tekerleklerinin bakım planlaması güvenilirlik ve bakım yapılabilirlik kısıtları da gözönünde bulundurulmak koşuluyla hazırlanabilir. Böylece bakımların gerçekleştirilmesi için gerekli kaynakların nitelik ve nicelikleri de bulunabilecektir. Bu açıklamalar doğrultusunda ele alınan sorunun çözümü için kestirim ve karar modelleri geliştirilerek bunların sayısal çözümü bulunacak, sonuçlar değerlendirilecektir. Lokomotifin diğer parçalarında karşılaşılabılır arıza türleri için yapılacak bakım planlamalarında da benzer yaklaşımın uygulanabileceği açıktır.

## 2- Güvenirlilik Çözümlemesi

### A- Geçmiş Dönemlerde Bandaj Kalınlığının Azalması

#### Şeklinde Ortaya Çıkan Arızaların İncelenmesi

Lokomotif tekerleklerinde ortaya çıkan bandaj aşınması şeklindeki arızaların incelenmesi için Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) 1. İşletme Eskişehir Deposunda bulunan 32 lokomotif üzerinde çeşitli zamanlarda yapılan ban-

daj kalınlık ölçüleri elde edilmiştir. Bu ölçülerden hareketle bandaj kalınlığının 1 milimetre aşınmasına neden olan yol miktarları hesaplanmıştır. Buna ilişkin 1902 adet gözlem sonucu Ek: 1'deki tabloda verilmiştir. Bu verilerden hareketle bakım planlaması için geliştirilecek modellerin sayısal çözümü gerçekleştirilecektir.

### B- Arızalarla İlgili Parametrelerin Kestirimi

Lokomotif tekerleklerinde bandaj aşınması ismi verilen arızaların ortaya çıkış zamanlarına ilişkin olasılık yoğunluk fonksiyonunun ve diğer ilgili parametrelerin kestirimini aşağıda açıklandığı şekilde yapılabilir.

Bandaj aşınmasının ortaya çıkış zamanlarının olasılık yoğunluk fonksiyonunun rastnal değişkeni

$Z$ , bir tekerleğin bandaj kalınlığında 1 milimetre azalma meydana getiren yol miktarı

olarak tanımlanmıştır. Sözkonusu rastnal değişkenin değer kümesi,  $Z_{ü}$ , 1 milimetrelilik aşınmanın mutlak ortaya çıkacağı uzaklık olmak üzere,

$$0 < Z \leq Z_{ü} \quad (1)$$

olarak belirlenmiştir. Buna göre,

$f(Z)$  = Çalışan bir tekerlekteki bandaj aşınmasını ortaya çıkaran yol miktarlarının olasılık yoğunluk fonksiyonu olacaktır.

Yukarıda tanımlanan olasılık yoğunluk fonksiyonunun belirlenebilmesi, dağılımın parametrelerinin kestirim değerlerinin hesaplanmasıyla mümkündür. Dağılımın parametre değerlerinin kestirimi ise, ikinci bölümün ilk kesiminde açıklanan yöntemlerden yararlanarak yapılabilir. Böylece arızalara ilişkin olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(Z; \theta_i)$  elde edilecektir.

Arızalarla ilgili diğer parametreler, önceden belirlenen uzaklıklara bağlı olan güvenirlilik değerleridir.  $Z_m$ , tekerleğin planlama döneminin başından itibaren gittiği yol iken, gidilen yolun sonunda tekerleğin güvenirliliği,

$$R(Z_m) = \int_{Z_m}^{Z_u} f(z; \theta_i) dz \quad (2)$$

integraliyle bulunur. Bu ifade yardımıyla, planlama dönemine ilişkin tekerleğin güvenirlilik değerleri elde edilebilir. 12 adet tekerleğe sahip bir lokomotifin güvenirliliği ise, sistemin seri yapısı nedeniyle

$$R_s(Z_m) = [R(Z_m)]^{12} \quad (3)$$

olacaktır.

Görüldüğü gibi rastnal değişken, buna bağlı olasılık yoğunluk fonksiyonu ve bakım planlamasına dönük diğer ilgili pa-

rametreler, lokomotifin gittiği yol miktarına bağlı olarak tanımlanmış ve türetilmişlerdir. Açıkta ki, lokomotiflerin birim zamanda katettikleri yol belirlendikten sonra, yukarıdaki tüm tanımlama ve gösterimler zamana bağlı olarak da yapılabilir.

### 3- Bakım Yapılabilirlik Çözümlemesi

Bandaj aşınması sonucu arızalanan lokomotif tekerleklerinin bakım planlamasına ilişkin geliştirilecek matematiksel modellere veri sağlamak amacıyla güvenilirliğin yanısıra bakım yapılabilirlik çözümlemesi de gerekmektedir.

#### A- Bakım Yerlerinin İncelenmesi

TCDD'nin bakım yerleri ve buralardaki donanım çoğunlukla buharlı lokomotiflere göre yapılmış durumdadır. Bununla birlikte TCDD Genel Müdürlüğüne bağlı bakım fabrikalarında dizel lokomotif bakımları için ileri düzeyde geliştirilmiş tezgahlardan da yararlanılmaktadır.

Bu çalışmada inceleme konusu olan bakım işleri ELMS' de gerçekleştirilmektedir. Söz konusu kuruluştaki ise bandaj değiştirme işlemi için yeterli olanaklar bulunmaktadır.

## B- İzlenen Bakım Politikasının İrdelenmesi

Bakım politikasının izlenmesinde gözlenen en önemli eksiklik yönetimden ileri gelmektedir. Hangi dönemde, kaç adet lokomotifin bakıma alınması gerektiği konusunda yönetim tarafından hiçbir kestirim yapılmamaktadır. Bu konuda bütünüyle belirsizlik ortamında karar verilmekte, arıza ortaya çıktığında giderilmesi için çaba harcanmaktadır. Bu nedenle ileriye dönük olarak alınacak önlemler konusunda gerekli ve yeterli çalışmalar yapılamamaktadır. Sonuçta ise bazen gerektiğinden fazla kaynak harcanmakta, bazen de kaynak yetersizliği nedeniyle bakımın aksamasına yol açılmaktadır.

## C- Bakım Yapılabilirliğin Belirlenmesi

Eldeki teknik olanaklarla tekerlek bandajı arızalı bir lokomotifin bakımı bir haftada kesinlikle gerçekleştirilebilmektedir. Bu olanaklar ve yöneticinin genel tutumları doğrultusunda, bakıma gelen bir lokomotifin bandaj değişikliğinin bir haftada yapılması öngörülmektedir. Sonuç olarak, bir lokomotifin bandaj değişikliği şeklindeki bakımının bir haftada gerçekleştirilme olasılığının, başka bir deyişle bakım yapılabilirliğinin 1'e eşit olduğu ortaya çıkmaktadır. Çalışmanın izleyen kesimlerinde, lokomotif tekerleklerinin bandaj aşınması arızalarının giderilmesi, başka bir deyişle aşınan bandajların yerlerine yenilerinin takılması için yapılacak bakım planlaması hafta temeline göre sürdürülecektir.

#### D- Bakımla İlgili Parametrelerin Kestirimi

Bandaj aşınması isimli arızanın giderilmesi için gerekli bakımla ilgili en önemli parametre bir lokomotifin bakımının gerçekleştirildiği süredir. ELMS Bakım Fabrikası yetkililerinin belirttiklerine göre bu sürede herhangi bir sapma olmamaktadır.

Bandaj değiştirmesi 6 operatör tarafından gerçekleştirilmektedir. Ancak eldeki tezgahlardan günün 24 saatinde de yararlanmak mümkün olduğundan yeni, bakım ekipleri oluşturularak bakım bölümü iki veya üç vardiya olarak da çalıştırılabilir. Bu vardiyaların günün hangi saatlerinde olacağı yönetim tarafından işletme koşullarına göre belirlenebilir.

#### 4- Maliyet Parametreleri

Lokomotif tekerleklerinin bandaj aşınması arızasını giderecek bakımın planlamasında gözönüne alınacak maliyetler şu şekilde sıralanabilir:

- Bandaj aşınması arızası nedeniyle bakıma gelen lokomotifler bakım için bekleme nedeniyle servisten alıkonmuş olacaktır. Bu bekleme ise TCDD'ye belli bir maliyet yükleyecektir. Bakım planlaması hazırlanırken, sözkonusu maliyetin gözönünde tutulması gerekmektedir.



## II- KESTİRİM VE KARAR MODELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

### 1- Modellerin Varsayımları

Lokomotif tekerleklerinde ortaya çıkan bandaj aşınması şeklindeki arızaların bakım planlamasına dönük geliştirilecek kestirim ve karar modelleri için sistemin davranış ilkeleri gözönüne alınarak aşağıdaki varsayımlar sıralanmıştır:

i- Uygulama denemesi için ele alınan sistem, lokomotifin bojisi (tekerlekler, dingiller ve şaşıden oluşan kısım) olup, gerçekte lokomotifin bir alt-sistemidir.

ii- Lokomotifin bojisi, lokomotif kullanıldığı sürece serviste kalmaktadır.

iii- Bojinin koruyucu bakımı çeşitli parçaların yağlanması şeklinde olmakta ve bu işlemler yapımçı kuruluşun (ELMS) belirlediği şekilde gerçekleştirilmektedir.

iv- Lokomotif tekerleklerinde görülen ve bandaj aşınması ismi verilen arızaların ortaya çıkış zamanları rastnal nitelik taşımaktadır.

v- Lokomotif tekerleklerinin bandaj kalınlıkları her hafta ölçülerek, ölçülerin işletme sınırı dışına çıkıp çıkmadığı kontrol edilmektedir.

vi- Lokomotif tekerleklerinin bandaj değiştirilme işlemi ELMS tarafından gerçekleştirilmektedir.

vii- Ele alınan sistem 12 tekerlekten oluşmakta ve herhangi bir tekerlekte ortaya çıkan arıza sistemin tümünün işletimden alıkonulmasına neden olmaktadır.

viii- Bakımlar için gerekli lojistik desteğe yönetim tarafından tezgah ve donanımlar dışında bir üst limit konulmamaktadır.

ix- Herhangi bir lokomotifin güvenilirliği 0,50'nin altına düştüğünde, sözkonusu lokomotif derhal bakıma alınmaktadır.

x- Bakım planlaması yapılan tüm lokomotif bojileri yeni olarak servise alınmaktadırlar.

xi- Bakım planlaması dönemi erken arızalar döneminin bitişinden sonra başlamaktadır.

xii- Bakıma gelen lokomotifler bir bekleme hattı oluşturmakta, bağlı olarak ilgili tüm maliyetler servis ve bekleme süresi ile doğru orantılı olmaktadır.

xiii- Bakıma gelen lokomotiflerin servise alımı ilk gelen ilk çıkar servis düzenine göre olmaktadır.

xiv- Lokomotiflerin arıza giderici bakım planlaması haftada temeline göre yapılmaktadır.

xv- Servis sistemindeki ikinci ve üçüncü vardiyalar yeni servis kanalları olarak kabul edilmektedir.

Lokomotif tekerleklerinin bakım planlaması sorununa yukarıda sıralanan varsayımlar altında çözüm aranacaktır. Bu amaçla önce planlama dönemindeki devreler için arızalı lokomotif sayılarının beklenen değerlerinin bulunması, daha sonra da buna göre bakıma ayrılacak kaynakların belirlenmesi gerekmektedir. Söz konusu gereksinimler geliştirilecek kestirim ve karar modelleriyle karşılanabilir.

## 2- Planlama Döneminde Beklenen Arızalı Lokomotif Sayısının Kestirimi İçin Markov Modeli

Lokomotif tekerleklerinin bandaj aşınması arızalarının bakım planlaması için yapılacak ilk işlen, planlama dönemindeki haftalarda ortaya çıkabilecek arızalı lokomotif sayılarının kestirimidir. Lokomotif tekerleklerinin arızalanma açısından bir devre sonraki davranışı yalnız şu anda bulunduğu duruma bağlı olduğundan, inceleme konusu olan süreç Markov süreci niteliği taşımaktadır (3). Bu nedenle arızalı lokomotiflerin beklenen sayılarının kestirimi için bir Markov modeli geliştirilecektir.

---

(3) İmdat KARA, "Rastnal Süreç Olarak Markov Zincirleri", ESADER, Cilt xv, Sayı:2, Haziran 1979, EİTİA Yayını, s.175-195.

### A- Markov Yaklaşımı Hakkında Genel Bilgiler

Bandaş aşınması sonucu arızalanan lokomotiflerin beklenen sayılarının kestirimi için Markov modelinin geliştirilmesinden önce sözkonusu yaklaşımı gerektiren rastnal süreç açıklanmalıdır.

$Y(t)$ ,  $t$  parametresine göre arızalı lokomotif sayısına ilişkin değerler alan rastnal bir değişken iken,

$$\{Y(t) / t \in T\} \quad (4)$$

kümesi sonsuz terim taşırsa, ilgilenilen olay bir rastnal süreç oluşturur, denir (4). Bu şekilde tanımlanan rastnal süreç, parametre ve durum uzayları açısından dörde ayrılmaktadır. Çalışmamızda ele alınan rastnal süreç ise parametre ve durum uzayı kesikli sınıfına girmektedir.

Yukarıda tanımlanan rastnal sürecin başlangıç durumuna göre olabileceği durumların kestirimi bu amaçla geliştirilen bir matematiksel modelle mümkündür. Bu modelin yapısı, planlama döneminin zaman boyutuna göre değerler alan  $Y(t)$ -nin özelliğine bağlıdır. Bu sebeple,  $Y(t)$ 'nin bir devre sonra alabileceği değer, şu anda almış olduğu değere bağlı olduğu için, ilgilenilen olay bir Markov süreci oluşturmaktadır.

---

(4) İmdat KARA, a.g.m.

Beklenen arıza sayılarının kestiriminde Markov yaklaşımının yapılabilmesi için sonlu sayıda durumu olan Markov zincirinin tanımlanması gerekmektedir (5).

Çalışmamızda ele alınan ve Markov süreci niteliğini taşıyan olayın durum uzayı,

$$H = \{1, 2, 3, \dots, B\} \quad (5)$$

cümlesinden oluşmaktadır. Bu cümledeki "B" elemanı, arızalar veya güvenilirlik limiti dışına çıkan bir lokomotifin bakımda olma durumunu, diğer elemanlar ise çalışan bir lokomotifin bakımından sonraki işletim haftalarını göstermektedir. Bu bilgiler ışığında, beklenen arızalı lokomotif sayılarının kestiriminde yararlanılacak geçiş olasılıkları matrisi belirlenecektir.

#### B- Geçiş Olasılıkları Matrisinin Belirlenmesi

Planlama döneminde beklenen arızalı lokomotif sayısının kestirimi için bu aşamada geçiş olasılıkları matrisinin belirlenmesi gerekmektedir. Söz konusu geçiş olasılığı,  $\{Y(t)/t \in T\}$  Markov Zincirinde, t-anında lokomotif i'inci durumda iken, izleyen devre j'inci durumda bulunma olasılığı, bir devre geçiş olasılığı olarak tanımlanmakta ve

$$P_{ij}^{t, t+1} = P \{ Y(t+1) = j / Y(t) = i \} \quad (6)$$

---

(5) Ayrıntılı bilgi için bakınız: Frederick S.HILLIER-Gerald J.LIEBERMAN, Introduction to Operations Research, 6. Baskı, Holden-Dany Inc., San Fransisco, 1970, s.404.

şeklinde gösterilmektedir. (6) no.lu ifadede görüldüğü üzere geçiş olasılığı koşullu olasılıktır. Bu tanımdan hareketle geçiş olasılıkları matrisi aşağıdaki şekilde tanımlanabilir;

Geçiş olasılıkları geçiş zamanına bağlı olmayan(durağan) ve durum uzayı  $H (1,2,\dots,B)$  olan bir  $\{Y(t)\}$  Markov Zincirinde  $P\{Y=j/Y=i\}=P_{ij}$  olmak üzere,

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & \dots & B \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ B \end{matrix} & \left[ \begin{array}{cccc} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1B} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2B} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{B1} & P_{B2} & \dots & P_{BB} \end{array} \right] \end{matrix}$$

matrisinin bir devre geçiş olasılıkları matrisi denir. Yukarıda belirlenen matrisin  $i$ 'inci satırındaki değerler,  $i$  durumundaki bir lokomotifin bir devre sonunda bulunabileceği durumların koşullu olasılık dağılımıdır. Bu nedenle her satırdaki olasılıklar toplamı bire eşittir.

$\{Y_n\}$  Markov zincirinin durumları  $1,2,\dots,B$  endisleri ile gösterilen geçiş olasılıkları matrisinden yararlanarak,  $n$ -devre geçiş olasılıkları matrisi elde edilir (6). Söz konusu matrisi oluşturan  $n$ -devre geçiş olasılığı,  $k$ 'inci devre  $i$ 'inci durumda olan rastnal değişkeninin,  $n$  devre

---

(6) İmdat KARA, a.g.m.

sonra j'inci durumda bulunma olasılığı olarak tanımlanmakta ve,

$$P_{ij}^{(n)} = P \{ Y_{k+n} = j / Y_k = i \} \quad i, j = 1, 2, \dots, B., n \geq 1 \quad (7)$$

şeklinde gösterilmektedir. Bu değerlerin elde edilmesi, n fazla büyük olmadığı durumlarda, doğrudan matris çarpımıyla mümkündür.

### C- Arızalı Lokomotif Sayısının Kestirimi

Planlama dönemindeki her devre için beklenen arızalı lokomotif sayısının kestirimi n devre geçiş olasılıkları matrisinden yararlanılarak yapılabilir. Ancak arızalı lokomotif sayısının kestiriminde n-devre geçiş olasılıklarının yanısıra, planlama döneminin başlangıcındaki lokomotif sayılarının durum uzaylarına göre sayılarının bilinmesi gerekmektedir. Söz konusu sayılar

$$L = (L_1, L_2, L_3, \dots, L_B) \quad (8)$$

satır matrisiyle gösterildiğinde, n'inci devredeki lokomotiflerin bakımdan sonraki yaşlarda ve bakımda oluşlarına göre sayıları

$$E_n(Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_B) = [L_1, L_2, L_3, \dots, L_B] P^n \quad (9)$$

matris çarpımı ile elde edilecektir.

### 3- Bakım Planlamasında Karar Modeli

Tekerleklerindeki bandaj aşınması sonucu arızalanarak bakıma gelen lokomotiflerin bakımının kısa bir sürede gerçekleştirilmemesi ve bu sırada başka lokomotiflerin ba-

kıma gelebilmeleri nedeniyle bakımın gerçekleştirildiği serviste bir kuyruk (veya bekleme hattı) oluşması sözkonusu olacaktır. Bu nedenle çalışmanın bu kısmında kuyruk kuramı hakkında genel bilgiler verilerek, çalışmanın amaçları doğrultusunda bir kuyruk modeli geliştirilecektir.

Kuyruk kuramı kuyrukların veya bekleme hatlarının matematiksel olarak incelenmesini içermektedir(7). Sözkonusu kuyruklar servis için gelenlerin veya servisi gerçekleştirecek makina ve işçilerin beklemek zorunda olduklarında ortaya çıkmaktadır (8). Bu şekilde kuyruk oluşan sistemlerin belirlenen amaçlar doğrultusunda eniyilenmesi Yöneylem Araştırması yaklaşımıyla mümkündür. Bu nedenle kuyruk oluşan sistemler için aşağıdaki genel tanım yapılmıştır (9):

"İstem, bekleme hattı ve servise alım kuralı, servis ve olgu gibi dört öğeden oluşan her insan-makina bileşimine servis sistemi denir".

Çalışmamızda söz konusu olan servis sistemi aşağıdaki şekilde ele alınabilir:

Lokomotif bandaj bakım servisi dört temel öğeden oluşmaktadır. Bunlar;

- 
- (7) HILLIER-LIEBERMAN, a.g.k., s.275.  
(8) Russell L.ACKOFF-Maurice W.SASIENI, Fundamentals of Operations Research, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1968, s.249.  
(9) İmdat KARA, Servis Sistemleri ve Gelişler Zamana Bağlı Olduğunda Kapasite Sorununa Matematiksel Yaklaşım, EİTİA Yayını, Eskişehir, 1976, s.10.

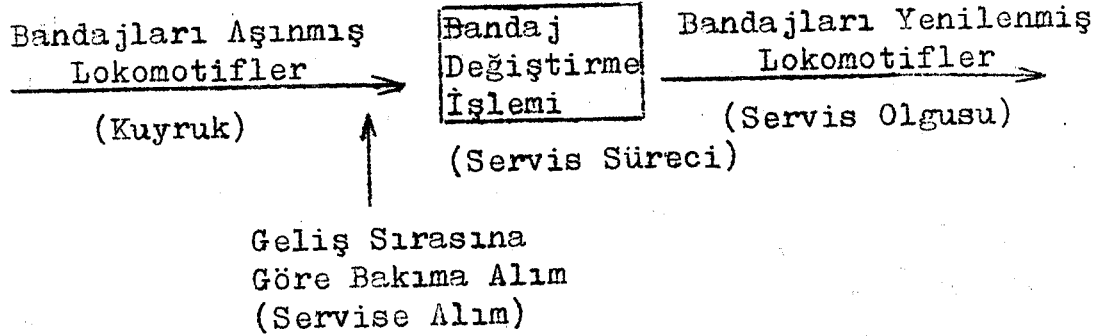


- Tekerlek bandaj kalınlıkları işletim sınırı dışına çıkan lokomotifler,

- Arızalı lokomotiflerin bandaj değişikliği için bakım servisine geldiğinde oluşturduğu kuyruk,

- Aşınan bandajların sökülerek yerlerine yenilerinin takılması,

- Aşınan bandajları değiştirilmiş lokomotifler olarak ifade edilmiştir. Bu öğelere göre çalışma konusu edilen servis sistemi Şekil-6'de görülmektedir.



Şekil:6 Lokomotif Bandaj Değişirme Servis Sistemi

Ögeleri bu şekilde belirlenen lokomotif bandaj değiştirme servis sisteminin eniyilenmesi veya yönetimde konulan amacına ulaşılması zorunludur. Bu çalışmada kuyruk kuramı açısından ele alınan amaç lokomotiflerin kuyruktaki beklemesinin ve bakım için tahsis edilecek kaynakların işletmeye yükleyeceği toplam masrafın enküçüklenmesidir. Toplam masrafı enküçükleyen karar değişkenlerinin bulunması sonucunda lokomotif bandaj değiştirme işlemi yapan servis sistemi eniyilenecek işletme amacına uygun bakım planlaması gerçekleştirilebilecektir.

### A- Kuyruk Modelleri

Tekerleklerindeki bandaj aşınması sonucunda arızalanan lokomotifler bakım yerinde bir kuyruk oluşturmaktadır. Bu nedenle söz konusu servis sisteminin eniyilenmesi için soruna dönük bir kuyruk modeline gereksinme vardır. Servis sisteminin içinde bulunduğu durumun koşullarına göre aşağıda açıklanan kuyruk modelleri bakım planlamasında karar vericiye yol gösterecektir. Karar verici bu modellerden kendi servis sistemi için uygun olanını seçecektir.

Aşağıda açıklanacak kuyruk modellerindeki karar değişkenleri, parametreler ve maliyet parametrelerinin simgesel gösterimi ve açıklamaları toplu olarak şöyledir (10):

L: Servis sisteminde oluşan kuyruktaki birim sayısı.

K: Servis sisteminde hizmet veren birim (veya kanal) sayısı; Durumun koşullarına göre parametre veya karar değişkeni olur.

$\mu$ : Ortalama servis oranı; Karar değişkeni veya parametre olur.

$\lambda$ : Servis sistemine girecek birimlerin ortalama geliş oranı.

$C_b$ : Bakıma gelen bir sistemin birim zaman bekleme maliyeti.

$C_K$ : Bakım için ek kapasite yaratmanın marjinal maliyeti.

---

(10) HILLIER-LIEBERMAN, a.g.k. S.332-333.

$B(C)$ : Birim zamanda beklenen toplam maliyet.

Yukarıda sıralanan parametre ve karar değişkenleri yardımıyla sorunun çözümü için uygun olabilecek kuyruk modelleri şu şekilde açıklanabilir:

i- Model 1)  $K$ 'nin karar değişkeni  $\mu$  ve  $\lambda$ 'nin parametreye olduğu durumlar içindir. Amaç fonksiyonu

$$B(C) = KC_k + LC_b \quad (10)$$

şeklindedir. Bu fonksiyonun yardımıyla bulunacak toplam maliyeti enküçükleyecek karar değişkeni  $K$ 'nin değeri araştırılacaktır.

ii- Model 2)  $\mu$  ve  $K$ 'nin karar değişkeni olduğu durumlar içindir. Parametreler  $\lambda$ ,  $\xi(\mu)$  ve  $W$ 'dir. Bu parametrelere,

$\xi(\mu)$  = Ortalama bakım oranı  $\mu$  olduğunda, hizmet veren birimin marjinal maliyeti,

$W$  =  $\mu$ 'nin alabileceği elverişli değerler kümesi olarak tanımlanmıştır.

Amaç fonksiyonu,  $\mu$ 'nün alabileceği değerler dahilinde,

$$B(C) = K\xi(\mu) + C_b L \quad (11)$$

şeklindedir. Bu fonksiyonu enküçükleyen  $K$  ve  $\mu$  değerleri araştırılacaktır.

Tekerleklerindeki bandaj aşınması sonucu bakıma gelen lokomotiflerin oluşturacakları kuyruk nedeniyle or-

taya, çıkan karar sorunu, açıklanan modellerden uygun olanı yardımıyla çözülebilir. Öte yandan bu iki model dışındaki bazı da kalan bazı modeller de vardır. Ancak ele alınacak servis sisteminde K ve/veya  $\mu$  karar değişkeni olabileceğinden, diğer modellere bu çalışmada yer verilmemiştir.

B- Uygun Kuyruk Modelinin Seçimi ve Eylem Seçeneklerinin Belirlenmesi

a- Kuyruk Modelinin Seçimi

Bandaj aşınması nedeniyle bakıma gelen lokomotiflerin oluşturacağı kuyruk sonucu ortaya çıkan bekleme hattı sorununun çözümü için kuyruk kuramından yararlanmak gerekmektedir. Ancak sorunun kuyruk kuramı yardımıyla çözümü için uygun bir model seçilmelidir.

Servis sisteminin içinde bulunduğu durumun koşulları birinci modelin seçimini öngörmektedir. Bunun nedeni, bakımda yararlanılan makinelerin servis oranlarının sabit oluşudur. Ancak ikinci ve üçüncü vardiyaların oluşturulması mümkündür ve sözkonusu vardiyalar servis sisteminde yeni servis kanalları olarak ele alınabilir.

b- Eylem Seçeneklerinin Belirlenmesi

Lokomotif tekerleklerinin bandaj aşınması arızalarına dönük bakım planlaması için geliştirilecek modele temel olacak eylem seçenekleri, servis sisteminin bir, iki veya üç vardiya şeklinde çalışmasıdır. Sözkonusu eylem seçenekleri kuyruk kuramı açısından bir, iki veya üç adet servis kanalına karşı gelmektedir. Yöneticiler sistemin a-

maçları doğrultusunda en uygun eylem biçimini seçerek bakım planlamasını gerçekleştirebileceklerdir.

#### D- Karar Modelinin Yazılımı

Lokomotif tekerleklerinin bakımından sorumlu ELMS yöneticilerinin lokomotiflerin bakım için beklemesi sorununun çözümünü bilimsel olarak elde etmesi ve böylece alınan kararların tutarlılığı ve uygulanabilirliğinin sağlanması geliştirilecek olan karar modeli ile mümkündür. Bu amaçla geliştirilecek olan karar modeli değişkenleri ve parametrelerle ifade edilen kısıtlayıcılar ve amaç fonksiyonundan oluşacaktır.

Tekerleklerin bakım planlaması için geliştirilecek modelin karar değişkeni

K, Bandaj değiştirilmesini gerçekleştirecek sistemdeki servis kanalı sayısı (veya sisteminin çalışacağı vardiya sayısı)

olacaktır; Modelin parametreleri ise

$\mu$ , bandaj değiştirme sisteminin haftalık ortalama bakım oranı;

$\lambda$ , arızalanan lokomotiflerin haftalık ortalama geliş oranı;

$C_k$ , lokomotif tekerlekleri bandaj değiştirme sisteminin kanal sayısına göre haftalık marjinal maliyeti.

$C_b$ , bakıma gelen lokomotifin birim zaman (hafta) bekleme maliyeti

olarak belirlenmiştir. Bunlara ek olarak karar modelinin politika içeren değişkeni

L, kuyruktaki lokomotif sayısı  
olmaktadır.

Karar değişkeninin alabileceği değerler nedeniyle karar modelinde bir kısıtlayıcı ortaya çıkmaktadır.

Bakımı, gerçekleştirecek servis sistemi bir günde üç vardiya çalışabileceğinden, karar değişkeni

$$K=1,2,3 \quad (12)$$

değerlerinden birini alabilecektir.

Karar modelinin amaç fonksiyonu

$$B(C) = KC_k + LC_b \quad (13)$$

şeklindedir. Bu fonksiyon servis sisteminde ek kapasite yaratmanın marjinal maliyeti ve kuyrukta beklemenin maliyeti toplamının beklenen değerini vermektedir. Bu noktada amaç yukarıda verilen maliyet fonksiyonunu enküçükleyen K karar değişkeninin değerini bulmaktır.

Yukarıdaki amaç fonksiyonunda yer alan politika içeren değişken L ise,

$$\rho = \frac{\lambda}{K\mu} \quad (14)$$

eşitliği kullanılarak

$$L = \frac{\rho^2}{2(1-\rho)} + \rho \quad (15)$$

ifadesiyle bulunur (11).

Böylece rastnal nitelikteki aşınma arızaları sonucunda bakıma gelebilecek lokomotif sayılarının kestirimi ve bunların bakım planlamasına ilişkin kararlar için modeller simgesel olarak geliştirilmiştir. Bu modellerin sayısal çözümlerinin bulunmasıyla, ele alınan sorun için tutarlı ve uygulanabilir bakım planlamasına ilişkin tüm göstergeler karar vericiye sunulacaktır. Geliştirilen modelin uygulanabilirliğinin gösterilmesi amacıyla izleyen kesimde bunların çözümü yapılacaktır.

---

(11) HILLIER-LIEBERMAN, a.g.k. s.302.

### III- MODELLERİN ÇÖZÜMÜ

Lokomotif tekerleklerindeki bandaj aşınması şeklinde ortaya çıkan arızaları gidermek üzere tutarlı ve uygulanabilir bakım planlaması hazırlamak amacıyla kestirim ve karar modelleri geliştirilmiştir. Çalışmanın bu kesiminde, geliştirilen bakım planlamasının sayısal çözümü yapılacaktır.

#### 1- Arıza ve Bakımla İlgili Parametrelerin Sayısal Değerleri

Lokomotif tekerleklerinin bakım planlaması amacıyla geliştirilen modellerin çözümü için öncelikle parametrelerin sayısal değerlerinin bulunması gerekmektedir. Ancak, modellerin parametrelerinden önce arıza ve bakımla ilgili parametrelerin değerlerinin izleyen paragraflarda belirtildiği şekilde bulunması zorunludur.



Lokomotif tekerleklerinin bandaj aşınması arızalarını gidermek üzere hazırlanacak bakım planlaması için rastnal nitelikli arızalar incelenerek, bunların ortaya çıkış zamanlarının kestirimini sağlayacak arıza olasılık yoğunluk fonksiyonunun belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle dağılımın parametreleri hesaplanacaktır.

TCDD 1. İşletme Eskişehir Deposu ilgili kayıtlarından yararlanarak elde edilen "Bandaj Kalınlığının 1 Milimetre Aşınmasına Neden Olan Yol Miktarına İlişkin Gözlemler" Ek: I'dedir. Söz konusu gözlem sonuçları Sturges kuralına göre gruplandırılmış, elde edilen sınıf aralıkları ve bu aralıklardaki gözlem sayıları Tablo 1'de verilmiştir.

TABLO 1: Bandaj Kalınlığının 1 Milimetre Aşınmasına Neden Olan Yol Miktarına İlişkin Gözlemler

<u>Gidilen Yol (Km)</u>	<u>Gözlem Sayısı</u>
1309 - 6412 .....	562
6412 - 11515 .....	404
11515 - 16618 .....	354
16618 - 21721 .....	204
21721 - 26824 .....	122
26824 - 31927 .....	93
31927 - 37030 .....	71
37030 - 42133 .....	38
42133 - 47236 .....	34
47236 - 52339 .....	17
52339 - 57442 .....	2
57442 - 62546 .....	1

Bandaj aşınması şeklinde ortaya çıkan arızaya ilişkin olasılık yoğunluk fonksiyonunun belirlenmesine geçmeden önce, sözkonusu fonksiyonun rastnal değişkeni, genel gösterimde de olduğu şekilde

Z: Bir tekerleğin bandaj kalınlığında 1 milimetre azalma meydana getiren yol miktarı (km)

olarak tanımlanmıştır. Sözkonusu rastnal değişkenin değer kümesi

$$1309 \text{ km} \leq Z \leq 62546 \text{ km} \quad (16)$$

olarak belirlenmiştir. Buna göre,

f(z): Çalışan bir tekerlekteki bandaj aşınması arızalarının ortaya çıkış mesafelerinin olasılık yoğunluk fonksiyonu olacaktır.

Eldeki verilere uygun olabilecek kuramsal olasılık yoğunluk fonksiyonunun bulunmasında öncelikle bu tür olaylar için geliştirilen ve esnek bir yapıya sahip olan Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu üzerinde durulacaktır (12). Bu nedenle sözkonusu dağılımın parametreleri kestirilerek, gerekli uygunluk sınamaları yapılacaktır.

---

(12) Weibull olasılık dağılım fonksiyonunun bu tür olaylara uygulanabilirliği hakkında ayrıntılı bilgi için bkz: SHOUMAN, a.g.k. s. 190.

Weibull dağılımının parametrelerinin bulunması için doğrudan yöntemler yoktur. Ancak bazı yaklaşımlarla kestirim yapmak mümkündür. Bu yaklaşımlardan en uygunu enbüyük benzerlik yöntemiyle yapılan yaklaşımdır (13). Bu konudaki gerekli açıklamalar Ek: 2'de verilmiştir.

Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu

$$f(z) = \alpha \beta z^{\alpha-1} \exp(-\beta z^\alpha) \quad (17)$$

olarak ifade edilmektedir. Bu fonksiyonun  $\alpha$  parametresinin kestirimi için Ek: 3-A' daki grafik ve Ek: 3-B' deki tablodan yararlanılacaktır. Söz konusu grafik ve tablodan fonksiyonun D.K. (Değişim Katsayısı) ve (D.K.)<sup>2</sup>'ne karşılık  $\alpha$  parametresinin alacağı değerler gösterilmektedir.

Ek: 1'de verilen gözlem sonuçlarının ortalama ve standart sapması sırasıyla

$$\bar{Z} = 13854 \quad \text{kilometre} \quad (18)$$

$$s = 10971 \quad \text{kilometre} \quad (19)$$

olduğundan,

---

(13) A.Clifford COHEN, "Maximum Likelihood Estimation in the Weibull Distribution Based On Compute and On Censored Samples", Technometrics, C. 7, No. 7, Kasım 1965.

$$D.K. = 0.79190 \quad (20)$$

$$(D.K.)^2 = 0.62711 \quad (21)$$

olarak bulunmuştur. Bu değerlere karşılık grafik ve tablodan

$$\hat{\alpha} = 1.25 \quad (22)$$

elde edilmiştir. En büyük benzerlik kestirimi yönteminden yararlanmak suretiyle

$$\hat{\beta} = 6.09 \times 10^{-6} \quad (23)$$

hesaplanmıştır.

Bu işlemler sonucunda lokomotif tekerleklerinin bandaj kalınlığının azalmasına ilişkin olasılık yoğunluk fonksiyonu

$$f(z) = 7.6125 \times 10^{-6} z^{0.25} \exp(-6.09 \times 10^{-6} z^{1.25}) \quad (24)$$

olarak önerilebilir. Önerilen fonksiyonun uygunluğu ise test edilerek kabul veya reddedilecektir.

Önerilen dağılım fonksiyonunun uygunluğu  $\chi^2$  ve/veya Kolmogorov uygunluk testleri ile yapılabilir. Bu çalışmada her iki test de yapılmıştır.  $\chi^2$  uygunluk testinin yapılması amacıyla

$$P \{ a \leq z \leq b \} = \exp(-6.09 \times 10^{-6} z^{1.25}) \Big|_a^b \quad (25)$$

ifadesi yardımıyla çeşitli aralıklardaki kuramsal olasılıklar elde edilmiş ve Tablo 2 düzenlenmiştir.

TABLO 2: Bandaj Aşınması Arızalarının Ortaya Çıkış Zamanlarına İlişkin Olasılık Yoğunluk Fonksiyonunun  $\chi^2$  - Uygunluk Test Değerleri

Gidilen Yol (Km)	Gözlenen Olasılık	Kuramsal Olasılık	Gözlenen Sıklık (fio)	Kuramsal Sıklık (fib)	$(fio-fib)^2$ fib
1309-6412	0.295	0.295	562	561	0.002
6412-11515	0.212	0.220	404	418	0.469
11515-16618	0.186	0.173	354	330	1.745
16618-21721	0.107	0.110	204	209	0.120
21721-26824	0.064	0.070	122	133	0.910
26824-31927	0.049	0.049	93	93	0.
31927-37030	0.037	0.036	71	69	0.058
37030-42133	0.020	0.019	38	36	0.111
42133-47236	0.018	0.016	34	30	0.533
47236-52339	0.009	0.008	17	15	0.267
52339-57442	0.001	0.003	2	6	2.667
57442-62546	0.001	0.001	1	2	0.500

Önerilen fonksiyonun uygunluğunu test amacıyla yapılan işlemler sonucunda,

$$\chi^2 = 7.382 \quad (26)$$

bulunmuştur. Öte yandan s.d.= 10 ve 0,95 güven seviyesine göre  $\chi^2$  'nin tablo değeri

$$\chi_{0,95}^2 = 18,307 \quad (27)$$

olduğundan, önerilen fonksiyonun incelenen olayı temsil ettiğine karar verilebilir (14).

Önerilen fonksiyonun uygunluğu  $\chi^2$  testinin yanısıra, Kolmogorov testi ile de incelenebilir. Bu amaçla yapılan işlemler sonucunda Birikimli Gözlenen Olasılık ile Birikimli Kuramsal Olasılıklar arasındaki en büyük mutlak fark

$$D_k = 0,0277128 \quad (28)$$

olarak elde edilmiştir. Kolmogorov testinde  $k$ (= sınıf sayısı)=12 için

$$D_{0,95} = 0,3754 \quad (29)$$

ve

$$D_{0,99} = 0,4491 \quad (30)$$

olduğundan,

$$D_k < ( D_{0,95} , D_{0,99} ) \quad (31)$$

yaazılabilir. Bu nedenle de, önerilen fonksiyonun incelenen olayı temsil ettiğine karar verilebilir.

---

(14) Necla ÇÖMLEKÇİ, İstatistik 3.baskı, Kalite Matbaası, Ankara, 1979, s. 261-262.

Böylece, elde edilen fonksiyondan hareketle arızalara ilişkin birikimli olasılık yoğunluk fonksiyonu

$$F(Z) = \int_0^Z 7.6125 \times 10^{-6} t^{0.25} \exp(-6.09 \times 10^{-6} t^{1.25}) dt \dots (32)$$

olarak bulunur.

Ortaya çıkış zamanlarına ilişkin olasılık yoğunluk ve birikimli olasılık yoğunluk fonksiyonları elde edilen arızaların en önemli parametreleri çeşitli haftalardaki güvenilirlikleri veya tekerleklerin arıza yapmama olasılıklarıdır.

Bakım planlaması hafta temelinde yapılacağı için, güvenilirlik buna göre kestirilmiştir (15). Bu nedenle, TCDD yetkililerince günde ortalama 400 kilometre yol yaptığı bildirilen bir lokomotifin birinci hafta sonundaki bir tekerleğinin güvenilirliği,

$$R_1(t_1) = 1 - \exp \left[ -6.09 \times 10^{-6} z^{1.25} \right] \Big|_0^{140} (33)$$

ifadesinde yararlanılarak,

$$R_1(t_1) = 0,99819 (34)$$

ifadesinde yararlanılarak,

(15) Bir tekerleğin 20 milimetre aşınması sonucu arıza ortaya çıkacağından, 1 haftada gidilecek 2800 kilometre için dö-müşüm yapılarak 140 kilometre alınmıştır.

olarak hesaplanmıştır. Bir lokomotifte 12 tekerlek bulunduğu ve bunların seri sistem oluşturduğu gözönüne alındığında bir lokomotifin ilk hafta sonundaki güvenilirliği

$$R(t_1) = (R_1(t_1))^{12} \quad (35)$$

$$R(t_1) = 0.97846 \quad (36)$$

olarak elde edilir. Benzer şekilde, güvenilirlik kısıtına göre gidilen yol, bir tekerleğin arızalanma olasılığı, lokomotifin arızalanma olasılığı ve güvenilirliği Tablo: 3'de görüldüğü şekilde hesaplanmıştır.

Bakım planlamasına ilişkin geliştirilecek kestirim ve karar modelleri için arıza ile ilgili parametrelerin yanısıra bakım parametrelerinin de belirlenmesi zorunludur.

Bandaj aşınması arızasını giderecek bakımın en önemli parametresi bir lokomotifin bakımının yapıldığı süredir. ELMS'de yapılan gözlemlere ve ilgili bölüm sorumlusunun belirttiğine göre, bir lokomotifin tüm tekerlek bandajlarının onarımı için gerekli süre,

$$\frac{1}{M} = 0,8 \text{ hafta/lokomotif} \quad (37)$$

olarak bulunmuştur.



TABLO 3: Gidilen Yol Miktarı İle Haftalara Göre Tekerleğin ve Lokomotifin Arızalanma Olasılığı ve Lokomotifin Güvenirliliği

Yeni Bandajlı Lokomotifin İşletimde Kaldığı Hafta Sayısı	Gidilen Yol (Km)	Bir Tekerleğin Arızalanma Olasılığı	Bir Lokomotifin Arızalanma Olasılığı	Bir Lokomotifin Güvenirliliği
1	140	0.00181	0.02144	0.97856
2	280	0.00695	0.08029	0.91971
3	420	0.01151	0.12973	0.87027
4	560	0.01645	0.18051	0.81949
5	700	0.02169	0.23136	0.76864
6	840	0.02715	0.28138	0.71862
7	980	0.03284	0.33015	0.66988
8	1120	0.03869	0.37718	0.62282
9	1260	0.04469	0.42224	0.57776
10	1400	0.05082	0.46518	0.53482
11	1540	0.05706	0.50590	0.49410

Bakımla ilgili diğer parametre ise, arızalanan bir lokomotifin bakımının bir haftada gerçekleştirilme olasılığı, başka bir deyişle bakım yapılabilirliğidir. Yönetimin bu konudaki tutumu bakımın bir hafta içinde mutlaka gerçekleştirilmesi olduğundan, bakım yapılabilirlik

$$M ( 1 \text{ haftada bakımın gerçekleştirilmesi } ) = 1 \quad (38)$$

olacaktır.

## 2- Planlama Dönemindeki Arızalı Lokomotif Sayılarının Kestirimi

Lokomotif tekerleklerindeki bandaj aşınması şeklinde ortaya çıkan arızaları giderecek bakımın planlaması için yapılacak ilk işlem, planlanan dönemlerdeki zaman birimlerinde ortaya çıkabilecek lokomotif sayısının kestirimidir. Öte yandan, durumun koşulları incelendiğinde, lokomotiflerin arızalanma olayının Markov sürecine uyduğu görülmüştür.

### A- Kestirim Modelinin Yazılımı

Bakım planlamasında haftalar itibariyle arızalı lokomotif sayılarının kestirimi sorununa Markov süreci yaklaşımı yapıldığında, oniki farklı durumla karşılaşılmaktadır. Söz konusu durumlar ve geçiş olasılıkları Tablo:4'te görülmektedir (16).

Kestirim modelinin ilk kısmı olan geçiş olasılıkları matrisi Tablo:4'ten yararlanılarak Tablo:5'te görüldüğü şekilde düzenlenmiştir.

12 x 12 boyutundaki geçiş olasılıkları matrisinin planla-

---

(16) Tablo 4'te, durum B'den tekrar durum I'e geçilmektedir.

ma dönemindeki her hafta için  $P^n$  değerleri bulunduğunda;

$Y [ t_n ]$  : n'inci dönemdeki lokomotiflerin durum uzayına göre sayılarını veren satır matrisini elde etmek için

$$Y [ t_n ] = [ 40, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 ] P^n \quad (39)$$

matris çarpımıyla kestirim modelinin açık yazılımı elde edilmiştir.

TABLO 4: Bakım Planlamasındaki Markov Sürecine İlişkin Durum Uzayı Öğeleri ve Geçiş Olasılıkları

<u>Durum Uzayı Öğeleri</u>	<u>(m)'den (m+1)'e Geçiş Olasılığı</u>	<u>(m)'den m=B'ye Geçiş Olasılığı</u>
I	0.9786	0.0214
II	0.9199	0.0801
III	0.8703	0.1297
IV	0.8195	0.1805
V	0.7686	0.2314
VI	0.7186	0.2814
VII	0.6699	0.3301
VIII	0.6228	0.3772
IX	0.5778	0.4222
X	0.5348	0.4652
XI	0	1
B	1	0

TABLO 5: Lokomotiflerin Arızalanma Olayına İlişkin Markov Zinciri

Geçiş Olasılıkları Matrisi

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	B
I	0	0.9786	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0214
II	0	0	0.9199	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0801
III	0	0	0	0.8703	0	0	0	0	0	0	0	0.1270
IV	0	0	0	0	0.8195	0	0	0	0	0	0	0.1805
V	0	0	0	0	0	0.7686	0	0	0	0	0	0.2314
VI	0	0	0	0	0	0	0.7286	0	0	0	0	0.2814
VII	0	0	0	0	0	0	0	0.6699	0	0	0	0.3301
VIII	0	0	0	0	0	0	0	0	0.6228	0	0	0.3772
IX	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5778	0	0.4228
X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5348	0.4652
XI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
B	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

P =

## B- Kestirim Modelinin Çözümü

Bandaj aşınması sonucu arızalanarak bakıma gelmesi beklenen lokomotif sayısı kestirimlerinin elde edilebilmesi planlama dönemindeki her devre için geçiş olasılıkları matrisleri  $P^n$ 'lerin bulunmasına bağlıdır.

Arızalı lokomotif sayılarının kestiriminde yararlanılacak  $P^n$ 'ler 40 devre için hesaplandığında,  $n=12$ 'den itibaren gelişlerin durağanlaştığı görülmüştür. Modellere ilişkin varsayımlarda da belirtildiği üzere, arıza olayının durağan hale (steady-state) geçmesinden sonraki devreler için bakım planlaması hazırlanacağından, daha önceki devreler planlama için gözönüne alınmayacaktır. Bu nedenle durağan hale geçişten sonraki devreler için geçiş olasılıkları matrisi Tablo:6'da görüldüğü şekilde kabul edilecektir.

Tablo 6'da  $n=12$  için verilen durağan hale gelmiş geçiş olasılıkları matrisi (39) no'lu ifadede yerine konulup, gerekli çarpım işlemi yapıldıktan sonra, planlama dönemindeki her hafta için beklenen arızalı lokomotif sayısının,

$$Y_b \{ t_n \} = 6 \quad n = 12, 13, 14, \dots \quad (40)$$

olduğu belirlenmiştir. Söz konusu beklenen arızalı lokomotif sayısı, lokomotiflerin servis sistemine geliş oranı olan,

$$\lambda = 6 \text{ lokomotif/hafta} \quad (41)$$

TABLO 6: Lokomotif Tekerleklerinin Arızalanma Olayının Durağan Hale Geçişinden İtibaren Geçiş Olasılıkları Matrisi

$P^{12} =$

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	B
I	0.1341	0.1641	0.1308	0.1159	0.0982	0.0786	0.0578	0.0379	0.0214	0.0098	0.0036	0.1427
II	0.1422	0.1310	0.1514	0.1137	0.0948	0.0754	0.0565	0.0388	0.0238	0.0125	0.0053	0.1493
III	0.1477	0.1389	0.1194	0.1328	0.0924	0.0722	0.0546	0.0381	0.0248	0.0143	0.0072	0.1524
IV	0.1506	0.1453	0.1274	0.1019	0.1101	0.0698	0.0514	0.0365	0.0248	0.0155	0.0087	0.1547
V	0.1518	0.1485	0.1338	0.1089	0.0794	0.0856	0.0488	0.0344	0.0240	0.0160	0.0099	0.1555
VI	0.1518	0.1505	0.1377	0.1154	0.0853	0.0552	0.0630	0.0322	0.0228	0.0160	0.0108	0.1558
VII	0.1512	0.1511	0.1405	0.1198	0.0916	0.0597	0.0330	0.0452	0.0212	0.0157	0.0116	0.1558
VIII	0.1500	0.1508	0.1419	0.1234	0.0962	0.0654	0.0362	0.0160	0.0337	0.0150	0.0120	0.1557
IX	0.1485	0.1496	0.1421	0.1257	0.1005	0.0700	0.0412	0.0181	0.0058	0.0272	0.0123	0.1557
X	0.1467	0.1474	0.1407	0.1263	0.1035	0.0748	0.0457	0.0226	0.0071	0.0009	0.0244	0.1557
XI	0.1453	0.1447	0.1377	0.1247	0.1046	0.0788	0.0513	0.0273	0.0116	0.0018	0.0000	0.1677
B	0.1677	0.1422	0.1331	0.1199	0.1022	0.0804	0.0566	0.0344	0.0170	0.0067	0.0010	0.1341

değerini vermektedir. Bu noktada ortaya çıkan bir gerçek de, gelişlerin eşit aralıklarda sabit sayıda olması nedeniyle Poisson sürecine uygun oluşudur (17).

### 3- Karar Modeli

Bandaj aşınması sonucunda bakıma gelmesi beklenen lokomotif sayılarının kestiriminden sonra bakım planlaması sorununun son aşaması olan bakım için ayrılacak kaynakların nitelik ve niceliklerini belirleme kararı evresine gelinmiştir. Bu noktada yönetimin sorunu, önceden belirlenen varsayımlar altında planlama dönemindeki haftalar için beklenen arızalı lokomotif sayıları bilindiğine göre, servis sisteminin ne şekilde hizmet sunacağına ilişkin kararın verilmesidir. Ancak bu uygulamada niteliklere yer verilmeyecektir. Bu amaçla daha önce geliştirilen karar modelinin sayısal çözümü yapılacaktır.

#### A- Model Parametrelerinin Belirlenmesi

Bakım planlaması için geliştirilecek karar modelindeki parametrelerden  $\mu$  ve  $\lambda$  çözümlenmeler ve kestirim modeli yardımıyla,

$$\mu = 1.25 \text{ lokomotif / hafta} \quad (42)$$

$$\lambda = 6 \text{ lokomotif / hafta} \quad (43)$$

olarak hesaplanmıştır. Öte yandan, ELMS yöneticilerince modeldeki maliyet parametre değerlerini

$$C_k = 40\ 000\ \text{TL} / \text{hafta} \quad k = 1,2,3 \quad (44)$$

$$C_b = 60\ 000\ \text{TL} / \text{hafta} \quad (45)$$

olarak belirtilmiştir.

### B- Modelin Yazılımı

Lokomotif tekerleklerinin bandaj aşınması arızalarını giderecek bakımın planlanması amacıyla geliştirilen karar modeli

$$B(C) = K C_k + L_k C_b \quad k = 1,2,3 \text{ için} \quad (46)$$

şeklinde bir maliyet fonksiyonu olup, bunun enküçük değerini sağlayan karar değişkeni K'nin hesaplanmasına çalışılacaktır.

Karar verici bu noktada üç eylem seçeneğinden toplam maliyeti enküçükleyeni seçme durumundadır.

Kapalı yazılımı (46) no'lu ifadede verilen modelin açık yazılımı şu şekilde olacaktır (18):

---

(18)  $C_k$  maliyeti her eylem seçeneği için aynı kalmaktadır.



$$K = 1 \text{ için } B(C) = C_k + L_1 C_b \quad (47)$$

$$K = 2 \text{ için } B(C) = 2 C_k + L_2 C_b \quad (48)$$

$$K = 3 \text{ için } B(C) = 3 C_k + L_3 C_b \quad (49)$$

yukarıda verilen maliyet fonksiyonlarındaki kuyruk uzunlukları ise,

$$\rho = \frac{K}{K} \quad (50)$$

$$L = \frac{\rho^2}{2(1 - \rho)} + \rho \quad (51)$$

ifadelerinden hesaplanarak modelin çözümü gerçekleştirilecektir.

### C- Modelin Çözümü

Lokomotif tekerleklerinin bandaj aşınması şeklinde ortaya çıkan arızalarını giderecek bakım planlamasının zaman boyutuna ilişkin çözümler kestirim modeli yardımıyla elde edilmiştir. Buna göre her hafta 6 lokomotifin sözkonusu arıza sonucunda bakıma gelmesi beklenmektedir. Bu bakımı gerçekleştirecek servis sisteminin kanal sayısı olarak ele alınan vardiya sayısı ise, geliştirilen karar modeli yardımıyla belirlenecektir. Bu amaçla model parametreleri karar modelinde yer-

lerine konularak gerekli hesaplamalar yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 7 'de verilmiştir.

TABLO 7: Tekerlek Bandaj Değişirme Servis Sistemlerinin - Servis Kanal Sayısı, Kuyruk Uzunluğu İle Beklenen Toplam Maliyetleri

Kanal Sayısı	$\frac{L}{KM}$	Kuyruktaki Birim Sayısı	Toplam Beklenen Maliyet (TL/hafta)
1	4.8	1.77	146200.00
2	2.4	0.34	100400.00
3	1.6	0.24	134400.00

Yukarıdaki tablo incelendiğinde, en küçük maliyet kistasına göre hareket etmesi beklenen karar verici için en uygun seçeneğin servis sisteminde iki kanal bulundurulması veya başka bir deyişle servis sisteminin iki vardiya çalıştırılmasıdır.

#### 4- Lojistik Destek Kestirimleri

Lokomotif tekerleklerinin bandaj aşınması arızası nedeniyle ortaya çıkan bakım planlaması sorununun çözümü için kestirim ve karar modellerinden yararlanılmıştır. Ancak hazırlanan bakım planının uygulamaya konması veya gerçekleştirilmesi için bazı kaynaklara gereksinme vardır. Bu kaynaklar

lojistik desteği oluşturmakta olup, aşağıda görüldüğü gibi  grupta ele alınmaktadır:

- Bandaj değişiklikliğini gerçekleştirecek tezgah ve donatılar. ELMS'de bu amaca göre geliştirilmiş bir tezgah bulunmaktadır. Karar vericilerin bu konuda koydukları kısıt nedeniyle yeni bir tezgah konulmamaktadır.

Bandaj değişikliğini gerçekleştirecek servis sisteminin işletilmesi için ELMS yetkililerinin belirttiği üzere uygun nitelikte sekiz operatöre gereksinme vardır. Karar modelinin czm sonucunda eniyi işletim politikasının iki vardiyada mümkün olması nedeniyle bakım işleminde toplam onaltı operatöre gereksinme duyulmaktadır.

- işletim sınırını açan, yani güvenirlilik limitinin altına düşen bandajların yerine takılacak yeni bandajlar lojistik desteğin yedek parça oğesini oluşturmaktadırlar. Kestirim modelinin czmne göre her hafta 6 lokomotifin bandaj değişikliğine gereksinme vardır. Bir lokomotifte 12 tekerlek olduğu gözönüne alınırsa, haftalık bandaj gereksinmesi 72 adet olacaktır (19).

---

(19) Bu konuda eniyi stok politikasının düzenlenmesi için karar verici durumunun koşullarına göre czm arayabilir. Çalışmanın genel yapısı nedeniyle burada, sözkonusu olabilecek politikalara yer verilmemiştir.

Yukarıda sıralanan lojistik destek öğelerinin yeterince sağlanması sonucunda modellerin sonuçlarına göre hazırlanan bakım planının gerçekleştirilmesi mümkün olabilecektir.

## SONUÇ VE ÖNERİLER

"Bakım Planlamasının Boyutları ve Planlama İçin Modeller-Anahat Dizel Lokomotif Tekerleklerine İlişkin Uygulama" başlığı altında geliştirilip tamamlanan bu çalışmada kuramsal ve uygulamaya ilişkin sonuçlar şu şekilde belirlenmiştir:

**Değişik** amaçlar için geliştirilen sistemlerin çeşitli dönemlerde bakımlara gereksinmesi vardır. Bu gereksinmenin tam anlamıyla karşılanabilmesi ve sistemlerden koşulların elvereceği eniyi biçimde yararlanmak, ancak bakımların tutarlı bir şekilde planlanmasıyla mümkündür. Öte yandan özellikle arıza giderici bakımları gerektiren arızaların oluş zamanlarının ve bakımların gerçekleştirilme sürelerinin rastnal nitelik taşıması bakım planlamasında rastnal yakla-

sıma üstünlük sağlamaktadır. Bu tür yaklaşımı gerçekleştiren yönetimin hazırlayacağı bakım planlamasının daha tutarlı ve uygulanabilir olacağı açıktır.

Bakım planlamasında rastnal yaklaşım için yapılan ~~çözümlenmelerde~~ aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

Güvenirlilik çözümlenmelerinden yararlanılıp, arıza giderici bakımların planlaması için geçmiş dönemlerdeki arızaların ortaya çıkış zamanlarının incelenmesiyle, bunları en iyi temsil eden arıza olasılık yoğunluk fonksiyonu (veya fonksiyonları) elde edilebilecektir. Böylece sözkonusu fonksiyonlardan hareketle, belirli dönemlerde çeşitli arızaların ortaya çıkma olasılıkları hesaplanarak, güvenirlilik kestirimleri yapılabilecektir. Ayrıca parçalar arasındaki ilişkilerin belirlenmesiyle de sistemin güvenirliliği hesaplanabilecektir.

Yapılacak olan bakım yapılabilirlik çözümlenmesi sonucunda, işletim dışı sürenin bir fonksiyonu olarak bakım yapılabilirlik fonksiyonu elde edilerek, önceden belirlenmiş yapılabilirlik fonksiyonu elde edilerek, önceden belirlenmiş bir sürede bakımın gerçekleştirilme olasılığı hesaplanabilecektir.

Bu çözümlenmelerin yanısıra, yapılacak lojistik destek çözümlenmesiyle şu sonuçlara varılmıştır; Tezgahlar, insan gücü ve yedek parçadan oluşan lojistik desteğin, güvenirlilik ve bakım yapılabilirlik göstergeleriyle birlikte

yönetimin tutumları da gözönüne alınarak, bakım yerlerinde ve yeterince bulundurulmasıyla, bakımların zamanında ve gerektiği şekilde gerçekleştirilmesi sağlanabilecektir.

Görüldüğü gibi bakım planlaması yöneticiler için çok boyutlu bir karar sorunu olmaktadır. Yöneticilerin bu tür konularda sağlıklı karar vermeleri, sorunu bütün boyutlarıyla ele alarak çözüme yaklaşmalarına bağlıdır. Çözüm için böyle bir yaklaşım ise sorunların genel bir karar modeli çerçevesinde ele alınmasını gerektirmektedir.

Çalışmamızın son bölümünde lokomotif tekerleklerinin bandaj aşınması şeklindeki arızalarını gidermek üzere hazırlanacak bakım planlaması için kestirim ve karar modelleri geliştirilerek, bunların sayısal çözümleri gerçekleştirilmiştir. Bu çözümlerin değerlendirilmesiyle varılan sonuçlar şunlardır:

Arızalı lokomotiflerin bakım yerine gelişlerinin bir Markov süreci oluşturması nedeniyle Markov modeli geliştirilmiştir. Bu modele veri olarak 1 milimetrelik aşınmaya neden olan gidilen yol miktarı alınmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda bu aşınmanın ortalama 13854 kilometrede ortaya çıktığı ve standart sapmasının 10971 kilometre olduğu görülmüştür. Ayrıca yapılan işlemler sonucunda arızaların ortaya çıkış zamanlarının Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonuna uygun olduğu bulunmuştur. Bu verilerden hareketle geliştirilen Markov modelinin çözümü sonucunda, başlangıçta

40 lokomotif işleme konulduğunda, 12 inci haftadan itibaren her hafta 6 lokomotifin bakıma geleceği kestirilmiştir. Öte yandan işletim koşullarındaki değişiklikler sonucu aşınmaya neden olan yol miktarının karakteristik değerlerinde ortaya çıkabilecek sapmalar istatistik testleriyle kontrol edilerek, kestirim modelinde gerekli uyarlamalar yapılabilir. Bakım yapılabilirlik ve güvenilirlik kısıtlarında karar verici tarafından yapılacak değişiklikler için de kestirim modeli yeniden düzenlenebilir.

Karar modeli parametreleri kestirim modelinin çözümü ve diğer ilgili çözümler sonucunda bulunmaktadır. Bu nedenle kestirim modeli parametrelerinde ortaya çıkacak bazı değişiklikler, aynı zamanda karar modeli parametrelerine yansıtacak ve sonuçta bazı değişikliklere yol açabilecektir. Öte yandan servis sisteminin bakım oranındaki bir azalış veya artış karar modelinin sonucunu değiştirecektir. Bu çalışmada ele alınan verilere göre karar modelinin çözümü sonucunda servis sisteminin iki vardiya şeklinde işletimde tutulması en küçük maliyet açısından uygun görülmüştür.

Bu çalışmada bakım planlamasında matematik modellerden yararlanmayı örneklemek amacıyla lokomotif tekerleklerinin bakım planlaması sorunu ele alınmıştır. Bu sorunun kapsamı genişletilerek lokomotifin bütününe içerecek bir çözüm aranabilir. Buna ek olarak, sözkonusu modeller yal-



nızca TCDD 1'inci İşletme deposundaki lokomotifler için değil, Türkiye'deki tüm lokomotifler için geliştirilebilir. Ayrıca lokomotiflerin bakım programları ile yol programları birlikte hazırlanarak, lokomotifin bakım gereksinmesi olduğu zamanlarda bakım merkezlerinde olması sağlanabilir. Çalışmanın proje niteliğinde olmayışı nedeniyle bu konular ele alınmamıştır.



7602.	11518.	14259.	6969.	28026.	3040.	19660.	1564.	28018.	7802.	11518.	14259.	6969.
28026.	3040.	19660.	1564.	28018.	7802.	11518.	14259.	6969.	28026.	3040.	19660.	1564.
28018.	7802.	11518.	14259.	6969.	28026.	3040.	19660.	1564.	28018.	7802.	11518.	14259.
6969.	28026.	3040.	7802.	11518.	14259.	6969.	2151.	2151.	2151.	2151.	2151.	2151.
2151.	2151.	2151.	2151.	2151.	2151.	2151.	2164.	2164.	25486.	5859.	25486.	5859.
2183.	2164.	2164.	25486.	25486.	5859.	5859.	2183.	5183.	2164.	2164.	25486.	25486.
5859.	5859.	5183.	5183.	2164.	2164.	25486.	25486.	5859.	5859.	5183.	5183.	2164.
3184.	7898.	7898.	5184.	3184.	7898.	7898.	4260.	4260.	35100.	35100.	23125.	23125.
3124.	4260.	4260.	7377.	17550.	35100.	23125.	23125.	35100.	23125.	23125.	35100.	35100.
23125.	23125.	35100.	35100.	23125.	23125.	10650.	4260.	35100.	35100.	35100.	23125.	23125.
10650.	4260.	18494.	14257.	14257.	13187.	15187.	2001.	12483.	13956.	58652.	12483.	13956.
16955.	10173.	4152.	4152.	4074.	14257.	14257.	13187.	13187.	2155.	2001.	12717.	4074.
4074.	14257.	14257.	15187.	15187.	2335.	2101.	16826.	12483.	13956.	16955.	25455.	4407.
4407.	14257.	14257.	26373.	25373.	2155.	1368.	16826.	12483.	13956.	16955.	10173.	4074.
18980.	13980.	2354.	2354.	5886.	5886.	9390.	12717.	10173.	47074.	47074.	14257.	14257.
13187.	26373.	13187.	2335.	2001.	16826.	12483.	13950.	4239.	16955.	12717.	4074.	5392.
14257.	14257.	15187.	2335.	2001.	16826.	12483.	13956.	10173.	20697.	20697.	9810.	2810.
45376.	45376.	58646.	18940.	2354.	2354.	5439.	5439.	6975.	6975.	4201.	4201.	24628.
12314.	21389.	21389.	18940.	7898.	3184.	3184.	7898.	7898.	3184.	3184.	10354.	10354.
7298.	7298.	13660.	13660.	1805.	13660.	13660.	1805.	1805.	1568.	7955.	7955.	1568.
7955.	7955.	10354.	10354.	7298.	7298.	10354.	7298.	7298.	13660.	13660.	1805.	1805.
1805.	9810.	9810.	45376.	45376.	17085.	17085.	17315.	4201.	4201.	24628.	24628.	21389.
21389.	12404.	27996.	13654.	11394.	17442.	2087.	12404.	2087.	12404.	17457.	13654.	11394.
17459.	2087.	17465.	2087.	12406.	17513.	13654.	11394.	17519.	17541.	11394.	17556.	2087.
12404.	13654.	11394.	12404.	17664.	13654.	11394.	17701.	2087.	12404.	14692.	3591.	13664.
17748.	22788.	17900.	2087.	11187.	3426.	20672.	1778.	17981.	14692.	3591.	18001.	14692.
3591.	12067.	3388.	8390.	3426.	3388.	8390.	3426.	20672.	1778.	13043.	14692.	3426.
20672.	1778.	18117.	14692.	3591.	10056.	20672.	1778.	18129.	14692.	3591.	10056.	3390.
18153.	14692.	3591.	10056.	3388.	8390.	3426.	18157.	14692.	3591.	30168.	3388.	6390.
3426.	12439.	7432.	18190.	12834.	12439.	7432.	18205.	7432.	18227.	8556.	12439.	7432.
18304.	8556.	16345.	8556.	12439.	7432.	18339.	8556.	12439.	18502.	8556.	12439.	7432.
18601.	12439.	7432.	8556.	24678.	7432.	18678.	12834.	12439.	7432.	7432.	18714.	3556.
12439.	7432.	18748.	37084.	4814.	14174.	18421.	18769.	37084.	8556.	12439.	42782.	18801.
6952.	2503.	1661.	4814.	14174.	31273.	12096.	22052.	7736.	18903.	26606.	11642.	18917.
18941.	11641.	42782.	18981.	16778.	2598.	19041.	16778.	2598.	31273.	12096.	19351.	7736.
9072.	29052.	7736.	19418.	26606.	11642.	42782.	19412.	26606.	11642.	42782.	19522.	16778.
2598.	19997.	11642.	42782.	20018.	16777.	3064.	29052.	20741.	16778.	2598.	8064.	29052.
7736.	20758.	12096.	29052.	7736.	20810.	26606.	11642.	42782.	20944.	5004.	11642.	42782.
5081.	2598.	31273.	2598.	20849.	14515.	29052.	7736.	5215.	5228.	29052.	7736.	5310.
5341.	11642.	42782.	5356.	5400.	11642.	42782.	5410.	2598.	62546.	10368.	5419.	2887.
20849.												

14515	29052	7756	5418	2072	29152	7756	5539	5747	11641	62782	12694	13839
15015	2501	34425	5911	2497	5916	3462	13839	15015	2501	34425	6540	34225
6547	6482	15839	15015	2501	34425	2501	34425	6549	5534	13839	15015	2501
15015	2501	34425	6539	6571	13839	15015	6534	12694	15015	2501	34425	5811
13839	34425	6574	6547	13839	15015	2501	34425	1310	34425	7111	7196	13839
15015	2501	15015	2501	34425	7315	7465	13839	15015	50776	13839	15015	2501
34425	7699	15839	7039	1698	6051	37816	2538	7603	24874	7039	1698	6051
57306	2538	7715	12457	8104	24374	7139	1698	5051	37816	2538	8015	24874
7039	1698	6051	37816	2538	37838	2538	3141	24874	7039	1698	6051	3454
6535	2977	6156	11411	24726	6454	14733	11411	24726	6454	6353	2977	6215
8234	30077	5257	5859	17319	15581	36129	3319	30077	5417	5869	17319	15581
30077	6464	30077	8464	5869	17319	15581	30029	8471	50977	8472	5869	17319
15581	30029	8464	30077	8491	3869	17319	15581	30029	8513	30077	8600	3869
17319	15541	30029	8621	30077	8657	3149	17319	15581	30029	8705	30077	6754
5869	17319	15581	30029	8799	30077	8945	3869	17319	15581	30029	8886	31677
3903	5869	17319	15581	30029	8978	30077	43751	3869	17319	15581	30029	43012
30077	45813	3869	17319	15581	30029	15034	3368	3390	3426	20672	1850	17017
20672	1850	17017	14622	3591	10056	3388	3521	15034	3388	6390	3426	20672
1778	3591	12067	3598	8390	3426	20672	1778	3358	8390	3426	20672	1656
17017	14692	3426	20672	1778	25525	14622	3591	15034	20672	1850	17017	13692
3591	3368	6390	14623	1666	3388	11187	3426	20672	1778	1666	24144	12181
14623	1666	24144	12181	24144	12181	14623	1666	24144	12181	14623	1666	24144
1666	24144	12181	14623	1666	14623	1666	24144	12181	14623	1666	24144	12181
24144	12181	14623	1666	24144	12181	21144	12181	14623	1666	24144	12181	13623
8556	12439	7432	24144	12181	14623	1666	1661	4814	14174	18421	6952	2503
1661	2503	1661	4814	14174	18421	6952	2503	1661	4814	14174	18421	6952
14174	6952	14174	18421	6952	2503	1661	4814	14174	4814	14174	18421	6952
2503	1661	4814	1661	4814	14174	18421	6952	2503	1661	2503	1661	4814
14121	18421	6952	2503	1661	4814	14174	18421	6952	18421	6952	18421	6952
2503	1661	4814	14174	18421	1625	6051	37806	2538	12660	14079	1698	7039
1698	6051	37806	2538	12660	14079	1698	7039	2538	12660	14079	1698	7039
2538	12660	7039	1698	6051	37816	2538	37806	2538	3440	7039	1698	6051
37806	6051	37806	2538	8440	7039	1698	6051	9792	3428	17193	14693	9492
3428	17193	3428	17193	14693	9792	3428	17193	7346	17193	5877	9792	3428
17193	14693	9792	5877	9792	3428	17193	14693	9792	3428	9792	3428	17193
14693	9792	3428	17193	3428	17193	29386	9792	3428	17193	29386	24726	6454
6355	5346	24556	11411	24726	3136	3184	7898	7898	3134	3184	7898	2087
12404	15250	16112	2416	1625	25315	4660	25701	31938	7623	3822	3807	25837
26271	2087	12404	15948	13654	11326	26407	17115	3582	13521	5833	5543	25441
6873	11394	25605	2077	12404	13922	15854	11394	37861	25219	16746	8654	21328
22506												

21101.	20088.	13394.	11374.	26147.	2087.	12404.	13998.	26512.	1619.	2177.	16012.	2415.
1625.	25918.	6355.	26921.	9752.	3422.	17193.	29386.	9722.	14259.	5969.	21007.	8140.
12600.	1563.	21996.	11662.	42782.	5099.	12598.	22315.	12096.	22052.	5543.	23649.	12737.
13471.	3562.	13521.	5333.	3622.	3585.	23597.	31235.	7623.	3822.	25615.	19160.	1564.
23758.	7602.	11518.	14259.	5569.	24001.	12919.	11162.	10014.	24215.	12919.	11162.	12919.
11162.	10014.	24348.	12919.	11162.	11914.	8873.	3562.	13521.	5833.	5543.	24410.	12747.
10014.	24012.	12919.	11162.	10014.	5697.	2258.	24603.	3040.	19666.	1566.	25008.	2802.
11518.	5543.	8873.	3562.	13521.	5833.	5543.	25197.	10014.	26959.	12919.	11162.	10014.
25105.	12919.	13660.	15660.	1835.	1835.	7955.	7955.	11334.	5050.	7955.	7955.	11354.
11354.	7298.	7298.	11244.	11244.	5050.	5050.	11244.	11244.	5050.	11244.	5050.	5050.
11244.	11244.	5050.	5050.	5050.	5050.	11244.	11244.	5050.	5050.	11244.	23871.	10105.
10105.	23871.	23871.	11244.	11244.	10105.	10105.	23871.	23871.	10105.	11105.	23871.	10105.
23871.	23871.	11105.	10105.	23871.	23871.	34834.	34834.	10105.	10105.	23871.	23871.	10105.
12094.	35052.	35052.	15507.	15507.	2548.	2548.	2548.	2548.	34834.	34834.	41961.	41961.
12094.	41961.	12094.	12094.	35052.	35052.	15507.	15507.	15507.	15507.	2548.	2548.	34834.
34834.	41961.	34834.	41961.	41961.	12094.	12094.	35052.	35052.	35052.	35052.	15507.	15507.
2548.	2548.	34834.	2548.	34834.	34834.	41961.	41961.	12094.	12094.	12094.	12094.	35052.
35052.	15507.	15507.	2548.	15507.	2548.	2548.	34834.	34834.	41961.	41961.	41961.	41961.
12094.	12094.	35052.	35052.	15507.	35052.	14651.	14651.	10649.	10649.	43369.	43369.	10775.
10775.	13363.	13363.	13423.	15423.	15333.	43369.	47574.	47574.	15968.	15968.	2088.	2088.
15333.	13363.	14651.	14651.	10649.	10649.	43369.	36496.	10775.	10775.	13363.	13363.	15423.
15423.	43369.	43369.	47574.	47574.	1697.	1697.	36496.	15423.	15333.	15333.	14651.	14651.
10649.	10649.	36496.	36496.	10775.	10775.	13363.	13363.	15423.	43369.	43369.	47574.	47574.
3685.	1507.	3395.	15423.	15333.	15333.	14651.	14651.	10649.	10649.	36496.	36496.	10775.
10775.	13363.	13363.	15423.	43369.	47574.	47574.	15968.	47904.	2088.	1059.	15333.	30666.
14651.	14651.	10649.	10649.	43369.	36496.	10775.	10775.	13363.	13363.	15423.	15423.	43369.
43369.	47574.	47574.	1810.	1810.	36496.	15423.	7667.	7667.	14651.	14651.	10649.	10649.
18248.	26496.	10775.	10775.	13363.	13363.	15423.	5183.	47574.	47574.	5898.	5898.	2585.
2585.	2164.	2164.	23486.	23486.	5859.	5859.	5183.	2164.	23486.	23486.	5259.	5859.
5183.	5183.	10354.	7298.	7298.	13660.	13660.	1805.	1805.	1568.	7955.	7955.	11354.
10354.	7298.	7298.	13660.	13660.	1805.	1805.	1568.	7955.	7955.	66001.	66001.	52079.
54710.	62849.	7898.	7898.									

WEİBULL OLASILIK YOĞUNLUK FONKSİYONUNUN  
PARAMETRELERİNİN KESTİRİMİ

Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu,

$$f(t) = \alpha \beta t^{\alpha-1} \exp(-\beta t^\alpha); \quad \begin{array}{l} t > 0 \\ \alpha > 0 \\ \beta > 0 \end{array}$$

şeklinde gösterilmektedir. Bu ifadede  $\alpha$  ve  $\beta$  parametreler,  $t$  ise değişkendir.

Weibull dağılımının parametrelerinin kestirimi için, daha önce üstünlükleri belirtilen **en büyük** benzerlik yönteminden yararlanılacaktır. Bu nedenle önce **en büyük** benzerlik fonksiyonu elde edilmelidir. Söz konusu **en büyük** benzerlik fonksiyonu,

$$L(t_i; \alpha, \beta) = \prod_{i=1}^n \alpha \beta t_i^{\alpha-1} \exp(-\beta t_i^\alpha)$$

şeklinde dir. **En büyük** benzerlik yönteminin gereği olarak fonksiyonun e tabanına göre logaritması alınır;

$$\mathcal{L} = \ln L = n \ln \alpha + n \ln \beta + (\alpha - 1) \sum_{i=1}^n \ln t_i - \beta \sum_{i=1}^n t_i^\alpha$$

Fonksiyonun  $\alpha$  ve  $\beta$  'ya göre kısmi türevleri alındığında,

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \alpha} = \frac{n}{\alpha} + \sum_{i=1}^n \ln t_i - \sum_{i=1}^n t_i \ln t_i$$

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} = \frac{n}{\hat{\beta}} - \sum_{i=1}^n \frac{\hat{\alpha}}{t_i}$$

elde edilir. Bunlar sıfıra eşitlenip,  $\hat{\alpha}$  ve  $\hat{\beta}$  için çözüldüğünde, aşağıdaki ifadeler elde edilir:

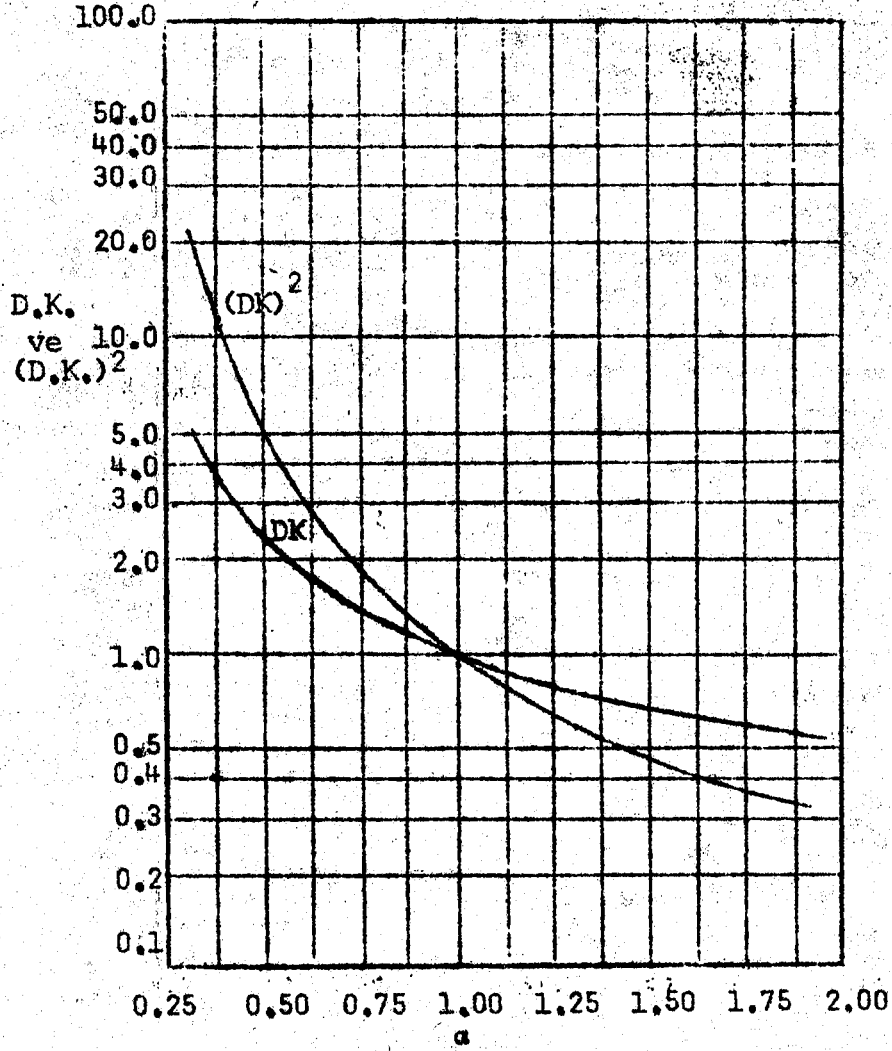
$$\hat{\alpha} = \frac{n}{\hat{\beta} \sum_{i=1}^n t_i^{\hat{\alpha}} \ln t_i - \sum_{i=1}^n \ln t_i}$$

$$\hat{\beta} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n t_i^{\hat{\alpha}}}$$

Kestirimi düşünülen parametrelerden Ek 3-A'daki grafik ve/veya Ek 3-B'deki tablodan D.K. ve (D.K)<sup>2</sup> yardımıyla bulunur. Bulunan  $\hat{\alpha}$  değeri  $\hat{\beta}$  'i hesaplamada kullanılan eşitlikte yerine konularak  $\hat{\beta}$  değeri kestirilir. Böylece söz konusu dağılımın parametreleri bulunur.

EK: 3 - A

WEIBULL OLASILIK YOĞUNLUK FONKSİYONUNUN  
 $\alpha$  PARAMETRESİ İLE D.K. ARASINDAKİ İLİŞKİYİ  
GÜSTEREN GRAFİK (\*)



(\*) Kaynak: COHEN, a.g.m.



EK: 3-B

WEIBULL OLASILIK YOĞUNLUK FONKSİYONUNUN  $\alpha$  PARAMETRESİ

İLE  $(DK)^{-1}$  ARASINDAKİ İLİŞKİ (\*)

$\alpha$	$(DK)^{-1}$	$\alpha$	$(DK)^{-1}$	$\alpha$	$(DK)^{-1}$
1,00	1,0000	3,35	3,0379	4,70	4,1262
1,10	1,0986	3,40	3,0788	4,75	4,1662
1,20	1,1949	3,45	3,1193	4,80	4,2061
1,30	1,2891	3,50	3,1600	4,85	4,2461
1,40	1,3817	3,55	3,2006	4,90	4,2860
1,50	1,4728	3,60	3,2411	4,95	4,3259
1,60	1,5627	3,65	3,2817	5,00	4,3658
1,70	1,6516	3,70	3,3222	5,05	4,4057
1,80	1,7395	3,75	3,3626	5,10	4,4455
1,90	1,8266	3,80	3,4031	5,15	4,4853
2,00	1,9131	3,85	3,4435	5,20	4,5252
2,10	1,9988	3,90	3,4838	5,25	4,5650
2,20	2,0841	3,95	3,5242	5,30	4,6048
2,30	2,1638	4,00	3,5645	5,35	4,6445
2,40	2,2531	4,05	3,6048	5,40	4,6843
2,50	2,3369	4,10	3,6450	5,60	4,8433
2,60	2,4205	4,15	3,6825	5,80	5,0020
2,70	2,5036	4,20	3,7255	6,00	5,1606
2,80	2,5865	4,25	3,7656	6,20	5,3191
2,90	2,6691	4,30	3,8058	6,40	5,4774
3,00	2,7514	4,35	3,8459	6,60	5,6356
3,05	2,7925	4,40	3,8860	6,80	5,7936
3,10	2,8335	4,45	3,9261	7,00	5,9516
3,15	2,8745	4,50	3,9662	7,20	6,1095
3,20	2,9154	4,55	4,0062	7,60	6,4249
3,25	2,9563	4,60	4,0462	8,00	6,7400
3,30	2,9971	4,65	4,0862		

(\*) Pandu R. Tadikamalla, "Applications of the Weibull Distribution in Inventory Control", Journal of O. R. Society Vol. 29, Number 1, 1978, Jan. s. 81.

## YARARLANILAN KAYNAKLAR

- ACKOFF, R.L. /  
ACKOFF, R.L. : "Systems Organizations and Interdisciplinary Research", Systems Thinking, Edited by F.E.EMERY, Penguin Books Limited, Harmonds-Worth, Middlesex, England, 1969.
- ACKOFF, R.L./  
SASIENI, M.W. : Fundamentals of Operations Research, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1968.
- AMSTADTER, B.L. : Reliability Mathematics, McGraw-Hill Book Company, New York, 1971.
- BARLOW, R.E./  
PROSCHAN, F. : Statistical Theory of Reliability and Life Testing, Holt, Rinehart and Winston, Inc., New York, 1975.
- BAZOVSKY, I. : Reliability Theory and Practice, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1961.
- BOMPAS-SMITH, J.H. : Mechanical Survival: The Use of Reliability Data, McGraw-Hill Book Company, London, 1973.
- BROWN, R.G. : Statistical Forecasting for Inventory Control, McGraw-Hill Book Company, New York, 1959.
- CALABRO, S.R. : Reliability Principles and Practices, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1962.

- CANAVOS, G.C./  
TNOKOS, C.P. : "Bayesian Estimation of Life Parameters in the Weibull Distribution", Operations Research, Volume 21, Number 3, May-June 1973, ORSA.
- CARTER- ADS. : Mechanical Reliability, The MacMillan Press Ltd., London, 1972.
- CHANG, E.Y./  
THOMPSON, W.E. : "Bayes Analysis of Reliability for Complex Systems", Operations Research, Vol. 24, No.1, Jan.-Feb., 1976.
- COHEN, A.C. : "Maximum Likelihood Estimation in the Weibull Distribution Based On Complete and on Censored Samples", Technometrics, Vol.7, No.4, Nov. 1965.
- CORDER, A. : Maintenance Management Techniques, McGraw-Hill Book Company England, 1976.
- COUTINHO, J.de.S. : "Program Management", Reliability Control, in Aerospace Equipment Development, Society of Automotive Society of Automotive Engineers, Technical Progress Series, Volume 4, New York, 1963.
- CUNNINGHAM, G.E../  
COX, W. : Applied Maintainability Engineering, John Wiley and Sons, New York, 1972.
- ÇÖMLEKÇİ, N. : İstatistik (II. Baskı) Kalite Matbaası, Ankara, 1979.
- DIXON, W.J./  
MASSEY, J.M. : Introduction to Statistical Analysis, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1957.

- DİCLE, İ.A./  
DİCLE, Ü.
- DUMMER, G.W.A./  
WINTON, R.C.
- ELDEKTON.
- EPSTEIN
- GERTSBAKH, İ.B./  
KORDONSKY, Kh.B.
- GNEDENKO, B.V./  
BELYAYEV, YU.K./  
SOLOVYEV, A.D.
- GREEN, A.E./  
BOURNE, A.J.
- HILLIER, F.S./  
LIEBERMAN, G.J.
- IRESON, W.G.(Editör)
- JARDINE, AKS.
- : "Sistem Kuramı ve Toplumsal Örgütlere Uygulanışı", Amme İdaresi Dergisi, Cilt 2, Sayı 4, Aralık 1969.
- : An Elementary Guide to Reliability, Pergamon Press, Oxford, 1974.
- : Frequency Curves and Correlation, (3B), London, 1938.
- : "Statistical Methods in Life Testing and Reliability", Edited by Daniel GROUGHKO, Operations Research and Reliability, Gordon and Beach, Science Publishers, London, 1971.
- : Models of Failure, Springer-Verlag, New York, 1969.
- : Mathematical Methods of Reliability Theory, Academic Press, New York, 1969.
- : Reliability Technology, Wiley Interscience, John Wiley and Sons Ltd., London, 1972.
- : Introduction to Operations Research, Holden Day, Inc., San Fransisco, 1970.
- : Reliability Handbook, McGraw-Hill Book Company, New York, 1966.
- : Maintenance, Replacement and Reliability, John Wiley and Sons, New York, 1973.

- KARA, İ. : "Yöneylem Araştırması ve İşletmecilikteki Yeri", ESADER, Cilt IX, Sayı 2, Haziran 1973, E.İ.T.İ.A., Eskişehir.
- KARA, İ. : "Rastnal Sürec Olarak Markov Zincirleri", ESADER, Cilt XV, Sayı 2, Haziran 1979, EİTİA, Eskişehir.
- KARA, İ. : Servis Sistemleri ve Gelişler Zamana Bağlı Olduğunda Kapasite Sorununa Matematiksel Yaklaşım, EİTİA Yayını, Eskişehir, 1976.
- KIVEHSON, G. : Durability and Reliability In Engineering Design, Hayden Book Company Inc., New York, 1971.
- LANDERS, R.L. : Reliability and Product Assurance, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1963.
- LLOYD, A.K./  
LIPOW, M. : Reliability: Management, Methods and Mathematics, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1964.
- MANN, N./  
SCHAFER, R.E./  
SINGPURWALLA, N.D. : Methods for Statistical Analysis of Reliability and Life Data, John Wiley and Sons, New York, 1974.
- MAYNARD, H.B.(Editör) : Industrial Engineering Handbook, McGraw-Hill Book Company, New York, 1956.
- MCMILLAN C./  
GONZALES, R.F. : Systems Analysis, R.D.Irwing, Inc., USA, 1965.

- MOOD, A.M./  
GRAYBILL, F.A. : Introduction to the Theory of Statistics, McGraw-Hill Book Company, New York, 1963.
- MYERS, R.H. : "Reliability Testing", Editor: MYERS, WONS, GORDY; Reliability Engineering for Electronic Systems, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1964.
- NAKAGAWA-SHUNJI, T. : "Reliability Analysis of One-Unit System with Unrepairable Spare Unit and Its Optimization Applications", Operations Research Quarterly, Vol.27. Number 1, 1976.
- NEWBROUGH, E.T. : Effective Maintenance Management, McGraw-Hill Book Company, New York, 1967.
- OYMAN, B. : "Bakım İşlerinde Personel Sorunları" Bakım ve Tamir Sorunları Sempozyumu, MPM Yayınları, No. 112, Ankara, 1972.
- PEGNUM, D.F. : Transportation: Economics and Public Policy, Richard D. Irwin, Inc., Homewood, Illinois, USA, 1963.
- PIERUSCHKA, E. : Principles of Reliability, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliff, New Jersey, 1963.
- POLOVKO, A.M. : Fundamentals of Reliability Theory, Academic Press, New York, 1968.
- ROBERTS, N.H. : Mathematical Methods of Reliability Engineering, McGraw-Hill Book Company New York, 1974.

- SAATÇIOĞLU, Ö. : "Sistem Güvenirliliği", Kalite Kontrolü Yöneticiler Toplantısı ve Sempozyumu, MPM Yayınları, Ankara, 1976.
- SARKADI, K./  
VINCZE, I. : Mathematical Methods of Statistical Quality Control, Academic Press, Hungary, 1974.
- STARR, M.K./  
MILLER, D. : Inventory Control: Theory and Practice, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1962.
- SHOOMAN, M.L. : Probabilistic Reliability: An Engineering Approach, McGraw-Hill Book Company, New York, 1968.
- SİNDİREN, ÖZ-ALP, AŞKUN : İşletme Politikası, Emel Matbaası, Ankara, 1971.
- TADIKAMALLA, P.R. : "Applications of the Weibull Distribution in Inventory Control", Journal of O.R. Society, Vol.29, Number 1, Jan. 1978.
- UZGÖREN, N. : İstatistik Analizi, (Teksir), İstanbul.
- VON ALVEN, W.H. : Reliability Engineering, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1964.
- YÜZER, A.F. : İşletme Yönetiminde Kâr-Zarar Bütçesine Olasılıklı Yaklaşım, (Basılmamış Doktora Tezi), EİTİA, Eskişehir.