

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ESNEK ÜSTYAPILI DEVLET YOLLARINDAKİ  
BOZULMALARIN BULANIK MANTIK İLE  
TAHMİNİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Müh. Onur DOĞAN**

**Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği**

**Programı: Ulaştırma Mühendisliği**

**Tez Danışmanı: Y. Doç. Dr. Murat ERGÜN**

**MAYIS 2006**

**ESNEK ÜSTYAPILI DEVLET YOLLARINDAKİ  
BOZULMALARIN BULANIK MANTIK İLE  
TAHMİNİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İnş. Müh. Onur DOĞAN  
(501031425)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 8 Mayıs 2006  
Tezin Savunulduğu Tarih : 15 Haziran 2006**

**Tez Danışmanı : Y. Doç.Dr. Murat ERGÜN  
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Zekai ŞEN (İ.T.Ü.)  
Y. Doç.Dr. Halit ÖZEN (Y.T.Ü.)**

**MAYIS 2006**

## **ÖNSÖZ**

Esnek üstyapılı devlet yollarının üstyapı performansının bir göstergesi olan Sürüş Sayısı'nın (RN), trafik yükleri ve çevre faktörleri (sıcaklık ve yağış parametreleri) yardımıyla, bulanık mantık tabanlı bir model ile tahminidir.

Bu konuda çalışma olanağı sağlayan ve beni destekleyen sayın hocam Y. Doç. Dr. Murat ERGÜN' e, çalışmakta olduğum Plan Yapı Denetim Ltd. Şti' nde bana yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu konu ile ilgili çalışmaların faydalı olmasını dilerim.

**İSTANBUL 2006**

**Onur DOĞAN**

## İÇİNDEKİLER

|   |             |
|---|-------------|
| <b>ÖNSÖZ</b>  | <b>ii</b>   |
| <b>KISALTMALAR</b>  | <b>vi</b>   |
| <b>TABLO LİSTESİ</b>  | <b>vii</b>  |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b>  | <b>viii</b> |
| <b>SEMBOL LİSTESİ</b>   | <b>x</b>    |
| <b>ÖZET</b>   | <b>xi</b>   |
| <b>SUMMARY</b>  | <b>xii</b>  |
| <b>1. GİRİŞ</b>   | <b>1</b>    |
| <b>2. KARAYOLU ÜSTYAPILARINDA OLUŞAN BOZULMALAR, NEDENLERİ VE ONARIM YÖNTEMLERİ</b> | <b>5</b>    |
| 2.1. Bozulma Etkenleri  | 6           |
| 2.1.1. Tasarım hataları   | 6           |
| 2.1.2. Yapım hataları   | 7           |
| 2.1.3. Bakım hataları   | 7           |
| 2.1.4. Çevre ve iklim şartları  | 8           |
| 2.1.5. Trafik etkileri  | 8           |
| 2.2. Yol Üstyapısında Meydana Gelen Bozulmalar ve Onarım Yöntemleri                 | 10          |
| 2.2.1. Çatlaklar  | 10          |
| 2.2.1.1. Timsah sırtı çatlaklar   | 10          |
| 2.2.1.2. Kenar çatlakları   | 11          |
| 2.2.1.3. Enine çatlaklar  | 13          |
| 2.2.1.4. Boyuna çatlaklar   | 14          |
| 2.2.1.5. Blok (harita) çatlaklar  | 15          |
| 2.2.2. Oturmalar  | 16          |
| 2.2.2.1. Tekerlek izinde oturmalar  | 16          |
| 2.2.2.2. Lokal oturmalar  | 18          |
| 2.2.3. Bombelikler  | 19          |
| 2.2.4. Çukurlar   | 20          |
| 2.2.5. Ayırışma, sökölme ve soyulma   | 22          |
| <b>3. ESNEK YOL ÜSTYAPI YÖNETİM SİSTEMLERİ</b>                                      | <b>23</b>   |
| 3.1. Karayolu Esnek Üstyapı Durumlarının Değerlendirilmesi                          | 24          |
| 3.1.1. Üstyapı durum değerlendirmesi ile genel bilgi                                | 24          |
| 3.1.2. Üstyapı bozulmalarını belirleme yöntemleri                                   | 25          |
| 3.1.2.1. Fotoğrafik gözlem yöntemleri   | 26          |
| 3.1.2.2. Optik gözlem   | 26          |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.1.2.3 Bozulmaların ölçülmesi                                     | 27        |
| 3.2. Bakım İçin Öncelik ve Gereksinimin Değerlendirilmesi          | 30        |
| 3.2.1. Bir değerlendirme sistemi geliştirme                        | 30        |
| 3.2.2. Önceliklerin saptanması                                     | 32        |
| 3.3. Yol Üstyapı İşletim Sisteminin Yapısı ve İşletim Özellikleri  | 32        |
| 3.4. Yol Üstyapı Bakım İşletim Sistemlerinde Veri Tabanı Kullanımı | 34        |
| 3.4.1. Veri bankası verilerin referanslanması                      | 34        |
| 3.4.2. ÜYS için hazırlanan bir veri bankasında veri içerikleri     | 35        |
| 3.4.3. Veri bankasında çıktı ortamı                                | 35        |
| <b>4. ÜSTYAPI PERFORMANS TAHMİN YÖNTEMLERİ</b>                     | <b>37</b> |
| 4.1. Doğrusal Azalan Tahmin Modeli                                 | 38        |
| 4.2. Çoklu Regresyon Modeli  | 38        |
| 4.3. Mekanistik-Ampirik Model                                      | 40        |
| 4.4. En Küçük Kareler Yöntemi ile Polinom Modeli                   | 41        |
| 4.5. S Şekilli (Logit) Eğriler                                     | 41        |
| 4.6. Olasılık Dağılımı   | 42        |
| 4.7. Yapay Zeka Modelleri  | 42        |
| <b>5. BULANIK MANTIK</b>   | <b>44</b> |
| 5.1. Belirsizlik Kavramları  | 44        |
| 5.2. Belirsizlik ve Kesin Olmayış                                  | 46        |
| 5.3. Belirsizlik Yöntemleri  | 48        |
| 5.4. Bulanık Kümeler ve Üyelik Dereceleri                          | 50        |
| 5.5. Bulanık Sistem Ne Demektir?                                   | 52        |
| 5.6. Üyelik Fonksiyonları  | 58        |
| 5.6.1. Üyelik fonksiyonunun kısımları                              | 61        |
| 5.7. Bulanıklaştırma   | 64        |
| 5.8. Durulaştırma  | 65        |
| 5.9. Üyelik Derecesi Ataması                                       | 67        |
| 5.10. Bulanık Mantık Yöntemleri                                    | 67        |
| 5.10.1. Mamdani bulanık mantık çözümlemesi                         | 67        |
| 5.10.2. Takagi-Sugeno bulanık mantık çözümlemesi                   | 70        |
| 5.11. Küme Tahmini Üzerine Kurulu Bulanık Model Tanımlaması        | 72        |
| 5.11.1. Küme tahmini   | 74        |
| 5.11.2. Model seçimi ve tanımlaması                                | 76        |
| <b>6. BULANIK MANTIK YÖNTEMİYLE MODELLEME</b>                      | <b>82</b> |
| 6.1. Bulanık Mantık Modelinde Kullanılan Parametreler              | 83        |
| 6.2. Bulanık Modelde Kullanılan Yol Kesimlerine Ait Veriler        | 84        |

|  |           |
|--|-----------|
| 6.3. Bulanık Model                     | 88        |
| 6.4. Parametre Etkisinin Araştırılması | 92        |
| <b>7. SONUÇ</b>                        | <b>97</b> |
| <b>KAYNAKLAR</b>                       | <b>98</b> |
| <br>                                   |           |
| <b>EKLER</b>                           |           |
| <br>                                   |           |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b>                        | <b>99</b> |

## KISALTMALAR

|                            |  |
|----------------------------|--|
| <b>KGM</b>                 | : Karayolları Genel Müdürlüğü                              |
| <b>RN</b>                  | : Sürüş Sayısı   |
| <b>YOGT</b>                | : Yıllık Ortalama Günlük Trafik                            |
| <b>YESDYS</b>              | : Yığılımlı Eşdeğer Standart Dingil Yüğü Sayısı            |
| <b>RMSE</b>                | : Ortalama Karekök Hatası                                  |
| <b>AADT</b>                | : Yıllık Ortalama Günlük Trafik                            |
| <b>TCK</b>                 | : Türkiye Cumhuriyeti Karayolları                          |
| <b>ÜYS</b>                 | : Üstyapı Yönetim Sistemi                                  |
| <b>AASHTO</b><br>Officials | : American Association of State Highway and Transportation |
| <b>IRI</b>                 | : Uluslararası Pürüzlülük İndeksi                          |
| <b>EDYS</b>                | : Eşdeğer Dingil Yüğü Sayısı                               |
| <b>PSI</b>                 | : Şimdiki Hizmet Göstergesi                                |
| <b>YSA</b>                 | : Yapay Sinir Ağı  |
| <b>FCM</b>                 | : Fuzzy C Means  |
| <b>YOY</b>                 | : Yıllık Ortalama Yağış Miktarı                            |
| <b>YOS</b>                 | : Yıllık Ortalama Sıcaklık Değeri                          |
| <b>YO<sub>max</sub></b>    | : Yıllık Ortalama En Büyük Sıcaklık                        |
| <b>YO<sub>min</sub></b>    | : Yıllık Ortalama En Düşük Sıcaklık                        |

## TABLO LİSTESİ

|  | <u>Sayfa No</u> |
|--|-----------------|
| <b>Tablo 2.1.</b> Çeşitli ülke standartlarında yer alan dingil yükleri ve toplam taşıt ağırlıkları ile ilgili sınırlar ..... | 9               |
| <b>Tablo 3.1.</b> Üstyapıların yüzey durumlarını kaydetme örnekleri .....  | 26              |
| <b>Tablo 3.2.</b> Ontario’da sökölme belirlemek için kullanılan şiddet düzeyleri ....  | 28              |
| <b>Tablo 3.3.</b> Ontario’da sökölme miktarını belirlemek için kullanılan yoğunluk sınıfları .....                           | 28              |
| <b>Tablo 3.4.</b> Belirli bozulmaların genel önemlerini saptamak .....   | 29              |
| <b>Tablo 3.5.</b> Üstyapı durumuna göre değerlendirme sayısı .....   | 29              |
| <b>Tablo 3.6.</b> ÜYS için hazırlanan bir veri bankasında veri içerikleri .....  | 35              |
| <b>Tablo 4.1.</b> Farklı üstyapı tipleri için performans eğrisi örnekleri.....   | 40              |
| <b>Tablo 6.1.</b> Taşıt eşdeğerlik faktörleri .....  | 83              |
| <b>Tablo 6.2.</b> Programa verilecek eğitim değerleri .....  | 86              |
| <b>Tablo 6.3.</b> RN değeri hesaplanacak olan veriler.....   | 87              |
| <b>Tablo 6.4.</b> İlişki matrisi .....   | 88              |
| <b>Tablo 6.5</b> Tahmin Edilen ve Ölçülen RN Değerleri ile Sistemin Hatası.....  | 90              |

## ŞEKİL LİSTESİ

|  | <u>Sayfa No</u> |
|--|-----------------|
| Şekil 1.1 : Karayolu ağında yol tipleri .....                                  | 3               |
| Şekil 2.1 : Orta şiddette timsah sırtı çatlak .....                            | 11              |
| Şekil 2.2 : Orta şiddette kenar çatlağı .....                                  | 12              |
| Şekil 2.3 : Yüksek şiddette enine çatlak .....                                 | 13              |
| Şekil 2.4 : Yüksek şiddette boyuna çatlak .....                                | 14              |
| Şekil 2.5 : Orta şiddetli blok çatlaklar .....                                 | 15              |
| Şekil 2.6 : Yüksek şiddetli blok çatlaklar .....                               | 16              |
| Şekil 2.7 : Tekerlek izinde oturma .....                                       | 17              |
| Şekil 2.8 : Orta şiddetli tekerlek izinde oturma .....                         | 17              |
| Şekil 2.9 : Yüksek şiddette tekerlek izinde oturmalar .....                    | 18              |
| Şekil 2.10 : Yüksek şiddette yerel oturmalar .....                             | 19              |
| Şekil 2.11 : Orta şiddette salınım .....                                       | 20              |
| Şekil 2.12 : Orta şiddette çukur .....   | 21              |
| Şekil 2.13 : Yüksek şiddette çukur .....                                       | 21              |
| Şekil 2.14 : Orta şiddette ayrışma .....                                       | 22              |
| Şekil 3.1 : Farklı bozulma ve müdahale düzeyleri arasındaki ilişki .....       | 31              |
| Şekil 3.2 : Üstyapı yönetim sistemi çalışma şeması .....                       | 33              |
| Şekil 4.1 : Üstyapının performans eğrisi ve iyileştirme seçeneklerinin etkisi  | 37              |
| Şekil 4.2 : Doğrusal azalan tahmin modeli .....                                | 38              |
| Şekil 4.3 : S şekilli eğriler .....  | 41              |
| Şekil 4.4 : Üstyapı yaşının farklı noktalarında yığışımlı yoğunluk eğrisi .... | 42              |
| Şekil 5.1 : Üyelik derecesi fonksiyonları (a) klasik küme, (b) bulanık küme    | 51              |
| Şekil 5.2 : (a) Geometrik şekiller (b) müphem terimler .....                   | 51              |
| Şekil 5.3 : Klasik sistem .....  | 55              |
| Şekil 5.4 : Genel bulanık sistem .....   | 55              |
| Şekil 5.5 : TSK bulanık sistemi .....  | 57              |
| Şekil 5.6 : Bulanıklaştırma-Durulaştırma birimli sistem .....                  | 58              |
| Şekil 5.7 : Bitişik üçgen gösterimi .....                                      | 59              |
| Şekil 5.8 : Örtüşmeli üçgen gösterimi .....                                    | 60              |
| Şekil 5.9 : Bulanık küme .....   | 60              |
| Şekil 5.10 : Yamuk ve çan eğrisi üyelik fonksiyonları .....                    | 61              |
| Şekil 5.11 : Üyelik fonksiyonu kısımları .....                                 | 61              |
| Şekil 5.12 : Bulanık kümeler (a)normal (b) normal olmayan .....                | 62              |
| Şekil 5.13 : Bulanık kümeler (a) dış bükey (b) dış bükey olmayan .....         | 63              |
| Şekil 5.14 : Dış bükey bulanık kümelerin kesişimi .....                        | 63              |
| Şekil 5.15 : Hassaslık (a) bulanık (b) klasik .....                            | 65              |
| Şekil 5.16 : Sıcaklık bulanık alt kümeleri .....                               | 66              |
| Şekil 5.17 : Dilsel değişkenler, sıcaklık .....                                | 67              |
| Şekil 5.18 : Dile ait değişkenler “sıcaklıktaki değişim” .....                 | 68              |
| Şekil 5.19 : Dilsel durum uzayı .....  | 68              |

|                   |   |    |
|-------------------|---|----|
| <b>Şekil 5.20</b> | : Birkaç durulaştırma metodu .....  | 69 |
| <b>Şekil 5.21</b> | : Adımda Mamdani tipi kontrolün gösterimi .....   | 69 |
| <b>Şekil 5.22</b> | : Birinci dereceden Sugeno tipi modelin girdi değişkenleri ile<br>çıkı değişkenleri arasındaki ilişki ..... | 71 |
| <b>Şekil 5.23</b> | : Birinci dereceden Sugeno tipi modelin girdi ve çıkı<br>değişkenleri arasındaki ilişki .....               | 71 |
| <b>Şekil 5.24</b> | : Beş adımda Sugeno tipi kontrolörün gösterimi .....  | 71 |
| <b>Şekil 6.1</b>  | : Sistemin çalışma şeması.....  | 91 |
| <b>Şekil 6.2</b>  | : Tahmin edilen değerler ile ölçülen değerlerin karşılaştırılması...  | 91 |
| <b>Şekil 6.3</b>  | : Veri sayısı ve sistem hatası.....   | 93 |
| <b>Şekil 6.4</b>  | : Tahmin edilen değerler ile ölçülen değerlerin karşılaştırılması<br>(YESDYS).....                          | 93 |
| <b>Şekil 6.5</b>  | : Tahmin edilen değerler ile ölçülen değerlerin karşılaştırılması...<br>(Kalınlık)                          | 94 |
| <b>Şekil 6.6</b>  | : Tahmin edilen değerler ile ölçülen değerlerin karşılaştırılması<br>(YOY)                                  | 94 |
| <b>Şekil 6.7</b>  | : Tahmin edilen ve ölçülen değerlerin karşılaştırılması<br>(YOS).....                                       | 95 |
| <b>Şekil 6.8</b>  | : Tahmin edilen değerler ile ölçülen değerlerin karşılaştırılması<br>(YSmax).....                           | 95 |
| <b>Şekil 6.9</b>  | : Tahmin edilen ve ölçülen değerlerin karşılaştırılması<br>(YSmin).....                                     | 96 |
| <b>Şekil 6.10</b> | : Duyarlık analiz sonuçları.....  | 96 |

## SEMBOL LİSTESİ

|                        |  |
|------------------------|--|
| <b>QI</b>              | : Düzgünsüzlük (tekrar/km)                             |
| <b>YAŞ</b>             | : Üstyapının yaşı (yıl)                                |
| <b>ST</b>              | : Yüzey durumu   |
| <b>RH</b>              | : İyileştirme durum göstergesi                         |
| <b>SENI</b>            | : Asfalt tabakanın altındaki şekil değiştirme enerjisi |
| <b>N</b>               | : Yığılımlı tek yükü eşdeğeri                          |
| <b>CR</b>              | : Üstyapı çatlak alanı yüzdesi                         |
| <b>HST</b>             | : Asfalt tabakanın altındaki yatay gerilme             |
| <b>RCI</b>             | : Herhangi bir YAŞ'ta sürüş konforu indeksi            |
| <b>RCI<sub>B</sub></b> | : Bir önceki RCI                                       |
| <b>PCR</b>             | : Üstyapı durum oranlaması                             |
| <b>C</b>               | : 100  |
| <b>M</b>               | : Eğim katsayısı                                       |
| <b>A</b>               | : Üstyapının yaşı                                      |
| <b>e</b>               | : Birim şekil değiştirme                               |
| <b>μ<sub>ik</sub></b>  | : Üyelik derecesi                                      |
| <b>X<sub>k</sub></b>   | : Küme merkezi   |
| <b>€</b>               | : Kabul edilecek potansiyel sınır değeri               |

## ÖZET

Bu çalışmanın amacı, Türkiye devlet karayollarındaki bozulmaların bulanık mantık yöntemiyle önceden tahminidir. Bu amacı gerçekleştirmek için, Devlet Karayollarında değişik yıllarda yapılan ve bozulmaları temsil eden Sürüş Sayısı (Ride Number-RN) değerleri, Karayolları Genel Müdürlüğü'nden (KGM) alınmıştır. Bu verilere ek olarak, KGM' den bozulma ölçümü yapılan yolların, 1992-2002 yılları arasında, trafik hacim değerleri (Otomobil, Otobüs, Kamyon ve TIR Yıllık Ortalama Günlük Trafik (Y.O.G.T.)), toplam kaplama kalınlıkları, bakım yapılmış ise bakım yılı değerleri, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden, yolların geçtiği illerin, Yıllık Ortalama Sıcaklık, Yıllık Ortalama En Yüksek Sıcaklık, Yıllık Ortalama En Düşük Sıcaklık, Yıllık Yağış Miktarı elde edilecektir. Bu değerler alındıktan sonra, trafik hacim değerleri, üstyapı tasarımında üstyapı bozulmasında ana faktör olarak tanımladığımız, yığışımlı eşdeğer standart dingil yükü sayısına (YESDYS) çevrilecektir. Çalışmanın devamında, karışık problemlerin çözümü için günümüzde sıklıkla kullanılmaya başlanan uzman sistem çözümlerinden, bulanık mantık yöntemi anlatılmıştır. Bulanık mantık yöntemi kullanılarak, MATLAB ortamında program yazılarak, yukarıda belirtilen tüm parametreler kullanılmış ve devlet karayollarındaki bozulmaları tahmin eden bir bulanık model elde edilmiştir. Modelin değerlendirilmesi için ortalama karekök hatası (Root Mean Squared Error- RMSE) kullanılarak, modelin etkinliği ve bu modelin kullanılması ile elde edilecek yararlar belirtilmiştir.

## **SUMMARY**

The main aim of this study is to estimate asphalt concrete distresses on the national highways of Turkey, with the help of fuzzy logic approach. To reach this aim, the main cause of distresses on the asphalt concrete and type of distresses are going to explain at the beginning of this study. Then, the measured Ride Number (RN) values which represent the level of distresses on the national highway network of Turkey will be gathered from General Directorate of Turkish Highways for between the year 1992 and 2002. Then, in addition to this data, the annually average daily traffic volumes (AADT) (for car, truck, bus and trailer separately) of distressed roads, the total thickness of distressed roads, the maintenance year for distressed roads if they maintained from General Directorate of Turkish Highways, and the annually average high temperature, the annually average temperature, the annually average low temperature, and average annually perception form Turkish State Meteorological Service will be taken for making analysis and developing distresses model. Then, the traffic volumes will be converted to the Total Equivalent Standard Axle Load to make analysis. In addition, Fuzzy logic approach, one of the expert system, became very popular tools to solve complex problems will be explained. Then, the program for estimation of asphalt concrete road distresses, using all parameters explained above written in MATLAB Fuzzy Logic toolbox will be explained. This model result will be evaluated by Root Mean squared Error (RMSE). Finally, the effectiveness and advantage of the model for asphalt concrete distresses with the help of fuzzy logic will be clarified. And, the potential uses of this model for the National Highways will be emphasized.

## 1. GİRİŞ

Karayolu ağında, yakın zamana kadar yapımı tamamlanarak hizmete açılmış olan yollarımızın çoğu, öncelikle ulaşılabilirliği amaçladıklarından ve yapıldıkları dönemlerin trafik hacimlerine göre projelendirildikleri için, bugünün artan trafiği, özellikle ağır taşıt trafiği nedeniyle daha çabuk bozulmaktadırlar. Diğer yandan, yoldan geçen taşıtların dingil ağırlıklarına, bu ağırlıkların tekrar ve dağılımlarına göre projelendirilmektedir. 1980 yılına kadar 8 ton olarak belirlenmiş olan nizami tek dingil yükü, transit taşımalardaki artışlar nedeniyle ve Avrupa ülkeleri ile uyum sağlamak üzere, önce 10 ve daha sonra da 13 ton'a çıkarılmış ve şu an 11,5 tona indirilmiştir. Böylece, daha hafif yükler için projelendirilmiş olan yollarımız giderek çok ağır yükler altında kalmakta, yol temelleri ve üstyapıları bu yükü taşıyamaz hale gelmektedir. Ayrıca, bütün dünyada hakimiyetini sürdüren enerji krizi sonucu olarak inşaat sektöründe ortaya çıkan yüksek maliyetler, yüksek enflasyon oranları, bütün ülkeleri yeni karayolu yapımından çok, giderek artan ağır yükler altında kalan mevcut altyapıyı korumayı ve hizmette tutmayı amaçlayan takviye ve bakım önlemlerini ön plana almaya zorlamaktadır. Bu bakımdan, bir yandan mevcudu korumak için çaba harcanırken, diğer yandan mevcut geometrik standartlardan geniş ölçüde yararlanmak suretiyle, yolların fiziki standartlarını artırıcı çalışmalara ağırlık vermek gereği ortaya çıkmaktadır. (İTÜ, 2004)

Bugün karayolu ağımızda mevcut asfalt üstyapılı yolların %90'ı (otoyollar hariç), çeşitli nedenlerle bitümlü yüzeysel (sathi) kaplama olarak yapılabilmektedir. Ülkemizde böylesine yaygın olarak kullanılan bitümlü yüzeysel kaplamalar, batı ülkelerinde, taşıyıcı özelliklerinden çok, stabilize yolların üzerini geçirimsiz bir tabaka ile örtmek (drenaj), yolculuk konforu sağlamak, çevreyi tozdan korumak ve kaymaları önleyici pürüzlü bir yüzey elde etmek gibi amaçlar doğrultusunda kullanılmaktadırlar. Buna karşılık, bitümlü sıcak karışım (asfalt betonu) üstyapılar, artan yükler altında en uygun taşıyıcı tabaka olarak yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. Bir yolda trafik yüklerini taşıyan kısım üstyapıdır. Dingil yüklerinden üstyapıya gelen gerilmeler, yol üst yüzeyindeki asfalt kaplamada en yüksek olup, alt tabakalara inildikçe azalır.

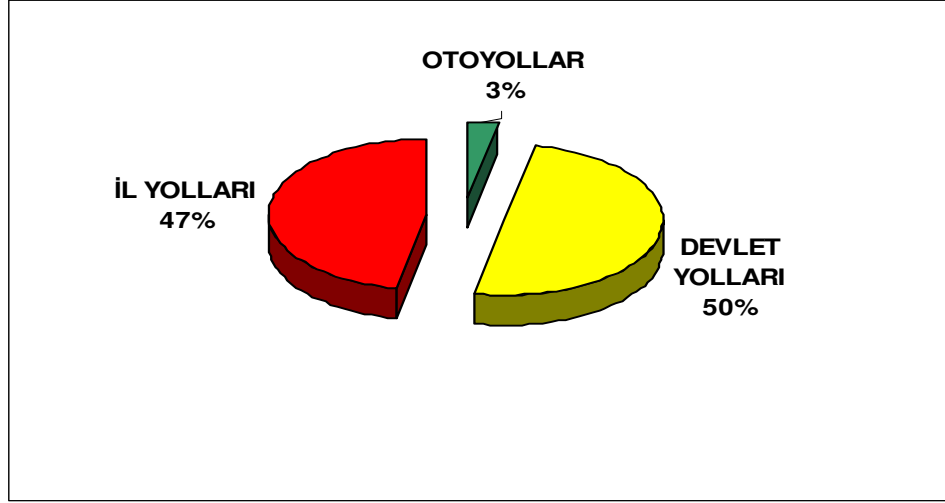
Bu nedenle, bir üstyapıda aşağıdaki tabakalardan, yukarıdaki tabakalara doğru malzeme kalitesi iyileşmektedir. Bu açıdan bakıldığında, ağır trafik yükü alan yolların, sık sık bozulan ve yenilenmeye gereksinim gösteren yüzeysel kaplamalar yerine, yalnızca rutin bakım yapılarak proje ömrü boyunca hizmette kalabilen bitümlü sıcak karışım ile kaplanmaları daha uygun olmaktadır.

Ülkemizdeki ağır trafik yükü olan yolların büyük bir kısmında taşıma gücü yetersizliği bulunmaktadır. Bu nedenlere ek olarak, ülkemiz taşıt trafiğinde özel otomobil oranının çok düşük, buna karşılık ticari taşıt oranının çok yüksek olması da etkilidir.

Günümüzde gelişmiş ülkelerde toplam trafiğin yalnızca %10-20'sinin ağır taşıtlardan oluşmasına karşılık, ülkemizde bu oran yaklaşık %50 olup, birçok yolda %70'e kadar çıkabilmektedir. Türkiye'de yeteri kadar ağırlık kontrolü yapılamadığından ve genellikle aşırı yüklemelere gidildiğinden, ülkemizdeki her bir ticari taşıtın, gelişmiş ülkelerdeki her bir ticari taşıta göre yola verdiği zarar fazladır.

Ülkemiz yol ağının, otoyollar dışında kalan ve büyük bir kısmı 8 ton dingil yüküne göre projelendirilmiş bulunan kısmının önemli bir bölümü 20 yıllık ekonomik ömürlerini tamamlamış bulunmaktadır. Bu nedenlerle, yeni yol inşasından çok, mevcut yollarımızın fiziksel özelliklerini iyileştirme projelerine öncelik vermek gerekli ve kaçınılmaz olmaktadır.

Karayolları Genel Müdürlüğü'nün (KGM) istatistiklerine göre 2003 yılı itibariyle karayolu ağının toplam uzunluğu Otoyol, Devlet Yolları ve İl Yolları olmak üzere, 63.219 km.'dir. Karayolu ağının % 3'ünü Otoyollar, %50'sini Devlet Yolları, %47'sini İl Yolları oluşturmaktadır (Şekil 1.1). Bu yolların bakımı ve iyileştirilmeleri, Türkiye'de güvenli ve ekonomik karayolu ulaşımı sağlanması amacıyla kurulmuş olan Karayolları Genel Müdürlüğü'nün sorumluluğu altındadır. (İTÜ, 2004)



Şekil 1.1 Karayolu Ağında Yol Tiplerinin Dağılımı

Söz konusu yol ağının bakım ve iyileştirme harcamaları, yeni devlet yolları ve otoyolların eklenmesiyle sürekli büyümekte ve önemli yönetim sorunları oluşturmaktadırlar. Bu problem, birçok yolun hızla bozulmasına ve ağır ticari trafik artışı ile birleşince, yeni olanaklara ve mevcut yolların bakım ve iyileştirilmelerine duyulan gereksinimi arttırmaktadır.

Türkiye’de hükümetler KGM’ nin güvenli ve ekonomik ulaşım sağlama çalışmalarına destek olmaktadır. Ancak, son yıllarda dünyadaki ekonomik güçlükler, artan talepler ve Türkiye’nin gerçekleştirdiği hızlı kalkınma çabaları nedeniyle kaynakların sınırlandırılması sonucu, devlet ve il yolları ağına harcanması gereken KGM bütçe talepleri karşılanamamaktadır. Aslında KGM bütçesinin genel bütçe içinde oranı sürekli azalmış ve % 1,8 düzeyine kadar inmiştir.

Bu tür idari ve mali zorluklardan dolayı, KGM, olanaklarını, kuruluşun yönetimini ve işleyişini geliştirme girişimlerinde bulunmaktadır. Bunun en belirgin örneği, KGM bünyesindeki karayolu ağı için üstyapı yönetim sistemi projesinin geliştirilmesi ve gerçekleştirilmesi çalışmalarına başlanmasıdır.

KGM, 2004 yılında karayolu ağında yer alan yaklaşık 6.000 km. uzunlukta bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplamalı yolda üstyapı yönetim sistemi (ÜYS) uygulamasına başlamıştır. İyi bir üstyapı yönetim sistemi mevcut yol ağının incelenmesi, durumunun değerlendirilmesi ile başlamaktadır. Bu çalışmalar sonucunda toplanan veriler değerlendirilerek, hangi bakım ve iyileştirme uygulamasına ihtiyaç

duyulduğuna karar verilmektedir. Bunun yapılabilmesi için karayolu ağında düzenli düzgünlük ölçümleri yapılmalıdır.

Ülkemizdeki karayolu ağının büyüklüğü göz önüne alındığında, bu ölçümlerin yapılmasında bazı aksaklıkların yaşanması kaçınılmazdır. Bu zorlukların aşılması amacıyla, üstyapı yönetim sisteminin bir parçası olan performans tahmin yöntemleri kullanılmaktadır. Geçmişte yapılan ölçümler kullanılarak, geleceğe yönelik yol üstyapı performansı tahmin edilmektedir.

Bu çalışmada, üstyapı yönetim sistemi uygulaması amacıyla, asfalt betonu kaplamalı devlet yollarında, üstyapı performansının bir göstergesi olan sürüş sayısı (RN)'nin tahminine yönelik modelleme yapılmıştır. Bu modelde, son yıllarda hayatımızın birçok alanında yerini alan, bulanık mantık modelinden yararlanılmıştır. KGM' den alınan trafik bilgileri, kaplama kalınlıkları ve sıcaklık parametreleri kullanılarak sürüş sayısı tahmin edilmiştir.

## 2. ÜSTYAPI BOZULMALARI, NEDENLERİ VE ONARIM YÖNTEMLERİ

Yollar yeni inşa edildiklerinde iyi durumdadırlar. Trafik yükleri ve iklim koşulları nedeniyle zamanla bozulurlar. Bu bozulmalar, başlangıçta çok yavaş olduğu için yolun servis seviyesini koruyabilmek için sadece periyodik bakıma ihtiyaç gösterirler. Süre ilerleyip zamanında bakım ve iyileştirme yapılmazsa, bozulmalar artarak çok pahalı bakım ve iyileştirme seçeneklerine gereksinim gösterirler. Bu nedenle bozulmaya başlamış yollarda, zamanında yapılmış bakım programları, en fazla kazancı sağlar.(Güzel, 2001)

Yapılacak bakım programları, üstyapının sağlıklı değerlendirilmesi ile başlar. Bu amaçla bozulmaya yüz tutan yolların yapısal dayanımının, yüzey bozukluklarının ve üstyapı tabakalarının fiziksel özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Genellikle etütler sonucunda toplanan verilerle analizler yapılır ve üstyapı takviye kalınlıkları belirlenir. Genel olarak, esnek üstyapılardaki bozuklukların gruplandırılması şu şekildedir;

- a) Çatlaklar, oturmalar, bombelikler
- b) Çukurlar
- c) Ayrışma, sökülme ve soyulmadır.

Üstyapı bozulması daha öncede tarif edildiği gibi, bir üstyapının tasarım süresi sonunda trafik yükleri ve çevresel etkiler sonucunda düşmesi beklenen hizmet yeteneğinin bir derecesidir. Üstyapı bozulmalarında, öncelikle bozulma nedenlerinin araştırılması gerekir. Bunun içinde iyi bir yol değerlendirme çalışması dahilinde karayolu ağının durumu ve yol bozulmalarının iyi incelenmesi şarttır. Bozulmaya neden olan etkenler tespit edilip, yok edildikten sonra yapılacak bakım ve onarım çalışmaları sayesinde, ileride tekrarlanabilecek olan bozulmalar da önlenmiş olacaktır.

Türkiye şartlarında, tasarım metodunun ve malzemenin yanlış seçimi, trafiğin öngörülenden hızlı artışı, iklimsel şartlarının ağırlığı, yol bakımı sırasındaki projeye ve tekniğe uygun oluşturmayan yapımlar, bakım biriminin daha az etkin çalışması ve diğer birimler ile koordinasyon eksiklikleri, başlıca bozulma nedenleridir.

Bir yolun hizmet ömrünü uzatmanın veya ekonomik ömrü içerisinde ondan ekonomik bir şekilde faydalanmanın tek çözümü, gerekli düzeyde devamlı bakım yaparken, yol üstyapısının dayanımını gerekirse onarım çabalarıyla yükseltmektir.

Yol bozulmalarının giderilmesi, ancak bozulma nedenlerinin iyice anlaşılmasına bağlıdır. Aksi takdirde, nedeni anlaşılmayan veya yanlış anlaşılan bozuklukların bakım ve onarım hizmetleri, mevcut aksaklıkları gidermekten uzak kalacaktır.

Yol sonsuz uzunlukta bir yapı olduğuna göre, yol boyunca bozulmaya etki eden faktörler devamlı değişim göstermekte, şartnamesine uygun inşa edilse de mevcut zemin yapısı, nem oranı, iklim, trafik miktarları, farklı dingil yükleri gibi faktörler yolu etkilemektedir. Böylece, sayısız aksaklıklar yüzeyde kendini gösterirken, kullanıcıları tarafından bu bozukluklar gözlenmekte ve kullanıcılar bunların giderilmesi konusunda kamuoyu ile baskı unsuru oluşturmaktadır.

Genel olarak, yol üstyapısında meydana gelen bozulmalar, fonksiyonel bozulma ve yapısal bozulma olmak üzere iki türlü olarak tanımlanır. Fonksiyonel bozulmada, üstyapı için amaçlanan fonksiyonlar yavaş yavaş yerine getirilemez. Yapısal bozulma ise, üstyapı bileşenlerinin bir veya birkaçının kırılmasını, göçmesini veya bozulmasını belirtir.(Güzel, 2001)

## **2.1 Bozulmaya Yol Açan Etkenler**

Yol esnek üstyapısında, çeşitli nedenlerle meydana gelen bozulmaların etkenleri, aşağıda ana başlıklar altında sınıflandırılıp belirtilmiştir. Bunlar genelde tasarım hataları, yapım hataları, bakım hataları, çevre şartları, iklim şartları ve trafik etkilerinden kaynaklanmaktadır.

### **2.1.1 Tasarım Hataları**

Taban zemini etütlerinin yeterince sağlıklı yapılmaması, büyük boyutlu yarma ve dolguların oluşturulması, şevlerin dik kesilmesi, hendeklerin ve sanat yapılarının uygun yer ve boyutta yapılmaması, büz ve menfez üstlerinde yeterli dolgu boyu bırakılmaması, üstyapı projelendirilmesinde trafik ve çevresel etkilerde yapılan yanlış hesaplamalar sonucu meydana gelen bozulmalardır.(Güzel, 2001)

### **2.1.2 Yapım Hataları**

Taşıma gücü zayıf zemin iyileştirilmeden yol gövdesinin oluşturulması, uygun dolgu malzemesi seçilmemesi, drenaj sisteminin yetersiz olması, asfalt tabaka kalınlıklarının şartnameye göre yapılmaması, kaplama malzemesi olarak kullanılan agrega ve bitümlü malzemenin yanlış seçimi ve kalite eksiklikleri, yetersiz yada aşırı sıkıştırma, düşük hava sıcaklığında veya yağışlı havada bitümlü karışım imalatı, kalitesiz işçilik, yapım hataları olarak sayılabilir.

Üstyapı tabakalarında oluşabilecek bozulmaların sebepleri; yukarıda belirtildiği gibi kötü malzeme kullanımı, sıkıştırmanın uygun şekilde yapılmaması, yapım sırasında hava sıcaklığının istenilen düzeyde olmaması olarak sayılabilir. Yüzeysel kaplamada ya da asfalt betonu kaplamada kullanılacak agreganın temiz, sağlam ve şartnameye uygun granülometriye sahip olması gerekir. İyi seçilmemiş veya kontrol edilmemiş granülometrilili, çürük, kirli, çabuk cilalanan ve yüksek oranda yuvarlak agrega içeren malzemeler kullanılmamalıdır. Bitümlü bağlayıcı gerekli oranlarda kullanılmalı, gerekenden az ya da fazla kullanılmamalıdır. Asfalt betonu kaplamalar için filler yüzdesinin yetersiz ya da fazla olmamasına, yetersiz karıştırma yapılmamasına dikkat edilmelidir. Ayrıca, aşırı derece veya yetersiz sıkıştırma, astar veya yapıştırma tabakalarının gerekli özenle yapılmaması, asfalt betonu kaplamalar içinde serme ve sıkıştırma sıcaklıklarının düşük olması, yapım sırasında karışımın ayrışmaya uğraması, genel yapım hataları olarak sınıflandırılabilir.(Güzel, 2001)

### **2.1.3 Bakım Hataları**

Yol gövdesi, kaplama, sanat yapıları, drenaj ve diğer tesisleri zaman içerisinde işlevini yitirmeye başlar başlamaz, bunların bakım ve onarımlarındaki gecikmeler yüzünden oluşan hatalar ve uygun yapılmayan kar ve buz mücadeleleridir.

Karayolları kenarlarında bulunan banketlerin bakımı, trafik emniyeti ve üstyapının ömrü yönünden önem arz eder. Bu bakımdan banketlerin daima düzgün ve sert bir yüzey olarak korunması gerekir. Banket bakımının ihmal edildiği yollarda, kaplama ile banket yüzey sularının dış ortama akmayışı nedeniyle birbirinden ayrılır ve kaplama kenardan ortaya doğru süratle bozulmaya başlar. Bütün drenaj sistemleri, hendek ve kanallar, sanat yapıları sürekli kontrol edilmeli, eğer kanallar, drenaj boruları veya menfezler çeşitli sürüntü maddeleriyle tıkanmış ise temizlenmelidir.

Kışın meydana gelen kar yağışı ve buzlanma, trafiğin güvenli ve hızlı seyretmesini engeller. Bu nedenle, yapılan bakım işlemlerindeki yanlış eylemler kaplamaya zarar verebilmektedir. Kar ve buz ile mücadelede tuz gereğinden fazla uygulanırsa, kaplamanın bozulmasına neden olabilirler.(Güzel, 2001)

#### **2.1.4 Çevre ve İklim Şartları**

Bitümlü bağlayıcıların viskoziteleri sıcaklığa doğrudan bağlıdır. Kışın agreganın bağlayıcıya yapışabilmesini sağlamak için, çok düşük viskoziteli bağlayıcı kullanıldığında, ilkbaharda sıcaklık yükselince, yumuşama sonucu üstyapının bozulması kaçınılmaz olacaktır.

Don etkisi olan bölgelerde, yol üstyapısının davranışı don penetrasyon derinliği ile yakından ilgilidir. Don penetrasyon derinliğinin tespiti için çeşitli teorik formül ve abakların yanı sıra arazi ve sıcaklık ölçümleri de geniş bir şekilde kullanılır.

Yağış mevsimlerinde yağmur ve kar sularının drenaj sistemlerinin yardımıyla uzaklaştırılması gerekir. Taban zemininde bulunan kil ve silt gibi bazı malzemeler bünyelerine su aldıklarında, büyük hacim değişikliği gösterirler. Bu hacim değişikliği sonucu meydana gelen kabarmalar ise üstyapıda kırılma ve dağılmalara yol açar. Yağışlardan sonra oluşan yüzeysel sular, yol yüzeyi, banket, yarma ve dolgu şevlerinin erozyonuna sebep olurlar.(Güzel, 2001)

#### **2.1.5 Trafik Etkileri**

Yapılan araştırmalar sonucunda, ülkemizde yukarıda bahsedilen tasarım, yapım, bakım hataları ve iklim şartlarının yanında, üstyapı bozulmasında en önemli etkenlerden bir diğerinin, denetimsiz seyreden aşırı yüklü kamyonlar olduğu gözlenmiştir. O halde, konu sadece karayollarına yapılan harcamalar açısından ele alınırsa, hedefe yönelik en etkili önlem, ağır taşıtların izin verilen maksimum dingil yüklerinin sınırlanması veya ekonomik açıdan dingil yüklerinin artması gerekiyorsa, üstyapı tasarımının öngörülen yeni dingil yük değerleri kullanılarak yapılması biçiminde ortaya çıkmaktadır. Buna ek olarak, yollarda seyreden ağır taşıtların ağırlık kontrollerine önem verilmelidir. İzin verilen sınırların üzerinde yüklenmiş taşıtların, yola verdiği zarar önemli seviyelere ulaşmaktadır.

Tablo 2.1' de çeşitli ülkelerde uygulanan dingil yükü limitleri verilmiştir. Değer aralığı olarak verilmiş limitler dingiller arası mesafeye, dingilin motris olup

olmamasına veya toplam dingil sayısına bağılı olarak değişen yükleri ifade etmektedir.

Karayollarında seyreden taşıtların dingil yüklerinin yolun yıpranmasına olan etkileri, 1957- 1961 yılları arasında yapılmış AASHTO (American Association of State Highway Officials) deney yolu verileriyle ortaya çıkarılmış olan bağıntılarla belirlenmektedir.(AASHTO, 1994)

Tablo 2.1 Çeşitli Ülke Standartlarında Yer Alan Dingil Yükleri ve Toplam Taşıtların Ağırlıkları İle İlgili Sınırlar

|             | dingil yükü        |            |            | taşıtların ağırlığı (ton) |             |                     |                |
|-------------|--------------------|------------|------------|---------------------------|-------------|---------------------|----------------|
|             | direksiyon dingili | tek dingil | tandem     | tandem dingili            | üç dingilli | yarı römorklu katar | römorklu katar |
| Almanya     | 10                 | 10         | 11-20      | 17                        | 24          | 40-44               | 40             |
| Avusturya   | 10                 | 10         | 16         | 16                        | 22          | 38                  | 38             |
| Bulgaristan | 6                  | 10         | 13-20      | 16                        | 26          | 38                  | 42             |
| Belçika     | 10                 | 10         | 19-20      | 19                        | 26          | 44                  | 44             |
| Danimarka   | 10                 | 10         | 16-20      | 18                        | 24          | 48                  | 48             |
| Finlandiya  | 8                  | 10         | 18         | 17                        | 25          | 44                  | 56             |
| Fransa      | 13                 | 13         | 21         | 19                        | 26          | 40-44               | 40             |
| Hollanda    | 10                 | 11         | 10.5-19    | 20                        | 30          | 50                  | 50             |
| İngiltere   | 9.2                | 10.5       | 10.5-20.34 | 17                        | 24.39       | 38                  | 32.52          |
| İsveç       | 10                 | 10         | 16         | 17                        | 29          | 37.5-51.4           | 37.5-51.4      |
| İsviçre     | 10                 | 10         | 18         | 16                        | 19          | 28                  | 28             |
| İtalya      | 12                 | 12         | 20         | 18                        | 24          | 40-44               | 40-44          |
| Macaristan  | 10                 | 10         | 16         | 20                        | 24          | 40                  | 40             |
| Norveç      | 10                 | 10         | 16         | 20                        | 26          | 45                  | 50             |
| Polonya     |                    | 8-10       | 14.5       | 16                        | 24          | 38                  | 33             |
| Romanya     |                    | 10         | 16         | 16                        | 22          | 38                  | 38             |
| Türkiye     | 13                 | 13         | 19         | 19                        | 26          | 42                  | 42             |
| Yugoslavya  | 10                 | 10         | 16         | 18                        | 24          | 40                  | 40             |
| Yunanistan  | 7                  | 10-13      | 20         | 19                        | 26          | 38                  | 38             |

Ülkemizde 8,2 ton tek dingil yüküne göre inşa edilmiş olan yollarımızda, hiç bir iyileştirmeye gidilmeden tek dingil yükü için önce 10,0 tona daha sonra ise 13,0 tona çıkarılmış ve son olarak 11,5 tona indirilmiştir. Farklı dingil yüklerinin standart dingil yüküne oranla yol esnek üstyapısına vermiş olduğu zarar "eşdeğerlik faktörü" adı verilmektedir.

AASHO yol deney sonuçları yorumlanarak eşdeğerlik faktörü aşağıdaki 2.1 bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

$$EF = \sum_{i=1}^n \left| \frac{L_i}{8.2} \right|^a$$

(2.1) Burada  $\alpha$  katsayısı Türkiye koşulları için 4,4 olarak alınmıştır. Örneğin, yoldan geçen 14 tonluk bir dingil yükü, 8 tonluk dingil yüküne oranla yola;

$$EF = \left| \frac{14}{8} \right|^{4.4} \cong 12 \quad (2.2)$$

kez daha fazla zarar verecektir. Diğer bir deyişle, 14 tonluk bir dingil yükünün yoldan bir geçişiyle, 8 tonluk bir dingil yükünün aynı yoldan 12 defa geçmesi eşdeğer olmaktadır.

## 2.2 Yol Üstyapısında Meydana Gelen Bozulmalar ve Onarım Yöntemleri

### 2.2.1 Çatlaklar

Çatlaklar timsah sırtı çatlaklar, kenar çatlakları, enine çatlaklar, boyuna çatlaklar ve blok çatlaklar olarak beşe ayrılırlar.

#### 2.2.1.1 Timsah sırtı çatlaklar

Timsah sırtı çatlakların oluşum nedenleri;

- a) Taban zemini, alt temel ve/veya temel tabakalarının yetersiz sıkışması ve/veya yetersiz drenajı nedeni ile taşıma gücünün yetersizleşmesi,
- b) Kaplamanın aşırı trafik yükleri altında yorulması,
- c) Uygun olmayan malzeme kullanımı ve kötü yapım teknikleri,
- d) Çevre ve iklim şartlarında donma etkisi ve nem değişiklikleridir.

Timsah sırtı çatlakların derecelendirilmesi hafif, orta ve yüksek şiddetli timsah sırtı çatlaklar olmak üzere üçe ayrılır.

Hafif şiddette timsah sırtı çatlaklarında, timsah sırtı deseni yeni oluşmaya başlamış ve desen oluşumu az sayıda çatlaklardan meydana gelmiştir. Çatlaklar kılcal seviyededir. Bozuklukların gelişimi sürekli olarak gözlenmelidir.(İsfalt, 2002)

Orta şiddette timsah sırtı çatlaklarında, timsah sırtı oluşumu iyice belirginleşmiş, poligon köşelerinde kopmalar başlamıştır. Çatlakların genişliği artmış ve belirginleşmiştir. Geçici çözüm olarak (bakım amaçlı), bozuk yüzey harç tipi örtü tabakası veya yüzeysel kaplama ile kaplanmalıdır. Onarım yöntemlerinden biri, çatlaklı bölge düzgün bir şekilde kesilip atılmalı, sıcak veya soğuk karışım malzemesi ile yamanmalıdır.( bak şekil 2.1)

Yüksek şiddette timsah sırtı çatlaklarında, poligon blokları kopmaya başlamıştır. Bazı oyuklar ve lokal oturmalar oluşmuş, kopmalar ileri seviyelere ulaşmıştır.



Şekil 2.1 Orta Şiddette Timsah Sırtı Çatlak (İsfalt, 2002)

Onarım çalışması olarak, detaylı üstyapı etüdü yapıldıktan sonra,

- a) Bozuk yüzey, asfalt kaplamalarının yeniden kullanımı metodu (recycling) ile iyileştirme yapılmalıdır.(İsfalt, 2002)
- b) Aşınma ve/veya binder tabakası sıyrılarak, yeniden üstyapı yapılmalıdır.

### **2.2.1.2 Kenar çatlakları**

Kenar çatlaklarının oluşum nedenleri,

- a) Donma etkisi,
- b) Kaplama kenarında yetersiz taşıma gücü ve üstyapının kenarında aşırı trafik yüklenmesi,
- c) Üstyapı kenarında ve bankette yetersiz drenaj,

d)Üstyapı genişliğinin yetersiz olması nedeni ile trafiğin banket kenarına yakın seyretmesidir.

Kenar çatlaklarının derecelendirilmesi hafif, orta ve yüksek şiddetli kenar çatlakları olmak üzere üçe ayrılır.

Hafif şiddetli kenar çatlaklarında, çatlaklar kaplama kenarına paralel olup bir veya birden çok olabilir. Çatlaklar kaplama kenarından 300 mm içeriye yayılmış olabilir. Bozuklukların gelişimi sürekli gözlenmelidir.(İsfalt, 2002)

Orta şiddetli kenar çatlaklarında, çatlaklar dış tekerlek izine kadar ilerlemiş ya da kaplama kenarından 600 mm kadar içeri ilerlemiştir. Çatlaklar birbirinden bağımsız boyuna çatlaklar olabileceği gibi bazen de dalga şeklinde olabilmektedir. Onarım çalışması olarak, çatlaklı bölge düzgün bir şekilde kesilip atıldıktan sonra uygun bir karışımla yamanmalıdır.(bak şekil 2.2)

Yüksek şiddette kenar çatlaklarında, dalga şeklinde çatlaklar görülmeye başlanmış olup bunlar timsah sırtı desenine dönüşmüş ve dış teker izinden daha da içeri ilerlemiştir.

Onarım çalışması olarak, çatlaklı bölge düzgün bir şekilde kesilip atıldıktan sonra uygun bir karışımla yamanmalıdır veya bozuk kesim sathi kaplama ile kaplanmalı ve banket drenajı gerekli bakımla iyileştirilmelidir.(İsfalt, 2002)



Şekil 2.2 Orta Şiddette Kenar Çatlağı (İsfalt, 2002)

### 2.2.1.3 Enine çatlaklar

Enine çatlakların oluşum nedenleri;

- a) Asfalt kaplamada çok düşük sıcaklıklarda meydana gelen büzülme,
- b) Tabanda don etkisi ve su içeriği değişikliği,
- c) Alt tabakalarda daha önce oluşan çatlakların yüzeye yansımaları,
- d) Karışım içindeki bitümün sıcaklığa olan yüksek hassasiyetidir.

Enine çatlakların derecelendirilmesi üçe ayrılır. Bunlar hafif, orta ve yüksek şiddetli enine çatlaklardır.

Hafif şiddetli enine çatlaklarda, çatlaklar 6 mm' den incedir ve ayrışmamıştır. Çatlaklar, üstyapı genişliği boyunca değişken uzunluktadır. Bozuklukların gelişimi sürekli gözlenmelidir.

Orta şiddetli enine çatlaklarda, çatlaklar 6 ile 15 mm arası genişliğe ulaşmıştır. Çatlak boyunca hafif kopmalar oluşmuş ve kılcal çatlaklar meydana gelmiştir. Bakım yöntemi olarak, çatlaklar gerekirse genişletilerek uygun bir dolgu malzemesi ile doldurulmalıdır.(İsfalt, 2002)

Yüksek şiddetli enine çatlaklarda, tek veya birden fazla çatlaklar ayrışmaya devam edip 15 mm' den fazla açıklığa ulaşmıştır. Bazı kopmalar ve bozulmalar oluşmuştur. Çatlak oluşumu yaygınlaşmıştır. Geçici çözüm olarak (bakım amaçlı), çatlaklar uygun bir dolgu malzemesi ile doldurulmalıdır. Kalıcı çözüm olarak, özel bir çatlak etüdü yapıldıktan sonra gerekirse zemin iyileştirilmesi ve asfalt kaplamaların yeniden kullanımı metodu veya yeniden yapım metodu uygulanmalıdır.(bak şekil 2.3)



Şekil 2.3 Yüksek Şiddette Enine Çatlak (İsfalt, 2002)

#### 2.2.1.4 Boyuna çatlaklar

Boyuna çatlakların oluşum nedenleri;

- a) Dolgularda yetersiz sıkışma ve yetersiz drenaj nedeniyle oturma,
- b) Dolgunun yanal hareketi,
- c) Çevre ve iklim şartları (don etkisi ve nem değişiklikleri),
- d) Üstyapının taşıma gücünün yetersiz oluşu ve bunun trafik yükü ile birleşmesi sonucu oluşan oturmalarıdır.

Boyuna çatlaklarının derecelendirilmesi hafif, orta ve yüksek şiddetli boyuna çatlakları olmak üzere üçe ayrılır.

Hafif şiddetli boyuna çatlaklarda, çatlaklar 6 mm' den incedir ve ayrışmamıştır. Çatlak kaplama kenarına paralel, diyagonal veya kıvrımlar şeklindedir. Bozuklukların gelişimi sürekli gözlenmelidir.

Orta şiddetli boyuna çatlaklarda, çatlaklar 6 ile 15 mm arası genişliğe ulaşmıştır. Ayrışmalar başlamış ve çok yönlü kılcal çatlaklar oluşmuştur. Bakım yöntemi olarak, çatlaklar gerekirse genişletilerek uygun bir dolgu malzemesi ile doldurulmalıdır.

Yüksek şiddetli boyuna çatlaklarda, tek veya birden fazla çatlaklar ayrışmaya devam edip 15 mm' den fazla açıklığa ulaşmıştır. Ayrışmalar derinleşmiş ve çatlak sayısı artmıştır. Geçici çözüm olarak (bakım amaçlı), çatlaklar uygun bir dolgu malzemesi ile doldurulmalıdır. Kalıcı çözüm olarak, özel bir çatlak etüdü yapıldıktan sonra gerekirse zemin iyileştirilmesi ve asfalt üstyapının yeniden kullanımı metodu veya yeniden yapım metodu uygulanmalıdır.(bak şekil 2.4)



Şekil 2.4 Yüksek Şiddette Boyuna Çatlak (İsfalt, 2002)

### 2.2.1.5 Blok (Harita) çatlaklar

Blok (harita) çatlakların oluşum nedenleri;

- a) Şişme ve büzülme etkisi,
- b) Donma etkisi,
- c) Asfalt kaplamanın yaşlanmasından dolayı sertleşmesi ve kırılmasıdır.

Blok çatlaklarının derecelendirilmesi hafif, orta ve yüksek şiddetli blok çatlaklar olmak üzere üçe ayrılır.

Hafif şiddetli blok çatlaklarda, çatlakların genişliği 6 mm' den incedir. Boyuna ve enine çatlaklar birbiri ile birleşerek harita şeklinde görünürler. Bozuklukların gelişimi sürekli gözlenmelidir.

Orta şiddetli blok çatlaklarda, çatlaklar 6 mm ile 15 mm arası genişliğe ulaşmıştır. Çatlak formasyonu bir veya birden fazla çatlağın ayrılıp kopması şeklindedir. Geçici çözüm olarak, bozuk yüzey harç tipi örtü tabakası veya yüzeysel kaplama ile kaplanmalıdır. Kalıcı çözüm olarak, bozuk yüzeye ya asfalt kaplamaların yeniden kullanım metodu ile ya da düzeltme tabakası ve geotekstil ile düzeltildikten sonra takviye kalınlıklar uygulanmalıdır.(bak şekil 2.5)



Şekil 2.5 Orta Şiddetli Blok Çatlaklar (İsfalt, 2002)

Yüksek şiddetli blok çatlaklarda, çatlaklar çok yönlü olarak ayrılmaya devam edip 15 mm' den fazla açıklığa ulaşmıştır. Timsah sırtı çatlaklar oluşmuştur. Bakım yöntemi olarak, detaylı üstyapı etüdü yapıldıktan sonra bozuk yüzey asfalt kaplamaların yeniden kullanımı metodu ile iyileştirilmelidir veya yeniden yapım metodu uygulanmalıdır.(bak şekil 2.6)



Şekil 2.6 Yüksek Şiddetli Blok Çatlaklar (İsfalt, 2002)

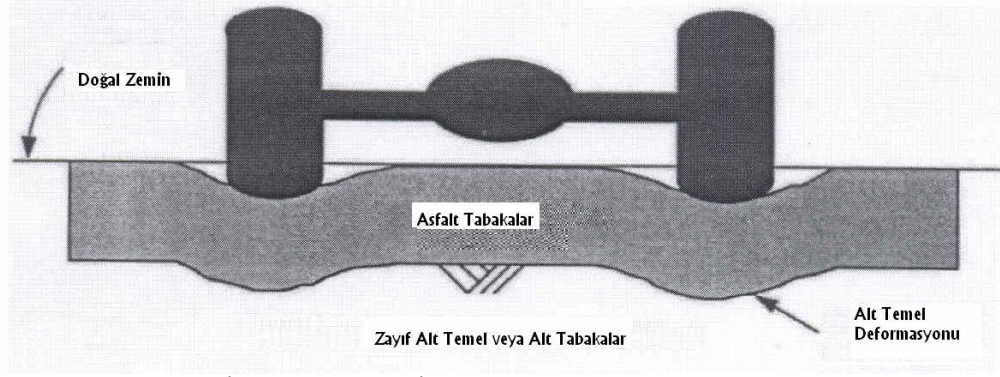
## 2.2.2 Oturmalar

### 2.2.2.1 Tekerlek izinde oturmalar

Tekerlek izinde oturmaların oluşum nedenleri;

- Yüksek ısı, düşük viskoziteli bağlayıcı ve yüksek bitüm içeriği nedenleri ile bitümlü sıcak karışım tabakalarının stabiliteelerini kaybetmeleri,
- Bitümlü sıcak karışım tabakalarının yetersiz sıkıştırılması,
- Üstyapı tabakalarının aşırı gerilmeler altında kalıcı deformasyonlara maruz kalması,
- Trafik yükleri altında boşluk suyu basıncı nedeniyle doyumluğa ulaşan temel ve alt temel tabakalarının stabiliteelerini kaybetmeleri,
- Drenaj yetersizliği ve/veya yetersiz sıkışma nedeniyle üstyapı tabanının stabilitesini kaybetmesi, taşıma gücünün zayıflaması,
- Banket malzemesinin stabil olmaması, yeterli yanal desteği sağlayamamasıdır.

Şekil 2.7’de görüldüğü üzere tekerlek izinde oturmaların derecelendirilmesi hafif, orta ve şiddetli tekerlek izinde oturmalar olmak üzere üçe ayrılır.



Şekil 2.7 Tekerlek İzinde Oturma (İsfalt, 2002)

Hafif şiddette tekerlek izinde oturmalarda, oturma derinliği 15 mm' den daha azdır. Orta şiddette tekerlek izinde oturmalarda, oturma derinliği 15- 30 mm arasındadır. Genellikle iz üzerinde çatlamlar vardır. Bakım yöntemi olarak tümsekler freze makinesi ile kesilmelidir.(bak şekil 2.8)



Şekil 2.8 Orta Şiddetli Tekerlek İzinde Oturma (İsfalt, 2002)

Yüksek şiddette tekerlek izinde oturmalarda, oturma derinliği 30 mm' den fazladır. Çatlaklar daha belirginleşmiştir. Tekerlek izinde oturma derinliği 3-5 cm ise derinlik kadar üstyapı kazılmalı ve yerine kazınan malzeme cinsinden aynı kalınlıkta malzeme getirilmelidir. Oturma derinliği 5 cm 'den fazla ise geçici çözüm olarak, tekerlek izinde oturma derinliği kadar üstyapı kazılmalı ve yerine aynı kalınlıkta malzeme getirilmelidir.(bak şekil 2.9)

Kalıcı çözüm amaçlı olarak, geçici çözüm önerisine ek olarak üstyapı etüdü sonucu belirlenen takviye tabakaları uygulanmalıdır.



Şekil 2.9 Yüksek Şiddette Tekerlek İzinde Oturmalar (İsfalt, 2002)

#### 2.2.2.2 Yerel oturmalar

Yerel oturmaların oluşma nedenleri;

- a) Taban, alt temel ve / veya temel tabakalarında yetersiz sıkıştırma,
- b) Üstyapı tabanının taşıma gücünün zayıf olması,
- c) Sanat yapılarının yaklaşım yerlerinin yetersizliği ile oluşan oturmalar,
- d) Dolgu şevindeki eğim hataları,
- e) Uygun olmayan bakım teknikleri, yetersiz sıkıştırma ve yetersiz drenaj sistemidir.

Yerel oturmaların derecelendirilmesi hafif, orta ve şiddetli oturmalar olmak üzere üçe ayrılır.

Hafif şiddette yerel oturmalar, düşey yönlü deplasman 50 mm' den azdır. Süriş konforundaki azalma çok az olup, hafif sarsıntılara neden olabilir.

Orta şiddette yerel oturmalar, düşey yönlü deplasman 50-100 mm arasındadır.

Hissedilir seviyede yükselme ve alçalmalar oluşmuştur. Bakım yöntemi olarak, drenaj sistemleri gözden geçirilmeli, bozuk kesim gerekirse kazılıp atılmalı, sıcak veya soğuk karışım malzemesi ile yamanmalıdır.

Yüksek şiddette yerel oturmalar, düşey yönlü deplasman 100 mm' nin üstündedir.

Sürekli hale gelen yükselip alçalmalar, rahatsızlık verici seviyededir.(bak şekil 2.10) Hız azaltma zorunluluğu hissedilir. Bakım yöntemi olarak, drenaj sistemleri gözden geçirilmeli, bozuk kesim gerekirse kazılıp atılmalı, sıcak veya soğuk karışım

malzemesi ile yamanmalıdır. Gerekli görülürse, üstyapı tabanı ve dolgular iyileştirilmelidir. (İsfalt, 2002)



Şekil 2.10 Yüksek Şiddette Lokal Oturmalar (İsfalt, 2002)

### 2.2.3 Bombelikler

Bombelikler oluşma nedenleri;

- Asfalt karışımının stabilitesinin yetersizliği,
- Karışımın serilmesi sırasındaki serim ve sıkıştırma hataları,
- Kavşak, trafik ışıkları ve duraklardaki trafik etkisi,
- Üstyapı tabakaları arasındaki yapııştırma tabakasının hatalı uygulanması,
- Temel tabakasındaki stabilite bozukluğunun yüzeye yansması,
- Köprü tahliyesinde su geçirimsizliği için kalın membran kullanılması,
- Ağır trafik altında suya doymuş granüler tabakaların varlığıdır.

Bombelikler derecelendirilmesi hafif, orta ve şiddetli bombelikler olmak üzere üçe ayrılır.

Hafif şiddette bombeliklerde, çeşitli yüksekliklerde enine bombelikler ve yerel kabarmalar, yığılmalar ve ötelenmeler oluşmaya başlamıştır. Sürüş konforunda düşüş hissedilmeye başlamıştır. Bozuklukların gelişimi sürekli gözlenmelidir.

Orta şiddette bombelikler, sürüş konforu belirgin bir şekilde düşmüş, yol yüzeyi tümsekli bir görünüş almıştır. Bakım yöntemi olarak, bozuk kesimler freze makinesi ile kesilmeli ve gerekirse yama yapılmalıdır.(bak şekil 2.11)



Şekil 2.11 Orta Şiddette Bombelikler (İsfalt, 2002)

Yüksek şiddette bombeliklerde, yol yüzeyindeki bozukluklar iyice artmış ve sürüş konforu iyice azalmıştır. Güvenli sürüş için hızı azaltma zorunluluğu vardır. Bakım yöntemi olarak, bozuk kesimler freze makinesi ile kazılmalı, yama yapılmalıdır. Gerekirse kapsamlı üstyapı etüdü yapılarak yeniden yapım metodu uygulanmalıdır.

#### 2.2.4 Çukurlar

Çukurların oluşma nedenleri;

- Yanlış yapım teknikleri ve düşük kalite kontrolü,
- Kaplamada düşük kaliteli agrega kullanımı,
- Üstyapı kalınlıklarının yetersiz oluşudur.

Çukurların derecelendirilmesi hafif, orta ve şiddetli çukurlar olmak üzere üçe ayrılır.

Hafif şiddette çukurlarda, çukurun derinliği 5 cm' den ve çapı 10 cm' den azdır. Bakım için, çukur uygun bir şekilde düzeltilip soğuk veya sıcak karışım ile yamanmalıdır.

Orta şiddette çukurlarda, çukur derinliği  $5 < H < 10$  cm ve çapı  $10 < R < 30$  cm' dir. Çukur uygun bir şekilde düzeltilip soğuk veya sıcak karışım ile yamanmalıdır.(bak şekil 2.12)

Geçici çözüm (bakım amaçlı) olarak, bozuk kesim bozukluk derinliğince kazılmalı, kazılan malzeme cinsinden aynı kalınlıkta malzeme getirilmelidir. Kalıcı çözüm olarak, üstyapı etüdü sonucu belirlenen takviye tabakaları uygulanmalıdır.



Şekil 2.12 Orta Şiddette Çukur (İsfalt, 2002)

Yüksek şiddette çukurlarda, çukurların derinliği  $H > 10$  cm ve çapı  $R > 30$  cm' dir. Geçici çözüm (bakım amaçlı) olarak, bozuk kesim bozukluk derinliğince kazılmalı, kazılan malzeme cinsinden aynı kalınlıkta malzeme getirilmelidir. Kalıcı çözüm olarak, üstyapı etüdü sonucu belirlenen takviye tabakaları uygulanmalıdır.(bak şekil 2.13)



Şekil 2.13 Yüksek Şiddette Çukur (İsfalt, 2002)

### 2.2.5 Sökülme ve Soyulma

Soyulmaların oluşma nedenleri;

- a) Su ve trafik etkisi ile soyulma,
- b) Bitümlü sıcak karışım içinde kil toprakları veya kille kaplı agrega bulunması,
- c) Zayıf sıkıştırma ve yüksek boşluk yüzdesi,
- d) Yetersiz asfalt yüzdesi,
- e) Yaşlanma nedeni ile oluşan asfalt sertleşmesi

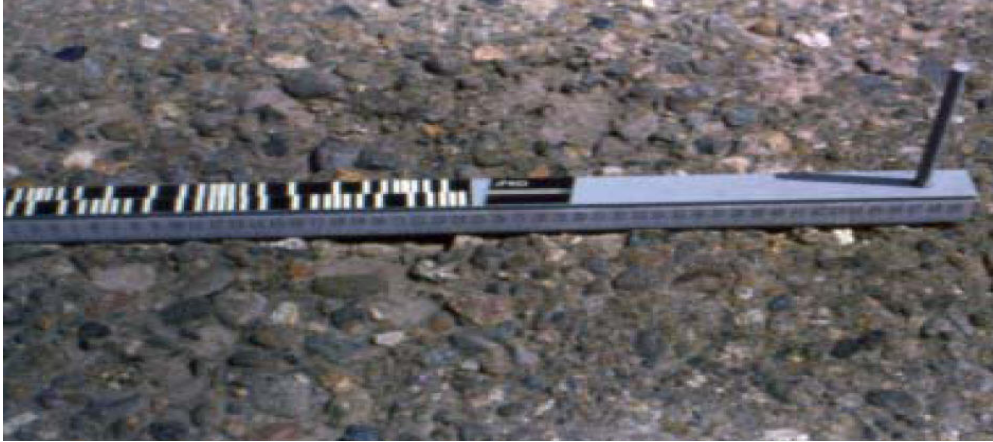
6- Uygun olmayan yapım teknikleri ve ekipman kullanımı

7- Donma çözünme olaylarının tekrarlanması ile absorpsiyonu ve kırılabilirliği yüksek agregaların kullanıldığı karışımlarda, ayrışma meydana gelmesidir.

Soyulmalarla derecelendirilmesi hafif, orta ve şiddetli olmak üzere üçe ayrılır.

Hafif şiddetli soyulmalar, yüzeyde agrega kaybı başlamıştır. Kaplama karışımının dokusal görüntüsünde hafif bir artış meydana gelmiştir. Bozuklukları gelişimi sürekli olarak gözlenmelidir. (İsfalt, 2002)

Orta şiddetli soyulmalarda, yol yüzeyindeki agrega kaybı artmıştır. Hızlanan agrega kaybı, kaplamada açık görümlü bir doku meydana getirmiştir. Onarım çalışması olarak, harç tipi örme tabakası veya sathi kaplama yapılmalıdır.(bak şekil 2.14)



Şekil 2.14 Orta Şiddette Soyulma (İsfalt, 2002)

Yüksek şiddetli soyulmalarda, agrega kaybının devamında yüzeydeki açık görümlü doku iyice belirginleşmiştir. Bazı lokal çukurlar ve kopmalar oluşmuştur. Onarım çalışması olarak, çukurlar sıcak karışım yama ile yamanır, yüzey tek tabaka asfalt betonu, sathi kaplama veya harç tipi örme tabakası ile kaplanır. (İsfalt, 2002)

### 3. ESNEK YOL ÜSTYAPI YÖNETİM SİSTEMLERİ

Genel anlamda yol üstyapı yönetim sistemleri (ÜYS), literatürde yol bakım yönetim sistemleri, üstyapı bakım sistemleri, üstyapı yönetim sistemleri gibi adlarla anılmaktadır.

Bir esnek üstyapı, yeni inşa edildiğinde performansı yüksektir. Ancak, değişik iklim koşulları, trafik vb. gibi faktörlerle zamanla yolun performansında önemli azalmalar görülmektedir. Meydana gelen bu performans azalmalarını iyileştirmek veya gidermek için bakım çalışmalarının yapılması gerekecektir. Bakım çalışmalarının zamanında ve belirli öncelikleri dikkate alarak yapılabilmesi için ÜYS' lerin hazırlanması gerekir.(Ministry of Transport, 1970)

Bir yol üstyapı yönetim sisteminin esas amacı, minimum maliyette, belirli bir sürede, istenilen servis düzeyinde yol üstyapılarının bakım, onarım ve iyileştirilmesi için gerekli en iyi çözümleri bulmada karayolu yöneticilerine yardımcı olmaktır.

Yol üstyapı yönetim sistemi (ÜYS) ile ilgili ilk çalışmalar 1960'lı yıllarda Kuzey Amerika'da, 70'li yılların başında ise Avrupa'da yoğun bir şekilde incelenmeye başlanmış ve her ülke kendi yol ağlarını kapsayan yol üstyapı yönetim sistemini kurmaya veya geliştirmeye çalışmıştır. Ülkemizde ise bu konu ile ilgili çalışmalar, Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından Ekim 1994 yılında 'Kanada Pavement Management Systems Limited' e yaptırılan pilot bir proje ile başlatılmıştır.

Bir bakım yönetim sistemi, planlama ve bakım işlemlerinde kullanılmak üzere envanter, yol ağı üzerindeki yol durumunun incelenmesi, yolun servis kabiliyetine göre bakım çalışmalarının tespiti, gerekli bütçeyi hesaplamak için maliyet hesabı ve bütçenin yetersiz olduğu durumlarda önceliklerin belirlenmesi, uygulama ve yapılan bakım çalışmalarının gözlenmesinden oluşmaktadır.(Haas, 1994)

Genel anlamda bir karayolu işletim sistemi şu elemanlardan oluşmaktadır.

- 1-Üstyapı yönetim sistemi
- 2-Bakım yönetim sistemi
- 3-Köprü yönetim sistemi

### **3.1 Karayolu Esnek Üstyapı Durumlarının Değerlendirilmesi**

Bir yol ağının mevcut durumunu ortaya koyup, buna göre uygulanacak bakım stratejilerinin belirlenmesini sağlayan üstyapı yönetimi, karayolu ağının mevcut durumunun sağlıklı biçimde değerlendirilmesiyle başlar.

Bu kısımda, kapsamlı bir bakım yönetim sisteminin geliştirilmesinde gerçekleştirilmesi zorunlu üstyapı durum değerlendirilmesi bağlamında, üstyapı bozulmalarını belirleme yöntemleriyle, bakım için öncelik ve gereksinim değerlendirmesi üzerinde durulacaktır.(Haas, 1994)

#### **3.1.1 Üstyapı Durum Değerlendirmesi ile İlgili Genel Bilgi**

Üstyapı durum değerlendirilmesinin ana amaçları;

- a) yolun mevcut durumunu belirlemek, ilk bozulma belirtileri ve bunları izleyen bozulma ilerlemesini ortaya koyan, sürekli izleme yolu ile bakım gereksinimlerini saptamak,
- b) üstyapıların bozulmaya bağlı olarak gelecekte nasıl davranacaklarını tahmin etmek üzere bilgi sağlamak,
- c) yıllık ve uzun süreli bakım programları planlamak,
- d) çeşitli yol durumlarını karşılaştırarak bakım önceliklerini tayin etmek,
- e) programlanan çalışmanın uygun şekilde yapılıp yapılmadığını kontrol etmek ve onun etkisini değerlendirmek,
- f) karayolu yetkilileri açısından daha nesnel ve düzenli karar vermeye zemin sağlamak,
- g) üstyapı tasarım yöntemleri ile, yapım ve bakım tekniklerinin yeterliliğini değerlendirmek şeklinde sıralanabilir.

Bu amaçlara ulaşmak için, aşağıda sıralananlar ile ilgili veri gereklidir;

- bükülme, düzgünlük, kayma direnci ve diğer parametreler gibi, ölçülebilir üstyapı durumu özellikleri,
- ölçülen verinin yorumu ve üstyapı durumlarının teşhisi için gerekli, yol geometrisi, kazalar, trafik, üstyapının yapısı, yürütülen çalışmaların tarihçesi, çevre, vs. gibi tamamlayıcı etkenler,
- ölçülen durumlar veya gözlemlerden sağlanan sonuçların karşılaştırabildiği kalite düzeylerini oluşturan kalite standartlarıdır.

- sonuç olarak, gereksinimleri öncelik sırasına göre sıralamayı sağlayan bir yöntemdir.

Bu işlemler, benimsenen bakım politikası çerçevesinde, elle yapılan veya bilgisayar kontrollü bir veri analizinin, bakım gereksinimlerini öncelik sırasına göre göstermesi bazında tamamlayıcı bir değerlendirme sistemi ile bütünleştirilmelidir. .(Haas, 1994)

### **3.1.2 Üstyapı Bozulmalarını Belirleme Yöntemleri**

Bu kısımda öncelikle, görünen bozulmalar ve bozulmalar ile ilgili üstyapı özelliklerini kaydetme şeklindeki, mevcut üstyapı değerlendirme teknikleri ve yüzey bozulmalarını belirlemeye mahsus yöntemler üzerinde durulmuştur. Yol üstyapısının durumu, uzman ölçüm ekipmanı kullanımı ile ve/veya fotoğrafik ya da optik gözlem vasıtasıyla değerlendirilebilir.

Deneyim, iki yöntemin birbirini tamamladığını göstermiştir. Gerçekte, yüksek verimlilikteki ölçüm ekipmanı kullanımının artması, belirli alanlarda genellikle daha öznel ve daha az doğruluktaki bazı optik gözlem tiplerinin yerine geçebilmekle birlikte, optik gözlem, aşağıdaki nedenlerle esastır;

- yalnızca ölçüm ile değerlendirilecek tüm üstyapı özellikleri veya bozulmaları için olası değildir,
- yalnızca ölçüm kullanımı, çoğu durumlarda esaslı bir bilgi kaybına yol açar,
- ölçüm ve fotoğrafik veya optik gözlemler, mutlaka aynı sonuçları verir.

Bu yüzden, dikkatli gözlem sonuçları ile ölçümden elde edilen veriyi birleştirmek ve bir sonraki analizi ikisi üzerine kurmak zorunludur. Bu nedenle, olası üstyapı durumlarının değerlendirilmesi sistematik gözlem gerektirir. Bununla birlikte, farklı gözlem hizmetlerinin üstyapı durumlarını tanımlama için aynı yöntemi kullanmaları gereklidir. Teknik personelin, teorik ve pratik bakımdan iyi eğitilmesi esastır. Örnek olarak, bozulma nedenlerinin araştırılması çok karmaşık bir işlemdir ve gerekli analitik çalışma yalnızca, her durumda çok miktarda yüksek kaliteli bilgi mevcut olması ve bozulma nedenleri, analizinin uzmanlar tarafından gerçekleştirilmesi halinde başarılı olacaktır. Kullanılmakta olan bazı sistemler Tablo 3.1'de tanımlanmaktadır. .(Haas, 1994)

Tablo 3.1 Üstyapıların Yüze Durumlarını Kaydetme Örnekleri

| Sınıf               | Kullanılan       | Yöntem            | Ölçümler  | Ölçülen Özellikler |                 |          |                        |              |                            |                            |                  |                   |                  |                 |                    |                    |                        |         |         |         |            |          |          |
|---------------------|------------------|-------------------|---|--------------------|-----------------|----------|------------------------|--------------|----------------------------|----------------------------|------------------|-------------------|------------------|-----------------|--------------------|--------------------|------------------------|---------|---------|---------|------------|----------|----------|
|                     |                  |                   |   | Deformasyon        |                 |          |                        | Kusurlar     |                            | Kırıklar ve Çatlaklar      |                  |                   |                  | Yüze            |                    | Onarımlar          |                        |         |         |         |            |          |          |
|                     |                  |                   |   | Oturma             | Bükülme, tümsek | Dalgalar | Çarpılma(mevzi oturma) | Tekerlek izi | Çökme(göçme) - kuş banyosu | Soyulma - Dağılma(ayrışma) | Şevlerin kayması | Zig zag çatlaklar | Boyuna çatlaklar | Enine çatlaklar | Bağlantılı çatlama | Yansıma çatlakları | Köşe çatlakları, kırık | Çilasma | Yolunma | Terleme | Çamur göçü | Henekler | Yamalama |
| DEĞERLENDİRME       | Ontario          |                   |   |                    |                 |          |                        |              |                            |                            |                  |                   |                  |                 |                    |                    |                        |         |         |         |            |          |          |
|                     | Washington       |                   |   | X                  | X               | X        |                        |              | X                          | X                          | X                | X                 | X                |                 |                    | X                  | X                      |         |         |         |            | X        |          |
|                     | California       |                   |   |                    |                 |          |                        |              |                            |                            |                  |                   |                  |                 |                    |                    |                        |         |         |         |            |          |          |
|                     | Quebec           |                   |   |                    |                 | X        |                        |              |                            |                            |                  | X                 | X                | X               |                    |                    |                        |         |         |         |            | X        |          |
|                     | Minnesota        |                   |   |                    |                 |          |                        |              |                            |                            |                  |                   |                  |                 |                    |                    |                        |         |         |         |            |          |          |
|                     | esnek üstyapılar | Fransa            | X   | X                  | X               |          | X                      | X            |                            | X                          | X                | X                 | X                |                 | X                  | X                  | X                      |         |         |         | X          | X        |          |
| FOTOĞRAFLA KAYDETME | Kanada           | X                 | X   | X                  | X               |          |                        | X            |                            | X                          | X                | X                 | X                |                 | X                  |                    |                        |         | X       | X       | X          | X        |          |
|                     | İngiltere        |                   |   | X                  | X               | X        |                        | X            |                            | X                          |                  | X                 | X                |                 | X                  |                    | X                      |         | X       | X       | X          | X        |          |
|                     | U.S.A            | Hava fotoğrafları | Üstyapı altındaki ve çatlaklar çevresindeki nemi ortaya çıkarmak için infrared(kızıl ötesi) fotoğrafçılık   |                    |                 |          |                        |              |                            |                            |                  |                   |                  |                 |                    |                    |                        |         |         |         |            |          |          |
|                     | Fransa           | Fotoğrafçılık     | Bozulmaların ölçümü. Kusurların miktarı belirlenebilir ve ölçümler objektiftir  |                    |                 |          |                        |              |                            |                            |                  |                   |                  |                 |                    |                    |                        |         |         |         |            |          |          |
| FOTOĞRAFLA KAYDETME | Norveç           |                   |   |                    |                 |          |                        |              |                            |                            |                  |                   |                  |                 |                    |                    |                        |         |         |         |            |          |          |
|                     | Japonya          |                   |   |                    |                 |          |                        |              |                            |                            |                  |                   |                  |                 |                    |                    |                        |         |         |         |            |          |          |
| FOTOĞRAFLA KAYDETME | U.S.A            | Fotolog           | Fotoğraflar üstyapıya paralel olarak alınır. Yöntem, kullanıcı tarafından görüldüğü gibi, üstyapı ve çevresinin genel bir görünüşün verir. Bu, önemli üstyapı kusurlarını ortaya çıkarır. |                    |                 |          |                        |              |                            |                            |                  |                   |                  |                 |                    |                    |                        |         |         |         |            |          |          |
|                     | British Columbia |                   |   |                    |                 |          |                        |              |                            |                            |                  |                   |                  |                 |                    |                    |                        |         |         |         |            |          |          |

### 3.1.2.1 Fotoğrafik gözlem yöntemleri

Üstyapı bozulmalarının, fotoğrafik olarak kaydedilmesi ile ilgili üç yöntem kullanılmaktadır. İlk yöntem, bir dizi fotoğraf almaktan ibarettir. İkinci ve üçüncü yöntemlerde ise, bir araca bağlanmış olup, üstyapıyı yola paralel veya dik olarak fotoğraflayan bir kamera kullanılır. (Haas, 1994)

### 3.1.2.2 Optik gözlem

Kontrolün ana amacı, gözle olabildiğince tam bir bozulma etüdü yapmaktır. Sistematik bir optik etüdü gerçekleştirmeden önce, gözlenecek yolu belirli uzunluktaki kesimlere bölmek gereklidir. Değişik gözlem ekipleri, aynı terminolojiyle, aynı kayıt ve ölçme yöntemlerini kullanmaldırlar.

Gözlemler, gözetim tipine göre hareketli araçlar içindeki, bisikletler üzerindeki veya yaya gözlemciler tarafından yapılmalıdır. Gözlemin yapılması gereken zaman periyodu ve gözlemin frekansı ile ilgili standartlar, yolun önemi, araştırılacak yol elemanları, iklim koşulları ve üstyapının genel durumuna bağlı olarak değişir. Böylece, acilen onarılması gereken bozulmaların ortaya çıkarılmasını sağlayan gözlem, günlük, haftalık veya aylık yapılır. Halbuki, genel veya sistematik gözlem,

yılda iki kez veya genellikle yılda bir kez olmak üzere, daha uzun zaman aralıklarında yapılır.

Gözlem sonuçlarının kaydedildiği mevcut gözlem formları, bilgisayara doğrudan doğruya girdi olarak verilecek şekilde hazırlanmıştır. Formlar, yerinde doğru kayda yardımcı olmak, hatalardan kaçınmak ve aynı zamanda veri işleme çalışmalarını da kolaylaştırmak üzere, olabildiğince basit olmalıdır. Verinin bilgisayar işleminden geçirilmesi sırasında, bakım personeli ve veri işleme bölümü arasındaki ortak çalışma, etkili ve doğru bir veri analizi için esastır. (Haas, 1994)

### **3.2.1.3 Bozulmaların ölçülmesi**

Bozulmaların kaydedilmesi, onların tanımlanması, yerlerinin belirlenmesi ve miktarlarının, yani, şiddet ve yoğunluklarının saptanmasını içerir. Bozulmaların önemini belirlemek için, mevcut üstyapı durumlarını, kabul edilebilir durumda olduğu varsayılan bir referans üstyapı ile karşılaştırmak gereklidir. Bu nedenle, aynı uzunluktaki yol kesimleri üzerinde değerlendirmeler yapmak ve eğer bu olası değilse, standart hale getirilmiş uzunluklar üzerindeki veriyi analiz etmek zorunludur.

Kesimler:

- a) Trafik hacmi ve tipi, yol geometrisi, üstyapı bileşimi, yüzey tipi, yapım yılı veya son aşınma tabakası teşkili ya da sağlamlaştırma yılı vs. gibi etkenler bakımından uzunlukları boyunca düzenli olmalı,
- b) Kavşaklar, kilometre işaretleri, özel işaretler, vs. ile sınırlanmalı,
- c) Evvelce, trafik ölçümleri, kaza yeri, yol envanteri, vs. gibi diğer amaçlar için kullanılan kesimler ile uyumlu olmalıdır.

Çoğu bozulmalar birçok şiddet düzeyinde sınıflandırılabilir. Tekerlek izi derinliği, çatlak genişliği vb. belirli bozulmalar ölçülebilir niteliktedir. Ancak, şiddet değerlendirmesi genelde, fotoğrafların tanımlanması gibi öznel ölçütlere dayanır.

Dünyada çoğunlukla, bakım programlarını planlama amaçları için üç şiddet düzeyi belirlenir. Tablo 3.2'de görüldüğü üzere Kanada, Ontario gibi bazıları ise, bozulmaların zamanla ilerlemesini daha iyi izlemek üzere, beş şiddet düzeyi belirlemişlerdir. Farklı kuruluşlar, çeşitli bozulma tiplerinin şiddetlerini değerlendirmede farklı ölçütleri esas alırlar. (Haas, 1994)

Tablo 3.2 Ontario' da Sökülme Miktarını Belirlemek İçin Kullanılan Şiddet Düzeyleri

| Sınıf | Üniform Tanımlama | Yol Gösterciler (Görünüş gözlemlerine dayalı)                                 |
|-------|-------------------|---|
| 1     | Çok az            | Ancak görülebilir   |
| 2     | Az                | Görülebilir   |
| 3     | Orta              | Çiçek bozuğu görünüşe sahip: çiçek bozukarı arasında oldukça fazla aralık var |
| 4     | Şiddetli          | Çiçek bozuğu görünüşüne sahip: çiçek bozukarı oldukça yakın aralıklı          |
| 5     | Çok şiddetli      | Yüzey sökülmüş bit görünüşe sahip ve küçük oyuklara ayrılmış                  |

Kullanılan ölçütlerin bir kuruluştan diğerine çok farklı olması önemli değildir. Bununla birlikte, şiddet düzeylerini belirlemede kullanılan ölçütlerin, tüm ağın homojen biçimde değerlendirilebilmesi için, olabildiğince nesnel ve kesin olması istenmektedir. (Haas, 1994)

Bozulmaların yoğunlukları genellikle;

- boyuna çatlaklar, üstyapı kenar çökmesi, tekerlek izi oluşumunun etkilediği üstyapı uzunluğu oranı,
- parabolik çatlaklar, bağlantılı çatlama, yolunma, soyulma ile hasar görmüş üstyapı alanı oranı,
- enine çatlaklar ve oyukların sayısı olarak kolayca tanımlanır.
- Örnek olarak, aşağıdaki tablo, Ontario' da sökülme miktarını belirlemek için tablo 3.3'de verilen beş yoğunluk sınıfı kullanılmaktadır.

Tablo 3.3 Ontario'da Sökülme Miktarını Belirlemek İçin Kullanılan Yoğunluk Sınıfları

| Sınıf | Üniform Tanımlama | Yol Gösterciler (Üstyapı kesiminde bozulmanın etkilediği yüzey alanı %'sine dayanır) |
|-------|-------------------|--|
| 1     | Az                | <10%   |
| 2     | Aralıklı          | 10 - 20%   |
| 3     | Sık               | 20 - 50%   |
| 4     | Yoğun             | 50 - 80%   |
| 5     | Baştan başa       | 80 - 100%  |

Belirli bir bozulmanın önemi, şiddet ve yoğunluğuna bağlı olarak açıklanır. Tablo 3.4, belirli bozulmaların şiddet ve yoğunlukları ile ilgili olarak Fransa'da öne sürülen değerlerin bir örneğini göstermektedir. (Haas, 1994)

Tablo 3.4 Belirli Bozulmaların Genel Önemlerini (Şiddet ve Yoğunluk) Saptamak

| GÖSTERGE   | BELİRLEME ÖLÇÜMÜ                       | ÖNEM | EK PARAMETRELER            | GEREKEN BAKIM                                      |   |
|--|--|------|----------------------------|--|---|
| Kayma Direnci  | S.C.R.I.M. Tarafından ölçülen S.F.C.   | 3    | Yaklaşık 0.5 - 0.6 S.F.C   | Islak yüzeyde ortalama kaza oranından daha fazla   | Sürekli gözetim   |
|  |  | 2    | Yaklaşık 0.35 - 0.5 S.F.C. | Kötü yol koşulları Kazalar                         | Sürekli gözetim veya yaşa göre aşınma tabakasını yenileme |
|  |  | 1    | S.F.C. 0.35-0.30(1)'dan az |  | Aşınma tabakasını yenileme                                |
| Yüzey bozulmaları -aşınma tabakasının plastik deformasyonu nedeniyle tekerlek izleri | Uzunluk oranı (%'si) Ortalama derinlik | 2    | 40-100% ve 5-15mm          | Kayma direnci derecesi 2 veya düzgünlük derecesi 1 | Sürekli gözetim veya yaşa göre aşınma tabakasını yenileme |
|  |  | 1    | 40-100% ve >15mm           |  | Aşınma tabakasını yenileme                                |
| - bağlantılı çatlama, agregaların kaybı, terleme                                     | Hasarlı üstyapı yüzey oranı            | 2    | 10-25%                     | Kayma direnci derecesi 2 veya düzgünlük derecesi 1 | Aşınma tabakasını yenileme, ince yüzey teşkili            |
|  |  | 1    | 25%                        |  |   |

(1) Ölçümlerin %40'ı 0.30'a eşit veya altında ya da ölçümlerin % 60'ı 0.35'e eşit veya altındadır.

Not: Her bir bozulma için 2 ve 3 önem düzeyi tanımlanır. Gerekli bakım çalışması, diğer bozulmalar ve son takviye işleminden sonra yol kesimini kullanmakta olan toplam kümülatif trafik gibi diğer parametreler göz önüne alındıktan sonra saptanır.

Kent içi yollara ait üstyapılar gibi belirli durumlarda, uygun bir değerlendirme ölçeği kullanılmak suretiyle, üstyapı durumlarını bütün yönleriyle değerlendirmek daha pratik olabilir. Tablo 3.5' de tipik bir örneği görülen böyle bir ölçek, yüzey bozulmalarının yoğunluk ve şiddeti ile sürüş konforuna dayanır. (Haas, 1994)

Tablo 3.5 Üstyapı Durumuna Göre Değerlendirme Sayısı (Bileşik Üstyapılar Montreal)

| SAYI | SÜRÜŞ          | TANIMLAMA  |
|------|----------------|--|
| 1    | Çok İyi        | Anormal görünen kusur yok  |
| 2    | İyi            | Birkaç çatlak ve az çökme ile birlikte, genellikle ciddi bozukluk yok  |
| 3    | Yeterince İyi  | Yeterli aşınma yüzeyli, fakat, enine ve boyuna çatlaklı, birkaç poligon çatlaklı ve birkaç çökmeli üstyapılar                  |
| 4    | Yeterince Kötü | Birkaç dalgalı, enine boyuna ve poligon çatlaklı ve ayrışma ve merdivenleşme başlangıcı gösteren üstyapılar                    |
| 5    | Kötü           | Tüm çeşitleri haiz çok sayıda çatlaklı, düzensiz profil ve pürüzlü yüzeyli üstyapılar. Bütününde ileri hasar gösteren kanıtlar |

Toplanan datalar aşağıdaki kararlar

- a) Üstyapının istenilen fonksiyonları yerine getirip getirmediğı,
- b) Gelecekteki iyileştirme gereksinimlerini programlama ve planlama,
- c) Tasarım, bakım ve yapım teknolojilerini geliştirme için kullanılabilir.

### **3.2 Bakım İçin Öncelik ve Gereksinim Değerlendirilmesi**

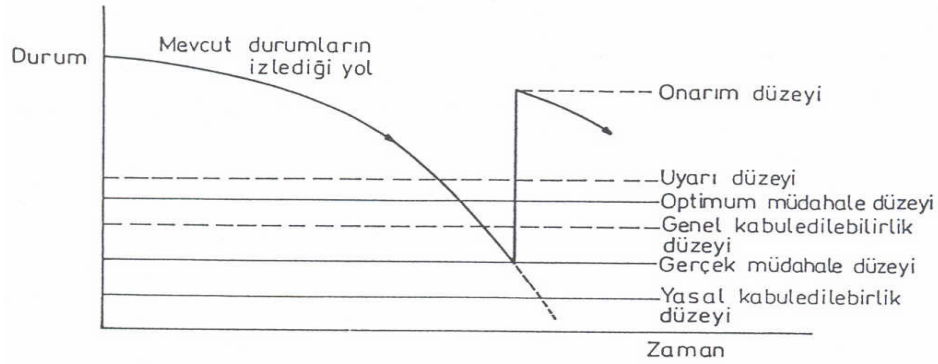
Bozulmaların belirlenmesi ve kaydedilmesinden sonra, gerekli müdahale önceliğini saptamak ve bakım gerektiren kesimleri belirlemek şeklinde bir yol izlenmelidir. Bunun için, kabul edilebilir yüzey durumlarına (kalite standartları) sahip olduğu varsayılan bir üstyapıyı referans alarak, gerçek üstyapı durumlarını tanımlayacak bir üstyapı değerlendirme sistemi geliştirmek gereklidir. Olabildiğince nesnel bir öncelik programının oluşturulması, tutarlı karar vermeyi sağlamak için zorunludur.

#### **3.2.1 Bir değerlendirme sistemi geliştirme**

Böyle bir sistemin geliştirilmesi, ölçümler ve gözlemler ile elde edilen üstyapı durumlarına ait verinin bulunmasını, kalite standartlarının, mevcut durumlar ile karşılaştırılacak referans ölçütleri olarak ifade edilmesini, bakım gereksinimleri ve önceliklerini saptamak için, gözlem verisi ve ona bağlı ölçülmüş veriye ait bir veri işleme ve sınıflama yönteminin geliştirilmesini gerektirir. Sonuçlar, bakım mühendislerine kolayca kullanılabilir şekilde sunulmalıdır. (Karan, 1976)

Değerlendirme sistemlerinin, ulusal veya bölgesel bir ağın tamamı üzerinde düzenli şekilde uygulanabilmesi için, ulusal veya bölgesel düzeyde istenen en geniş olası formatta geliştirilmesi gerekir. Böyle bir yönetim sistemi, yalnızca tüm yönetim düzeyleri tarafından kullanılabildeğinde etkili olacaktır.

Doğru zamanda tayin edilecek uygun bakıma olanak vermek üzere, değerlendirilen her bir bozulma veya üstyapı özelliği için çeşitli durum düzeylerini belirlemek esastır. Bunlar, müdahalenin ve onarımın yapılması gereken düzeylerdir.(bak şekil 3.1)



Şekil 3.1 – Farklı Bozulma ve Müdahale Düzeyleri Arasındaki İlişki

- Uyarı düzeyi, mevcut durumu daha yakından izlemeye gereksinim gösteren düzeydir.
- Optimum müdahale düzeyi, uzun süreli toplam sosyal bakım maliyetlerini en aza indiren düzeydir.
- Gerçek müdahale düzeyi, bakımın uygulamada yapıldığı düzeydir. Yönetim tarafından, mevcut kaynaklar ile bağlantılı olarak belli yol sınıfları veya grupları için ayrı ayrı düzenlenir.
- Yasal kabul edilebilirlik düzeyi, yasal olarak belirlenen minimum düzeydir.
- Yenileme (onarım) düzeyi, bir karayolu bileşeninin, eski durumuna getirildiği düzeydir.

Gerçek müdahale düzeyi değişen bir düzeydir. Bu düzey, ideal olarak optimum müdahale düzeyi ile çakışmalıdır. İstenen ise, bu düzeyin genel kabul edilebilirlik düzeyinin üzerinde olmasıdır. (Karan, 1976)

Kalite standartları, önlemin alınması gereken bozulma düzeyini, nerede uygun ve olası olduğunu, ne olması gerektiğini tayin eder. Standartlar, yüksek kaliteli bakım için esastır. Bunlar, gerçek durumun karşılaştırılabildiği, kıstaslar ve bakım gereksinimi önceliklerinin ölçülebilmesinden sağlanan bir baz olarak kabul edilmelidir.

Standartlar ve değerlendirme sistemi, üstyapı bakım mühendislerine, bilgi, deneyim ve kararlarını daha gerçeklere dayalı bilgi sağlayarak, daha nesnel biçimde kullanmaları için yardım ederler.

### 3.2.2 Önceliklerin saptanması

Gerçek öncelikler, yalnızca, bozulmaları, bakım gereksinimlerini etkilemelerine göre, onların görelî önemleri ile ilişkili olarak sayısal terimler halinde sıralamak suretiyle saptanabilir. Buna karşılık, bozulmaların görelî önemlerini değerlendirme ve buna göre sıralamaların yerini tayin etme, kalite standartlarını oluşturma ile birlikte çok öznel bir işlemdir. Sıralama yöntemleri, yolların trafik akışı ve fiziksel durumlarını göz önüne alarak, farklı yol uzunlukları arasındaki ve her bir yol uzunluğu içindeki değişik bakım gereksinimleri arasındaki öncelikleri göstermek amacıyla tasarlanmalıdır. (Karan, 1976)

Bu hususta benimsenen bir yaklaşım, tüm bozulmalar için, bir bozulmanın yoğunluğu veya şiddeti ile ilgili olarak, 0 ile 100 arasında değişen bir nokta ölçeği kullanmaktır. Böylece, ağırlıklı etkenler, bakım gereksinimini etkilemesine göre göz önüne alınan bozulma önemi ile ilgili temel sıralamalar ve trafik akımları ile ilgili trafik etkenlerine göre uygulanır. (Karan, 1976)

### 3.3 Yol Üstyapı Yönetim Sisteminin Yapısı ve Özellikleri

Yol üstyapı yönetim sisteminin yapısı basit bir veri tabanından (ağ düzeyinde büyük ölçekli planlama), çok karmaşık makro planlama düzeyinde uzman (expert) veya bilgi tabanlı (knowledge – based) sistemlere kadar değişiklik göstermektedir.

Bu iki yöntem arasında kullanıcı gereksinimlerine göre veri elde edilebilirliği ve planlama düzeyine bağlı olarak, çok değişik sistemler oluşturmak mümkün olmaktadır. Tipik bir yol üstyapı yönetim sisteminin yapısı aşağıda Şekil 3.2'de verilmektedir. (Haas, 1994)

- Seviye1. Ağ önceliği (Temel Sistem);

Mevcut ve gelecekteki bakım stratejileri ile ilgilenir. Prensip olarak, bütün yol ağlarının gözlenebilmesi ve aynı derecelendirmeden geçirilebilmesi için bütün yol ağlarına ihtiyaç vardır. Buna göre, yol ağ önceliği mevcut bozulma düzeyine, bozulma tipinin yaygınlığına ve trafik hacmine göre belirlenerek, basit bir sıralama önceliği tespit edilmek suretiyle bütçe ile karşılaştırılır.

- Seviye 2. Ağ önceliği ve proje değerlendirmesi (orta seviyede sistem);

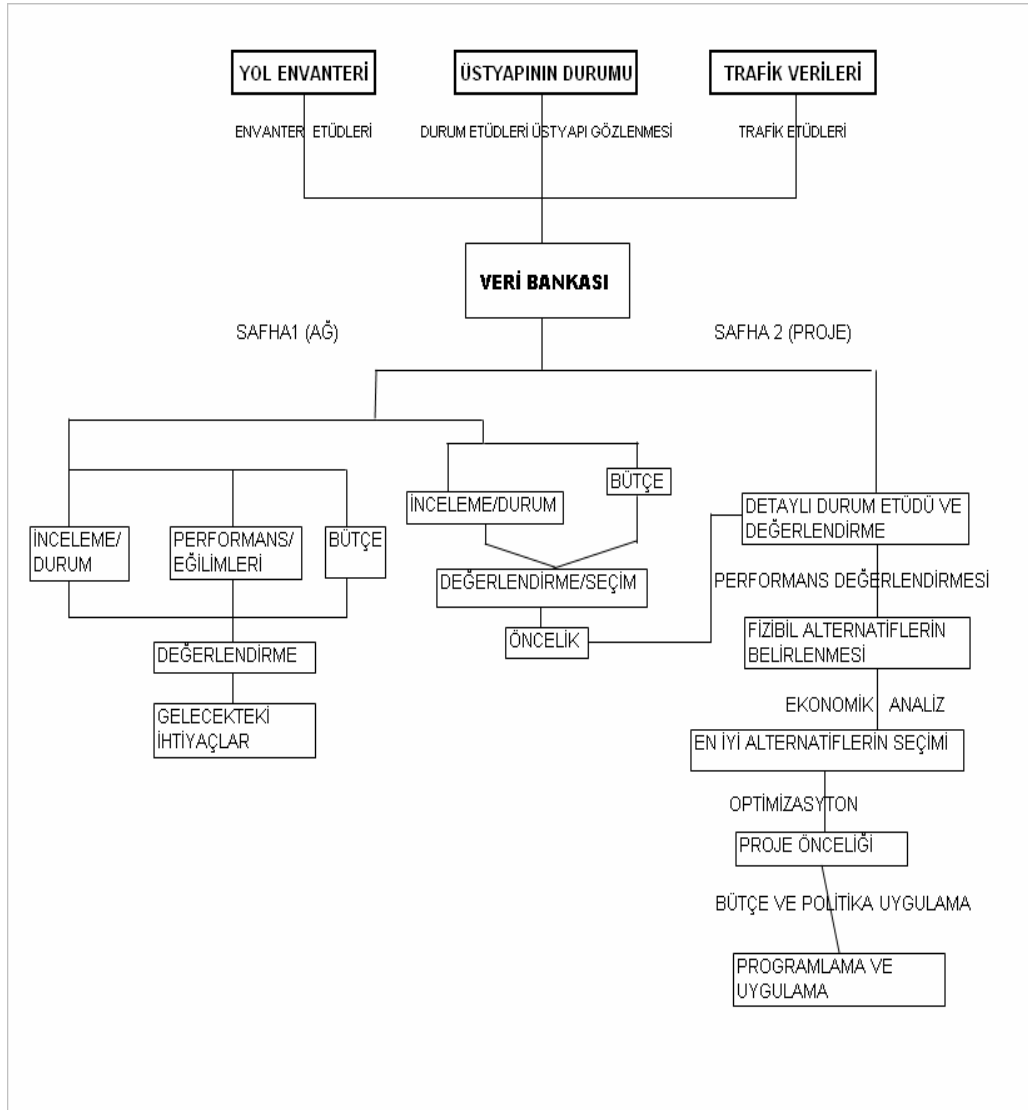
Çözüm değerlendirme işlemleri,

Üstyapı performans tahmin denklemlerinden yararlanarak, iyileştirme veya bakım alternatiflerinin değerlendirilmesi,

Sonra, değişik seçenekler arasında ömür döngü analizine gidilir (life cycle cost) ve uygulama için proje önceliklerinin neler olduğu tespit edilir.

- Seviye 3. Ağ Önceliği, proje değerlendirilmesi ve ağ iyilemeli ileri sistem;

En ileri olan sistemdir. Bütçe kısıtlarını dikkate alarak, problemi en uygun şekilde ele alır. Bu tür modeller için çok karmaşık yöneylem araştırması tekniklerine ihtiyaç vardır. (Haas, 1994)



Şekil 3.2 Üstyapı Yönetim Sistemi Çalışma Şeması (Haas, 1994)

### **3.4 Yol Üstyapı Bakım İşletim Sistemlerinde Veri Tabanı (Data Base) Kullanımı**

Yol üstyapı yönetim sistemi (ÜYS)'in kalbi veri tabanıdır. Veri tabanı, birbirleri ile sıkı ilişki halinde olan dosyaların işlenmesinden elde edilen verilerin bir kümesidir. ÜYS' de yol veri bankası kullanımı, yol ağı ile görevli kurumun işlerini kolaylaştırır. Bu aktiviteler, planlama, yapım, bakım ve yönetimdir. Bu aktivitelerin bir veya birkaçı için, belirli bir yol kesimi için bilgi gerektiğinde, günlük işlerde bir referans olarak kullanılabilir. Bunun dışında, veri bankası yeni yol standartlarının etkisini değerlendirmede ve ağ istatistiklerini elde etme gibi genel etütleri kolaylaştırır.

Bir yol üstyapı yönetim sistemi için oluşturulacak veri bankasında (veri tabanı programında) mevcut olan veri elemanlarının tanımları ve her bir bilginin nasıl elde edildiğini, nasıl ve hangi yöntemler kullanılarak ölçülmesi gerektiği açık bir şekilde ortaya konulmalıdır. Ayrıca, arazide ölçüm yapılan yerlerin bir referans sisteminin oluşturulması da gerekir. (Haas, 1994)

Bir yol üstyapı yönetim sistemi için oluşturulacak bir veri bankasında şu hususlara mutlaka dikkat etmek gerekir.

- Uygulamalar belirlenmeden önce mi, bütün mevcut veri elemanları işleme konulacak, yoksa önce uygulamalar tamamlanacak, ona göre mi veriler toplanacak?
- Veri bankası öncelik esasına dayanarak iş programı yapım merkezi yönetime yardımcı mı olacak, yoksa basit bir düzeyde yerel yönetimlerin iş programı yapmasında mı kullanılacak?

#### **3.4.1 Veri Bankasında Verilerin Referanslanması**

Bir veri bankasından istenen en temel özellik verilerin hangi yol ağına ve hangi yerleşim yerine ait olduğunun bir referans sistemi ile gösterilmiş olmasıdır. Üstyapı bakım yönetim sistemi veya genel olarak bir üstyapı yönetim sistemi için oluşturulacak veri bankasında, bu referanslama işi için birkaç metot kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılmakta olan iki yöntemde de yineceğiz.

a) Danimarka, Fransa ve Japonya'da kullanılmakta olan bu metotta, yolun her bir kilometresi başına bir işaret konulur ve bu şekilde verilerin hangi yerleşim yerine veya yolun hangi kesimine ait olduğu referanslanmaktadır. (Haas, 1994)

b) Ağ düğüm noktaları ile tanımlanan kısımlara ayrılır. Ayrılan bu düğüm noktaları özel olarak seçilmiş noktalardır. Örnek olarak, kavşaklar, sokaklar veya cadde isimlerinin değiştiği noktalar verilebilir. Burada en önemli husus, iki düğüm noktası arasındaki kısmın homojen olduğunun kabul edilmesidir. Bu metot, İsveç tarafından kullanılmaktadır.

Yukarıda bahsedilen bu bilgilerin ışığında yol üstyapı yönetim sistemi veya üstyapı bakım yönetim sistemi için hazırlanan veri tabanı (data base), sürekli olarak yeni bilgilerle (üstyapı durum etütleri, trafik ve kaza etütleri) beslenmeli ve üzerinde gerekli değişiklikler kolayca yapılabilir. Ayrıca, veri tabanı birçok kullanıcıya açık olmalı ve kullanıcı istekleri dikkate alınarak değiştirilebilir. (Haas, 1994)

### 3.4.2 ÜYS için Hazırlanan Bir Veri Bankasında Veri İçerikleri

Yol üstyapı yönetim sistemi için hazırlanacak olan bir veri bankasında Tablo 3.6'da belirtilen içeriklerin detaylı bir şekilde yer alması gerekmektedir.

Tablo 3.6 ÜYS İçin Hazırlanan Bir Veri Bankasında Veri İçerikleri

| VERİ İÇERİKLERİ      |  |
|----------------------|--|
| TANIM                | Yol Tanımlaması<br>Yol İdari Bölümleri   |
| TRAFİK               | Y.O.G.T.<br>10 Ton Dingil Yüğü Eşdeğeri  |
| GEOMETRİ             | Yol Genişliği<br>Banket Genişliği  |
| YOL ÜSTYAPI İNŞAATI  | Malzeme(*)<br>Elastisite Modülü(*)<br>Yaş(*)<br>Kalınlık(*)  |
| YOL ÜSTYAPI DURUMU   | Yüzey Bozulmalarının Ölçümlerinin Ortalaması Ve Sapması(+)   |
| PLANLAMA DÜŞÜNCELERİ | Genişletme İçin Alınan Kararlar  |
| ÇEVRE                | Gürültüye Hassas Komşuluk  |
| MAALİYETLER          | Kısıtlı Tamir İşlerinin Maliyetleri<br>Üstyapının Rehabilitasyon Maliyetleri<br>Standart Kullanıcı Maliyetleri |

### 3.4.3 Veri Bankasında Çıktı Ortamı

Bir yol veri bankasının içeriklerini değişik şekillerde sunmak mümkündür. Temel veri raporları, bilgi değiştirmek isteyen sorumlu kişilere bir kontrol mekanizması oluşturur. Ayrıca yol idaresinden sorumlu olan kişilere bir referansta teşkil eder.

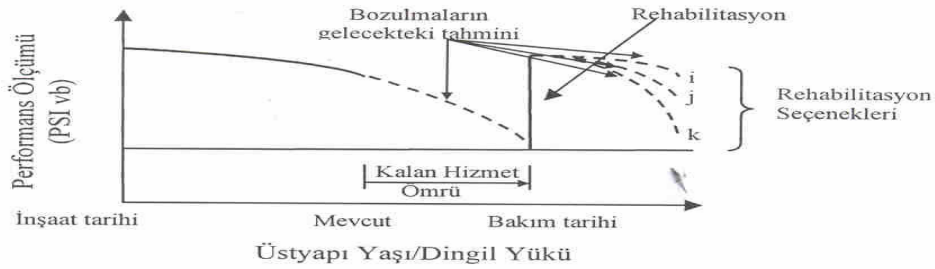
Datalar çeşitli şekillerde takdim edilebilir.

- a) Liste ve tablolarla (gruplandırılmış bilgi ve sonuç çıktıları)
- b) Diyagramlarla (tabloların değişik grafik gösterimleri)
- c) Yol ağı çizimleri (belirli koşulları sağlayan yolların çizimleri)
- d) Yol kısım profilleri (yol boyunca değişik bilgileri içeren çizimler)

#### 4. ÜSTYAPI PERFORMANSININ TAHMİN YÖNTEMLERİ

Bütün üstyapılar aynı zamanda incelenemeyeceği için, yolun incelendiği tarihte veya daha sonraki bir tarih için üstyapı kesiminin durumunun tahmin edilmesi gerekmektedir. Belirli bir zaman dilimi için, performans eğrileri kullanılarak tahmin yapılabilir. Performans tahmini için çeşitli modeller geliştirilebilir. Bir üstyapı ağındaki kesimler için gelecek yıllardaki durumu tahmin etmek amacıyla, bozulma için dikkate alınan ölçütlerdeki değişim oranını belirlemek gerekir. (Shahin, 2002)

Şekil 4.1, bir üstyapı kesiminde gelecekteki bozulma durumuna göre, bakım zamanını tahmin etmek için kullanılacak performans eğrisini şematik olarak göstermektedir. Ayrıca aynı şekil, bakım yılında uygulanan iyileştirme seçenekleri için bozulma modellerinin uygulamasını gösterir.



Şekil 4.1 Bir Üstyapının Performans Eğrisi ve İyileştirme Seçeneklerinin Etkisi

Herhangi bir tahmin modeli için gereken temel bilgiler şunlardır; (Haas, 1994)

- Bir veri tabanı (örnek olarak, yapım tarihi, YOGT, PSI, IRI, RN değeri vb.),
- Bozulmayı etkileyen tüm önemli değişkenlerin belirlenmesi,
- Gerçek yol koşullarını kapsayacak şekilde dikkatli bir model seçimi,
- Kriterlerin belirlenmesidir. (Örnek olarak, RN değeri 2,5 olduğunda onarım programına alınması)

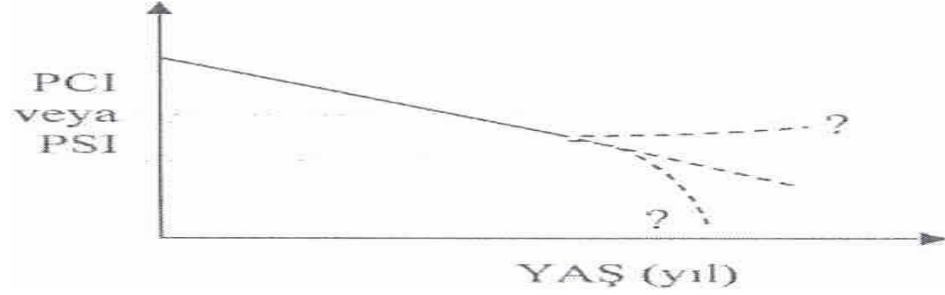
Üstyapı performans tahmini için kullanılan modeller aşağıdaki gibi gruplandırılabilir;

- Doğrusal azalan tahmin modeli,
- Çoklu regresyon modeli,
- Mekanistik-Ampirik model,

- d) En küçük kareler yöntemi ile polinom modeli,
- e) S-şekilli (logit) eğriler
- f) Olasılık dağılımı
- g) Yapay zeka modelleri.

#### 4.1 Doğrusal Azalan Tahmin Modeli

En basit performans tahmin yöntemidir ve iki ölçüm noktasından azalan bir doğru ile gelecekteki durum tahmin edilir. Model, geçmişteki trafik yükleri ve bakım düzeylerinin gelecekte de değişmeyeceğini varsayar. Yapımdan sonra performans tahmini için en az bir ölçüm gerekir. Şekil 4.2, doğrusal azalan tahmin modelinin şematik bir gösterimidir. (Shahin, 2002)



Şekil 4.2 Doğrusal Azalan Tahmin Modeli

#### 4.2 Çoklu Regresyon Modeli

Üstyapı bozulmaları veya takviye tabakası tasarımı gibi durumlarda kullanılması faydalı olur. Bu tip modellere iyi bir örnek Querioz (1983) tarafından geliştirilen doğrusal elastik modeldir. Bu model ile düzensüzlük veya çatlak gelişimi kullanılarak çeşitli uygulamalar yapılabilmektedir. Düzensüzlük için aşağıdaki eşitlik geliştirilmiştir. (Haas, 1994)

$$\text{Log}(QI) = 1,297 + 9,22 \cdot 10^{-3} \text{YAŞ} + 9,08 \cdot 10^{-2} \text{ST} - 7,03 \cdot 10^{-2} \text{RH} + 5,57 \cdot 10^{-4} \text{SEN1LogN} \quad (4.1)$$

Burada,

QI= Düzensüzlük (tekrar/km)

YAŞ= Üstyapının yaşı (yıl)

ST= Yüzey durumu (yeni inşa edilen üstyapı için 0, takviye edilmiş üstyapı için 1)

RH= İyileştirme durum göstergesi (yeni inşa edilen üstyapı için 0, takviye edilmiş

üstyapı için 1)

SENI = Asfalt tabakanın altındaki şekil değiştirme enerjisi (10-4 kgf cm)

N=Yığılımlı tek yükü eşdeğeri (EDYS)

Bu eşitliğin regresyon katsayısı ( $R^2= 0,52$ ) ve standart sapması 0,11 'dir.

Bir diğer tahmin eşitliği ise çatlak için önerilmiştir.

$$CR = -8,70 + 0,258HST * \log N + 1,006 * 10^{-7} HST * N \quad (4.2)$$

Burada,

CR= Üstyapı çatlak alanı yüzdesi,

HST=Asfalt tabakanın altındaki yatay gerilme

N=Yığılımlı dingil yükü eşdeğeri (EDYS)

Bu eşitliğin regresyon katsayısı ( $R^2= 0,54$ ) ve standart sapması 0,154' tür.

Doğrudan regresyon, özellikle uzun süreli veri tabanını gerektirir. Örnek olarak, bozulma modeli geliştirmek için üstyapıya ait 25 yıllık veriler kullanılarak geliştirilmiş eşitlik ise;

$$RCI = -5,998 + 6,870 \log_e(RCI_B) - 0,162 \log_e(YAŞ^2 + 1) + 0,185YAŞ - 0,084YAŞ \log_e(RCI_B) - 0,093\Delta YAŞ$$

Burada, (4.3)

RCI = Herhangi bir YAŞ 'ta Sürüş Konforu İndeksi (0-10)

RCIB= Bir önceki RCI

YAŞ=Üstyapının yaşı

$$\Delta YAŞ = 4 \text{ yıl}$$

Bu eşitliğin regresyon katsayısı ( $R^2= 0,84$ ) ve standart sapması 0,38'dir.

Benzer şekilde, Washington şehrinde uzun süreli üstyapı performansı veri tabanını esas alan eşitlik aşağıdaki şekilde geliştirilmiştir.

$$PCR = C - m * AP \quad (4.4)$$

Burada,

PCR=Üstyapı Durum Oranlaması (0-100)

C= 100

M= Eğim katsayısı

A= Üstyapının yaşı, yıl

p= Bir sabit (eğrinin şekline göre)

Tablo 4.1' de farklı üstyapı tipleri için eşitlik 4.4 kullanılarak oluşturulmuş standart performans eğrisi örnekleri görülmektedir. (Haas, 1994)

Tablo 4.1. Farklı Üstyapı Tipleri İçin Performans Eğrisi Örnekleri

| Bölge      | İnşaat Tipi/<br>Üstyapı Yüzeyi                                      | Analiz<br>Birim<br>sayısı | Performans<br>eşitliği          | PCR'nin 40<br>olacağı yaş |
|------------|---|---------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| Washington | Yeni veya yeniden<br>inşa edilmiş<br>BSK                            | 2                         | $PCR = 100 - 0,086(YAŞ)^{2,50}$ | 13,7                      |
|            | Yeni veya yeniden<br>inşa edilmiş<br>Asfalt Betonu                  | 26                        | $PCR = 100 - 0,22(YAŞ)^{2,00}$  | 16,5                      |
|            | Yeni veya yeniden<br>inşa edilmiş<br>Beton Yol                      | 19                        | $PCR = 100 - 0,85(YAŞ)^{1,25}$  | 30,1                      |
|            | Yeniden kaplanmış/<br>Asfalt üzeri<br>BSK                           | 5                         | $PCR = 100 - 8,50(YAŞ)^{1,25}$  | 4,8                       |
|            | Yeniden kaplanmış/<br>BSK üzeri<br>BSK                              | 6                         | $PCR = 100 - 3,42(YAŞ)^{1,50}$  | 6,8                       |
|            | Yeniden kaplanmış/<br>Asfalt betonu<br>takviye(1,2 inçten az)       | 75                        | $PCR = 100 - 0,58(YAŞ)^{2,00}$  | 10,2                      |
|            | Yeniden kaplanmış/<br>Asfalt betonu<br>takviye(1,2-2,4 inç)         | 126                       | $PCR = 100 - 0,76(YAŞ)^{1,75}$  | 12,1                      |
|            | Yeniden kaplanmış/<br>Asfalt betonu<br>takviye(2,4 inçten<br>fazla) | 19                        | $PCR = 100 - 0,54(YAŞ)^{1,75}$  | 14,8                      |

### 4.3 Mekanistik-Ampirik Model

Mekanistik-ampirik yaklaşım ile modelleme, sadece üstyapının tepkisini (gerilme, şekil değiştirme ve bükülme) hesaplamak için kullanılabilir. Bu tepkiye genellikle trafik, iklim veya her ikisi birlikte neden olur. Gerilme ve şekil değiştirme hesaplaması için mekanistik modeller kullanılamayabilir, ancak hesaplamalardan sonra regresyon yöntemi kullanılarak performans tahmini yapılabilir. Bu nedenle yöntemin adı mekanistik-ampirik modeldir. Üstyapının yorulma ömrü için mekanistik-ampirik bir model örneği aşağıdaki gibidir.

$$N = A \left( \frac{1}{e} \right)^B \quad (4.5)$$

Burada,

N= yorulma ömrü

e= birim şekil değiştirme

A ve B ise sabit

Bu tahmin modelinde birim şekil değiştirme (e), mekanistik olarak elde edilir. A ve B katsayıları ise regresyon yöntemi ile elde edilir (Shahin, 2002).

#### 4.4 En Küçük Kareler Yöntemi ile Polinom Modeli

Bağımlı değişkenleri ( $p'(x)$ ) (PCI veya düzgünsüzlük) bir x değişkeninin (yaş veya trafik) bir fonksiyonu olarak tahmin etmek için kullanılan en iyi yöntemlerden biridir. Örnek olarak, PCI ve yaş arasındaki beklenen çok terimli eğri;

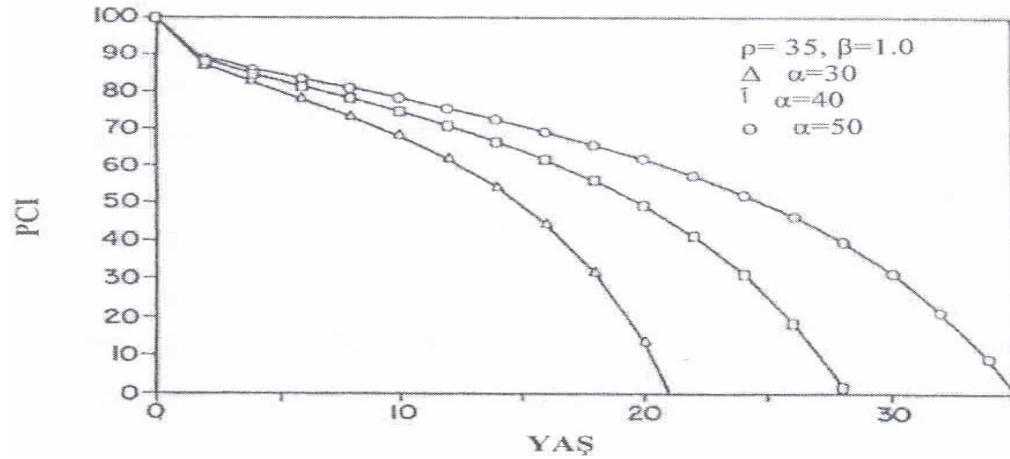
$$p'(x) = a_1 + 2a_2x + 3a_3x^2 + \dots + na_nx^{n-1} \quad (4.6)$$

#### 4.5 S-Şekilli (Logit) Eğriler

Polinom modele benzeyen S-şekilli eğri tekniği, üstyapı yaşı ile PCI ilişkisi için kullanıldığında daha iyi sonuç verir. Bu model aşağıdaki şekildedir.

$$PCI = \left( \frac{100 - \rho}{\ln(\alpha) - \ln(YAŞ)} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (4.7)$$

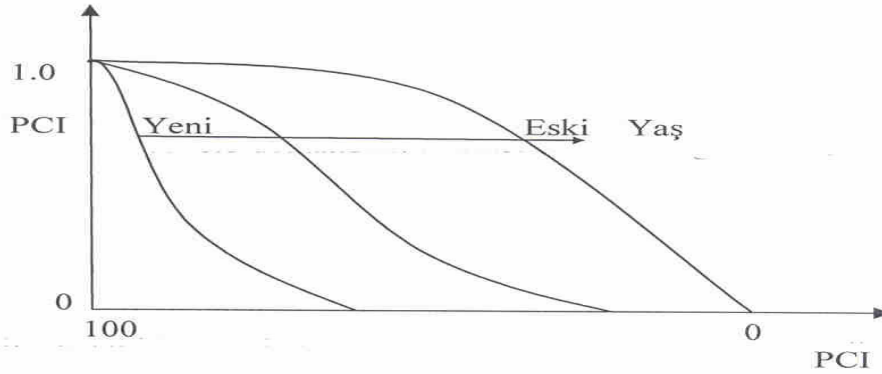
Burada,  $\rho$ ,  $\beta$  ve  $\alpha$  kısıtlardır.  $\alpha$  kısıtı Şekil 4.3' de görüldüğü gibi PCI değerleri 0' a ulaşana kadar tüm yaş değerleri için PCI değerini tahmin eder. Bu üç kısıt, regresyon çözümlemesi ile belirlenir (Shahin, 2002).



Şekil 4.3 S Şekilli Eğriler

#### 4.6 Olasılık Dağılımı

Olasılık dağılımı, bir rasgele değişkenin alabileceği tüm değerleri ile ilişkilendirilme olasılıklarını tanımlar. Örnek olarak, rasgele değişken PCI olarak seçilirse, olasılık yoğunluk fonksiyonu, yığışimli yoğunluk fonksiyonu ile tanımlanabilir. Şekil 4.4, yığışimli dağılım fonksiyonunu göstermektedir. Şekildeki düşey eksen, belirli bir "PCI" değerine eşit veya daha az olma olasılığıdır. Bu şekil, seçilen PCI değeri için zamana bağlı olasılıkların "hayatta kalma eğrisini" göstermektedir. Bu teknik özellikle bireysel bozulma tahmini için yararlıdır. (Shahin, 2002)



Şekil 4.4 Üstyapı Yaşının Farklı Noktalarında Yığışimli Yoğunluk Eğrisi

#### 4.8 Yapay Zeka Modelleri

Yeni teknolojilerin üstyapı yönetim sistemlerinde kullanımı her geçen gün artmaktadır. Uzman sistemler, insan deneyimlerini kullanan en yaygın yöntemdir. Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte özellikle mühendislik uygulamalarında, önemli bir uygulama alanı bulan yapay zeka yöntemleri performans tahmininde de kullanılmaktadır. Yapay zeka teknikleri genel olarak bulanık mantık, yapay sinir ağları (YSA) ve genetik algoritma yönteminden oluşur.

Roberts ve Atttoh-Okine (1998), tekerlek izi, enine çatlak, blok kırılma ve eşdeğer dingil yükü sayısı (EDYS) verileri ile düzgünlük indeksi (IRI) tahmini yapan iki farklı YSA modeli kurmuştur.

Owusu-Ababio (1998), YSA yöntemiyle, üstyapı yaşı, tabaka kalınlığı ve EDYS verileri kullanarak, çatlak genişliğini tahmin eden bir model geliştirmiştir.

Atttoh-Okine (1999), tekerlek izi, enine çatlak, blok kırılma ve eşdeğer dingil yükü verileri ile IRI tahmini yapan bir YSA modeli kurmuştur.

Attoh-Okine (2001), yıllık ortalama günlük trafik (YOGT), eşdeğer dingil yükü, ya, timsah sırtı çatlak, kenar çatlağı, evre etkenleri, üstyapı kalınlığı, oyuk, tekerlek izi ve yama verileri ile IRI tahmini yapan bir YSA modeli kurmuştur.

Madanat vd. (2002), AASHO tarafından geliştirilen yol verilerini kullanarak çeşitli regresyon modelleri geliirmitir.

## 5. BULANIK MANTIK

### 5.1 Belirsizlik Kavramları

Her insan günlük hayatında kesinlik arz etmeyen durumlarla karşılaşır. Bu durumların sistematik bir şekilde önceden planlanarak, sayısal öngörülerinin yapılması ancak bir takım kabul ve varsayımlardan sonra mümkün olabilmektedir. Bulanık mantığa kadar yapılan mühendislik araştırmalarında ve modellemelerinde, bu varsayım, kabul ve kavramlara kesinlik kazandırmak için değişik çalışmalarda bulunulmuştur. Büyük ölçeklerden küçük ölçeklere doğru gidildikçe, incelenen olayların kesinlikten uzaklaşarak belirsizlikler içeren yönlere doğru gitmeleri söz konusudur. Örnek olarak, çok uzakta bulunan bir cisme bakıldığında, bunun nokta şeklinde algılanması onun boyutsuz ve şekilsiz olduğu sonucuna varmamıza neden olur. Bu cisim bize yaklaştıkça, bir boyutludan önce tepsi gibi, iki daha sonra da sanki üç boyutlu hale dönüşür. Böylece boyutlar arasında kesin bir geçişten çok, tedricen bir değişimin olduğu düşüncesine varılabilir. Bu konuda, Mandelbrot (1982) tarafından ilkeleri açıklanan kesitli fraktal geometrisinde boyutlar ondalık sayıdır. Doğanın geometrisi denilen fraktal geometrisi, belirsiz ve gelişigüzel şekillerin incelenmesine yaramaktadır.(Şen, 1999)

Gerçek dünya karmaşıktır. Bu karmaşıklık genel olarak belirsizlik, kesin düşünce ve kararlar verilemeyeiştten kaynaklanır. Birçok sosyal, iktisadi ve teknik konularda, insan düşüncelerinin tam anlamı ile olgunlaşmamış oluşundan dolayı, belirsizlikler her zaman bulunur. İnsan tarafından geliştirilmiş olan bilgisayarlar, bu türlü belirsizlikleri işleyemezler ve çalışmaları için sayısal bilgilere ihtiyaç duyarlar. Gerçek bir olayın tam olarak kavranılması, insan bilgisinin yetersizliği sonucunda tam anlamı ile mümkün olmadığından, insan düşünce sisteminde ve zihninde bu gibi olayları yaklaşık olarak canlandırarak yorumlar. Bilgisayarlardan farklı olarak, insanın yaklaşık düşünme, eksik ve belirsizlik içeren bilgi ile işlem yapabilme yeteneği vardır. Bu yetenek bilgisayarlarda bulunmaz. Genel olarak, değişik biçimlerde ortaya çıkan karmaşıklık ve belirsizlik gibi kesin olmayan bilgi kaynaklarına bulanık kaynaklar adı verilir.

1973 yılında Zadeh tarafından, gerçek dünya sorunları ne kadar yakından incelenmeye alınır, çözümün daha da bulanık hale geleceği ifade edilmiştir. Bunun nedeni, çok fazla olan bilgi kaynaklarının tümünü, insan aynı zamanda ve etkileşimli olarak kavrayamaz ve bunlardan kesin sonuçlar çıkaramaz. Burada bilgi kaynaklarının, temel ve kesin bilgilere ilave olarak, özellikle sözel olan bilgileri de içerdiği vurgulanmalıdır. İnsan sözel düşünebildiğine ve bildiklerini başkalarına sözel ifadelerle aktarabildiğine göre, bu ifadelerin kesin olması söz konusu olamaz.

Bir sistem hakkında ne kadar fazla öğrenerek bilgi sahibi olursak, onu o kadar iyi anlayabiliriz ve sistem hakkındaki karmaşıklıkları da o derece azaltabiliriz, ancak tamamen yok edemeyiz. İncelenen sistemlerde, karmaşıklığı ne kadar fazla veri bulunursa, bulanıklık o kadar etkili olacaktır. Bu sistemlerin çözümlerinin araştırılmasında, bulanık olan girdi ve çıktı bilgilerinden, bulanık mantık kurallarının kullanılması ile anlamlı ve yararlı çözüm çıkarımlarının yapılması yoluna gidilebilir.

Bulanık ilkeler hakkında ilk bilgiler, Azerbaycan asıllı Lütfü Asker Zade (Zadeh, 1965) tarafından literatüre sokulmuştur. Bu fikirler, batı dünyasında şüphe ile karşılanmış ve oldukça yoğun eleştiri almıştır. Bunun ana sebebi, batı kültürünün temelinde ikili mantık, yani Aristo mantığının yatması ve olaylara evet-hayır, beyaz-siyah, kurak-sulak, artı-eksi vb. gibi ikili esasta yaklaşılmasıdır. Bu iki değer arasında başka seçeneklere, kesin olmadığı düşüncesi ile hiç yer verilmez. Batı toplumunda bulanık kelimesi güvenirsizliği ifade eder. Ancak, 1970'li yıllardan sonra doğu dünyasında ve özellikle de Japonya' da bulanık mantık ve sistem kavramlarına önem verilmiştir. Bu sistemlerin, teknolojik cihaz yapım ve işleyişinde kullanılması sonrasında, tüm dünyada yaygın bir biçimde tanınmışlardır.(Şen, 1999)

Bulanık kavram ve sistemlerin, dünyanın değişik araştırma merkezlerinde dikkat kazanması, 1975 yılında Mamdani ve Assilian tarafından yapılan gerçek bir kontrol uygulaması ile olmuştur. Bu araştırmacılar, ilk olarak bir buhar makinesi kontrolünün, bulanık sistem ile modellenmesini başarmıştır. Bu ön çalışmadan, bulanık sistemlerle çalışmanın ne kadar basit ama sonuçlarının ne kadar etkili olduğu anlaşılmıştır.

İlerleyen yıllarda, Holmblad ve Östergaard(1978), bulanık sistem uygulamasını bir çimento fabrikasının işletilmesi ve kontrolü için yapınca, artık bulanık kavramlar

dünyanın birçok yerinde kullanılmaya başlanmıştır. Bu geçiş, batıda çok yavaş olurken, doğuda ve özellikle de Japonya, Singapur, Kore ve Malezya'da fazlaca kendisini göstermiştir. Teknolojiye duyarlı olan Japon mühendisleri, bulanık kontrol birimlerini kurmanın ne kadar kolay olduğunu görerek, bunları birçok cihazın yapımında kullanmaya başlamışlardır. Bulanık sistemlerin elektrikli süpürgeler, çamaşır makineleri, asansörler, metro ve şirket işletimi gibi konularda yaygın bir biçimde kullanılmasında, 1980 sonrasında patlama olmuştur. Son yıllarda birçok mühendislik dallarında, veri tabanlarının sözelleştirilmesinde, tele sekreterlerin cevaplamasında ve birçok konularda dünyada kullanılır hale gelmektedir. Değişik bilim ve mühendislik konularını yayınlayan uluslararası dergilere bakıldığında, hemen her mühendislik konusunda ve teknolojik çalışmalarda artık bulanık sistem kontrollerinin ve hesaplamalarının yaygınlaştığı görülmektedir.(Şen, 1999)

## **5.2 Belirsizlik ve Kesin Olmayış**

Bulanıklık, (mantık, sistem, küme) belirsizliğin bir ifadesi olarak karşımıza çıkar. Geçmişte, belirsizliklerin işlenmesi ve anlamlı sonuçlara varılabilmesi için ihtimaller teorisi kullanılmıştır. Matematik ve mühendislikte bu teori, belirsizlik durumlarında istatistik yöntemlerle birlikte kullanılır. Bu nedenle, bütün belirsizliklerin gelişigüzel karakterde olduğu kavramı yerleşmiştir. Rasgeleliğin en önemli özelliği, sonuçların ortaya çıkmasında tamamen şans olayının rol oynaması, gerekli öngörülerin ve tahminlerin kesin bir doğrulukla önceden yapılamamasıdır. Günlük hayatta karşılaşılan belirsizliklerin çoğunun tesadüf olmadığı kolayca anlaşılabilir. Rasgele karakterde olmayan olayların, örneğin, sözel belirsizlikler halinde inceleme ve sonuç çıkarma işlemlerinde, ihtimal teorisi ve istatistik gibi sayısal belirsizlikleri gerektiren yöntem bilimler kullanılamaz.(Şen, 1999)

Etrafımızda ilgimizi çeken birçok sorunun yorumlanmasında, sayısal bilgidен çok kendi görüş ve düşüncelerimizi sözel olarak ifade ederek, olayları inceleriz. Bu ifadelerin anlamlı olmaları ve başkalarına iletilebilmesi için, mutlaka her insanın en az bir dil konuşmaya ihtiyacı vardır. Dil ne kadar kesin olmayan kelime ve cümleleri içerse de, insan iletişimde ve bilgi akışında kullanılan en etkin araçtır. Örnek olarak, 'hava sıcak' denildiğinde herkes hava kelimesinin günlük hayattaki kullanımını kesinlikle anlamakta,

ancak 'sıcak' kelimesinin ifade ettiği anlam göreceli olarak birbirinden farklı olabilmektedir. Kutuplarda bulunan bir kişinin sıcak için 15 °C' yi algılamasına karşılık, ekvatorlarda yaşayan bir kişi için bu değer 35 °C' yi bulabilir. Böylece, 'sıcak' kelimesinin altında insanların ima ettiği sayısal anlayışın bir sonucu olarak, belirsiz bir durum ortaya çıkar. Bu rasgele değildir ancak belirsizdir ve bu şekilde kelimelerin algılanmalarındaki belirsizliklere bulanıklık denir. Bazı insanların sıcaklığı 15 °C, bazılarının ise 35 °C gibi oldukça farklı algılamasına karşılık, bu insanlar arasında bir ihtilaf bulunmaz. Aristo mantığı geçerli sayılacak olsaydı, bu iki grup insan arasında sürekli anlaşmazlıklar bulunacaktı. Bunun nedeni, Aristo mantığında sadece sıcak veya soğuk ifadesi olması, ikisi arasına değer verilmemesidir. Böylelikle, bulanık mantığın sayılardan çok, sözel kelimeleri esas aldığı anlaşılmalıdır.(Şen, 1999)

İnsanın fizik olayları hakkındaki bilgi ve yorumlarının çoğu, kişisel görüşleri şeklinde ortaya çıkar. Bu bakımdan, insan düşüncesinde sayısal olmasa da belirsizlik, faydalı bir bilgi kaynağıdır. Mühendislik modellemelerinde, kesinliğin kazanılması durumunda maliyetlerin artması ve zamanın uzaması söz konusudur. Bunun nedeni, maliyetle kesinlik arasında doğru orantı bulunmasıdır. Olayın bulanık mantık ile incelenmesinde, araştırmacı veya mühendisin her şeyden önce yapacağı çıkarımların, belirli tolerans sınırları içinde kalmasına karar vermesi gerekir. Yüksek kesinlik sadece yüksek maliyetleri değil, aynı zamanda sorunun çözülmesinin çok karmaşıklaşmasına da sebep olur.

Bir sorunun çözümlenmesine başlamadan önce, mühendis toplayabildiği kadar sayısal ve sözel verileri göz önünde tutarak, çözüm için en uygun yöntem hakkında karar vermelidir. Bir annenin çocuğuna fırına koyduğu keklerin pişmesi durumunda, fırını kapatmasını söylemesi için ya sayısal olarak sıcaklığın hangi dereceye kadar devam etmesini ya da basit olarak keklerin üstünün açık kahverengi olmaya başlaması halinde kapatmasını söyleyebilir. Bunlardan birinci tür bilgi bulanıktır ve sayısal yönleri belirtmesine karşın kesinlikle bilinmemektedir. İkinci tür sözel bilginin ise yani renk bilgisinin, birçok kişi tarafından tercih edilebileceği gerçektir. Bu durumda, böyle bilgileri bilgisayarlara tanıtılarak, bulanık işlemlerin yapılmasını sağlama yoluna gidilmelidir. İşte bu yoldaki en geçerli yöntem bilim, bulanık küme, mantık ve sistemlerdir. Yukarıdaki kek örneğinde, sıcaklığın 60 °C olması gibi bir bilgiyi

uygulamak oldukça zordur ancak keklerin piştiğini açık kahverengi rengin belirlenmesini, bir çocuk bile anlayabilmektedir.(Şen, 1999)

### 5.3 Belirsizlik Yöntemleri

Yukarıda kısaca bahsedilen belirsizlik durumu aslında doğa, sosyal, toplum ve fizik olaylarının hepsinde olduğu, insanlar tarafından anlaşılmıştır. Örnek olarak, matematik hesaplamaların sadece belirgin yöntemlerle çözümlenmesinin yetersiz olduğu, nasıl 17. yüzyılda şans oyunlarının hesaplanmalarının düşünülmesi ile anlaşıldı ise, ilerleyen yıllarda yapılan bilimsel çalışmalar belirgin yönere gideceğine, belirsizlik yöntemlerinin gelişmesi ve hesaplamalara karışması yönlerinde olmuştur. Sanayi devriminin 18. yüzyılda gelişmesi ile elde edilen bilgi ve bilimsel sorgulamalar sonunda ortaya çıkan, termodinamik yani ısı iletimi olayının moleküler seviyede tamamen belirsizlik yöntemleri ile çözümlenebileceği anlaşılabilir, belirsizliğin bilimsel ölçütü olarak entropi kavramı karşımıza çıkmıştır. Bunun anlamı, doğal ve fizik olayların sürekli olarak belirsizliklerinin arttığı ve kesinlikle azalmadığı yani, bir düzensizliğe doğru gelişme bulunduğudır. Bir bakıma entropi, belirsizlik ve düzensizliğin ölçüsüdür. Belirsizliğin ve düzensizliğin arttığı bir dünyada doğal olarak, bunları objektif biçimlerde kontrol edebilecek belirsizlik yöntemlerine önem verilmelidir.(Şen, 1999)

Son yüzyıl içinde yapılan bilimsel devrimlerin tümü, belirsizlik ilkelerini ve bunların sonucunda geliştirilen yöntemleri içermektedir. Örnek olarak, daha 20. yüzyılın başında fizikçiler bundan sonra fizikte yapılacak bir şey kalmadı, her şey belirlilik yöntemleri olan Newton ilke ve kanunları ile açıklanabilir diyerek bir genelleme yapmışlardır. İlerleyen yıllarda, molekül ve atom altı yapılarla uğraşan fizikçilerin, belirgin yöntemlerin bu olayları inceleyemeyeceği sonucuna varmaları, bilim adamları arasında bir huzursuzluğa neden olmuştur. Yapılan araştırmalar sonucunda klasik, yani Newton fiziğini devrim yaparak yıkan Kuantum fiziği ortaya çıkmıştır.

İnsanların bütün tasarımlarında kullandıkları yaklaşık 2000 yıllık Öklit geometrisi, 1970'li yıllarda yerini artık daha doğal olayların geometrisini yapabilen fraktal yani kesirli geometriye bırakmıştır. Öklit geometrisinde noktanın 0, doğrunun 1, yüzeyin 2 ve hacmin 3 boyutlu olduğu varsayılmıştır. Bu varsayımlar birer belirginlik örneğidir.

Fraktal geometrisinde ise belirsizlik işin içine girerek, incelenen her şeklin kesirli boyutlarının olabileceği ileriye sürülmüştür. Örnek olarak, çok girintili çıkıntılı olan Türkiye'nin Ege sahillerinin uzunluğunun 1 boyutunda değil, 1,32 gibi bir boyuta sahip olabileceği söylenebilmektedir.

Belirgin fizik ve matematik kurallarının bir araya gelmesi ile elde edilen madde, enerji ve momentumun korunumu ilkeleri ile akışkanlar mekaniğinde ve diğer akla gelen her türlü durumlarda geçerli olan diferansiyel denklemler elde edilmiştir. Aslında, bunların çözülmesi ile incelenen olayın gelecek durumlarının tahminleri yapılır. Başlangıç ve sınır koşulları işin içine girer. Diferansiyel denklemler çok ideal sınır ve başlangıç koşulları için analitik olarak çözülebilir. Büyük bir kısmının, özellikle mühendislik gibi uygulamalı alanlarda kullanılması için, çözülmesinde sayısal yöntemler kullanılır. Çözümlerinin belirgin olduğu düşünülen bu diferansiyel denklemlerin, sonuçlarının kesin olmadığı ve belirsiz çözümler içerdiği, son 30 yılda anlaşılmıştır.

Son 30 yıla kadar sürekli kullanılan belirgin mantık ve özellikle Aristo mantığı yerine, belirsizlik içeren ve bugün Azerbaycanlı bilim adamı Lütfü Askerzade tarafından 'fuzzy' veya Türkçe bulanık denilen bir mantık yapısı değişik teknolojik cihazlarda kullanmaya başlanmıştır. Günlük konuşma dilinde geçen sözel belirsizlikleri, modelleme veya hesaplamalar yapılırken işin içine katılması yolu seçilmiştir. Günümüz teknolojisinin, çamaşır makinesi, elektrikli süpürgesi, araba, asansör, yapay zeka, modelleme gibi birçok atılımları son günlerde bulanık mantık yöntemlerinin katılımı ile geliştirilmektedir.

Yukarıda anlatılanlardan sonra, belirsizliğin her tarafta bulunduğu ve bunların nesnel olarak incelenmeleri için bazı teknik, yöntem, algoritma ve yaklaşımların, geleneksel matematik (diferansiyel denklem, türev) dışında belirsizliği yakalayabilecek ve onu sayısallaştırabilecek kuralları olan bazı bilimsel yöntemlere ihtiyaç olduğu anlaşılmıştır. Bu tür konular için geçerli olabilecek olasılık, istatistik, stokastik, fraktal, kaotik, pertürbasyon, kuantum gibi değişik belirsizlik yöntemleri bulunmaktadır. Bunların en eskisi ve diğerlerinin anlaşılması için gerekli olanı olasılık yöntemleridir.(Şen, 1999)

#### 5.4 Bulanık Kümeler ve Üyelik Dereceleri

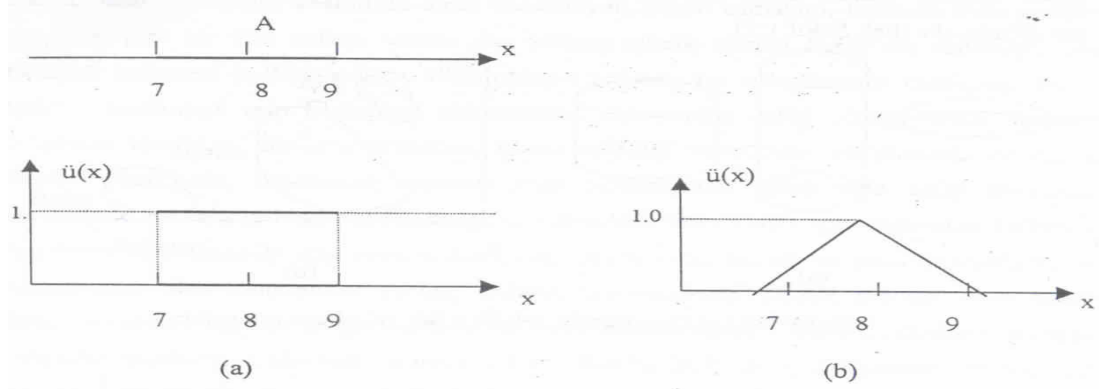
Belirsizlik durumları arasında, sözel olanlarının mükemmel olmayan bilgi içeriği olması açısından, daima yaklaşıklık ve bulanıklık içerdiği anlaşılmaktadır. Belirsizlik durumlarında en uygun yöntem bilim esasının, küme elemanlarına değişik üyelik derecelerinin verilmesi ile olacağı Lütü Askerzade tarafından 1965 yılında belirtilmiştir. Aristo mantığına göre insanlar boy bakımından ya uzundur ya da uzun değildir. Zadeh yaklaşımına göre ise uzun boyluluğun değişik dereceleri vardır. Uzun boylulardan bir tanesi gerçek uzun boylu olarak esas alınır, ondan biraz daha uzun veya kısa olanlar uzun boylu değil diye tanımlanamazlar. Esas alınan, uzun boyluluğun altında ve üstündeki boylar o kadar kuvvetli olmasa bile, uzun boylular kümesine girmesidir. Böylelikle, dünyadaki insanlar kümesindeki tüm insanların, boy açısından bir uzunluk üyelik derecelerinin bulunduğunu söyleyebiliriz. Bunu biraz daha küçük ölçekte, Türkiye' de bulunan insanların, "insan toplumu" kümesinin bir ögesi olduğu düşünülürse, bunlarında her birinin uzun boyluluk açısından üyelik derecelerinin bulunduğunu söyleyebiliriz.(Şen, 1999)

Aristo mantığına göre çalışan klasik küme kavramında, bir kümeye giren öğelerin üyelik dereceleri 1'e, o kümeye ait olmamaları durumunda ise 0'a eşit olduğu varsayılmaktadır. Bu ikisi arasında hiçbir üyelik derecesi düşünülmez, ancak bulanık kümeler kavramında 0 ile 1 arasında değişen üyelik derecelerinden söz etmek mümkündür. Zadeh, küme öğelerinin üyelik derecelerinin 0 ile 1 arasında değişebileceğini ileriye sürerek, kümeler teorisinde geniş uygulamaya sahip ve doğal hayatla uyumlu olan bulanık küme teorisini geliştirmiştir. Bu kadar basit temeli olan bulanık kümeler kavramının, 1980'li yıllar sonrasındaki teknoloji ve bilimsel çalışmalarda etkisi büyük olmuştur. Bu şekilde tanımlanan üyelik derecelerinin, her bir bulanık söz için üç temel özelliği sağlaması tanım olarak gerekmektedir. Bunlar,

a) Bulanık kümenin normal olmasıdır. Bunun için en azından, o kümede bulunan öğelerden bir tanesinin, en büyük üyelik derecesi olan 1'e sahip olması gerekmektedir.

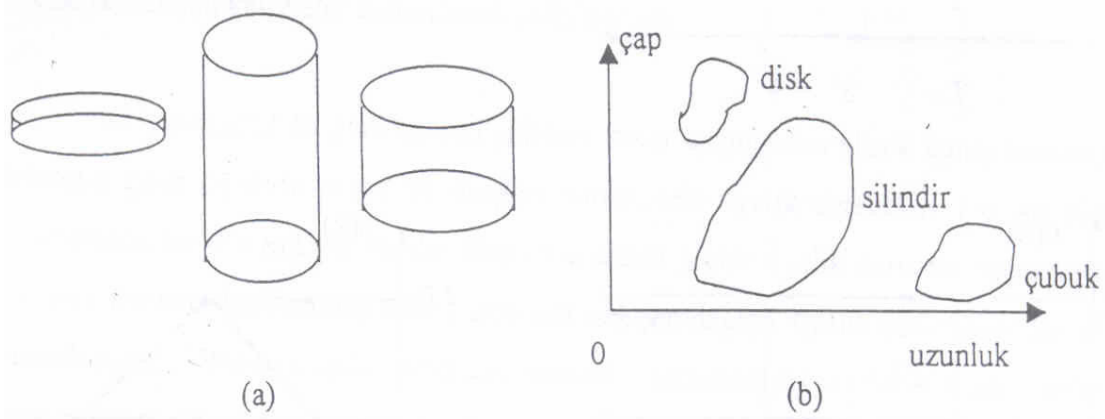
b) Bulanık kümenin monoton olmasıdır. Bunun anlamı, üyelik derecesi 1'e eşit olan öğeye yakın, sağda ve soldaki öğelerin üyelik derecelerinin de 1'e yakın olmasıdır.

c) Üyelik derecesi 1 olan öğeden sağa veya sola eşit mesafede hareket edildiği zaman, bulunan öğelerin üyelik derecelerinin birbirine eşit olmasıdır ki buna da bulanık kümenin simetri özelliği adı verilir. Klasik kümelerle, bulanık kümelerin arasındaki önemli farklardan bir tanesi, klasik kümelerin sadece bir tane dikdörtgen üyelik fonksiyonu bulunmasına karşılık, bulanık kümenin yukarıdaki üç şarttan ilk ikisini mutlaka sağlayacak biçimde, değişik üyelik fonksiyonlarına sahip olmasıdır. Şekil 5.1, 7 ile 9 arasında değişen gerçek sayıların üyelik derece fonksiyonlarını göstermektedir.



Şekil 5.1 Üyelik Derecesi Fonksiyonları (a) Klasik Küme, (b) Bulanık Küme(Şen, 1999)

Bulanıklığı müphemlik, belirsizlik, değişik anlamlara gelebilen olayların özelliği olarak tanımlayabiliriz. Rasgeleliği ise, o olayın meydana gelmesindeki belirsizliğin sayısal ölçüsü olarak anlayabiliriz. Olay meydana gelebilir veya gelemez ancak onun bulanıklığı daima söz konusudur. Bir disk, silindir ve yuvarlak çubuk arasında ne gibi farklar olduğunu sorusunu ele alırsak, bunların her biri geometrik olarak birbirinin aynısıdır. Aralarındaki fark, yüksekliklerinin farklı olmasıdır. (bak Şekil 5.2)



Şekil 5.2 (a) Geometrik Şekiller (b) Müphem Terimler(Şen, 1999)

Disk yüksekliği "kısa", silindir yüksekliği "orta", çubuk ise bu ikisine oranla yüksekliği "büyük (uzun)" olan silindirik şekillerdir. Bunların, birinden diğerine geçiş sınırı kesin değildir ve bulanık küme esaslarına göre Şekil 5.2' deki her bir geometrik hacim "silindir toplum" kümesinin değişik üyelik dereceleri ile birer alt kümelerini teşkil eder. Burada üç tane alt küme söz konusudur. Bunlar 'kısa', 'orta' ve 'uzun' kelimeleri ile ifade edilmiştir. Yukarıdaki üç şeklin tanımında doğal ve ideal olarak kesitlerinin daire biçiminde olduğu klasik bilgilerimizle algılanır. Ancak, kesit alanının mutlaka daire olması gerekmemektedir. Daireden sapmaları olan, ancak genel hatları ile daireye benzeyen kesit alanları bulunmaktadır, çünkü gerçek dünya her zaman için idealleştirilmiş dünyadan sapmalar gösterir.(Şen, 1999)

Günlük hayatımızda bazı olaylar karşısında tercih yapmak durumunda kaldığımız zaman, her sözel bilginin bir bulanık kümeye karşı geldiğini düşünerek ve kendi kendimize üyelikler vererek uygun çözümlere varabiliriz. Burada belirtilmesi gerekli çok önemli hususlardan bir tanesi, bulanık kümelerde öznel, yani bir dereceye kadar kişiye bağlı tercihler yapılarak üyelik dereceleri fonksiyonlarına karar verilebilmektedir.

### **5.5. Bulanık Sistem Ne Demektir?**

Türkçedeki bulanık kelimesinin genel olarak puslu, dumanlı, kesinlikle ayırt edilemeyen, kesin olmayan, belirsiz, müphem gibi bir dizi anlamı vardır. Bu çalışmada teknik açıdan, İngilizce 'fuzzy' kelimesinin yerine bulanık kelimesi kullanılacaktır. Bulanıklığın anlamı, bir araştırmacının incelediği konunun kendisi tarafından, kesinlikle bilinmemesi durumunda, sahip olduğu eksik ve belirsiz bilgilerin tümüdür. Böylece araştırmacı, klasik analitik yöntemler, dinamik ve korunum ilkelerinden (enerjinin, maddenin, momentumun korunumları gibi) elde ettiği denklemleri, verilerinde ve bilgilerinde belirsizlik yani bulanıklık bulunduğu için doğrudan kullanamaz.

Araştırmacının incelediği olay veya mekanizma sadece, kesin kurallı ve çıkarımlarında kabuller olan denklemler yerine, onların tamamlayıcısı olarak sözel ve belirsiz bilgilerde göz önünde tutularak modellenabilir. Bulanık ilkelerin yardımı ile olayların incelenmesinde veri ve bilgi bakımından bir bulanıklık söz konusu ise de, bulanık yöntemlerin işleyişi tamamen belirgindir.(Şen, 1999)

Araştırmacıların bulanık sistemleri kullanması için genel olarak iki sebep vardır. Bunlar;

a) Gerçek dünya olaylarının çok karmaşık olmasından dolayı, bu olayların belirgin denklemlerle kesinlikle kontrol altına alınması mümkün olamaz. Bunun doğal sonucu olarak, araştırmacı kesin olmasa bile yaklaşık fakat çözülebilirliği olan yöntemlere başvurmayı tercih etmektedir. Yapılan bütün çalışmalarda, çözümler bir dereceye kadar yaklaşıktır. Aksi durumda, çok sayıda doğrusal olmayan denklemin eş zamanlı çözülmesi gerekir ki, bunun günümüz bilgilerine göre belirgin olmayan kaotik çözümlere yol açacağı bilinmektedir. Kaotik incelenen olayı temsil eden denklemlerin hepsinin çözümü, sayısal verilere gerek gösterir.(Şen, 1999)

b) Mühendislikte bütün teori ve denklemler, gerçek dünyayı yaklaşık bir şekilde ifade eder. Birçok gerçek sistem, doğrusal olmamasına rağmen, doğrusallık kabulünü için içine koymaktadır. Örnek olarak, mukavemet hesaplarında malzemenin gerilme altında doğrusal şekil değiştirmeler ortaya çıkaracağı, Hooke kanunu ile kesinleştirilmiştir. Ancak, malzemenin her zaman bu şekilde davranması beklenemez ve bu nedenle küçükte olsa bazı sapmaların olması beklenir. Bunun doğal sonucu olarak, mukavemet boyutlandırmalarında emniyet katsayısı gibi bir büyüklük hesaplara dahil edilerek, olabilecek belirsizlikler göz önünde tutulmuştur. Emniyet katsayısının kullanılması, bir bakıma belirsizliklerin çözümün içine bir şekilde sokulmasıdır. Gerçek olayların davranışlarında emniyet katsayısı gibi bir büyüklüğe gerek kalmadan boyutlandırmaların yapılması durumunda, belirsizlik ilkelerine gerek duyulur.

Günümüzde, bilgi çağı ve bunun getirdiği sözel verilere önem verilmektedir. Bunun nedeni, insanların bir cihaz gibi sayısal değil de, yaklaşık sözel verilerle konuşarak anlaşmasıdır. Sözel veriler zamanla önemini artırmaktadır. Bu sözel verileri, bir sistem içinde formüle ederek, cihazların verdiği sayısal bilgilerle birlikte mühendislik sistemlerinde göz önünde tutmak gerekmektedir. Bulanık sistemlerin esas işleyeceği konu, bu tür bilgilerin bulunması halinde çözümlenmelere gitmek için nasıl düşünüleceğidir. İyi bir mühendislik teorisinin, incelenen olayın önemli özelliklerini yakalayarak, onu yaklaşık bir biçimde modellemesi ve matematik bakımdan karmaşık olmayacak çözümlerle kontrol altına alması beklenir. Aslında bulanık yöntemlerle bir sistemin modellenmesinde de yaklaşıklık ve oldukça kolay çözümlülük bulunur. Bu bakımdan bulanık sistemler, teorik ve matematik aksiyomlu yaklaşımlardan bağımsız bir

çözüm algoritmasını temsil eder. Mühendislik yaklaşımlarında, elde edilebilen tüm sayısal ve sözel bilgilerin çözüm algoritmasına katılarak, bunların kontrolünde anlamlı çözümlere varılmalıdır. Bulanık küme, mantık ve sistem ilkeleri, uzman kişilerin de vereceği sözel bilgileri işleyerek toptan çözüme gitmeye yarar. Buna karşın, teorik matematik ve diferansiyel hesaplamalarda sadece sayısal değerler kullanılır. Örnek olarak, taşkın çalışmalarında risk hesaplamaları, su toplama havzasının alan, eğim, drenaj yoğunluğu, yağış ve akışının şiddeti, tekerrür süresi gibi sayısal değerlerinin yanında, o bölgede yaşayanlardan elde edilen sözel bilgiler ile arazide geçmiş taşkınların bıraktıkları izlerin düşük, orta veya çok derin debileri geçirdiği şeklindeki sözel bilgiler de hesaplamalara katılmalıdır. Bunun için bulanık sistemlerin iyi bilinmesi gerekir. İnsanların sunduğu sözel bilgilerin sayısal hale getirilerek, bilgisayarlar veya algoritmalar tarafından hesaplamaların yapılabilmesi için bulanık sistemlere gerek duyulmaktadır.(Şen, 1999)

Bulanık sistemlere örnek, bir kişinin araba sürmeyi öğrenmesinde ortaya çıkan sözel bilgilerdir. Sürücü adayına hız şu kadar kilometreye varınca gaza, şu kadar miktar bas demektense, eğitim sırasında;

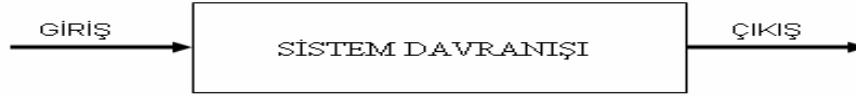
'EĞER hız düşük İSE gaza fazla bas'

veya

'EĞER hız yüksek İSE gaza az bas'

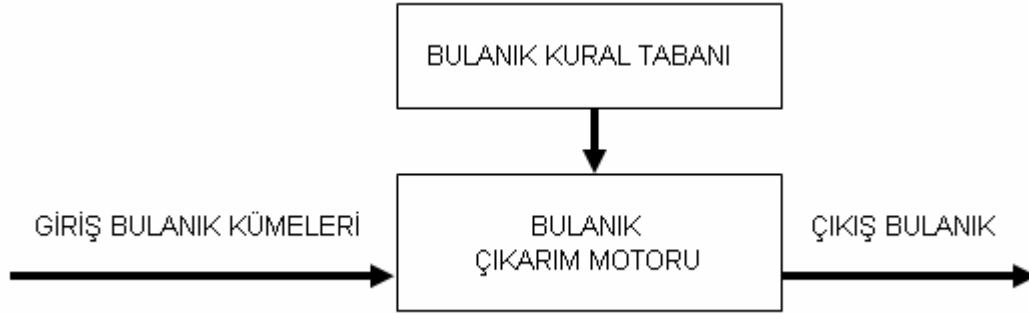
gibi kurallar söylenir. Bu kurallardaki düşük, az ve yüksek kelimeleri, kişilere belirli bir aralıkta sayısal değerleri ifade etmektedir.. Bu ifade edilen değerler topluluğuna, o kelimeyi temsil eden küme denir. Bu kümenin her ögesi aynı derecede önemli değildir, ancak bazı değerler, diğerlerine göre önceliklidir. 'EĞER – İSE' şeklindeki kuralların 'EĞER' ile 'İSE' kelimeleri arasında kalan kısımlara öncül kısım ve 'İSE' kelimesinden sonra olan kısma da soncul kısım veya kural çıkarımı adı verilir.

Şimdiye kadar öğrenilen matematik, stokastik veya kavramsal sistemlerin hemen hepsi Şekil 5.3' de verilen üç ayrı birimden ibarettir.(Şen, 1999)



Şekil 5.3 Klasik Sistem(Şen, 1999)

Bunlar giriş, bu girişi çıkışa dönüştüren, sistem davranışı denilen bir kutu ve buradan olan çıkış kısımlarıdır. Buradaki birimlerin hepsinde sayısal veri, çıkış veya işlemler yapılmaktadır. Bulanık sistemlerin bu klasik tasarımdan farkı, sistem davranışı kısmının ikiye ayrılarak Şekil 5.4' de gösterildiği gibi kendi aralarında bağlantılı dört birimin oluşmasıdır.



Şekil 5.4 Genel Bulanık Sistem(Şen, 1999)

Burada bulunan birimlerin her birinin farklı, fakat birbiri ile ilişkili aşağıdaki görevleri vardır.

a) Genel Bilgi Tabanı Birimi: İncelenecek olayın maruz kaldığı girdi değişkenlerini ve bunlar hakkındaki tüm bilgileri içerir. Buna veri tabanı veya kısaca giriş adı verilir. Genel veri tabanı adı verilmesinin nedeni, buradaki bilgilerin sayısal ve/ya sözel olabilmesidir.

b) Bulanık Kural Taban Birimi: Veri tabanındaki girişleri, çıkış değişkenlerine bağlayan mantıksal 'EĞER-İSE' türünde yazılabilen kuralların tümünü içerir. Bu kuralların yazılmasında sadece, girdi verileri ile çıktılar arasında olabilecek tüm aralık (bulanık küme) bağlantıları düşünülür. Böylece, her bir kural girdi uzayının bir parçasını, çıktı uzayına mantıksal olarak bağlar. İşte bu bağlantıların tümü, kural tabanını oluşturur.

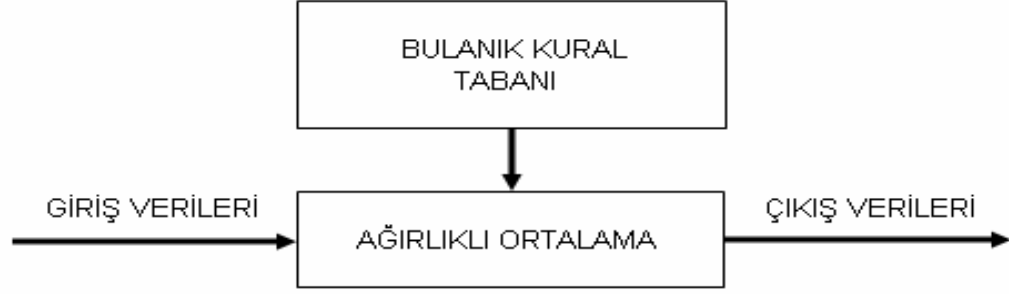
c) Bulanık Çıkarım Motoru Birimi: Bulanık kural tabanında giriş ve çıkış bulanık kümeleri arasında kurulmuş olan parça, ilişkilerin hepsini bir araya toplayarak sistemin bir çıkışlı davranmasını sağlayan işlemler topluluğunu içeren bir mekanizmadır. Bu motor, her bir kuralın çıkarımlarını bir araya toplayarak, tüm sistemin girdiler paralelinde nasıl bir çıktı vereceğinin belirlenmesine yaramaktadır.

d) Çıktı Birimi: Bilgi ve bulanık kural tabanlarının, bulanık çıkarım motoru ile etkileşimi sonunda elde edilen çıktı değer topluluğunu belirtir. Şekil 5.4' deki sistem temel bir genel bulanık sistemi temsil eder. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, veri tabanındaki bilgileri ve çıktıların bulanık değerler olmasıdır. Şekil 5.5' deki sistemde, her birim bulanık kümelerden oluşmaktadır. Temel bulanık sistemin en önemli sakıncası, sayısal olan veri tabanının, böyle bir genel bulanık sisteme girememesi ve çıktıların sayısal olmaması yani, mühendislik tasarımlarında doğrudan kullanılamamasıdır.

Genel bulanık sistemin sakıncalarını bir dereceye kadar ortadan kaldırmak için Takagi, Sugeno(1985) ve Sugeno, Kank (1988) tarafından teklif edilen ve Takagi, Sugeno, Kank (TSK) bulanık sistemi denilen sistem kullanılır. Burada veri tabanındaki girdiler, birer sayı ve bulanık kural, çıkarım motorunun çalışması sonunda elde edilen çıktılar ise girdilerin bir fonksiyonu şeklindedir. Özet olarak, kural tabanındaki öncül kısımların değişkenleri olduğu gibi İSE' den sonraki kural soncul kısmına, bu değişkenlerin birer doğrusal fonksiyonu olarak yansıtıldığı düşünülmüştür. Buna göre kural;

'EĞER' arabanın x hızı yüksek 'İSE', gaza basma kuvveti y,  $y = a \cdot x$  şekline gelir. Örnek olarak, 3 tane öncül değişkeni ( $x_1$ ,  $x_2$  ve  $x_3$ ) bulunması durumunda, soncul değişken olan y, genel olarak bulanık sistemin kurallarından birinde;

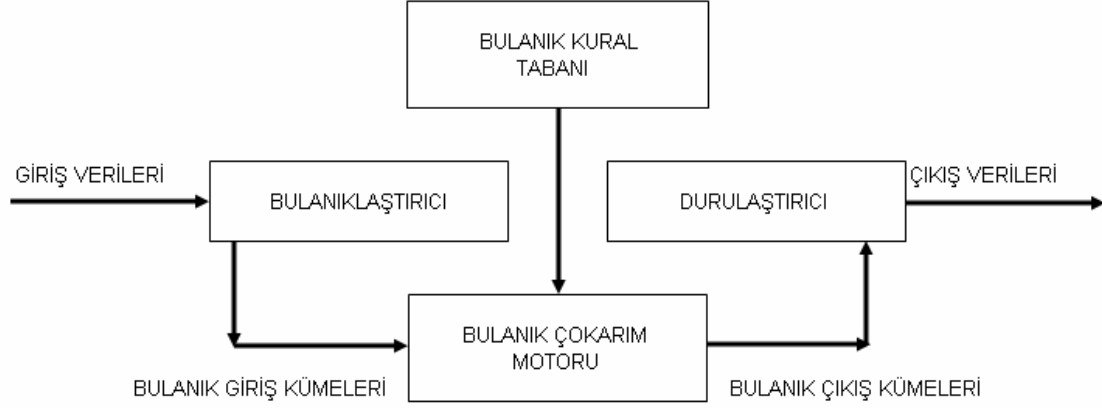
'EĞER'  $x_1$  az ve  $x_2$  yüksek ve  $x_3$  geniş 'İSE'  $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$  şeklini alır. Bütün kuralların soncul kısımları, çoklu doğrusal denklemden ibarettir. Böyle bir yapıya sahip olan bulanık sistemde, soncul bulanık küme şeklinde olmadıklarından Şekil 5.4' deki 'Bulanık Çıkarım Motoru' birimi yerine, her bir kuralın öncül kısmından hesaplanan üyelik dereceleri ağırlık olmak üzere ağırlıklı çıkarım hesaplaması birimi gelir. (bak Şekil 5.5)



Şekil 5.5 TSK Bulanık Sistemi(Şen, 1999)

Böyle bir bulanık sistemde çıktı uzayı, girdilerin fonksiyonu olarak her bir alt uzayda geçerli bir kural almak üzere temsil edilmiştir. TSK yaklaşımı ile çıktı yüzeyinin doğrusal olmaması halinde bile, bu yüzeyin alt uzaylar üzerinde girdi değişkenleri cinsinden düzlem parçaları şeklinde modellendiği anlaşılmaktadır. Ancak, TSK bulanık sisteminin sakıncaları arasında 'İSE' kısmından sonra matematik bir ilişki bulunduğundan, kuralların soncul kısımlarının insanlar tarafından verilecek sözel bilgileri modelleyememesi ve giriş-çıkış değişkenleri arasında yazılması mümkün olan tüm kuralların, soncul kısımlarının bulanık olmaması yani yazılamamasıdır. İşte bu sakıncaları ortadan kaldırabilmek için Şekil 5.6' da verilen ve girdi-çıkış birimlerinde sırası ile bulanıklaştırma ve durulaştırma işlemleri yapıldığından, bu birimlerin de kutu şeklinde gösterildiği bir bulanık sistem karşımıza çıkar.

Burada, genel bir bulanık sistemdeki bulanık kural tabanı ve çıkarım motoru aynı şekilde kalmaktadır. Girişlerin sayısal olmaları durumunda, bulanıklaştırılmasına yarayan bulanıklaştırıcı birim ile yine bulanık olan çıktıların sayısallaştırılmasına yarayan durulaştırıcı birim ilave edilmiştir. Bulanıklaştırma ve durulaştırma sırası ile giriş sayılarını bulanıklaştırılması ve bulanık sayıların sayısallaştırılması anlamına gelir. Bu sistemde, bulanık sözel bilgilerle birlikte bulanıklaştırılmış sayısal bilgiler bir arada toplanarak, Şekil 5.4' de gösterilen genel bulanık sistemin girdisine indirgenmiş bir durum ortaya çıkar. Çıkışta ise, genel bulanık sistemin çıkışlarının mühendislik tasarımlarında kullanılması amacıyla durulaştırma birimi ilave edilmiştir. Bu bulanıklaştırıcı-durulaştırıcı bulanık sistem, genel bulanık ve TSK bulanık sistemlerinde bulunan tüm mahzurları ortadan kaldırır.(Şen, 1999)



Şekil 5.6 Bulanıklaştırma-Durulaştırma Birimli Bulanık Sistem(Şen, 1999)

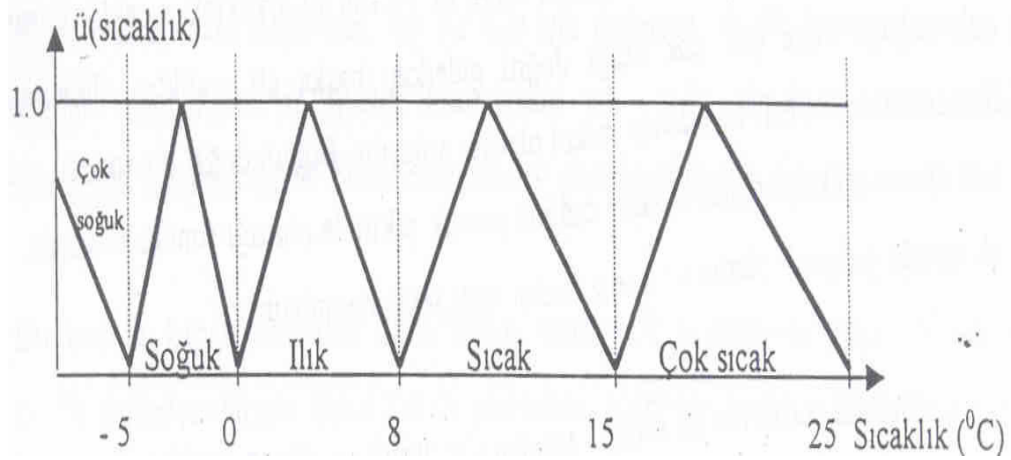
Bulanık sistemlerin başlıca özellikleri arasında, çoklu girdileri kural tabanı ve çıkarım motoru ile işleyerek, tek çıktı haline dönüştürmesi gelmektedir. Bazı özel durumlarda, çıktılar birden fazla olabilir. Ancak, hemen her mühendislik çalışmasında en az bir tane çıktı bulunur. Bulanık sistem doğrusal olmayan bir şekilde girdileri oluşturan değişkenleri, çıktı değişkenine dönüştürerek, sistemin davranışını tespit etmektedir. Böylelikle, bilgi tabanının doğrusal olmayan dönüşümlere maruz bırakılarak, istenen sonuçlara ulaşmak için incelenen sistemin kontrol altına alınması mümkün olmaktadır. Bulanık sistemler sayesinde mühendislikte görüntü işleme, zaman serileri esaslı tahmin yapmak, kontrol sorunlarını çözmek ve iletişim konularında uygulamalar yapılabilmektedir. Bunun dışında, bulanık sistemler mühendislik, tıp, sosyoloji, psikoloji, işletme, uzman sistemler, yapay zeka, sinyal işlenmesi, ulaştırma, kavşak sinyalizasyonu gibi birçok alanda rahatlıkla kullanılabilir.(Şen, 1999)

## 5.6 Üyelik Fonksiyonları

Bir bulanık ifadenin temsil ettiği sayısal aralık, o ifade hakkında bilgi sahibi kişiler tarafından belirlenebilir. Örnek olarak, İstanbul’ da sıcaklık derecesinin değişim aralığının, aşağı yukarı -10 °C ile 35 °C olduğu söylenebilir. Bu aralık tanımı ile tüm sıcaklık uzayı belirlenmiştir. Bu sıcaklık uzayında çok soğuk, soğuk, ılık, sıcak ve aşırı sıcak gibi alt aralıklar oluşturulabilir. Örnek olarak, -5 ile 0 çok soğuğu, 0 ile 8 soğuğu, 8 ile 15 arası ılığı, 15 ile 25 sığığı, 25 üzeri sıcaklıklar çok sığığı temsil ettiği kabulü yapılmıştır. Bu aralıkların sınırlarında, Aristo mantığına göre katı kararlar

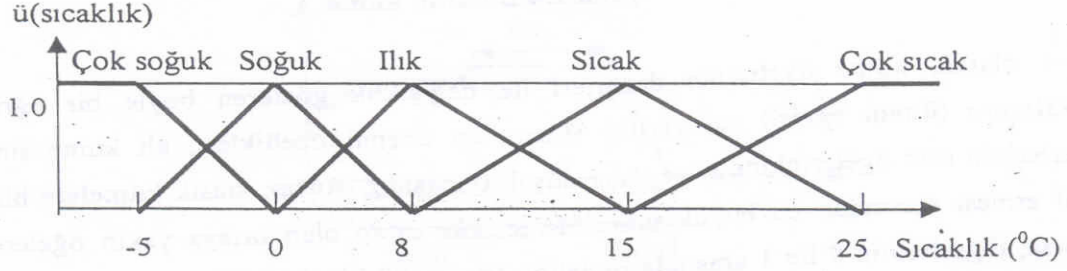
alınmalıdır. Yapılan sınırlamalar sonucunda, 7,9 °C' nin soğuk, 8,1°C' nin ise ılık olduğu sonucu çıkmaktadır. Bu iki değerin birbirine çok yakın olmasına rağmen, farklı aralıklarda bulunmaları, Aristo mantığında bazı eksiklikler olduğunun bir göstergesidir. Bu şekilde gösterimde, her alt aralığa düşen sıcaklık değerinin üyelik derecesinin sadece o aralık içerisinde 1'e eşit, diğer aralıklarda ise 0'a eşit olduğu görülmektedir.

Yukarıdaki tartışmanın bir doğal sonucu olarak, en basit üçgen üyelik fonksiyonları bitişik olarak alınmıştır. Bu üçgenlerin, sıcaklık alt kümelerini tam yansıtmadığı açıktır, çünkü sınırlardaki sıcaklık değerlerinin üyelik dereceleri sıfır olarak alınmıştır. Ayrıca, bu sınır değerleri ne alttaki nede üstteki sıcaklık alt kümelerine dahildir. Böylece, sınır değerleri için tam anlamı ile bir belirsizlik vardır. Şekil 5.7' deki alt aralıklar Aristo mantığına göre işlem görür, çünkü bir alt aralığa düşen sıcaklık değeri sadece o alt aralığa aittir.



Şekil 5.7 Bitişik Üçgen Gösterimi(Şen, 1999)

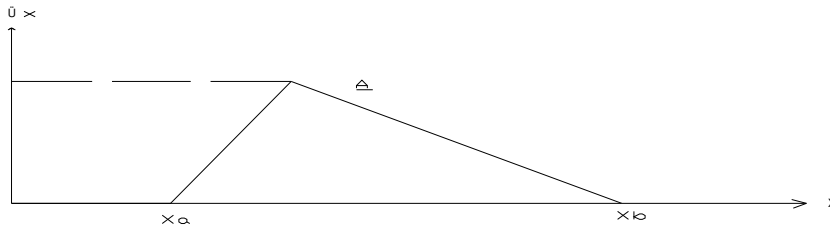
Bu aralıkların arasındaki geçiş kısımlarının böyle birbirinin devamı olmayacağını ve bir örtüşmenin söz konusu olabileceğini söylersek, daha mantıklı, günlük hayatta daha geçerli ve uzlaştırıcı çözümlere gitmiş oluruz. Her insanın ılık sınırlarının +5 °C ile + 15 °C' de sıfır üyelik derecelerine sahip olacağını kabul etmesini savunmak mümkün değildir. Günlük hayatta sınıra yakın olan değerlerin, hangi aralığa düşeceği oldukça şüpheli yani bulanıktır. Böylece, sıcaklık alt aralıklarının birbiri ile örtüşmeli geçişlere sahip olmasının gerekliliği ile Şekil 5.8' de verilen üyelik fonksiyonları karşımıza çıkar.



Şekil 5.8 Örtüşmeli Üçgen Gösterimi(Şen, 1999)

İlk ve son alt aralıktaki sıcaklık durumlarının, çok soğuğa veya çok sıcağa doğru gidildikçe, başka alt aralıklar olmadığından, üyelik derecelerinin 1'e eşit kalmasının mantıklı olacağı anlaşılmaktadır. Bunun doğal bir sonucu olarak, ilk ve son üyelik fonksiyonlarının üçgen yerine yamuk şeklinde olacağı sonucuna varılmaktadır.

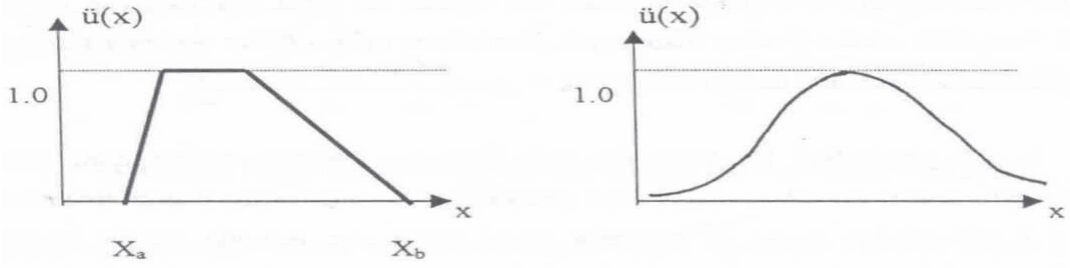
Burada sorun, her alt aralığa düşen sıcaklık derecelerinin hepsinin aynı önemde olup olmayacağıdır. İlık aralığının alt ve üst uçlarına yaklaştıkça, onun komşusu olan altta soğuk üstte ise sıcak alt kümelerine doğru geçişler beklendiği için, o geçiş bölgelerinde tam anlamı ile ilık vafına sahip olacağı söylenemez. Böylelikle, her alt aralığa düşen sıcaklık derecelerinin, o alt aralığın uçlarına yakın kısımlarında önemlerini, orta kısma kıyasla göreceli olarak kaybedeceği sonucuna varılmaktadır. Bir alt aralıkta, üyelik derecesinin en yüksek olduğu kısım aralığın ortalarında, en düşük değerinin ise uçlarda olacağını söyleyebiliriz. Bu düşüncelerden, Şekil 5.9' da gösterilen bir geometrik gösterim ortaya çıkar. Genel olarak, her alt aralığın ayrıık üyelik fonksiyonu Şekil 5.9' de gösterildiği gibi olur. Bu fonksiyonların simetrik olması gerekmez. Böylece,  $X_a$  ve  $X_b$  gibi alt ve üst sınırlara sahip  $X$  değişkeninin, bu aralıktaki her değerine ayrı bir üyelik derecesi,  $\mu(x)$ , atanmış olur. Bu aralıktaki tüm  $X$  değerleri, o  $X$  değişkeninin bir alt kümesini teşkil eder.(Şen, 1999)



Şekil 5.9 Bulanık Küme (Şen, 1999)

Küme üyelerinin değerleri ile değişiklik gösteren böyle bir eğriye üyelik fonksiyonu adı verilir. Bunun en önemli özelliklerinden biri, alt küme sınırlarındaki değerlerin orta öğelere göre daha düşük olmasıdır. Ancak, klasik kümelere bir benzerlik teşkil etmesi açısından en büyük önem derecesine sahip olan ortaya yakın öğelere 1 değeri atanırsa, diğerlerinin 0 ile 1 arasında ondalıklı ve sürekli değişen değerler olacağı sonucuna varılır. Bu şekilde 0 ile 1 arasındaki değişimin, her bir öğe için değerine, üyelik derecesi, bunun bir alt küme içindeki değişimine ise üyelik fonksiyonu adı verilmektedir. Üyelik fonksiyonu şemsiyesi altında toplanan öğeler, önem derecelerine göre birer üyelik derecesine sahiptir.

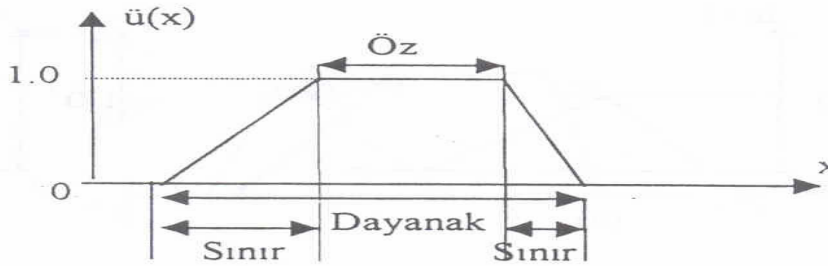
Matematik kurallarına uygun olarak düzgün şekilli üyelik fonksiyonlarının Şekil 5.9' da gösterilen üçgenden başka, yamuk veya çan eğrisi şeklinde olabilmektedir. (Bak Şekil 5.10) Pratik uygulamalarda üçgen üyelik fonksiyonu yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 5.10 Yamuk ve Çan Eğrisi Üyelik Fonksiyonları(Şen, 1999)

### 5.6.1 Üyelik Fonksiyonunun Kısımları

Üyelik fonksiyonlarının, daha bilimsel terminoloji ile açıklanması aşağıda yapılacaktır. Genel olarak, yamuk şeklindeki bir üyelik fonksiyonu Şekil 5.11' de gösterildiği gibi değişik kısımlara sahiptir.



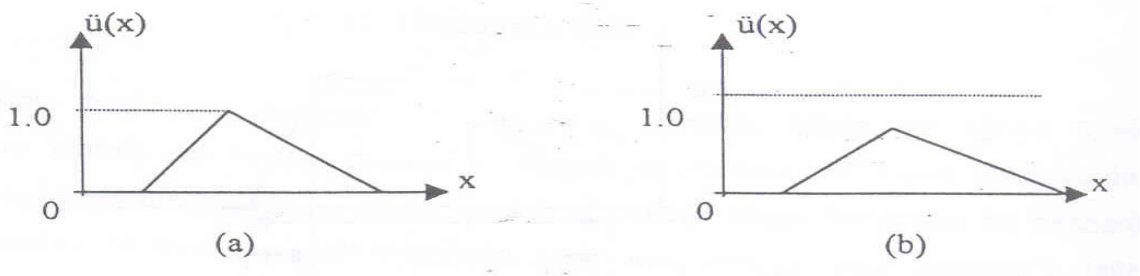
Şekil 5.11 Üyelik Fonksiyonu Kısımları(Şen, 1999)

Buradaki gibi verilen bir bulanık alt kümede bir değil, birden fazla öğenin üyelik derecesi 1'e eşit alınabilir. Bu durumda, 1 üyelik dereceli öğelerin tam anlamı ile hiçbir şüphe olmadan sadece o alt kümeye ait olduğu sonucuna varılır. Böyle üyelik derecesine sahip olan öğeler, alt kümenin orta kısmında toplanmıştır. Üyelik dereceleri 1'e eşit olan öğelerin toplandığı alt küme kısmına, o alt kümenin özü denir. ( $\mu(x) = 1$  dir) Üçgen şeklindeki üyelik fonksiyonunda sadece bir öğenin üyelik derecesi 1'e eşit olduğundan, üçgen üyelik fonksiyonlarının özü bir nokta olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bir alt kümenin tüm öğelerini içeren aralığa, o alt kümenin dayanağı adı verilir. Dayanak kısmında bulunan her öğenin az veya çok değerde (0 ile 1 arasında) üyelik dereceleri vardır. Bunun matematik gösterimi  $\mu(x) > 0$ 'dır.(Şen, 1999)

Üyelik dereceleri 1'e veya 0'a eşit olmayan öğelerin oluşturduğu kısımlara üyelik fonksiyonunun sınırları veya geçiş bölgeleri adı verilir. Bunun matematik tanımı  $0 < \mu(x) < 1$  şeklindedir. Bunlar alt kümenin kısmi öğeleridir. Genel olarak, tüm üyelik fonksiyonlarında biri sağda diğeri de solda olmak üzere iki tane geçiş bölgesi vardır. Şekil 5.11'deki en sol ve en sağdaki bulanık kümelerde birer tane geçiş bölgesi vardır.

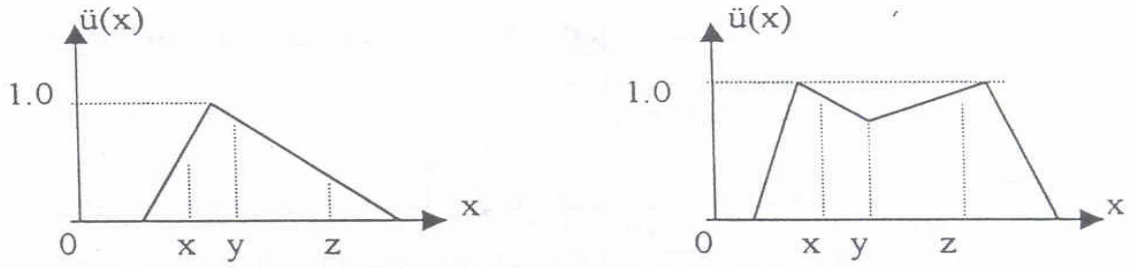
Yukarıda şekil olarak açıklanan bu üç özelliğe ilave olarak, üyelik fonksiyonunun sahip olması gerekli olan iki tane daha özellik bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, bulanık kümenin normal olduğunu tespit etmemize yarayan bir kavramdır. Buna göre normal bulanık kümede, en azından bir tane üyelik derecesi 1'e eşit olan üye bulunmalıdır. Şekil 5.12, normal ve normal olmayan bulanık kümeleri göstermektedir.



Şekil 5.12 Bulanık Kümeler (a) Normal (b) Normal Olmayan(Şen, 1999)

İkinci özellik ise bulanık kümenin dış bükey (konveks) olmasıdır. Dış bükey olan bulanık kümelerde üyelik fonksiyonu kümenin dayanağı üzerinde, ya sürekli artar veya sürekli azalır veya üçgen üyelik fonksiyonunda olduğu gibi önce sürekli olarak üyelik

derecesi bir öğede 1' e eşit oluncaya kadar artar, ondan sonraki dayanağa düşen öğeler için sürekli azalır. Bunun aksi durumlarda söz konusudur. Ancak, onlar bulanık kümeler üyelik fonksiyonu olamaz. Şekil 5.13' de dış bükey olan ve olmayan bulanık alt kümeler bazı örnekler gösterilmiştir.



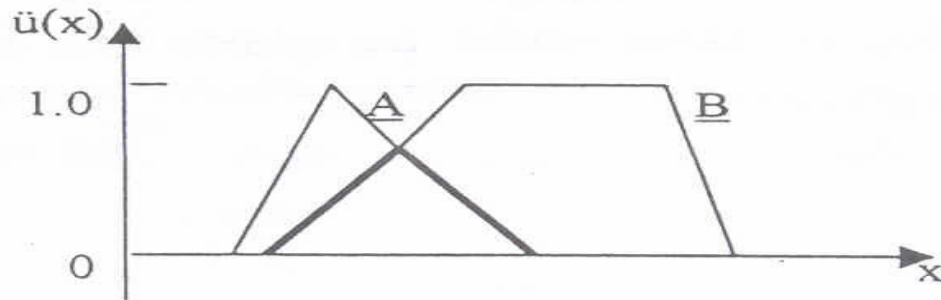
Şekil 5.13 Bulanık Kümeler (a) Dış Bükey (b) Dış Bükey Olmayan(Şen, 1999)

Dış bükeyliğin matematik olarak tanımlanmasında, aynı bulanık alt kümeye düşen x, y ve z gibi üç tane öğe düşünülürse ve bunlar arasında değerce büyüklük olarak  $x < y < z$  gibi bir sıra bulunuyor ise, bunlardan ortadakinin üyelik fonksiyonu önceki ve sonrakine göre;

$$\mu(y) \geq \min[\mu(x), \mu(z)] \quad (5.1)$$

bağıntısı daima geçerli olmalıdır.

Burada 'EK' en küçükleme işlemi demektir. Y' nin üyelik derecesi, x ve z' nin üyelik derecelerinin en küçüğünden daha büyüktür. İşte bu durumda, o kümeye dış bükey bulanık küme adı verilir.(bak şekil 5.14)



Şekil 5.14 Dış Bükey Bulanık Kümelerin Kesişimi(Şen, 1999)

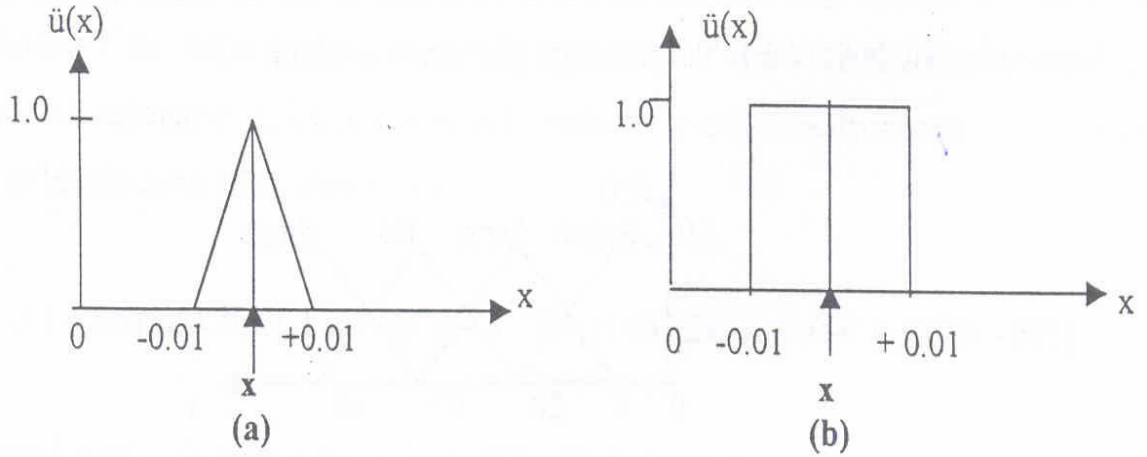
Bulanık kümelerin üyelik fonksiyonlarında üyelik derecesinin 0,5' e eşit olması durumundaki noktaya geçiş noktası adı verilir. Bu durum geçiş noktasında,  $\mu(x) = 0.5$  olması anlamına gelir. Bulanık kümenin yüksekliği denilen bir büyüklük ise üyelik derecesinin en büyük olduğu öğelere karşı gelmektedir. Yüksekliği 1'e eşit olmayan bulanık kümeler normal olmadıklarından herhangi bir bulanık küme, mantık ve sistem içerisinde kullanılamazlar. Normal olmayan bulanık kümeleri, normal hale dönüştürmek için, mevcut herbir üyelik derecesinin, en büyük üyelik derecesine bölünmesi gereklidir. Böylece normal olmayan bulanık kümelerin, dış bükey olmaları şartı ile nasıl normal bulanık kümelere dönüştürüleceği anlatılmıştır.

Temel bulanık kümeler, normal ve dış bükey olmasına karşılık daha sonraki bölümlerde görüleceği üzere küme işleminin yapılması sonucunda elde edilen kümeler, bulanık normal küme olmayabilir. Örnek olarak, iki normal ve dış bükey bulanık alt kümenin birleşimi, normal ve dış bükey olmayan bulanık küme çıkabilir (bak Şekil 5.14).

Üyelik fonksiyonları simetrik olmayabilmektedir. Genel olarak, bir boyutlu uzayda tanımlanan bulanık kümelerin iki veya daha fazla boyutta, az da olsa tanımlanması mümkündür. Şimdiye kadar gösterilen tüm üyelik fonksiyonları bir boyutta tanımlanmıştır. Bir boyutlu uzayda çizgi şeklinde olan üyelik fonksiyonları iki boyutta yüzey şeklinde görülür.(Şen, 1999)

## 5.7 Bulanıklaştırma

Pratikte, klasik küme şeklinde beliren değişim aralıklarının bulanıklaştırılması, bulanık küme, mantık ve sistem işlemleri için gereklidir. Bunun için, bir aralıkta bulunabilecek öğelerin hepsinin, 1'e eşit üyelik derecesine sahip olması yerine, 0 ile 1 arasında değişik değerlere sahip olması düşünülür. Bazı öğelerin belirsizlik içerdikleri kabul edilir. Özellikle, bazı cihazların prezisyonu diye tabir edilen durumlarda mesela (+,-) % 1 'lik hassaslık (prezisyon), ölçülen  $x$  büyüklüğünün  $x + 0.01$  ve  $x - 0.01$  arasında değişeceği beklentisini ifade etmektedir. Bunun klasik ve bulanık kümelere gösterilimi Şekil 5.15 'de verilmiştir.



Şekil 5.15 Hassaslık (a) Bulanık (b) Klasik(kaynak)

Buradan, bulanık prezisyonun pratikte mantiki olarak daha sağlıklı bir tanım olduğu ortaya çıkar. Böylelikle, prezisyon kelimesinden ve değerinden bulanık üyelik fonksiyonunun üçgen şeklinde olması akla gelen ilk durumdur.

### 5.8 Durulaştırma

Bulanık mantık kullanılarak kurulan modellerle elde edilen sonuçların ya da çıktılarının uygulamalarda doğrudan kullanılması mümkün değildir. Çıktıların kullanılabilir duruma getirilmesi için bulanık çıktıların sayısal değerlere dönüşümünü sağlamak gerekmektedir. Durulaştırma ismi verilen işlem bu dönüşümü ifade etmektedir. Durulaştırma, bir başka ifade ile bulanıklığın giderilmesi anlamına gelmektedir.

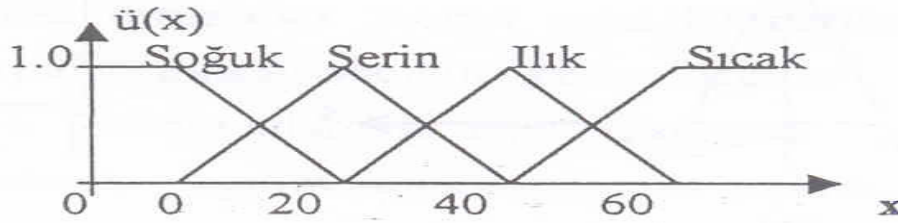
### 5.9 Üyelik Derecesi Ataması

Bulanık kümelerin gerek üyelik derecelerinin, gerekse bunların tümünü temsil edebilecek üyelik fonksiyonlarının belirlenmesinde, ilk başlayanlar tarafından kişisel sezgi, mantık ve tecrübelerin kullanılmasına sıkça rastlanmaktadır. Pratik olarak, birçok sorunun üstesinden gelebilmek için bu yaklaşımlar çoğu zaman yeterlidir. Üyelik fonksiyonlarının belirlenmesinde kullanılan diğer yöntemlerinden bazıları;

- a) sezgi,
- b) çıkarım,

- c) mertebelenme,
- d) açılı bulanık kümeler,
- e) yapay sinir ağları,
- f) genetik algoritmalar,
- g) çıkarımcı muhakeme gibi değişik yaklaşımlardır.

Bunlardan sezgi fazlaca yöntembilim bilgisi gerektirmemektedir. Bu bölümün başında, üyelik derecesi ve fonksiyonlarının sezgi ile elde edilmesi konusunda açıklamalar yapılmıştır. Burada her kişinin kendi anlayış, görüş ve olaya bakışları önemli rol oynar. Buna en basit örnek herkesin, görüş ileriye sürdüğü sıcaklık kelimesinin belirttiği alt kümeleri düşünebiliriz. Soğuk, serin, ılık ve sıcak gibi dört tane alt küme belirlenebilir. Bu alt kümelerin her biri belirli bir geometrik şekil ile Şekil 5. 16'da görüldüğü gibi temsil edilebilir.



Şekil 5.16 Sıcaklık Bulanık Alt Kümeleri(Şen, 1999)

Bu geometrik şekillerin konumları doğal olarak, o yörede yaşayan kişilere göre değişir. Örnek olarak, kutuplarda yaşayan insanların soğuk kavramı ile tropikal bölgelerde yaşayanlarındaki birbirinden oldukça farklıdır. Bu insanların algılarında olabilecek farklılıkları göstermektedir. Bu farklılıklar üyelik derecesi atanmasında göz önünde tutulmalıdır.

Çıkarım ile bulanık küme üyelik fonksiyonlarının bulunması için mutlaka incelenen olay hakkında bazı temel bilgilere sahip olmak gereklidir. Burada, literatürde sıkça bilinen bir örnek üzerinde durularak tanımlama yapılacaktır. Ü' yü üçgenler kümesi olarak düşünelim ve bir üçgenin A, B ve C iç açılarının toplamının  $180^\circ$  olduğunu biliyoruz. İşte bu bilgiden çıkarıma gideceğiz. Üçgenlerin yaklaşıklıkla eşkenar, E, ikizkenar, İ, dik açılı, D, dik açılı ve eşkenar, DE ve diğerleri gibi alt kümelere ayırdığımızı düşünelim. Bunların her biri, üçgenler kümesinin bulanık alt kümelerini temsil eder. Sıra bu alt kümelerin her birine birer üyelik fonksiyonunun atanmasına geldiğinde, bilinen

bilgilerden yararlanarak bazı üyelik fonksiyonu çıkarımlarının yapılmasına gidilebilir. Örnek olarak, bulanık bir ikiz kenar üçgende  $A \geq B \geq C \geq 0$  olmak üzere  $A = B$  veya  $B = C$  olması durumunda, üyelik değerinin  $\mu_E(x) = 1$  olacağı düşünülerek üyelik fonksiyonu eşitliği aşağıda verilmiştir.

$$\mu_i(A,B,C) = 1 - (1/60)EK (A-B, B-C) \quad (5.2)$$

$A = 120^\circ$ ,  $B = 60^\circ$  ve  $C = 0$  ise  $\mu_f(x) = 0$  olur.

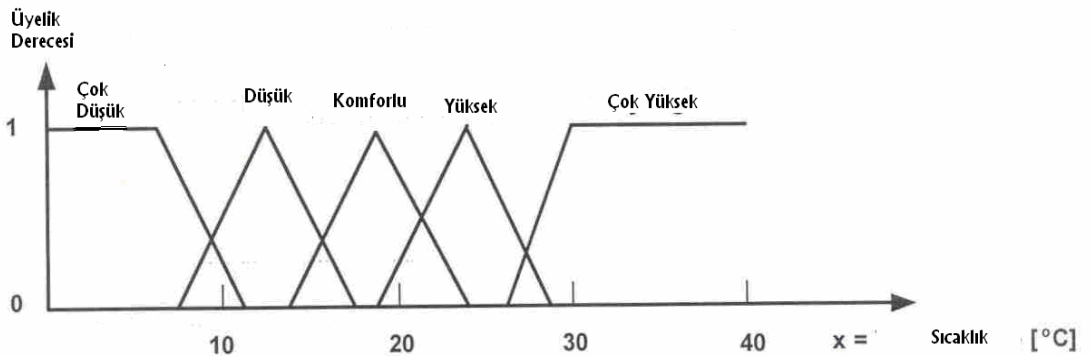
## 5.10 Bulanık Mantık Yöntemleri

Mamdani ve Sugeno gibi birçok insan, bilgisayar ortamında insan tecrübesini operatör olarak kullanan, bulanık mantık metotları geliştirmeye yönelik çalışmalar yapmışlardır. Bu sistemler bulanık kümeler, bulanık mantık ve bulanık kontrolörleri kullanarak, insan kararlarını işleme dahil ederler.

Bunlardan en önemli ikisi, Mamdani ve Takagi-Sugeno tipi bulanık mantık yöntemleridir. Aşağıda bu yöntemlerin temelleri özetle anlatılacaktır. (Pedrycz, 1993)

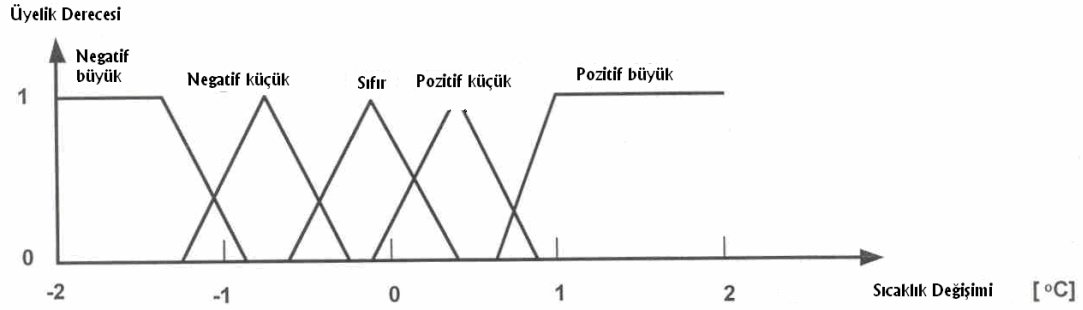
### 5.10.1 Mamdani Bulanık Mantık Yöntemi

Mamdani bulanık mantığı, yöntem durumlarını açıklamak için dile ait değişkenleri kullanır ve bu değişkenleri, kontrol kuralları için girdi olarak belirler. Isıtıcı sistem örneğinde, oda sıcaklıkları giriş değişkenleridir. Sıcaklık değişkenleri çok az, az, konforlu, yüksek ve çok yüksek olarak bölünmüştür.(bak şekil 5.17)



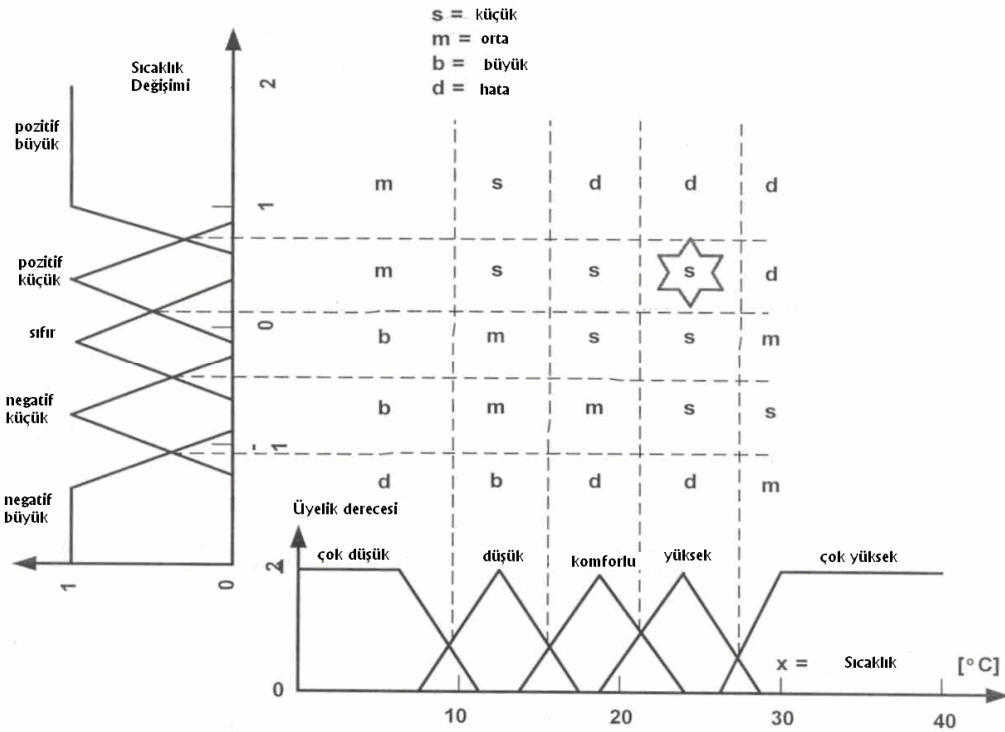
Şekil 5.17 Dilsel Değişkenler, Sıcaklık(Pedrycz, 1993)

Sıcaklık değişiminin üyelik fonksiyonu aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. (bak Şekil 5.18)



Şekil 5.18 Dile Ait Değişkenler “Sıcaklıktaki Değişim” (Pedrycz, 1993)

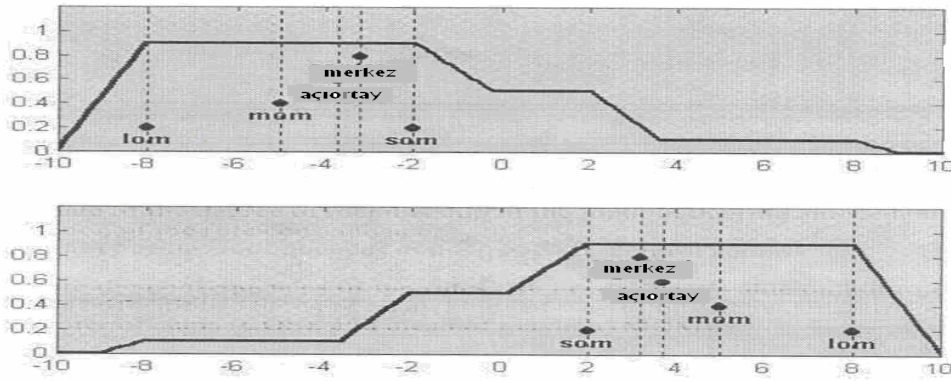
Bu yöntemi, çıkış değişkenlerinin üyelikleri tespit edilirken kullanırız. Güç küçük, orta ve büyük olarak sınıflandırılır. Bu iki dile ait değişken ile sıcaklık sisteminin kuralları belirlenir. Şekil 5.19’ da, kurallar her durum için güç bileşeninde değişiklik yaparlar. Bu yöntemde, insan tecrübesine dayalı kurallar kullanılmaktadır. Eğer sıcaklık yüksek ve sıcaklık değişimi pozitif (az) ise güç az kullanılır.



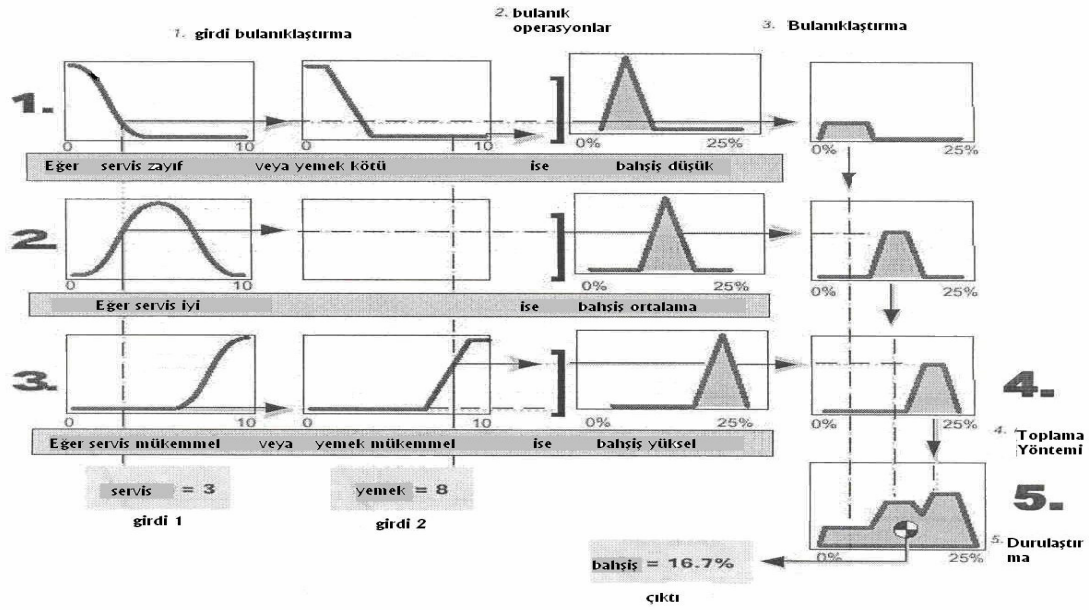
Şekil 5.19 Dilsel Durum Uzayı (Pedrycz, 1993)

Yukarıda anlatılan tüm adımlar Mamdani kontrolünün tasarımını amaçlamaktadır. Giriş verilerine üyelik fonksiyon değerlerinin atanması, kural sonuçlarının hesaplanması, kural sonuçlarının, bulanık kümeye “kontrol hareket” toplanmasıdır.

Kural sonuçlarını topladığımız zaman, sistemi kontrol etmek için klasik çıktı değerine ihtiyaç duyarız. Buna durulaştırma denir. Durulaştırmanın amacı, bulanık kümeyi klasik kümeye çevirmektir. Birçok durulaştırma yöntemleri vardır.(bak şekil 5.20) Bunlar alan merkezi yöntemi (COA), sonuçların değerlerinin merkezi (COS) ve maksimumun ortalaması (MOM) olarak sayılabilir.



Şekil 5.20 Birkaç Durulaştırma Metodu (Zimmerman, 1996)



Şekil 5.21 5 Adımda Mamdani Tipi Kontrolün Gösterimi (Zimmerman, 1996 )

Mamdani metodunun faydaları;

- a) Oluşturulması kolay,
- b) Diğer bulanık metotlarında temelini oluşturur,
- c) İnsan düşüncesine uygundur.

Mamdani metodunun mahsurları;

- a) İşlemi kontrol etmek çabuk ve kolaydır ancak uzun vadeli sistemlerde başarılıdır (Sıcaklık kontrol sistemleri gibi),
- b) Yüksek frekanslı giriş sistemlerini kontrol ettiği zaman, hassasiyeti arttırmak için ek beceriye ihtiyaç duymaktadır. (Zimmerman, 1996)

### 5.10.2 Takagi – Sugeno Bulanık Mantık Yöntemi

Takagi - Sugeno bulanık mantığı ilk olarak 1985 yılında yayınlanmıştır. Bu yöntem, Mamdani yönteminin geliştirilmiş halidir. Girdileri bulanıklaştırma ve bulanık operasyonları, Mamdani metoduyla aynıdır. İkisi arasındaki fark, çıkış üyelik fonksiyonunun lineer veya sabit olmasıdır. (Pedrycz, 1993)

Çıkış fonksiyonları sabit ise, bu fonksiyonlara sıfıncı derece Sugeno bulanık modeli denir. Örnek olarak;

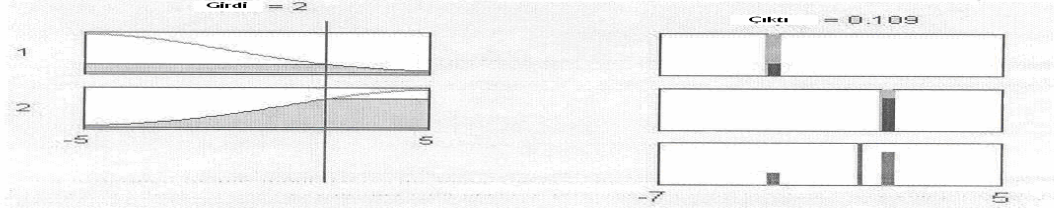
$$\text{'Eğer } x - A \text{ ve } y - B \text{ ise } z = k' \quad (5.3)$$

A ve B, x ve y 'nin üyelik fonksiyonlarını ifade eden bulanık kümelerdir. 'k' ise sabit bir sonuç değeridir.

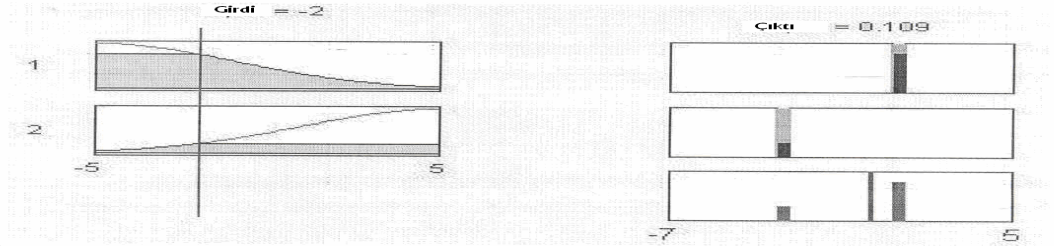
Birinci dereceden Sugeno bulanık modeli;

$$\text{'Eğer } x - A \text{ ve } y - B \text{ ise } z = p \cdot x + q \cdot y + r' \quad (5.4)$$

Denklemdaki A ve B bulanık kümeler, p, f, r ise sabitlerdir. Aşağıda matlab programında kullanılan 1. dereceden sistemler gösterilmiştir.



Şekil 5.22 Birinci Dereceden Sugeno Tipi Modelin Girdi Değişkenleri ile Çıktı Değişkenleri Arasındaki İlişki



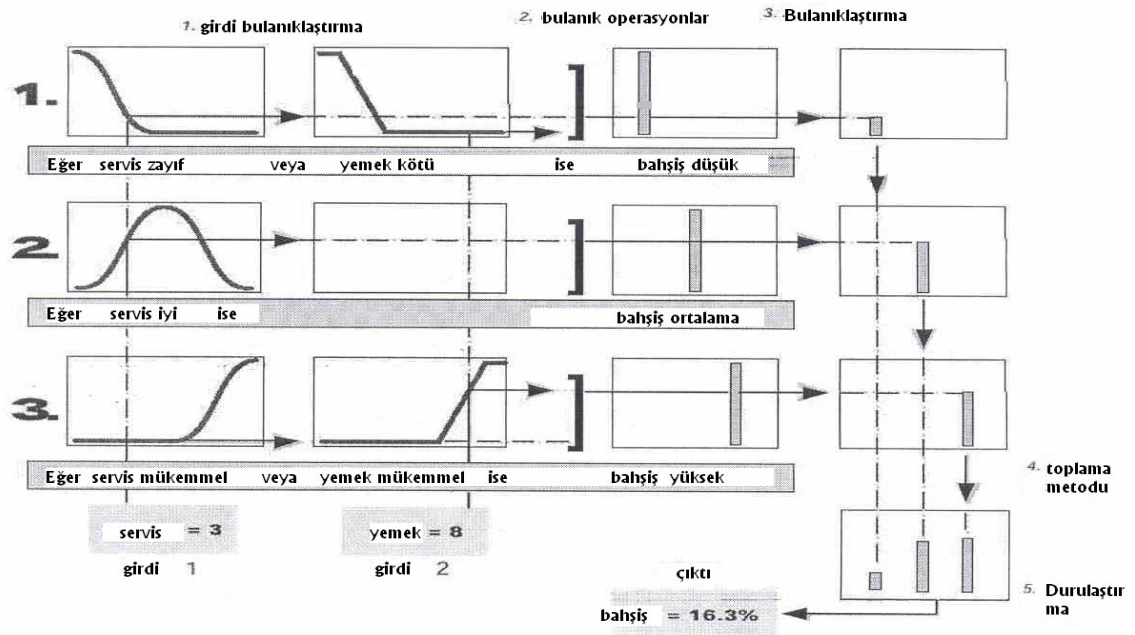
Şekil 5.23 1. Dereceden Sugeno Tipi Modelin Girdi ve Çıktı Değişkenleri Arasındaki İlişki

Yukarıdaki iki şekildeki, çıkış çizgisi 1 ve çizgi 2 aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\text{Çizgi 1 çıkış} = (-1) * \text{girdi} + (-1) \quad (5.5)$$

$$\text{Çizgi 2 çıkış} = (1) * \text{girdi} + (1) \quad (5.6)$$

Bu örnekten, Sugeno tipi sistemin şekil 5.24'de doğrusal sistemi, bulanık sisteme bağlamaya yaradığı görülmüştür. (Pedrycz, 1993)



Şekil 5.24 5 Adımda Sugeno Tipi Kontrolörün Gösterimi

Sugeno metodunun faydaları;

- a) Hesaplama için çok uygun,
- b) Lineer olmayan sistemleri kontrol etmek için lineer teknikleri kullanır,
- c) Hassasiyeti arttırmak için çıktıları optimize edebilir,
- d) Sürekli çıktı yüzeyine sahiptir,
- e) Matematik ile analiz edilebilir,

Sugeno metodunun mahsurları;

- a) Sezgisel değil,
- b) Daha yüksek dereceden Sugeno metodu kullanıldığında karmaşıklaşmaktadır.

Yukarıdaki iki metottan birini seçmemiz gerektiğinde, öncelikle sistemi ve karakterleri iyi kavramalı, daha sonra hangisinin sistemi daha kolay, ucuz ve uygun tamamlayacağına karar vermeliyiz.

### **5.11 Küme Tahmini Üzerine Kurulu Bulanık Model Tanımlanması**

Aşağıda anlatılacak yöntemde, sayısal veri topluluklarını kümelendirme ve bu küme merkezlerinin tahmini yapılmaktadır. (FCM algoritması gibi). Her bir küme merkezi, bir kuralı temsil etmektedir. Bu şekilde sistem davranışı belirlenir. Öncelikli olarak, küme merkezleri ve optimizasyon temelli küme algoritması için bu merkezlerin başlangıç değerleri belirlenir. Bulanık modellerin belirlenmesi için küme tahmin metodu kullanılmaktadır. Düzensiz zaman serilerinin tahmini ile ilgili problemlerin çözümünde, bu yöntem diğer karmaşık yöntemlerle kıyaslanarak daha kullanışlı olduğu görülmüştür. Bu kısımda, yol performans göstergesi olan RN sayısının tahmin edilmesi amacıyla kurulacak olan programın kullanacağı yöntemin çalışması ve özellikleri üzerinde durulmuştur.(Chiu, 1994)

Birçok sınıflandırma ve sistem modelleme algoritmalarının temelinin, sayısal verilerin kümelendirilmesi şekillendirmektedir. Kümelendirmenin amacı, geniş veri topluluklarını sınıflandırarak, sistemin davranışını özlü bir şekilde tanımlamaktır. 'Fuzzy C means' (FCM) kümelendirme algoritması (Dunn, 1974; Bezdek, 1974; Bezdek et al., 1987),

daha önce birçok araştırmada geniş bir biçimde incelenmiş ve çalışılmıştır. Tekrarlı optimizasyon algoritması olan FCM, aşağıdaki değer fonksiyonunu küçültmektedir.

$$J = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c \mu_{ik}^m \|x_k - v_i\|^2 \quad (5.7)$$

Üyelik derecesi olan  $\mu_{ik}$ 'nin tanımı;

$$\mu_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left( \frac{\|x_k - v_i\|}{\|x_k - v_j\|} \right)^{2/(m-1)}} \quad (5.8)$$

olarak karşımıza çıkmaktadır.

Formüllerde görülen  $n$  veri nokta sayısını,  $c$  küme sayısını,  $x_k$   $k$ . veri noktasını,  $v_i$   $i$ . küme merkezini,  $\mu_{ik}$  ise  $i$ . kümenin içindeki  $k$ . verinin üyelik derecesi,  $m$  ise 1' den büyük olan bir sabiti tanımlamaktadır. (Örnek olarak  $m=2$  alınır.)

Veri topluluğu içerisinde küme sayısının ( $c$ ) belirlenmesinden sonra, her küme merkezi için başlangıç tahminleri yapılmaktadır. ( $v_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, c$ ) FCM,  $v_i$  değeri için sonuca yaklaşma amacıyla, değer fonksiyonunun yerel minimumunu veya yüklenme noktasını göstermektedir. FCM sonucunun niteliği, başlangıç değerlerinin seçimine dayanmaktadır. ( $c$  küme sayısı, küme merkezlerinin potansiyel değerleri vb.)

Küme sayıları ve bu kümelerin merkezlerinin tahmini için Yager ve Filev (1992), basit ve etkili bir algoritma olan Mountain Metodu'nu oluşturmuşlardır. Sundukları yöntem, veri uzayı içerisinde bir ağ şebekesi oluşturularak, ağ noktalarının belirlenmesine ve bu ağ noktalarının, gerçek veri noktalarına olan uzaklıklarına göre potansiyel değerlerinin hesaplanmasına dayanmaktadır.(Chiu, 1994)

Ağ noktalarının potansiyel değeri, etrafında bulunan veri nokta sayısının bir fonksiyonudur. Çevresinde en çok sayıda veri noktası olan ağ (grid) noktası, en yüksek potansiyel değerine sahip olacaktır. Bu ağ noktası, ilk küme merkezi olarak seçilmektedir. Bundan sonra, ağ noktalarının potansiyelleri seçilen ilk küme merkezine olan uzaklıklarına göre azaltılır. Bu işlemden sonra en yüksek potansiyele sahip ağ noktası, ikinci küme merkezi olarak belirlenmektedir. Bu işlem, bütün ağ nokta

potansiyellerini belirli bir sınır altına düşürene kadar devam etmektedir. Bu yöntemin basit ve etkili olmasına karşın, problemin büyüklüğü ile orantılı olarak hesap katlanarak artmaktadır. Örnek olarak, 4 değişkenli ve 10 ağ (grid) çizgili bir küme problemi  $10^4$  adet ağ noktasına sahip olacaktır.

Bu çalışmada Mountain Metodu modifiye edilerek, küme tahmini üzerine kurulu bulanık modelleme yapılacaktır. Potansiyel küme merkezleri olarak ağ noktaları yerine veri noktaları alınarak, ağ nokta sayısı, veri nokta sayısına eşit tutulmuştur. Bu uygulama sonucunda, ağ çözümüne gerek kalmamaktadır. Bu şekilde yöntemin hesaplama yeteneği geliştirilmiştir. Bu tahmin algoritmasının hızlı olmasındaki esas nokta, tekrarlanan lineer olmayan optimizasyon içermemesidir. Ek olarak, hesap problemin büyüklüğü ile lineer olarak artmaktadır. Bu algoritmanın performansını diğer algoritmalar ile karşılaştırıldığında karmaşık yöntemlerle aynı sonucu verdiği görülmüştür.(Chiu, 1994)

### 5.11.1 Küme Tahmini

M boyutlu uzay içerisinde, n veri noktaları  $\{ x_1, x_2, \dots, x_n \}$  bulunmaktadır. Burada, her veri noktası potansiyel küme merkezi olarak düşünülmüş ve veri noktasının potansiyel değeri  $x_i$  olarak tanımlanmıştır;

$$P_i = \sum_{j=1}^n e^{-\alpha \|x_i - x_j\|^2}$$

$$\alpha = \frac{4}{r_a^2}$$

(5.9)

Veri noktasının potansiyelinin ölçüsü, diğer noktalara olan uzaklığının bir fonksiyonudur. Bir veri noktasının, komşu veri noktası ne kadar çok ise, potansiyel değeri de buna paralel olarak yüksek olacaktır. Sabit  $r_a$ , veri noktasının komşuluk ilişkisini temsil eder. Bu değeri yüksek alırsak, sistem düşük sayıda küme merkezi bulacaktır.  $r_a$  sabiti, sistemin hassasiyetini belirleyen bir sayıdır. Bu değer dışında kalan noktaların potansiyel üzerinde etkisi daha az olacaktır.(Chiu, 1994)

Bu metot ile potansiyel değerinin ölçümü, Yager ve Filev'in metodundan iki yönde ayrılmaktadır.

- a) Potansiyel, veri noktalarıyla tanımlanıyor. Ağ noktaları kullanılmıyor.
- b) Komşu veri noktasının önemi mesafenin kendisi yerine, karesiyle orantılı azalmaktadır. Böylece, mesafenin karesinin alınması ile karekök operasyonuna gerek kalmamaktadır.(Chiu, 1994)

Tüm veri noktalarının potansiyelleri hesaplandıktan sonra, en büyük potansiyele sahip nokta, birinci küme merkezi olarak kabul edilir.

$x_1^*$  , 1. küme merkezini,  $P_1^*$  ise bu küme merkezinin potansiyel değerini tanımlamaktadır.

$$P_i \Leftarrow P_i - P_1^* * e^{-\beta \|x_i - x_1\|^2}$$

$$\beta = \frac{4}{r_b^2}$$
(5.10)

Bu işlemden sonra, her veri noktasının potansiyel değeri, yukarıdaki denkleme göre gözden geçirilir. Diğer veri noktalarının potansiyel değerlerinde, birinci küme merkezine olan uzaklıklarına göre azalma olmaktadır. Birinci küme merkezine yakın noktalardaki azalma çok yüksek olacağından, potansiyeli düşük olur. En yüksek potansiyele sahip nokta, ikinci küme merkezi olarak tespit edilir.  $r_b$  sabiti (yarıçap) komşuluk ilişkisini tanımlamaktadır. Yaklaşık olarak,  $r_b = 1,5 \cdot r_a$  alınır.

$$P_i \Leftarrow P_i - P_k^* * e^{-\beta \|x_i - x_k\|^2}$$
(5.11)

$x_k^*$  – k. küme merkezi,  $P_k^*$  k. küme merkezinin potansiyel değeridir.(Chiu, 1994)

Bu işlemler k. küme merkezinde, Yager ve Filev'in metoduna uygun olarak,  $P_k^*$  potansiyel değeri aşağıdaki eşitliği sağlayıncaya kadar devam eder. Burada  $\epsilon$  ufak bir sabittir.

$$P_k^* < \epsilon P_1^*$$
(5.12)

$\varepsilon$  değerinin seçimi, küme merkezi tayini için önemlidir.  $\varepsilon$  değeri büyük seçilirse, az sayıda küme merkezi belirlenir. Bu değerin seçiminde farklı sonuçlar doğabileceğinden dolayı, yeni bir kriter geliştirilmiştir.

Eğer,  $P_k^* > \varepsilon P_1^*$  ise  $X_k^*$  küme merkezi olarak kabul edilir.

Veya,  $P_k^* < \varepsilon P_1^*$  olursa  $X_k^*$  küme merkezi olarak kabul edilmez.

Başka ,

$D_{\min} = X_k^*$  ve daha önce hesaplanmış küme merkezleri arası en kısa mesafe

Eğer, 
$$\frac{d_{\min}}{r_a} + \frac{P_k^*}{\sigma_1^*} \geq 1$$
 ise

$X_k^*$  küme merkezi olarak kabul edilir ve işlemlere devam edilir.

Veya,

$X_k^*$  küme merkezi olarak kabul görmez ve potansiyel değeri 0' a eşitlenir. En yüksek değerli diğer veri noktası  $X_k^*$  olarak seğilir. Ve tekrar test edilir.

Bitiş.

Formüllerde  $\varepsilon$ , kabul edilecek potansiyel sınır değeridir.  $\underline{\varepsilon}$ , küme merkezi tayini için incelenen veri noktasının, kabul görmeyecek potansiyel sınır değeridir.(Chiu, 1994)

### **Model Seçimi, Tanımlaması**

Girdi ve çıktı verilerine küme tahmin metodu uygulandığında, her küme merkezi bir kuralı yani sistemin bir karakterini temsil etmektedir. M boyutlu uzayda, c küme merkezleri  $\{ x_1^*, x_2^*, \dots, x_c^* \}$  incelenmektedir. N boyutlu uzayda, girdi verileri karşılanmaktadır ve son olarak, M – N boyutlu uzayda, çıkış değerleri karşılanmaktadır. Her  $x_i$  vektörü,  $y_i$  ve  $z_i$  olarak iki bileşene ayrılır.  $y_i, x_i'$  nin N boyutundaki elemanlarını

kapsar (küme merkezinin girdi uzayı içerisindeki koordinatları) ve  $z_i$  ise M-N elemanlarını kapsamaktadır.(Çıktı uzayındaki koordinatlarıdır.)

Her küme merkezi, bir bulanık kural içermektedir. Bu şekilde sistem davranışı temsil edilmektedir. Girdi vektörü  $y$ ' nin,  $i$ . kural derecesi aşağıda gösterilmiştir.

$$\mu_i = e^{-\alpha \|y - y_i^*\|^2} \quad (5.13)$$

Çıktı vektörü  $z$ ' nin hesabı aşağıdaki formül ile yapılmaktadır.

$$z = \frac{\sum_{i=1}^c \mu_i z_i^*}{\sum_{i=1}^c \mu_i} \quad (5.14)$$

Bu hesaplama modeli görüntülemek için bulanık mantığın 'eğer-ise' kurallarından yararlanır. Her kural aşağıdaki formattadır.(Chiu, 1994)

'eğer  $Y_1 - A_1 ; Y_2 - A_2 ; \dots$  ise,  $Z_1 - B_1 ; Z_2 - B_2 , \dots$ ' olur.

$Y_j$ ,  $j$ . giriş değişkeni,  $A_j$  üyelik fonksiyonunu,  $Z_j$   $j$ . çıkış değişkeni,  $B_j$  ise tek bir değerdir.  $X_i^*$  küme merkezinde,  $i$ . kural içerisinde  $A_j$  ve  $B_j$  aşağıda formüle edilmiştir.

$$A_j(q) = e^{-\alpha(q - y_{ij}^*)^2}$$

$$B_j = z_{ij}^* \quad (5.15)$$

$y_{ij} = y_i^*$ ' nin  $j$ . elemanı,  $z_{ij} = z_i^*$ ' nin  $j$ . elemanını temsil etmektedir.(Chiu, 1994)

Bu hesap projesi, toplama işlemi için 'VE' operatörünü kullanan bir metottur. Çıkış kurallarının ağırlıklı ortalamalarını hesaplamaktadır. Denklem 5.14 ve denklem 5.15, bir grup küme merkezinin bulanık modele dönüştürülmesinin kolay ve direk bir yoludur. Mountain Metodu'nda Yager ve Filev (1992), bulanık model oluşturmak için küme

merkezleri seçmişler ve bu merkezlerin kurallarını optimize etmede  $y_{ij}$ ,  $z_{ij}$  ve  $\alpha_{ij}$  parametrelerini denklem 5.15’de kullanmışlardır. Bu modelde yukarıdaki  $z_i^*$  değeri, giriş değişkenlerinin lineer fonksiyonu olarak, sabit bir değer yerine birinci dereceden bir denklem olarak ifade edilmiştir.(Chiu, 1994)

$$z_i^* = G_i y + h_i \quad (5.16)$$

$G_i$ , (M-N) x N sabit matris

$h_i$ , sabit sütun vektörü (M-N elemanları)

‘Eğer – İse’ kuralları Takagi – Sugeno tipine dönüşmektedir, dolayısı ile her kural, girdi değerleri içinde lineer bir denklemdir. Takagi – Sugeno tipi kurallar kullanan modeller, az sayıdaki kurallar ile karmaşık davranışlar göstermektedir. (Tanaka ve Sugena, 1991).

$z_i^*$  değerinin lineer bir fonksiyon olarak ifade edilmesi ile optimizasyon kuralının yerine getirilmesi ile daha fazla hesap karmaşıklığının önüne geçilmektedir. Takagi ve Sugeno (1985) belirttiği üzere parametrelerin sonuç denklemleri içerisinde optimize edilmesi sayesinde en küçük kareler probleminin azalması sağlanmaktadır. Böyle problemlerin çözümleri kolayca yapılabilmekte ve sonuç, her zaman uygun çıkmaktadır.(Chiu, 1994)

Denklem parametresi olan optimizasyon problemini, lineer en küçük kareler metoduna çevirmek amacı ile aşağıdaki formül verilmiştir.

$$\rho_i = \frac{\mu_i}{\sum_{j=1}^c \mu_j} \quad (5.17)$$

$$z = \sum_{i=1}^c \rho_i z_i^* = \sum_{i=1}^c \rho_i (G_i y + h_i) \quad (5.18)$$

$$z^T = \begin{bmatrix} \rho_1 y^T & \rho_1 \dots \rho_c y^T & \rho_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1^T \\ h_1^T \\ \vdots \\ G_c^T \\ h_c^T \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

Burada  $z^T$  ve  $y^T$  dizi vektörlerini,  $n$  giriş veri noktalarını  $\{ y_1, y_2, \dots, y_n \}$  ifade etmektedir. Modelin çıktısı aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} z_1^T \\ \vdots \\ z_n^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{1.1} y_1^T & \rho_{1.1} \dots \rho_{c.1} y_1^T & \rho_{c.1} \\ \vdots \\ \rho_{1.n} y_n^T & \rho_{1.n} \dots \rho_{c.n} y_n^T & \rho_{c.n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1^T \\ h_1^T \\ \vdots \\ G_c^T \\ h_c^T \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

$\rho_{ij}$ ,  $\rho_i$  nin  $y_j$  'deki değerini ifade etmektedir

Yukarıdaki formülde, sağdaki matris (denklem 5.20'nin sağında) sabittir. İkinci matris yani soldaki, optimize edilecek bütün parametreleri içermektedir.(Chiu, 1994)

Model çıktıları ile eğitilen verilerin arasındaki hatayı minimize etmek amacıyla, denklem 5.20' nin solundaki matrisin yerine gerçek çıkış verileri yerleştirilmiştir. Bu şekilde en küçük kareler problemi çözülmüştür. Bir diğer varsayım, en küçük kareler problemindeki eğitilen veri sayısının, optimize edilecek parametre sayısından fazla olduğudur.

Birçok literatürde en küçük kareler yönteminin esas formatı aşağıdaki şekilde verilmektedir.

$$'AX = B' \quad (5.21)$$

B, çıkış değerlerinin matrisini, A sabit bir matrisi, X ise tahmin edilecek parametrelerin matrisini tanımlamaktadır. '  $\|AX - B\|^2$  ' formülünü minimuma yaklaştıran çözüm denklemini aşağıda verilmiştir.

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (5.22)$$

$(A^T A)$  büyük bir matrisi tanımladığı takdirde,  $(A^T A)^{-1}$  matrisini hesaplamak uzun zaman almaktadır.  $(A^T A)$  yaklaşık tekil olduğu zamanda, sayısal problemler artmaktadır. X değerini çözmek için farklı bir iterasyon metodu kullanılmaktadır. Bu metodun etkili bir hesaplama kabiliyeti vardır.(Chiu, 1994)

$$X_{i+1} = X_i + S_{i+1} a_{i+1} (b_{i+1}^T - a_{i+1}^T X_i) \quad (5.23)$$

$$S_{i+1} = S_i - \frac{S_i a_{i+1} a_{i+1}^T S_i}{1 + a_{i+1}^T S_i a_{i+1}}, i = 0, 1, \dots, n \quad (5.24)$$

$X_i$  i. iterasyonda X değerinin tahmini,  $S_i$  değişken matris ( $c(N+1) \times c(N+1)$ ),  $a_i^T$ , A'nın i. sütun vektörü ve  $b_i^T$ , B'nin i. sütun vektörüdür.

Yukarıda anlatılan model tanımlama metodu, iki farklı adım içermektedir.

- a) Bulanık kuralları temsil eden küme merkezlerine karar vermek,
- b) Kural sonuçlarını optimize etmektir.

İki adımdan hiçbiri lineer-olmayan optimizasyon içermemektedir ve ikisi de hesaplama zamanını iyi sınırlandırmıştır. Birinci adımda, zamanın çoğu veri noktalarının her birinin potansiyelini bulmada harcanmaktadır. Bir sonraki adımda küme merkezleri tayin ediliyor ve verilerin potansiyel değerleri, küme merkezlerine mesafelerine göre tekrar hesaplanıyor. Bu şekilde, küme merkezi olarak belirlenecek tüm noktalar işaretlenmiş oluyor. Birinci adımda bulunan küme merkezlerinin sayısı, ikinci adımdaki hesap süresini direk olarak etkilemektedir. Çünkü, optimize edilecek parametre sayısı, küme

sayısı ile lineer olarak artmaktadır. Bu yüzden, 2. adımın hesap süresini ancak 1. adım tamamlandıktan sonra tahmin edebiliriz.(Chiu, 1994)

Bu modelde küme merkez sayısının otomatik olarak tayin edilmesine rağmen, kullanıcının sisteme  $r_a$  değerini girmesi gerekmektedir.  $r_a$  değerini, veri noktalarının komşuluk fonksiyonu olarak değerlendirebiliriz. Bu değeri büyük almamız durumunda, az sayıda küme merkezi belirleneceğinden dolayı, kaba bir model oluşturmuş oluruz.  $r_a$  değerini ufak aldığımız takdirde, çok sayıda küme çıkacağından, sistem fazla yüklenmiş olur. Optimum bir değer ataması yapılarak, iyi çalışan bir sistem oluşturabiliriz.(Chiu, 1994)

## 6. BULANIK MANTIK YÖNTEMİYLE MODELLEME

Bu çalışmada, Devlet yollardaki üstyapı performansının bir göstergesi olan Sürüş Sayısı'nın (RN), bulanık mantık tabanlı bir model ile tahmini üzerinde çalışılmıştır. Bu amaçla, kullanılan programa, Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından ölçümü yapılan RN (Sürüş Sayısı) değerleri ve bu yolların bozulmaları üzerinde değişik oranlarda etkisi olan parametreler girilmiştir. Bu parametreler, Karayolları Genel Müdürlüğü'nden alınan, incelenen yollara ait yığılımlı standart dingil yükü tekrar sayısı (YESDYS), kalınlık ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan yolların geçtiği bölgelerin yıllık ortalama yağış miktarı (YOY), yıllık ortalama en yüksek sıcaklık değeri (YSmaks), yıllık ortalama sıcaklık değeri (YSort.) ve yıllık ortalama en düşük sıcaklık değeri (YSmin) olarak sıralanabilir. Program veri topluluğunu kullanarak kendini eğitmektedir. Bu eğitim safhasından sonra, programa verilen farklı parametreler doğrultusunda, RN tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Bilinen bulanık mantık yöntemlerinde (Mamdani, Sugeno,...vb.) sistemi modelleyen kişi (uzman kişi), model parametreleri arasındaki ilişkileri bilmektedir. Konu ile ilgili bilgileri ve tecrübeleri doğrultusunda, ilişkiler arasındaki kuralları yazarak modelleme yapar. Bu şekilde, sistem kuralları ve sınırları, insan algısına uygun olarak belirlenmektedir. Model parametrelerinin sistem üzerindeki etkisi yani üyelik dereceleri, uzman kişi tarafından belirlenerek, sistemin modellenmesi yapılmaktadır.

Yol performansı üzerinde etkisi olan trafik hacmi, yağış, sıcaklık gibi parametrelerin aralarındaki ilişki tam olarak bilinmemektedir. Model parametrelerinin arasındaki ilişkilerin şüpheli olduğu bu tip durumlarda, küme merkezinin tahminine dayalı bir model kullanılarak bulanıklık çözülebilmektedir.

Küme merkezi tahminine dayalı bulanık model tanımlaması olarak bilinen bu yöntem, veri topluluklarını sınıflandırarak, küme merkezlerini belirlemekte ve bu merkezlere bulanık kural ataması yapmaktadır. Karışık verilerde, ilişkilerin tam bilinmediği durumlarda, bu yöntemin kullanılmasının daha etkili olacağı düşünülmektedir.

## 6.1 Bulanık Mantık Modelinde Kullanılan Parametreler

Bu modelde, Ulaşım Ana Planı Stratejisi çalışması sırasında KGM ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan veriler kullanılmıştır. Modelde kullanılan parametreler;

- YESDYS, yığışımli eşdeğer dingil yükü tekrar sayısını ifade etmektedir. KGM'den alınan, son on iki yılın trafik bilgileri (YOGT değerleri) değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler sonucunda, bu çalışmada kullanılmak üzere belirlenen yol ağı üzerinde, kesim no.su göz önüne alınarak, trafik hacimleri ve son on iki yıldaki trafik hacim değişimleri incelenmiştir. Trafik hacimleri, daha sonra çalışmada kullanılacak olan YESDYS' ye dönüştürülmüştür. Trafik hacimleri, otomobil, otobüs, kamyon ve treyler olarak dört grup halinde belirtilmiştir. Belirtilen gruptaki trafik değerlerini 8,2 tonluk Standart Dingil Yüğü ( $T_{8,2}$ ) değerine çevirmek için, KGM tarafından belirlenen Taşıt Eşdeğerlik Faktörleri kullanılmış (Tablo 6.1), her yıl için Yığışımli Eşdeğer Standart Dingil Yüğü Sayısı bulunmuştur. Bu değerler, her bir yol kesimi için bakım yapıldığı yıl belirtilmiş ise, bakım yapıldığı yıldan itibaren, herhangi bir bakım belirtilmemiş ise 1992 yılından başlayarak yığışımli olarak 2002 yılı sonuna getirilmiştir.

Tablo 6.1 Taşıt eşdeğerlik faktörleri

| Taşıt Grubu | Taşıt Eşdeğerlik Faktörleri |
|-------------|-----------------------------|
| Treyler     | 4.40                        |
| Kamyon      | 2.80                        |
| Otobüs      | 3.90                        |
| Otomobil    | 0.0006                      |

- Üstyapı kalınlığı, alt temel, temel ve üstündeki aşınma, binder tabakalarının kalınlıklarının toplamını ifade etmektedir.
- YOY, incelenen yolun bulunduğu bölgenin yıllık ortalama yağış miktarıdır.

- YSmaks., incelenen yolun bulunduğu bölgenin yıllık ortalama en yüksek sıcaklık değerini ifade etmektedir.
- YSmin., değerlendirilen yolun geçtiği bölgede ölçülen yıllık ortalama en düşük sıcaklık değeridir.
- YSort., değerlendirilen yolun geçtiği bölgede Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından ölçülen yıllık ortalama sıcaklık değeridir.
- Sürüş Sayısı (RN) , RN ölçümleri Devlet Yolları için 1996, 1998, 2000 ve 2002 yıllarında, yapılmıştır. RN değeri sürüş kalitesini, trafik güvenliğini ve taşıt bakım maliyetlerini olumsuz yönde etkileyen üstyapı yüzey düzgünsüzlüğünün bir göstergesidir. Profilometre Aleti ile otomatik olarak 15.0 cm. aralıklarla ölçülmekte ve bilgisayar yardımı ile 100 m.'lik ortalamaları alınmak suretiyle, her kontrol kesim numaralı yol için, homojen kesimlerin ve yolun genel ortalamaları hesaplanabilmektedir. Ölçülen RN değerleri 0-5 arasında değişmekte olup, (0) değeri geçit vermeyen yolu, (5) değeri ise, mükemmel bir yolu göstermektedir.

## **6.2 Bulamık Modelde Kullanılan Yol Kesimlerine Ait Veriler**

KGM' den alınan esnek üstyapılı devlet yollarına ait verilerin bazıları anlamsız, bazıları da tekrarlı (aynı veriler) olduğu için değerlendirmeye alınmamış, ayrıca şüphe duyulan kesimlere ait veriler KGM' ye sorularak kontrol edilmiştir.

Yapılan değerlendirme sonucunda seçilen 32 adet yol üzerinde çalışmanın devamına karar verilmiştir. Bu yolların, özellikle RN (Sürüş Sayısı) ölçümleri KGM tarafından yapılmış olan yollar içerisinde seçilmesine özen gösterilmiştir. Seçilen yollara ait parametreler ve RN ölçümleri ek-1'de gösterilmiştir.

Ek-1'deki tabloda yol isimleri, üstyapı kalınlıkları, YESDYS, YOY, YOS, YSmax, YSmin gibi yol performansı üzerinde etkisi olduğu düşünülen parametrelerin yanı sıra yol performansının bir ölçüsü olan RN değerlerinin ölçümleri de verilmiştir.

Her yola ait parametrelerin ve RN ölçümlerinin birlikte gösterildiği tablo aşağıda verilmiştir. Bu şekilde parametreler ile RN sayısının birlikte değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Program, parametreler ve RN değerleri arasındaki ilişkiyi bu veriler aracılığıyla yapmaktadır. Bu veriler, programın eğitim aşamasında kullanılmaktadır.( Tablo 6.2, Tablo 6.3 )

Bu aşamada veriler program tarafından analiz edilerek parametreler arası ilişkiler tanımlanmaktadır. Parametrelerin, RN sayısı üzerindeki etkileri ve birbiri arası ilişkileri program tarafından eğitim aşamasında belirlenmektedir.

Hesap edilecek olan değerler, programın eğitim aşamasının tamamlanması ile işleme dahil ediliyor. Parametreler arası ilişkiler, eğitilecek veriler içerisinde değerlendirildikten sonra hesaplama kısmında, RN sayısının tahmini için kullanılmaktadır.

Tablo 6.2 Programa Verilecek Eğitim Değerleri

| EGİTİLECEK DEĞERLER |     |     |       |       |          |      |
|---------------------|-----|-----|-------|-------|----------|------|
| YESDYS              | YOY | YOS | YSmax | Ysmin | Kalınlık | RN   |
| 19940768            | 27  | 25  | 39    | -12   | 67       | 3,22 |
| 16186195            | 68  | 26  | 35    | -3    | 60       | 3,16 |
| 7465486             | 36  | 25  | 40    | -14   | 64       | 3,91 |
| 6536029             | 31  | 27  | 38    | -10   | 50       | 3,96 |
| 18070966            | 53  | 26  | 38    | -9    | 55       | 2,81 |
| 21018450            | 106 | 29  | 38    | -2    | 57       | 2,97 |
| 8876501             | 40  | 25  | 39    | -9    | 67       | 3,73 |
| 10379675            | 52  | 29  | 43    | -5    | 62       | 3,45 |
| 6793354             | 31  | 27  | 38    | -10   | 62       | 3,69 |
| 11041689            | 40  | 25  | 39    | -9    | 62       | 3,56 |
| 9358176             | 46  | 26  | 37    | -13   | 69       | 3,56 |
| 5268967             | 27  | 25  | 39    | -12   | 55       | 4,05 |
| 28255859            | 42  | 26  | 37    | -15   | 67       | 3,01 |
| 11679746            | 38  | 26  | 38    | -13   | 50       | 3,51 |
| 20899290            | 26  | 25  | 36    | -10   | 45       | 2,75 |
| 18227320            | 39  | 27  | 38    | -8    | 48       | 2,84 |
| 10856358            | 33  | 26  | 38    | -13   | 62       | 3,73 |
| 10754971            | 38  | 23  | 37    | -15   | 58       | 3,64 |
| 27744159            | 134 | 30  | 42    | -1    | 57       | 2,67 |
| 4525556             | 52  | 29  | 43    | -5    | 74       | 3,97 |
| 16893172            | 40  | 25  | 37    | -11   | 67       | 3,43 |
| 20680239            | 45  | 27  | 42    | -8    | 48       | 2,81 |
| 17914925            | 40  | 25  | 37    | -11   | 62       | 3,33 |
| 6799484             | 38  | 26  | 38    | -7    | 65       | 3,73 |
| 18560440            | 43  | 31  | 45    | -3    | 55       | 2,84 |
| 9214774             | 43  | 31  | 45    | -3    | 55       | 3,5  |
| 5836304             | 62  | 31  | 45    | -4    | 64       | 4,3  |
| 16304670            | 61  | 27  | 36    | -12   | 69       | 3,42 |
| 11952093            | 42  | 26  | 37    | -15   | 55       | 3,71 |
| 36506661            | 30  | 25  | 41    | -22   | 67       | 2,89 |
| 34505697            | 57  | 25  | 35    | -5    | 60       | 2,25 |
| 21515900            | 41  | 27  | 45    | -17   | 62       | 3,27 |
| 19301934            | 34  | 24  | 42    | -19   | 64       | 3,44 |
| 18645451            | 39  | 26  | 40    | -16   | 50       | 3,24 |
| 23744932            | 35  | 28  | 42    | -10   | 55       | 2,38 |
| 17174291            | 31  | 24  | 38    | -18   | 58       | 3,21 |
| 27010254            | 68  | 25  | 40    | -8    | 45       | 2,43 |
| 25320832            | 35  | 25  | 42    | -18   | 48       | 2,01 |
| 15499384            | 43  | 25  | 43    | -21   | 62       | 3,58 |
| 14998824            | 38  | 25  | 42    | -16   | 58       | 3,45 |
| 14405315            | 63  | 30  | 45    | -6    | 74       | 3,88 |
| 23408664            | 66  | 27  | 43    | -5    | 48       | 3,02 |
| 26867780            | 31  | 24  | 41    | -15   | 67       | 3,22 |
| 30622633            | 63  | 30  | 45    | -6    | 62       | 2,46 |
| 26994237            | 39  | 26  | 40    | -16   | 62       | 3,13 |
| 14486631            | 37  | 27  | 41    | -10   | 65       | 3,43 |
| 18669492            | 41  | 27  | 45    | -17   | 55       | 3,47 |
| 13227809            | 56  | 31  | 44    | -5    | 62       | 3,84 |
| 26298274            | 35  | 31  | 47    | -2    | 55       | 2,52 |
| 15240722            | 35  | 31  | 47    | -2    | 55       | 3,27 |
| 11621432            | 56  | 31  | 44    | -5    | 64       | 3,9  |
| 30078773            | 63  | 30  | 45    | -6    | 69       | 2,75 |
| 25013532            | 47  | 26  | 39    | -16   | 69       | 3,33 |
| 13898637            | 63  | 30  | 45    | -6    | 65       | 3,64 |
| 17742162            | 30  | 25  | 41    | -22   | 55       | 3,5  |
| 19724700            | 31  | 24  | 41    | -15   | 70       | 3,65 |
| 22163712            | 72  | 31  | 41    | -3    | 72       | 3,5  |
| 25924372            | 27  | 26  | 38    | -20   | 50       | 2,85 |
| 33844273            | 97  | 25  | 37    | -11   | 45       | 1,95 |
| 32830321            | 36  | 26  | 39    | -10   | 48       | 1,17 |
| 25750703            | 57  | 29  | 42    | -6    | 74       | 3,68 |
| 30339859            | 45  | 27  | 40    | -9    | 48       | 2,78 |
| 36337949            | 32  | 25  | 38    | -15   | 67       | 2,98 |
| 40547242            | 58  | 29  | 44    | -6    | 62       | 1,9  |
| 39334825            | 27  | 26  | 38    | -20   | 62       | 2,79 |
| 39479129            | 45  | 27  | 40    | -9    | 48       | 1,93 |
| 35047105            | 30  | 31  | 43    | -5    | 55       | 2,08 |
| 21860179            | 30  | 31  | 43    | -5    | 55       | 2,98 |
| 16610130            | 69  | 30  | 44    | -4    | 64       | 3,79 |
| 42813331            | 57  | 29  | 42    | -6    | 69       | 2,4  |
| 37957248            | 40  | 25  | 38    | -18   | 72       | 2,85 |
| 29404862            | 32  | 25  | 38    | -15   | 70       | 3,43 |
| 36115796            | 40  | 32  | 41    | -2    | 72       | 3,06 |

Tablo 6.3 RN Değeri Hesaplanacak Olan Veriler

| HESAP EDİLECEK DEğERLER |     |     |       |       |          |  |
|-------------------------|-----|-----|-------|-------|----------|--|
| YESDYS                  | YOY | YOS | Ysmax | Ysmin | kalınlık |  |
| 7201322                 | 77  | 31  | 42    | -2    | 62       |  |
| 7687129                 | 39  | 30  | 42    | -9    | 55       |  |
| 18500163                | 69  | 30  | 44    | -4    | 62       |  |
| 10637599                | 39  | 30  | 42    | -9    | 62       |  |
| 16110787                | 38  | 26  | 38    | -13   | 62       |  |
| 25046929                | 37  | 25  | 40    | -17   | 72       |  |
| 17452312                | 45  | 27  | 42    | -8    | 48       |  |
| 23117070                | 57  | 29  | 42    | -6    | 65       |  |
| 26355663                | 31  | 24  | 41    | -15   | 62       |  |
| 30512293                | 34  | 25  | 36    | -20   | 58       |  |
| 25924372                | 27  | 26  | 38    | -20   | 50       |  |
| 30078773                | 63  | 30  | 45    | -6    | 69       |  |
| 29486116                | 66  | 27  | 43    | -5    | 48       |  |
| 40954899                | 84  | 30  | 41    | -1    | 57       |  |
| 43105822                | 62  | 26  | 34    | -4    | 60       |  |
| 20027050                | 55  | 29  | 44    | -5    | 62       |  |
| 13432067                | 40  | 28  | 43    | -10   | 55       |  |
| 25193354                | 60  | 25  | 35    | -6    | 60       |  |
| 16278655                | 40  | 28  | 42    | -12   | 62       |  |
| 13325273                | 35  | 24  | 41    | -15   | 64       |  |

### 6.3 Bulanık Model

RN değerinin tahmin edilmesi amacıyla bulanık mantık tabanlı bir model oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu modelde, giriş verileri kümelendirilerek kural ataması yapan bir algoritma kullanılmıştır.

Küme merkezi tahminine dayalı bulanık model tanımlaması olarak bilinen bu yöntem, veri topluluklarını sınıflandırarak, küme merkezlerini belirlemekte ve bu merkezlere bulanık kural ataması yapmaktadır. Bu şekilde, büyük veri topluluklarının az sayıda kural ile tanımlanması amaçlanmaktadır. İşlem yoğunluğu verilerin kümelendirilmesi yöntemiyle azaltılmaktadır.

Küme merkezi tahminine dayalı bu algoritmada, veriler arası komşuluk ilişkisinin fonksiyonu olan  $r$  sabiti, sisteme uzman kişi tarafından girilmektedir. Seçilen küme merkezi sayısı  $r$  sabit değeriyle ters orantılı olarak değişmektedir. ' $r$ ' değerinin küçük alınması durumunda, sistem çok sayıda küme merkezi belirlemektedir. ' $r$ ' sayısı büyük seçildiği takdirde, küme merkez sayısı az olmaktadır. Her iki durumda sakıncaları bulunmaktadır. Bu değer seçiminde en uygun olanın bulunması (genellikle 0,4 ile 0,8), sistemin başarılı olmasını sağlamaktadır.

Modelde kullanılacak parametrelerin birbiriyle ilişkili olup olmadığını belirlemek amacıyla eğitilecek veriler için korelasyon matrisi, excell programında hesaplanmıştır.

Tablo 6.4 Korelasyon Matrisi

|               | <i>RN</i> | <i>YESDYS</i> | <i>YOY</i> | <i>YOS</i> | <i>Ymax S</i> | <i>Ymin S</i> | Kalınlık |
|---------------|-----------|---------------|------------|------------|---------------|---------------|----------|
| <i>RN</i>     | 1         |               |            |            |               |               |          |
| <i>YESDYS</i> | -0,786942 | 1             |            |            |               |               |          |
| <i>YOY</i>    | -0,122737 | 0,1042525     | 1          |            |               |               |          |
| <i>YOS</i>    | 0,001893  | 0,0204958     | 0,3689455  | 1          |               |               |          |
| <i>Ymax S</i> | 0,0439234 | -0,011423     | 0,1194649  | 0,4804288  | 1             |               |          |
| <i>Ymin S</i> | -0,067792 | -0,07502      | 0,5233246  | 0,5594257  | 0,3439333     | 1             |          |
| Kalınlık      | 0,4452812 | -0,031675     | 0,020744   | 0,1188247  | 0,074719      | 0,0008449     | 1        |

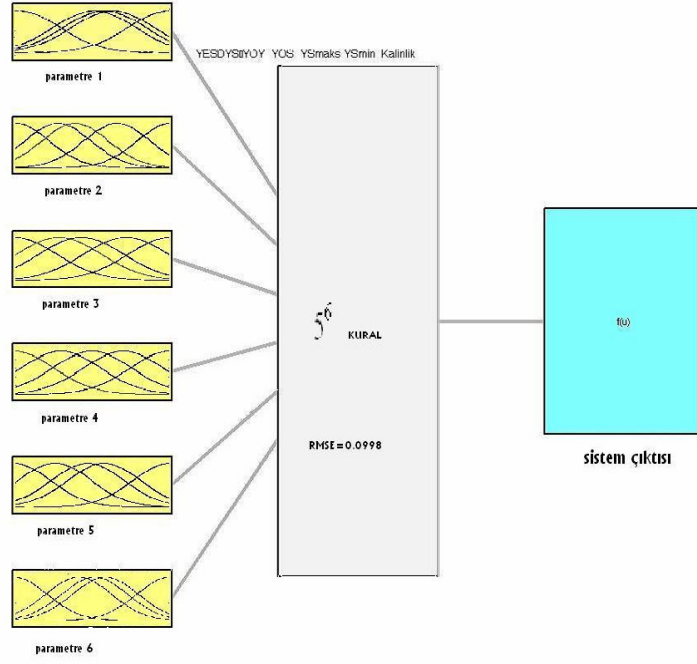
Tablodan görüldüğü gibi, YESDYS ile RN parametreleri arasındaki ilişkinin en kuvvetli olduğu görülmektedir. Bir diğer kuvvetli ilişki, RN ile kalınlık parametreleri arasında olduğu söylenebilir. Diğer parametreler ile RN arası ilişkinin zayıf olduğu tablodan görülmektedir. Sıcaklık parametreleri olan yıllık ortalama sıcaklık, yıllık ortalama yüksek sıcaklık ve yıllık ortalama düşük sıcaklık değerleri için korelasyon katsayısı 0,5 civarındadır. Doğal olarak, sıcaklık parametreleri arasında ufak bir ilişki olduğu söylenir. Buna karşın fiziksel olarak tamamen farklı parametreler olduğu açıktır.

Yol performansı üzerinde etkisi olan parametrelerin bulunduğu veri topluluğunu gösteren Tablo 6.2' de 73 adet RN değeri bulunmaktadır. Eğitim aşamasında kullanılmak üzere seçilen bu 73 veri noktasının küme merkezlerinin belirlenmesi amacıyla sisteme 'r' değeri 0,71 olarak girilmiştir. Bu değer kullanıma karar vermek amacıyla, birçok deneme yapılarak programın sonuçları incelenmiştir. Sistem hatası ve tahmin edilen RN değerleri baz alınarak, sonuçların en mantıklı olduğu değere ulaşılmaya çalışılmıştır. Program tarafından yapılan veri noktası potansiyel hesaplamaları sonucu her parametre için 5 adet küme merkezi bulunmuştur. Bütün veri topluluğu 5<sup>6</sup> bulanık kural ile en uygun şekilde tanımlanmıştır. Programa verilen her RN değerine karşı gelen satır içerisinde bulunan parametre değerleri, eğitim aşamasında kullanılarak veriler arası ilişkiler program tarafından belirlenmektedir.

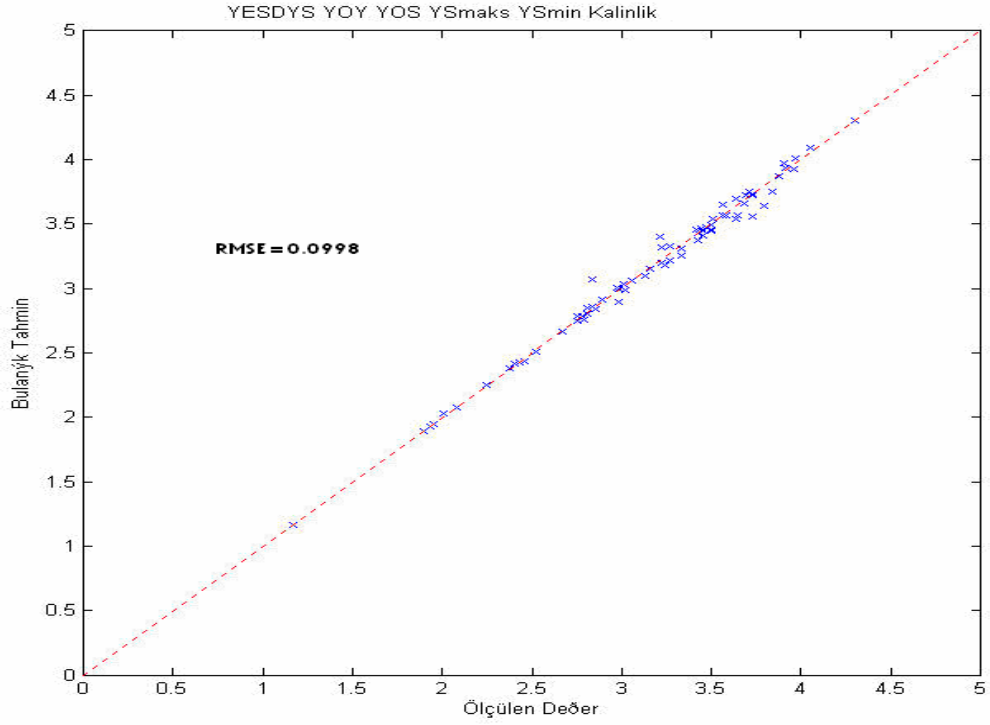
Bulanık modelin sonuçları aşağıda gösterildiği gibi, MATLAB programı içinde yazılan program modülü tarafından oluşturulan grafikler halinde sunulmaktadır. Veri sayısı, seçilen küme sayısı, modelin hatası gibi sonuçları ifade eden Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3 aşağıda verilmiştir. Ölçülen RN değerleri ile programın tahmin ettiği RN değerlerini gösteren tablo aşağıda sunulmuştur.( bak tablo 6.5)

Tablo 6.5 Tahmin Edilen ve Ölçülen RN Değerleri ile Sistemin Hatası

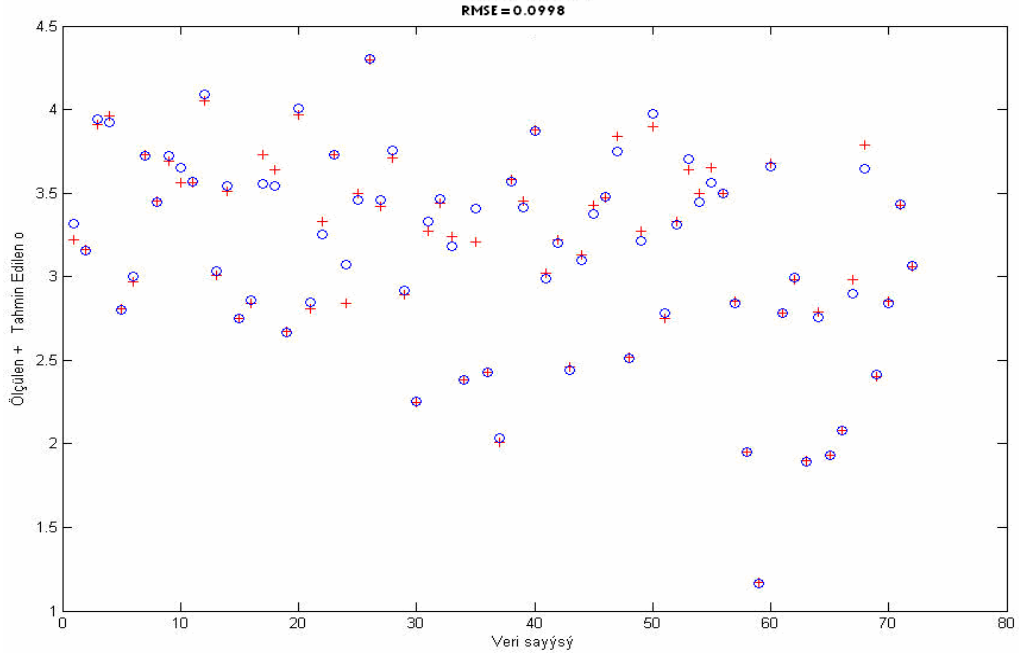
| YESDEYS  | YOY | Yomax S | Ymax S | Ymin S | Kalınlık | RN ölçülen | RN tahmin | RMSE   |
|----------|-----|---------|--------|--------|----------|------------|-----------|--------|
| 7201322  | 77  | 31      | 42     | -2     | 62       | 3,92       | 4,0413    | 0,0998 |
| 7687129  | 39  | 30      | 42     | -9     | 55       | 3,84       | 3,8147    |        |
| 18500163 | 69  | 30      | 44     | -4     | 62       | 3,67       | 3,7214    |        |
| 10637599 | 39  | 30      | 42     | -9     | 62       | 3,55       | 3,5315    |        |
| 16110787 | 38  | 26      | 38     | -13    | 62       | 3,41       | 3,4023    |        |
| 25046929 | 37  | 25      | 40     | -17    | 72       | 3,32       | 3,5427    |        |
| 17452312 | 45  | 27      | 42     | -8     | 48       | 3,24       | 3,22      |        |
| 23117070 | 57  | 29      | 42     | -6     | 65       | 3,22       | 3,2712    |        |
| 26355663 | 31  | 24      | 41     | -15    | 62       | 3,13       | 2,9697    |        |
| 30512293 | 34  | 25      | 36     | -20    | 58       | 2,98       | 2,7289    |        |
| 25924372 | 27  | 26      | 38     | -20    | 50       | 2,85       | 2,8392    |        |
| 30078773 | 63  | 30      | 45     | -6     | 69       | 2,75       | 2,7826    |        |
| 29486116 | 66  | 27      | 43     | -5     | 48       | 2,36       | 2,2359    |        |
| 40954899 | 84  | 30      | 41     | -1     | 57       | 2,01       | 2,9698    |        |
| 43105822 | 62  | 26      | 34     | -4     | 60       | 1,82       | 1,8813    |        |
| 20027050 | 55  | 29      | 44     | -5     | 62       | 3,03       |           |        |
| 13432067 | 40  | 28      | 43     | -10    | 55       | 3,51       |           |        |
| 25193354 | 60  | 25      | 35     | -6     | 60       | 2,89       |           |        |
| 16278655 | 40  | 28      | 42     | -12    | 62       | 3,35       |           |        |
| 13325273 | 35  | 24      | 41     | -15    | 64       | 3,61       |           |        |



Şekil 6.1 Sistemin Çalışma Şeması



Şekil 6.2 Tahmin Edilen Değerler ile Ölçülen Değerlerin Karşılaştırılması

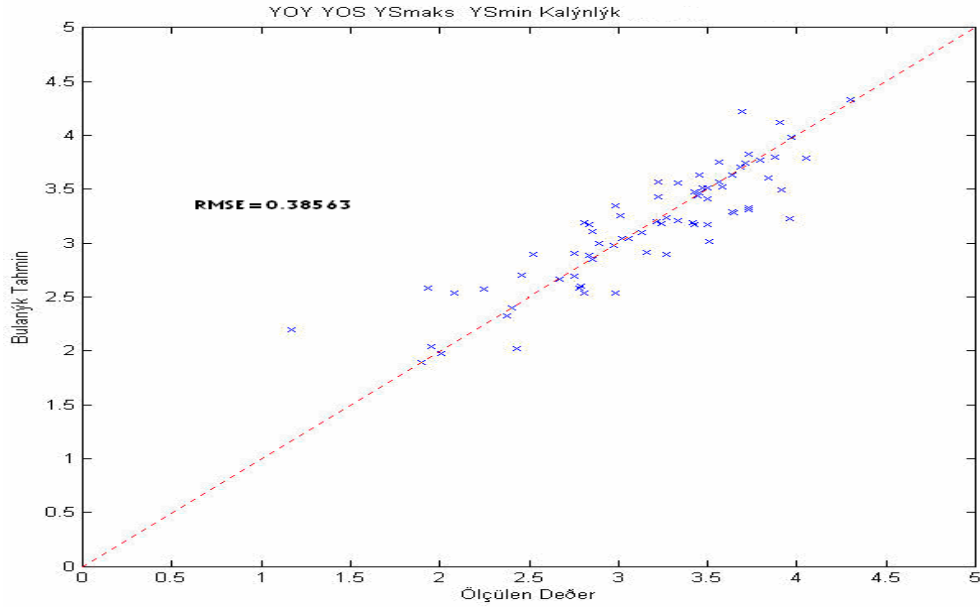


Şekil 6.3 Veri Sayısı ve Sistem Hatası

#### 6. 4. Parametrelerin etkisinin araştırılması

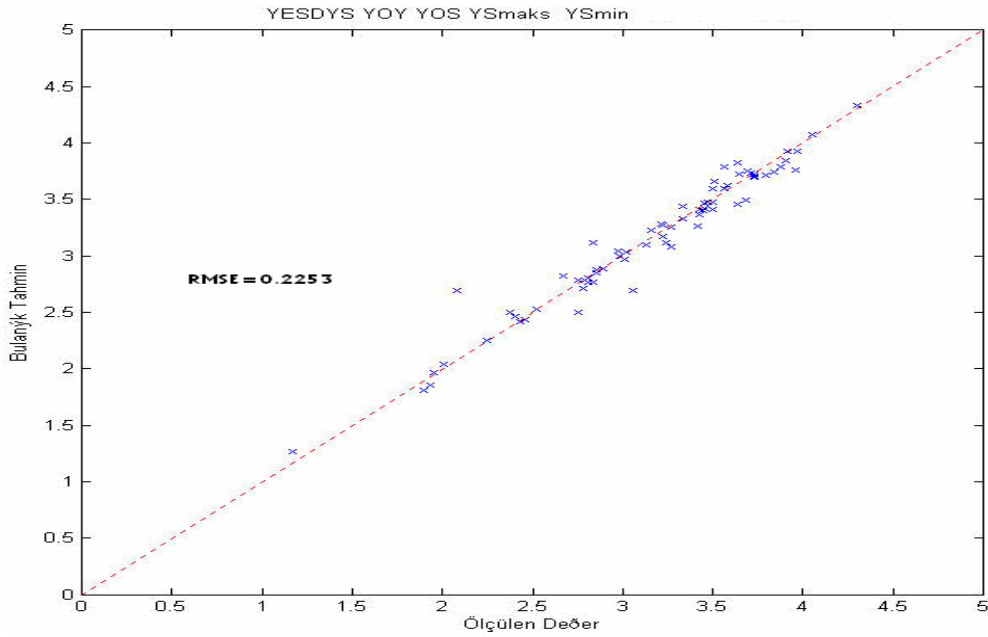
Yol performansının bir göstergesi olan, RN değerinin tahmin edilmesi amacıyla bulanık mantık tabanlı bir model oluşturduktan sonra, RN değeri üzerindeki etkili olan parametreleri incelemek amacıyla duyarlılık analizi yapılmıştır.

Duyarlılık analizde ilk olarak, trafik yükünün, YESDYS, etkisini belirlemek amacıyla, bulanık modelde YESDYS değerleri göz önüne alınmamış ve elde edilen bulanık model aynı küme sayısı araştırılarak (r değerini değiştirerek) çalıştırılmış ve modelin RMSE değerinin 0,3852 değerine yükseldiği gözlenmiştir. Modelden tahmin edilen değerler ile ölçülen değerlerin karşılaştırılması Şekil 6.4'de gösterilmiştir.



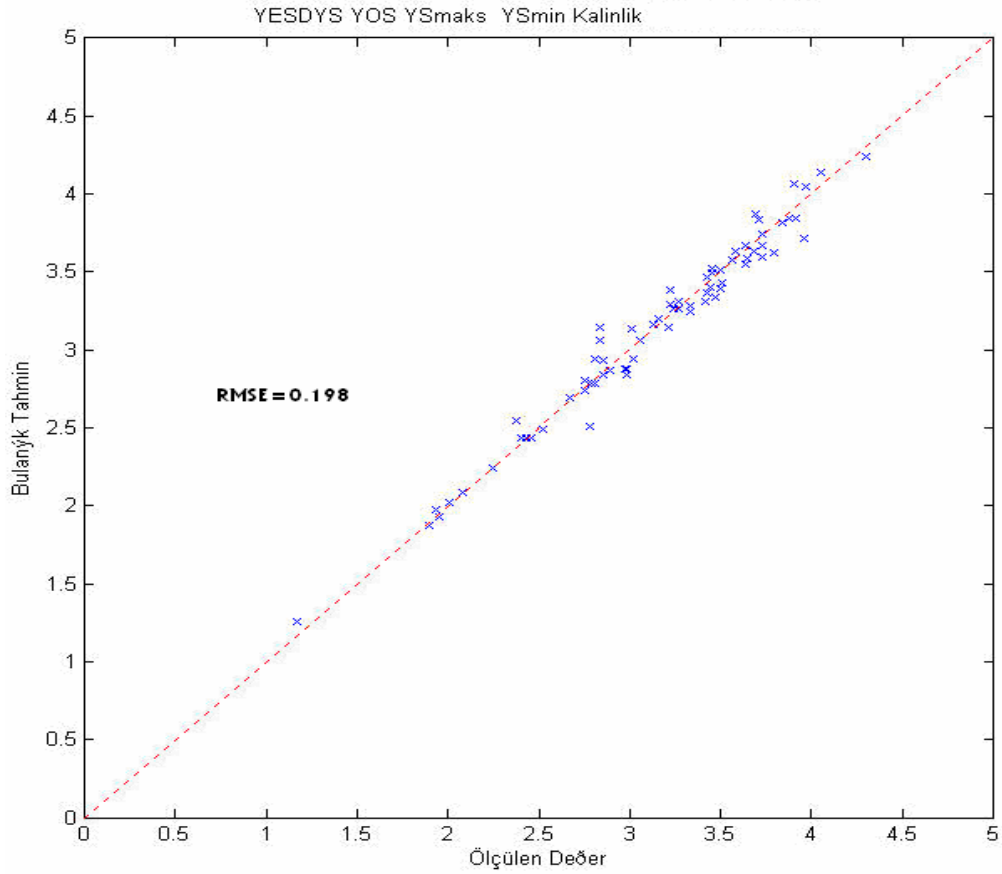
Şekil 6.4 Tahmin Edilen Değerler ile Ölçülen Değerlerin Karşılaştırılması(YESDYS)

Duyarlılık analizde ikinci adımda, toplam üstyapı kalınlığının etkisini belirlemek amacıyla, bulanık modelde kalınlık değerleri göz önüne alınmamış ve elde edilen bulanık model aynı küme sayısı araştırılarak (r değerini değiştirerek) çalıştırılmış ve modelin RMSE değerinin 0,2253 değerine yükseldiği gözlenmiştir. Modelden tahmin edilen değerler ile ölçülen değerlerin karşılaştırılması Şekil 6.5' de gösterilmiştir.



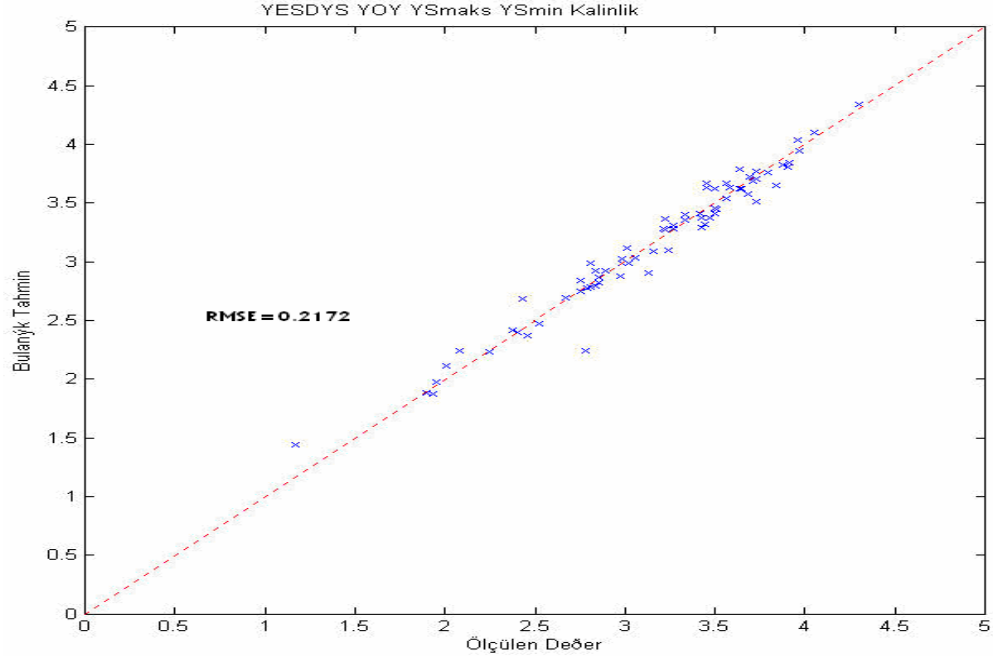
Şekil 6.5 Tahmin Edilen Değerler ile Ölçülen Değerlerin Karşılaştırılması (Kalınlık)

Duyarlılık analizde üçüncü adımda, yıllık ortalama yağış miktarının etkisini belirlemek amacıyla, bulanık modelde bu parametre değerleri göz önüne alınmamış ve elde edilen bulanık model aynı küme sayısı araştırılarak (r değerini değiştirerek) çalıştırılmış ve modelin RMSE değerinin 0,198 değerine yükseldiği gözlenmiştir. Modelden tahmin edilen değerler ile ölçülen değerlerin karşılaştırılması Şekil 6.6'da gösterilmiştir.



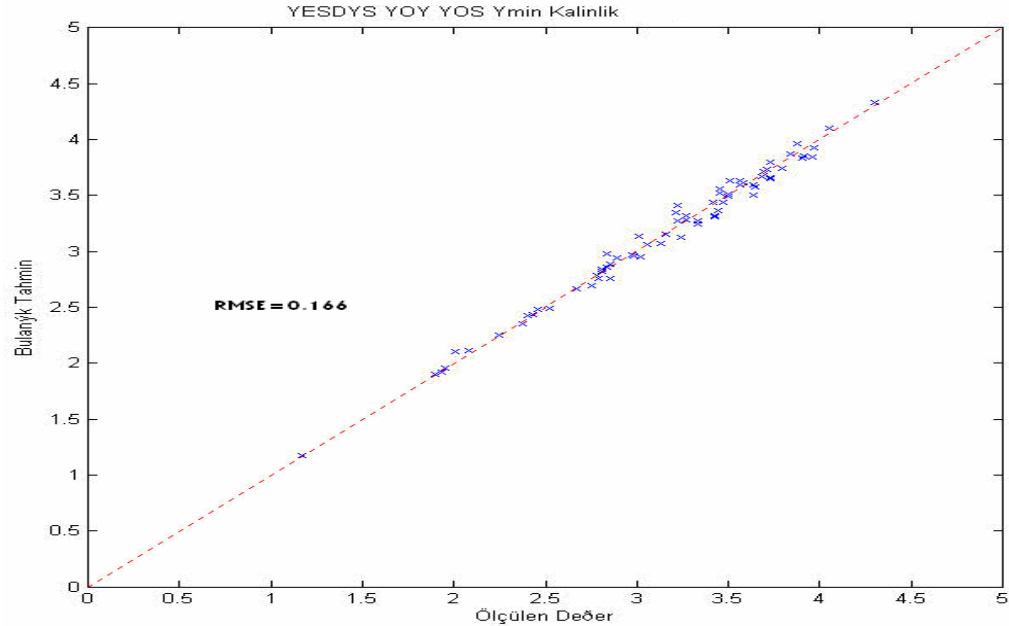
Şekil 6.6 Tahmin Edilen Değerler ile Ölçülen Değerlerin Karşılaştırılması (YOY)

Duyarlılık analizde dördüncü adımda, yıllık ortalama sıcaklık derecesinin etkisini belirlemek amacıyla, bulanık modelde bu parametre değerleri göz önüne alınmamış ve elde edilen bulanık model aynı küme sayısı araştırılarak (r değerini değiştirerek) çalıştırılmış ve modelin RMSE değerinin 0,2172 değerine yükseldiği gözlenmiştir. Modelden tahmin edilen değerler ile ölçülen değerlerin karşılaştırılması Şekil 6.7'de gösterilmiştir.



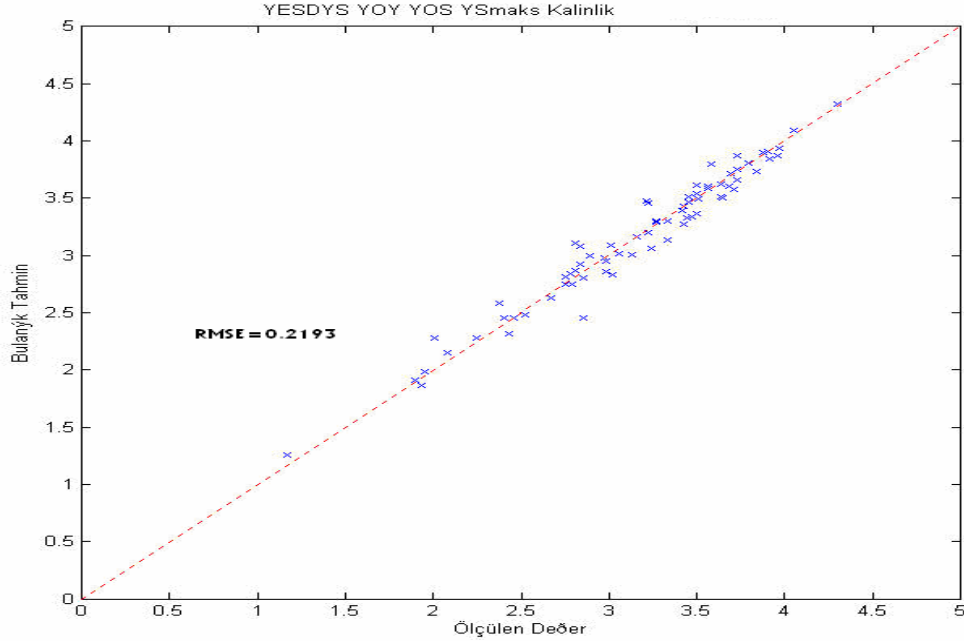
Şekil 6.7 Tahmin Edilen Değerler ile Ölçülen Değerlerin Karşılaştırılması (YOS)

Duyarlılık analizde beşinci adımda, yıllık ortalama yüksek sıcaklık derecesinin etkisini belirlemek amacıyla, bulanık modelde bu parametre değerleri göz önüne alınmamış ve elde edilen bulanık model aynı küme sayısı araştırılarak (r değerini değiştirerek) çalıştırılmış ve modelin RMSE değerinin 0,16643 değerine yükseldiği gözlenmiştir. Modelden tahmin edilen değerler ile ölçülen değerlerin karşılaştırılması Şekil 6.8’de gösterilmiştir.



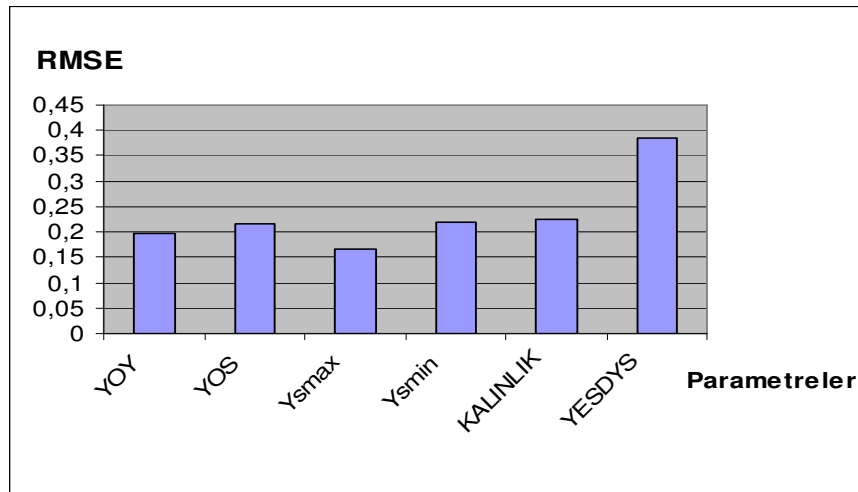
Şekil 6.8 Tahmin Edilen Değerler ile Ölçülen Değerlerin Karşılaştırılması (YSmaks)

Duyarlılık analizde altıncı adımda, yıllık ortalama düşük sıcaklık derecesinin etkisini belirlemek amacıyla, bulanık modelde bu parametre değerleri göz önüne alınmamış ve elde edilen bulanık model aynı küme sayısı araştırılarak (r değerini değiştirerek) çalıştırılmış ve modelin RMSE değerinin 0,2193 değerine yükseldiği gözlenmiştir. Modelden tahmin edilen değerler ile ölçülen değerlerin karşılaştırılması Şekil 6.9'da gösterilmiştir.



Şekil 6.9 Tahmin Edilen Değerler ile Ölçülen Değerlerin Karşılaştırılması (YSmin)

Duyarlılık analizini sonuçları ise, Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Tüm denemelerin sonuçlarını birlikte gösteren sütun grafiği aşağıda görülmektedir.



Şekil 6.10 Duyarlılık Analiz Sonuçları

## 7. SONUÇ

Bu çalışma sonucunda, Devlet yollardaki üstyapı performansının bir göstergesi olan Sürüş Sayısı (RN) bulanık mantık tabanlı bir model ile tahmin edilmiştir. Bulanık mantık modelleme sırasında, küme merkezi tahminine dayalı olarak veri topluluklarını sınıflandırılmış, küme merkezleri belirlenmiş, bu merkezlere bulanık kural ataması yapılmıştır.

Devlet yollardaki üstyapı performansının bir göstergesi olan Sürüş Sayısı'nın (RN) bulanık model ile tahmininde kullanılan parametreler, trafik yükü ile ilgili parametre, YESDYS, kaplama fiziki özelliği ile ilgili olan parametre, toplam üstyapı kalınlığı ve çevre koşulları ile ilgili parametreler, Yıllık Ortalama Yağış Miktarı, Yıllık Ortalama Sıcaklık, Yıllık Ortalama Yüksek Sıcaklık, Yıllık Ortalama Düşük Sıcaklıktır.

Bulanık mantık modellemesi gerçekleştirildikten sonra duyarlılık analizi yapılarak, tüm parametrelerin Devlet yollardaki üstyapı performansının bir göstergesi olan Sürüş Sayısı üzerine etkileri araştırılmıştır. Araştırma sonucunda, Devlet yollardaki üstyapı performansının bir göstergesi olan Sürüş Sayısı (RN) üzerinde en etkili parametre YESDYS bulunmuştur. YESDYS den sonra etkili olan parametre kalınlık, daha sonra sırasıyla Yıllık Ortalama Düşük Sıcaklık, Yıllık Ortalama Sıcaklık, Yıllık Ortalama Yüksek Sıcaklık parametreleri ve son olarak Yıllık Ortalama Yağış Miktarı parametresinin etkili olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada kullanılan bulanık mantık modelinin avantajı, parametreler arası ilişkilerin tam olarak bilinmediği durumlarda, veri topluluğunun küme merkezleri tahmini yardımıyla damıtılması ve model içerisinde işlem yoğunluğunun önüne geçilmesidir.

Bulanık mantık modelinde, eğitilecek verilerin mantıklı olması gerekmektedir. Sapkın verilerin bulunması durumunda, model sonuçlarında bozulmalar oluşmaktadır. 'r' sayısı seçilirken küme sayısının yüksek olmamasına dikkat edilmelidir. Modelin oluşturulması sırasında, veriler ile çok sayıda deneme yapma gerekliliği modelin sakıncaları olarak sıralanabilmektedir.

## **KAYNAKLAR**

- İTÜ 2004**, Ulaştırma Ana Planı Stratejisi II.Ara Rapor
- Güzel, G.**, 2001. Seminer Çalışması, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
- İsfalt**, 2002. Asfalt El Kitabı, İstanbul
- İsfalt**, 2002. Asfalt ve Uygulamaları, İstanbul
- AASHTO**, 1994. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, Washington D.C
- Haas, R., Hudson, W.R., and Zaniewski**, 1994 modern Pavement Management
- Ministry Of Transport**, 1970 Report of the Committees on Highway Maintenance
- KARAN, M.A., and HAAS, R.**, (1976)Determining Investmend Maintenance
- Shahin, M. Y.**, 2002, “Pavement Management for Airports, Roads and Parking Lots”, Kluwer Academic Publishers, London.
- Zekai Şen**, 1999 Mühendislikte Bulanık (Fuzzy) Modelleme İlkeleri
- Zadeh, L. A.**, 1965. Fuzzy sets. Informat. And Control, 8, pp. 338-353.
- Zadeh, L. A.**, 1971. Towards a theory of fuzzy systems. In Aspects of Network and System Theory, eds. R. E. Kalman and N. DeClaris.
- Mamdani, E. H., and Assilian, S.**, 1975. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. Int. J. Man Mach. Studies, 7, 1, pp. 1-3.
- Bezdek, J. C.**, 1981. Pattern Regognition with Fuzzy Objective Function Algorithms Plenum Press, New York.
- Takagi, T., and Sugeno, M.**, 1985. Fuzzy identification of systems and its applicationsto modeling and control. IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybern., 15, 1, pp. 116-132.
- Witold Pedrycz**, 1993. Fuzzy Control and Fuzzy Systems second edition
- H.-J. Zimmermann**, 1996. Fuzzy Set Theory and Its Application third edition.
- Stephen L. Chiu**, 1994 Fuzzy Model Identification Based On Cluster Estimation

## **ÖZGEÇMİŞ**

1980 yılında İstanbul'da doğdu. 1991 senesinde Hasan Ali Yücel İlköğretim Okulu'nu bitirdikten sonra öğrenimine, 1991-1999 yılları arasında Kadıköy Anadolu Lisesi'nde devam etti. 1999 yılında girdiği sınav sonrasında Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne girmeye hak kazandı. 2003 yılında mezun olduktan sonra İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Mühendisliği Programı'nda yüksek lisans eğitimine başladı.