

21872

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNSAN HATALARINI SAYISALLAŞTIRMAK İÇİN BİR MODEL

DOKTORA TEZİ

Y.Müh. Coşkun ÖZKAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12 Ağustos 1992

Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Eylül 1992

Tez Danışmanı : Prof.Dr.Ahmet F.ÖZOK

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr.Coşkun Külür

Prof.Dr.Turay GÖKÇEN

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

EYLÜL 1992

ÖNSÖZ

İnsan hatası insanlık tarihi kadar eski. Muhtemelen insanın yeryüzüne doğuşu ile birlikte insan hatası da ortaya çıktı. İnsan varlığının kaçınılmaz bir sonucu olan insan hatalarını anlamaya, tahmin etmeye ve önlemeye yönelik çabalar ise çok daha yeni. Bu alandaki çabaların ivme kazanması son yüzyılda yaşanan teknolojik gelişmelerin bir sonucu olmuştur. İnsan, kendi yarattığı büyük ve karmaşık sistemlerin içinde hiç ummadığı karmaşık durumlarla karşılaşabilmektedir. İnsan hataları böyle sistemlerde doğurabilecekleri sonuçlar nedeniyle büyük önem kazanmışlardır. Örneğin, geçmiş yıllarda gerçekleşen uçak kazalarının % 70'den fazlasının insan hatasından kaynaklandığı havacılıkla ilgili çeşitli kuruluşlarca bildirilmektedir.

Bu gerçekler insan hatalarını inceleme ve insan güvenilirliğini geliştirme konusunda farklı amaç ve disiplinden birçok araştırmacının ilgisine neden olmuştur ve oluşturmaya devam etmektedir. Konuya bazı araştırmalarda iş emniyeti, bazılarında güvenilirlik ve risk tayini gözlüğü ile bakılmış, kimi araştırmacılar insan hatasının maddi nedenlerini kimi ise hataya götüren psikolojik mekanizmaları incelemişlerdir. Bu çalışma da aynı saptamalardan destek alarak, insan hatalarını sayısal olarak incelemeyi amaçlamaktadır.

Bana İnsan hataları gibi önemli bir konuda, bulanık kümeler kuramı gibi güncel bir matematik araçla çalışma fırsatı veren, tez süresince maddi-manevi desteğiyle beni teşvik eden, yönlendiren, detaycı, şüpheci, titiz bilimselliği ile tezimi kontrol eden ve yöneten Hocam Sayın Prof.Dr.Ahmet Fahri Özok'a özel teşekkür borçluyum. Bu günümdeki yeri doldurulamaz katkıları için sevgili aileme, tezin yazımını gerçekleştiren ve sıkıntılarımı yüksünmeden paylaşan sevgili eşim Müjgan'a içten teşekkürler..

Ağustos 1992

Coşkun ÖZKAN

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	x
SUMMARY.....	xi
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. İNSAN-MAKİNA SİSTEMİ	3
2.1. Sistem Yaklaşımı.....	3
2.2. İnsan Makina Sistemi Tanımı.....	4
2.2.1. İnsan-Makina Sisteminin Yapısal Analizi.....	4
2.2.2. İnsan-Makina Sisteminin Fonksiyonel Analizi.....	6
2.3. İnsan Çalışması ve Sınıflandırılması.....	6
2.4. Zihinsel Çalışma ve Sınıflandırılması.....	10
2.5. Bir Kontrol Çevrimi Olarak İnsan-Makina Sistemi....	13
BÖLÜM 3. İNSAN-MAKİNA SİSTEMİNDE İNSAN DAVRANIŞI VE PERFORMANS.....	15
3.1. İnsan-Makina Sistemi Performansı.....	15
3.2. İnsan-Makina Sisteminde Performansın Değerlendirilmesi.....	16
3.3. İnsan-Makina Sistemlerinde İnsan Davranışı.....	18
3.3.1. İnsan Davranışının Elemanları: S-O-R Paradigma..	18
3.3.2. İnsan Davranış Türleri.....	19
3.3.3. İnsanda Ana Fonksiyonlar.....	19
BÖLÜM 4. İNSAN HATALARI.....	23
4.1. İnsan Hatası Nedir?.....	23
4.2. İnsan Hatalarının İncelenmesinde Nedensel Yaklaşım	25
4.2.1. İnsan Hataları Nasıl Doğar?.....	25
4.2.2. İnsan Hatalarının Sınıflandırılması.....	27
4.2.2.1. Sebeplerine Göre Hata Sınıflaması.....	28
4.2.2.2. Sonuçlarına Göre Hata Sınıflaması.....	29
4.2.2.3. Meydana Geldiği Aşamaya Göre Hata Sınıflaması.	31
4.2.2.4. Davranış Esaslı Hata Sınıflaması.....	33
4.2.3. İnsan Hatasının Oluşumunda Rol Alan Faktörler...	39

BÖLÜM 5. İNSAN GÜVENİLİRLİĞİ.....	43
5.1. Teknik Sistemlerde Güvenilirlik.....	43
5.2. İnsan Güvenilirliği ve Analizi.....	44
5.3. İnsan Güvenilirliği Analiz Yöntemleri.....	45
5.3.1. İnsan Güvenilirliğinde Temel Bilgiler.....	46
5.3.1.1. Sürekli Görevlerde İnsan Güvenilirliği ve İnsan Hata Oranı.....	46
5.3.1.2. Kesikli Görevlerde İnsan Güvenilirliği ve İnsan Hata Probabilitesi.....	49
5.3.1.3. Sistem Güvenilirliği.....	50
5.3.2. Görev Kritikliği Analizi.....	51
5.3.2.1. Görev Analizi.....	52
5.3.2.2. Zamansal Analiz.....	53
5.3.2.3. Hataların ve Etkilerinin Analizi.....	53
5.3.2.4. Kantitatif Analiz.....	54
5.3.3. Arıza Ağacı Analizi.....	56
5.3.3.1. Sistemin Tanımlanması ve Arıza Ağacının Kurulması.....	58
5.3.3.2. Kalitatif Analiz.....	59
5.3.3.3. Kantitatif Analiz.....	62
5.3.3.4. Eleştiri.....	63
5.3.4. Operatör Faaliyet Ağacı.....	64
5.3.5. İnsan Hata Oranı Belirleme Tekniği.....	67
5.3.5.1. İHOBT'nin Uygulanması.....	67
5.3.5.2. İHP'lerin Tayini.....	70
5.3.5.3. Bağımlılık.....	71
5.3.5.4. İHOBT'nin Çıktıları ve Duyarlılık Analizleri..	72
5.3.6. İnsan Güvenilirliğinde Simülasyon.....	73
BÖLÜM 6. İNSAN GÜVENİLİRLİĞİ ALANINDA VERİ PROBLEMİ.....	76
6.1. İnsan Güvenilirliği Veri Kaynakları.....	76
6.2. Uzman Yargısı Teknikleri.....	77
6.2.1. Sıralama Tekniği.....	78
6.2.2. İkili Karşılaştırma Tekniği.....	79
6.2.3. Doğrudan Sayısal Tahmin Tekniği.....	79
6.2.4. Başarı İhtimali Endeksi Yöntemi.....	79
6.3. Veri Tabanı Oluşturma Girişimleri: Veri Bankaları.	81

BÖLÜM 7. BULANIK KÜMELER KURAMI VE GÜVENİLİRLİK.....	84
7.1. Bulanık Kümelerin Esasları.....	84
7.2. Bulanık Kümelerde Temel Küme İşlemleri.....	86
7.3. Bulanık Sayılarda Cebirsel İşlemler.....	87
7.4. Dilsel Değişkenler ve Bulanık Küme Analizi.....	89
7.5. Güvenilirlik Alanında Bulanık Küme Çalışmaları...	91
BÖLÜM 8. İNSAN HATALARININ BULANIK KÜMELER KURAMI İLE SAYISALLAŞTIRILMASI İÇİN BİR MODEL ÖNERİSİ.....	93
8.1. Çalışmanın Amacı.....	93
8.2. Modelin Kapsamı.....	93
8.3. Çalışmanın Gerekçeleri.....	93
8.4. Geliştirilen Model.....	98
8.4.1. Sistem Analizi.....	98
8.4.2. Girdilerin Tayini.....	100
8.4.2.1. Hata ve Arıza Olabilirliği.....	100
8.4.2.2. Sistemi Etkileme Derecesi.....	100
8.4.2.3. Bağımlılık.....	101
8.4.3. Kantitatif Analiz.....	102
8.4.3.1. Dal Olabilirliklerinin Hesabı.....	102
8.4.3.2. Dal Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	104
8.5. Modelin Uygulanması.....	107
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	113
KAYNAKLAR.....	118
EKLER.....	125
ÖZGEÇMİŞ.....	135

NOTASYON LİSTESİ

$h(t)$	: arıza oranı
$e(t)$	: insan hata oranı
T_1	: ilk hataya kadar geçen süre
e_1	: ilk hata oranı
R	: güvenilirlik
r	: hata sayısı
$N(t_1, t_2)$	: $[t_1, t_2]$ zaman aralığında toplam hata sayısı
N_L	: N için alt sınır
N_U	: N için üst sınır
E_i	: i sınıfından bir insan hatasının belirli bir görev süresince ortaya çıkma probabilitesi
F_{ij}	: i sınıfından bir hatanın j sonucunu doğurması probabilitesi
Q_i	: belirli bir görev sırasında i sınıfından bir insan hatası sonucunda sistemin aksaması probabilitesi
Q_T	: belirli bir görev sırasında meydana gelen bir veya daha fazla insan hatası sonucunda sistemin aksaması probabilitesi
R_T	: görevin öngörülen süre ve koşullarda başarıyla yerine getirilmesi probabilitesi
S_{ij}	: i sınıfından bir insan hatasına ait j sonucunun oluşturacağı muhtemel etkinin şiddeti
C_{Eij}	: i hatasının ortaya çıkması halinde yol açacağı j sonucunun sistemi aksatma potansiyeli
C_{Ei}	: i sınıfından bir hatanın gerçekleşmesi halinde doğuracağı bir ya da daha fazla sonucun potansiyeli
C_i	: i sınıfından bir insan hatasının kritiklik tahmini
C_T	: görev kritiklik tahmini
C_m	: N adet görevden oluşan bir görev dizisinde insan performansının kritikliği
$\mu_A(x)$	: x 'in A kümesine üyelik derecesi
X	: evrensel küme
$\min$	: minimum
$\max$	: maksimum
U	: birleşim
$\cap$	: kesişim
$\circ$	: bulanık aritmetik işlem
$P(i, j)$	: i . daldaki j . olayın gerçekleşme olabilirliğine ait bulanık küme
$P_k(i, j)$	: i . daldaki j . olayın koşullu gerçekleşme olabilirliğine ait bulanık küme
P_i	: i . dalın koşullu gerçekleşme olabilirliği
$B(i, j)$	: i . daldaki j . olayın kendinden önce gelen olaya bağımlılığını gösteren bulanık küme
C_s	: C bulanık kümesine ait sıralı destek kümesi
C_{ind}	: C kümesinin eliminasyon sonucunda indirgenmiş destek kümesi
K_i	: i . dalın kritikliğini ifade eden bulanık küme

S_i : i. dal için gerekleŖme olabilirliğine ait bulanık küme
Supp A : A bulanık kümesine ait destek kümesi
sup : supremum
 S_{im} : i. dala ait maksimizasyon kümesi
 S_{io} : i. dala ait birleŖik küme
 D_o : değerlendirme kümesi
 D_{on} : normalize edilmiŖ değerlendirme kümesi



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2-1	İnsan Makina Sistemi.....	5
Şekil 2-2	Farklı Düzeydeki İ-M Sistemlerinde Kısmi Fonksiyonların Paylaşımı.....	7
Şekil 2-3	İnsan Enformasyon İşleme Mekanizması.....	12
Şekil 2-4	Bir İnsan-Makina Sistemi Örneği.....	14
Şekil 3-1	İnsan Performansının Ortaya Çıkışı.....	15
Şekil 3-2	İ-M Sisteminde İnsanın Ana Fonksiyonları.....	21
Şekil 4-1	İ-M Sisteminde İnsan Hatalarının Ortaya Çıkışı..	26
Şekil 4-2	Operatör Görevlerinde Kavramsal Model.....	37
Şekil 4-3	Performansı Etkileyen Faktör Grupları.....	39
Şekil 5-1	Tekrarlı Olay İçeren Bir Arıza Ağacı.....	61
Şekil 5-2	Temel Operatör Faaliyet Ağacı Örneği.....	65
Şekil 5-3	Zaman-Güvenilirlik Eğrisi.....	66
Şekil 5-4	Bir Olay Ağacı Örneği.....	69
Şekil 7-1	Örnek Bulanık Kümelerin Gösterimi.....	90
Şekil 8-1	Basitleştirilmiş Ağaç Şeması Örneği.....	99

TABLO LİSTESİ

Tablo 2-1	Sistem Sınıflaması.....	4
Tablo 2-2	İnsan Çalışmasının Grupları.....	9
Tablo 2-3	Darboğaz Oluşturan Bloğa Göre Çalışma Türleri....	13
Tablo 3-1	İ-M Sistemini ve Sistem Performansını Değerlendirme Ölçütleri.....	17
Tablo 3-2	Görevle ilgili Davranışların Sınıflanması.....	20
Tablo 4-1	İnsan Nedenli Arızalar.....	30
Tablo 4-2	Nükleer Silah Üretiminde Rastlanılan Bazı İşçilik Hataları ve Oranları.....	32
Tablo 4-3	Hata Sınıflama Sistemi.....	34
Tablo 4-4	İki Düzeyli Sınıflama Sistemi.....	38
Tablo 4-5	Performansı Etkileyen Faktörler.....	41
Tablo 5-1	Hata Sınıfları ve S _{ij} Değerleri.....	55
Tablo 5-2	Arıza Ağacı Olay Sembolleri.....	58
Tablo 5-3	Arıza Ağacı Kapı Sembolleri.....	59
Tablo 5-4	İHOBT'nin Uygulanmasında Ana Adımlar.....	68
Tablo 5-5	Bağımlılık Düzeyleri.....	72
Tablo 6-1	Kumanda Levyesi Kullanımında Zaman ve Güvenilirlik Verileri.....	82
Tablo 8-1	Örnekteki Olaylara Ait Gerçekleşme Olabilirlikleri ve Bağımlılık Değerleri.....	108
Tablo 8-2	Örnekteki Dallara Ait Kritiklik Değerleri.....	108

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, İ-M sistemlerinde insan hatalarına yönelik literatürü incelemek ve insan hatalarının sayısallaştırılmasına yönelik bir model geliştirmektir.

İlk bölümde insan hatalarına yönelik çalışmalara değinilmektedir.

İkinci bölüm insan çalışmasının gerçekleştiği ve insan hatalarının meydana geldiği İ-M sistemini tanımaya ayrılmaktadır.

Üçüncü bölümün konusunu insan davranışları ve bu davranışların İ-M sistemindeki sonucu olan insan performansı oluşturmaktadır. İnsan davranışının esasları, performansın ortaya çıkışı ve değerlendirilmesi bu bölümde incelenmektedir.

İnsan performansının bir parçası olan insan hatalarını inceleyen nedensel yaklaşım dördüncü bölümde ele alınmaktadır. İnsan hatası nedir, nasıl ortaya çıkar, sebepleri-sonuçları nelerdir, ve nasıl sınıflanır, sorularına yönelik literatür bu bölümde araştırılmaktadır.

Beşinci bölüm insan hatalarını sayısal olarak inceleyen insan güvenilirliği konusuna ayrılmıştır. İnsan güvenilirliği kavramı, konunun esasları tanıtılarak, insan güvenilirliği analizi için geliştirilmiş yöntemler bu bölümde tartışılmaktadır.

Altıncı bölüm insan güvenilirliği alanında önemli yer tutan veri problemi ile ilgilidir. Güvenilirlik alanında veri elde edilebilen kaynaklar ile veri tabanı oluşturma girişimleri tanıtılmaktadır.

Yedinci bölümde, bu çalışmadaki kullanımına ışık tutmak üzere, bulanık küme kavramı, bazı özellikleri ve dilsel değişken kavramı açıklanmakta ve güvenilirlik alanındaki bulanık küme uygulamaları belirlenmektedir.

İnsan hatalarını sayısal olarak incelemek üzere geliştirilen model sekizinci bölümde yer almaktadır. Modelin amacı, kapsamı ve dayandığı gerekçeler tespit edilmektedir. Üç aşamadan oluşan model açıklanarak, fiktif bir örnek üzerinde uygulama yapılmaktadır. Model matematik araç olarak bulanık kümeler kuramını kullanmaktadır. Sayısal değerlendirme, geliştirilen bilgisayar programı ile gerçekleştirilmektedir.

Son kısım çalışmanın sonuçlarını, bu alanda mevcut problemleri ve potansiyel çalışma konularına dair önerileri içermektedir.

SUMMARY

A MODEL FOR QUANTIFYING OF HUMAN ERROR

The word machine is used in a generic sense to imply any piece of device or facility with some useful purpose. The pencil we write with, the woods and irons we play golf with are, in this sense, just as much machines as the lathe in a factory or the plant itself. The same applies for aircrafts, nuclear reactors, space ships, etc., up in the spectrum of technical complexities.

Since machines are designed and built for human use, humans are involved in every man-machine system. Thus, man is not a being independent of the system, an entity that only operates or controls a machine aloof from the rest of the system. Rather, he is an active part of the system, at least even as a monitor, and as such he contributes those capabilities which are uniquely his.

The entire man-machine system operates in an environment of temperature, humidity, illumination, noise, vibration, acceleration, circadian rhythm, etc. These environmental factors, to one degree or another, affect the performance of the system components, man or machine.

Single man-machine systems can be combined into a larger system. In such a system, the several man-machine subsystems may interact with each other, the functions of one subsystem depending upon the efficient functioning of another. Alternatively, a system may consist of one machine and several humans, for example, as an aircraft navigated by two pilots (personnel redundancy); or one human may form the link between several machines.

For a man-machine system to function well, its purpose should be clearly defined and "understood", not only by the operator, but by the various machine components involved. This implies that individual components are well matched to each other by carefully balancing the functions of man and machine, that their contributions to overall performance are clearly defined. And for this purpose, the various capabilities and limitations of man should be carefully taken into consideration.

The current trend toward automation is altering the nature of human involvement in the man-machine systems. For example, some of the functions formerly carried out exclusively by hand or with hand tools have become mechanized, thereby shifting the human contribution more towards the operation and maintenance of machines.

In automatic operations, the consequences of a human error.. an incorrect reading of a display, a minor lapse of memory, a failure to notice a warning signal, a skipping of a small procedural detail, or a misunderstanding of instructions.. are usually much greater than in a conventional operation. Because of the high capital investment required for an automatic installation, downtime can be very expensive. Because of the faster pace of the machines, time spent in producing unusable products can be very costly, from the excessive waste of

material. Because of the large scale, damage or injury can range widely, even precipitating the loss of many lives.

Every man-machine system contains certain functions that must be performed by man. Even the so-called fully automated systems need human interventions in monitoring and maintaining. If the variability in human performance is recognized as inevitable, then it is easy to understand that when humans are involved, errors will be made, regardless of the level of training, experience, or skill.

As the man-machine systems are required to become more reliable, human influence becomes more and more important. The effort that is sometimes spent in designing ultrareliable equipment is often negated by human error.

Two major approaches can be taken to characterizing human error: probabilistic and causal. Human reliability analysis is concerned with the qualitative and quantitative analysis of human errors and its subsequent reduction. This approach is typically pursued by those who are interested in the human reliability aspects of risk analysis.

In contrast to reliability analysis the causal approach to characterizing human error is based on the premise that errors are seldom random and, in fact, can be traced to causes and contributing factors which, once isolated, can perhaps be eliminated or at least ameliorated and subsequently modifying system designs and training programs.

Human errors are said to occur when the performance is outside of predefined tolerance limits. One should not assume that all errors are alike in terms of their causes or their effects on the systems or their mechanisms. Errors may be classified in various ways.

1. In terms of what caused the error
2. In terms of what the error consequences are
3. In terms of the stage of systems development in which the errors occurred.
4. Behavior-oriented.

Frequently, successful man-machine system performance depends on the successful performance of each and every component, man or machine. The human operator is inherently less stable than the machine. His performance is influenced by many more conditions: his physiological condition, fatigue, amount of learning, and incentives, the work environment (e.g., temperature, humidity), among numerous other factors.

As above cited not all human errors, however, are the same in terms of their cause, mechanism, and consequences. Another measure often used to indicate the effectiveness of the human component in a man-machine system is the frequency of the system or machine failures caused by various human errors.

Although human errors generally affect the speed and accuracy of mission accomplishment, they do not necessarily affect the condition of the machines, don't do they necessarily cause the failure of the system mission. On the other hand, slightly different from the trivial errors of omission or commission are the human initiated failures, which typically prevent the system from accomplishing its mission, if the nature of the failure is serious enough. Human errors that do not result in system failure are often reversible, whereas errors causing human initiated failures cannot be reversed, because failed machines usually cannot restore themselves.

The role played by human errors in overall system unreliability cannot be taken lightly. The high incidence of human error in the operation of man-machine systems is well documented by many investigators.

Reliability is generally defined as "the probability that an item will operate adequately for a specified period of time in its intended application".

Although the main focus of quantitative reliability has been on hardware portion of man-machine systems applied to the performance of functional objects, the general concept of reliability can be extended naturally and easily also to human activity.

The purpose of human reliability analysis is to analyze the man-machine system and predict the potential for human error. Human error probabilities or human reliabilities are useful not only in estimating man-machine system reliability, but also in other Human Engineering activities such as allocating functions between man and machine (based on reliabilities with and without the human), quantifying the error likelihood and consequences of human engineered equipment, and estimating the success of personnel training programs.

Reliability is the antithesis of error likelihood. Human reliability is then defined as the probability that his performance will be error-free for a specified duration.

Human performance concerns both time-discrete and time-continuous task. Data on reliability are expressed in terms of failures per event for the first and of failures per unit time for the second. By combining these measures in assorted ways, the analyst can calculate a total reliability figure for human performance in some specific task or job.

The best way of obtaining an human error probability in a task is to directly observe the errors committed in the task. One major problem with this approach is that it is only applicable to those installations and tasks for which empirical data are available. Further, the trend toward large, centralized systems does not foster the availability of direct empirical probability data on human involvement in complex, rare event.

Numerous techniques have been proposed for predicting the performance of the human component of the man-machine system. The techniques take one of two general approaches: analytical or simulation. Since each technique is specifically applicable to some particular types of tasks and systems, there is no general purpose methodology.

The basic theoretical underpinnings of human reliability derive from conventional hardware reliability theory. Individual component reliabilities are combined according to the system configuration and its operation sequences. Human task sequences can be modeled in a similar manner. Human reliability figures for component task are combined mathematically to synthesize the error probability for the entire task sequence.

Thus, the general approach is to divide human behavior in a system into small behavioral units, find data for these subdivisions and then to estimate the error probabilities for the task. Until one have the error frequency data on the whole task in question, this type of decomposition and recomposition is often necessary.

The general procedure common to most of the predictive techniques are as follows:

- 1- As the bases for prediction, the behavioral units (e.g. subtasks, tasks, functions) are determined from the function/task analysis of the system.
- 2- Important parameters for the behavioral units are determined, such as operator function, display/control organization, availability of feedback information, required response accuracy, etc.
- 3- Input data are assigned to the behavioral units.
- 4- The measures for the combined behavioral units are derived either through probabilistic analysis or simulation of the behavioral operations.
- 5- The overall system reliability is predicted by combining the final predicted behavioral-reliability and the machine reliability.

Monte-Carlo modeling of man-machine systems can include human and equipment variables. The purpose of the technique is to indicate where the system may overload or underload its personnel and to determine whether the average operator can complete all required tasks on time.

Although the combinative techniques are very similar for the hardware and human reliability analysis, estimating the human task element reliabilities are not straightforward. The human is inherently less stable than the machine; he is influenced by various behavioral factors such as physiological condition, fatigue, the work environment, amount of learning, and incentives, etc.

One of the complications in modeling tasks as sequences of behaviors is the dependence among the task elements. Two events are independent if the conditional probability of one event is the same whether the other event has occurred or not.

Dependence can occur between people working on a task and also between an individual as several related tasks are performed. Failure to take dependence into account can underestimate task error probabilities.

The most serious problem in the rather young field of human reliability is the lack of data. All human reliability analysis techniques require human error data at some point in their analysis-prediction processes.

Material attempts at constructing formal human error data bases have been few. An impediment to the mass aggregation of human error data is the variation in the type of sources from which the data are collected. There are four basic sources of human error data; the field, simulator activities, laboratory experiments, and expert judgment.

Fuzzy set theory or possibility theory is based on a recognition that certain sets have imprecise boundaries. The imprecision of fuzzy set deals with the shades of membership of an object in a set with imprecise boundaries, whereas the randomness of probability theory deals with uncertainty regarding the occurrence or nonoccurrence of some event. An important motivation for the fuzzy set theory is that much, perhaps most, of human reasoning is based on information that is possibilistic rather than probabilistic in nature.

The purpose of this study is to develop an analytical model to quantify the human error using fuzzy sets concept. Despite individual differences between analytical and simulation methods, all of the human reliability analysis techniques requires numerical data. However in many cases the available information about the required inputs is not numerical. Rather this information can be expressed as words or phrases in a natural language termed linguistic variables. Subjective judgment plays an important role in the reliability area. The fuzzy sets theory offers an appropriate tool for handling this type of uncertainty.

The procedure of the proposed model consists of three steps.

1. Step: System analysis by the simplified three chart.
2. Step: Assigning selected input data expressed in natural language
3. Step: Combining task/function elements using fuzzy sets concept.

The main input of the model is the error/failure possibility. Other factors covered in this study are, dependence and criticality, which play an important role in the overall system reliability. Both factors are expressed in natural language and quantified with fuzzy sets, too.

A computer program is developed, for the computations in the third step.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

İnsan-Makina sisteminde insan görevini yerine getirmesi sırasında her zaman bekleneni veremeyebilir. İnsan performansının tolere edilen sınırların dışına taşıdığı bu tür durumlarda bir insan hatası söz konusudur. İnsanın yaradılışı itibariyle değişken olduğu dikkate alındığında hatanın insan performansının ayrılmaz bir parçası olduğu kolaylıkla belirlenebilir.

İnsan hatasının önemi, doğurduğu sosyal ve ekonomik sonuçlara bağlıdır. Bir insan hatası etkisini, çalışan insana zarar vererek doğrudan veya üretim kaybı, ekipman-makina arızası, hasarı veya üçüncü bir şahısa zarar vermek şeklinde dolaylı olarak gösterebilir. Hızlı teknolojik gelişme ve büyük, merkezi tesislerin kurulması yönündeki eğilim, insanı gitgide daha karmaşık iş ortamları ve daha nadir durumlar ile karşı karşıya getirmektedir. Sistemlerin büyüyerek karmaşık hale gelmesi, onların daha güvenilir olmaları gereğini arttırmaktadır. İnsan-makina sistemlerinin güvenilirlikleri, insan ve makina güvenilirliklerinin fonksiyonu olarak ortaya çıkar. İnsan hataları, hataların gerçekleştiği İnsan-Makina sistemlerinin veya daha genel bir deyişle sosyo-teknik sistemlerin bir ürünüdür (Leplat, 1987). Bu nedenle hatayı anlamak öncelikle sistemi, sistemin özellik ve işleyişini anlamayı gerektirir.

İnsan güvenilirliği konusunun, basitçe, işbilim ve güvenilirlik teorisinin ara kesitinden oluştuğunu söylemek, gerçeği tam olarak yansıtmaz. Daha geniş bir açıdan bakıldığında insan çalışmasını, performansını güvenilir kılmak, işbilimin varlık nedenlerindendir. Çünkü işbilim, insanın işini başarıyla gerçekleştirmesini sağlamak üzere insan-makina sisteminde gerekli uyumu yaratmakla yükümlü bir disiplindir. Öte yandan insan güvenilirliği aynı zamanda güvenilirlik teorisinin varoluş nedenidir. Çünkü güvenilirlik teorisi içinde insanı da barındıran sistemleri güvenilir biçimde tasarlamakla yükümlü bir disiplindir.

Güvenilirlik disiplininin başlangıç noktası olarak genellikle İkinci Dünya Savaşı gösterilir. Savaş sırasında Almanlar temel güvenilirlik kavramlarını, roketlerin güvenilirliğini geliştirmek amacıyla kullandılar. 1951 yılında İsveç

Kraliyet Teknoloji Enstitüsü tarafından yayınlanan Weibull dağılımı güvenilirlik teorisinin gelişmesinde önemli rol oynayan bir diğer adım oldu. 1950'li yılların ortaları insan güvenilirliğine yönelik ilginin arttığı bir dönem olarak kabul edilir. Bu dönem süresince Amerikan hava kuvvetlerinde ilk ergonomik standartlar geliştirildi (Meister, 1984). Hettinger (1958) ve Meister (1958) iki ayrı çalışmadan elde ettikleri insan güvenilirliği konusundaki bulgularını yayınladılar. İki yıl sonra 1960'da Shapero ve diğ. (1960) ve LeVan (1960) havacılık alanında iki firma için yürüttükleri güvenilirlik konulu araştırmalarını açıkladılar. Bu iki araştırmada da arızaların önemli bir bölümünün insandan kaynaklanadığı vurgulanmaktadır. İlk veri tabanı girişimi 1962 yılında AIR Data Store (Munger ve diğ.,1962) adı ile yayınlandı. İnsan çalışması için zaman ve güvenilirlik değerlerini içeren bu veri bankası ergonomik tasarımlara yönelikti. 1960'lı yıllar boyunca Rook, Swain, Meister gibi isimler insan güvenilirliği alanında katkılar yaptılar.

İnsan hatalarına yönelik çalışma ve katkılar ilk'leri takiben genişleyerek ve çoğalarak süregelmektedir. Bu katkıların tez konusu ile ilgili önemli bir kısmı, izleyen bölümlerde çeşitli başlıklar altında ele alınmakta ve insan hataları ile insan hatalarını sayısal olarak inceleyen yöntemler tartışılmakta ve insan hatalarını sayısallaştırmaya yönelik bir model önerilmektedir.

BÖLÜM 2. İNSAN-MAKİNA SİSTEMİ

2.1. Sistem Yaklaşımı

Sistem kavramı günümüzde bilim ve teknolojinin bir çok alanında kullanılmaktadır. Bu yönüyle sistem; sistematize etmek, düzenlemek anlamlarını içermektedir. Kullanımdaki alan çeşitliliği gibi kavramın tanımında da çeşitlilik gözlenmektedir.

Belirli bir amacı gerçekleştirmek üzere biraraya gelmiş elemanlar bütünü olarak tanımlanan bir sistem genel olarak

- sistem sınırları
- sistem elemanları
- sistem elemanlarının birbirleri ve sistem çevresiyle olan etkileşiminden meydana gelir (Özok, 1985).

Erkut'a (1989) göre sistem birbirleri ile etkileşim halinde olan bileşenler kümesidir.

Sistem, var oluşunun nedeni olan bir "amaç"ı gerçekleştirmek üzere, sınırları içindeki elemanların karşılıklı etkileşim halinde çalıştıkları bir bütündür. Sistemin karmaşıklığını da bu etkileşim belirler. Bu tanımdan yola çıkılarak sistemler değişik sınıflara ayrılabilir. Örnek olarak bir sistem gruplaması Tablo 2-1'de görülmektedir.

İşbilim'in uğraş konusu, inceleme alanı insan çalışmasıdır. İnsan çalışması, işbilimsel incelemeler çerçevesinde, mühendislerce yukarıda kısaca açıklanan sistem yaklaşımı ile ele alınmaktadır. Bir üretim sistemi, ne kadar geniş kapsamlı olursa olsun, elemanlarına ayrıldığında mikro düzeyde bir İnsan-Makina (İ-M) Sistemi'nden oluştuğu görülür (Özok, 1987). İncelenecek konunun sistemler halinde ele alınması bilginin, düşüncenin soyutlanma, genellenme ve düzenlenmesine olanak vermektedir. Bu ise işbilimin

öğretilmesinde ya da işbilimsel incelemelerde ve pratikteki uygulamalarda faydalı ve gerekli olmaktadır.

Tablo 2-1. Sistem Sınıflaması

Yapay Sistemler Örn: Otomobil, Havalimanı	Doğal Sistemler İnsan, Bitki, Orman
Statik Sistemler Örn: Transfer Hattı, Bilgisayar	Dinamik Sistemler İşletme, Toplum
Soyut Sistemler Örn: Sayı Sistemleri, Periyodik Cetvel, Yasalar	Somut Sistemler Makinalar, Şehir Suyu Şebekeleri
Kapalı Sistemler Örn: Su çevrimi ve diğer Recycling Sistemleri	Açık Sistemler Atölye, Kuvvet Santrali
Belirli (Deterministik) Sistemler Örn: Makinalar, İmalat Tesisleri, Teknik Sistemler	Belirsizlik Taşıyan Sistemler Para Sistemi, Politik Sistemler, Sosyo-Teknik Sistemler

2.2. İnsan-Makina Sistemi Tanımı

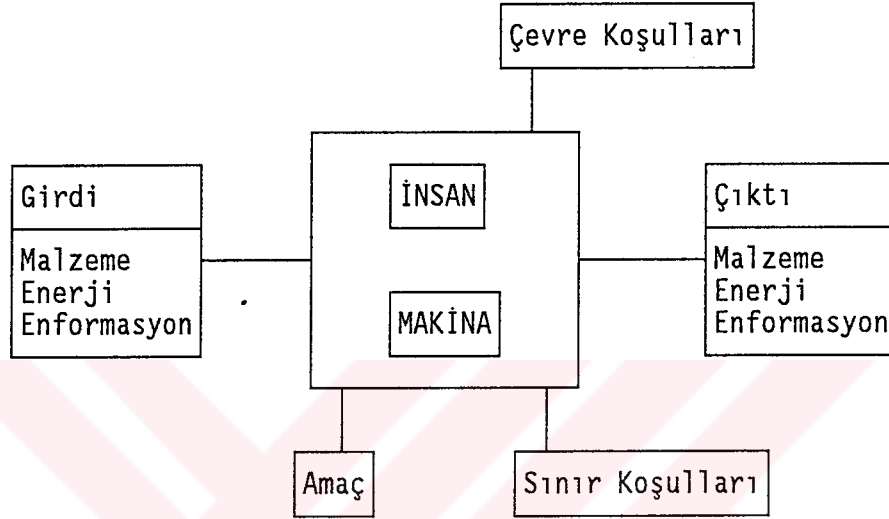
Oldukça yaygın kullanım bulan İnsan-Makina Sistemi kavramı DIN 33400'de şöyle tanımlanmaktadır: Bir İnsan-Makina Sistemi insan, çalışma yeri, üretim aracı, iş akışı, iş çevresi ve iş parçasının öngörülen görevi yerine getirmek üzere karşılıklı etkileşim halinde bulundukları bir sistemdir. Tablo 2-1'de verilen sınıflama uyarınca İ-M sisteminin üretim amacına yönelik, dinamik, açık, belirsizlik taşıyan, somut bir sosyoteknik sistem olduğu söylenebilir.

2.2.1. İnsan-Makina Sisteminin Yapısal Analizi

İnsan-Makina sistemi yapısal olarak iki alt sistemden oluşur: İnsan ve Makina

Mc Cormick (1976) İ-M sisteminin insanın varlığı, yetenekleri ile fiziki birtakım bileşenlerin verilen girdileri çıktıya dönüştürmek üzere biraraya gelmesiyle oluştuğunu belirtmektedir. Bir İ-M sistemi Şekil 2-1'de şematik

olarak verilmektedir. İnsan-Makina sisteminin iki ana elemanı insan ve makina, sistem sınırından giren girdi (malzeme, enerji, enformasyon) elemanlarını verilen görev doğrultusunda ve mevcut sınır koşulları (iş koşulları) altında işleyip çıktıya (malzeme, enerji, enformasyon) dönüştürerek sistem dışına, yani sistemin çevresine iletirler.



Şekil 2-1. İnsan-Makina Sistemi

Makina kavramı altında sistem sınırları içindeki üretim süreci için gerekli makina, takım, cihaz, kontrol ünitesi, klavye vs. anlaşılmaktadır. Sistem sınırları, sistem ile çevresini birbirinden ayırır. Sistemin nerede sınırlanacağı ve sistem elemanları arası ilişkinin ne denli araştırılacağı yapılacak sistem analizinin amacına bağlıdır ve bu konuda araştırmacıyı engelleyen herhangi bir sınır yoktur.

İnsan-Makina sisteminde genel olarak üretim kavramıyla kapsanan amaç, iş parçasının planlanan iş akışı uyarınca değiştirilmesidir. Bu değişim iş parçasının özelliklerinde olabileceği gibi konumunda da olabilir. Burada mal ve hizmet üretimi birlikte kapsamaktadır.

İ-M sistemi ile çevresi arasındaki üretim amacına dönük etkileşimin yanı sıra, amaçla ilgisi bulunmayan diğer bazı etkileşimler de söz konusudur. Bunlar çevre koşulları olarak adlandırılmaktadır. İnsan-Makina sistemi içinde bulunduğu fiziksel ve sosyal çevreden etkilenmekte ve onu etkilemektedir.

2.2.2. İnsan-Makina Sisteminin Fonksiyonel Analizi

Sistem analizleri yardımıyla sistemin yapısal özelliklerinin yanında fonksiyonel özellikleri de belirlenebilmektedir.

İnsan-Makina sistemi fonksiyonel açıdan incelendiğinde üç alt sistemden oluştuğu ortaya çıkmaktadır. Bir başka deyişle, bir İnsan-Makina sisteminde, görevin yapılması sürecinde insan ve makinanın yerine getirdikleri fonksiyonlar üç grupta toplanmaktadır:

- Etkileme (Enerji verme) fonksiyonu
- Yönetme (Kumanda) fonksiyonu
- Kontrol (Gözleme) fonksiyonu

İnsan-Makina sistemi tasarlanırken, amaca ulaşmak üzere yerine getirilmesi gereken "fonksiyonlar bütünü" yapılan işe, sistemdeki teknik düzeye, maddi olanaklara (sermaye ve işçilik maliyetleri) ve hukuki ve sosyal yapıya bağlı olarak insan ve makina arasında paylaşılır. İnsan ve makinaya ait "kısmi fonksiyonlar", İ-M sisteminin teknik düzeyine göre farklılık göstermektedir. Zaman içinde otomasyonun gelişmesi ve çeşitli alanlara uygulanması, üretimde insan faktörüne değişik bir boyut getirmektedir (Soysal, 1990). Otomasyon insana ait kısmi fonksiyonların niteliğinde büyük değişikliğe neden olmaktadır (Özok, 1991a). Kısmi fonksiyonların insan ve makina arasındaki paylaşımını da etkileyen bu değişimi Şekil 2-2'de (Kirchner, 1972) görmek mümkündür.

2.3. İnsan Çalışması (İş) ve Sınıflandırılması

İnsan çalışmasını, yani "iş"i farklı şekillerde tanımlamak mümkündür. Ansiklopedik olarak iş, insanın bir görevi yerine getirmek için yaptığı her türlü etkinlik olarak tanımlanabilir (Meydan Larousse).

Fizikte iş, $W = F \times s$ ifadesiyle verilir. Fiziksel anlamda iş'ten söz edebilmek için bir F kuvvetinin bir s yolu boyunca uygulanması gerekir. Bu tanım insan çalışması için yetersiz kalmaktadır. Çünkü tutma, durma faaliyetleri yanısıra zihinsel çabaları da bu tanımla kapsamak mümkün değildir.

	İnsana Ait Kısmi Fonksiyonlar		
Basit Sistem	E	Y	G
Mekanik Sistem	E	Y	G
Otomatik Sistem	E	Y	G
	Makinaya Ait Kısmi Fonksiyonlar		

E: Etkileme Y:Yöneltilme G: Gözleme

Şekil 2-2. Farklı Düzeydeki İ-M Sistemlerinde Kısmi Fonksiyonların Paylaşımı

İktisatta ise iş, yaşam için gerekli maddi ve manevi değerlerin oluşumu, temini, dönüşümü, dağıtımı veya kullanımına yarayan, devamlı çaba gerektiren ve düzenli her türlü etkinliktir. İnsanların ihtiyaçlarını karşılamak üzere kıt malların miktar ve faydalarını artırmak amacıyla harcanan çabaların tümü üretim faaliyetleri içindedir (Üstünel, 1983).

İşbilimde iş, bir İş (İ-M) sisteminde insan ve üretim aracının nesne üzerinde ortak etkide bulunmasıyla görevin yerine getirilmesidir (REFA, 1984).

İnsan-Makina sisteminde, sistemin temel elemanlarından insan, sistem amacına ulaşmak üzere kassal (fiziksel) ve zihinsel (mental) çaba harcamaktadır. İnsan iş görürken görevin niteliğine göre değişen ağırlıklarda kassal ve zihinsel gayret göstermektedir. Bu gerçekler ışığında, insan çalışması iki ana grupta incelenmekte ve değerlendirilmektedir:

- Kassal çalışma
- Zihinsel Çalışma

Sistem mantığı ile de insan çalışmasında benzeri bir sınıflamaya ulaşılmaktadır. Şekil 2-1'de İ-M sisteminde girdilerin malzeme, enerji ve enformasyon olduğu görülmektedir. Bu girdilerin çıktıya dönüştürülmesi sürecinde insanın katkıları "enerji" ve "enformasyon" kavramları kapsamında olmaktadır. Böylece İnsan-Makina sisteminde insanın fonksiyonları, yani insan çalışması

- Enerjisel çalışma
- Enformasyonel çalışma

olarak sınıflandırılabilir (Luczak, 1974).

Bu bağlamda ergonomik açıdan "iş", çalışma sırasında insan tarafından dönüştürülmesi veya işlenmesi gereken enerji ve enformasyonun tümü olarak tanımlanmaktadır (REFA,1984).

İnsan çalışmasına dair ana gruplamadaki esaslarda hemfikir olan yazarlar, çalışmanın alt gruplarını verirken bazı farklılıklara ulaşmaktadır.

Yapılan her işin, değişik oranlarda olmakla birlikte, mutlaka hem enerjisel ve hem de enformasyonel çaba gerektirdiğini, bu nedenle insan çalışmasını

- ağırlıklı enerjisel çalışma
- ağırlıklı enformasyonel çalışma

olarak sınıflamanın uygunluğunun belirten Laurig'e (1980) ait iş sınıflaması Tablo 2-2'de görülmektedir.

Schmidtke (1973) sınıflamaya fizyolojik bakış açısıyla gitmekte, yani iş sürecinde zorlanan organ/organ grubu'na göre ayırımı temel almaktadır. Yazar, insan çalışmasını fiziksel ve mental çalışma olarak ikiye ayırmaktadır.

Grandjean (1987) bedensel ve mental olmak üzere insan çalışmasını iki ana grupta toplamaktadır: Ağır kasal çalışma, ve beceri isteyen çalışma bedensel çalışma kapsamındadır. Mental çalışma ise dar anlamda zihinsel etkinlikler ve enformasyon işleme etkinlikleri olarak verilmektedir.

REFA (1984) tarafından verilen sınıflamada ise fiziksel ve psişik iş ayırımı yapılmaktadır. Fiziksel iş olarak insanın kaslarını kullanarak yaptığı iş anlaşılırken, psişik iş kapsamında ise zihinsel ağırlıklı, yani yaratıcı ve düzenleyici etkinlikler bulunmaktadır.

Tablo 2-2. İnsan Çalışmasının Grupları

ÇALIŞMA TÜRÜ	E N E R J İ S E L		E N F O R M A S Y O N E L		
	Kasal	Sensomotorik	Tepkisel	Bağlantı kurucu	Yaratıcı
Görev karakteristikleri: İnsandan beklenen nedir?	Kas gücü kullanımı	Belirli hassasiyet isteyen, fazla kuvvet gerektirmeyen el-kol hareketleri	Enformasyonları alma işleme,gereğinde tepki gösterme	Enformasyonları alma, işleme, dönüştürme, verme	Enformasyon üretme, gereğinde verme
Zorlanma karakteristikleri: Görev hangi organları zorlamaktadır?	Kaslar, kan dolaşımı, solunum, iskelet	Kaslar,duyu organları	Duyu organları (kaslar)	Duyu organları, zihinsel yetenekler	Zihinsel yetenekler
Örnekler	Yük taşıma, küreleme	Montaj, örgü	Kontrol, gözleme	Telefon etme, program yazma	Buluş yapma, problem çözme

2.4. Zihinsel Çalışma ve Sınıflandırılması

Mental ve enformasyonel olarak da adlandırılan bu çalışma türünde, ağırlıklı olarak duyuşal ve zihinsel aktiviteler söz konusu olmaktadır.

Zihinsel çalışmanın sınıflandırılmasında farklı bilim dalları farklı yaklaşımlar getirmektedir. Psikologlar zihinsel çalışmayı sınıflandırmada "faaliyet düzeyini" esas almaktadır. Guillaume (1970) bu yaklaşımla

- uyku ve ona yakın haller
- çaba hali
- dikkat hali (vigilance)

ayrımını yapmaktadır. Ayrıca psikologlar, zihinsel prosese, yani insana ait enformasyon işleme mekanizmasının fonksiyonlarına yönelik incelemelerde bazı alt fonksiyon bloklarının varlığına işaret etmektedirler. Bu fonksiyon blokları

- Farketme
- Tanıma
- Karar Verme
- İcra Etme

şeklinde (Guillaume, 1970). İnsan çevresinden aldığı enformasyonları bu bloklardan geçirerek işlemekte ve sonucu dışarıya iletmektedir.

Fizyologlar, psikologlarca tanımlanan bu fonksiyonel bloklara, insan vücudunda fizyolojik birimler tekabül ettirerek, sınıflamayı çalışma sırasında zorlanan bu fizyolojik birimlere göre oluşturmaktadır. Zorlanan ünite (üniteler) sensorik, motorik, dolaşım sistemi, kalp, merkezi sinir sistemi vs. veya bunların kombinasyonları olabilmektedir.

Schmidtke (1973) mental çalışmayı işin içeriğine dayanarak sınıflamaktadır. Günümüzde mental çalışma sınıfına giren işlerin çok çeşitliliğinin, sınıflamada zorluk çıkardığına değinerek bu işleri 4 grupta toplamaktadır:

- Dar anlamda zihinsel etkinlikler (geistige Taetigkeiten in engerem Sinne)
- Gözleme-Müdahale (Überwachungstaetigkeit)
- Kontrol (Muayene), (Kontrolltaetigkeit)
- Yöneltilme (Kumanda), (Steuerungstaetigkeit)

Karşılaşılan yeni bir problem eldeki veriler ve bellekteki depolanmış bilgiler yardımıyla çözülecek ve bir karar geliştirilecek ise "dar anlamda zihinsel etkinlik" söz konusu olmaktadır (örn.tasarım). Bir makina veya tesisin işleyişi sürekli olarak izlenecek ve gözlenen-değerler gerek-değerlerle karşılaştırılarak gereğinde düzeltici müdahalelerde bulunulacak ise çalışma "gözleme-müdahale" türündedir (örn. radar ile hava sahasının gözlenmesi). Çalışanın görevi, üretilen ürünü nicelik ve nitelik yönünden öngörülen üretim normlarına göre denetleyip, sınıflamak ise "kontrol etkinliği" nde bulunuyor demektir (örn. bant üzerinde akan cam şişelerin temizlik kontrolü). Görev, öngörülen bir program veya tesisin optimal kullanımı gereği, üretim sürecinin akışına yönelik karar vermeyi veya dinamik bir sisteme kumanda etmeyi gerektiriyorsa "yöneltilme" grubuna girmektedir (örn.TV naklem yayın odasında resim seçme işi, pilotaj).

Mühendislik yaklaşımıyla Steinbuch (1965), "insanın zihinsel çalışmasının kantitatif olarak incelenebilmesi için gerek şart, çalışmanın ölçülebilmesinin teknik açıdan mümkün olmasıdır" teziyle hareket ederek, zihinsel çalışmaya ölçme tekniği bakış açısından yaklaşmaktadır. Steinbuch, insanı bir black-box olarak ele alıp, zihinsel çalışmayı girdi ve çıktılar yönünden incelemektedir. Şekil 2-3'de insana ait enformasyon işleme mekanizması ile muhtemel çalışma türleri şematik olarak görülmektedir.

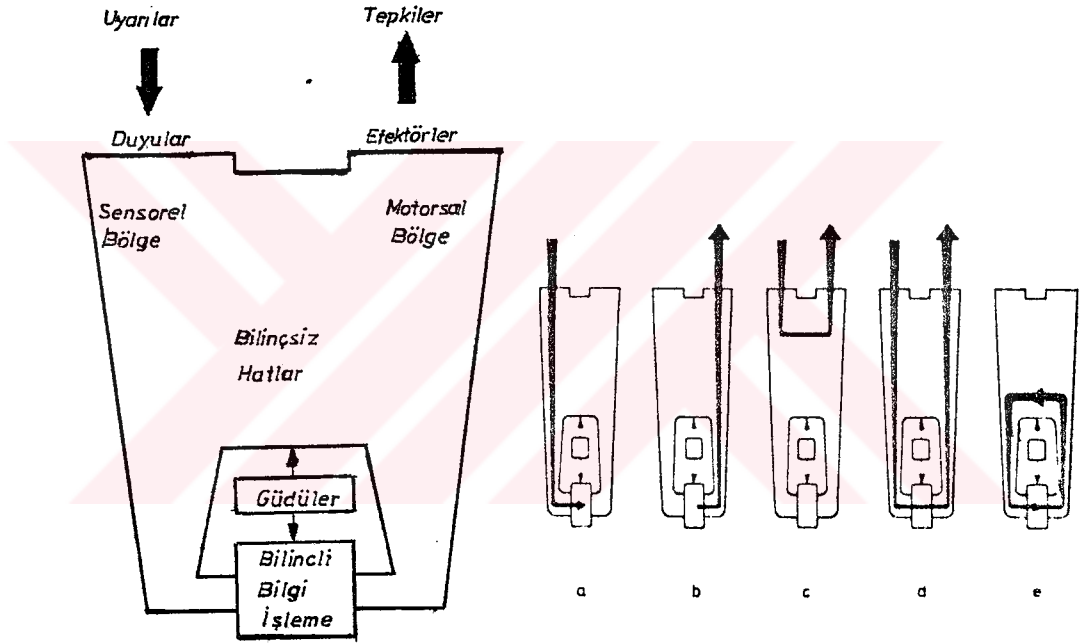
a) Salt Enformasyon Girişi : Çevreden gelen sinyaller sensorik tarafından alınıp, tanınmakta ve zihinde kısmen veya tamamen depolanmaktadır. Herhangi bir tepki, enformasyon çıkışı söz konusu değildir.

b) Salt Enformasyon Çıkışı (Üretimi) : Herhangi bir enformasyon girişi olmaksızın önceden depolanmış olan motorsal programların (şema) okunması ve tepkiye dönüştürülmesi

c) Refleksler : Korunma amaçlı, içgüdüsel gerçekleşen tepkilerdir. Bilinçli enformasyon işlenmesi yoktur. Alınan sinyal doğrudan motorsal tepkiye dönüşür.

d) Bilinçli Tepki : Alınan sinyal hafızadaki kayıtlı bilgilerle kombine edilerek bir tepki üretilir.

e) Düşünme : Bu grupta zihinde gerçekleşen bilgi tarama, ilişkilendirme, sonuç çıkarma gibi dışa yansımayan, herhangi bir tepkinin gözlenmediği süreçler yer almaktadır.



Şekil 2-3. İnsan Enformasyon İşleme Mekanizması

Bilinçli işlem içermediği için refleksler işbilimsel açıdan ilginç değildir. Düşünme türüne giren faaliyetler ise dışa yansımadıkları için işbilimsel incelemelerde uygun olmamaktadır. İşbilim açısından ideal hal, alınan enformasyonun "bilinçli işleme"den geçerek tepkiye dönüştürüldüğü (d) halidir. Girdi ve çıktıların ölçülebilir olmaları objektif incelemelere olanak tanımaktadır.

Luczak (1974), yukarıda açıklanan farklı bilimsel yaklaşımları sentezleyerek mental çalışmayı

- enformasyonel
- düşünme
- refleks

olmak üzere 3 sınıfta toplamaktadır. Ayrıca enformasyon işlemedeki fonksiyonel bloklarda darboğaz incelemesi uygulayarak, enformasyonel çalışmayı alt sınıflara ayırmaktadır. Bilgi işleme sırasında darboğazın hangi blokta olduğuna bağlı olarak çalışma sınıflandırılmaktadır.

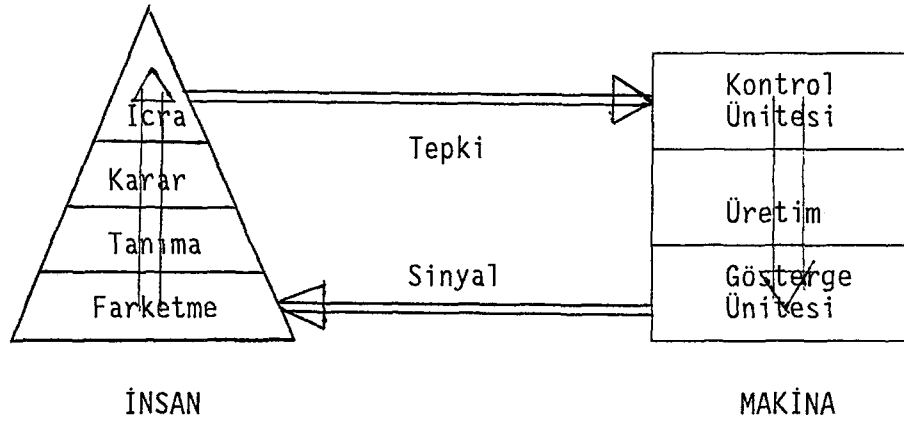
Tablo 2-3. Darboğaz Oluşturan Bloğa Göre Çalışma Türleri

Darboğaz Oluşturan Blok	Çalışma Türü
Farketme	Sensorel
Tanıma	Ayrımsama
Karar Verme	İlişkilendirme
İcra Etme	Sinyal-motorsal

İnsan çalışmasının gittikçe daha fazla önem kazanan ve yaygınlaşan bir bölümü olan zihinsel çalışma içinde enformasyonel çalışma işbilim yönünden en ilginç grubu oluşturmaktadır. Zihinsel çalışmanın işbilimsel incelemelere açık olan bu önemli bölümü şöyle tanımlanabilir: Bir İnsan-Makina sisteminde insanın sistemden gelen enformasyonları alıp, gerekli bilinçli işlemeden geçirerek, ürettiği tepkiyi sistemin diğer elemanlarına aktarması faaliyetlerine enformasyonel çalışma denir (Keidel, 1973).

2.5. Bir Kontrol Çevrimi Olarak İnsan-Makina Sistemi

Çalışana ait görevin enformasyonel çalışma sınıfına girdiği bir İ-M sistemine örnek olarak "kumanda paneli önünde bir prosesin kontrol ve kumandası" işi verilebilir. Şekil 2-4 bu İnsan-Makina sistemini yapısal ve işlevsel olarak şematize etmektedir.



Şekil 2-4. Bir İnsan-Makina Sistemi Örneği

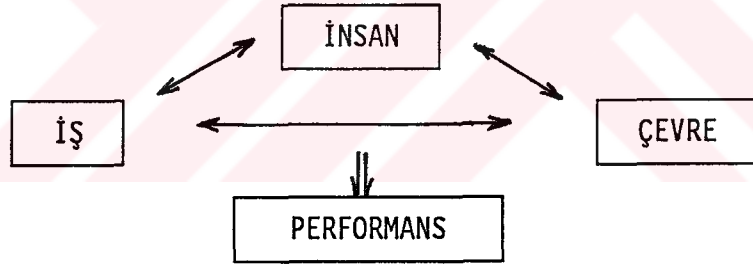
Böyle bir İnsan-Makina sisteminde göstergeler, üretimin gidişi hakkında enformasyon aktarırlar. İnsan, duyuları aracılığıyla aldığı bu enformasyonları gerekli zihinsel işlemlerden geçirerek, daha önceki bilgi ve tecrübelerine de dayanarak bir karar oluşturur. Kararı kontrol ünitesi üzerinden makineye ileterek, sisteme kumanda eder. Yine göstergelerle kararın gerçekleşmesini denetler (Geri Besleme) ve nihayet gerekli düzeltmeleri yapar.

Örnekten de saptanabileceği gibi böyle bir sistem bir Kontrol Çevrimi niteliğindedir. İnsan bu çevrimde kontrol görevini yerine getirdiği için anahtar pozisyonundadır (Grandjean, 1987). Burada "kontrol" kavramı, belirli bir büyüklüğü sabit değerde tutmak anlamını taşımaktadır (örn. arabayı 90 km/h sabit hız ile sürmek) (Gregg, 1961). Kontrol çevrimleri ile temsil edilebilen İnsan-Makina sistemlerinde insan, Kontrol Organı görevini gerçekleştirmektedir (Rohmert, 1986).

BÖLÜM 3. İNSAN-MAKİNA SİSTEMİNDE İNSAN DAVRANIŞI VE PERFORMANS

3.1. İnsan-Makina Sistemi Performansı

Her sistem gibi İ-M sistemi de bir amaca sahiptir: Üretmek. İşin tasarımından ve içinde bulunulan çevreden kaynaklanan koşullar ile çalışanın beraberinde getirdiği özelliklerin biraraya gelmesiyle İ-M sisteminin amacı gerçekleştirilebilir. Sonuçta objektif olarak ölçülüp, değerlendirilebilen bir ürün doğar, performans ortaya çıkar (Stier, 1970). Sistem performansı ve insan performansının oluşumunda sistem elemanları ve sistem çevresi arasındaki karşılıklı, karmaşık etkileşim yapısı belirleyici rol oynar.



Şekil 3-1. İnsan Performansının Ortaya Çıkışı

İ-M sisteminde performansın, sistemde insan dışındaki tüm elemanlar ile insan arasındaki uyuma bağlı olduğu Şekil 3-1'de ifade bulunmaktadır. Görevi yerine getirebilecek insan kendine özgü yetenek, beceri ve özellikleri ile göreve ve çevresine ait gerekleri karşılamak zorundadır. İ-M sisteminin performansı, tüm bunların fonksiyonu olarak meydana gelir. Karşılıklı etkileşim halindeki bu iki tarafa ait parametreler arasındaki uyum, ne denli iyi sağlanmış ise sonuç da o kadar iyi olacaktır (Bosman, 1981). İ-M sistemlerinde bu uyum çok sayıda faktöre bağlıdır. Genel olarak bir İ-M sisteminde insan performansının oluşumunda rol alan bütün faktörler Bölüm 4.2.3'te incelenmektedir. İncelenen

sistemde insan performansının optimizasyonu için iki taraf arasındaki uyumu etkileyen tüm faktörler belirlenerek iyileştirilmelidir.

3.2. İnsan-Makina Sisteminde Performansın Değerlendirilmesi

Churchman (1968), bir sistemin performans ölçüsü sistemin ne denli iyi çalıştığını gösteren bir değerdir demektedir. Performans bir sistemin verilen bir hedefe ulaşma etkinliğini gösterir. Farklı elemanlardan oluşan sistemlerin performansı sistemi oluşturan eleman performanslarının bileşkesidir.

Başarıyı ölçmek üzere konulan göstergelerin neler olacağı, performansı ölçülmek istenen sistemin yapısına, amacına ve sistemin incelenme amacına bağlı olarak ortaya çıkar. Sistemin amacına ulaşma derecesi, kaynakların kullanımındaki etkinlik, sistemden fayda bekleyenlerin bu beklentilerinin karşılanma derecesi dikkate alınarak bir sistem için performans kriterleri oluşturulur.

İ-M sistemlerinde performansı kontrol etmek ve değerlendirmek üzere çeşitli kriterler kullanılabilir. Mc Cormick (1976), İ-M sistemlerine yönelik performans kriterlerinin iki geniş grupta toplanabileceğini bildirmektedir:

- Sistemle ilgili kriterler
- İnsanla ilgili kriterler

Sistem kriterleri, sistem performansı veya çıktısıyla ilgilidir ve sistemin öngörülen hedefine ne derecede ulaşıldığını yansıtır. Bu gruptaki kriterlerin bir kısmı oldukça mekanistik karakterlidir (motorun devir hızı gibi), bir kısmı ise (bilgisayarda bilgi girişi gibi) sistemin kullanımına yöneliktir. İnsan ile ilgili kriterler ise

- İnsan performans göstergeleri
- Fizyolojik göstergeler
- Subjektif cevaplar (tepkiler)
- Kaza frekansı

olmak üzere 4 grupta ele alınabilir. İnsan performansı bir anlamda kullanılan ekipmana da bağlıdır. Ekipmanın tasarımı ve durumu insan performansını

etkilemektedir. Kan basıncı, nabız frekansı gibi fizyolojik göstergeler insanın performansı hakkında fikir edinmek üzere kullanılabilir. Bazı durumlarda kişilerin subjektif değerlendirmeleri ve çalışma yeri ile ilgili kaza ve yaralanma istatistikleri de gösterge olarak alınıp sistemlerin değerlendirilmesinde kullanılabilir.

İ-M sistemine yönelik kimi kriterler kantitatif değerlendirilirken bazı kriterler kalitatif değerlendirmeye tabi tutulurlar. Sisteme ait birim zamanda üretim miktarı, devamsızlık süreleri, enerji sarfı gibi göstergeler ölçülebilir, sayısal niteliktedir. Çalışanın hoşnutluğu, iş tatmini gibi bazı kriterler ise iyi-kötü, yeterli-yetersiz, az-çok şeklinde değerlendirilir. Hakkında yeterli kesinlikte ve miktarda veriye sahip olunmayan sayısal, ölçülebilir nitelikteki kriterler de benzer olarak dilsel ifadeler yoluyla tahmin edilir, belirlenir ve uygun matematik teknikler kullanılarak değerlendirilir.

Tablo 3-1. İ-M Sistemini Ve Sistem Performansını Değerlendirme Ölçütleri

- birim zamanda üretilen ürün sayısı
- verimlilik.
- üretkenlik
- hata sayısı
 - parça başına
 - birim zamanda
- emniyet
 - teknik
 - insani
- güvenilirlik
 - teknik
 - insani
- çalışanın hoşnutluğu, iş tatmini
- çevre sağlığı
- ürün kalitesi
- çalışanın sağlığı
- çalışma koşulları
- çevre koşulları
- iş akışı, iş metodu, iş organizasyonu
- çalışanın zorlanması
- insanlararası ilişkiler
- çalışanın işe uygunluğu
- kullanım-işletim kolaylığı
- bakıma uygunluk
- işletim maliyeti
- iş gücü gereksinimi
- fizyolojik göstergeler

İ-M sistemlerinde performansı değerlendirmek üzere kullanılabilecek bazı kriterler Tablo 3-1'de sıralanmaktadır. Sistem elemanları arasındaki farklılık performans kriterlerine de çok boyutluluk kazandırmaktadır. Tablo 3-1'de görülen ölçütlerin bir kısmı çalışana yönelik, bir kısmı ise işe yöneliktir. Bazı kriterler objektif değerlendirme gerektirmekte, bazıları ise subjektif değerlendirilmek zorundadır. Kriterler arasında teknik kökenli olanların yanısıra sosyoloji, psikoloji, fizyoloji gibi insana yönelik bilim dalları kökenli olanlar da mevcuttur. Sistemin yapısına ve inceleme amacına bağlı olarak ilgili ölçütler seçilir ve bunlar yukarıda sözedilen kalitatif veya kantitatif skalalar vasıtasıyla değerlendirilir.

3.3. İnsan-Makina Sistemlerinde İnsan Davranışı

3.3.1. İnsan Davranışının Elemanları: S-O-R Paradigma

İ-M sistemlerinin fonksiyonel bir parçası olan insan davranışı, bu sistemin kısıtları ve amaçlarından doğan gerekleri karşılamak zorundadır (Kalsbeek, 1981). Her İ-M sisteminde gözleme, ayarlama, bakım-onarım gibi birçok faaliyetlerin insan tarafından ve bazen de alışılmadık dış şartlarda, yani risk içeren durumlarda gerçekleştirilmesi gereklidir. İ-M sisteminde her insan, tek başına veya bir ekibin elemanı olarak, sorumlu olduğu sistem veya alt sistemin durumu hakkındaki enformasyonu (gösterge, çevre veya yönergelerden) almak durumundadır. İnsan daha sonra bu enformasyonu işleyerek ne yapacağına karar verir ve bu kararını uygular.

Verilen bu örnekte de olduğu gibi, tüm insan davranışlarının temelinde yatan üç genel psikolojik eleman "algılama, enformasyon işleme ve eylem" dir. Bu üç eleman psikolojide Uyarı (Stimuli), Organizma (Organism) ve Cevap (Responce) olarak adlandırılır ve S-O-R Paradigma olarak bilinir (Mc Cormick, 1976). Çoğu insan davranışlarını yansıtan bu üç elemana göre, bir uyarı, organizmayı harekete geçirerek bir cevap doğurur.

Organizma tarafından değişim olarak algılanan her tür fiziksel değişim bir uyarıdır(S). Bir ikaz lambası veya alarm sesi gibi çoğu girdiler organizma için dışsal niteliktedir. Ancak bazı hallerde uyarı organizma içinden de

kaynaklanabilir: Bir işin yapılma vaktinin geldiğinin hissedilmesi gibi (Mc Cormick ve Sanders, 1982).

Organizma O, alınan fiziksel uyarı S ile bütünleşir. Uyarının işlenmesi sırasında hatırlama, karar, yorum gibi birtakım faaliyetler gerçekleşir. Sonuçta alınan girdiye, organizma bir cevap (S) oluşturur. Konuşma, bir düğmeye veya pedala basma bu tür birer çıktı örnekleridir.

Tüm davranışlar bu üç elemanın (S-O-R) bir kombinasyonudur. Kompleks davranışların da, eş zamanlı olarak gerçekleşen bir takım S-O-R dizilerinden oluştuğu söylenebilir.

3.3.2. İnsan Davranış Türleri

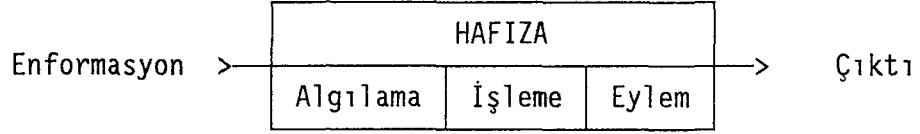
İnsan performansının mikro düzeyde incelenmesinde ilk adım yapılan görevin analizidir. İnsan tarafından yerine getirilen görev, kendi içinde alt parçalarına ayrılarak temel davranış üniteleri şeklinde ifade edilmelidir. İnsan davranışlarını standart üniteler halinde tanımlayan bir sınıflama, görev analizinde önemli bir yardım sağlar. Berliner ve diğ.(1964) insanın görev davranışlarını inceleyerek görev parçacıklarından oluşan bir standart sınıflama oluşturmuşlardır. Tablo 3-2'de görülen sınıflama modeli S-O-R, paradigmadaki davranışsal üç temel eleman ile de uyum göstermektedir.

3.3.3. İnsanda Ana Fonksiyonlar

İnsanın kontrol organı olarak görev yaptığı tipik bir İ-M sisteminde insan ile makina arasındaki etkileşim Şekil 2-4'de gösterilmektedir. Bu şekil, bir göstergenin insan için uyarılar ürettiği, bu uyarıların insanda bir takım enformasyon işleme ve karar verme süreçlerini harekete geçirdiği ve sonuçta insanın oluşturduğu cevapları kontrol organı vasıtasıyla makinaya ileterek makinanın çalışmasını düzelttiği döngüyü ifade etmektedir. Bu olaylar zincirinde insan algılama, işleme ve eylem fonksiyonlarını bir dördüncü önemli fonksiyon olan "insan hafızası"nın desteğiyle gerçekleştirir (Şekil 3-2).

Tablo 3-2. Görevle İlgili Davranışların Sınıflandırması

Süreç	Faaliyet	Davranış
A L G I L A M A	Enformasyonu arama, alma	Gözleme Okuma Dinleme
	Cisimleri, hareketleri ve olayları tanımlama	Ayrımsama Tanımlama Yerini bulma
İ Ş L E M E	Enformasyon işleme	Kodlama Enterpolasyon Tercüme
	Problem çözme ve karar verme	Hesaplama Kıyaslama Tahmin
İ L E T İ Ş İ M		Cevap verme Yönetme Talimat verme Talep etme İletme
M O T O R	Basit/kesikli	Kapama Birleştirme Hareket ettirme Yerleştirme
	Karmaşık/sürekli	Ayarlama Sıraya dizme Dengeleme İz boyunca hareket ettirme



Şekil 3-2. İ-M Sisteminde İnsanın Ana Fonksiyonları

İnsan çalışmasının temel taşları olan bu fonksiyonlar aşağıda kısaca açıklanmaktadır:

Algılama : İnsan, görme, işitme, dokunma gibi duyularını kullanarak, çevresindeki kaynaklardan yayılan enformasyonları duyar, ayırır ve algılar. Özetle, insan enformasyonları filtre eden, tanıyan ve düzenleyen aktif bir algılama sistemine sahiptir.

Enformasyon işleme ve karar verme: Enformasyon işleme, algılanan enformasyonlar ve hafızadaki enformasyonları kullanarak yapılan çeşitli işlemleri içerir. Farklı psikoloji ekollerinde mediasyon, organizmik süreç, kognitif süreç gibi farklı isimlerle anılır. Tüm bu isimlendirmeler "bilmek-kavramak" ile eş anlamlı olarak kullanılmaktadır. Basit veya karmaşık olabilen bu proses sonuçta bir karar doğurur.

Hafıza: Enformasyonları işleme sürecinde insanın en önemli özelliklerinden biri enformasyonları hatırlama yeteneğidir. Mevcut teoriler, üç ayrı insan hafıza türünden söz etmektedirler:

Duyu hafızası gözler veya kulak yoluyla alınan enformasyonları 1 saniyeden daha kısa süre boyunca saklar ve onları ya kısa süreli hafızaya aktarır veya bu enformasyonlar kaybolur.

Kısa süreli hafıza enformasyonun biraz daha uzun süre saklandığı hallerde devreye girer. Yeniden işitme, tekrar söyleme gibi tekrarlı kullanımlar enformasyonun kısa süreli hafızada saklanmasını sağlar. Enformasyon tekrar kullanılmaz ise kaybolabilir.

Üçüncü tür hafızaya "uzun süreli hafıza" adı verilir. Eğer enformasyon kısa süreli hafızadan uzun süreliye aktarılmış ise, orada saklanması için tekrar kullanım gerekmez. Fakat uzun süreli hafızada çok fazla enformasyon depolanması nedeniyle, herbirinin oradan bulunup, çıkarılması her zaman mümkün olmamaktadır.

Eylem: Verilen karara bağlı olarak oluşturulan cevaplar, tepkilerdir. Eylemler motor ve iletişim olarak iki grupta toplanır. Birinci grup, bir makina üzerindeki kolun çekilmesi, civatanın monte edilmesi gibi fiziksel kontrol hareketlerini kapsar. Diğer grup ise konuşma, klavye veya diğer sinyaller aracılığıyla iletişimi hedefler.



BÖLÜM 4. İNSAN HATALARI

4.1. İnsan Hatası Nedir?

İ-M sistemlerinde insana ait kısmi fonksiyonların yerine getirilmesi sırasında insan her zaman bekleneni veremeyebilir ve bazı hatalar ortaya çıkar. İnsan performansı değişkenliğinin kaçınılmazlığı dikkate alındığında, insanın olduğu yerde hatanın da olabileceği kolayca kabul görülür (Kragt, 1978).

Sistemlerin büyüyerek karmaşık hale gelmesi, onların daha güvenilir olmaları gereğini zorlamaktadır. Sistemlerin güvenilirliğini arttırmak için ekipman güvenilirliğini iyileştirmek tek başına yeterli olamamaktadır. Ekipman güvenilirliğini arttırmak için harcanan büyük çabalar, çoğu zaman insan hataları tarafından etkisiz kılınmıştır (Hagen ve Mays, 1981). Bu nedenle İ-M sistemlerinin daha güvenilir olması gereği arttıkça insanın etkisi de daha fazla önem kazanmıştır.

İnsan hataları birçok kazanın ve istenmeyen sonuçların nedeni olarak belirtilmektedir. Aşağıdaki bazı istatistiksel bilgiler de bu ifadeyi doğrulamaktadır (Dhillon, 1988):

- 9 Amerikan füze sistemiyle ilgili araştırmada sistem arızalarının %20-53'ünün insandan kaynaklandığı
- Hava trafiğini kontrol sistemlerindeki hataların % 90'ının insana bağlı olduğu belirtilmektedir.
- Bir işletmede üretim bozukluklarının %82'sinin insan nedenli olduğu saptanmıştır.
- Ürünlerdeki her 5 kusurdan birinin kontrolden kaçtığı bildirilmektedir.
- 213 bakım olayı ile ilgili bir araştırmada arızaların %25,8'inin tümüyle insan tarafından kaynaklandığı belirlenmiştir.

Bu ve benzeri tüm insan hatalarını genel bir tanımla ifade etmek mümkündür: İnsanın performansı, öngörülen tolerans sınırları dışında ise " insan hatası"ndan sözedilir. Hatalar,

- 1) gerekli hareketi yerine getirmeme
- 2) gerekli hareketi yanlış olarak yerine getirme
- 3) gerekli hareketi yanlış sıra veya zamanda yerine getirme

şeklinde ortaya çıkabilir (Meister, 1971).

Hagen ve Mays (1981) insan hatasını " insanın öngörülen bir hareketi istenen hassasiyet, sıra ve zamanda yerine getirememesi olarak tanımlamaktadır. Bu hatalar, sistemde maddi hasara yol açacak veya planlanan işlemlerin akışını kesintiye uğratacak ve hatta insana zarar verecek sonuçlar doğurabilecektir. Teknolojik gelişmenin karmaşıktırdığı sistemlerin, fonksiyonlarını istenen biçimde yerine getirebilmesi için sistemin bir parçası olan insana ait hataların önemle ele alınarak incelenmesi gereklidir. İnsan hatalarının günümüz kompleks İ-M sistemlerinde yol açabileceği vahim sonuçlar dikkate alındığında, insan hatalarının tanımlanması, sayısallaştırılması ve önlenmesinin önem ve gerekliliği bir kez daha ortaya çıkmaktadır. Günümüzde insan hataları esaslı ve önemli bir problem olarak gözükmemektedir (Rouse ve Rouse, 1983).

İnsan hatalarına yönelik literatürdeki mevcut çalışmalar, yaklaşımları açısından iki ayrı grup altında toplanmaktadır (Wu ve Hwang, 1989):

- 1- Matematik Yaklaşım
- 2- Nedensel Yaklaşım

İnsan güvenilirliğinin incelendiği hallerde matematik yaklaşıma başvurulur. İnsan güvenilirliği analizi, insan hatalarının kalitatif ve kantitatif açıdan incelenmesi ile ilgilidir. Bu inceleme sonucunda hataların giderilmesi, azaltılması hedeflenir (Kirwan, 1987). Güvenilirlik adıyla bilinen matematiksel incelemelerde insan hatası, donanım arızası kavramına oldukça benzer biçimde değerlendirilir. İnsan hatalarının tesadüfi olarak ortaya çıktığı kabul edilerek ve klasik güvenilirlik alanından tekniklerden yararlanılarak, insan ve donanım güvenilirlikleri tüm sistem güvenilirliğini yansıtacak biçimde biraraya getirilir.

Bu tezin ana hedefini oluşturan ve insan hatalarının sayısallaştırılmasını amaçlayan insan güvenilirlik analizi izleyen bölümlerde incelenmektedir.

Nedensel yaklaşımda ise matematik yaklaşımın aksine insan hatalarının nadiren tesadüfi karakterli olduğu, aslında bazı neden ve faktörlere bağlı olarak ortaya çıktığı öngörülür. Bu nedenler ve faktörler belirlenebilir ise ortadan kaldırılmaları veya en azından iyileştirilmeleri mümkündür (Rouse ve Rouse, 1983). İnsan hatalarına yönelik araştırmaların önemli bir grubunu kapsayan nedensel yaklaşım bu bölümde ele alınmaktadır.

4.2. İnsan Hatalarının İncelenmesinde Nedensel Yaklaşım

Nedensel yaklaşım insan hatalarını anlamayı, hataların altında yatan nedenleri, hataya etki yapan faktörleri ve hatanın ortaya çıkışındaki mekanizmaları belirlemeyi, yani insan hatalarını karakteristiklerine göre belirli gruplarda toplayarak incelemeyi ve böylece hatayı oluşturan nedenleri ortadan kaldırmayı, faktörleri iyileştirmeyi hedefler. Sistemlerin tasarımında, mevcut tasarımların iyileştirilmesinde ve personel eğitim programlarının düzenlenmesinde, nedensel yaklaşım etkin bir araç oluşturabilir.

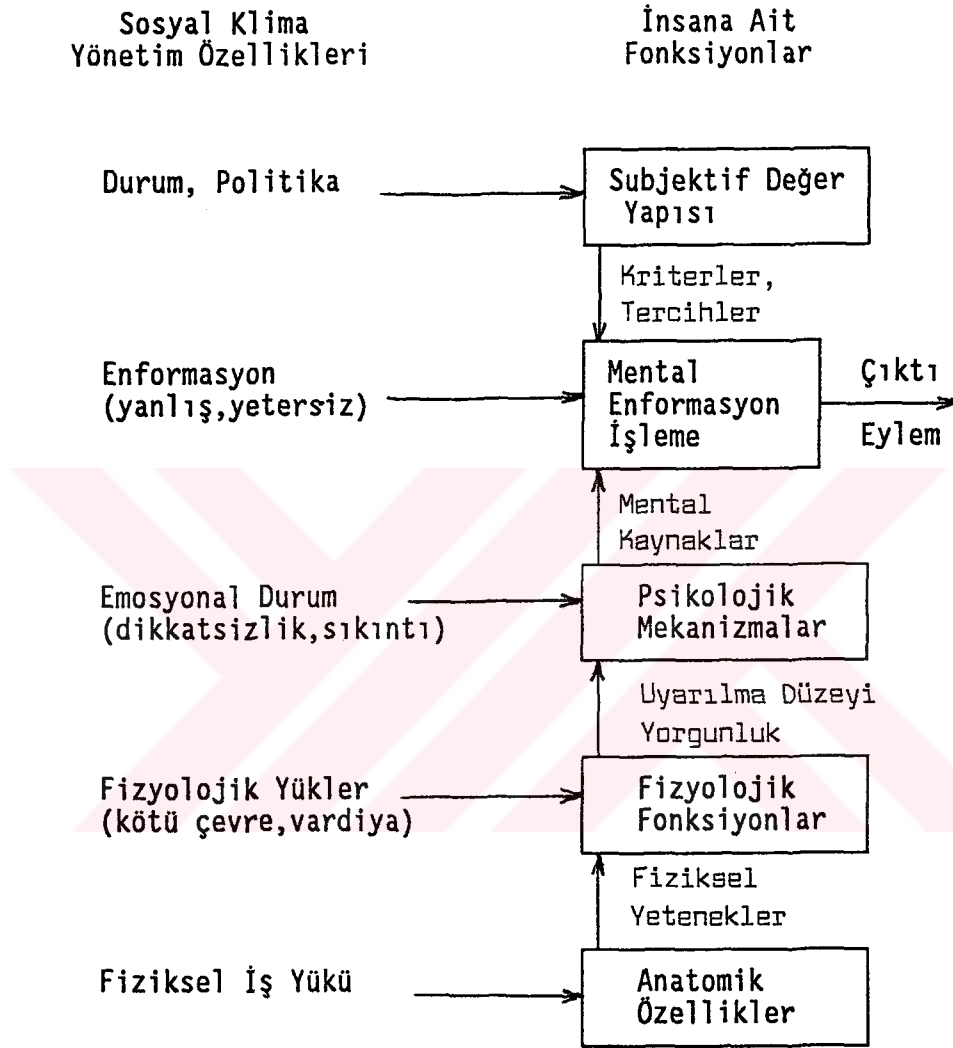
4.2.1. İnsan Hataları Nasıl Doğar?

İ-M sistemi içerisinde insan, sistemin kendisine yüklediği görevleri yerine getirirken, sistemi oluşturan tüm diğer elemanlar ile de etkileşim halindedir. İnsan-makina, insan-çevre, makina-çevre arasındaki bu karşılıklı etkiler kümesi dinamik bir karaktere sahiptir. İnsan performansı ve İ-M sistemi performansı bu dinamik etkileşim sürecinde ortaya çıkar.

İnsan hataları, sistem ve insan davranışlarının istenmeyen bir sonucudur. Sistemdeki ve daha önemlisi insandaki değişkenliğin yol açtığı insan hatalarını incelemek, gerçekleşme probabilitelerini tahmin etmek ve bunları giderici veya önleyici çözümler bulmak için insan hatalarının nedenlerine inmek gerekir.

İnsan hataları incelenirken, insan performansı genel kavramı içinde ele alınmalıdır. İnsan hatalarının izole edilerek, tek boyutlu olarak incelenmesi uygun değildir. İnsan hatalarına yönelik araştırmaların objektif olabilmesi için, sistemdeki insan ve teknik donanıma ait performansın birlikte ele alınması

gereklidir. İ-M sistemlerinde bir insan hatasının oluşumunu kontrol eden karmaşık etkileşim (Şekil 4-1), hatayı etkileyen faktörlerin çokluğu ve içiçeliğini sergilemektedir.



Şekil 4-1. İ-M Sisteminde İnsan Hatalarının Ortaya Çıkışı (Rasmussen, 1988a)

Taylor (1988), bir İ-M sisteminde insan dışındaki tüm elemanların kusursuz çalıştığı kabul edildiğinde, insan değişkenliğinin üç yolla bir sistem arızasına neden olabileceğini bildirmektedir:

- Sistem davranışı ve operatör değer sistemi sabit kalmasına ve operatörün tüm çabalarına rağmen, operatör fazlaca değişkendir ve istenen sonucu sağlayamaz.
- Operatör değer sistemi ve onu gerçekleştirme becerisi sabit kalmaktadır. Ancak sistemdeki değişikliklere uyum göstermekte yetersiz kalır.
- Sistem davranışı ve operatör becerileri kabul edilebilir sınırlar içindedir. Fakat operatörün sahip olduğu değer sistemi sistem amaçları ile gelişerek, sistem amacına uymayan bir sonuca neden olur.

4.2.2. İnsan Hatalarının Sınıflandırılması

İnsan hataları, "öngörülen performanstan herhangi bir sapma" şeklinde genel olarak tanımlanmakla birlikte, tüm insan hatalarının sebepleri, sonuçları, meydana gelişleri vs, yönünden aynı olduğu düşünülmemelidir (Van Eekhout ve Rouse, 1981).

İnsan hataları arasındaki farklılıkları, benzerlikleri saptamak ve hataları sınıflandırmak amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Literatürde genel amaçlı sınıflamaların yanısıra, belirli bir göreve veya sisteme yönelik sınıflama çalışmaları da mevcuttur. Görev ve sistem esaslı girişimlerde belirli bir uygulama alanı hedeflenmekte, hatalar görev ve sistem bazında ele alınmaktadır. Nawrocki ve diğ. (1973) 'nin sınıflamaları bir enformasyon sistemiyle iletişim ve klavye kullanımı görevi ile ilgilidir. Süreç kontrolü alanında Lees (1973) ve Gelder (1980)'in yaklaşımları, yine görev esaslı sınıflamaya birer örnektir. Belirli bir sistemin kapsamında nispeten geniş bir yelpaze içindeki bir dizi görevi ele alan ve hataları sınıflayan çalışmalar, sistem esaslı olarak adlandırılmaktadır. Bu gruba giren çalışmaların hemen tümü havacılık alanına yöneliktir (Rouse ve Rouse, 1983).

Hata sınıflandırma şemalarını dört başlık altında toplamak mümkündür:

- Hataları sebeplerine göre sınıflayanlar
- Hataları sonuçlarına göre sınıflayanlar
- Hataları meydana geldiği aşamaya göre sınıflayanlar
- Hataları davranış esasına göre sınıflayanlar

4.2.2.1. Sebeplerine Göre Hata Sınıflaması

İnsan hataları sebeplerine göre

- sistemden kaynaklanan
- tasarımdan kaynaklanan
- operatörden kaynaklanan

şeklinde sınıflanabilir (Meister, 1971).

Bir sistem tasarlanırken yalnızca ekipmana ait özellikler değil, onu kullanacak insanların sayısı, özellikleri, ve kullanımı yönlendirecek teknik yönergeler, kullanım kılavuzu vs., lojistik hizmetler (yeterli sayıda ve uygun tipte yedek malzeme, araç-gereç vs.) ve bakım planları (önleyici bakım programları ve yöntemleri vs.) gibi sistem ögeleri bütün olarak belirlenir. Dolayısıyla hatalar sadece ekipmanın yanlış tasarımından doğmaz. Sistem tasarımı kapsamındaki yukarıda sıralanan diğer ögelere bağlı olarak da, sistem kaynaklı hatalar meydana gelebilir. Örneğin gereğinden az personel, göreve uygun olmayan personel birer sistem kaynaklı hatadır. Bu hatalar ekipmandan veya insandaki bir kusurdan kaynaklanmamakta, sistem bütününe planlanmasından doğmaktadır. Sistem tasarımıdaki uygunsuzluk nedeniyle, personelin yaptığı bu tür hatalara "sistem kaynaklı hata" adı verilir.

Tasarımdan kaynaklanan insan hataları, doğrudan ekipman tasarımıdaki kusurların bir sonucudur. Ekipman özelliklerindeki uygunsuzluklar operatör için zorluklar yaratarak, hata potansiyelini yükseltir. Ergonomi ilkelerine uygun düşmeyen biçimde tasarlanmış bu tür ekipman, araç ve gerece günlük hayattan pek çok örnek vermek mümkündür.

Operatörden kaynaklanan hatalar, doğrudan hatayı yapan kişideki kusurlara bağlıdır. Kapasite eksikliği (örn. görme kusuru), tecrübe, beceri, motivasyon veya yorgunluğa bağlı hatalar, operatör nedenli hatalar olarak sınıflanabilir. Gerekli trafik uyarı işaretleri bulunduğu halde, tek yönlü bir yolda aracını ters yönde süren bir sürücünün yaptığı hata, ne sistem kaynaklı ne de tasarım kaynaklıdır; sürücüden kaynaklanan tipik bir hatadır.

4.2.2.2. Sonuçlarına Göre Hata Sınıflaması

İnsan hataları sebepleri ve mekanizmaları açısından farklı oldukları gibi, bulundukları sistemde doğurdıkları sonuçlar açısından da farklıdırlar. İnsan hataları her ne kadar görevin süresini ve başarısını etkilemekte ise de, çoğu zaman sistem ve makinalarda arızalara yol açmamaktadır. Ancak bazı hatalar makina ve sistemleri çalışma dışı bırakabilecek ciddiyette olabilmektedir. Bir göstergenin yanlış algılanması, bir yanlış hatırlama, bir bilgiyi kaydederken yapılan hata, kritik bir sinyale verilen yanlış cevap, veya bir talimatın yanlış aktarılması ürünün güvenilirliğini ve emniyetli olma özelliğini azaltmakla kalmaz, beraberinde malzeme ve zaman kaybı, hasar, yaralanma ve hatta can kaybı da getirebilir. Üretimin yanı sıra bakım-onarım, taşıma, yükleme ve tesis etme gibi üretim sonrası lojistik hizmetlerin verilmesinde de insan hataları benzer sonuçlara yol açabilmektedir.

Sonuçlar açısından incelendiğinde "insanın yolaştığı arızalar" ve "hatalar" ayrımının yapılması gerekli olur. İlk gruba giren insan hataları sonucunda, ekipmanda aksama ortaya çıkar. Arızayla sonuçlanan hatalar hakkında veri elde etmek, diğer gruba göre daha kolaydır. Sistemlerin aksamadan çalışmasında, yani güvenilirliğinde, insanın rolü küçümsenemeyecek boyutlardadır. Bu konu özellikle askeri alanda ve nükleer teknoloji alanlarında raporlarla tespit edilmektedir. Bu raporlardan derlenerek Tablo 4-1'de verilen, dolaylı veya dolaysız bir şekilde sistem arızası veya kazalara yol açan insan hatalarına ait bilgiler, bu gerçeğe işaret etmektedir.

Hata hakkında diğer bir ayrım, sonuçların ortaya çıkış zamanı dikkate alınarak verilebilir. Bazı hatalar anında etkili olurken, bazılarının sonuçları bir gecikmeyle ortaya çıkar. Otomobil sürücüsünün ters yola girmesi anında kazaya neden olabilecekken, bir üretim hatasının etkileri belki de ancak mamulün kullanımı sırasında ortaya çıkacaktır. Sonuçların ortaya çıkış süresindeki farklılık, hataların gözlenmesi ve düzeltilmesini de etkilemektedir. Hatanın sonucu çabuk ortaya çıkıyor ve gözlenebiliyor ise, düzeltilmesi de hızla mümkün olur.

Tablo 4-1. İnsan Nedenli Arızalar (Meister,1971)

Sistem	Arıza Türü	İnsan Nedenli Arıza Oranı %
Elektronik sistem	İnsan nedenli fonksiyon arızası	23-45
Füze	Ekipman arızası, kaza	20-65
Füze/uçak	Ekipman arızası	26-50
Uçak	Kaza, başarısız uçuş	12-60
Gemi	Çarpışma, batma karaya oturma	63,6
Nükleer silah	Üretim kusurları	82

Bazı hatalar sık gerçekleşmelerine rağmen, etkileri açısından fazla önem taşımazlar. Çok daha seyrek oluşan bazı hatalar ise, sistem performansı açısından kritik niteliktedir. Otomobil sürücüsünün el frenini boşaltmadan kalkış yapması sık görülen bir hatadır; ancak ciddi sonuçlar doğurduğu söylenemez. Bir uçak pilotunun iniş sırasında iniş takımlarını açmaması ise çok nadir bir hatadır; fakat bir felakete yolaçabilir. Burada bir hatanın sonuçları açısından taşıdığı önemin, hatanın gerçekleştiği sisteme bağlı olduğunu vurgulamak gerekir. Pickrel ve Mc Donald (1964), insan hatalarını muhtemel etkileri yönünden

- güvenli
- marjinal
- kritik
- facia

olarak niteledikleri dört sınıfta toplamaktadır (Bkz. Bölüm 5.3.2.3).

4.2.2.3. Meydana Geldiği Aşamaya Göre Hata Sınıflaması

Genel olarak bir mamulün ömründe dört aşama söz konusudur:

- Tasarım
- Üretim
- Test
- Kullanım-İşletim

Tasarımı yapıp, üretim aşamasında şekillendirilen mamul, öngörülen spesifikasyonları sağladığı test edildikten sonra , tesis edilerek kullanıma, işleme sunulur ve gerektiğinde bakımı yapılır. Bu aşamaların herbirinde bazı insan hataları oluşabilir. İlgili aşamalar da dikkate alınarak, bu hatalar

- Ergonomi ilkelerine uygun olmayan tasarım: tasarım hatası
- Tasarıma aykırı imalat veya montaj: üretim hatası
- Makinaların talimatlara uygun düşmeyen biçimde tesis edilmesi: bakım-onarım-tesis hatası
- Sistemin prosedüre uymayan biçimde işletimi: işletim-kullanım hatası

şeklinde sınıflanabilir (Meister ve Rabideau, 1965).

Tasarım hataları, mamul tasarımının insana uygun olmamasından kaynaklanan önemli bir hata grubunu oluşturur. İlk aşamada meydana gelen tasarım hatası sonuçlarını kullanım-işletim sırasında operatör hatası olarak gösterir.

Üretim hataları kötü işcilik, yanlış parça kullanımı, montaj hatası, kontrol eksikliği gibi nedenlere dayanır. Bir ürünün üretimi ve montajı sırasında çalışanların yaptığı hatalar ileriki kullanım aşamasında bazı problem ve arızalara yol açabilmektedir. Örneğin bir vidanın gereğinden az sıkılması, onun kullanım sırasında gevşemesi; çok sıkılması ise kırılması sonucunu doğurabilir. Bu hataların da etkileri ancak test veya kullanım-işletim aşamalarında ortaya çıkar. Tablo 4-1'de verilen sonuçların bir kısmı üretim sırasındaki hatalarla doğrudan ilişkilidir. Nükleer silah sistemlerinde kullanılan parçaların kontrolünde saptanan 23.000 kusurun % 82'sinin, yani 19.200'ünün insan

hatalarından kaynaklandığı belirlenmiştir (Rook, 1962). Bu analiz süresinde 23.000 kusurlu parçada tespit edilen üretim hatalarının bazıları Tablo 4-2'de verilmektedir.

Tablo 4-2. Nükleer Silah Üretiminde Rastlanılan Bazı İşçilik Hataları ve Oranları (Rook, 1962)

Hata	Hata Oranı
Lehimde Boşluk	0,07
Yetersiz lehim	0,002
Parça ters bağlanmış	0,001
Parça lehimleme sırasında yanmış	0,001
Lehim Sıçramış	0,0006
Bağlantılar ters	0,0005
Aşırı lehim	0,0002
Yanlış parça kullanımı	0,00005
Lehim unutulmuş	0,00003
Parça unutulmuş	0,00003

Bir ürünün oluşumunda insana ait binlerce katkı düşünüldüğünde, bu çok küçük hata oranlarının sonuçta ciddi arıza oranlarına, fonksiyonel aksaklıklara dönüşebileceğini kestirmek kolaydır. Bu örnekler üretimde insan hatalarının, maliyet, kalite, kantite ve çalışanların ve kullanıcının emniyeti açısından önemini açıkça ortaya koymaktadır.

Üretimle ilgili bir diğer hata grubu kontrol hatalarıdır. Kontrolcünün görevi üretim hatalarını belirleyerek, hatalı ürünlerin kullanıma girmesini önlemektir. Kontrollerin önemli kısmı üretim sırasında gerçekleşir. Ancak üretim sonrası test ve tesis aşamalarında da kontrol hataları ortaya çıkabilir.

Kontrol görevi ağırlıklı olarak algılama ve yargılama fonksiyonlarına dayanmaktadır. Kontrol işlevi, genellikle görsel sınama ve karar vermeyi gerektirir. Kontrolör, ürünün fiziksel karakteristiklerini belirler ve bunları kalite standartları ile karşılaştırarak değerlendirir.

Kontrolün etkinliği, bir anlamda üretimin eksikliklerini örter. Bir üretimde % 100 kontrol yapılır ve tüm kusurlular elimine edilirse-üretim hatalarının yol açtığı sistem arızaları problemi tümüyle ortadan kalkar. Ne var

ki, çoğu durumda % 100 kontrol yapılamayacağı gibi, kontrol etkinliği de % 100'den uzak olacaktır. Harris ve Chaney (1969), sadece ürün karmaşıklığına bağlı olarak ortalama kontrol hassasiyetinin % 20-80 arasında değişmekte olduğunu ve tek bir kontrolörün kusurların % 60'ını belirleyebildiği hallerin çok nadir olduğunu bildirmektedir.

Mamulün tesisi ve bakımı sırasında yapılan bakım, ayar ve tesis faaliyetleri de bir insan hata kaynağını meydana getirirler. Bunların etkileri de gecikmeli görülür. Tesis edilen mamulün öngörülen prosedüre aykırı biçimde kullanılması, işletim-kullanım hatası olarak adlandırılır. Test aşamasında ise işletim-kullanım, bakım veya tesis hataları ortaya çıkabilir. Kullanım-işletim ve bakım hataları mamul ömrü boyunca tekrarlanabilir.

4.2.2.4. Davranış Esaslı Hata Sınıflaması

Davranış esaslı yaklaşımda, hata sınıflamasının özünü insan davranışındaki kademeler oluşturmaktadır. Tüm insan davranışlarının, üç davranış elemanının (S-O-R) biraraya gelmesiyle izah edilebildiği Bölüm 3.3.1'de belirtilmişti. İ-M sisteminde insan davranışını oluşturan bu S-O-R zincirlerinde herhangi bir elemanın gerçekleşmemesi insan hatasına yol açar. Bu zinciri kesintiye uğratan ve hatayı doğuran aksaklıklar şunlar olabilir:

- Uyarının farkedilmemesi veya yanlış farkedilmesi
- Çevreden gelen uyarıların ayrılmasında yetersizlik
- Uyarının taşıdığı anlamın yanlış yorumlanması
- Uyarıya verilecek cevabın seçiminde hata
- Gerekli cevabın verilmesinde fiziksel yetersizlik
- Cevabın yanlış zaman ve sırada verilmesi

Payne ve Altman (1962) insan hatalarını, S-O-R paradigmanın içerdiği davranış bileşenlerini de bir anlamda yansıtan bir grupta yapmışlardır:

- Girdi hataları : Enformasyonun duyulanması ve algılanması aşamasında ortaya çıkan hatalar
- İşleme hataları : Enformasyonun işlenmesi sırasında ortaya çıkan hatalar

- Çıktı hataları : Belirlenen fiziksel cevabın ortaya konmasında oluşan hatalar

Rook (1962), bu sınıflamaya bir ikinci boyut eklemektedir (Tablo 4-3). Hata ile sonuçlanan hareketin yapılışındaki kasıt, sistemi tanımlayan ikinci boyut olmaktadır.

Tablo 4-3. Hata Sınıflama Sistemi (Rook, 1962)

Niyet Unsuru	Davranış Bileşeni		
	Girdi(G)	İşleme(İ)	Çıktı(Ç)
Niyetli (A)	AG	Aİ	AÇ
Niyetsiz (B)	BG	Bİ	BÇ
İhmal, atlama (C)	CG	Cİ	CÇ

Kişisel hatalar Tablo 4-3'deki bu 9 gruptan birine sınıflandırılmaktadır. Örneğin, uçağa pilotun bir göstereyi yanlış okuması AG, kanatçıklara kumanda eden düğmeye dikkatsizlikle dokunması BÇ sınıfı bir hatadır.

Sahadan toplanan veriler bu sisteme göre sınıflandırılarak, hata kaynaklarının belirlenmesi ve ortadan kaldırılması mümkün olmaktadır. Nitekim bu şekilde sınıflanan hata verileri incelenerek, uçak kazalarında önemli bir nedeni, altimetreden yüksekliğin okunmasında yapılan hataların oluşturduğu belirlenmiş ve cihazlar daha hassas okumaya imkan verecek biçimde yeniden tasarlanmıştır (Mc Cormick ve Ilgen, 1980).

Sistem bütünlüğünde ele alındığında, sisteme hatalı girdi üreten insan hataları birincil derecede önemlidir. İnsan hataları, sisteme olan etkileri ön planda tutularak ve insan içinde hataya götüren iç mekanizmalar dikkate alınmaksızın incelendiğinde, insan çıktıları ile sistem gereklerini ilişkilendiren bir sınıflama ortaya çıkar. Swain (1963) tarafından geliştirilen bu sınıflama sisteminde hatalar

- ihmal, atlama hataları (omission)
- görev hataları (commission)

biçiminde ayrımlanmaktadır.

Operatör yapması gereken bir görevin tümünü veya bu görevin bir adımını atlarsa, bir ihmal/atlama hatası oluşur. Örneğin motor yağı değiştirilmesi sırasında karter tapası açılarak eski yağ boşaltılır, fakat tapa tekrar kapatılmadan yeni yağ motora konulur ise bu atlama hatası, yağın yerlere dağılması sonucunu doğurur. Görev hatasında ise operatör ilgili görevi yapar, fakat doğru yapmaz. Bu grup seçme hataları, sıra hataları, zaman hataları ve kalitatif hataları içeren geniş bir gruptur. Yağ değiştirme örneğinde tapaya büyük bir contanın takılması, seçme hatası; eski yağı boşaltmadan yeni yağın konması sıra hatasıdır. Eğer verilen görev öngörülen sürede bitirilemiyorsa zaman hatası, tapa gereğinden az sıkılarak yağ sızmasına yol açılıyorsa kalitatif hata sözkonusu olur.

Sistemle ilişkileri esas alan bu sınıflamaların yanısıra, insan hatalarının nedenlerine yönelik teorik çabalara ışık tutan, hatanın insan içindeki mekanizmalarını inceleyen, dikkate alan sınıflama çalışmaları da mevcuttur. Norman (1981) tarafından önerilen hata sınıflamasında, "hareket yanlışlıkları" kaynaklarına göre sınıflanmaktadır. Sistem, hareket dizilerinin bir takım şemalar tarafından kontrol edildiği kabulüne dayanmaktadır. Her görev bir grup şemadan oluşur. Görevin yerine getirilmesi ile ilgili şemalar, uygun koşulların oluşması halinde seçilerek, aktif hale getirilir ve bir tetik mekanizması yardımıyla uygulamaya konulur. Bu yaklaşım doğrultusunda Norman, insan yanlışlıklarını kaynaklarına göre üç ana sınıfta toplamaktadır:

- Niyetin (amaç/kasıt) oluşumundaki hatalardan kaynaklanan yanlışlıklar: karar verme ve problem çözme hataları
- Şemaların hatalı olarak aktif hale getirilmesinden kaynaklanan yanlışlıklar (slips): amacı(niyet) unutma, hareket sırasını yanlış düzenleme, hareket dizisinde bir adımı atlama veya tekrarlama hataları
- Aktif şemaların hatalı harekete geçirilmesinden kaynaklanan yanlışlıklar: Aktif bir şemanın yanlış zamanda harekete geçirilmesi, başka şemaların bileşenlerinin karıştırılması

Rasmussen (1983), insan enformasyon işleme sürecindeki farklı hata tiplerini açıklayabilmek için, bu sürecin altında yatan kognitif kontrol

mekanizmalarının belirlenmesi gerektiği görüşünü savunmaktadır. Sınıflama yaklaşımı insan davranışlarında 3 farklı düzeyi kapsamaktadır:

- beceri esaslı davranış (skill based)
- kural esaslı davranış (rule based)
- bilgi esaslı davranış (knowledge based)

Beceri esaslı davranış, hafızada depolanmış davranış kalıplarına dayanır. Örneğin kren sürücülüğü. Beceri esaslı davranışın tipik bir karakteristiği, göstergeden gelen bilginin anlamını yorumlamaya gerek olmaksızın ilgili eylemin yerine getirilmesidir.

Kural esaslı davranışta, hafızada depolanmış veya yazılı kuralların takip edilmesi sırasında daha bilinçli çabalar gerekir. Örneğin test ve ayar işleri. Kural ve beceri esaslı davranışlar arasındaki sınır kesin değildir ve pratik düzeyine bağlı olarak değişir. Bir görevde pratiği fazla olan kişi için beceri esaslı olan bir davranış, pratiği daha az olan diğer biri için kural esaslı olabilmektedir (Swain ve Weston, 1988).

Karşılaşılan durum pek tanıdık, bildik değilse, yani personelin durumla ilgili olarak kendi bilgi ve tercihlerine başvurarak yorum yapması tanıda bulunması ve karar vermesi gerekiyorsa bilgi esaslı davranıştan söz edilir.

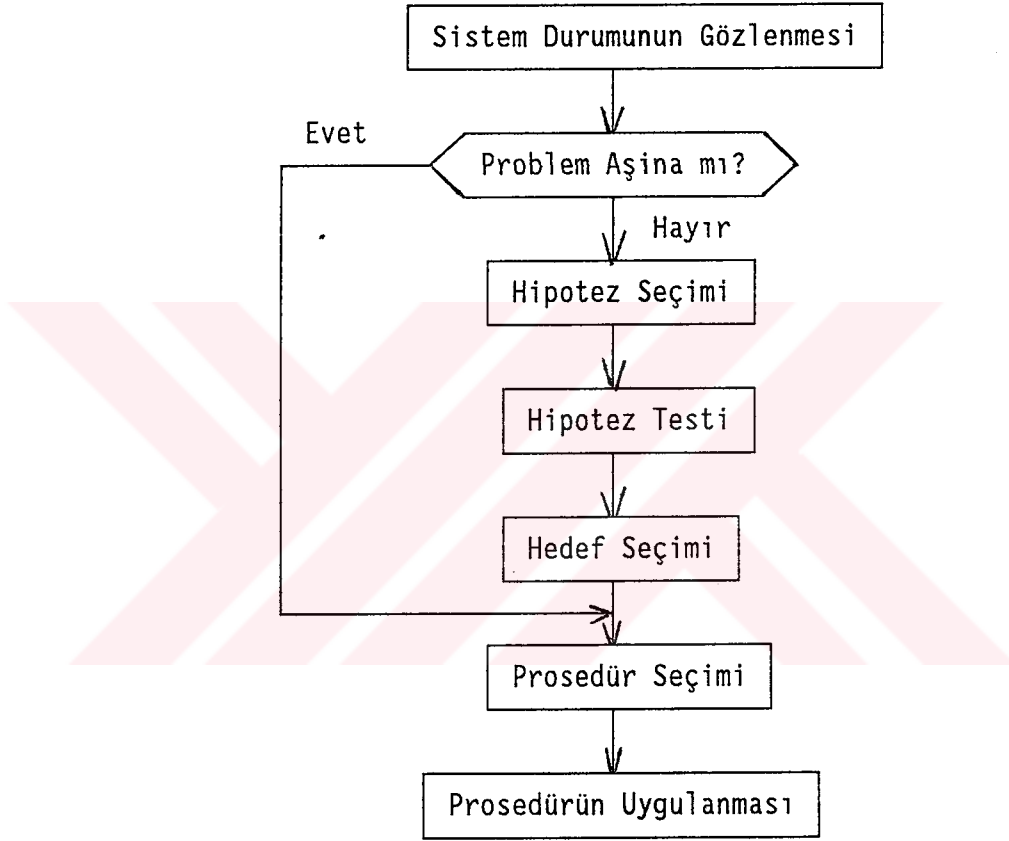
Konuyu sistem yaklaşımıyla ele alan Rasmussen, insan hatalarını çeşitli şekillerde ayırt etmenin mümkün olabileceğini, örneğin işin özelliklerine, insandaki psikolojik mekanizmalara veya çevre koşullarına göre sınıflama yapılabileceğini vurgulamaktadır. Ancak yazara göre güvenilir sistemler dizayn etmek için, birçok farklı bakış açısını birlikte içeren sınıflamalara gerek vardır (Rasmussen, 1989).

Rouse ve Rouse (1983), insan hatalarını nedenleri ve faktörleri ile birlikte analiz etmek amacıyla iki düzeyli bir sınıflama önermektedirler. Bu iki düzey

- Genel kategoriler
- Özel kategoriler

olarak adlandırılmaktadır. Genel kategoriler, insan hatasının olduğu davranış süreçlerini ayırt etmeye yöneliktir. Özel kategoriler ise hatalı karar ve hareketlerin özelliklerini tanımlamaktadır.

Sınıflamada, Şekil 4-2'de görülen ve bir operatörün görevindeki ana adımları yansıtan kavramsal modelden yararlanılmaktadır.



Şekil 4-2. Operatör Görevlerinde Kavramsal Model

Bu model, uçak, gemi ve güç santralleri gibi karmaşık sistemlerde operatörün görevini basit biçimde ifade etmektedir. Önerilen sınıflamada genel kategoriler bu modeldeki ana adımları yansıtmaktadır. Bu iki düzeyli sınıflama sistemi Tablo 4-4'de verilmektedir.

Tablo 4-4. İki Düzeyli Sınıflama Sistemi (Rouse ve Rouse, 1983)

Genel Kategori	Özel Kategori
1) Sistem Davranışının Gözlenmesi	a- aşırı b- yanlış yorumlanmış c- doğru değil d- tam değil e- uygun değil f- yok
2) Hipotez Seçimi	a- gözlemle uyuşmuyor b- uyuşuyor ama ihtimali çok az c- uyuşuyor fakat oldukça pahalı d- fonksiyonel açıdan ilgisiz
3) Hipotez Testi	a- tam değil b- yanlış hipotezin kabulü c- doğru hipotezin reddi d- yok
4) Hedef Seçimi	a- tam değil b- doğru değil c- gerekli değil d- yok
5) Prosedür Seçimi	a- tam değil b- doğru değil c- gerekli değil d- yok
6) Prosedürün Uygulanması	a- adım atlanmış b- adım tekrarlanmış c- adım eklenmiş d- adım sıra dışı e- zamanlama uygun değil f- tam değil g- hareket ilişkisiz, uygun değil

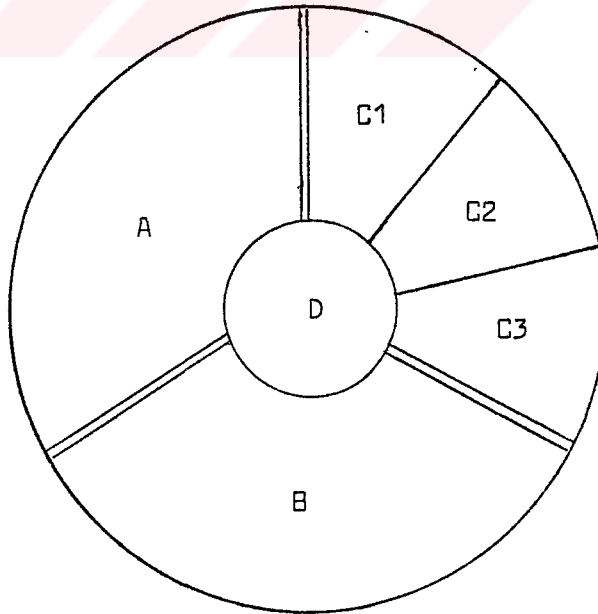
Sınıflamanın uygulanmasında önce göreve ait ilgilenilen genel kategoriler Şekil 4-2'den belirlenir. Sonrasında her genel kategori için uygun özel kategoriler tespit edilir. Bu belirlemelerde görevin özellikleri, incelemenin amaçları ve mevcut veriler etkili olur.

Bir diğer iki düzeyli sınıflama Wu ve Hwang (1989) tarafından nükleer santrallerde bakım çalışmaları için önerilmektedir. Sınıflama, insan hatasına yol

açan ana sebeplerin belirlenmesi ve bağlı olarak hataları önleme ve giderme politikalarının önerilmesi amaçlarına yönelik olarak geliştirilmiştir.

4.2.3. İnsan Hatasının Oluşumunda Rol Alan Faktörler

İnsan davranışının iş ortamındaki yansıması insan çalışmasıdır, insan performansıdır. İnsan performansının önemli bir parçasını, istenmeyen bir bölümünü ise, insan hataları oluşturur. İnsan hatasına yol açan, insan davranışındaki değişkenliği oluşturan faktörleri araştırırken, İ-M sisteminin iki ana elemanı arasındaki bir temel farklılık gözden kaçırılmamalıdır: İnsan yaradılışı itibarıyla makineye göre daha az stabildir ve çevresinden ona etki yapan faktör sayısı makineye göre çok daha fazladır. İnsan davranışlarının öncelikle kendisi stabil olmayan bir çevrede gerçekleştiğini ve bu çevreden etkilendiğini belirtmek gerekir. Ayrıca operatör tepkileri işten kaynaklanmayan fizyolojik ve psikolojik faktörlere de bağlıdır (Queinnec ve Terssac, 1988). Sonuçta insan davranışı ve onun iş ortamındaki sonucu olan insan performansı, birçok faktörün kombinasyonu olarak değişkenlik gösterir ve bu değişkenliklerin bir kısmı hatayla sonuçlanır. İnsan performansı kişiden kişiye farklılık gösterdiği gibi, aynı kişi üzerinde zamana bağlı olarak da değişir.



- A: İşle İlgili
- B: Kişisel
- C1: Sosyal Çevre
- C2: Fiziksel Çevre
- C3: Organizasyonel Çevre
- D: Psikolojik-Fizyolojik

Şekil 4-3. Performansı Etkileyen Faktör Grupları

Swain (1977), insan performansının oluşumunda etkili olan tüm faktörleri "Performansı Etkileyen Faktörler" (PEF) olarak adlandırmaktadır. Bu faktörler 3 grupta toplanabilir (Şekil 4-3). PEF'in bir kısmı kişinin dışında gerçekleşir ve performansa yön verir. İş'e ve iş ortamında insanı etkileyen fiziksel, sosyal ve organizasyonel çevreye ait faktörler bu grubu oluşturur. Kişisel faktörler kişinin beraberinde getirdiği ve performansın oluşumunda rol oynayan PEF grubudur. Psikolojik-fizyolojik PEF adı ile verilen üçüncü grup faktörler ise, diğer iki PEF grubu arasında köprü görevi yaparlar.

İnsan performansının oluşumunda rol alan çok sayıda faktör vardır. İnsan performansını konu alan birçok kaynakta bu faktörler incelenmekte ve çeşitli gruplar altında toplanmaktadır (Bkz. Bosman 1981, Mc Cormick 1976, Swain 1977, Rohmert 1986, Mc Cormick ve Ilgen 1980). İnsan performansının oluşumunda rol oynayan bu faktörler ilgili gruplara göre Tablo 4-5'de sıralanmaktadır.

İ-M sistemlerinde insan performansını belirleyici rol oynayan tüm faktörlerin bir kısmı iş ve işin yapıldığı ortamdan kaynaklanan durumsal faktörlerdir, bir kısmı ise kişisel faktörlerdir. İlk gruptaki faktörler İ-M sistemi bütünlüğünde incelenirler. Kişisel faktörler ise daha farklı niteliktedirler ve insana yönelik bilim dallarının inceleme konuları arasındadırlar.

Durumsal faktörler ergonomi felsefesinin özelliklerini taşıyan bir yaklaşımla iyileştirilmeye çalışılır: Yani sistem kullanıcıya uygun olarak dizayn edilmelidir, aksi mümkün değildir. Her İ-M sisteminde, sistemin insana yüklediği bir takım gerekler vardır. Bu göreve ait gereklerin insanın kapasite ve sınırlarını aşması halinde "hataya-yatkın" durumlar ortaya çıkar (Swain ve Guttman, 1983). Bu tür durumların ortadan kaldırılmasında işbilim alanındaki mevcut literatür yeterli teorik destek sunmaktadır.

Psikolojik-fizyolojik PEF'in incelenmesinde hem içsel hem dışsal PEF birlikte ele alınmalıdır. Çünkü psikolojik-fizyolojik PEF, diğer iki grup PEF'e bağlı olarak etkisini gösterir. Psikolojik-fizyolojik PEFlerin performansı olumsuz yönde etkileyebileceği, personel devir oranı, devamsızlık ve diğer istenmeyen sonuçları arttırabileceğine dikkat edilmelidir (Swain, 1976).

Tablo 4-5. Performansı Etkileyen Faktörler

- * İşle ilgili PEF:
 - İş metodu, iş akışı
 - Çalışma yeri tasarımı
 - Araç-gereç ekipman tasarımı
 - İş karmaşıklığı/ iş zorluğu
 - iş yükü
 - İş talimatları
 - Çalışma süresi/mola süreleri
 - Vardiya
 - Görev kritikliği
- * Çevre ile ilgili PEF
 - . Fiziksel çevre
 - Aydınlatma
 - Gürültü
 - Titreşim
 - Çevre Temizliği
 - Çevre düzeni
 - Klima
 - Gaz, toz, duman, radyasyon vs
 - . Sosyal çevre
 - Çalışma hayatı dışında kalan kişiler, aile vs ile ilişkiler
 - İş yerindeki kişiler arası ilişkiler, grup davranışları
 - ast-üst ilişkileri vs
 - . Organizasyonel Çevre
 - Organizasyon yapısı, politikası
 - Yönetim denetim türü
 - Dürtüleme tipi: ödül, ceza, diğer faydalar
- * Kişisel PEF
 - Eğitim
 - Tecrübe
 - Beceri (motor özellikler)
 - Zeka
 - Değer sistemi
 - Fiziksel yapı
 - Yaş
 - Cinsiyet
 - Kültür düzeyi
 - Yetenek
 - Kişilik özellikleri
 - Hafıza
- * Psikolojik-fizyolojik PEF
 - Yorgunluk
 - Motivasyon
 - İşe ilgi
 - Açlık-susuzluk
 - Ağrı
 - Monotonluk
 - Vigilance
 - İşe uygunluk
 - İşe yatkınlık
 - Performans arzı ritmi
 - Sağlık durumu

Kişinin işe gelirken sahip olduğu birtakım, özellik, beceri, yetenek, kapasite vs. gibi nitelikler vardır. Bu özellikler iş ile ve işin yapıldığı ortam ile ilgili değildir. Ancak performansın oluşumunda bu kişisel özellikler işle ve çevresiyle ilgili diğer faktörlerle birlikte rol alır. İşin ve iş çevresinin gerektirdikleri ile insana ait bu özellikler arasındaki uygunluk ne denli fazla ise performans da o derece iyi düzeyde olacaktır. İ-M sisteminde tüm elemanlar birbiriyle etkileşim halindedir. Bu nedenle elemanlardan birinin değişimi diğerlerini de etkileyecektir.

Tablo 4-5'de verilenler genel olarak herhangi bir İ-M sisteminde performansı etkileyebilecek faktörlerdir. İncelenecek olan sisteme bağlı olarak, bu faktörlerden bazılarının sisteme etkileri yok kabul edilebilecekken, diğerleri performansın oluşumunda farklı önem derecelerinde etkili olacaklardır.



BÖLÜM 5. İNSAN GÜVENİLİRLİĞİ

5.1. Teknik Sistemlerde Güvenilirlik

Güvenilirlik tanım itibarıyla arıza probabilesinin bütünleyenidir. Teknik alanda literatürde çeşitli güvenilirlik tanımları verilmektedir. Külür'e (1977) göre güvenilirlik bir malzemenin kullanılırken arıza yapmama kabiliyetidir. Dhillon (1988) ise güvenilirliği, bir ünitenin (sistem, alt sistem veya bileşen) üzerine yüklenen fonksiyonu, belirlenen koşullar altında ve belirli süre boyunca sürdürme probabilesi olarak tanımlamaktadır.

Teknik sistemlerin güvenilirlik analizlerinde izlenen yol genelde bir kaç aşamadan oluşmaktadır. Güvenilirlik analizleri sırasında sistemler yapısal ve fonksiyonel olarak incelenir, sistemi oluşturan elemanlara ait güvenilirlik değerleri sistem yapısı ve süreçteki fonksiyonel sıra uyarınca biraraya getirilir, ilişkilendirilir. Sistemin işleyişi sırasındaki çeşitli fonksiyon dizileri, fonksiyonel olay ağaçları veya arıza ağaçları kullanılarak modellenir. Muhtemel her fonksiyon dizisi bu ağaçlarda ayrı bir dal şeklinde temsil edilir. Her bir bileşene ait güvenilirlik değerleri, üreticinin bildirdiği tahmini değerler, sahadan gelen arıza verileri vb'nden yararlanılarak belirlenir. Sistemi oluşturan bileşenler için böylece tahmin edilen güvenilirlik değerleri matematik kurallar vasıtasıyla birleştirilerek, ağaçtaki her bir dala ait güvenilirlik elde edilir.

Klasik güvenilirlik tanımı probabiles kavramını içerir ve klasik güvenilirlik teorisi "arıza oranı" terimi üzerine kuruludur. Arıza oranı, bir ünite (sistem, alt sistem veya bir parça) öngörülen bir ömür ölçüsü boyunca ortaya çıkan arıza sayısıdır. Ömür ölçüsü olarak örneğin zaman, olay, metre veya devir kullanılabilir (Dhillon, 1988).

5.2. İnsan Güvenilirliği ve Analizi

İnsan güvenilirliği teorik esaslarını klasik güvenilirlik alanından almaktadır. İnsan güvenilirliği, teknik sistemlere benzer bir yol izlenerek analiz edilir. İnsan güvenilirliği analizlerinde görev dizileri, teknik sistemlerin güvenilirlik analizlerine benzer biçimde modellenir. Görevi oluşturan bileşenler ve göreve ait elemanlar için güvenilirlik değerleri tayin olunur. Fonksiyon dizisindeki yapıya uygun olarak bu güvenilirlik değerleri birleştirilir, tüm göreve veya görev dizisine ait güvenilirlik (veya hata probabilitesi) ortaya çıkarılır.

Klasik güvenilirlik tanımı ile analogi kurarak, insan güvenilirliği, insanın bir görevi öngörülen bir süre boyunca, öngörülen koşullarda hatasız olarak gerçekleştirmesi probabilitesi olarak tanımlanabilir. Swain ve Guttman (1983), insan güvenilirliğini bir kişinin

- İ-M sisteminin gerektirdiği faaliyetleri, izin verilen süre zarfında (zaman kısıtı varsa) doğru olarak yapması
- Sistemi aksatacak, fazladan faaliyetlerde bulunmaması probabilitesi

olarak tanımlamaktadır. Rasmussen (1988b) insan güvenilirliği kavramının, çalışan insan, içinde bulunulan çevre ve performansı değerlendirecek bir karar vericiden oluşan üçlüye bağlı olarak ortaya çıktığını belirtmektedir.

İnsan güvenilirliği analizinin (İGA) amacı, İ-M sistemini analiz ederek muhtemel insan hatalarını ve onların potansiyel etki ve sonuçlarını tahmin etmektir (Lee ve diğ.,1988; Meister, 1973). Analizler kalitatif veya kantitatif nitelikte olabilir. Kalitatif İGA özellikle sistemlerin ilk tasarımlarında veya modifikasyonlarında uygulanır. Amaç, insan hatalarının sistemde doğuracakları etkileri, tolere edilebilecek bir düzeye indirmektir. En basit şekli ile bir kalitatif İGA görev analizi, bir hatanın belirli bir dönemde (ay, yıl) oluşma frekansı tahmini, hatanın doğurduğu muhtemel sonuçların veya maliyetlerin değerlendirilmesi ve hatanın giderilip giderilmeyeceği konusundaki karar aşamalarını içerir (Miller ve Swain, 1987). Kantitatif bir İGA'nde ise her bir görev elemanı için insan hata probabilitesi tayin edilerek, insan hatasının sisteme etkileri belirlenir ve görev bütünü için hata (başarı) probabilitesi sayısal olarak elde edilir.

5.3. İnsan Güvenilirliği Analiz Yöntemleri

İnsan güvenilirliği alanında çok sayıda yöntem geliştirilmiştir. Meister (1973), operatör ve teknisyen güvenilirliklerini sayısal olarak tahmine yönelik 22 yöntemi (veri bankaları da dahil) karşılaştırmakta ve yöntemleri özelliklerine göre sınıflamaktadır. Bu araştırmaya göre, incelenen yöntemlerde genel amaçlı bir metodoloji söz konusu değildir. Her yöntem bazı tür görev ve uygulama alanlarında (sistemlerde) diğerlerine üstünlük sağlamaktadır. Yöntemler çıktı olarak genellikle görevin/sistemin başarıyla çalışması probabilitası ile görevin tamamlanma süresine yönelik tahminler üretir. Yöntemlerin bir kısmı operatör, bir kısmı ise bakım faaliyetleri ile ilgilidir. İGA yöntemlerinde iki farklı temel yaklaşım kullanılmaktadır:

- Analitik Yaklaşım
- Simülasyon

Yöntemler arasında ortak bir metodoloji bulunmamasına ve analitik/simülasyon yaklaşım farklılıklarına rağmen, analizin uygulanmasındaki ana adımlar hemen tüm yöntemlerde aynıdır. İGA yöntemlerinin uygulanmasındaki bu genel prosedür şöyledir:

- Sisteme fonksiyon/görev analizleri uygulanarak, görev bütünleri, tahmine esas oluşturan davranışsal ünitelere (görev parçaları, görevler ve fonksiyonlar) ayrıştırılır.
- Bu davranışsal üniteler incelenerek tahminde hangi parametrelerin dikkate alınması gerektiği belirlenir.
- Uygun veri kaynaklarından elde edilen veriler davranışsal ünitelere tahsis edilir.
- Tahmin yönteminin amaçladığı çıktıları elde etmek üzere, davranışsal üniteler probabilitate veya simülasyon yoluyla birleştirilir.
- Görev bütününe ait nihai değer ile sistemin teknik kısmına ait nihai değerler bir araya getirilerek, sistem güvenilirliği tayin edilir. Sadece insan güvenilirliğinin tayini amaçlanmış ise, bu adım uygulanmaz.

İnsan güvenilirliği analiz yöntemlerinin uygulanmasında temeli oluşturan güvenilirlik ölçüleri ve sistem güvenilirliği konuları aşağıda ele alınmaktadır.

İnsan güvenilirliğinin alt yapısını oluşturan bu bilgilerin ışığında , İGA alanındaki yaklaşım, modelleme tekniği, modele dahil edilen boyutlar (kritiklik, bağımlılık vs.) açısından varolan temel farklılıkları yansıtan, uygulamada nispeten yaygın kabul görmüş ve probabiliteleri kullanan bazı İGA yöntemleri incelenmekte, tanıtılmaktadır.

5.3.1. İnsan Güvenilirliğinde Temel Bilgiler

İnsan güvenilirliğinin modellenmesinde insan çalışması açısından iki grup sözkonusu olur. İnsan çalışması zamanla ilişkisi yönünden değerlendirildiğinde, görevler farklı özellikte iki grupta ele alınır, farklı nitelikteki ölçüler kullanılarak sayısallaştırılır ve modellenir:

- Zamana göre sürekli görevler
- Zamana göre kesikli görevler

Zamana göre kesikli ve sürekli görevlere ait tanımlar ve bu iki görev grubunda probabilistik güvenilirlik hesabının dayandığı temel kavramlar, ölçüler ve ilişkiler bu bölümde incelenmektedir.

5.3.1.1. Sürekli Görevlerde İnsan Güvenilirliği ve İnsan Hata Oranı

Sürekli dikkat (Vigilance, örn. ekran gözleme), dengeleme (stabilizing), iz sürme (tracking örn. araba sürme) gibi görevler zamana göre sürekli dir. Mekanik ekipmanların gözlenmesi sürekli dikkat gerektirir. Sürekli dikkat olarak adlandırılan bu görev türü, sık gerçekleşmeyen ve herhangi bir anda ortaya çıkacak olan bir uyarıyı süregelen bir dikkatle beklemeyi, görsel ve işitsel kanallar yoluyla tespit edilen uyarının gerektirdiği eylemleri yerine getirmeyi kapsar (Siegel, 1970). Bu tür görevlerin başlangıç ve bitiş anları net ve kesin değildir. Görev zaman boyunca devam eder. Sürekli görevlerin güvenilirlikleri, klasik güvenilirliğin sürekli kısmına benzer olarak modellenir.

Sürekli işlerde insan güvenilirliği, klasik güvenilirlikteki Arıza Oranı $h(t)$ 'ye analog bir kavram olan İnsan Hata Oranı $e(t)$ kavramına dayanmaktadır. Yani güvenilirlik verileri birim zamanda hata şeklinde ifade edilmektedir.

İnsan güvenilirliği açısından önemli diğer iki kavram ilk hataya kadar geçen süre T_1 ve ilk hata oranı $e_1(t)$ 'dir.

$e_1(t)$: t süresine kadar hata olmadığı durumda, t'yi izleyen dt küçük zaman aralığında ilk hatanın olması koşullu probabilesidir.

$e_1(t)$ hata verilerinden belirlenip, tahmin edilebilir veya önceden belirlenmiş olması gereken güvenilirlik fonksiyonundan elde edilebilir.

Askren ve Regulinski (1969), sürekli görevlerde insan güvenilirliğini veren genel bir matematik model geliştirmişlerdir. Model ilk hata oranına dayanmaktadır. Laboratuvarında yürütülen bir dizi sürekli dikkat çalışmasında ilk hata süreleri gözlemle tespit edilmiştir. Öğrenme ve yorulma etkisini minimum kılmak için deney süresi 30 dakika ile sınırlandırılmıştır. Elde edilen veriler uyarınca ilk hata oranı $e_1(t)$ tanımlanmıştır.

Çalışmada en azından t süresine kadar hatasız çalışma probabilesi

$$R(t) = \exp \left[- \int_0^t e_1(x) dx \right] \quad (5.1)$$

olarak modellenmektedir.

Makina arızaları ortaya çıktıktan sonra, eğer makina tamir edilip yeniden işleme alınmaz ise, arızanın yenilenmesi söz konusu olmaz. Oysa insan hataları tesadüfi olarak oluşur ve göreve devam edildiği sürece hata ortaya çıkmaya devam eder. Sürekli görevler kapsamında, operatör tarafından yapılan hata sayısının teorik dağılımı ve operatörün belirlenen zaman diliminde verilen görevi hatasız yapması probabilesi, güvenilirliği incelenebilir. Bu incelemede insan hatasının süreçte herhangi bir kesintiye yol açmadığı varsayılır. Genel hata süreçlerinin matematik olarak modellenmesi çok güçtür. Bazı durumlarda hata oranlarının sabit kaldığı ve geçmişten bağımsız olduğu, yani hatanın oluşma probabilesinin kendinden önceki hatalara bağlı olmadığı (istatistiksel bağımsızlık) kabul edilebilir. Böyle durumlar bir Poisson süreci olarak ele alınıp, incelenebilir.

Bu durumda t civarında dt dar zaman aralığında $e(t)$ insan hata oranı

$$e(t)dt = \text{Prob} \{ [t, t+dt) \text{ aralığında en az bir hata} \} \\ = E [[t, t+dt) \text{ aralığında hata sayısı}] \quad (5.2)$$

olarak tanımlanır.

$e(t)$ oranı, sürekli dikkat etkisi, yorgunluk veya öğrenmeye bağlı olarak zamana göre değişken ise süreç nonhomojendir. Park (1985), öğrenme etkisinde insan güvenilirliğini, zaman sürekli görevler için nonhomojen bir Poisson süreci olarak modellemektedir.

Eğer $e(t)$ zamana göre sabit ise hata süreci homojendir. $e(t) = \lambda$ ile gösterilir. Sabit insan hata oranı λ hata sayısının toplam görev süresine oranından tahmin edilir:

$$e(t) = \hat{\lambda} = \frac{\text{hata sayısı}}{\text{toplam görev süresi}} = r/t \quad (5.3)$$

$[t_1, t_2]$ zaman aralığındaki toplam hata sayısı $N(t_1, t_2)$ aşağıdaki probabilitelere göre ortaya çıkar:

$$\text{Prob} \{ N(t_1, t_2) = k \} = [\exp[-\lambda (t_2 - t_1)]] \cdot [(t_2 - t_1)^k / k!] \quad (5.4)$$

Aynı aralıkta, hata sayısının beklenen değeri

$$E [N(t_1, t_2)] = \lambda (t_2 - t_1) \quad (5.5)$$

olur.

$N(t_1, t_2)$ için % 90 güvenlikte, alt ve üst sınırlar (N_L, N_U) aşağıdaki eşitsizliklerden elde edilir:

$$\sum_{k=0}^{N_L} \text{Prob} \{ N(t_1, t_2) = k \} > 0.05 \\ \sum_{k=0}^{N_U} \text{Prob} \{ N(t_1, t_2) = k \} > 0.95 \quad (5.6)$$

İnsanın verilen görevi (t_1, t_2) zaman aralığında hatasız olarak yerine getirme probabilitesi, güvenilirliği

$$R(t_1, t_2) = \text{Prob} \{ N(t_1, t_2) = 0 \} = \exp [-\lambda (t_2 - t_1)] \quad (5.7)$$

olur. Hata oranının zamanla değişmesi halinde ifade

$$R(t_1, t_2) = \exp \left[- \int_{t_1}^{t_2} e(x) dx \right] \quad (5.8)$$

şeklinde genelleştirilir.

Hata süreci, yukarıda incelenen özel hallerin dışında, bağımlı olaylardan oluşan, gelişler arası sürelerin eksponansiyel dağılıma uymadığı, tümüyle genel bir hata süreci şeklinde gelişebilir. Birkaç özel durum dışında, bu tür süreçler çözüme yatkın değildir (Park, 1987b).

5.3.1.2. Kesikli Görevlerde İnsan Güvenilirliği ve İnsan Hata Probabilitesi

Eğer çalışma net olarak tanımlanmış başlangıç ve bitiş noktaları arasında sürüyor ise, kesikli görev söz konusudur. Kesikli işler için insan güvenilirliğinin dayandığı temel terim İnsan Hata Probabilitesi (İHP) dir. İHP belirli bir görev boyunca hatanın oluşması probabilitesidir. Görev için öngörülen süre tanımlı ve sabit olabileceği gibi, göreve herhangi bir süre biçilmemiş de olabilir. İHP değeri yapılan hata sayısının, o hatanın oluşması için mevcut toplam fırsat sayısına oranından tahmin edilir.

$$\hat{IHP} = \hat{q} = \frac{\text{yapılan hata sayısı}}{\text{toplam fırsat (deneme) sayısı}} = r/n \quad (5.9)$$

Bir görevin başarıyla yerine getirilmesi probabilitesi, yani işin güvenilirliği (1-İHP) olarak, klasik güvenilirliğe benzer şekilde verilebilir. Tanımlardan görüldüğü üzere, insan hata oranı yapılan hata sayısının zamana oranlanmasıyla, İHP ise tekrar sayısına oranlanmasıyla elde edilir. Bu nedenle kesikli görevlerde, insanın yerine getireceği bir görev elemanının performans güvenilirliğinden söz edildiğinde, klasik güvenilirlikteki "talep başına başarılı performans probabilitesi" sözkonusu demektir.

Eğer İHP değerleri, yorgunluk veya öğrenme gibi nedenlerle zamanla değişiyor ise, zaman-kesikli görevin tekrarından oluşan dizi (süreç) sabit (stationary) değildir. Park (1985), zaman-kesikli görevlerde öğrenme etkisinde insan güvenilirliğini, sabit olmayan (nonstationary) bir Bernoulli süreci olarak modellemektedir.

İHP değerleri geçmişten bağımsız değil ise, süreç non-Markovian hal alır. Non-Markov zincirleri hakkında genel bir teori henüz yoktur. Koşullu İHP değerleri kullanılarak, genel güvenilirlik belirlenebilir. Fakat bağımlı İHP için veri elde edilmesi güç olabilir (Park, 1987b).

İnsan çalışmasının büyük kısmı bu grup kapsamındadır. Görevi başlangıcı ve sonu belli elemanlarına ayırarak inceleyen ve değerlendiren iş etüdü yöntemleri de esas olarak bu gruba yöneliktirler. İzleyen bölümde büyük ölçüde kesikli görevlerin modellenmesi ve değerlendirilmesinde kullanılan insan güvenilirliği analiz yöntemleri ele alınmaktadır.

5.3.1.3. Sistem Güvenilirliği

Birden fazla bileşenden (insan veya makina veya her ikisi) oluşan bir sistemin bütününe ait güvenilirlik, bileşenlerin güvenilirlikleri ve bileşenlerin birbirlerine nasıl bağlandıkları ile ilgilidir. Bir sistemde bileşenler birbirleri ile "seri" veya "paralel" bağlı olabilirler.

Bileşenlerin seri olarak düzenlendiği sistemlerde (seri sistem), sistemin başarısı istisnasız tüm bileşenlerin (insan veya makina) başarılı olması ile mümkündür. Bir bileşenin aksaması bile sistemin başarısızlığı demektir. Güvenilirlikleri R_1 ve R_2 olan, seri bağlı iki bileşenden oluşan bir sistemin güvenilirliği

$$R_{\text{sistem}} = R_1 \times R_2 \quad (5.10)$$

olarak verilir.

Paralel sistemde aynı görevi yapan iki veya daha fazla bileşen birbirleriyle paralel olarak ilişkilendirilmiştir. Bileşenler birbirini yedekleyerek fonksiyonu başarıyla yerine getirme probabilesini yükseltirler. Paralel bağlı

bileşenlerden bir tekinin bile başarıyla çalışması, tüm sistemin başarısı için yeterlidir. Sistemin başarısızlığı için, paralel bağlı tüm bileşenlerin aynı anda başarısız olması gerekir. Güvenilirlikleri R_1 ve R_2 olan paralel bağlı iki bileşenin oluşturduğu bir sistemin güvenilirliği

$$R_{\text{sistem}} = [1 - (1-R_1)(1-R_2)] \quad (5.11)$$

şeklindedir.

5.3.2. Görev Kritikliği Analizi (Task Criticality Analysis)

Görev Kritikliği Analizi, Pickrel ve Mc Donald tarafından geliştirilen analitik bir yöntemdir. Yöntem, tahmin, değerlendirme ve tasarımların karşılaştırılması çalışmalarına imkan verir. Matematik araç olarak probabilitiyi kullanan yöntem, görevin başarı ile tamamlanması probabilitesi ile tamamlanma süresini üretir.

Bir sistemde insan tarafından yerine getirilmesi gereken çok sayıda farklı görev olabilir. Bu görevler sırasında meydana gelebilecek insan hatalarının sistem performansı üzerindeki etkileri, doğurdukları sonuçlar farklı olabilmektedir. Bu farklılığı "görev kritikliği" kavramıyla güvenilirlik analizlerine yansıtmak üzere Pickrel ve Mc Donald (1964), insan güvenilirliği ile ilgili çalışmalarında insan hatalarını sonuçlarına göre sınıflamaktadırlar. Bu sınıflamayı kullanarak, hatalarının frekansını ve şiddetini de yansıtan bir "hata kritikliği oranı" tanımlamaktadırlar. Yazarların bu çalışmalarındaki ana amaç, sistemin performansını etkileme probabilitesi daha yüksek olan hataları belirleyerek, hataların azaltılması çabalarını bunlara yönlendirmektir. Özellikle büyük ve kompleks sistemlerde insanın sebep olduğu kritik hata kaynaklarını belirlemek ve bunları ilk geliştirme aşamalarında bertaraf etmek amaçlanmaktadır.

Yöntemde her görev için

- Hatanın beklenen frekansı
- Bu hataya bağlı olarak bir sistem arızasının oluşması frekansı
- Arızanın muhtemel sonuçları

esaslarına dayanan kritiklik tahminleri gerçekleştirilir.

Görevler bu kritiklik tahminlerine göre sıralanır ve bağlı olarak hata sebeplerinin araştırılmasındaki öncelikler belirlenir. İlk veriler sisteme ait mevcut bilgilerden elde edilir. Simülasyon, prototip ve gerçek uygulamadan elde edilen veriler ile kritiklik değerleri güncelleştirilir.

Yöntemin uygulanmasında izlenen ana adımlar şunlardır:

- Görev Analizi
- Zamansal Analiz
- Hataların ve Etkilerinin Analizi
- Kantitatif Analiz

5.3.2.1. Görev Analizi

Bu yöntem kapsamında görev, belirli bir ekip tarafından belirli bir zamanda yerine getirilecek ana fonksiyonlar şeklinde tanımlanmaktadır. Ekip ise, görevi yerine getirecek bir veya daha fazla kişinin oluşturduğu gruptur.

Tüm ana görevleri belirlemek üzere akış diyagramları düzenlenir. Bu görevler zaman ekseninde sıralı biçimde gösterilerek, zaman yönünden kısıtlar ve çakışmalar belirlenir.

Görev tanımlarının hangi düzeyden başlayacağı ve ne denli detaylı olacağı analizin gereklerine göre belirlenir. Genellikle görev tanımları alt sistem düzeyinden başlar ve insan ile makina arasındaki etkileşimleri kapsar. Gerekli hallerde analiz daha elemanter düzeye indirilebilir.

Görev tanımı, işe özel bilgilerin yanısıra, operatörün neleri algılaması gerektiği, başarması gereken entellektüel fonksiyonları (bilgi hatırlama, alınan bilgiyi yorumlama), bunlara bağlı olarak vereceği cevap (tepki) hakkındaki bilgileri de içerir. Ayrıca birtakım durumsal parametreler de tanım içinde yansıtılır.

5.3.2.2. Zamansal Analiz

Zamanı, insan performansının bir parametresi olarak incelemek ve kontrol etmek görev hakkındaki bilgilerin analizi ile mümkün olur. Ekibin görevi ne kadar bir sürede tamamlayacağına yönelik tahminler "Ekip Görev Detayları (Crew Task Details) adı verilen formlar vasıtasıyla gerçekleştirilir.

Form ekibin bir görevi başarmak üzere yapması gereken tüm operasyonların listesini içerir. Bu form'a her adım için tahmin edilen süreler işlenir. Süre tahminlerinde enformasyon işleme süreleri için enformasyon teorisi; uzanma, görme gibi işlemler içinde MTM (Methods Time Measurement) tekniğinden yararlanılır.

Form aşağıdaki değerlerin kolayca elde edileceği bilgileri içerir:

- operasyonlar sırasında kontrol ve gösterge ünitelerinin kullanım sıklığı
- kontrol, gösterge üniteleri gibi elemanlar arası geçiş sıklığı

Bu bilgilerin ışığı altında kontrol ve gösterge ünitelerinin gruplanması, yerleşimi planlanır ve zaman kullanımı, hataların minimizasyonu hedeflenir.

5.3.2.3. Hataların ve Etkilerinin Analizi

Görevin yerine getirilmesi için yeterli süre tanınmışsa görev artık hata probabilitesi ve hataların etkilerinin muhtemel şiddetleri yönünden analiz edilebilir. Bir görev için yeterli süre verilmiş iken görevin öngörülen süre içinde ve koşullar altında yerine getirilmesi aksıyor ise, insan hatasından sözedilir.

Her görev incelenerek, muhtemel operatör hataları belirlenir. Fonksiyonel şemalar, mantıksal akış diyagramları ve diğer bilgilerden insan hatalarının muhtemel etkileri ortaya çıkarılır. Yöntem, insan hatalarını muhtemel etkilerine göre dört sınıfta gruplamaktadır:

- Güvenli : Hata sistemde büyük aksamalara yol açmaz. Sistemde fonksiyonel arıza, hasar yada personel yaralanması olmaz.

- Marjinal : Oluşacak hafif aksaklık kontrol edilebilir. Sistemde büyük aksama veya personel yaralanması olmaz.
- Kritik : Personel yaralanmalarına, alt sistem arızalarına neden olan hata sistemi aksatır. Derhal kontrol ve düzeltme gerekir.
- Facia : Hatanın doğuracağı aksamalar sistem kaybı, yaralanma ve insan kaybına yol açar

5.3.2.4. Kantitatif Analiz

İnsan hatasının sonucu olarak doğan sistem aksaklıklarının boyutunu tahmin için, hata probabiliteleri ile hatanın etkilerine dair bilgilerden faydalanılır.

Bir görev sırasında belirli bir insan hatasının gerçekleşmesi probabilitesi, birincil olarak AIR Data Store (bkz.Bölüm 6.3) adlı veri kaynağından elde edilir. Bu İHP değerlerinin kullanımı için işe ait muhtemel durum parametrelerinin ortaya konması gerekir. Dolayısıyla sisteme ait ön tasarım bilgileri, görev gerekleri ve durumsal bilgilere gerek duyulur. Bu ilk İHP tahminleri diğer kaynaklardan (simülasyon, benzer gerçek sistemler, modelin testi vs.) gelen bilgiler ile güncelleştirilir.

E_i : i sınıfından bir insan hatasının belirli bir görev süresince ortaya çıkma probabilitesi

Bir sonuç iki hatanın birlikte oluşması ile doğuyor ise, bu sonucun gerçekleşmesi probabilitesi

$$E_i = E_{i1} \cdot E_{i2} \quad (5.12)$$

olaylar bağımlı ise

$$E_i = (E_{i1}) \cdot (E_{i2} \mid E_{i1}) \quad (5.13)$$

olur. i sınıfından bir hatanın sistemi aksatma probabilitesi F_i uzman yargısı ile belirlenir.

i sınıfından bir hata birden fazla sonuç doğurabilir ise, sonuçların oluşması probabilitesi şöyledir.

$$F_i = 1 - \prod_{j=1}^J (1 - F_{ij}) \quad (5.14)$$

F_{ij} i sınıfından bir hatanın j sonucunu doğurması probabilitelerini gösterir.

Belirli bir görev sırasında i sınıfından bir insan hatası sonucunda sistemin aksamaması probabilitesi

$$Q_i = E_i \cdot F_i \quad (5.15)$$

olur. Belirli bir görev sırasında meydana gelen bir veya daha fazla insan hatası sonucunda sistemin aksamaması probabilitesi

$$Q_T = 1 - \prod_{i=1}^I (1 - Q_i) \quad (5.16)$$

görevin öngörülen süre ve koşullarda başarıyla yerine getirilmesi probabilitesi

$$R_T = 1 - Q_T \quad (5.17)$$

Kritiklik tahminleri, bir insan hatasının sistemi aksatma potansiyelini ifade eder.

S_{ij} , i sınıfından bir insan hatasına ait j sonucunun oluşturacağı muhtemel etkinin şiddetini gösterir. S_{ij} (0,1) aralığında bir değer alır. S_{ij} değerlerinin atanması, yargı (takdir) esasına dayanır. Hataların muhtemel etkileri hakkında yukarıda sözedilen sınıflama, değer atama için yol gösterir. Bu sınıflar için değer aralıkları Tablo 5-1'de verilmektedir.

Tablo 5-1. Hata Sınıfları ve S_{ij} Değerleri

sınıf	S_{ij}
güvenli	(0,0-0,1)
marjinal	(0,1-0,3)
kritik	(0,3-0,8)
facia	(0,8-1.0)

i hatasının ortaya çıkması halinde yolaçacağı j sonucunun sistemi aksatma potansiyeli

$$C_{Eij} = F_{ij} \cdot S_{ij} \quad (5.18)$$

i sınıfından bir hatanın gerçekleşmesi halinde doğuracağı bir veya daha fazla sonucun potansiyeli ise

$$C_{Ei} = 1 - \prod_{j=1}^J (1 - C_{Eij}) \quad (5.19)$$

olur.

C_i , i sınıfından bir insan hatasının kritiklik tahminidir ve o insan hatasının, doğuracağı bir veya daha fazla sayıdaki muhtemel sonuçlar nedeniyle sistemi aksatma potansiyelini ifade eder:

$$C_i = E_i \cdot C_{Ei} \quad (5.20)$$

Görev kritiklik tahmini C_T , o görev sırasında insanın yerine getireceği fonksiyonlarda oluşabilecek bir veya daha fazla insan hatasının sistemi aksatma potansiyelini verir:

$$C_T = 1 - \prod_{i=1}^I (1 - C_i) \quad (5.21)$$

N adet görevden oluşan bir görev dizisinde insan performansının kritikliği

$$C_M = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - C_{Tn}) \quad (5.22)$$

olur. Burada C_{Tn} n. görevin kritikliğidir.

5.3.3. Arıza Ağacı Analizi (Fault Tree Analysis)

Güvenilirlik analizi alanında önemli bir yöntemdir. Yöntem 1961-62 yıllarında Bell Telephone Laboratories bünyesinde yürütülen bir havacılık projesi sırasında geliştirilmiştir (Fussell ve diğ, 1974).

Yöntem, deduktif karakterli bir tekniktir. Teknikle "tepe olay" olarak adlandırılan istenmeyen bir olayın analizi yapılır. Başlangıç olarak alınan tepe olaydan geriye doğru, bu istenmeyen sonucu doğuran muhtemel olaylar sıra içinde detaylı biçimde incelenir. Teknik, bütün bir işletmeyi, herhangi bir sistem veya alt sistemi kapsayacak şekilde uygulanabilir. Ele alınan sistemin donanım, yazılım, insan ve çevre koşulları gibi tüm elemanları analize dahil edilebilir.

Yöntem, bir sistem arızasına (sonuç) yol açan muhtemel hataların (neden) Boole cebri ile ilişkilendirilerek, grafik şeklinde gösterimini sağlar. Yöntem etkin bir görsel araçtır.

"Olay" kavramı, yöntem kapsamında, sistem içinde bir arızanın oluşmasını belirtmektedir. Bir temel olay elemanter düzeyde oluşur ve arıza ağacının en alt seviyesinde temsil edilir. Tepe olay, olay ağacının tepesinde yer alır. Tüm olay ağacı tepe olayın analizine yöneliktir.

Arıza ağacının ilk uygulamalarında aşağıdaki genel kabuller yapılmaktadır:

- sistem elemanları için yalnızca iki durum sözkonusudur: başarı veya arıza (hata)
- temel olaylar birbirinden bağımsızdır.
- her olayın gerçekleşme (arıza) oranı sabittir ve eksponansiyel dağılıma uyar.

Yöntem dört adımdan oluşmaktadır:

- Sistemin tanımlanması : Sistem, istenmeyen olay (tepe olay) ve ona ulaşan dallar tanımlanır.
- Arıza ağacının oluşturulması : Bu adımda sistem, sembollerle ifade edilir.
- Kalitatif analiz : Oluşturulan arıza ağacı kalitatif olarak değerlendirilir. Örneğin arıza ağacının minimal kesme kümeleri belirlenir. Sistemin bazı zayıf yanları bu aşamada ortaya çıkarılır.
- Kantitatif analiz : Bu aşamada arıza ağacının tepe olayı ile ilgili arıza probabilitesi gibi sayısal bilgiler elde edilir. Bu amaçla analitik yaklaşım veya simülasyon kullanılabilir.

5.3.3.1. Sistemin Tanımlanması ve Arıza Ağacının Kurulması

Kompleks bir sistemde arıza ağacının kurulabilmesi için öncelikle, sistemin nasıl işlediği iyice incelenmelidir. Araştırmanın nedenini oluşturan tepe olay seçilerek, ağaçta yer alacak tüm olaylar, tepe olaya etkileri açısından ele alınmalıdır.

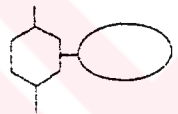
Bundan sonraki adımda tepe olaya doğrudan neden oluşturacak tüm olaylar belirlenerek, tanımlanan kapı sembolleri (VE, VEYA) vasıtasıyla tepe olayla ilişkilendirilirler. İlk dallanmayı takiben, o seviyedeki olayları etkileyen olaylar, son kademeye yani temel olay'a kadar benzer şekilde belirlenir. Tüm dallar, birbirinden bağımsız temel olaylara ayrıştırıldığında prosedür sona erer. Arıza ağacının oluşturulması karmaşıktır, zaman alıcıdır ve tecrübe gerektirir. Bu konuda detaylı bilgi için Vesely ve diğ.(1981)'e başvurulabilir.

Arıza ağaçları oluşturulurken, farklı nitelikteki olaylar Olay sembolleri ile gösterilir. Olaylar arasındaki ilişki ve bağlantılar ise Kapı (Gate) sembolleri adı verilen, mantıksal işlemleri temsil eden semboller ile verilir. Yöntemde en sık kullanılan mantıksal işlemler VE, VEYA, olaylar ise Temel Olay ve Sonuç Olay'dır. Arıza ağaçlarında kullanılan bazı olay sembolleri ve anlamları Tablo 5-2'de, kapı sembolleri ve anlamları Tablo 5-3'de görülmektedir. Bu tablolarda verilenlerin dışında daha karmaşık durumlarda gerek duyulan, diğer bazı semboller Dhillon ve Singh (1981)'de verilmektedir.

Tablo 5-2. Arıza Ağacı Olay Sembolleri

SEMBOL	İFADE	ANLAM
	Sonuç Olay	Kendinden önce gelen temel olayların kombinasyonundan ortaya çıkan olay
	Temel Olay	Bir elemanter bileşenin arızası
	Eksik Olay	Yetersiz ilgi veya veri nedeniyle sebebi tam olarak belirlenmemiş arıza olayı

Tablo 5-3. Arıza Ağacı Kapı Sembolleri

SEMBOL	İFADE	ANLAM
	VE	Çıkış olayının gerçekleşmesi için tüm giriş olaylarının aynı anda gerçekleşmesi gerekir.
	VEYA	Çıkış olayının gerçekleşmesi için girişteki en az bir olayın gerçekleşmesi gerekir.
	Sıralı VE	Çıkış olayının gerçekleşmesi için giriş olaylarının soldan sağa doğru sıra ile gerçekleşmesi gerekir.
	Yalnız VEYA	Çıkış olayının gerçekleşmesi için iki giriş olayından sadece birinin (ikisi birden değil) gerçekleşmesi gerekir.
	ÖNLEME	Giriş olayının çıkış olayını oluşturmaması için belirlenen koşulun sağlanması gerekir.
	GECİKME	Ancak belirli bir gecikme süresinin aşılmasından sonra çıkış olayı gerçekleşir.

5.3.3.2. Kalitatif Analiz

Arıza ağacını sadece oluşturmak bile, sistemi anlamakta oldukça fayda sağlar. Kompleks bir sistemi inceleyerek hazırlanan arıza ağacını bilgisayara aktarmak ve daha başka analizler yapmak mümkündür: Örneğin sisteme ait kesme kümeleri belirlenebilir; eğer bileşenlere ait güvenilirlikler veya arıza oranları verilmiş ise, minimal kesme kümelerinden hareketle sistem güvenilirliği oldukça kolay hesaplanabilir.

Tasarımın değerlendirilmesi açısından, arıza ağacına ait minimal kesme kümeleri ve minimal yol kümelerinin belirlenmesi yararlıdır. Arıza ağacında kesme kümesi, gerçekleşmeleri tepe olayını doğuran temel olay kümesi demektir. Daha fazla daraltılamayan ama yine de tepe olayı doğuran kesme kümesi ise minimaldir.

Kalitatif analizin amacı, oluşturulan arıza ağacını, tepe olayı doğuran temel olayların kombinasyonu şeklinde ifade eden, mantıksal açıdan ona eşdeğer, fakat daha basit bir biçime indirmektedir. Bu indirgemeyi sağlayan araçlardan biri Boole cebridir (Ayrıntılı bilgi ve diğer araçlar için bkz Fussell ve diğ., 1974).

Boole cebrinin bazı kuralları şöyledir:

Özdeşlik (Identity) kuralı:

$$\begin{aligned} X_1 + X_1 &= X_1 \\ X_1 \cdot X_1 &= X_1 \end{aligned} \quad (5.23)$$

Soğurma (Absorption) kuralı:

$$\begin{aligned} X_1 \cdot (X_1 + X_2) &= X_1 \cdot X_1 \\ X_1 + (X_1 \cdot X_2) &= X_1 \end{aligned} \quad (5.24)$$

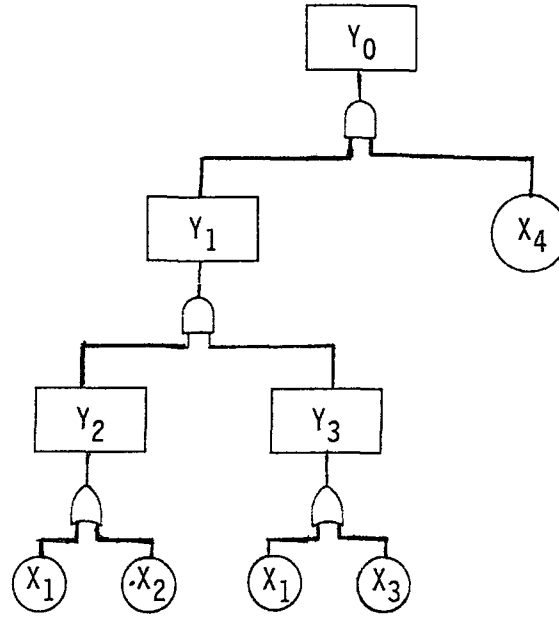
Dağılım (Distributive) kuralı:

$$\begin{aligned} X_1 \cdot (X_2 + X_3) &= X_1 \cdot X_2 + X_1 \cdot X_3 \\ (X_1 + X_2) \cdot (X_1 + X_3) &= X_1 \cdot X_1 + X_1 \cdot X_2 + X_1 \cdot X_3 + X_2 \cdot X_3 \\ &= X_1 + X_1 \cdot (X_2 + X_3) + X_2 \cdot X_3 \\ &= X_1 + X_2 \cdot X_3 \end{aligned} \quad (5.25)$$

Sadece VE ve VEYA kapılarından oluşan her arıza ağacında, tepe olayın gerçekleşmesini temsil etmek üzere Boole cebri kullanılabilir.

Arıza ağacının içerdiği her kapı, bir Boole cebir denklemi ile ifade edilir. Her kapı için giriş olayları bağımsız değişkenleri, çıkış olayları ise bağımlı değişkenleri oluşturur. Yukarıda verilen Boole cebri kuralları uygulanarak, bu denklemler çözülür. Böylece tepe olay, sadece temel olayları (çarpımların toplamı biçiminde) içeren, minimal kesme kümeleri cinsinden ifade edilir.

Sadece VE, VEYA kapılarından oluşan ve tekrarlı bir olay içeren basit bir arıza ağacı Şekil 5-1'de görülmektedir.



Şekil 5-1. Tekrarlı Olay İçeren Bir Arıza Ağacı

Bu örnekte

X_1, X_2, X_3, X_4 temel olaylar,
 Y_1, Y_2, Y_3 ara olaylar,
 Y_0 tepe olaydır.

Arıza ağacı aşağıdaki Boole denklemleri ile ifade edilir:

$$\begin{aligned}
 Y_0 &= Y_1 \cdot X_4 \\
 Y_1 &= Y_2 \cdot Y_3 \\
 Y_2 &= X_1 + X_2 \\
 Y_3 &= X_1 + X_3
 \end{aligned}$$

Denklemler yerine konularak, temel olay için

$$Y_0 = Y_1 \cdot X_4 = Y_2 \cdot Y_3 \cdot X_4 = (X_1 + X_2) \cdot (X_1 + X_3) \cdot X_4$$

elde edilir. İfade açılarak

$$\begin{aligned}
 Y_0 &= (X_1 \cdot X_1 + X_2 \cdot X_1 + X_1 \cdot X_3 + X_2 \cdot X_3) \cdot X_4 \\
 &= X_1 \cdot X_1 \cdot X_4 + X_2 \cdot X_1 \cdot X_4 + X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 + X_2 \cdot X_3 \cdot X_4
 \end{aligned}$$

bulunur. Bu ifadenin sol tarafındaki terimler birer kesme kümesidir. Yukarıda verilen kurallar 5.23-25 uygulanarak, X_1 olayının tekrarı giderilir ve

$$Y_0 = X_1 \cdot X_4 + X_2 \cdot X_3 \cdot X_4$$

şeklindeki minimal kesme kümeleri bulunur. Tekrarlı olayların elimine edilerek minimal kesme kümesinin belirlenmesi ile kalitatif analiz tamamlanır; tepe olayın (sistem arızası) oluşmasına katkıda bulunan temel olaylar (elemanter bileşen arızaları) belirlenmiş olur.

Arıza ağacının içerdiği her bir mantıksal kapı bir Boole cebir denklemi ile tanımlanır. Her kapı için giriş olayları bağımsız, çıkış olayları ise bağımlı değişkeni oluşturur. Boole cebri kuralları kullanılarak, bu denklemler çözülür. Böylece tepe olay, sadece temel olayları (çarpımların toplamı biçiminde) içeren minimal kesme kümeleri şeklinde ifade bulur.

Tepe olaya (sistem arızası) neden olan temel olayların (elemanter bileşen arızaları) belirlenmesi (minimal kesme kümesi) ile kalitatif analiz tamamlanmış olur.

5.3.3.3. Kantitatif Analiz

Arıza ağacının kantitatif analizi, kurulan mantıksal yapının, eşdeğer bir probabilistik biçime dönüştürülmesi ve temel olay probabilitelerinden tepe olay oluşma probabilitésinin sayısal olarak hesaplanmasına dayanır.

i. olayın gerçekleşme oranı λ ise, olayın t süresi boyunca gerçekleşmesi probabilitési

$$\begin{aligned} q &= 1 - \text{Prob (olayın } t \text{ süresine kadar gerçekleşmemesi)} \\ &= 1 - e^{-\lambda t} \end{aligned} \quad (5.26)$$

olur.

Tepe olaya ait gerçekleşme probabilitésini temel olay probabilitelerinden hesaplamak üzere iki yol vardır:

Eğer minimal kesme kümesi belirlenmiş ise, minimal kesme kümesinin birleşiminin probabilitesi tepe olayın probabilitesi verir:

$C_1, C_2, \dots, C_n$ kesme kümeleri olmak üzere

$$Q_{Tepe} = \text{Prob} (C_1 + C_2 + \dots + C_n) \quad (5.27)$$

$$= \sum_{i=1}^n \text{Prob} \{C_i\} - \sum_{i=1}^n \text{Prob} \{C_i \cap C_j\} + \dots + (-1)^{n-1} \text{Prob} \{C_1 \cap C_2 \cap \dots \cap C_n\} \quad \text{olur.}$$

Eğer minimal kesme kümesi bilinmeyen ve içinde tekrarlı olay bulunmayan bir arıza ağacı sözkonusu ise, olayların bağımsız olduğu kabulü ile

$$Q_{VE} = \prod_{i=1}^n q_i \quad (5.28)$$

$$Q_{VEYA} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i) \quad (5.29)$$

ifadelerinden yararlanarak arıza ağacının en altından tepesine doğru adım adım Q_{Tepe} hesaplanır.

5.3.3.4. Eleştiri

Fussell ve diğ. (1974)'nin yöntemin önemli buldukları yanlarından bazıları şöyledir:

- 1- analisti, hataları deduktif olarak gidermeye yönlendirmesi
- 2- ilgilenilen arızalar açısından, sistem için önem taşıyan hususları ortaya çıkarması
- 3- sistem tasarım değişikliklerinden sorumlu olanlara kolaylık sağlayan bir grafik araç olması
- 4- kalitatif ve kantitatif sistem güvenilirliği analizine imkan sunması

Aynı yazarlar

1- olayların çok global incelendiğini, bu nedenle bazı noktaların gözden kaçabileceğini

2- arıza verilerinin yetersizliğini ve kompleks sistemlerde kabullerin yetersiz kaldığını

3- aynı ağaçta yer alan bağımlı olayların hesaba katılamamasını yöntemin zaafı arasında sıralamaktadırlar.

Ayrıca yöntem özellikle ilk uygulama hallerinde çok pahalıdır. Bağdaşmaz olaylarda ve genel sebepli arızalarda iyi uygulanamaz. En önemli eksikliği ise bağımlı olaylara cevap verememesidir. Buna destek verecek, koşullu probabiliteleri dikkate alan genel bir mekanizmaya sahip değildir.

5.3.4. Operatör Faaliyet Ağacı (Operator Action Tree)

Yöntem, Wreathall, Fragola ve Hall (Hall ve diğ,1982)'nin çabalarıyla geliştirilmiş analitik bir kantitatif İGA yöntemidir. Esas olarak tanılama ve karar verme hataları ile ilgilidir. Yöntemde özel bir durumda kişisel performansı etkileyen faktörlerle ilgilenilmeksizin, daha genel durumlar için bir grup operatörün performansı ele alınmaktadır. Genelleştirilmiş durumlarda bir grup operatörün performansı istatistiksel olarak değerlendirilerek, güvenilirlik değerleri elde edilmektedir.

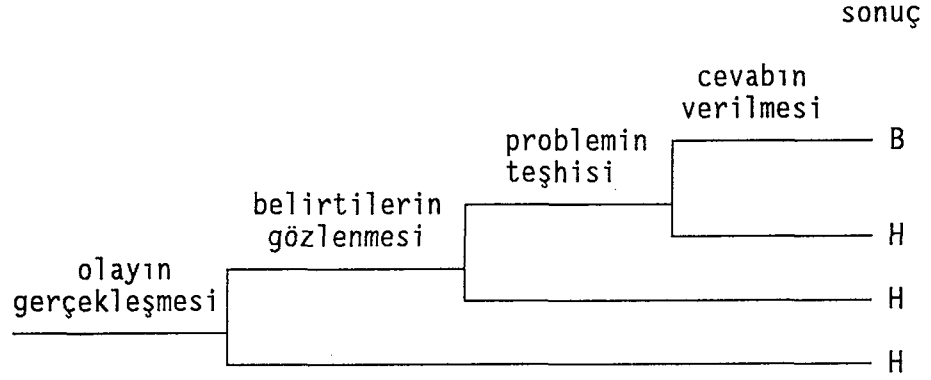
Rasmussen (1979) kaza vb. gibi kritik koşullar altında insan davranışının, normal koşullarda gerçekleşen rutin işler sırasındaki davranışlardan farklılık gösterdiğini belirtmektedir. Yöntem anormal koşullar altındaki görev dizileri ile ilgilenerek, kritik durumlarda operatörlerin rolünü incelemektedir.

Operatör faaliyet ağacı, her adımda operatörün seçimine bağlı olarak ortaya çıkan ve başarı veya hata sonucuna götüren dallardan oluşur. Yönteme ait modelden elde edilen İHP şeklindeki performans tahminleri olay ağacı veya arıza ağacı şeklinde birleştirilerek değerlendirilir.

Bu yaklaşım insanın çevresinde gerçekleşen bir olaya verdiği cevabın üç adımdan oluştuğunu kabul eder:

- 1- algılama
- 2- tanılama (teşhis)
- 3- cevap (tepki)

İnsana ait bu üç temel faaliyetteki potansiyel hataları esas alarak oluşturulan temel operatör faaliyet ağacı Şekil 5-2'de görülmektedir. Sonuçta ya Başarı (B) veya Hata (H) vardır.

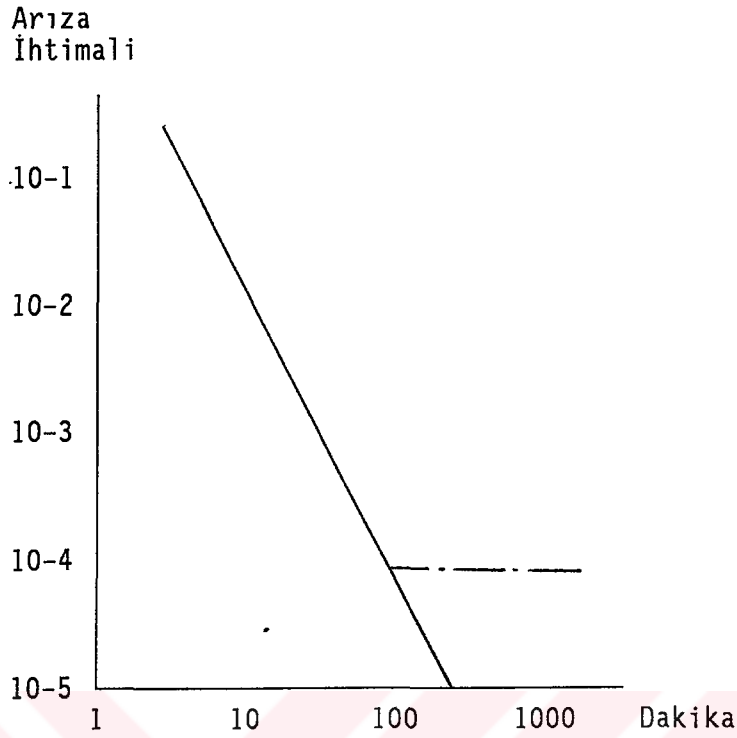


Şekil 5-2. Temel Operatör Faaliyet Ağacı Örneği

Yöntemdeki diğer bir ana kabul şu saptamaya dayanmaktadır: Eğer yapılan hataları tespiti imkan veren geri besleme varsa ve belirlenen hatayı düzeltmek için yeterli süre tanınmış ise, hareketlerin yerine getirilmesi sırasında yapılan hatalar giderilebilir. Yani operatör hata probabilesini belirleyen baskın faktör, teşhis için öngörülen süredir. Tanınan süre azaldıkça operatörün anormal durumu doğru teşhis probabilesi de azalmaktadır. Teşhis için verilen düşünme aralığı, operatörün anormal durumu farketmediği an ile seçtiği cevabı uygulamaya girdiği an arasında geçen süre olarak tanımlanmaktadır.

Bu kabullerin ışığında, zaman-güvenilirlik korelasyonu adıyla, hatanın ortaya çıkma probabilesi ile tanınan teşhis süresi arasındaki ilişkiyi veren, bir model geliştirilmiştir. Logaritmik eksenlerdeki bu model Şekil 5-3'de verilmektedir.

Yöntemin geliştirilmesi aşamasında elde veri bulunmaması nedeniyle fonksiyonel ilişki sistem analizi alanından iki, mühendislik psikolojisi alanından bir uzmanın mutabakatları ile geliştirilmiştir.



Şekil 5-3. Zaman-Güvenilirlik Eğrisi

Yöntemin ve zaman-güvenilirlik korelasyonunun İGA'ya uygulanmasında ana adımlar şöyle sıralanmaktadır:

- 1- İlgili işyeri emniyet fonksiyonlarının olay ağaçlarından belirlenmesi
- 2- İşyeri emniyeti fonksiyonlarını başarıyla yerine getirmek için gereken etkinliklerin belirlenmesi
- 3- Mevcut durumdaki alarm belirtilerini yansıtan göstergelerin ve operatörün durumu yumuşatmak üzere yapması gereken hareketlerin belirlenmesi
- 4- Hataların arıza ağacı veya olay ağaçlarında temsil edilmesi
- 5- Hata probabilitelerinin tahmin edilmesi. Düşünme süresi belirlendikten sonra, nominal hata probabilitesi zaman güvenilirlik korelasyonundan hesaplanır.

Yöntem oldukça özel bir takım performans koşullarına yönelik bir zaman-cevap (tepki) modeli ortaya koymaktadır. Model, ortalamada doğru hata tahminleri verebilir. Ancak tekil tahminlerde belirsizlik oldukça yüksektir. Bu model etki potansiyelleri fazla olabilen PEF'leri hesaba katmamaktadır. Bizzat

yazarlar modelin kullanımını atlama, ihmal ve gözleme hataları ile sınırlamaktadırlar.

Bu eğrilerin teşhis hatalarını spekülatif biçimde yansıttıkları ve bu alanda ileri çalışmaların gerektiği söylenebilir.

5.3.5. İnsan Hata Oranı Belirleme Tekniği (Theory for Human Error Rate Prediction.)

İnsan güvenilirliği alanında en eski ve en fazla kullanılan yöntemlerden biridir (Lewis ve Stine, 1989). 1960'ların başında Swain ve Rook tarafından geliştirilmiştir. İnsan Hata Oranı Belirleme Tekniği (İHOBT), insan hata probabilitelerini belirlemeye ve insan veya insan-ekipman, insan-prosedür etkileşimine bağlı oluşan sistem aksaklıklarını ve sistem davranışını etkileyen tüm diğer sistem, insan karakteristiklerini iyileştirmeye yönelik bir yöntem olarak tanımlanmaktadır (Swain ve Guttman, 1983). İHOBT analitik bir yöntemdir ve klasik güvenilirlik analizinin kesikli halini kullanır. İçerdiği ana adımlar bir İ-M sistem analizindeki genel akışla benzerdir:

- 1- İhtimali belirlenmek istenen ve insan hataları sonucu ortaya çıkabilecek sistem arızalarının tanımlanması
- 2- İlgilenilen sistem fonksiyonları kapsamında insan tarafından icra edilen işlemlerin ve bunların sistem fonksiyonları ile ilişkilerinin belirlenmesi, listelenmesi ve analizi
- 3- Uygun İHP'lerin tahmini
- 4- İnsan hatalarının sistem arızalarına etkisinin tayini
- 5- Sistem arıza oranını kabul edilebilir bir düzeye indirecek değişikliklerin önerilmesi. Adım 2-4, değişiklikleri geliştirmek üzere tekrarlanabilir.

5.3.5.1. İHOBT'nin Uygulanması

İHOBT, bir göreve ait güvenilirlik, insan etkinlikleri arasındaki bağımlılık, performansı etkileyen faktörlerin olaydaki etkileri, ekipman performansı ve sisteme yönelik diğer etkiler hakkında sayısal tahminler üretmek amacıyla kullanılan pratik, uygulamalı bir tekniktir. Sistemlerin değerlendirilmesi ve farklı tasarımların karşılaştırılması amacıyla da uygulanabilir.

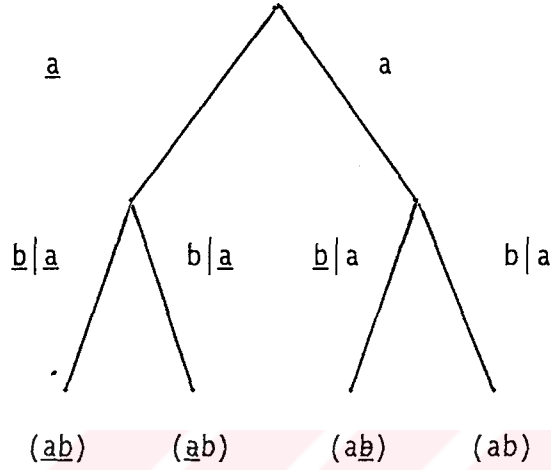
İHOBT yaklaşımına ait 4 aşama ve ilgili adımlar Tablo 5-4'de sıralanmaktadır:

Tablo 5-4. İHOBT'nin Uygulanmasında Ana Adımlar

* Tanıma
1- İşletme ziyareti
2- Sistem analistinden bilgi edinme
* Kalitatif İnceleme
1- Adım-adım inceleme
2- Görev analizi
3- İnsan güvenilirliği analizi olay ağacının oluşturulması
* Kantitatif İnceleme
1- Nominal İHP'lerin tayini
2- PEF ve bağıl etkilerinin belirlenmesi
3- Bağımlılıkların tayini
4- Hata düzeltmenin etkisinin tayini
5- İnsan hatasının sistem arıza probabilesine katkısının hesabı
* Sonuçlandırma
1- Duyarlılık analizinin gerçekleştirilmesi
2- Sonuçların sistem analistine aktarılması

Yöntemde görevlerin ve görev dizilerinin modellenmesinde İGA Olay Ağacı adı verilen fonksiyonel şemalar kullanılır. Olay ağaçlarında yapılan detaylı görev analizine dayanarak, tüm etkinlikler zaman dikkate alınarak birbirini izleyen ikili karar dallarından oluşan bir ağaç biçimine dönüştürülür. İHOBT, olayları ikili karar düğümleri silsilesi şeklinde modeller. Her düğümde görev başarılı veya başarısız (hatalı) olarak gerçekleştirilir. Her ikili daldaki probabiliteler toplamı 1'e eşit olmak zorundadır. Olay ağacı amaca uygun olarak belirlenen bir elemandan başlar ve zaman yönünde hareket edilerek tamamlanır. İlk dallanma dışında ağaçta yer alan tüm probabiliteler koşulludur. Eğer ilk dallanma başka bir olay ağacı veya başka bir olay ile bağlantılı ise, o da koşullu probabilitelere sahip olabilir.

Şekil 5-4'de iki görevden oluşan, basit bir olay ağacı örneği görülmektedir. A görevi ilk olarak, B görevi ise onu takiben yerine getirilmektedir. Bu nedenle B görevine ait probabiliteler koşulludur.



a : A görevinin başarı ile yerine getirilmesi

a̅ : A görevinin hatalı olarak yerine getirilmesi

Şekil 5-4. Bir Olay Ağacı Örneği

Olay ağacı kurulup, her bir dal için ilgili başarı/hata koşullu probabiliteleri tayin edildiğinde, ağaçtaki herbir dal yani olay dizisi için gerçekleşme probabilitesi matematik olarak hesaplanabilir. Bazı durumlarda sistemin başarıyla çalışması için tüm insan etkinliklerinin hatasız olması gerekir, herhangi bir etkinliğin hatalı olması sonucu hatalı kılar (seri sistem). Bazı hallerde ise sistemin aksaması için tüm ilgili insan faaliyetlerinin hatalı olması gerekir, ilgili bir tek etkinliğin bile başarılı olması tüm sistemin başarılı olması için yeterlidir (paralel sistem).

Sistemlerin başarı probabilitesi ile hata probabilitesi arasında

$$\text{Prob (Başarı)} = 1 - \text{Prob (Hata)} \quad (5.30)$$

şeklindeki ilişki iki yönde de geçerlidir. Bu nedenle hata veya başarı probabilitelerinden birini belirlemek yeterlidir, diğeri bu ifadeden kolayca hesaplanır.

A ve B gibi iki görevden oluşan bir seri bağlı sistemde:

$$\text{Prob (Başarı)} = \text{Prob (a)} \cdot \text{Prob (b|a)} \quad (5.31)$$

$$\begin{aligned} \text{Prob (Hata)} &= 1 - \text{Prob (a)} \cdot \text{Prob (b|a)} \\ &= \text{Prob (a)} \cdot \text{Prob (b|a)} + \text{Prob (a)} \cdot \text{Prob (b|a)} \\ &\quad + \text{Prob (a)} \cdot \text{Prob (b|a)} \end{aligned} \quad (5.32)$$

paralel bağlı sistemde:

$$\begin{aligned} \text{Prob (Başarı)} &= 1 - \text{Prob (a)} \cdot \text{Prob (b|a)} \\ &= \text{Prob (a)} \cdot \text{Prob (b|a)} + \text{Prob (a)} \cdot \text{Prob (b|a)} \\ &\quad + \text{Prob (a)} \cdot \text{Prob (b|a)} \end{aligned} \quad (5.33)$$

$$\text{Prob (Hata)} = \text{Prob (a)} \cdot \text{Prob (b|a)} \quad (5.34)$$

5.3.5.2. İHP'lerin Tayini

Görevlerin olay ağacı ile modellenmesi ve klasik güvenilirlik matematiğini kullanarak, görev başarı probabilitelerinin hesabı kolay anlaşılır ve uygulanır olmasına rağmen, olay ağacında gerek duyulan İHP değerlerinin tayini zordur ve büyük ölçüde analistin yargısına dayanmaktadır. Swain ve Guttman (1983) için bu kısmını, bu konuda bilgisine güvenilecek kişilerin yapmasını tavsiye etmektedirler. İHP'lerin belirlenmesinde en iyi yol, bu değerlerin incelenen sistem ve duruma ait gerçek verilerden elde edilmesidir. Ancak bu tür insan hata verilerinin çok nadir mevcut olması, başka kaynaklara yönelmeyi zorunlu kılmaktadır. Bu ham değerler İHOBT içinde "nominal İHP" olarak adlandırılmaktadır. İşletmeye ve göreve özgü PEF de hesaba katılarak "temel İHP" elde edilir. Temel İHP, tek başına o görev için insan hata probabilitelerini vermektedir. Diğer görevler ve kişiler arası etkilerin de dikkate alınmasıyla temel İHP, koşullu İHP'ye dönüştürülür.

5.3.5.3. Bağımlılık

Görevlerin davranışsal üniteler dizisi şeklinde modellenmesinde ana problemlerden biri, bir görevin başarı veya başarısızlıkla sonuçlanmasının bir diğer görevin başarısını veya başarısızlığını ne şekilde etkilediğinin belirlenmesindedir.

İHOBT bu problemi bir bağımlılık modeli ile çözmektedir. Bir olayın koşullu probabilitesi, diğer olay gerçekleşse de gerçekleşmese de aynı kalıyor ise, bu iki olay bağımsızdır. Bir başka ifadeyle

$$\begin{aligned} \text{Prob } (b) &= \text{Prob } (b|a) = \text{Prob } (b|\bar{a}) \\ \text{ve} \\ \text{Prob } (b) &= \text{Prob } (b|a) = \text{Prob } (b|\bar{a}) \end{aligned} \quad (5.35)$$

olur. Eğer bu ifadeler sağlanmıyorsa, iki olay birbirini etkiliyor demektir, yani olaylar bağımlıdır. Bağımlılık bir görevi birlikte yerine getiren birkaç kişi arasında veya işi yapan ve kontrol eden kişiler arasında olabilir. Civata sıkma işi ve sıkma momentini kontrol eden kişi arasındaki ilişki örnek verilebilir. Bağımlılık, bir kişinin birbiriyle ilişkili birden fazla iş yapması sırasında da söz konusu olabilir. Birinci işin atlanması, takibeden işlerin de atlanması probabilitelerini yükseltmektedir (Omission tipi hata).

Görev (commission) tipi hatalarda birinci işin hatalı olması ve düzeltilmemesi halinde, sıradaki diğer işlerin hatalı olması probabilitesi yükselmektedir. İşçi bir civatayı fazla sıkıyor ise sıradakilerini de fazla sıkması probabilitesi yüksektir. Bağımlılığın dikkate alınmaması göreve ait hata probabilitelerinin düşük tahmin edilmesine yol açar ve aşırı iyimser güvenilirlik değerleri ile sonuçlanır.

İHOBT'de bağımlılık, tümüyle bağımsız ile pozitif tam bağımlı aralığında 5 sınıfta derecelendirilmektedir (Tablo 5-5). Pozitif bağımlılık birinci işin başarı/hatasının takibeden (ikinci) işin başarı/hatasını arttırdığı anlamını taşımaktadır.

Tablo 5-5. Bağımlılık Düzeyleri

Bağımlılık (%)	Düzy
0	sıfır
5	alçak
15	orta
50	yüksek
100	tam

Tayin edilen bağımlılık düzeyine karşı gelen bağımlılık derecesi kullanılarak aşağıda verilen formüller yardımı ile $(N-1)$. işi izleyen N . işin başarı/hata koşullu probabilitesi $\text{Prob}(N | N-1)$ hesaplanır:

$$\text{Prob}(N | N-1) = (\% \text{bağ}) 1.0 + (1 - \% \text{bağ}) \text{Prob}(N) \quad (5.36)$$

$$\text{Prob}(N | N-1) = (\% \text{bağ}) 1.0 + (1 - \% \text{bağ}) \text{Prob}(N)$$

5.3.5.4. İHOBT'nin Çıktıları ve Duyarlılık Analizleri

İHOBT ile gerçekleştirilen İGA'lerinde görev başarı/hata probabiliteleri tahmin edilmektedir. Bu probabiliteler değeri tasarımı aşamasında ödünleşme amaçlı çalışmalarda ve probabilistik risk tayini için kullanılabilir. İGA olay ağaçları ile de sistemin insan hataları yönünden incelenmesi mümkün olmaktadır.

İHOBT'de İGA, klasik güvenilirlik analizinin kesikli biçimiyle gerçekleşmektedir. İHOBT'de elde edilen güvenilirlik değeri talep başına değeri. Bu nedenle insan güvenirliliği ile makina güvenirliliğinin birleştirilmesi aşamasında ilave kabuller ve dikkatli bir analiz gerekmektedir.

İnsan performansına yönelik probabiliteler verilerinin çoğundaki belirsizlik nedeniyle, tahmin edilen İHP bağımlılık düzeyleri veya insan performansını etkileyen diğer faktörlerin çeşitli değeri sınırdığı bir duyarlılık analizi gerçekleştirerek, bu değeri sistem çıktıları nasıl etkilediğini belirlemek yönünden uygulamada fayda sağlamaktadır. Swain ve Guttman (1983) iki tip duyarlılık analizi uygulamışlardır:

Kötümser İHP değerleri (Örn tüm işler için 0,1) ile en kötü durum, iyimser İHP değerleri ile (örn. tüm işler için 0,0001) en iyi durum analiz edilmiştir.

5.3.6. İnsan Güvenilirliğinde Simülasyon

Simülasyon herhangi bir sistemin modeli üzerinde incelenmesidir. Her türlü benzetim işleminde amaç sistemin gerek fiziki yapısında gerekse sistem içindeki hareketlerde olabilecek değişikliklerin sistemin performansına olacak etkilerinin araştırılmasıdır. Simülasyon matematiksel alanda bir optimum arama işlemi değildir. Sistemle ilgili akla gelebilecek iyileştirme önerilerinin incelenmesi ve bu alanda karar almaya yardımcı olacak bilgilerin toplanmasıdır (Dinçmen, 1991).

İşbilim alanında Monte Carlo simülasyon tekniğinin uygulanmasında ilk girişim Siegel ve Wolf (1961) tarafından yapılmıştır. İ-M sistemlerinde insan davranışının oldukça karmaşık, belirsiz ve değişken olduğu ve bu nedenle insan davranışını tanımlamak üzere probabilistik bir modele gerek duyulduğu vurgulanarak; bu durumda Monte Carlo simülasyonunun uygun bir alternatif olduğu belirtilmektedir.

Siegel ve Wolf (1969) bu çalışmalarında iki görev dizisini simüle etmişlerdir:

- Bir savaş uçağının uçak gemisine indirilmesi: 37-41 alt-görevden oluşan görev, 37 pilot tipi için simüle edilmiştir.
- Havadan havaya bir füzenin ateşlenmesi: 22-24 alt-görevden oluşan görev, 35 pilot tipi için simüle edilmiştir.

Tekniğin uygulanmasında izlenen yol şöyledir: İ-M sistemi incelenerek görevleri oluşturan alt-görevler sıralı biçimde belirlenir. Bu teknikte hesaplamalar alt-görevler düzeyinde gerçekleştirilir. Dolayısıyla her alt-görev için, mevcut uygun kaynaklar taranarak gerekli veriler elde edilir. Operatörün bir alt-görevi yerine getirmek için gerek duyduğu süreye ait ortalama değer ve dağılım ölçüsü, alt-görevin başarıyla yerine getirilmesi olasılığı, alt-görevin başarılmasının görev bütününün başarısı için ne derece önemli olduğunun ölçüsü, PEF gibi veriler ile seçilen parametre değerleri (örn. görevin yapılması

için izin verilen süre) modelin girdilerini oluşturur. Modele ait algoritmalar ve Monte Carlo tekniği kullanılarak, her alt-görev için herbir operatörün performansı simüle edilir. Görev için izin verilen süre sona erdiğinde veya henüz süre dolmadan görev başarıyla tamamlandığında simülasyon sona erer. Model tasarım ile ilgili aşağıdaki sorulara sayısal yanıtlar üretmeyi amaçlamaktadır:

- Belirli bir prosedür ve makina tasarımı için, ortalama bir operatör görevin bütün gereklerini öngörülen sürede, başarıyla yerine getirebilir mi?
- Görev için öngörülen sürenin uzun veya kısa olması halinde ve operatörün hızlı ve yavaş olması durumunda görev başarı probabilitesi nasıl değişir?
- Görevin icrası sırasında her bir operatör ne kadar yüklenir? Görevin hangi bölümlerinde aşırı yüklenme vardır, hangi bölümlerinde operatör atılabilir?
- Operatör yükü ve operatör hızına bağlı olarak, operatör hata dağılımı ne şeklindedir?

Simülasyon farklı parametre değerleri (örn. hızlı, yavaş operatör) için tekrar edilerek bir parametrenin veya bir alt-görevin sisteme etkileri gözlenebilir.

Siegel ve arkadaşları 1975 yılına ait daha yeni çalışmalarında güvenilirliğe yönelmektedirler (Siegel ve diğ., 1975). Sadece insan davranışını modelleyen ilk çalışmalarının aksine, bu model hem insan hem de ekipman performansını kapsamaktadır. Arızalar arası ortalama süre esasına dayalı ekipman güvenilirliği ile insana ait başarı probabilitesi bir endeks halinde birleştirilerek, sistem güvenilirliğine yönelik bir ölçü elde edilir.

Teknik, kuvvet santrallerinde bakım çalışmaları için de kullanılmıştır. Siegel ve arkadaşları bu alandaki ilk çalışmaları geliştirerek Bakım Personeli Performans Simülasyonu (Maintenance Personnel Performance Simulation, MAPPS) adıyla, bakım faaliyetlerinde görev alan personelin güvenilirliğini tahmine yönelik bir simülasyon modeli geliştirmişlerdir (Siegel ve diğ., 1984). Model alt-görevlerin zorluğu ile bakım personelinin yeteneği, becerisi arasındaki farka bağlı olarak görev başarı probabilitelerini üretmektedir. Simülasyon ile alt-görevde rol alan her bir personelin başarı probabilitesi hesap edilir. Personel başarı probabiliteleri toplanarak ve ağırlıklandırılarak, ekip için ortalama başarı probabilitesi belirlenir.

Bilgisayar destekli bu teknik, analiste aynı görevi çeşitli parametreler altında tekrar tekrar inceleme ve değişikliklerin sonucu nasıl etkilediğini gözleme imkanı verir.



BÖLÜM 6. İNSAN GÜVENİLİRLİĞİ ALANINDA VERİ PROBLEMİ

6.1. İnsan Güvenilirliği Veri Kaynakları

Veri yetersizliği, insan güvenilirliği alanında karşılaşılan en ciddi problemdir. Tüm İGA yöntemleri, ister analitik ister simülasyon esaslı olsun, analiz-tahmin sürecinin herhangi bir aşamasında insan hata verilerine ihtiyaç duyarlar. Nominal İHP değerleri tüm yöntemlerin temel girdisini oluşturur. İGA yöntemlerini uygulamanın yanı sıra, bu yöntemlerin içerdiği kabul, model ve prosedürlerin geçerliliklerini sınamak için de yine insan hata verilerine gerek vardır.

Esasen her insan hatası, nedenleri, altında yatan motivasyon ve diğer PEF'i, sonuçları vs. ile kendine özgüdür. Ancak bilimsel gelişmeleri mümkün kılmak üzere, hata karakteristikleri arasında yeterli benzerlik olduğu kabul edilerek, hata gruplamalarına gidilmektedir. Davranışsal ve durumsal açıdan benzerlikler gösteren hataların, gerçekleşme probabilitelerinin de benzer olduğu kabulü analiste verilen koşul seti için İHP değerleri tahmin imkanı verir.

İnsan hatası alanındaki çeşitli verilerin birleştirilmesi ve kullanımının genelleştirilebilmesinde bazı engeller söz konusudur. İGA yöntemleri, görevlerin farklı detay düzeylerinde incelenmesini gerektirirler. Kimi yöntem, bir uçağın indirilmesi gibi bir görev bütününe ait veriler gerektirirken, kimi çok daha elemanter düzeyde görev parçalarına ait verilere gerek duyarlar. Ayrıca tekniklerin farklı uygulama alanlarında yoğunlaşmaları da genelleştirmeyi güçleştirmektedir. Bu konuda diğer bir engel insan hata verilerinin elde edildiği kaynakların farklılığından kaynaklanmaktadır. İnsan hataları konusunda 4 temel kaynaktan veri toplanmaktadır (Lee ve diğ., 1988):

- alan incelemeleri
- simülatör faaliyetleri
- laboratuvar deneyleri
- uzman yargısı (takdiri)

Bu dört kaynaktan elde edilen veriler farklı kalite ve geçerlilik taşırlar. Tüm diğer şartlar eşit tutulduğunda, veri kalitesi yönünden kaynaklar yukarıdaki biçimde sıralanırlar (Miller ve Swain, 1987).

Alandan, yani ilgili çalışma yerinden toplanan veriler İGA çalışmalarında uygulanması en kolay verilerdir. Bunlar bizzat çalışan insan tarafından veya bir gözlemci tarafından kaydedilebilirler. Ancak alandan veri toplama diğer kaynaklara oranla daha güç ve zaman alıcıdır.

Simülatör faaliyetlerinden veri elde etme oldukça pahalı bir yoldur. Bu faaliyetlere katılanların normal çalışmalarına göre daha yüksek motivasyon taşıdıkları ve beklenmedik olaylara karşı daha hazırlıklı oldukları, veri kalitesini değerlendirirken dikkate alınmalıdır.

Deneysel çalışmalarla da insan hata verileri elde edilebilir. Laboratuvar ortamında görev bütün şartlarıyla değil, birçok değişkenin sabit tutulması yoluyla ele alınabilir. Özellikle gerçekleşme probabilitesi küçük olayların incelenmesi oldukça zaman alıcı ve pahalıdır.

İzleyen bölümde tartışılan uzman yargısı teknikleri, veri kaynakları arasında geçerliliği en az olan kaynaktır. Buna karşın diğer veri elde etme yöntemlerine göre daha ucuzdur ve daha az zaman gerektirir. Görevi tanıyan uzmanların mutlak veya göreceli olarak tahmin ettikleri hata probabiliteleri, uygun matematik ölçeklendirme teknikleri ile kullanılabilir, sayısal İHP değerlerine dönüştürülür. Uzman yargısı ile İHP verileri değil ama, tahminleri üretilmektedir.

6.2. Uzman Yargısı Teknikleri

Uzman yargısı (takdiri) ile hem analitik hem de simülasyon esaslı İGA yöntemlerinde kullanılmak üzere İHP değerleri üretilebileceği gibi bütün bir göreve ait güvenilirlik değerleri de bu teknikle tahmin edilebilir. Yani uzman yargısına hem bir veri kaynağı hem de kantitatif bir İGA yöntemi olarak başvurulabilir.

İnsan güvenilirliği alanında da ampirik verilerin mevcut olmadığı hallerde, özellikle sistem geliştirme sürecinde kullanılmak üzere, bazı görev parametreleri hakkında insan tahminlerine başvurmak gerekir. Görevi tanıyan uzmanların mutlak veya göreceli olarak tahmin ettikleri hata probabiliteleri, uygun matematik ölçeklendirme teknikleriyle kullanılabilir İHP değerlerine dönüştürülür. Uzman yargısı ile doğrudan İHP verileri elde edilmemekle birlikte, bunlara yönelik tahminler üretilmektedir. Uzman yargısını sayısallaştırmak amacını taşıyan dört ayrı teknik aşağıda tanıtılmaktadır.

6.2.1. Sıralama Tekniği

İnsan hata probabilitelerinin bu yöntemle tahmin edildiği bir uygulamada, Pontecorvo (1965) görevin bütünü hakkında fikir sahibi olan, görev gereklerini bilen bir grup personelden (tecrübeli mühendisler, teknisyenler, vs.) görev bütününe ait 60 adet görev parçasının hata probabilitelerini 10 dereceli bir skala üzerinde değerlendirmelerini talep etmektedir. Böylelikle uzmanın subjektif değerlendirmesi ile 60 görev, hata probabiliteleri yönünden göreceli olarak sıralanmaktadır. Hata probabilitesi en yüksek olan görev 10 en düşük olan ise 0 ile değerlendirilerek, tüm görevler azalan biçimde sıralanmaktadır. Bu çalışma sırasında AIR Data Store (Bkz. Bölüm 6.3.) adlı veri bankası araştırılarak incelenen 60 görevin 29'u için güvenilirlik verileri bulunmuş, uzmanların değerlendirmeleri ile bu 29 göreve ait veriler ilişkilendirilmiş ve sonuçta

$$q = \text{İHP} = 1 - (\text{Ampirik Güvenilirlik Değeri}) \quad (6.1)$$

Sr: Uzmanlarca yapılan tahminlerin toplamı
olmak üzere

$$\log_{10} q = -2,9174 + 0,006122 \cdot \text{Sr} \quad (6.2)$$

şeklinde logaritmik bir regresyon doğrusu elde edilmiştir. Geliştirilen bu regresyon doğrusu yardımıyla 60 adet işin tümü için kantitatif güvenilirlik tahminleri belirlemek mümkün olmuştur.

6.2.2. İkili Karşılaştırma Tekniği

Psikoloji alanında kullanılan bir ölçülendirme tekniğidir. Seaver ve Stillwell (1983) bu tekniği nükleer güç santrallerinde İHP tahminlerine uygulamışlardır. Yöntemde yargısına başvuru uzman, A ve B görevlerini birbiriyle karşılaştırarak hata olasılığının hangisinde daha fazla olduğunu takdir eder. Uzmardan sayısal tahmin istenmediği için, teknik oldukça kolaydır. Fakat çok sayıda bir grup görevin, bir uzman grubu tarafından ikili olarak karşılaştırıldığı düşünüldüğünde, tekniğin zahmetli ve zaman alıcı olduğu söylenebilir.

İkili karşılaştırma ile enterval (aralık) skala üzerinde elde edilen sonuçlar, İGA'nde kullanılmak üzere, oran skalasına dönüştürülmelidir. Bu skala dönüşümünde kalibrasyonu sağlamak üzere, karşılaştırma kapsamındaki görevlerden en az ikisine (mümkünse daha çok) ait İHP değerlerinin biliniyor olması gerekir.

6.2.3. Doğrudan Sayısal Tahmin Tekniği

Psikoloji alanında kullanılan bu teknik de yine Seaver ve Stillwell (1983) tarafından nükleer santrallerde İHP tahminleri için uygulanmıştır.

Bu teknik, uzmanların her görev için sayısal İHP tahminleri yapmalarını gerektirir. İkili karşılaştırmaya göre uzmanların işi daha zordur, fakat yapılan tahmin sayısı azalır. İHP değerleri ile birlikte belirsizlik aralığının da tahmin edilebilmesi, doğrudan tahmin yönteminin bir diğer avantajı olmaktadır.

6.2.4. Başarı İhtimali Endeksi Yöntemi (Success Likelihood Index Methodology)

Embrey (1983) ve izleyen araştırmacılar (Embrey ve diğ.,1984) tarafından geliştirilen ve İHP tahminleri yapmak üzere uzman yargısını kullanan bir yöntemdir. Görev başarı olasılığını başarıyı etkileyen koşulların (PEF) fonksiyonu şeklinde ölçeklendiren sistematik bir yapıya sahiptir. Skala, güvenilirlik değerleri bilinen referans görevler yoluyla kalibre edilir. Böylece

ölçeklendirilen skala üzerinde, diğer görevler için başarı probabilitelerine ait mutlak ölçülerin hesaplanması mümkün olur.

Yöntemde tecrübelerden geniş ölçüde yararlanmak ve uzmanlar arası farklılıkların etkisini azaltmak üzere, çok sayıda uzmanın (birlikte veya ayrı ayrı) yargısına başvurulur. Herhangi bir durumda, bir göreve ait İHP değerinin, küçük bir PEF kümesinin etkilerine bağlı olduğu, yöntemin temelini oluşturan kabuldür.

Yöntemin prosedürü şöyle özetlenebilir. Uzmanlardan, her bir PEF'in incelenen görev açısından göreceli önemini (ağırlığı) belirlemesi talep edilir. İkinci olarak görevin yapılacağı mevcut şartlarda, PEF'lerin durumunun, düzeyinin tayini istenir. Bu ikinci tahmin PEF'in ne denli iyi veya kötü olduğunu sayısal olarak belirtmeye yarar. PEF'den oluşan küçük küme belirlenip, PEF'lerin ağırlıkları tayin edildikten sonra, her PEF için tahmin edilen sayısal değer ile göreceli ağırlık çarpılır. Bu çarpımlar toplanarak 0 ile 100 arasında değer alabilen Başarı İhtimali Endeksi (Success Likelihood Index, SLI) elde edilir. Belirlenen SLI değeri, PEF'lerin görevin başarılanmasında yaptıkları pozitif veya negatif etkiler hakkında, uzmanın görüşlerini temsil eder.

Bu yaklaşıma göre, uzun sürede beklenen başarı probabilitesi ile SLI arasında fonksiyonel bir ilişki vardır. Logaritmik olarak ifade edilen bu ilişki

$$\log \text{Prob}(\text{Başarı}) = a \cdot (\text{SLI}) + b \quad (6.3)$$

şeklinde dir. Burada a ve b sabitlerdir. a ve b değerlerinin yukarıdaki ifadede n elde edilebilmesi için, incelenen görev grubundan en az iki görev için ampirik güvenilirlik değerleri mevcut olmalıdır. Belirlenen a ve b sabitleri ifade de yerine konulduktan sonra, herbir görev için SLI değerleri ifadeye yerleştirilerek, başarı probabiliteleri hesaplanır. Eğer güvenilirlik değerleri bilinen iki görev yok ise, iki referans göreve ait güvenilirlik değerlerinin uzmanlarca doğrudan tahmin yoluyla takdiri gerekir.

Doğrudan tahmin, SLI yoluyla belirlenen İHP değerlerinin belirsizlik aralıklarını tayin için de önerilmektedir. Bu aralıklar kişisel tahmin veya grup uzlaşması şeklinde elde edilebilir.

6.3. Veri Tabanı Oluşturma Girişimleri: Veri Bankaları

Oldukça yeni olan insan güvenilirliği alanında veri tabanı oluşturmaya ve veri problemini çözmeye yönelik az sayıda girişim vardır. İnsan performansının güvenilirliği alanında veri toplama sistemleri ve insan güvenliğinin sayısallaştırılması için yöntem geliştirme konusunda ilk hareketler, ABD Savunma ve Atom Enerjisi Komisyonu (U.S. Department of Defense and Atomic Energy Commission, AEC) bünyesinde başlamıştır (Topmiller ve diğ., 1982). Bu çalışma silah sanayine yöneliktir. Shapero ve diğ.'ne (1960) ait çalışma, insan hatalarının neden olduğu sistem arızalarını sayısallaştırmayı amaçlayan ilk girişimdir. Füze arızalarında sebeplerin % 39'unun insana ait olduğu, bu çalışma ile saptanmıştır. Rook (1962) tarafından yürütülen araştırma, insan güvenilirliği veri tabanı alanında önemli bir kilometre-taşı oluşturur. Nükleer ünite üretimi ile ilgili bu araştırmada 23.000 hatalı parça incelenmiş ve hataların % 82'sinin insana bağlı olduğu tespit edilmiştir.

Aynı yıl Munger ve diğ.(1962) tarafından, Amerikan Araştırma Enstitüsü (American Institute for Research, AIR) Veri Stoğu (Data Store) adıyla bir veri bankası kurulmuştur. Çok yaygın kullanım bulmamakla birlikte, AIR veri stoğu, çeşitli alanlarda uygulanabilir nitelikte hata verileri içeren, ilk gerçekçi girişim olmuştur (Miller ve Swain, 1987).

AIR veri stoğu, özellikle kontrol ve gösterge ünitelerinin (düğmeler, kontrol levheleri, ölçüm gereçleri vs.) kullanımına yönelik olarak geliştirilmiştir. Bu amaçla mevcut literatür taranarak, davranışsal incelemeleri içeren 164 çalışmadan, görev parçalarına ait zaman ve hata verileri toplanmıştır. Bu veriler, iş elemanları ve ergonomik tasarım karakteristiklerine göre listelenerek, veri stoğuna dönüştürülmüştür. AIR verilerinden bir örnek grubu Tablo 6-1'de görülmektedir.

AIR veri stoğunu kullanarak bir göreve ait güvenilirliği belirlemek için, kullanıcı önce görevi analiz etmelidir. Belirlenen tüm görev parçaları (elemanlar) ve tasarım değerleri için uygun eleman güvenilirlikleri AIR Data Store'dan alınır. Bu değerler birbiriyle çarpılarak, göreve ait güvenilirlik belirlenir. Görev bütününe ait tahmini süre ise, görev elemanları için bankadan alınan sürelerin toplanmasıyla elde edilir.

Prosedürden de anlaşılacağı üzere, bu yöntemle sadece kesikli görevlerin ve bağımsız durumların incelenmesi mümkündür.

Tablo 6-1. Kumanda Levyesi Kullanımında Zaman ve Güvenilirlik Verileri

Parametre	Süre (s)	Güvenilirlik
Esas süre	1.93	
Kol uzunluğu (inch)		
6-9	1.50	0.9963
12-18	0	0.9967
21-25	1.50	0.9963
Kolun taradığı açı		
5-20	0	0.9981
30-40	0.20	0.9975
40-60	0.50	0.9960
Kol direnci (lb)		
5-10	0	0.9999
10-30	0.50	0.9992

Irwin ve diğ.(1964), AIR veri stoğunu, Aerojet General Company için özellikle Titan II füzelerinin bakım ve kontrolü çalışmalarında kullanılmak üzere geliştirmişlerdir. Bu çalışma sonucunda elde edilen ve Aerojet General Method olarak bilinen bu veri tabanı, özel bir alana yönelik olduğu için diğer alanlarda kullanımı sınırlıdır.

Meister de yine AIR veri stoğunu geliştirerek, Bunker Ramo Tabloları olarak anılan bir veri tabanı oluşturmuştur. Bu çalışma Hornyak (1967)'nin ekinde yayınlanmıştır. Çalışmada, çeşitli alanlardan toplanan ampirik veriler, performansı etkileyen faktörlerin etkileri de uzman yargısı yoluyla dikkate alınarak, insan güvenilirliği tahminlerine dönüştürülmüştür.

Topmiller ve diğ.(1982), insan hata verilerini nükleer santrallerde risk analizi uygulamaları açısından değerlendirmek amacıyla, yukarıda değinilen 3 veri tabanı ile birlikte diğer 6 veri bankasını, yani insan güvenilirliği alanında

mevcut toplam 9 veri bankasını detaylı biçimde incelemişlerdir. Bu 9 veri bankası orjinal isimleriyle şunlardır:

- * American Institute for Research (AIR) Data Store
- * Aerojet General Method
- * Bunker Ramo Tables
- * Technique for Establishing Personnel Performance Standarts, TEPPS (Blanchard ve diğ., 1966)
- * Operational Recording and Data System, OPREDS (Osga, 1981)
- * Air Force Inspection and Safety Center, AFISC (U.S.Air Force, 1971)
- * Aviation Safety Reporting System, ASRS (Federal Aviation Administration, 1979)
- * Nuclear Plant Reliability Data System, NPRDS (Southwest Research Institute, 1980)
- * Safety-Related Operator Action Program, SROA (Barks ve diğ., 1982)

BÖLÜM 7. BULANIK KÜMELER KURAMI ve İNSAN GÜVENİLİRLİĞİ

Lotfi Zadeh'in 1965 yılında bulanık kümeler kuramının iskeletini formüle etmesinden bu yana, teori çeşitli yönlerde hızlı bir gelişme kaydederek, çok geniş bir yelpaze içinde uygulama bulmuştur. Konuyla ilgili teorik çalışmalar ve uygulamalar çeşitli kitaplarda toplanmıştır (Dubois ve Prade, 1980; Kaufmann, 1975; Zimmermann, 1986; Klir ve Folger, 1988).

Bulanık kümeler kuramı veya possibilite kuramı, bazı kümelerin kesin olmayan sınırlara sahip olduğu ana fikrine dayanmaktadır. Probabilite teorisi olayların gerçekleşmelerine veya gerçekleşmemelerine yönelik belirsizliği tesadüflik kapsamında ele almakta; bulanık kümeler kuramı ise bir şeyin sınırları kesinlik taşımayan bir kümeye ait olup olmadığı belirsizliği ile ilgilenmektedir.

7.1. Bulanık Kümelerin Esasları

Klasik küme, tanımı itibarıyla verilen bir evrensel kümeye ait elemanların kümeye ait olanlar (üyeler) ve olmayanlar şeklinde iki gruba ayırır. Klasik kümenin tarif ettiği gruba veya sınıfa ait olan ve olmayanlar arasında kesin, belirgin bir sınır vardır. Ancak konuşma dilinde tanımladığımız çoğu grup ve sınıflar (uzun boylular, pahalı arabalar, koyu renkliler, 5'den büyük sayılar gibi) bu özelliklere uymamaktadır. Bu gruplarda sınırlar kesin ve net gözükmemekte; üyelik ile üye olmama arasındaki geçişin ani değil, ama dereceli olduğu gözlenmektedir. Bu saptamalara dayanarak bulanık küme kuramı bulanıklık konseptini getirmekte, üyeler ile üye olmayanlar arasındaki kesin sınırları ortadan kaldırmaktadır. Bir bulanık küme, evrensel kümeye ait her elemana bulanık kümeye üyeliği gösteren birer üyelik derecesi atamak yoluyla matematik olarak ifade edilir. Üyelik derecesi, bir elemanın bulanık kümenin temsil ettiği konsept ne denli benzer veya uygun olduğunu belirler. Üyelik değerleri genellikle 0 ile 1 kapalı aralığındaki gerçel sayılarla temsil edilir. Üyelik derecesi büyüdükçe elemanın bulanık kümeye ait olma derecesi artar. Tam üyelik veya tam üye olmama sırasıyla 1 ve 0 üyelik değerleri ile gösterilir. Bu nedenle

klasik kümeler, daha genel ifade biçimi olan bulanık kümelerin, üyelik dereceleri sadece 0 ve 1 değerlerini alabilen, bir özel hali olarak gösterilebilir.

Bulanık kümeler teorisinde esaslı oluşturan kavram "üyelik fonksiyonudur". Klasik bir küme elemanların veya cisimlerin topluluğu olarak tanımlanabilir. Her bir eleman A kümesine aittir veya değildir. Böyle bir klasik küme farklı şekillerde tanımlanabilir: Kümeye ait elemanlar listelenir veya küme analitik olarak tanımlanır (örneğin üyelik koşulu verilerek :

$$(A = \{ x \mid x \geq 5 \})$$

veya üye elemanları karakteristik fonksiyon kullanılarak tanımlanır.

Klasik kümelerde karakteristik fonksiyon evrensel kümenin elemanlarına 1 veya 0 değerlerini atayarak, elemanları ilgilenilen klasik kümeye ait olanlar ve olmayanlar şeklinde ayırmaktadır. Bu fonksiyon evrensel kümenin elemanlarına belirlenen bir aralıkta değer atayacak biçimde genelleştirildiğinde, her bir elemanın ilgilenilen kümeye ait olma (üyelik) derecesini verir. Böyle bir fonksiyona "üyelik fonksiyonu" ve bu fonksiyonun tanımladığı kümeye "bulanık küme" adı verilir. Bu çalışma içerisinde bundan böyle karşılaşılabilecek tüm bulanık kümeler için üyelik değerleri $[0,1]$ aralığında olacaktır.

X bir evrensel küme olsun. A bulanık kümesini tanımlayan üyelik fonksiyonu μ_A genellikle

$[0,1]$: 0 ile 1 arasındaki gerçel sayıları kapsayan kapalı aralık olmak üzere

$$\mu_A : x \rightarrow [0,1] \quad (7.1)$$

şeklinde tanımlanır.

Bu durumda düzenli çiftlerden oluşan A bulanık kümesi

$$A = \{ (x, \mu_A(x)) \mid x \in X \} \quad (7.2)$$

olarak gösterilir.

X'deki bir A bulanık kümesinin desteği (support), evrensel kümeye ait ve A'ya üyelik dereceleri 0'dan büyük olan bütün elemanları içeren bir klasik kümedir.

$$\text{Supp } A = \{ x \in X \mid \mu_A(x) > 0 \} \quad (7.3)$$

Bir bulanık kümenin "yüksekliği", o kümedeki elemanların sahip olduğu en yüksek üyelik derecesidir. Bir bulanık kümenin elemanlarından en az biri mümkün maksimum üyelik derecesine sahip ise, o bulanık kümeye "normalleştirilmiş" adı verilir.

Bir bulanık kümenin α kesimi A_α , A'daki üyelik dereceleri, belirlenen α değerine eşit veya büyük olan ve X evrensel kümesine ait tüm elemanları kapsayan bir klasik kümedir:

$$A_\alpha = \{ x \in X \mid \mu_A(x) \geq \alpha \} \quad (7.4)$$

Konveks olma özelliği bulanık küme teorisinde önemli rol oynar. Klasik küme teorisinin tersine, konvekslik koşulları bulanık kümenin desteği yerine üyelik fonksiyonuna göre tanımlanır.

$$x_1, x_2 \in X ; \lambda \in [0,1] \text{ için}$$

$$\mu_A (x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \min (\mu_A (x_1), \mu_A (x_2)) \quad (7.5)$$

sağlanıyor ise A bulanık kümesi konvektir.

Veya bir A bulanık kümesine ait tüm α -kesim kümeleri konveks ise A kümesi de konvektir.

7.2. Bulanık Kümelerde Temel Küme İşlemleri

X de tanımlı A bulanık kümesinin tamamlayıcı $\bar{A}$ için

Her $x \in X$ için

$$\mu_{\bar{A}} (x) = 1 - \mu_A (x) \quad (7.6)$$

olur.

A ve B bulanık kümelerinin birleşimi $A \cup B$ de bir bulanık kümedir ve
Her $x \in X$ için

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max [\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (7.7)$$

şeklinde tanımlanır.

A ve B bulanık kümelerinin kesişimi $A \cap B$ de bir bulanık kümedir ve
Her $x \in X$ için

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min [\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (7.8)$$

şeklinde tanımlanır.

Şu ana kadar söz edilen bulanık kümeleri temsil eden üyelik fonksiyonları veya üyelik dereceleri klasik fonksiyonlar veya gerçel sayılar idi. Bu tür bulanık kümeler birinci tip veya standart bulanık kümeler olarak adlandırılır. Bir bulanık kümenin üyelik fonksiyonunun kendisi de bir bulanık küme olabilir. Üyelik fonksiyonu $[0,1]$ aralığında değer alan birinci tip bir bulanık küme olan, bulanık kümeler ikinci tip bulanık küme olarak adlandırılır. Bu tanımları genişleterek m.tip bulanık küme tarif edilir:

X 'de m.tip bir bulanık küme, $[0,1]$ de $(m-1)$.tip üyelik değerlerine sahiptir ($m > 1$).

7.3. Bulanık Sayılarda Cebirsel İşlemler

R de tanımlı, üyelik fonksiyonu kısmi (piecewise) sürekli, konveks ve normalleştirilmiş bir bulanık kümeye "bulanık sayı" denir.

Bulanık sayılarda

- kesin olarak bir tane $x_0 \in R$, $\mu_M(x_0) = 1$ olan x_0 değeri vardır.
- $\mu_M(x)$ kısmi sürekli dir.

Bir bulanık sayı M 'nin üyelik fonksiyonu

her $x < 0$ (her $x > 0$) için $\mu_M(x) = 0$

ise, M pozitif (negatif) bir bulanık sayıdır denir.

M ve N iki bulanık sayı olsun.

$$M = \{ x_i \mid \mu_M(x_i) \} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (7.9)$$

$$N = \{ y_j \mid \mu_N(y_j) \} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7.10)$$

Zadeh'in "genişleme prensibi" uygulanarak bulanık sayılar için cebirsel işlemler aşağıdaki gibi tanımlanır (Kangari ve Riggs, 1989):

Klasik $+$, $-$, $\cdot$, $\div$ işlemleri bulanık sayılar için

$\oplus, \ominus, \odot, \oslash$ şeklinde gösterilir.

Bulanık Sayılarda Çarpma İşlemi:

$$K = M \odot N \quad (7.11)$$

$$K = \{ (z_k \mid \mu_K(z_k)) \} \quad (7.12)$$

$$z_k = x_i \cdot y_j \quad (7.13)$$

$$\mu_{MON}(z_k) = \min(\mu_M(x_i), \mu_N(y_j)) \quad (7.14)$$

şeklindedir.

Diğer işlemler de benzer şekilde gerçekleştirilir:

O herhangi bir bulanık cebirsel işlemi gösterebilir.

$$K = M \circ N \quad (7.15)$$

olur.

Genişletilmiş işlemlerin özellikleri:

- Komütatif her işlem için, $\circ$ işlemi de komütatiftir.
- Assosiyatif her işlem için, $\circ$ işlemi de assosiyatiftir.

7.4. Dilsel Değişkenler ve Bulanık Küme Analizi

Bulanık kümelerin kullanımı riskin doğal dile dayanan dilsel değişkenler ile değerlendirilmesine imkan sağlar. Dilsel değişken (Linguistic Variable) değeri sayı değil bir dile ait kelimeler veya deyimler olan bir değişkendir. Bir dile ait bir x kelimesi X evrensel kümesinden $A(x)$ bulanık kümesinin tanımı olarak düşünülebilir. Yani $A(x)$ kümesi x kelimesinin anlamını temsil eden bir kümedir.

Dilsel değişkenler ile bulanık kümeler arasında amaç-araç ilişkisi bulunmaktadır. Dilsel değişkenler ile işlem yapma amacına ulaşmak için bulanık kümeler kuramı araç olarak kullanılır.

rnek olarak hava sıcaklığını tanımlamak üzere üç bulanık küme geliştirilmek istensin. Bu durumda "hava sıcaklığı" bulanık değişkenine ait bulanık sınırlamalar "sıcak", "ılık" ve "soğuk" olsun. Bir dilsel değişken ile bir bulanık sınırlamanın biraraya gelmesiyle bir bulanık küme oluşur: Örneğin "sıcak hava".

Görüldüğü gibi bir bulanık kümeyi oluştururken, karar verici önce dilsel değişkeni ve bulanık sınırlamaları amacı doğrultusunda belirlemelidir. Takiben, oluşturulan X evrensel kümesindeki tüm elemanlara her bulanık sınırlama için üyelik dereceleri tayin edilir. Bu dereceler, sıcaklık değerlerinin o bulanık sınırlamaya dahil olmak konusunda karar vericinin inancını, düşüncesini yansıtır.

Bu örnekte hava sıcaklık değerlerinden ($^{\circ}\text{C}$) seçilerek oluşturulan X evrensel kümesi şöyle olsun.

$$X = \{0,5,10,15,20,25,30,35,40\}$$

Sıcak hava ifadesinin anlamını yansıtan $A = \{(x | \mu_A(x))\}$ bulanık kümesi aşağıdaki gibi verilebilir. Burada x değerleri sıcaklık, $\mu_A(x)$ değerleri ise üyelik derecelerini göstermektedir.

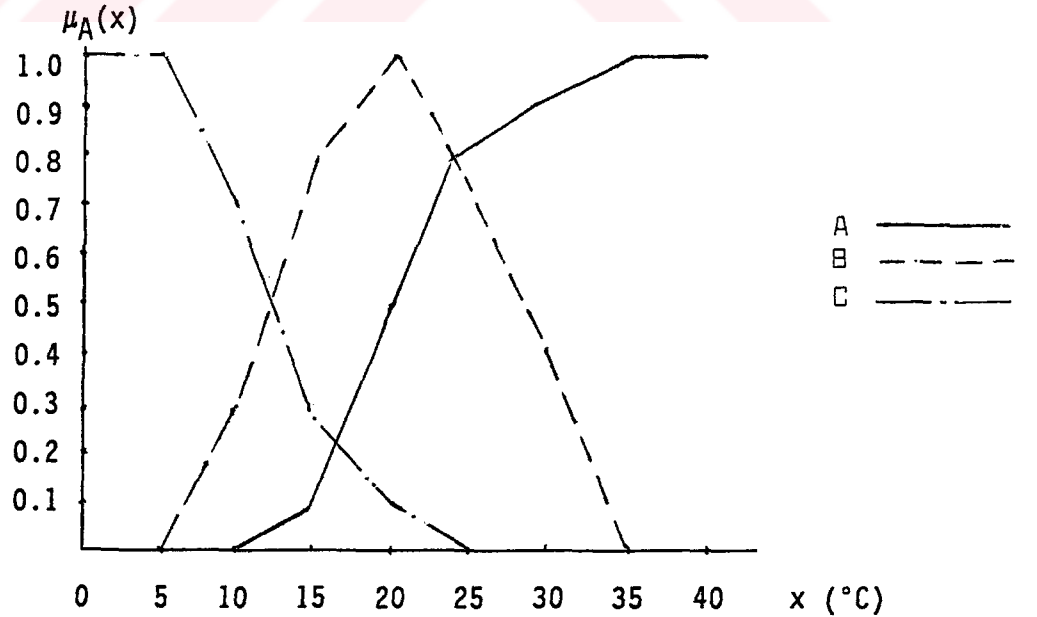
$$A = \{(0 | 0.0), (5 | 0.0), (10 | 0.0), (15 | 0.1), (20 | 0.5), (25 | 0.8), (30 | 0.9), (35 | 1.0), (40 | 1.0)\}$$

Bu A bulanık kümesi, "sıcak hava" ifadesinden, kümeyi oluşturan kişinin ne anladığını belirtmektedir. Bu kümede 35 ve 40 değerleri en büyük üyelik derecesine, yani 1.0 sahip olan değerlerdir. Yani karar verici bu değerlerin "sıcak hava" ifadesini en iyi temsil ettiğine inanmaktadır.

Benzer şekilde oluşturulan, "ılık hava" ve "soğuk hava" ifadelerini temsil eden B ve C bulanık kümeleri aşağıda verilmektedir. A, B, C kümeleri Şekil 7-1' de grafik olarak gösterilmektedir.

$$B = \{(0 | 0.0), (5 | 0.0), (10 | 0.3), (15 | 0.8), (20 | 1.0), (25 | 0.8), (30 | 0.4), (35 | 0.0), (40 | 0.0)\}$$

$$C = \{(0 | 1.0), (5 | 1.0), (10 | 0.7), (15 | 0.3), (20 | 0.1), (25 | 0.0), (30 | 0.0), (35 | 0.0), (40 | 0.0)\}$$



Şekil 7-1. Örnek Bulanık Kümelerin Gösterimi

7.5. Güvenilirlik Alanında Bulanık Küme Çalışmaları

Bulanık kümeler birçok diğer konu ile birlikte güvenilirlik konusunda da uygulama bulmuştur.

Güvenilirlik alanında Tanaka ve diğ. (1983) bulanık küme kavramını sistemlerin arıza ağacı yoluyla analizinde kullanarak, sistemi oluşturan bileşenlerin arıza olabirliklerini bulanık kümeler şeklinde tanımlamışlardır. Bu çalışmada bulanık arıza ağacı modeline genişleme prensibi uygulanarak, tepe olayı ilişkin arıza olabirliği belirlenmektedir. Hesaplamanın esasını oluşturan temel olay olabirlikleri trapez biçimli üyelik fonksiyonları ile temsil edilmektedir.

İnsan ile makina güvenilirliklerinin tahsisini de kapsayan güvenilirlik bölüşümü kavramı İ-M sistemlerinin tasarımı ve yönetiminde önemli bir rol oynar. Güvenirliğın artırılmasında maliyet, ağırlık, hacim gibi kısıtlar optimal bölüşüm probleminin belirsiz, bulanık bir hale getirir. Park (1989), amacı ve kısıtları bulanık karakterli bu tür bir güvenilirlik problemini nonlinear bir bulanık optimizasyon problemi olarak modellemektedir.

Genel olarak teşhis, birtakım gözlemlere dayanarak muhtemel sebeplerin (arıza, bozukluk vs.) belirlenmesidir. Pratikteki birçok durumda gözlemler bulanıklık taşır, yani büyük ölçüde kalitatiftir ve sebep-sonuç arasındaki ilişki de karmaşıktır, tanımlanması güçtür. Bu tür bulanık ilişki içeren durumlarda teşhise yönelik bir çalışma Tsukamoto ve Terano (1977) tarafından yapılmıştır. Model araba arızaları örneğine uygulanmıştır. Mühendislik sistemlerinde arıza teşhisi ve önlenmesi belirsizlikle ilgilidir ve bulanık kümeler kuramı teknikleriyle ele alınabilir. Sistem durumu ile sisteme etki eden bulanıklaştırılmış etkenler kümesi arasındaki bulanık ilişkiyi inceleyen böyle bir teknik Gazdik'in (1985) çalışmasında yer almıştır.

Onisawa (1990), sistemlerde meydana gelebilecek kazalara ait kalitatif senaryolar üzerinde sistem güvenilirliğinin incelemek üzere geliştirdiği çalışmasında bulanıklık kavramının güvenilirlik analizinde gerekliliğini gösteren çeşitli noktaları belirterek, bir bulanık güvenilirlik analizi modeli vermektedir.

Çalışmada klasik güvenilirlikteki arıza oranı ve hata oranı kavramları yerine, arıza olabilirliği ve hata olabilirliği kavramları kullanılmaktadır. İncelenen sistemin modellenmesinde bulanık arıza ağacı uygulanmaktadır. Arıza ve hata oranları, özellikle probabilitenin küçük olduğu durumları daha iyi yansıtmayı hedefleyen fonksiyonlar ile tanımlanmaktadır. Arıza ağacındaki ve/veya kapıları genişleme prensibi kullanılarak bulanık kümeler kuramı ile sayısal analize girmektedir. Çalışmada arıza ağacını oluşturan temel olayların birbirlerine ve analizi hedeflenen tepe olaya etkileri iki tür bağımlılık şeklinde modele dahil edilmektedir.



BÖLÜM 8. İNSAN HATALARININ BULANIK KÜMELER KURAMI İLE SAYISALLAŞTIRILMASI İÇİN BİR MODEL ÖNERİSİ

8.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışma ile İ-M sistemlerinde güvenilirliği analiz etmek üzere insan hatası ve ilgili diğer faktörlerin dilsel ifadeler yoluyla tayini ve bulanık kümeler kuramı olanakları ile sayısallaştırılarak değerlendirilmesine yönelik bir metodoloji geliştirmek amaçlanmaktadır.

8.2. Modelin Kapsamı

Geliştirilen model daha önce belirtilen sınıflama çerçevesinde analitik bir yaklaşım taşımaktadır. İlgilenilen arıza ile ilgili olarak sistem analiz edilerek arızaya yol açan olay/fonksiyon dizileri bir ağaç şeması biçiminde temsil edilmektedir. Olaylara ait olasılıklar dilsel olarak ifade ve tayin edilmektedir. Modelde güvenilirliği etkileyen iki önemli faktör olan bağımlılık ve kritiklik de yine dilsel ifadeler biçiminde belirlenmektedir.

Dilsel ifadeleri sayısallaştırmak ve kurulan ağacı matematik olarak değerlendirmek üzere model, araç olarak bulanık kümeler kuramını kullanmaktadır. Modelde yer alan tüm bulanık değişkenlerin kesikli değer aldığı kabul edilmekte ve dolayısıyla birer bulanık küme (bulanık sayı) ile temsil edilmektedir.

Ağacın kantitatif analizi bu çalışmada geliştirilen bir bilgisayar programı ile gerçekleştirilmektedir.

8.3. Çalışmanın Gerekçeleri

İ-M sistemlerinde insan hatalarını sayısallaştırmaya yönelik mevcut İGA yöntemleri, probabilitate esasına dayalı matematik araç olarak probabilitateyi kullanan tekniklerdir. Bu çalışma ile insan hatalarını sayısallaştırmak üzere

bulanık kümeler kuramı üzerine kurulu bir metodoloji önerilmektedir. İnsan güvenilirliği konusunda bulanık kümeler kuramının kullanılması ve modelin kapsadığı diğer noktalara dair gerekçeler aşağıda açıklanmaktadır:

Özok, (1991b) "Bir sosyoteknik sistem olan İ-M sistemlerinin sayısallaştırılması, bu sistemlerin tasarım aşamasında ve tasarımdan sonra sayısal olarak değerlendirilebilmeleri için en önemli adımlardan biridir. Sosyoteknik sistemler sayısallaştırma açısından teknik ve sosyal sistemlerden önemli farklılıklar göstermektedir. Teknik sistemlerde daha çok diferansiyel denklemler, integraller, Fourier serileri, Laplace transformasyonları,.....ve seriler gibi konuların, sosyal sistemlerde kümeler kuramı, probabilitite kuramı, istatistik ve lineer cebirin kullanılmasına karşılık, iş sistemleri ve İ-M sistemleri olarak da adlandırılan sosyo-teknik sistemlerde kullanılan matematik daha çok dilsel değişkenlerle ve bulanık kümelerle ilgilidir." şeklindeki sözleriyle İ-M sistemlerinde sayısallaştırmanın önemine ve bu alanda bulanık kümelerin gereğine işaret etmektedir.

Yaşanan gelişmelerin sonucunda İ-M sistemleri daha karmaşık hale gelmektedir. İ-M sistemine ait problemler açık olarak tanımlanmış, basit veya deterministik değildir. Bu belirsiz ve karmaşık sistemlerin net olarak sayısallaştırılabileceğini söylemek mümkün değildir (Özok, 1991b). Böyle sistemleri anlayabilmek sistemleri basite indirgemeyi gerektirmektedir. Karmaşık bir sistemi basit biçimde ifade etmek, ifadenin bir oranda belirsizlik içermesine izin vermekle sağlanabilir.

Belirsizliğin ele alınabildiği yeni bir matematik yaklaşım, bulanık kümeler kuramıdır (Klir ve Folger, 1988). Bulanık kümeler kuramı veya possibilite kuramı, bazı kümelerin kesin olmayan sınırlara sahip olduğu ana fikrine dayanmaktadır. Belirsizlik durumlarına cevap verebilen bir diğer matematik araç olan probabilitite teorisi, olayların gerçekleştirmelerine yönelik belirsizliği tesadüflik kapsamında ele almakta; bulanık kümeler kuramı ise bir şeyin (objenin) sınırları kesinlik taşımayan bir gruba (küme) ait olup olmadığı belirsizliği ile ilgilenmektedir. Araştırmacıların İ-M sistemlerinin modellenmesinde bulanık kümeleri yeterince kullanmayışlarının birinci nedeni bu konudaki matematiksel bilgilerinin yetersizliğidir (Özok, 1991b).

Mevcut İGA yöntemleri, ister analitik ister simülasyon esaslı olsun, sayısal verilere girdi olarak gerek duyan tekniklerdir. Ancak pek çok durumda kullanılabilir veri mevcut değildir, veya mevcut veriler yeterli ve güvenilir değildir. Veri yetersizliği insan güvenilirliği alanında en önemli problemlerden biri olarak gösterilmektedir (Lee ve diğ, 1988). Böyle durumlarda çoğu zaman uzman yargısına, takdirine başvurularak tahminler elde edilir.

Ancak bu yolla elde edilen bilgiler sayısal değildir. Uzman yargısına dayanılarak kazanılan bilgiler, kalitatif karakterlidir ve genellikle bir dile ait kelimeler ve deyimler ile ifade edilen "bulanık bilgilerdir".

Bir teknik sistemde değişkenlerin aldıkları değerleri sayılarla ifade edebilmek kolaylıkla mümkünken, değişkenlerin teknik sistemdekilere göre çok daha yetersiz tanımlandığı İ-M sistemlerinde bu sayısallaştırma işlemi bazı güçlükleri aşmayı gerektirir. Değerleri bir dil içindeki sözcük ve cümleler olan dilsel değişkenler kavramı, dilsel teknikler aracılığıyla bu sistemlerde kullanıldığında sistemlerin doğal yapısına daha uygun ve daha etkin sonuçlar vermektedir (Özok, 1991b).

İnsan, çıkarım gerektiren böyle durumlarda, yapısına uygun olarak, fikrini alışkın olduğu biçimde çok küçük, küçük, oldukça büyük vs. şeklindeki terimlerle ifade eder. Bu terimler belirsizlikten (uncertainty) çok, kötü tanımlanmış (ill-defined) ifadeler olmaları nedeniyle kesin olmama (inexactness) halini artırırlar (Jain, 1976).

Bu tür dilsel olarak ifade bulan faktörlerin probabiliteleri kullanan yöntemler ile doğrudan incelenmesi mümkün değildir (Kangari ve Riggs, 1989).

Zadeh'e (1979) göre bulanık kümelerin gelişmesini teşvik eden belki de en önemli nokta, insan çıkarımlarının probabilistikten ziyade possibilistik enformasyonlara dayanmasıdır.

İnsan yargısının kompleks sistemlerdeki güvenlik analizlerinde merkezi bir rol oynadığı belirtilmektedir (Tanaka ve diğ, 1983). İnsan hatalarının sayısallaştırılması ve sistem güvenilirliğine olan etkilerinin analizinde insan yargısına büyük oranda başvuru konular şöyle sıralanabilir:

Önceki bölümlerde ifade edildiği gibi güvenilirlik analizlerinin temel taşı hata/başarı probabiliteleridir. Analizlerin yapılabilmesi için sayısal probabiliteler verileri gerekmektedir. Ancak yeterli veri mevcut değildir, ve mevcut veri bankaları bu ihtiyaca cevap verememektedir (Miller ve Swain, 1987). İnsan güvenilirliği alanında çoğu durumda probabiliteler değerleri subjektif tahminlere, uzman yargısına başvurulmuş tahmin edilmektedir (Moray, 1989). Bu nedenle risk tayininde bulanık probabiliteler kavramı önerilmektedir (Tanaka ve diğ., 1983).

Bir güvenilirlik analizinde ne tür veriler gerektiği, yöntemin içerdiği faktörlerin, neler olduğuna bağlıdır. Bu çalışmada önerilen model insan hatalarının sayısallaştırılmasında önemli etkileri olan iki faktörü, bağımlılık ve sonucu etkileme derecesini (kritiklik) kapsamaktadır.

Sistemde insan tarafından yerine getirilen fonksiyonlar veya sistemi oluşturan üniteler arasındaki "bağımlılık" olarak adlandırılan ilişki güvenilirlik analizinin sonucu açısından oldukça önemlidir (Meister, 1976).

Bir görev bütününü oluşturan görevler birbirleriyle ilişki içinde yerine getirilir. Göreve ait başarı/hatayı belirlerken bağımlılığın dikkate alınmaması veya gereğinden az tayini, elde edilecek sonucun fazlaca iyimser olmasına neden olur (Miller ve Swain, 1987). İHOB'Te getirilen bağımlılık modelinde, birbirini takip eden görevler arasındaki bağımlılık, beş dereceli bir skala kullanılarak sıfır bağımlılık, alçak bağımlılık, orta bağımlılık, yüksek bağımlılık ve tam bağımlılık şeklinde ifade edilmektedir. Bu ifadelere sayısal değerler atanmakta ve verilen bir formül yardımıyla bağımlılık etkisi hata/başarı probabilitelerine yansıtılmaktadır (Bkz. Bölüm 5.3.5.3). Ancak görüldüğü üzere bağımlılık etkisi uzman yargısı ile ve dilsel ifadeler yoluyla belirlenmektedir (Onisawa, 1990).

Bir sistemde insan tarafından yerine getirilmesi gereken çok sayıda farklı görev olabilir. Bu görevler arasında meydana gelebilecek insan hatalarının incelenen sistem performansı üzerindeki etkileri, doğurdukları sonuçlar farklı olabilmektedir (Pickrel ve Mc Donald, 1964). İlgilenilen sistem arızasına yol açan farklı olay dizilerinin sistem üzerinde oluşturdıkları risk derecesi, güvenilirlik analizi sonucunu etkileyen önemli bir faktördür. Bu konuda sayısal veri elde etmek oldukça güçtür. Nitekim görev kritikliği analizi yönteminde insan hataları sistem sonucuna etkileri yönünden güvenli, marjinal, kritik ve facia

şeklinde dört sınıfa ayrılmaktadır. Yöntemde görev kritikliği olarak adlandırılan bu faktör, uzman yargısı yardımıyla dilsel olarak tayin edilmekte ve atanan sayısal değerler bir çarpan halinde işlemlere sokulmaktadır.

Güvenilirlik analizlerinin ilk aşaması, sistemin analiz edilerek, elemanter fonksiyon ve görevlerin belirlenmesidir (Meister, 1973). Saptanan çeşitli fonksiyon dizileri, sıra ve sistem yapısı uyarınca fonksiyonel olay ağaçları veya sistem arıza ağaçları biçiminde modellenir (Miller ve Swain, 1987).

İkili karar dallarından oluşan, zaman yönünde hareket edilerek hazırlanan ve hem hata hem de başarıyla sonuçlanan tüm dalları birlikte gösteren İHOBT olay ağacı fazlaca mikroskopik ve detaylıdır (Park, 1987b).

Bir sistem arızasına götüren her fonksiyon/görev dizisi arıza ağacında bir dal olarak yer alır. Olaylar ile VE, VEYA şeklindeki olaylararası ilişkiler birtakım semboller ile ağaç üzerinde temsil edilir. Arıza ağaçları zamanın tersi yönde hareket eder. Böyle bir arıza ağacının kurulması, karmaşık ve zaman alıcı olabilmektedir (Fussell ve diğ. 1974).

Kullanım basitliği ve sadelik sağlamak üzere bu çalışmada, dilsel tanımlamadan yola çıkan sadece arızaya yol açan olay dizilerini gösteren, zaman yönünde hareket eden bir ağaç şeması kullanılmaktadır.

Sistem güvenilirliği sistemi oluşturan bileşenlerin güvenilirliğinden meydana gelir (Halpin ve diğ., 1973). İ-M sistemlerin güvenilirlik analizlerinde hem insan güvenilirliği, hem de ekipman güvenilirlikleri birlikte ele alınmalıdır, birleştirilmelidir. Ancak hata probabilitesi ve arıza oranı kavramları tanımları itibarıyla birbirlerinden farklıdır. Sistem güvenilirliğine ulaşmak üzere insan ve ekipman güvenilirliğini anlamlı bir şekilde birleştirecek metodlardan yoksun olunması, güvenilirlik alanındaki önemli problemlerden biridir (Lee ve diğ., 1988). Dilsel değişkenler bu konudaki farklılıkları ortadan kaldırabilir. Hata probabilitesi yerine hata olabilirliği, arıza oranı yerine arıza olabilirliği kavramları konularak, insan ve ekipman güvenilirliklerinin aynı ölçüyle elde edilmeleri mümkün olur.

8.4. Geliştirilen Model

İnsan hatalarını sayısallaştırmaya yönelik, önerilen bu metodoloji üç ana aşamadan oluşmaktadır:

1. Sistem analizi: Fonksiyon/olay analizi ve basitleştirilmiş olay ağacının kurulması.
2. Girdilerin tayini: Modelin girdilerini oluşturan olabilirlik, bağımlılık ve sonucu etkileme derecesine ait bulanık kümelerin oluşturulması.
3. Kantitatif analiz: Kurulan ağacın bulanık kümeler kuramı vasıtası ile sayısal olarak değerlendirilmesi.

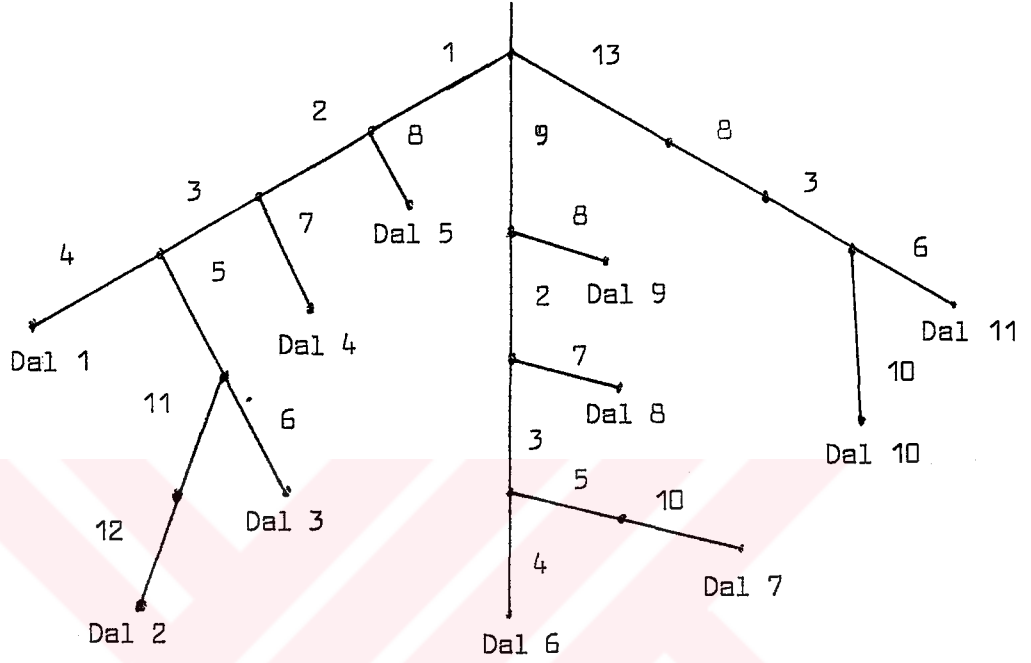
8.4.1. Sistem Analizi

Kullanım basitliği ve sadelik sağlamak üzere, bu çalışmada dilsel tanımlamalardan yola çıkan, sadece incelenen arızaya yol açan olay dizilerini gösteren, zaman yönünde hareket eden bir ağaç yapısı kullanılmaktadır. Sistemde araştırılacak arıza belirlenerek, İ-M sisteminde bu arızayla ilgili fonksiyon ve görevlerin akışı sistematik olarak kaydedilir. Bu arızaya yol açan olay/fonksiyon dizileri konuşma diliyle saptanır. Akış uyarınca birbirini izleyen olay/fonksiyonlar "ve" bağlacı ile birbirleri ile bağlanırken, "veya" bağlacı arızaya götüren ayrı bir diziye işaret etmektedir.

İfadeler çözümlenerek bir ağaç yapısı oluşturacak biçimde kağıda dökülür. Ağacın tepesinde yer alan ve incelenmesi hedeflenen arızaya yolaçan bütün olay/fonksiyon dizileri, bu ağaç üzerinde şematik olarak gösterilir. Birbirlerine ve ile bağlanan bir olay/fonksiyon grubu ağaçta bir dal olarak gösterilir. Veya bağlacı ise, arızaya götüren bir diğer olay fonksiyon grubunu belirtir ve ağaçta o noktada bir dallanmayı gerektirir.

İnsan hatası ve ekipman arızasına bağlı olarak oluşabilen bir sistem arızasının analizi ve fonksiyonel ağacın kurulması aşağıdaki basit örnekte açıklanmaktadır. Örnekte incelenen problem "bir otomobil motorunda motor yağ seviyesi" ile ilgilidir. Yapılan analiz ile kaydedilen ifadelerin ilk kısmı şöyledir: Motor yağı seviyesi düşerse ve yağ göstergesi doğru olarak çalışırsa ve sürücü göstergeden gelen uyarıyı fark ederse ve gerekeni yapmayı ihmal ederse veya

motor yağ seviyesi düşerse ve yağ göstergesi doğru olarak çalışırsa ve sürücü göstergeden gelen uyarıyı fark etmezse bir yağ seviyesi problemi söz konusu olur. Benzer mantıkla analiz sürdürülürse Şekil 8-1' de görülen olay/fonksiyon ağacı elde edilir.



1. Yağ seviyesi düşük
2. Gösterge doğru
3. Uyarı fark ediliyor
4. İhmal ediliyor
5. İhmal edilmiyor
6. Yanlış yağ konuyor
7. Uyarı fark edilmiyor
8. Gösterge hatalı
9. Yağ seviyesi yüksek
10. Yağ fazla boşaltılıyor
11. Doğru yağ konuyor
12. Karter kapağı kapatılmıyor
13. Yağ seviyesi normal

Şekil 8-1. Basitleştirilmiş Ağaç Şeması Örneği

8.4.2. Girdilerin Tayini

8.4.2.1. Hata ve Arıza Olabilirliği

Güvenilirlik analiz yöntemlerinin temel girdisi arıza ve hatanın gerçekleşme probabiliteleridir. Bu çalışmada bu kavramlar yerine gerçekleşme olabilirliği (hata/arıza) kavramı kullanılmaktadır.

Bir olayın gerçekleşme olabilirliği dilsel olarak aşağıda verilen bir grup kelimeyle ifade edilebilir:

Çok yüksek, yüksek, orta, zayıf, çok zayıf.

Olabilirlikle ilgili bu ifadeleri temsil eden bulanık kümeler ise şöyle verilebilir:

$$\begin{aligned}
 \text{Çok Yüksek} &= \{(0,95 \mid 0,5), (0,995 \mid 0,95), (1,0 \mid 1,0)\} \\
 \text{Yüksek} &= \{(0,8 \mid 0,6), (0,85 \mid 1,0), (0,88 \mid 0,6)\} \\
 \text{Orta} &= \{(0,45 \mid 0,5), (0,5 \mid 1,0), (0,55 \mid 0,5)\} \\
 \text{Zayıf} &= \{(0,3 \mid 0,5), (0,35 \mid 1,0), (0,38 \mid 0,5)\} \\
 \text{Çok Zayıf} &= \{(0,05 \mid 0,51), (0,01 \mid 0,94), (0,001 \mid 1,0)\}
 \end{aligned} \tag{8.1}$$

Burada parantez içindeki ilk eleman probabiliteleri değerini ikinci eleman üyelik derecelerini göstermektedir. Modelin kullandığı diğer veriler sistemlerin güvenilirliğinde rol oynayan bağımlılık ve kritiklik olarak bilinen iki önemli faktördür. Bu çalışmada bu iki faktör de dilsel değişkenler ile ifade edilmekte ve bulanık kümeler ile temsil edilerek sayısal analize dahil edilmektedir.

8.4.2.2. Sistemi Etkileme Derecesi (Kritiklik)

Şekil 8-1' deki örnekte verilen ağaçta her dal yağ seviyesi problemi sonucunu doğurmaktadır. Ancak her dalın gerçekleşmesi ile ortaya çıkan yağ seviyesi problemi, sistem açısından farklı öneme sahiptir. Yani bütün dallar yağ seviyesi ile ilgili problem doğurmakla birlikte oluşan problemin boyutları sistem üzerinde farklı risk yaratabilmektedir. Örnekte üç no'lu dal ele alındığında, yağ seçiminde yapılan hata, yani "yanlış yağ koyma" olayı sonucunda motorda yine de yeterli miktarda yağ bulunacağı için sistem açısından çok önemli bir sorun olmayacaktır. Dolayısıyla bu dalın sistem üzerinde oluşturduğu risk küçüktür.

Oysa birinci daldaki ihmal hatası, motorun yağsız kalmasına neden olarak, motorun zarar görmesine neden olacaktır. Bu nedenle birinci dal sistem üzerinde doğuracağı sonuçlar yönünden büyük risk oluşturmaktadır. Olay dizilerinin sistemde oluşturabilecekleri sonuçların önemi, yani içerdikleri risk dal bazında dilsel olarak büyük, küçük, orta kelimeleriyle nitelendirilebilir. Riski ifade eden bu dilsel değişkenler aşağıdaki bulanık kümeler ile gösterilebilir.

$$\begin{aligned} \text{Büyük Risk} &= \{(0.8 \mid 0.5), (0.85 \mid 1.0), (0.88 \mid 0.5)\} \\ \text{Orta Risk} &= \{(0.4 \mid 0.5), (0.5 \mid 1.0), (0.6 \mid 0.5)\} \\ \text{Küçük Risk} &= \{(0.15 \mid 0.5), (0.2 \mid 1.0), (0.25 \mid 0.5)\} \end{aligned} \quad (8.2)$$

8.4.2.3. Bağımlılık

Bir olay dizisinde B olayının gerçekleşmesi, kendinden önce gelen A olayının gerçekleşmesinden etkileniyor ise, A ve B olayları istatistiksel açıdan bağımsız değildir. A olayı gerçekleşse de gerçekleşmese de B'nin gerçekleşme probabilitesi aynı kalıyor ise A ve B olayları bağımsızdır.

Şekil 8-1' deki örnekte birbirini izleyen olaylar arası bağımlılık ilişkileri incelendiğinde 5 nolu "ihmal edilmiyor" olayının gerçekleşmesine ait olabilirliğin, ondan önce gelen 3 nolu "uyarı fark edilmiyor" olayının gerçekleşmesine bağlı olarak arttığı söylenebilir. Yani göstergeden gelen uyarı fark ediliyorsa uyarının gereğinin ihmal edilmeden gerçekleştirileceğinin dikkate alınması gerekir. Aynı daldaki 1 nolu "yağ seviyesi düşük" olayı ve onu takiben gerçekleşen 2 nolu "gösterge doğru" olayı arasında bir bağımlılık yoktur. Yağ seviyesinin düşük olması, göstergenin doğru çalışma probabilitesine herhangi bir şekilde etki yapmaz.

Bu çalışmada olaylar arası bağımlılık ilişkileri tam, çok, normal, az, sıfır bağımlı şeklindeki terim grubu ile ifade edilmektedir. Tam bağımlılık halinde olabilirlik en üst değere çıkmakta, sıfır bağımlılık halinde ise olabilirlik değişmemektedir. Bağımlılığı ifade eden diğer terimler aşağıdaki bulanık kümeler yolu ile analize dahil edilmektedir:

$$\begin{aligned} \text{Çok Bağımlılık} &= \{(0.8 \mid 0.5), (0.85 \mid 1.0), (0.88 \mid 0.5)\} \\ \text{Normal Bağımlılık} &= \{(0.4 \mid 0.5), (0.5 \mid 1.0), (0.6 \mid 0.5)\} \\ \text{Az Bağımlılık} &= \{(0.15 \mid 0.5), (0.2 \mid 1.0), (0.25 \mid 0.5)\} \end{aligned} \quad (8.3)$$

8.4.3. Kantitatif Analiz

Sistemin incelenerek ağacın kurulması ve dilsel olarak ifade edilen olabilirlik, bağımlılık ve kritiklik şeklindeki girdileri temsil eden bulanık kümelerin oluşturulmasını takiben, sistemin sayısal olarak değerlendirilmesi mümkün olur. Bu çalışmada insan güvenilirliğinin kantitatif analizinde matematik araç olarak bulanık kümeler kuramı kullanılmaktadır.

Kurulan ağacı dal bazında değerlendirmek amacını taşıyan kantitatif analiz aşaması iki adımdan oluşmaktadır:

1. Dal olabilirliklerinin hesabı
2. Dal sonuçlarının değerlendirilmesi

Bu adımlar aşağıda tanıtılmaktadır.

8.4.3.1. Dal Olabilirliklerinin Hesabı

Bu adımda olaylara ait gerçekleşme olabilirlikleri ve olaylar arası bağımlılık düzeylerinden hareketle, ağacı oluşturan tüm dallar için koşullu gerçekleşme olabilirlikleri hesaplanmaktadır.

n adet daldan oluşan bir olay ağacındaki i .dalın koşullu gerçekleşme olabilirliği P_i , i daldaki tüm olaylara ait koşullu olabilirlik değerlerinin çarpımı şeklinde belirlenir:

$$P_i = P_k(i,1) \cdot P_k(i,2) \dots P_k(i,m_i) = \prod_{j=1}^{m_i} P_k(i,j) \quad (8.4)$$

$$P_k(i,j) = \{(p | \mu_{p_k}(p))\} \quad (8.5)$$

Burada

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$j = 1, 2, \dots, m_i$$

n : ağaçtaki dal sayısı

m_i : i .daldaki olay sayısı

$P_k(i,j)$: i .daldaki j .olayın koşullu gerçekleşme olabilirliğini gösteren bulanık küme olmaktadır.

Bu çalışmada bir olaya ait koşullu gerçekleşme olabilirliğini elde etmek üzere, aşağıdaki ifade kullanılacaktır.

$$P_k(i,j) = B(i,j) + (K - B(i,j)) \cdot P(i,j) \quad (8.6)$$

$$B(i,j) = \{(b | \mu_B(b))\} \quad (8.7)$$

Burada

$P(i,j)$: i. daldaki j. olayın gerçekleşme olasılığı

$B(i,j)$: i. daldaki j. olayın kendinden önce gelen olaya bağımlılığını gösteren bulanık küme

$K = \{(1.0 | 1.0)\}$ şeklindeki bir sabit bulanık küme olmaktadır.

Ağacın bulanık kümeler kuramı ile kalitatif analizinde yukarıda da görüldüğü gibi bazı aritmetik işlemler gerekli olmaktadır. Bulanık sayılar ile yapılan herhangi bir aritmetik işlem O sembolü ile ifade edilsin. M ve N

$$M = \{(a_i | \mu_M(a_i))\} \quad i=1,2,\dots,m \quad (8.8)$$

$$N = \{(b_j | \mu_N(b_j))\} \quad j=1,2,\dots,n \quad (8.9)$$

şeklinde iki bulanık sayı olsun.

M ve N ile gerçekleştirilen herhangi bir bulanık aritmetik işlem

$$C = M \circ N = \{(c_t | \mu_C(c_t))\} \quad (8.10)$$

şeklindedir. Burada

$$t = 1,2,\dots, (m \times n)$$

O $(+, -, \times, \div)$ işlemlerinden herhangi biri olmak üzere

$$c_t = a_i \circ b_j \quad a_i \in M, \quad b_j \in N \quad (8.11)$$

$$\mu_C(c_t) = \mu_M(a_i) \cap \mu_N(b_j) \quad (8.12)$$

olur.

Elde edilen C kümesi M ve N kümelerine ait destek kümelerinin kartezyen çarpımı nedeni ile $(m \times n)$ adet elemana sahiptir. C kümesindeki eleman sayısının fazlalığını gidermek ve bu arada bulanık aritmetik işlemlerde bozulabilen konvekslik özelliğini yeniden geçerli kılmak üzere, her aritmetik işlemden sonra bir "eliminasyon" işlemi uygulanması gereklidir. Her bulanık aritmetik işlemden sonra uygulanacak eliminasyon prosedürü sonuç kümesinin eleman sayısını

azaltıp kümeyi konveks yaparken, bulanık kümenin temsil yeteneğini değiştirmemelidir. Bu amaçla uygulanan eliminasyon prosedürü şu şekildedir:

Eliminasyon ile n adet elemana sahip işlem sonuç kümesi C 'nin eleman sayısının p 'ye düşürülmesi amaçlanmaktadır ($p \ll n$). İlk adım C 'ye ait destek kümesinin belirlenerek elemanlarının küçükten büyüğe sıralanmasıdır (Bellman ve Zadeh, 1970; Gain ve Kohout, 1977).

$$C_S = \{c_1, c_2, \dots, c_n\} \quad (8.13)$$

Elde edilen sıralı destek kümesi C_S

$$C^1 = \{c_1, c_2, \dots, c_1\}$$

$$C^2 = \{c_{1+1}, c_{1+2}, \dots, c_{21}\}$$

$$\vdots$$

$$C^p = \{c_{(p-1)1+1}, \dots, c_n\}$$

(8.14)

şeklinde l adet elemana sahip p tane kümeye bölünür. Burada l sayısı n/p oranına en yakın tam sayıdır.

p adet kümenin her birinden üyelik derecesi en büyük olan eleman c_*^p seçilerek, p adet elemanı olan ve konvekslik özelliğine sahip indirgenmiş işlem sonuç kümesi C_{ind} elde edilir.

$$C_{ind} = \{ (c_*^1 | \mu(c_*^1)), (c_*^2 | \mu(c_*^2)), \dots, (c_*^p | \mu(c_*^p)) \} \quad (8.15)$$

Yukarıda verilen akış izlenerek ağacı oluşturan n adet dala ait koşullu gerçekleşme olabirlikleri benzer şekilde belirlenir.

8.4.3.2. Dal Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Sistem analisti veya sistem tasarımcısının incelenen sistemi temsil eden ağaçtaki dalları güvenilirlik açısından sıralamak kritik ve güvenli dalları belirlemek, sistem üzerinde insanın oluşturduğu riski tayin etmek ve sistemde insan ve makina arasında risk paylaşımını gerçekleştirmek üzere dal gerçekleşme olabirliklerinin belirli bir baza göre karşılaştırması gereklidir.

Kantitatif analizde ikinci ve son adım ağaçtaki her dalın sistem sonucuna etkileri, kritiklik düzeylerini önceki adımda elde edilen dal olabilirlikleri ile birlikte değerlendirerek dalların karşılaştırılmasına yöneliktir.

K_i , i.dalın sonuç üzerindeki etkisini, riskini temsil eden bulanık küme olmak üzere i.dal sonuç kümesi S_i

$$S_i = P_i \cdot K_i \quad (8.16)$$

olarak belirlenir.

Kritiklik ve bağımlılık faktörlerine etkisi ile olay gerçekleşme olabilirliklerinden hesaplanan ve arızaya götüren dalların gerçekleşme olabilirliklerini yansıtan dal sonuç olabilirlikleri birer bulanık kümedir, yani ikili elemanlardan oluşmaktadır. Dolayısıyla dalları kıyaslamak ve sıralamak üzere dal olabilirlikleri bu ikiliyi oluşturan probabiliteler veya üyelik dereceleri esas alınarak değerlendirilebilir. Gerçekleşme olabilirliği en fazla olan dal, maksimum probabilitelerine sahip olan dal olarak seçilebileceği gibi, olabilirlik kümeleri içinde en büyük üyelik derecesine sahip dal olarak da seçilebilir. Ancak her iki durumda da hata söz konusudur. Bu iki bazda yapılan değerlendirmeler, hatalı bir sıralamaya yol açabilir:

İhtimal değerine göre değerlendirme yapılırken, maksimum probabilitelerine sahip olan elemana ait üyelik derecesi diğer elemanlardan çok daha ufak olabilir. Bu elemanın üst sıraya yerleştirilmesi hatalı bir seçimdir. Çünkü probabiliteler değeri yüksek olmasına rağmen düşük üyelik dereceli bu elemanın içinde bulunduğu bulanık kümeyi temsil özelliği zayıftır. Diğer yanda üyelik derecesi esaslı değerlendirmede, en büyük üyelik derecesine sahip elemanın probabiliteler değeri diğerlerine göre çok küçük olabilir. Bu elemanın seçimi halinde bulanıklık etkisi azaltılmakta ve yüksek probabiliteli elemanlar gözardı edilmektedir.

Dalların olabilirlik açısından sıralanmasında daha uygun olan yaklaşım değerlendirmede hem maksimum probabiliteler değerlerinin hem de ilgili üyelik derecelerinin birlikte dikkate alınması olmak gerekir. Bu tür bir yaklaşım "maksimizasyon kümeleri" (maximizing sets) kavramı yolu ile uygulanabilir (Jain, 1976; Kenarangui, 1991).

Tanım itibarıyla bir Y klasik kümesine ait maksimizasyon kümesi $M(Y)$, öyle bir bulanık kümedir ki; bir y ($y \in Y$) noktasının $M(Y)$ 'deki üyelik derecesi, y 'nin ($\sup y$)'ye yaklaşma derecesini (belirlenen bir hassasiyetle) temsil eder (Jain, 1976). Dolayısıyla maksimizasyon kümesi kavramının kullanılabilmesi için öncelikle bir Y kümesine gerek vardır. Bu çalışmada Y kümesi, ağaçtaki n adet dala ait dal sonuçlarının destek kümelerinin birleşiminden oluşmaktadır.

$$Y = \bigcup \text{Supp } S_i = \text{Supp } S_1 \cup \text{Supp } S_2 \cup \dots \cup \text{Supp } S_n \quad (8.17)$$

Bu durumda i . dala ait maksimizasyon kümesi S_{im}

$$s_{maks} = \sup Y \quad (8.18)$$

$$f_{Sim}(s_t) = [s_t / s_{maks}]^n \quad (8.19)$$

n : uygulamaya bağlı olarak seçilen bir tamsayı olmak üzere

$$S_{im} = \{ (s_t | f_{Sim}(s_t)) \} \quad (8.20)$$

olarak belirlenir.

Artık S_i ve S_{im} bulanık kümelerinin kapsadığı bilgileri birleştirecek bir S_{i0} bulanık kümesi elde edilebilir. S_{i0} kümesi S_i ve S_{im} kümelerinin kesişimi ile oluşur.

$$S_{i0} = \{ (s_t | \mu_{S_{i0}}(s_t)) \} \quad (8.21)$$

Bu kümeye ait üyelik dereceleri

$$\mu_{S_{i0}}(s_t) = \mu_{Sim}(s_t) \cap \mu_{Si}(s_t) \quad (8.22)$$

şeklinde elde edilir.

Böylece S_{i0} kümesinde üyelik derecelerinin oluşturulmasında, s_t 'ye ait üyelik derecesi ile s_t 'nin s_{maks} 'a nispi değeri birlikte rol oynamaktadır.

S_{i0} kümesindeki probabiliteler değeri, maksimum üyelik derecesi yönünden

$$\mu_{D0}(d_i) = V_k \mu_{Si0}(s_t) \quad (8.23)$$

ifadesi ile birbirleri ile karşılaştırılarak değerlendirilir ve bulanık çözüm kümesinde i. dalı temsil edecek üyelik derecesi belirlenir. Dolayısıyla bu tür bir seçme işlemi sonucunda, dal sonuçları hem probabilitelerinin yüksekliği ve hem de üyelik derecelerinin yüksekliği baz alınarak değerlendirilmektedir.

Üyelik dereceleri $\mu_{D0}(d_i)$ belirlenerek oluşturulan

$$D_0 = \{ (d_i | \mu_{D0}(d_i)) \} \quad (8.24)$$

bulanık kümesi dal gerçekleşme olasılıklarının sıralanmasını mümkün kılar. Gerçekleşme olasılığı ve oluşturduğu risk açısından en önemli dal d_0

$$\mu_{D0}(d_0) = V_i \mu_{D0}(d_i) \quad (8.25)$$

ile ifade bulan maksimum üyelik derecesine sahip dal olmaktadır.

D_0 kümesindeki bütün üyelik dereceleri en büyük üyelik derecesi ile bölünerek normalleştirildiğinde, elde edilen D_{0n} kümesinde dalların maksimum gerçekleşme olasılığına yakınlıkları belirlenir. Bu değerlere bağlı olarak dallar en kritikten en güvenliye doğru sıralanabilirler.

8.5. Modelin Uygulanması

Geliştirilen modeldeki kantitatif analiz aşaması Şekil 8-1' de verilen fiktif bir olay/fonksiyon ağacı örneği üzerinde uygulanarak açıklanmaktadır. Kantitatif analiz aşamasındaki tüm işlemler, bu çalışma kapsamında geliştirilen bir bilgisayar programı tarafından yapılmaktadır. Geliştirilen program listesi Ek A'da yer almaktadır.

Modelin girdileri olan dilsel değişkenler aşağıdaki değerleri almaktadır.

Gerçekleşme Olasılığı =

$$\{ \text{çok yüksek, yüksek, orta, zayıf, çok zayıf} \} \quad (8.26)$$

$$\text{Bağımlılık} = \{ \text{tam, çok, normal, az, sıfır} \} \quad (8.27)$$

$$\text{Kritiklik} = \{ \text{büyük, orta, küçük} \} \quad (8.28)$$

Ağacı oluşturan olay/fonksiyon'lara ait gerçekleşme olabirlikleri ve bağımlılık değeri Tablo 8-1' deki gibi tayin edilmiştir. Dalların oluşturdıkları risk itibariyle kritiklik değeri ise Tablo 8-2' dedir.

Tablo 8-1. Örnekteki Olaylara Ait Gerçekleşme Olabirlikleri ve Bağımlılık Değeri

Olay No	Olabirlik	Bağımlılık
1	ÇOK ZAYIF	SIFIR
2	ÇOK YÜKSEK	SIFIR
3	YÜKSEK	AZ
4	ZAYIF	SIFIR
5	YÜKSEK	YÜKSEK
6	ORTA	AZ
7	ZAYIF	AZ
8	ÇOK ZAYIF	SIFIR
9	ÇOK ZAYIF	SIFIR
10	ORTA	NORMAL
11	ÇOK YÜKSEK	YÜKSEK
12	ZAYIF	SIFIR
13	YÜKSEK	SIFIR

Tablo 8-2. Örnekteki Dallara Ait Kritiklik Değeri

Dal No	Kritiklik
1	BÜYÜK
2	ORTA
3	KÜÇÜK
4	BÜYÜK
5	BÜYÜK
6	ORTA
7	BÜYÜK
8	ORTA
9	ORTA
10	BÜYÜK
11	KÜÇÜK

Örnek uygulamada bu dilsel ifadeleri yansıtmak üzere Bölüm 8.4.2' de verilen bulanık kümeler kullanılmaktadır.

(8.4) eşitliğini kullanarak

$$P_1 = P_k(1,1) \cdot P_k(1,2) \cdot P_k(1,3) \cdot P_k(1,4) \quad (8.29)$$

bulunur.

Olaylara ait koşullu olasılıklar, (8.6) ifadesinden elde edilir. 1. daldaki 3. olay için koşullu olasılık

$$P_k(1,3) = B(1,3) + (K - B(1,3)) \cdot P(1,3) \quad (8.30)$$

şeklinde belirlenir.

Her işlemten sonra eliminasyon uygulayıp kümedeki eleman sayısını 3'e indirerek verilen bu eşitliğe göre 1. dalın 3. olayı için

$$P_k(1,3) = \{ (.84 \mid .6) (.88 \mid 1) (.904 \mid .6) \} \quad (8.31)$$

kümesi elde edilir.

(8.11) ve (8.12) ifadelerini kullanarak ve eleman sayısını 3'e indirmek üzere eliminasyon uygulayarak, tüm dallara ait gerçekleşme olasılıkları

$$\begin{array}{lll} \{ (.534912 \mid .6) & (.6326211 \mid .95) & (.6358 \mid 1) \} \\ \{ (.6503276 \mid .6) & (.6535956 \mid .6) & (.7311701 \mid 1) \} \\ \{ (.3186278 \mid .5) & (.4365085 \mid .95) & (.4387021 \mid 1) \} \\ \{ (.68655 \mid .5) & (.796 \mid .6) & (.85 \mid 1) \} \\ \{ (.796 \mid .6) & (.8457501 \mid .95) & (.85 \mid 1) \} \\ \{ (.534912 \mid .6) & (.6326211 \mid .95) & (.6358 \mid 1) \} \\ \{ (.3790854 \mid .5) & (.5456356 \mid .95) & (.5483775 \mid 1) \} \\ \{ (.68655 \mid .5) & (.796 \mid .6) & (.85 \mid 1) \} \\ \{ (.796 \mid .6) & (.8457501 \mid .95) & (.85 \mid 1) \} \\ \{ (.3878112 \mid .5) & (.558195 \mid .95) & (.561 \mid 1) \} \\ \{ (.14742 \mid .5) & (.2244 \mid 1) & (.23052 \mid .6) \} \end{array} \quad (8.32)$$

olarak bulunur.

Dalların sonucu etkileme derecesi, sonuç açısından oluşturduğu riski de dal gerçekleşme olasılıklarına yansıtarak dal sonuçlarını elde etmek üzere (8.16) eşitliğinden I.dal için

$$S_1 = P_1 \cdot K_1 \quad (8.33)$$

olarak belirlenir.

Elde edilen dal sonuçları topluca aşağıda görülmektedir:

$$\begin{aligned} & \{ (.4546752 \mid .6) \quad (.5377279 \mid .95) \quad (.54043 \mid 1) \} \\ & \{ (.260131 \mid .5) \quad (.365585 \mid 1) \quad (.3901966 \mid .5) \} \\ & \{ (4.779418E-02 \mid .5) \quad (.0873017 \mid .95) \quad (8.774041E-02 \mid 1) \} \\ & \{ (.54924 \mid .5) \quad (.6766001 \mid .6) \quad (.7225 \mid 1) \} \\ & \{ (.6766001 \mid .6) \quad (.7188876 \mid .95) \quad (.7225 \mid 1) \} \\ & \{ (.2139648 \mid .5) \quad (.3179 \mid 1) \quad (.3209472 \mid .5) \} \\ & \{ (.3032684 \mid .5) \quad (.4637903 \mid .95) \quad (.4661209 \mid 1) \} \\ & \{ (.27462 \mid .5) \quad (.398 \mid .6) \quad (.425 \mid 1) \} \\ & \{ (.3184 \mid .5) \quad (.425 \mid 1) \quad (.4776 \mid .5) \} \\ & \{ (.3102489 \mid .5) \quad (.4744658 \mid .95) \quad (.47685 \mid 1) \} \\ & \{ (.022113 \mid .5) \quad (4.488001E-02 \mid 1) \quad (4.610401E-02 \mid .6) \} \end{aligned} \quad (8.34)$$

Elde edilen dal sonuçlarını değerlendirmek için maksimizasyon kümesi yaklaşımını uygulamak üzere (8.17) eşitliğinden

$$Y = \text{Supp } S_1 \cup \text{Supp } S_2 \cup \text{Supp } S_3 \cup \dots \cup \text{Supp } S_{11} \quad (8.35)$$

olmak üzere Y kümesi

$$\begin{aligned} & \{ .4546752, .5377279, .54043 \} \\ & \{ .260131, .365585, .3901966 \} \\ & \{ 4.779418E-02, .0873017, 8.774041E-02 \} \\ & \{ .54924, .6766001, .7225 \} \\ & \{ .6766001, .7188876, .7225 \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \{ .2139648 , \quad .3179 , \quad .3209472 \} \\
& \{ .3032684 , \quad .4637903 , \quad .4661209 \} \\
& \{ .27462 , \quad .398 , \quad .425 \} \\
& \{ .3184 , \quad .425 , \quad .4776 \} \\
& \{ .3102489 , \quad .4744658 , \quad .47685 \} \\
& \{ .022113 , \quad 4.488001E-02 , \quad 4.610401E-02 \}
\end{aligned} \tag{8.36}$$

şeklinde belirlenir.

$n = 1$ alarak, (8.18) ve (8.19) ifadelerini uygulayarak (8.20)'den tüm dallar için maksimizasyon kümeleri S_{im}

$$\begin{aligned}
& \{ (.4546752 \mid .6293083) (.5377279 \mid .74426) \quad (.54043 \mid .748) \} \\
& \{ (.260131 \mid .3600429) (.365585 \mid .5060001) \quad (.3901966 \mid .5400645) \} \\
& \{ (4.779418E-02 \mid 6.615111E-02) \quad (.0873017 \mid .1208328) \quad (8.774041E-02 \mid .12144) \} \\
& \{ (.54924 \mid .7601937) (.6766001 \mid .9364706) \quad (.7225 \mid 1) \} \\
& \{ (.6766001 \mid .9364706) (.7188876 \mid .9950001) \quad (.7225 \mid 1) \} \\
& \{ (.2139648 \mid .296145) (.3179 \mid .44) \quad (.3209472 \mid .4442176) \} \\
& \{ (.3032684 \mid .4197486) (.4637903 \mid .6419242) \quad (.4661209 \mid .64515) \} \\
& \{ (.27462 \mid .3800969) (.398 \mid .5508651) \quad (.425 \mid .5882353) \} \\
& \{ (.3184 \mid .440692) \quad (.425 \mid .5882353) \quad (.4776 \mid .6610381) \} \\
& \{ (.3102489 \mid .4294103) (.4744658 \mid .6567) \quad (.47685 \mid .66) \} \\
& \{ (.022113 \mid 3.060622E-02) \quad (4.488001E-02 \mid 6.211765E-02) \quad (4.610401E-02 \mid 6.381176E-02) \}
\end{aligned} \tag{8.37}$$

şeklinde elde edilir.

(8.21) ve (8.22)'den tüm dallar için S_{i0} bulanık kümeleri belirlenir:

$$\begin{aligned}
& \{ (.4546752 \mid .6) \quad (.5377279 \mid .74426) \quad (.54043 \mid .748) \} \\
& \{ (.260131 \mid .3600429) (.365585 \mid .5060001) \quad (.3901966 \mid .5) \} \\
& \{ (4.779418E-02 \mid 6.615111E-02) \quad (.0873017 \mid .1208328) \quad (8.774041E-02 \mid .12144) \} \\
& \{ (.54924 \mid .5) \quad (.6766001 \mid .6) \quad (.7225 \mid 1) \} \\
& \{ (.6766001 \mid .6) \quad (.7188876 \mid .95) \quad (.7225 \mid 1) \}
\end{aligned} \tag{8.38}$$

```

{ ( .2139648 | .296145 ) ( .3179 | .44 ) ( .3209472 | .4442176 ) }
{ ( .3032684 | .4197486 ) ( .4637903 | .6419242 ) ( .4661209 | .64515 ) }
{ ( .27462 | .3800969 ) ( .398 | .5508651 ) ( .425 | .5882353 ) }
{ ( .3184 | .440692 ) ( .425 | .5882353 ) ( .4776 | .5 ) }
{ ( .3102489 | .4294103 ) ( .4744658 | .6567 ) ( .47685 | .66 ) }
{ ( .022113 | 3.060622E-02 )
  ( 4.488001E-02 | 6.211765E-02 )
  ( 4.610401E-02 | 6.381176E-02 )
}

```

(8.23) ifadesini uygulayarak (8.24)'den D_0 çözüm kümesi

$$\begin{aligned}
D_0 = \{ & (\text{Dal } 1, 0.748), (\text{Dal } 2, 0.5), \\
& (\text{Dal } 3, 0.121), (\text{Dal } 4, 1.0), (\text{Dal } 5, 1.0), \\
& (\text{Dal } 6, 0.444), (\text{Dal } 7, 0.645), (\text{Dal } 8, 0.588), \\
& (\text{Dal } 9, 0.5), (\text{Dal } 10, 0.66), (\text{Dal } 11, 0.064) \}
\end{aligned} \tag{8.39}$$

şeklinde, her dalı temsil eden değerlerden oluşturulur. Ağacı oluşturan bütün dallara ait gerçekleşme olabirlikleri bu kümede sırasıyla yer almaktadır.

Belirlenen bu bulanık sonuç kümesi uyarınca, ağacı oluşturan dallar gerçekleşme olabirlikleri ve sonucu etkilemedeki rolleri açısından önemlerine göre aşağıdaki gibi sıralanmaktadır:

Dal 5
 Dal 4
 Dal 1
 Dal 10
 Dal 7
 Dal 8
 Dal 9
 Dal 2
 Dal 6
 Dal 3
 Dal 11

Birinci sırada yer alan Dal 5 gerçekleşme olabirliği ve sonuç için oluşturduğu risk açısından en önemli dal olmaktadır. Aynı değerlendirmeye göre Dal 11 en az öneme sahip olan daldır.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Hata, insan performansının arzu edilmeyen bir biçimidir. İnsan çalışmasının gerçekleştiği sosyo-teknik sistemlerde, sistemin teknik bölümünün hatasız işlediği varsayıldığında sistem güvenilirliğini arttırmak için tek yol insan güvenilirliğini iyileştirmektir. Teknolojik gelişmelerin yarattığı karmaşık ve büyük sistemlerde insan hatası veya insan güvenilirliği daha da önem kazanmaktadır.

İnsan hatası, çalışmanın yapıldığı yani hatanın ortaya çıktığı İnsan-Makina sisteminin bir ürünüdür. İnsan hatalarını, İnsan-Makina sisteminde insanı izole ederek inceleyen, bir yaklaşım yeterli ve doğru değildir. Önerilen yaklaşım, insan hatalarını insan performansı kavramı içinde ve sistem bütünlüğünde ele almaktır. İnsan-Makina sistemi elemanları arasındaki etkileşim, uyum-uyumsuzluk insan hatalarının oluşumunda belirleyici rol oynamaktadır. İnsan-Makina sistemi ve bu sistemde insanın üstlendiği görevler Bölüm 2'nin konusunu oluşturmaktadır.

Sistem performansının bileşenlerinden insan performansı, iş ortamında çalışma sırasındaki insan davranışlarının bir sonucudur. İnsan-Makina sistem performansını incelemek ve değerlendirmek için kullanılan kriterler de bunu göstermektedir.

İnsan çalışmasının mikro düzeyde incelenmesinde ilk adım görevin analizidir. Tüm insan davranışları Uyarı-Organizma-Cevap (S-O-R) zincirindeki üç eleman ile temsil edilebilir. İnsan iş ortamında da kendisine gelen bilgileri işleyerek gerekli eylemi yerine getirir. Bu esas uyarınca yapılan görev sınıflamaları iş etüdü yöntemlerinin (özellikle sentetik zamanlar yöntemi) de temelini oluşturur. Bölüm 3 insan davranışı ve performansını ele almaktadır.

Literatürde insan hataları iki ana yaklaşımla incelenmektedir. Bölüm 4'de ele alınan nedensel yaklaşım, insan hatalarının nadiren tesadüfi karakterli olduğu, aslında bazı neden ve faktörlere bağlı olarak ortaya çıktığı tezinden

hareket etmektedir. İnsan hataları sebepleri, sonuçları, meydana geliş mekanizmaları açısından farklılıklar göstermektedir. Nedensel yaklaşım insan hatalarını anlamayı, hataların altında yatan nedenleri hataya etki yapan faktörleri ve hatanın ortaya çıkışındaki mekanizmaları belirlemeyi amaçlamaktadır. Hataları karakteristiklerine göre belirli gruplarda toplayarak incelemek, hatayı oluşturan nedenleri ortadan kaldırmayı ve faktörleri iyileştirmeyi mümkün kılar. Bu nedenle insan hatasına yol açan faktörler ve değişik hata sınıflama çalışmaları incelenmektedir.

İnsan hatasına yönelik literatürde önemli bir yer tutan diğer yaklaşım matematik esaslıdır. Güvenilirlik adıyla bilinen matematiksel incelemeler, insan hatasını sayısal olarak incelemeye yöneliktir. Güvenilirlik analizinde insan hatasının tesadüfi olarak ortaya çıktığı kabul edilir. İnsan güvenilirliği analizinin amacı, İ-M sistemini analiz ederek, muhtemel insan hatalarını ve onların potansiyel etki ve sonuçlarını tahmin etmektir.

İnsan güvenilirliği alanında uygulanmakta olan, klasik güvenilirlik teorisine benzerlik kurularak oluşturulmuş ve probabilité teorisini kullanan, İGA yöntemleri iki temel yaklaşım taşımaktadır.

Simülasyon, hem operatör hem de bakım faaliyetlerinde operatör ve sistem güvenilirliğini belirlemek üzere uygulanmıştır. İGA alanında analitik yaklaşımı kullanan, modelleme tekniği, modele dahil edilen boyutlar, açısından varolan temel farklılıkları yansıtan, uygulamada nispeten yaygın kabul görmüş, bu çalışma açısından ilginç bazı yöntemler Bölüm 5'de ele alınmaktadır.

Yöntemler arasında ortak bir metodoloji bulunmamasına ve analitik/simülasyon yaklaşım farkına rağmen İGA, sistem analizi, veri tayini ve kalitatif, kantitatif inceleme adımlarından oluşmaktadır.

İGA'nın ilk adımı olan sistem analizi aşamasında, görev/sistem incelenerek elemanter bileşenlerine ayrılır. Elde edilen elemanter fonksiyonlar arıza veya olay ağacı şemaları şeklinde sıralı biçimde kaydedilir.

Bütün İGA teknikleri kantitatif analiz için sayısal birtakım veriye gerek göstermektedir. Gerek analizin temel girdisini oluşturan hata/başarı probabilité değerleri, gerekse modelin içerdığı diğer faktörlere ait veri yetersizliği İGA

alanındaki en önemli problemlerden biridir. Veri bulunamayan durumlarda, analiz girdileri genellikle insan tahmini (takdiri) ile elde edilir. İnsan güvenilirliği alanında veri problemi ve veri bankası girişimleri Bölüm 6'da incelenmektedir.

Her yöntem güvenilirlik için önem taşıyan bazı faktörleri içermektedir. Yöntemlerde ele alınan önemli faktörler bağımlılık, kritiklik ve PEF olmaktadır.

Yapılan literatür araştırması ayrıca şu noktaları açıkça ortaya koymaktadır:

- . İ-M sistemlerinde insan hatalarının öneminin artması, bu konunun incelenmesinin gereğini de arttırmaktadır.
- . İnsan güvenilirliği alanında uzman takdiri merkezi bir rol oynamaktadır.
- . Uzmanlar subjektif tahmin ve yargılarda bulunurken, düşüncelerini dilsel olarak ve kötü tanımlamış ifadeler kullanarak yansıtmak eğilimindedir.
- . Böyle dilsel ifadelerin içerdiği belirsizliğin klasik yöntemler ile incelenmesi mümkün değildir.
- . Bulanık kümeler kuramı, dilsel değişkenlerin içerdiği belirsizliği ele alıp, incelemek üzere uygun bir matematik araçtır.
- . İnsan hata probabilitesi ve arıza oranı arasındaki tanım farklılığı, sistem güvenilirliği analizinde güçlük yaratmaktadır.

Yukarıda belirtilen bulguların ışığında, bu çalışmada insan hatalarını sayısal olarak incelemek üzere İ-M sisteminde görev/fonksiyon akışını dilsel ifadelerden yola çıkarak modelleyen, girdi olarak dilsel değişkenleri işleyen ve matematik araç olarak bulanık kümeler kuramını kullanan bir prosedür önerilmektedir.

Modelin gerektirdiği kadarıyla bulanık kümeler kuramının tanıtıldığı ve bulanık kümeler ile ilgili bazı kavram ve özelliklerin verildiği Bölüm 7'de, ayrıca güvenilirlik alanındaki bulanık küme uygulamaları yer almaktadır.

Önerilen model üç aşamalıdır. Sistemin analiz edildiği ilk aşama basitleştirilmiş ağaç şemasının kurulması ile sona erer. Kullanım basitliği ve sadelik sağlamak üzere, bu çalışmada dilsel tanımlamalardan yola çıkan, sadece

incelenen arızaya yol açan görev/fonksiyon dizilerini gösteren zaman yönünde ilerleyen bir ağaç şeması kullanılmaktadır.

Modelin ana girdisi dilsel olarak ifade edilen ve bulanık kümeler olarak tanımlanan hata/arıza gerçekleşme olasılıklarıdır. Ayrıca insan güvenilirliği açısından önemli iki faktör, bağımlılık ve kritiklik modele dahil edilmiştir.

Bağımlılık, güvenilirlikte sonuç üzerinde önemli etki yapar. Modelde bağımlılık dilsel olarak ifade edilmekte ve bulanık faktör olarak işlemlere girmektedir.

Ağaç şemasında yer alan çeşitli olay zincirleri, sonucu etkilemek açısından farklı öneme sahip olabilirler. Uzman yargısına dayanarak saptanan bu durum, kritiklik adı altında bulanık küme ile temsil edilerek dal bazındaki incelemelere dahil edilmektedir.

Kalitatif analiz bölümünde, ağaç şeması ile temsil edilen fonksiyon/görev yapısı ve olasılık, bağımlılık ve kritiklik girdileri bulanık kümeler kuramı ile incelenmektedir.

Bağımlılık faktörünün işlemlere katılması için bir bulanık bağımlılık modeli getirilmektedir. Hesaplanan dal gerçekleşme olasılıkları hem probabiliteler değeri hem de üyelik derecelerini dikkate alan dengelenmiş bir yaklaşımla değerlendirilmektedir.

Hesaplamaların el ile yapılmasındaki zorluk nedeniyle, bu çalışmada hesaplamalar geliştirilen bir bilgisayar programı (Ek A) ile gerçekleştirilmektedir.

Bu değerlendirme, sistem analisti veya sistem tasarımcısına incelenen sistemi temsil eden ağaçtaki dalları güvenilirlik açısından sıralamak, kritik ve güvenli dalları belirlemek, sistem üzerinde insanın oluşturduğu riski tayin etmek ve insan ile makina arasında risk paylaşımını gerçekleştirmek üzere dal gerçekleşme olasılıklarını karşılaştırma olanağı sağlar.

Bu çalışmada tüm değişkenlerin kesikli değer aldığı kabul edilerek, değişkenler bulanık kümeler ile temsil edilmektedir. Değişkenlerin sürekli değerler alması halinde üyelik fonksiyonları tanımlanmalıdır.

Bulanık kümeler alanında mevcut uygulamalar için önde gelen sorun, bir dilsel değişkeni temsil edecek bulanık kümeyi oluştururken üyelik derecelerinin, atanması ile ilgilidir (Kangari ve Riggs, 1989). Değerlendirmenin başlangıç noktasını oluşturması nedeniyle, üyelik derecelerinin olabildiğince gerçekçi belirlenmesi oldukça önemlidir. Seçilen bulanık kümelerde üyelik dereceleri değişikliğinin etkilerini belirleyecek duyarlılık analizleri yapmak, bu problemi yumuşatır ve kullanıcıya faydalı bilgiler sunabilir.

Bulanık kümeler alanında bir diğer problem aritmetik işlemler ile ilgilidir. Aritmetik işlemlerin uygulanması ve işlemlerde bozulabilen konveksliğin sağlanması konusunda bir standardizasyon sağlanamamıştır (Kangari ve Riggs, 1989).

İnsan değişkenliğinde önemli rol oynayan ve PEF olarak bilinen faktörler bu çalışmada dikkate alınmamıştır. İnsan performansında kişiden kişiye ve aynı kişi üzerinde zamanla değişiklik yaratan bu faktörlerin de modele ithali ayrı ve önemli bir çalışma konusu olarak düşünölmek gerekir.

KAYNAKLAR

- ASKREN, W. and T. REGULINSKI, (1969), Quantifying Human Performance for Reliability Analysis of Systems, Human Factors, 11(4), 393-396
- BARKS, D. B., KOZINSKY, E. J., and ECKEL, J. S. (1982), Nuclear Power Plant Control Room Task Analysis, NUREG/CR-2598, USA
- BELLMAN, R. E., ZADEH, L. A., (1970), Decision Making In Fuzzy Environment, Management Science, 178, 141-164
- BERLINER, C., D. ANGELL, & J. SHEARER, (1964), Behaviors, Measures and Instruments for Performance Evaluation in Simulated Environments, Symposium on Quantification of Human Performance, USA
- BLANCHARD, R. E., MITCHELL, M. B., and SMITH, R. L., (1966), Likelihood of Accomplishment Scale for a Sample of Man-Machine Activities, Dunlap Asc, USA.
- BOSMAN, D., (1981), Systematic Design of Socio-Technical Systems, Stress, Work Design and Productivity, John Wiley & Sons, 165-194
- CHURCHMAN, C.W., (1968), The System Approach, Dell Publishing, USA
- DHILLON, B. S. and SINGH, C., (1978), Bibliography of Literature on Fault Trees, Microelectronics and Reliability, 17(5), 501-503
- DHILLON, B. S., (1988), Mechanical Reliability: Theory, Models and Applications, AIAA, USA
- DİNÇMEN, M., (1991), Benzetim Tekniği ve Sanayideki Uygulamalar, Sanayide Bilgisayar Kullanımı ve Otomasyon 1991 Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İstanbul, 65-75
- DUBOIS, D., and PRADE, H., (1980), Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications, Academic Press, USA
- EMBREY, D. E., (1983), The Use of Performance Shaping Factors and Quantified Expert Judgment in The Evaluation of Human Reliability: An Initial Appraisal, NUREG/CR-2986, USA
- EMBREY, D. E, HUMPHREYS, P., ROSA, E. A., KIRWAN, B., and REA, K., (1984), SLIM-MAUD: An Approach to Assessing Human Error Probabilities Using Structural Expert Judgment, Vol. 1-2, NUREG/CR-3518, USA
- ERKUT, H., (1989), Sistem Analizi, Kıyı Yayınları, İstanbul

- FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, (1979), Aviation Safety Reporting Program, USA
- FUSSELL, J., POWERS, G, & BENNETTS, R., (1974), Fault Trees.. a State of The Art Discussion, *IEEE Transactions on Reliability*, 23(1), 51-55
- GAIN, R. R., KOHOUT, L. J., (1977), The Fuzzy Decade:A Bibliography of Fuzzy System and Closely Related Topics, *International Journal of Man-Machine Studies*, 9, 1-68
- GAZDIK, I., (1985), Fault Diagnosis and Prevention by Fuzzy Sets, *IEEE Transactions on Reliability*, 34(4), 382-388
- GELDER, K., (1980) Human Error with a Blending Process Simulator, *IEEE Transactions on Reliability*, 29(3), 258-264
- GRANDJEAN, E., (1987), Physiologische Arbeitsgestaltung, Ott Verlag, Germany
- GREGG, L. W. (1961), Engineering Psychology, Industrial Psychology, Mc Graw Hill, USA, 324-352
- GUILLAUME, P., (1970), Psikoloji, İÜ Fen Fak. Basimevi, İstanbul
- HAGEN, E. and MAYS, G., (1981), Human Factors Engineering in the USA Nuclear Arena, *Nuclear Safety*, 22(3), 337-346
- HALL, R., FRAGOLA, J., and WREATHALL, (1982), Post Event Human Decision Errors: Operator Action Tree/Time Reliability Correlation, NUREG/CR-3010, USA
- HALPIN, S. M., JOHNSON E. M., THORNBERRY, J. A., (1973), Cognitive Reliability in Manned Systems, *IEEE Transactions on Reliability*, 22(3), 165-169
- HARRIS, D. and CHANEY, F., (1969), Human Factors in Quality Assurance, John Wiley & Sons, USA
- HETTINGER, C. W., (1958), Analysis of Equipment Failnres Caused by Human Errors, Convair Astronantics, Rept. REL-R-005, USA.
- HORNYAK, S. J., (1967), Effectiveness of Display Subsytem Measurement and Prediction Techniques, Air Force Report No. TR-67-292, USA
- IRWIN, I. A., LEVITZ, J. J., and FREED, A. M., (1964), Human Reliability in The Performance of Maintenance, Aerojet General Corp. Report No. LRP 317/TDR-63-18, USA
- JAIN, R., (1976), Decisionmaking in The Presence of Fuzzy Variables, *IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics*, 698-703
- KALSBEEK, J. W. H., (1981), The Production of Behaviour and Its Accompanying Stresses, Stress, Work Design and Productivity, John Wiley & Sons, USA 76-99

- KANGARI, R., and RIGGS, L. S., (1989), Construction Risk Assessment by Linguistics, IEEE Transactions on Engineering Management, 36(2), 126-131
- KAUFMANN, A., (1975), Introduction to the Theory of Fuzzy Subsets, Academic Press, USA
- KEIDEL, W. D., (1973), Informationsverarbeitung, Lehrbuch Physiologie, Germany
- KENARANGUI, R., (1991), Event-Tree Analysis by Fuzzy Probability, IEEE Transactions on Reliability, 40(1), 120-124
- KIRCHNER, J. H., (1972), Arbeitswissenschaftlicher Beitrag zur Automatisierung-Analyse und Synthese von Arbeitssystemen, Beuth-Vertrieb, Germany
- KIRWAN, B., (1987), Human Reliability Analysis of An Offshore Emergency Blowdown System, Applied Ergonomics, 18(1), 22-23
- KLIR, G. J., and FOLGER, T. A., (1988), Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information, Prentice Hall, USA
- KRAGT, H., (1978), Human Reliability Engineering, IEEE Transactions on Reliability, 27(3), 195-201
- KÜLÜR, C., (1977), Kalite Kontrolü Seminer Notları, Mak.Müh.Oda Yayınları
- LAURIG, W., (1980), Grundzüge der Ergonomie, Beuth Verlag, Germany
- LEE, K. W., TILLMAN, F. A., HIGGINS, J. J., (1988), A Literature Survey of The Human Reliability Component in a Man-Machine System, IEEE Transactions On Reliability, 37(1), 24-34
- LEES, F., (1973), Quantification of Man-Machine System Reliability in Process Control, IEEE Transactions on Reliability, 22(3), 124-131
- LEPLAT, J., (1987), Accidents and Incidents Production: Methods of Analysis, New Technology and Human Error, John Wiley & Sons, 133-142, USA
- LEVAN, W. I., (1960), Analysis of the Human Error Problem in The Field, Bell Aerosystems Co., Rept. 7-60-932004, USA
- LEWIS, C. M., STINE, W. W., (1989), Hidden Dependence in Human Errors, IEEE Transactions on Reliability, 38(3), 296-300.
- LUCZAK, H., (1974), Untersuchungen Informatorischer Belastung und Beanspruchung des Menschen, IAD, Germany
- MC CORMICK, E. J., (1976), Human Factors In Engineering and Design, Mc Graw-Hill, USA
- MC CORMICK, E. J., and ILGEN, D., (1980), Industrial Psychology, Prentice-Hall, USA

- MC CORMICK, E. J. and SANDERS, M., (1982), Human Factors in Engineering and Design, Mc Graw-Hill, USA
- MEISTER, D., (1958), Human Engineering Survey of Difficulties in Reporting Failure and Consumption Data, Convair Astronautics, Rept. ZX-7-035, USA
- MEISTER, D., and G. RABIDEAU, (1965), Human Factors Evaluation in System Development, John Wiley & Sons, USA
- MEISTER, D., (1971), Human Factors: Theory and Practice, John Wiley & Sons, USA
- MEISTER, D., (1973), A Critical Review of Human Performance Reliability Predictive Methods, IEEE Transactions on Reliability, 22(3), 116-123
- MEISTER, D., (1976), Behavioral Foundations of System Development, John Wiley & Sons, USA
- MEISTER, D., (1984), Human Reliability, Human Factors Review, 13-53
- MILLER, D. P., SWAIN, A. D., (1987), Human Error and Human Reliability, Handbook of Human Factors, Wiley & Sons, USA, 219-250
- MORAY, N., (1989), Objective & Subjective Estimates of Human Error, IEEE Transactions on Reliability, 38(3), 301-304
- MUNGER, S. J., SMITH, R. W., and PAYNE, D., (1962), An Index of Electronic Equipment Operability: Data Store, American Institutes For Research, AIR-C43-1/62-RP(1), USA
- NAWROCKI, L., STRUB, M., and CECIL, R., (1973), Error Categorization and Analysis in Man-Computer Communicative Systems IEEE Transactions on Reliability, 22(3), 135-140
- NORMAN, D. A., (1981), Categorization of Action Slips, Psychological Review Vol.88, 1-15,
- ONISAWA, T., (1990), An Application Of Fuzzy Concepts To Modelling Of Reliability Analysis, Fuzzy Sets and Systems, 37, 267-286
- OSGA, G. A., (1981), Guidelines For Development, Use, and Validation of Human Performance Data Bank For NTDS Combat Operations, Naval Ocean Systems Center, USA
- ÖZOK, A. F., (1985), Küçük Sanayide Daha Verimli Nasıl Çalışabiliriz, İTO Yay. No:1985-13, İstanbul
- ÖZOK, A. F., (1987), Üretimde Değer Yargılarımız ve Ergonominin Önemi, 1. Ulusal Ergonomi Kongresi Bildiriler Kitabı, MPM Yayınları, 467-477
- ÖZOK, A. F., (1991a), Otomasyon, İş Yükü Niteliklerinin Değişimi ve İnsan Performansı, Sanayide Bilgisayar Kullanımı ve Otomasyon 1991 Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İstanbul, 173-181

- ÖZOK, A. F., (1991b), İnsan-Makina Sistemlerinin Sayısallaştırma Yöntemleri, 3. Ergonomi Kongresi Bildiriler Kitabı, MPM Yayınları, 441, 75-82
- PARK, K. S., (1985), Human Reliability With Probabilistic Learning in Discrete and Continuous Tasks: Conceptualization and Modeling, *Microelectronics & Reliability*, 25(1), 157-166
- PARK, K. S., (1987a), Fuzzy Apportionment of System Reliability, *IEEE Transactions on Reliability*, 36(1), 129-132
- PARK, K. S., (1987b), Human Reliability, Elsevier, Netherlands
- PAYNE, D. and ALTMAN, J., (1962), An Index of Electronic Equipment Operability, AIR, USA
- PICKREL, E. & MC DONALD, T., (1964), Quantification of Human Performance in Large, Complex Systems, *Human Factors*, 6(6), 647-662
- PONTECORVO, A., (1965), A Method of Predicting Human Reliability, Annuals Reliability & Maintainability Symp., 337-342
- QUEINNEC, Y. and TERSSAC, G. de, (1988), Chronobiological Approach of Human Errors in Complex Systems, New Technology And Human Error, John Wiley & Sons, England, 223-233
- RASMUSSEN, J., (1979), On The Structure of Knowledge.. A Morphology of Mental Models in a Man-Machine Context, RISO National Laboratory, Report No. M-2192, Denmark,
- RASMUSSEN, J., (1983), Skills, Rules and Knowledge: Signals, Signs and Symbols and other Distinctions in Human Performance Models, *IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics*, 13(3), 257-266
- RASMUSSEN, J., (1988a), The Definition of Human Error and a Taxonomy for Technical System Design, New Technology and Human Error, John Wiley & Sons, England, 23-30
- RASMUSSEN, J., (1988b), Trends in Human Reliability Analysis, *Ergonomics*, 28(2), 1185-1195
- REFA, (1984), Methodenlehre des Arbeitsstudiums Teil 1, Carl Hanser Verlag, Germany
- ROHMERT, W., LAURIG, W., LUCZAK, H., MAINZER, J., ZIPP, P., (1986), Arbeitswissenschaft 1, IAD, Germany
- ROOK, L., (1962), Reduction of Human Error in Industrial Production, Sandia National Lab., SCTM 93-62(14), USA
- ROUSE, W. and ROUSE, S., (1983), Analysis and Classification of Human Error, *IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics*, 13(4), 539-549
- SCHMIDTKE, H., et al, (1973), Ergonomie 1, Carl Hanser Verlag, Germany

- SEEVER, D. A., and STILWELL, W. G., (1983), Procedures for Using Expert Judgment to Estimate Human Error Probabilities in Nuclear Power Plant Operations, NUREG/CR-2743, USA
- SHAPER, A., COOPER, J. I., RAPPAPORT, M., SCHAEFFER K. H., and BATES, C. J., (1960), Human Engineering Testing and Malfunction Data Collection in Weapon System Programs, Wright Air Development Div., WADD TR 60-36
- SIEGEL, A. and WOLF, J., (1961), A Technique for Evaluating Man-Machine System Designs, Human Factors, 3(1), 18-28
- SIEGEL, A. and WOLF, J., (1969), Man-Machine Simulation Models, John Wiley & Sons, USA
- SIEGEL, L., (1970), Industrial Psychology, Richard Irwin Inc., USA,
- SIEGEL, A., WOLF, J., and LAUTMAN, M., (1975), A Family of Models for Measuring Human Reliability, IEEE Proc. Annual Reliability and Maintainability Symp.,
- SIEGEL, A., BARTER, W., WOLF, J., and KNEE, H., (1984), Maintenance Personnel Performance Simulation (MAPPS) Model: Description of Model Content, Structure and Sensitivity Testing, NUREG/CR-3626(2), USA
- SOUTHWEST RESEARCH INSTITUTE, (1980), Reporting Procedures Manual for The Nuclear Plant Reliability Data System, Southwest RI, USA
- SOYSAL, A., (1990), Türkiye'de Bilgisayar Kullanımının Gelişmesi ve Fabrikalarda Uygulamalar, Sanayide Bilgisayar Kullanımı ve Otomasyon 1990 Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İstanbul, 211-219
- STEINBUCH, K., (1965), Automat und Mensch, Springer Verlag, Germany
- STIER, F., (1970), Zur Ermittlung und Bewertung Menschlicher Arbeit und Leistung, Arbeit und Leistung, 24, 89-92
- SWAIN, A., (1963), A Method for Performing a Human Factors Reliability Analysis, Sandia National Lab., SCR-685, USA
- SWAIN, A. D., (1976), The Human Element in Systems Safety, InComTec, USA
- SWAIN, A. D., (1977), Design Techniques For Improving Human Performance In Production, InComTec, USA
- SWAIN, A. D., and GUTTMANN, H. E., (1983), Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, NUREG/CR-1278, USA
- SWAIN, A. D. and WESTON, L. M., (1988), An Approach to the Diagnosis and Misdiagnosis of Abnormal Conditions in Post-accident Sequences in Complex Man-Machine Systems, Task, Errors and Mental Models, Taylor & Francis

- TANAKA, H., FAN, L., LAI, F., & TOGUCHI, K., (1983), Fault-Tree Analysis By Fuzzy Probability, IEEE Transactions on Reliability, 32(5), 453-457
- TAYLOR, D. H., (1988), A Plea for Reasons-A Reply to Rasmussen, New Technology and Human Error, John Wiley & Sons, USA, 303-310
- TOPMILLER, D. A., ECKEL, J. S., and KOZINSKY, E. J., (1982), Human Reliability Data Bank For Nuclear Power Plant Operations, Vol.1, NUREG/CR-2744, USA
- TSUKAMOTO, Y., TERANO, T., (1977), Failure Diagnosis by Using Fuzzy Logic, Proc. Fuzzy Set Theory and Application, IEEE Conf. Decision Control, 1390-1395, USA
- U.S. AIR FORCE, (1971), Life Sciences Accident and Incident Classification Elements and Factors, AFISCM 127-6, USA
- ÜSTÜNEL, B., (1983), Ekonominin Temelleri, Mısırlı Matb., İstanbul
- VAN EEKHOUT, J. M., ROUSE W. B., (1981), Human Errors in Detection, Diagnosis, and Compansation for Failures in the Engine Control Room of a Supertanker, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 11(12)
- VESELY, W., GOLDBERG, F., ROBERTS, N., and HAASL, D., (1981), Fault Tree Handbook, NUREG-0492, USA
- WU, T. and HWANG, S., (1989), Maintenance Error Reduction Strategies in Nuclear Power Plants Using Root Cause Analysis, Applied Ergonomics, 20,2, 115-121
- ZADEH, L., (1979), Fuzzy Sets, Operations Research Support Methodology, Marcel Dekker Inc., USA
- ZIMMERMANN, H. J., (1986), Fuzzy Set Theory and Its Applications, Kluwer-Nijhoff Publishing, USA

EK A

Geliştirilen Programın Listesi

```
10 REM OLAY AĞACI BİLGİLERİ
20 INPUT "DAL SAYISI= ";K
30 INPUT "HERHANGİ BİR DALDAKİ MAKS. OLAY SAYISI= ";MOS
40 INPUT "AĞAÇTAKİ TOPLAM OLAY SAYISI= ";TOS
50 L=MOS+1
60 DIM
DAL(K,L),DPROB$(TOS),Y(3,2),A(3,2),MULT(9,2),CARP1(3,2),CARP2(3,2)
,TET(3)
70 DIM TET2(3),O(3,2),CA(3,2),CY(3,2),DBAG$(TOS)
80 DIM BY(3,2),BA(3,2),BO(3,2),KCARP1(3,2),KCARP2(3,2)
90 DIM DALSON(K,3,2),BİRİM(K,3,2),MINİM(K,3,2),EKCARP2(3,2)
100 DIM KRC(3,2),KRN(3,2),KRA(3,2),DKRIT$(K)
110 FOR I=1 TO K
120 FOR J=1 TO L
130 READ DAL(I,J)
140 NEXT J
150 NEXT I
160 REM OLAY İHTİMAL VE BAĞIMLILIKLARININ OKUNMASI
170 FOR I=1 TO TOS
180 PRINT
190 PRINT "OLABİLİRLİK (CY,Y,O,Z,CZ)  (";I;")= ";:INPUT DPROB$(I)
200 PRINT "BAĞIMLILIK (T,Y,O,A,S)  (";I;")= ";:INPUT
DBAG$(I):PRINT
210 NEXT I
220 FOR I=1 TO K
230 PRINT "KRİTİKLİK (C,N,A)  (";I;")= ";:INPUT DKRIT$(I)
240 NEXT I
250 REM BULANIK İHTİMAL (Y,A,O,CA,CY) KÜMELERİNİN OKUNMASI
260 FOR I=1 TO 3
270 FOR J=1 TO 2
280 READ Y(I,J)
290 NEXT J
300 NEXT I
310 FOR I=1 TO 3
320 FOR J=1 TO 2
330 READ A(I,J)
340 NEXT J
350 NEXT I
360 FOR I=1 TO 3
370 FOR J=1 TO 2
380 READ O(I,J)
390 NEXT J
```

```

400 NEXT I
410 FOR I=1 TO 3
420 FOR J=1 TO 2
430 READ CA(I,J)
440 NEXT J
450 NEXT I
460 FOR I=1 TO 3
470 FOR J=1 TO 2
480 READ CY(I,J)
490 NEXT J
500 NEXT I
510 REM BULANIK BAĞIMLILIK (Y,A,O) KÜMELERİNİN OKUNMASI
520 FOR I=1 TO 3
530 FOR J=1 TO 2
540 READ BY(I,J)
550 NEXT J
560 NEXT I
570 FOR I=1 TO 3
580 FOR J=1 TO 2
590 READ BA(I,J)
600 NEXT J
610 NEXT I
620 FOR I=1 TO 3
630 FOR J=1 TO 2
640 READ BO(I,J)
650 NEXT J
660 NEXT I
670 REM BULANIK KRITIKLIK (C,N,A) KÜMELERİNİN OKUNMASI
680 FOR I=1 TO 3
690 FOR J=1 TO 2
700 READ KRC(I,J)
710 NEXT J
720 NEXT I
730 FOR I=1 TO 3
740 FOR J=1 TO 2
750 READ KRN(I,J)
760 NEXT J
770 NEXT I
780 FOR I=1 TO 3
790 FOR J=1 TO 2
800 READ KRA(I,J)
810 NEXT J
820 NEXT I
830 REM DAL ÇEVİRİMLERİNİN BAŞLANGICI
840 ND=1
850 REM
860 TJ=0
870 REM ÇARPMAYA GİRİŞ
880 TJ=TJ+1
890 IF (DAL(ND,TJ)=0 OR TJ>MOS) THEN 2830
900 IF ND>K THEN 2900
910 LL=ND:II=TJ
920 IF TJ=1 THEN 930 ELSE 1590
930 CARIND1$=DPROB$(DAL(ND,1)):T=1
940 IF CARIND1$="Y" THEN 990

```

```

950 IF CARIND1$="A" THEN 1270
960 IF CARIND1$="O" THEN 1060
970 IF CARIND1$="CA" THEN 1130
980 IF CARIND1$="CY" THEN 1200
990 REM Y (İHTİMAL) İÇİN ÇARPANA ATAMALAR
1000 FOR IY= 1 TO 3
1010 FOR JY= 1 TO 2
1020 IF T=1 THEN CARP1(IY,JY)=Y(IY,JY)
1030 NEXT JY
1040 NEXT IY
1050 GOTO 1590
1060 REM O (İHTİMAL) İÇİN ÇARPANA ATAMALAR
1070 FOR IY= 1 TO 3
1080 FOR JY= 1 TO 2
1090 IF T=1 THEN CARP1(IY,JY)=O(IY,JY)
1100 NEXT JY
1110 NEXT IY
1120 GOTO 1590
1130 REM CA (İHTİMAL) İÇİN ÇARPANA ATAMALAR
1140 FOR IY= 1 TO 3
1150 FOR JY= 1 TO 2
1160 IF T=1 THEN CARP1(IY,JY)=CA(IY,JY)
1170 NEXT JY
1180 NEXT IY
1190 GOTO 1590
1200 REM CY (İHTİMAL) İÇİN ÇARPANA ATAMALAR
1210 FOR IY= 1 TO 3
1220 FOR JY= 1 TO 2
1230 IF T=1 THEN CARP1(IY,JY)=CY(IY,JY)
1240 NEXT JY
1250 NEXT IY
1260 GOTO 1590
1270 REM A (İHTİMAL) İÇİN ÇARPANA ATAMALAR
1280 FOR IA= 1 TO 3
1290 FOR JA= 1 TO 2
1300 IF T=1 THEN CARP1(IA,JA)=A(IA,JA)
1310 NEXT JA
1320 NEXT IA
1330 GOTO 1590
1340 LPRINT "{(";CARP2(1,2);"|";CARP2(1,1);")" TAB(25)
"(";CARP2(2,2);"|";CARP2(2,1);")" TAB(50)
"(";CARP2(3,2);"|";CARP2(3,1);")":REM carpm
1350 PRINT "{(";CARP2(1,2);"|";CARP2(1,1);")" TAB(25)
"(";CARP2(2,2);"|";CARP2(2,1);")" TAB(50)
"(";CARP2(3,2);"|";CARP2(3,1);")":
1360 LPRINT
1370 LPRINT "-----"
"-----"
1380 R%=0
1390 FOR I=1 TO 3
1400 FOR M=1 TO 3
1410 R%=R%+1
1420 IF CARP1(I,1)<=CARP2(M,1) THEN MULT(R%,1)=CARP1(I,1) ELSE
MULT(R%,1)=CARP2(M,1)
1430 MULT(R%,2)=CARP1(I,2)*CARP2(M,2)

```

```

1440 NEXT M
1450 NEXT I
1460 REM ELİMİNASYON
1470 FOR TT=1 TO 8
1480 FOR J=TT+1 TO 9
1490 IF MULT(TT,2)>MULT(J,2) THEN
PAR=MULT(J,2):MULT(J,2)=MULT(TT,2):MULT(TT,2)=PAR:PAR2=MULT(J,1):M
ULT(J,1)=MULT(TT,1):MULT(TT,1)=PAR2
1500 NEXT J
1510 NEXT TT
1520 FOR AA=1 TO 3
1530 IF AA=1 THEN IA=1 ELSE IF AA=2 THEN IA=4 ELSE IF AA=3 THEN
IA=7
1540 CARP1(AA,1)=MULT(IA,1):CARP1(AA,2)=MULT(IA,2)
1550 IF MULT(IA+1,1)>CARP1(AA,1) THEN
CARP1(AA,1)=MULT(IA+1,1):CARP1(AA,2)=MULT(IA+1,2)
1560 IF MULT(IA+2,1)>CARP1(AA,1) THEN
CARP1(AA,1)=MULT(IA+2,1):CARP1(AA,2)=MULT(IA+2,2)
1570 NEXT AA
1580 GOTO 880
1590 REM BİR OLAY İÇİN KOŞULLU İHTİMAL HESABI
1600 IF TJ=1 THEN 880
1610 KCARIND1$=DPROB$(DAL(LL,II)):REM IT=1
1620 IF KCARIND1$="Y" THEN 1730
1630 IF KCARIND1$="A" THEN 2010
1640 IF KCARIND1$="O" THEN 1940
1650 IF KCARIND1$="CA" THEN 1800
1660 IF KCARIND1$="CY" THEN 1870
1670 KCARIND2$=DBAG$(DAL(LL,II)):REM IT=2
1680 IF KCARIND2$="Y" THEN 2080
1690 IF KCARIND2$="A" THEN 2150
1700 IF KCARIND2$="T" THEN 2080
1710 IF KCARIND2$="S" THEN 2080
1720 IF KCARIND2$="O" THEN 2220
1730 REM Y (İHTİMAL) İÇİN ÇARPANA ATAMALAR
1740 FOR IY= 1 TO 3
1750 FOR JY= 1 TO 2
1760 KCARP1(IY,JY)=Y(IY,JY)
1770 NEXT JY
1780 NEXT IY
1790 GOTO 1670
1800 REM CA (İHTİMAL) İÇİN ÇARPANA ATAMALAR
1810 FOR IY= 1 TO 3
1820 FOR JY= 1 TO 2
1830 KCARP1(IY,JY)=CA(IY,JY)
1840 NEXT JY
1850 NEXT IY
1860 GOTO 1670
1870 REM CY (İHTİMAL) İÇİN ÇARPANA ATAMALAR
1880 FOR IY= 1 TO 3
1890 FOR JY= 1 TO 2
1900 KCARP1(IY,JY)=CY(IY,JY)
1910 NEXT JY
1920 NEXT IY
1930 GOTO 1670

```

```

1940 REM O (İHTİMAL) İÇİN ÇARPANA ATAMALAR
1950 FOR IY= 1 TO 3
1960 FOR JY= 1 TO 2
1970 KCARP1(IY,JY)=O(IY,JY)
1980 NEXT JY
1990 NEXT IY
2000 GOTO 1670
2010 REM A (İHTİMAL) İÇİN ÇARPANA ATAMALAR
2020 FOR IY= 1 TO 3
2030 FOR JY= 1 TO 2
2040 KCARP1(IY,JY)=A(IY,JY)
2050 NEXT JY
2060 NEXT IY
2070 GOTO 1670
2080 REM Y (BAĞIMLILIK) İÇİN ÇARPANA ATAMALAR
2090 FOR IY= 1 TO 3
2100 FOR JY= 1 TO 2
2110 KCARP2(IY,JY)=BY(IY,JY)
2120 NEXT JY
2130 NEXT IY
2140 GOTO 2290
2150 REM A (BAĞIMLILIK) İÇİN ÇARPANA ATAMALAR
2160 FOR IY= 1 TO 3
2170 FOR JY= 1 TO 2
2180 KCARP2(IY,JY)=BA(IY,JY)
2190 NEXT JY
2200 NEXT IY
2210 GOTO 2290
2220 REM O (BAĞIMLILIK) İÇİN ÇARPANA ATAMALAR
2230 FOR IY= 1 TO 3
2240 FOR JY= 1 TO 2
2250 KCARP2(IY,JY)=BO(IY,JY)
2260 NEXT JY
2270 NEXT IY
2280 GOTO 2290
2290 REM KOŞULLU İHTİMAL ÇARPIMLARI
2300 FOR IKB=1 TO 3
2310 EKCARP2(IKB,2)=1-KCARP2(IKB,2)
2320 EKCARP2(IKB,1)=KCARP2(IKB,1)
2330 NEXT IKB
2340 R%=0
2350 FOR I=1 TO 3
2360 FOR M=1 TO 3
2370 R%=R%+1
2380 IF KCARP1(I,1)<=EKCARP2(M,1) THEN MULT(R%,1)=KCARP1(I,1) ELSE
MULT(R%,1)=EKCARP2(M,1)
2390 MULT(R%,2)=KCARP1(I,2)*EKCARP2(M,2)
2400 NEXT M
2410 NEXT I
2420 REM ELİMİNASYON
2430 FOR TT=1 TO 8
2440 FOR J=TT+1 TO 9
2450 IF MULT(TT,2)>MULT(J,2) THEN
PAR=MULT(J,2):MULT(J,2)=MULT(TT,2):MULT(TT,2)=PAR:PAR2=MULT(J,1):M
ULT(J,1)=MULT(TT,1):MULT(TT,1)=PAR2

```

```

2460 NEXT J
2470 NEXT TT
2480 FOR AA=1 TO 3
2490 IF AA=1 THEN IA=1 ELSE IF AA=2 THEN IA=4 ELSE IF AA=3 THEN
IA=7
2500 CARP2(AA,1)=MULT(IA,1):CARP2(AA,2)=MULT(IA,2)
2510 IF MULT(IA+1,1)>CARP2(AA,1) THEN
CARP2(AA,1)=MULT(IA+1,1):CARP2(AA,2)=MULT(IA+1,2)
2520 IF MULT(IA+2,1)>CARP2(AA,1) THEN
CARP2(AA,1)=MULT(IA+2,1):CARP2(AA,2)=MULT(IA+2,2)
2530 NEXT AA
2540 REM TOPLAMA İŞLEMİ
2550 R%=0
2560 FOR I=1 TO 3
2570 FOR M=1 TO 3
2580 R%=R%+1
2590 IF CARP2(I,1)<=KCARP2(M,1) THEN MULT(R%,1)=CARP2(I,1) ELSE
MULT(R%,1)=KCARP2(M,1)
2600 MULT(R%,2)=CARP2(I,2)+KCARP2(M,2)
2610 NEXT M
2620 NEXT I
2630 REM TOPLAMADA ELİMİNASYON
2640 FOR TT=1 TO 8
2650 FOR J=TT+1 TO 9
2660 IF MULT(TT,2)>MULT(J,2) THEN
PAR=MULT(J,2):MULT(J,2)=MULT(TT,2):MULT(TT,2)=PAR:PAR2=MULT(J,1):M
ULT(J,1)=MULT(TT,1):MULT(TT,1)=PAR2
2670 NEXT J
2680 NEXT TT
2690 FOR AA=1 TO 3
2700 IF AA=1 THEN IA=1 ELSE IF AA=2 THEN IA=4 ELSE IF AA=3 THEN
IA=7
2710 CARP2(AA,1)=MULT(IA,1):CARP2(AA,2)=MULT(IA,2)
2720 IF MULT(IA+1,1)>CARP2(AA,1) THEN
CARP2(AA,1)=MULT(IA+1,1):CARP2(AA,2)=MULT(IA+1,2)
2730 IF MULT(IA+2,1)>CARP2(AA,1) THEN
CARP2(AA,1)=MULT(IA+2,1):CARP2(AA,2)=MULT(IA+2,2)
2740 IF CARP2(AA,2)>1 THEN CARP2(AA,2)=1 ELSE
2750 NEXT AA
2760 IF (KCARIND2$="T" OR KCARIND2$="S") THEN 2770 ELSE 2820
2770 FOR W=1 TO 3
2780 FOR WW=1 TO 2
2790 IF KCARIND2$="T" THEN CARP2(W,WW)=1 ELSE
CARP2(W,WW)=KCARP1(W,WW)
2800 NEXT WW
2810 NEXT W
2820 GOTO 1340
2830 REM DAL İHTİMALLERİ
2840 FOR I=1 TO 3
2850 FOR J=1 TO 2
2860 DALSON(ND,I,J)=CARP1(I,J)
2870 NEXT J
2880 NEXT I
2890 ND=ND+1:IF ND>K GOTO 2900 ELSE GOTO 850

```

```

2900 PRINT:PRINT "GİRİLEN OLAY AĞACI YAPISI, OLAY İHTİMALLERİ VE
BAĞIMLILIKLARI"
2910 LPRINT
2920 LPRINT "GİRİLEN OLAY AĞACI YAPISI, OLABİLİRLİKLER VE
BAĞIMLILIKLAR"
2930 PRINT "SONUCUNDA HESAP EDİLEN DAL OLABİLİRLİKLERİ SIRASIYLA
AŞAĞIDIR:"
2940 LPRINT "SONUCUNDA HESAP EDİLEN DAL OLABİLİRLİKLERİ SIRASIYLA
AŞAĞIDIR:"
2950 PRINT
2960 LPRINT
2970 FOR P=1 TO K
2980 PRINT DALSON(P,1,1);"|";DALSON(P,1,2) TAB(25)
DALSON(P,2,1);"|";DALSON(P,2,2) TAB(50)
DALSON(P,3,1);"|";DALSON(P,3,2)
2990 LPRINT "{(";DALSON(P,1,2);"|";DALSON(P,1,1);")" TAB(25)
"(";DALSON(P,2,2);"|";DALSON(P,2,1);")" TAB(50)
"(";DALSON(P,3,2);"|";DALSON(P,3,1);")}"
3000 PRINT
3010 REM LPRINT
3020 NEXT P
3030 IF DKRIT$(1)="*" THEN 3040 ELSE GOTO 3550
3040 REM MAKSİMUM İHTİMAL ELEMANININ BULUNMASI
3050 PRINT:PRINT "KRİTİKLİK*DALSON İŞLEMİ SONUÇLARI:"
3060 LPRINT
3070 LPRINT "KRİTİKLİK*DALSON İŞLEMİ SONUÇLARI:"
3080 LPRINT
3090 FOR P=1 TO K
3100 PRINT DALSON(P,1,1);"|";DALSON(P,1,2) TAB(25)
DALSON(P,2,1);"|";DALSON(P,2,2) TAB(50)
DALSON(P,3,1);"|";DALSON(P,3,2)
3110 LPRINT "{(";DALSON(P,1,2);"|";DALSON(P,1,1);")" TAB(25)
"(";DALSON(P,2,2);"|";DALSON(P,2,1);")" TAB(50)
"(";DALSON(P,3,2);"|";DALSON(P,3,1);")}"
3120 REM LPRINT
3130 NEXT P
3140 MAKS=DALSON(1,1,2)
3150 FOR MK=1 TO K
3160 FOR MI=1 TO 3
3170 IF MAKS<DALSON(MK,MI,2) THEN MAKS=DALSON(MK,MI,2)
3180 NEXT MI
3190 NEXT MK
3200 REM MAKSİMİZASYON KÜMELERİNİN BULUNMASI
3210 FOR BK=1 TO K
3220 FOR BI=1 TO 3
3230 BİRİM(BK,BI,1)=DALSON(BK,BI,2)/MAKS
3240 BİRİM(BK,BI,2)=DALSON(BK,BI,2)
3250 NEXT BI
3260 NEXT BK
3270 PRINT:PRINT "MAKSİMİZASYON KÜMELERİ:      MAKS. ELEMEN=";MAKS
3280 LPRINT
3290 LPRINT "MAKSİMİZASYON KÜMELERİ:"
3300 PRINT
3310 LPRINT
3320 FOR P=1 TO K

```

```

3330 PRINT BIRIM(P,1,1);"|"BIRIM(P,1,2) TAB(25)
BIRIM(P,2,1);"|"BIRIM(P,2,2) TAB(50)
BIRIM(P,3,1);"|"BIRIM(P,3,2)
3340 LPRINT "{("BIRIM(P,1,2);"|"BIRIM(P,1,1);)" TAB(25)
"("BIRIM(P,2,2);"|"BIRIM(P,2,1);)" TAB(50)
"("BIRIM(P,3,2);"|"BIRIM(P,3,1);)"}"
3350 REM LPRINT
3360 NEXT PCü
3370 REM DAL SONUÇ KÜMELERİNİN BULUNMASI
3380 PRINT:PRINT "MAKSİMİZASYON KÜMESİ YOLUYLA YAPILAN
DEĞERLENDİRME SONUÇLARI:"
3390 LPRINT
3400 LPRINT "MAKSİMİZASYON KÜMESİ YOLUYLA YAPILAN DEĞERLENDİRME
SONUÇLARI:"
3410 PRINT
3420 LPRINT
3430 FOR KM=1 TO K
3440 FOR KI=1 TO 3
3450 IF DALSON(KM,KI,1)<BIRIM(KM,KI,1) THEN
MINIM(KM,KI,1)=DALSON(KM,KI,1) ELSE MINIM(KM,KI,1)=BIRIM(KM,KI,1)
3460 MINIM(KM,KI,2)=DALSON(KM,KI,2)
3470 NEXT KI
3480 NEXT KM
3490 FOR P=1 TO K
3500 PRINT MINIM(P,1,1);"|"MINIM(P,1,2) TAB(25)
MINIM(P,2,1);"|"MINIM(P,2,2) TAB(50)
MINIM(P,3,1);"|"MINIM(P,3,2)
3510 LPRINT "{("MINIM(P,1,2);"|"MINIM(P,1,1);)" TAB(25)
"("MINIM(P,2,2);"|"MINIM(P,2,1);)" TAB(50)
"("MINIM(P,3,2);"|"MINIM(P,3,1);)"}"
3520 REM LPRINT
3530 NEXT P
3540 GOTO 4130
3550 LD=1: REM KRITIKLIK HESABI
3560 REM FOR LD=1 TO K
3570 IF DKRIT$(LD)="C" THEN 3600
3580 IF DKRIT$(LD)="N" THEN 3670
3590 IF DKRIT$(LD)="A" THEN 3740
3600 REM C (KRITIKLIK) İÇİN CARPIMA ATAMALAR
3610 FOR IY= 1 TO 3
3620 FOR JY= 1 TO 2
3630 CARP1(IY,JY)=KRC(IY,JY)
3640 NEXT JY
3650 NEXT IY
3660 GOTO 3810
3670 REM N (KRITIKLIK) İÇİN CARPIMA ATAMALAR
3680 FOR IY= 1 TO 3
3690 FOR JY= 1 TO 2
3700 CARP1(IY,JY)=KRN(IY,JY)
3710 NEXT JY
3720 NEXT IY
3730 GOTO 3810
3740 REM A (KRITIKLIK) İÇİN CARPIMA ATAMALAR
3750 FOR IY= 1 TO 3
3760 FOR JY= 1 TO 2

```

```

3770 CARP1(IY,JY)=KRA(IY,JY)
3780 NEXT JY
3790 NEXT IY
3800 GOTO 3810
3810 FOR I=1 TO 3
3820 FOR J=1 TO 2
3830 CARP2(I,J)=DALSON(LD,I,J)
3840 NEXT J
3850 NEXT I
3860 REM CARPMA ISLEMI (KRITIKLIK*DAL SONUCLARI)
3870 R%=0
3880 FOR I=1 TO 3
3890 FOR M=1 TO 3
3900 R%=R%+1
3910 IF CARP1(I,1)<=CARP2(M,1) THEN MULT(R%,1)=CARP1(I,1) ELSE
MULT(R%,1)=CARP2(M,1)
3920 MULT(R%,2)=CARP1(I,2)*CARP2(M,2)
3930 NEXT M
3940 NEXT I
3950 REM ELİMİNASYON
3960 FOR TT=1 TO 8
3970 FOR J=TT+1 TO 9
3980 IF MULT(TT,2)>MULT(J,2) THEN
PAR=MULT(J,2):MULT(J,2)=MULT(TT,2):MULT(TT,2)=PAR:PAR2=MULT(J,1):M
ULT(J,1)=MULT(TT,1):MULT(TT,1)=PAR2
3990 NEXT J
4000 NEXT TT
4010 FOR AA=1 TO 3
4020 IF AA=1 THEN IA=1 ELSE IF AA=2 THEN IA=4 ELSE IF AA=3 THEN
IA=7
4030 CARP1(AA,1)=MULT(IA,1):CARP1(AA,2)=MULT(IA,2)
4040 IF MULT(IA+1,1)>CARP1(AA,1) THEN
CARP1(AA,1)=MULT(IA+1,1):CARP1(AA,2)=MULT(IA+1,2)
4050 IF MULT(IA+2,1)>CARP1(AA,1) THEN
CARP1(AA,1)=MULT(IA+2,1):CARP1(AA,2)=MULT(IA+2,2)
4060 NEXT AA
4070 FOR I=1 TO 3
4080 FOR J=1 TO 2
4090 DALSON(LD,I,J)=CARP1(I,J)
4100 NEXT J
4110 NEXT I
4120 IF LD=K GOTO 3040 ELSE LD=LD+1: GOTO 3560
4130 END
4140 REM DALDAKI OLAYLAR
4150 DATA 1,2,3,4,0,0,0
4160 DATA 1,2,3,5,11,12,0
4170 DATA 1,2,3,5,6,0,0
4180 DATA 1,2,7,0,0,0,0
4190 DATA 1,8,0,0,0,0,0
4200 DATA 9,2,3,4,0,0,0
4210 DATA 9,2,3,5,10,0,0
4220 DATA 9,2,7,0,0,0,0
4230 DATA 9,8,0,0,0,0,0
4240 DATA 13,8,3,10,0,0,0
4250 DATA 13,8,3,6,0,0,0Cü

```

4260 REM BULANIK KÜMELER (İHTİMAL)
4270 REM YÜKSEK
4280 DATA 0.6,0.8
4290 DATA 1.0,0.85
4300 DATA 0.6,0.88
4310 REM ZAYIF
4320 DATA 0.5,0.3
4330 DATA 1.0,0.35
4340 DATA 0.5,0.38
4350 REM ORTA
4360 DATA 0.5,0.45
4370 DATA 1.0,0.5
4380 DATA 0.5,0.55
4390 REM COK ZAYIF
4400 DATA 0.51,0.05
4410 DATA 0.94,0.01
4420 DATA 1.0,0.001
4430 REM COK YÜKSEK
4440 DATA 0.5,0.95
4450 DATA 0.95,0.995
4460 DATA 1.0,1.0
4470 REM BULANIK KÜMELER (BAĞIMLILIK)
4480 REM COK BAĞIMLILIK
4490 DATA 0.5,0.8
4500 DATA 1.0,0.85
4510 DATA 0.5,0.88
4520 REM AZ BAĞIMLILIK
4530 DATA 0.5,0.15
4540 DATA 1.0,0.2
4550 DATA 0.5,0.25
4560 REM NORMAL BAĞIMLILIK
4570 DATA 0.5,0.4
4580 DATA 1.0,0.5
4590 DATA 0.5,0.6
4600 REM BULANIK KÜMELER (KRİTİKLİK)
4610 REM ÇOK KRİTİK
4620 DATA 0.5,0.8
4630 DATA 1.0,0.85
4640 DATA 0.5,0.88
4650 REM NORMAL KRİTİK
4660 DATA 0.5,0.4
4670 DATA 1.0,0.5
4680 DATA 0.5,0.6
4690 REM AZ KRİTİK
4700 DATA 0.5,0.15
4710 DATA 1.0,0.2
4720 DATA 0.5,0.25

→

ÖZGEÇMİŞ

1960'da İstanbul'da doğdu. 1978'de İstanbul Erkek Lisesi'nden, 1982'de İTÜ Makina Fakültesi Genel Makina Bölümü'nden mezun oldu. Yüksek lisans öğrenimini İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği programında 1985 yılında tamamladı. 1986-87 öğretim yılında Almanya'da, Technische Hochschule Darmstadt bünyesindeki İşbilim Enstitüsü'nde (Institut für Arbeitswissenschaft) misafir asistan olarak araştırmalar yaptı. 1984 yılından bu yana İTÜ Endüstri Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. Özkan'ın İşbilim, Organizasyon, Malzeme Yönetimi ve Bilgisayar Destekli Hizmet Sistemleri konularında yurtiçi ve yurtdışı yayınları bulunmaktadır. Evlidir. İngilizce ve Almanca bilmektedir.