

**T.C.**  
**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DÜŞÜK ÇEVİRİMLİ YORULMA PARAMETRELERİNİN**  
**İNCELENMESİ VE YAPAY SİNİR AĞLARI KULLANILARAK**  
**TAHMİN EDİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MEHMET ALPEREN SOYER**

**DENİZLİ, TEMMUZ - 2023**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**DÜŞÜK ÇEVİRİMLİ YORULMA PARAMETRELERİNİN  
İNCELENMESİ VE YAPAY SİNİR AĞLARI KULLANILARAK  
TAHMİN EDİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MEHMET ALPEREN SOYER**

**DENİZLİ, TEMMUZ - 2023**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

**MEHMET ALPEREN SOYER**

## ÖZET

### DÜŞÜK ÇEVİRİMLİ YORULMA PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ VE YAPAY SİNİR AĞLARI KULLANILARAK TAHMİN EDİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEHMET ALPEREN SOYER

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ÖZLER KARAKAŞ)

DENİZLİ, TEMMUZ - 2023

Düşük çevrimli yorulma (DÇY) parametreleri ve yorulma ömürlerinin tahmin edilmesinde geleneksel ve geleneksel olmayan yöntemler kullanılmaktadır. Yapay sinir ağları (YSA), DÇY parametreleri ve yorulma ömürlerinin tahmin edilmesinde en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu tez çalışmasında DÇY parametreleri ve yorulma ömürleri iki farklı YSA modeli ile tahmin edilmiş ve aynı zamanda YSA yapısının tahminleme sonuçlarına olan etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Model 1 ile yüksek dayanımlı çeliklerin DÇY parametreleri %99,99'un üzerinde, yorulma ömürleri ise %98,7'nin üzerinde tahminleme doğruluğu ile tahmin edilmiştir. Tek gizli katmanlı yapı için en iyi aktivasyon fonksiyonu lojistik sigmoid (logsig), epok sayısı 100, öğrenme fonksiyonu Levenberg-Marquardt (trainlm) ve gizli nöron aralığı 5-20 olarak bulunmuştur. Model 2 ile çeşitli çeliklerin DÇY parametreleri ve geçiş yorulma ömürleri bir, iki ve üç gizli katmanlı YSA yapısı kullanılarak tahmin edilmiştir. Çıktı katmanları için en uygun aktivasyon fonksiyonları hiperbolik tanjant sigmoid (tansig) ve lineer (purelin) olmuştur. Logsig ise çıktı katmanında neredeyse hiç iyi sonuç vermemiştir. Gizli katmanlarda ise tansig, logsig ve purelin'e göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Üç gizli katmanlı yapı için en iyi kombinasyon tansig-tansig-tansig-tansig/purelin ve her gizli katman için 10-15 gizli nöron aralığı, iki gizli katmanlı için tansig-logsig-purelin/tansig ve 10-15 gizli nöron aralığı, tek gizli katmanlı yapı için ise purelin-tansig ve 1-5 gizli nöron aralığı olarak bulunmuştur. Tüm tahminleme parametreleri bir gizli katmanlı yapıda %94,4/%1,685, iki gizli katmanlı yapıda %93,4/%1,389 ve üç gizli katmanlı yapıda %97,1/%0,873 tahminleme doğruluğu/ortalama mutlak yüzdelik hata oranlarında tahmin edilmiştir.

#### ANAHTAR KELİMELER:

Düşük Çevrimli Yorulma, Yorulma Ömrü, Yapay Sinir Ağları, Makine Öğrenmesi, Tahminleme, Parametre Tahmini, Optimizasyon

# ABSTRACT

## AN INVESTIGATION OF THE LOW-CYCLE FATIGUE PARAMETERS AND ESTIMATION USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

MSC THESIS

MEHMET ALPEREN SOYER

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. ÖZLER KARAKAŞ)

DENİZLİ, JULY 2023

Traditional and non-traditional prediction methods are used to estimate low-cycle fatigue (LCF) parameters and fatigue lives. Artificial neural networks (ANN) are the most widely used method for estimating the LCF parameters and fatigue lives. In this thesis, the LCF parameters and fatigue lives were estimated by two different ANN models and at the same time the effects of ANN structure on the estimation results were analyzed. According to the obtained results, LCF parameters of high-strength steels were estimated at over 99.99% and fatigue lives were estimated at over 98.7% estimation accuracy. For one hidden layer structure, the best activation function was found to be logistic sigmoid (logsig), epoch number 100, training function Levenberg-Marquardt (trainlm) and hidden neuron range 5-20. With Model 2, LCF parameters and transition fatigue lives of various steels were estimated using one, two, and three hidden layer ANN structures. The most optimal activation functions for the output layers were hyperbolic tangent sigmoid (tansig) and linear (purelin). On the other hand, logsig almost never gave good results in the output layer. In hidden layers, tansig gave better results than logsig and purelin. The best combination for three hidden layered structure was found to be tansig-tansig-tansig-tansig/purelin and 10-15 hidden neuron range for each hidden layer, tansig-logsig-purelin/tansig and 10-15 hidden neuron range for two hidden layers structure, and purelin-tansig and 1-5 hidden neuron range for one hidden layer structure. All estimation parameters were estimated at 94.4%/1.685% for one hidden layer structure, 93.4%/1.389% for two hidden layer structure, and 97.1%/0.873% for three hidden layer structure with estimation accuracy/mean absolute percentage error rates.

### KEYWORDS:

Low-Cycle Fatigue, Fatigue Life, Artificial Neural Networks, Machine Learning, Estimation, Parameter Estimation, Optimization

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

|   |      |
|---|------|
| ÖZET.....   | i    |
| ABSTRACT .....  | ii   |
| İÇİNDEKİLER.....  | iii  |
| ŞEKİL LİSTESİ.....  | v    |
| TABLO LİSTESİ.....  | vii  |
| SEMBOLLER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....   | viii |
| ÖNSÖZ.....  | x    |
| 1. GİRİŞ.....   | 1    |
| 2. YORULMA .....  | 3    |
| 2.1    Yorulmanın Tarihçesi .....   | 3    |
| 2.2    Yorulma Mekanığı.....  | 4    |
| 2.2.1    Çatlak Oluşumu.....  | 6    |
| 2.2.2    Yorulmaya Etki Eden Faktörler .....  | 9    |
| 2.2.3    Yorulma Ömrü ve Yorulma Dayanımı.....  | 11   |
| 2.2.3.1    Yorulma Ömrünün Hesaplanması .....   | 14   |
| 2.2.4    Yüksek Çevrimli Yorulma.....   | 16   |
| 2.2.5    Düşük Çevrimli Yorulma .....   | 17   |
| 2.2.6    Düşük Çevrimli Yorulma Parametreleri.....  | 18   |
| 2.2.6.1    Yorulma Dayanım Üsteli (b).....  | 19   |
| 2.2.6.2    Yorulma Süneklik Üsteli (c).....   | 20   |
| 2.2.6.3    Yorulma Dayanım Katsayısı ( $\sigma'f$ ) .....   | 20   |
| 2.2.6.4    Yorulma Süneklik Katsayısı ( $\epsilon'f$ ) .....  | 21   |
| 3. DÜŞÜK ÇEVİRİMLİ YORULMA PARAMETRELERİNİN<br>HESAPLANMASI .....   | 22   |
| 3.1    Düşük Çevrimli Yorulma Parametrelerinin Hesaplanmasında Kullanılan<br>Geleneksel Yöntemler .....                                 | 22   |
| 3.1.1    Yorulma Dayanım Üstelinin (b) Hesaplanması .....   | 23   |
| 3.1.2    Yorulma Süneklik Üstelinin (c) Hesaplanması.....   | 25   |
| 3.1.3    Yorulma Dayanım Katsayısının ( $\sigma'f$ ) Hesaplanması .....   | 26   |
| 3.1.4    Yorulma Süneklik Katsayısının ( $\epsilon'f$ ) Hesaplanması .....  | 27   |
| 3.2    Düşük Çevrimli Yorulma Parametrelerinin Hesaplanmasında Kullanılan<br>Geleneksel Olmayan Yöntemler .....                         | 28   |
| 3.2.1    Literatürde Yorulma Ömrü ve Yorulma Parametrelerinin Tahmin<br>Edilmesinde Kullanılan Çeşitli Makine Öğrenmesi Yöntemleri..... | 30   |
| 4. YAPAY SİNİR AĞLARI .....   | 34   |
| 5. YAPAY SİNİR AĞLARININ UYGULANIŞI.....  | 39   |
| 5.1    Model 1'in Uygulanışı .....  | 40   |
| 5.2    Model 2'nin Uygulanışı .....   | 43   |
| 6. BULGULAR.....  | 45   |
| 6.1    Model 1 .....  | 45   |
| 6.1.1    Aktivasyon Fonksiyonlarının Belirlenmesi .....   | 45   |
| 6.1.2    Optimum Epok Sayısının Belirlenmesi .....  | 46   |
| 6.1.3    Tahminleme Sürelerinin Karşılaştırılması .....   | 47   |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 6.1.4     | Öğrenme Fonksiyonlarının Karşılaştırılması ve Gizli Nöron Sayısının Belirlenmesi.....   | 49        |
| 6.1.5     | Deneyel ve Tahmin Edilen Düşük Çevrimli Yorulma Parametre Değerlerinin Karşılaştırılması .....  | 54        |
| 6.1.6     | Deneyel ve Tahmin Edilen Yorulma Ömürlerinin Karşılaştırılması  | 57        |
| 6.2       | Model 2 .....   | 61        |
| 6.2.1     | Farklı Gizli Katman Sayılarındaki Tahminleme Sürelerinin Karşılaştırılması.....   | 61        |
| 6.2.2     | Düşük Çevrimli Yorulma Parametrelerinin Tahminleme Sonuçlarının ve Farklı Gizli Katman Sayılarında Aktivasyon Fonksiyonlarının Karşılaştırılması..... | 65        |
| 6.2.2.1   | Çıktı Katmanı .....   | 69        |
| 6.2.2.2   | Gizli Katmanlar .....   | 69        |
| 6.2.3     | En İyi Gizli Nöron Aralığının Belirlenmesi .....  | 72        |
| 6.2.4     | Tahminlenen ve Deneyel Parametre Değerlerinin Karşılaştırılması   | 73        |
| <b>7.</b> | <b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>  | <b>80</b> |
| <b>8.</b> | <b>KAYNAKLAR .....</b>  | <b>84</b> |
| <b>9.</b> | <b>EKLER .....</b>  | <b>97</b> |
|           | EK A Yüksek Dayanımlı Çeliklere Ait Girdi ve Çıktı Parametreleri .....  | 97        |
|           | EK B Çeşitli Çeliklere Ait Girdi ve Çıktı Parametre Değerleri.....  | 98        |

# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

|   |    |
|---|----|
| Şekil 2.1: Kuvvet-zaman grafiği ve farklı zorlama türleri .....   | 6  |
| Şekil 2.2: Yorulma hasarı ve evreleri ( <a href="https://fatigue-life.com/fatigue-physics/">https://fatigue-life.com/fatigue-physics/</a> )   | 8  |
| Şekil 2.3: Gerilme-zaman grafiği .....  | 12 |
| Şekil 2.4: Wöhler (S-N) eğrisi.....   | 13 |
| Şekil 2.5: Merdiven yöntemi (Huo ve diğ. 2022).....   | 14 |
| Şekil 2.6: Wöhler eğrisinde ( $\epsilon$ -N) plastik (düşük çevrimli) ve elastik (yüksek çevrimli) bölge ( <a href="https://community.sw.siemens.com/s/article/what-is-a-sn-curve">https://community.sw.siemens.com/s/article/what-is-a-sn-curve</a> )..... | 18 |
| Şekil 2.7: Uzama-yorulma ömrü grafiği (Genel 2004).....   | 19 |
| Şekil 4.8: Yapay sinir ağlarının yapısı.....  | 34 |
| Şekil 4.9: Veri işleme şematığı.....  | 35 |
| Şekil 4.10: Aktivasyon fonksiyonları grafikleri a) lojistik sigmoid, b) linear, c) hiperbolik tanjant sigmoid, d) hard limit .....  | 37 |
| Şekil 5.11: Tek gizli katmanlı yapay sinir ağlarının yapısı.....  | 42 |
| Şekil 5.12: Çok gizli katmanlı yapay sinir ağlarının yapısı .....   | 44 |
| Şekil 6.13: Tahmin parametrelerinde aktivasyon fonksiyonlarının ortalama kare hatalarının karşılaştırılması .....   | 46 |
| Şekil 6.14: Tahmin parametrelerinde farklı epok sayılarının ortalama kare hatalarına göre karşılaştırılması.....  | 47 |
| Şekil 6.15: Farklı öğrenme fonksiyonlarının geçen süreye etkilerinin karşılaştırılması .....  | 48 |
| Şekil 6.16: Öğrenme fonksiyonlarına ait geçen sürelerin birbirleriyle karşılaştırılması .....   | 50 |
| Şekil 6.17: Öğrenme fonksiyonlarının farklı gizli nöron sayılarına ait ortalama kare hatalarının karşılaştırılması .....  | 52 |
| Şekil 6.18: Öğrenme fonksiyonlarının farklı gizli nöron sayılarına ait regresyon değerlerinin karşılaştırılması .....   | 53 |
| Şekil 6.19: Tüm düşük çevrimli yorulma parametrelerine ait deneysel ve tahminsel parametre değerlerinin karşılaştırılması.....  | 55 |
| Şekil 6.20: Yazarların deneysel yorulma ömürleri ile tahminlenen yorulma ömürlerinin farklı YDÇ'ler için karşılaştırılması .....  | 57 |
| Şekil 6.21: YDÇ'lerin tahminsel ve deneysel yorulma ömürlerinin karşılaştırılması .....   | 60 |
| Şekil 6.22: Bir gizli katman sayısında tahminleme parametrelerinin geçen süre bakımından karşılaştırılması .....  | 62 |
| Şekil 6.23: İki gizli katman sayısında tahminleme parametrelerinin geçen süre bakımından karşılaştırılması .....  | 62 |
| Şekil 6.24: Üç gizli katman sayısında tahminleme parametrelerinin geçen süre bakımından karşılaştırılması .....   | 63 |
| Şekil 6.25: Tüm tahminleme parametrelerinde bir, iki ve üç gizli katmanlı yapıya ait tahminleme sürelerinin karşılaştırılması .....   | 64 |
| Şekil 6.26: Tahminleme parametreleri ve genel sonuçlara ait kullanılan aktivasyon fonksiyonlarının yüzdelik oranları.....   | 70 |



|  |    |
|--|----|
| Şekil 6.27: Tahminleme parametrelerinin bütün gizli katmanlarda kullanılan toplam gizli nöron sayıları ..... | 72 |
| Şekil 6.28: Tahminlenen ile deneysel yorulma dayanım üstelleri değerlerinin karşılaştırılması.....           | 74 |
| Şekil 6.29: Tahminlenen ile deneysel yorulma süreklilik üstelleri değerlerinin karşılaştırılması.....        | 75 |
| Şekil 6.30: Tahminlenen ile deneysel yorulma dayanım katsayısı değerlerinin karşılaştırılması.....           | 76 |
| Şekil 6.31: Tahminlenen ile deneysel yorulma süreklilik katsayısı değerlerinin karşılaştırılması.....        | 77 |
| Şekil 6.32: Tahminlenen ile deneysel geçiş yorulma ömürleri değerlerinin karşılaştırılması.....              | 78 |

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

|   |    |
|---|----|
| Tablo 6.1: Öğrenme fonksiyonlarına ait 100 replikasyon içerisinde en iyi 10 replikasyonun ortalama sonuçları.....   | 51 |
| Tablo 6.2: Öğrenme fonksiyonlarına ait 100 replikasyon içerisinde elde edilen en iyi tekil sonuçlar .....   | 51 |
| Tablo 6.3: Düşük çevrimli yorulma parametrelerine ait deneysel ve tahminsel değerlerin karşılaştırılması .....  | 56 |
| Tablo 6.4: Farklı YDÇ'lerin belirlenen gerilme genlikleri altındaki yorulma ömürlerinin deneysel ve tahminsel olarak karşılaştırılması .....                    | 58 |
| Tablo 6.5: %0.4-1.5 gerilme genliği aralığında yüksek dayanımlı çeliklerin tahminlenen ve deneysel yorulma ömürlerinin karşılaştırılması.....                   | 59 |
| Tablo 6.6: Bir gizli katmanlı yapıda düşük çevrimli yorulma parametrelerine ve geçiş yorulma ömrüne ait en iyi sonuçlar .....                                   | 66 |
| Tablo 6.7: İki gizli katmanlı yapıda düşük çevrimli yorulma parametrelerine ve geçiş yorulma ömrüne ait en iyi sonuçlar .....                                   | 66 |
| Tablo 6.8: Üç gizli katmanlı yapıda düşük çevrimli yorulma parametrelerine ve geçiş yorulma ömrüne ait en iyi sonuçlar .....                                    | 66 |
| Tablo 6.9: Tüm tahminleme parametrelerine ait farklı gizli katmanlı yapılardaki toplam tahminleme süresi ve toplam uzaklık değerlerinin karşılaştırılması ..... | 67 |
| Tablo 6.10: Gizli katmanlar ve çıktı katmanında kullanılan aktivasyon fonksiyonlarının sayısı .....   | 68 |
| Tablo 6.11: Gizli katmanlar ve çıktı katmanında kullanılan aktivasyon fonksiyonlarının toplam sayısı .....  | 68 |
| Tablo 6.12: Farklı gizli katman sayılarında kullanılan aktivasyon fonksiyonları   | 71 |
| Tablo 6.13: Tahminlenen parametrelerin tüm gizli katmanlardaki MAPE sonuçları .....   | 74 |

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR LİSTESİ

|                              |  |
|------------------------------|--|
| <b>%RA</b>                   | Kopma uzaması                          |
| $\epsilon'_f$                | Yorulma süneklik katsayısı             |
| $\sigma'_f$                  | Yorulma dayanım katsayısı              |
| $\frac{\Delta\epsilon_e}{2}$ | Elastik uzama genliği                  |
| $\frac{\Delta\epsilon_p}{2}$ | Plastik uzama genliği                  |
| $\frac{\Delta\epsilon_t}{2}$ | Toplam uzama genliği                   |
| $\epsilon_a$                 | Yerel uzama genliği                    |
| $\epsilon_f$                 | Gerçek kırılma sünekliği               |
| $\sigma_f$                   | Gerçek kırılma dayanımı                |
| $\sigma_m$                   | Ortalama gerilme                       |
| $\sigma_u$                   | Çekme dayanımı                         |
| $\sigma_y$                   | Akma dayanımı                          |
| $Q_{max}$                    | Maksimum değer                         |
| $Q_{min}$                    | Minimum değer                          |
| $b^*$                        | Bias değeri                            |
| $f_{akt}$                    | Aktivasyon fonksiyonu                  |
| $w_i$                        | Ağırlık değeri                         |
| $x_i$                        | Girdi verisi                           |
| $\Delta\epsilon^*_e$         | $10^4$ çevrimde elastik uzama aralığı  |
| $2N_f$                       | Tekrarlı çevrim sayısı                 |
| <b>3D</b>                    | Üç boyutlu                             |
| <b>AF</b>                    | Aktivasyon Fonksiyonu                  |
| <b>b</b>                     | Yorulma dayanım üsteli                 |
| <b>BHN</b>                   | Brinell sertliği                       |
| <b>c</b>                     | Yorulma süneklik üsteli                |
| <b>DÇY</b>                   | Düşük çevrimli yorulma                 |
| <b>E</b>                     | Elastisite modülü                      |
| <b>GA</b>                    | Genetik algoritma                      |
| <b>GK1</b>                   | 1. Gizli katman                        |
| <b>GK2</b>                   | 2. Gizli katman                        |
| <b>GK3</b>                   | 3. Gizli katman                        |
| <b>hardlim</b>               | Hard limit aktivasyon fonksiyonu       |
| <b>K'</b>                    | Çevrimsel dayanım katsayısı            |
| <b>logsig</b>                | Lojistik sigmoid aktivasyon fonksiyonu |
| <b>MAPE</b>                  | Ortalama mutlak yüzdellik hata         |
| <b>MPa</b>                   | Megapaskal                             |
| <b>N</b>                     | Yorulma ömrü                           |
| <b>n'</b>                    | Çevrimsel uzama sertleşme üsteli       |
| <b>N<sub>t</sub></b>         | Geçiş yorulma ömrü                     |
| <b>PLA</b>                   | Polilaktik asit                        |
| <b>purelin</b>               | Lineer aktivasyon fonksiyonu           |
| <b>Q</b>                     | Gerçek değer                           |
| <b>Q'</b>                    | Normalize değer                        |

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <b>R</b>                         | Gerilme oranı                                    |
| <b>S, <math>\sigma_a</math></b>  | Gerilme genliği                                  |
| <b>tansig</b>                    | Hiperbolik tanjant sigmoid aktivasyon fonksiyonu |
| <b>y</b>                         | Çıktı verisi                                     |
| <b>YDÇ</b>                       | Yüksek dayanımlı çelik                           |
| <b>YSA</b>                       | Yapay sinir ağları                               |
| <b><math>\sigma_{max}</math></b> | Maksimum gerilme                                 |
| <b><math>\sigma_{min}</math></b> | Minimum gerilme                                  |
| <b><i>f</i></b>                  | Yorulma  |

## ÖNSÖZ

Bu çalışmada emeği geçen, bana yol gösteren, hedef doğrultusunda ilerlemeyi öğreten, gelişimime katkı sağlayan, yorulma gibi önemli bir konuda çalışma fırsatı veren, bu alanın şüphesiz en iyilerinden olan ve her zaman desteğini sunan danışmanım sayın Prof. Dr. Özler KARAKAŞ'a

Yapay zekâ ve makine öğrenmesi yöntemleri konusunda gelişmemi sağlayan ve her zaman sorularımı cevaplayarak bana yardımcı olan sayın Doç. Dr. Can Berk KALAYCI'ya

Bilgileri, tecrübeleri ve verdikleri kaliteli eğitim sayesinde daha donanımlı, bilinçli ve üretken bir hale gelmemi sağlayan Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü hocalarıma,

Bana moral ve motivasyon sağlayan, tüm süreçlerde yanımda olan arkadaşlarım Öğretim Görevlisi Duygu TOPALOĞLU'na ve Hüseyin ÖZTÜRK'e,

Her zaman yanımda olan, desteğini esirgemeyen, tüm zorlu süreçlerde bir şekilde devam etmemi sağlayan, neşesiyle moral veren, güler yüzünü eksik etmeyen ve motivasyon sağlayan Berna GÜNGÖRDÜ'ye,

Maddi ve manevi her koşulda yanımda olan, bilime katkı sağlayan, ahlaki ve etik değerlerinden şaşmayan, herkese karşı saygılı ve yardımsever olmayı öğreten ve bu yolda ilerleyen bir birey olmam konusunda verdikleri çaba ile bu günlere gelmemi sağlayan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili babam Ümit SOYER'e, annem Hatice SOYER'e ve abim Ahmet Kürşat SOYER'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

# 1. GİRİŞ

Yorulma, tekrarlanan yükler sonucu malzemenin zayıflaması ve sonrasında kırılması olayıdır. Yorulma ömrü, zamana bağlı olarak malzemenin çatladığı ya da kırılmaya uğradığı tekrar sayısı ile ölçülür. Yorulma, malzemeyi hasara uğratar ya da malzemenin içyapısında değişiklikler meydana getirir. Malzemenin yorulma ömrünün belirlenmesi, malzemedeki kaynaklanacak olası kazaların önlenmesi ve üretim maliyetlerinin düşürülmesi için önemli rol oynamaktadır. Yorulma ömrünün tahmini sadece malzemede oluşabilecek hasarların ve ekonomik maliyetlerin yanı sıra insan hayatı için de son derece önemlidir. Son yıllarda gerçekleşen kaynaklı yapılarda oluşan hasarların %80-85 gibi ezici bir çoğunluğu yorulma hasarlarından kaynaklanmaktadır. Bu sorunlardan kaçınmak için malzemenin yorulma ömrünün ve yorulma parametrelerinin mutlaka tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu sayede yorulma hasarından doğabilecek her türlü zarar önlenmiş olup öncesinden gerekli önlemler alınabilecektir.

Yorulma davranışı düşük çevrimli yorulma ve yüksek çevrimli yorulma olarak iki ana başlık altında toplanabilir. Düşük çevrimli yorulmada malzemenin hasar çevrim sayısı  $5 \times 10^4$ 'ten azdır ve plastik deformasyon hakimdir. Plastik deformasyon sonucunda malzemede oluşan deformasyonlar geri döndürülemez. Yüksek çevrimli yorulmada ise malzemenin hasar çevrim sayısı  $2 \times 10^6$ 'ten büyüktür ve elastik deformasyon hakimdir. Elastik deformasyonda malzemede oluşan deformasyonlar geri döndürülebilmektedir. Belirli bir malzemede hasara neden olacak çevrim sayısı ile yorulma dayanımının oluşturduğu eğriye Wöhler (S-N) eğrisi adı verilmektedir. Wöhler eğrisi sayesinde düşük çevrimli yorulma bölgesi, geçiş yorulma ömrü ve yüksek çevrimli yorulma bölgelerinin yanı sıra elastik ve plastik bölgeler de görülebilmektedir. Bu eğrilerin oluşturulmasında gerekli olan parametrelerin geleneksel formülasyonlarla, deney düzenekleri ile ve makine öğrenmesi yöntemleri ile tahmin edilip oluşturulması çok önemlidir. Bu sayede belirli malzeme için hangi zorlama büyüklüğünde malzeme kaç çevrim sayısına kadar dayanabilir ve hangi çevrim sayısından sonra hasara uğrayabilir açıkça görülebilmektedir.

Yorulma deneylerinin yapılması yüksek derecede zaman, maliyet ve bilgi birikimi gerektirdiğinden pratik bir yöntem değildir. Malzemelerin yorulma ömrünün

ve yorulma parametrelerinin geleneksel ve geleneksel olmayan yöntemlerle tahmin edilmesi, malzemelerin seçimi konusunda rahatlık sağlayıp ön eleme yapılmasını sağlamaktadır. Geleneksel yöntemler tüm çelik ve çelik olmayan malzemeler için mevcut olmadığından sadece çok yaygın olarak kullanılan malzemeler için geçerlidir ve hata oranları yüksektir. Geleneksel olmayan yöntemler daha az zaman, maliyet ve bilgi birikimi gerektirdiğinden daha akılcı ve mantıklı bir yöntem olarak günümüzde giderek yaygınlaşmaktadır. Makine öğrenmesi yöntemleri sayesinde her türden veri seti, malzeme grubu, ısıl işlem görmüş ya da görmemiş ve kaynaklı ya da kaynaklı olmayan durumlara rahatlıkla uygulanabilip özelleştirilebilmektedir. Her türden probleme özgü daha iyi sonuç veren algoritmalar geliştirilebilmekte gerekirse hibrit bir şekilde kullanılabilir. Yapay sinir ağları geniş kullanım alanı, kolay özelleştirilebilir seçenekleri, her türden veri tiplerinde yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilebilmesi, düşük çevrimli yorulma parametreleri ve yorulma ömürlerinde ezici bir çoğunlukla kullanılması ve MATLAB programı arayüzünde hazır kütüphanesinin bulunması ile makine öğrenmesi yöntemleri arasında en uygun yöntem olarak düşünülmektedir. Bu tez çalışmasında düşük çevrimli yorulma parametreleri ve yorulma ömürleri yapay sinir ağları yöntemi ile farklı iki model halinde tahmin edilecek olup aynı zamanda bu parametreler tahmin edilirken yapay sinir ağları yapısının probleme göre özelleştirilmesi, farklı kombinasyonlarının denenmesi ve farklı türden veri setleri ile tahminleme doğruluklarının ve performanslarının karşılaştırılması yapılacaktır. Aynı zamanda tahminlenen parametre değerleri ile deneysel sonuçlardan elde edilen parametre değerleri birbirleri ile karşılaştırılacaktır.

## 2. YORULMA

### 2.1 Yorulmanın Tarihçesi

Yorulma üzerine çalışmalar ilk olarak 19. yüzyılda yapılmaya başlanmıştır. Yorulma dayanımı hakkında ilk makale Wilhelm Albert tarafından 1837 yılında yayımlanmıştır. Endüstriyel devrimin gerçekleşmesi ile yapıların ve malzemelerin yorulma dayanımı konusu önemli bir hal almaya başlamıştır. Endüstriyel devrimle birlikte yorulma dayanımı, yoğun ve gelişmekte olan kullanımları nedeniyle en çok buhar makineleri ve lokomotifler üzerine ilişkilendirilmiştir. 1800'lü yıllarda yorulma konusuna dair literatürde neredeyse yok denecek kadar az bilgi olduğu için en çok akıllara takılan düşünce aynı büyüklükteki yükü tek bir seferde malzemeye/yapıya uyguladığımızda hiçbir hasar meydana gelmezken, aynı büyüklükteki yükü çok fazla miktarda uyguladığımızda malzemede neden hasar meydana geliyor sorusuydu. 20. yüzyılda yorulma dayanımı üzerine yapılan çalışmalar artmış ve gittikçe önem kazanmıştır. Mann (2013), yaptığı araştırmalar sonucu yorulma üzerine 19. yüzyılda yayımlanan makale sayısı 100'den az, 20. yüzyılda yayımlanan makale sayısı ise 100.000 civarına ulaşmaktadır. Günümüzde malzemelerin yorulma davranışları hala tam olarak çözülememiştir ve her geçen gün yeni yöntemler ve çözümler geliştirilmektedir.

Yorulma dayanımı için ilk büyük adım 1903 yılında Ewing ve Humfrey (1903) tarafından atıldı. Ewing ve Humfrey malzemelerin mikroyapısı üzerine çalışmalar yapıp Lüders bantlarında yorulma çatlığının, mikro çatlaklar ile başladığını gözlemlədiler. Dayanım limiti (daha sonra yorulma limiti olarak tanımlanacak) ilk olarak August Wöhler tarafından 1870 yılında tanımlandı, (Suresh 1998). Ayrıca yorulma dayanımı için hala günümüzde kullanılan ve çok önemli olan Wöhler eğrisi olarak bilinen S-N eğrisini geliştirdi ve malzemelerin yorulma dayanımı üzerine ilk sistematik çalışmaları yapan kişi oldu. 1910 yılında Olin Hanson Basquin, August Wöhler'in deney verilerini baz alarak Wöhler eğrisinde kullanılması için log-log ilişkisini Basquin denklemiyle kurdu, (Basquin 1910). 1943 yılında W. Ramberg ve W.R. Osgood, malzemenin yaygın ve kolaylıkla bulunabilen özellikleri ile yaklaşık olarak gerilme-uzama eğrilerin oluşturulmasını Ramberg-Osgood denklemi ile



buldular, (Ramberg ve Osgood 1943). L.F. Coffin 1954 ve S.S Manson 1953 yıllarında birbirlerinden bağımsız olarak, düşük çevrim, yüksek uzama koşullarında plastik şekil değiştirme ile yorulma ömrü arasındaki ilişkiyi Coffin-Manson denklemi ile açıkladılar, (Manson 1953; Coffin Jr 1954). 1968 yılında Morrow, Coffin-Manson'da plastik uzama ve Basquin'de elastik uzama denklemlerini birleştirerek toplam uzama ilişkisini "Morrow Design Rule" adı altında birleştirmiştir, (Morrow 1968). Sonradan bu formül düzenlenerek Coffin-Manson-Basquin denklemi olarak tanımlanacaktır. Yorulma konusunda yapılan daha birçok önemli araştırma bulunmaktadır fakat özellikle düşük çevrimli yorulma özelliklerinin belirlenmesi ve bu yolda araştırmaların artmasını sağlayan en önemli çalışmalar bunlardır.

## 2.2 Yorulma Mekanikliği

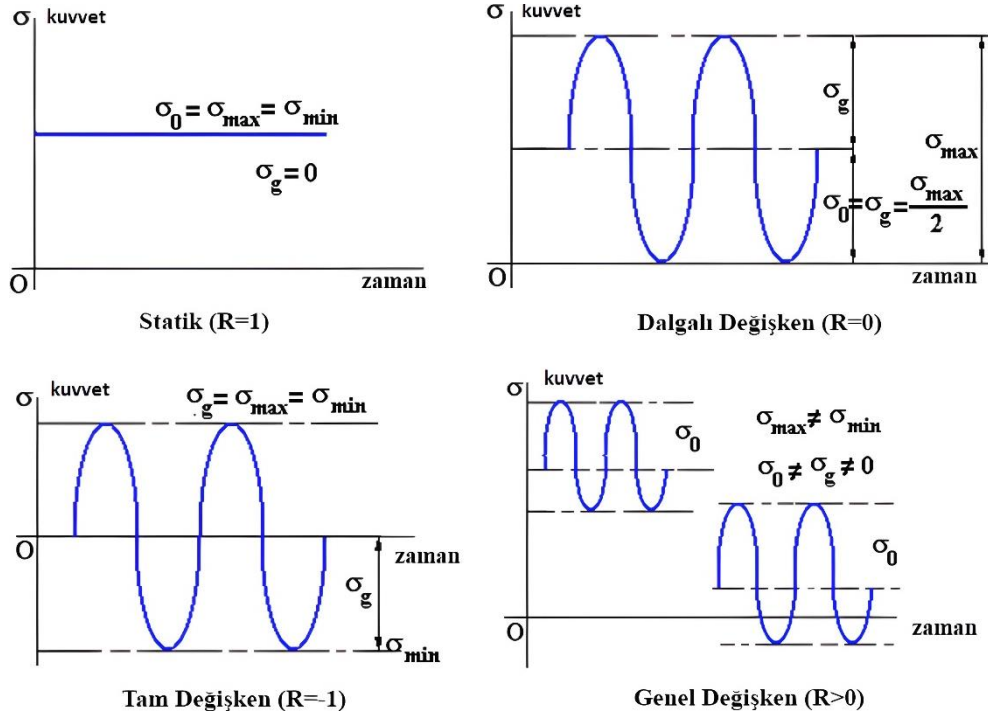
Makineler çoğunlukla çevrimsel zorlama koşullarına maruz kalırken, nadiren de olsa statik zorlamaya maruz kalmaktadırlar. Makine parçaları genellikle çevrimsel zorlamalar altında çalıştığı için mühendislik yapılarında yorulma dayanımı, statik dayanımdan daha önemlidir. Çevrimsel zorlamalar malzemede genellikle eğilme ve burulma momentleri oluşturduğundan malzemenin yorulma ömrünü ciddi şekilde etkilemektedir. Yorulmanın etkisi ile malzemede meydana gelen kırılma hasarı normalde akma sınırının üzerinde olması gerekirken, akma sınırının çok altındaki gerilmelerde de hasar meydana gelebilmektedir, (Umezawa ve diğ. 1990). Bu tür hasarlara, yorulma kırılması denilmektedir. Bu nedenle öngörülmesi ve engellenmesi zordur. Böylece malzemelerin sadece statik değil çevrimsel mukavemet hesaplarının da doğru tahmin edilebilmesi önemli hale gelmektedir. Malzeme tasarımı sırasında sadece anma gerilmelerinin hesaplanması yeterli olmamaktadır. Gerilmelerin kesitte dağılımı ve zamanla değişimleri de oldukça önemlidir. Malzemeye etkileyen yüklerin gerçeğe yakın değerlerde tahmin edilebilmesi ile üretilecek malzemelerin daha düşük emniyet katsayısı ve küçük kesitlerle üretilebilmesine olanak sağlayacaktır.

Yorulma dayanımı sadece uygulanan zorlamaya değil malzemenin iç yapısına ve dış etkenlere de son derece bağlıdır. Yorulma dayanımına etki eden çok fazla faktör olduğundan dolayı makine, taşıt vb. yapılarda görülen hasarların %80-85'i, kaynaklı birleştirmelerin de %80'i gibi ezici bir çoğunluğu yorulmadan

kaynaklanmaktadır, (Kalayci ve diğ. 2020). Bu oran bile tek başına yorulma konusunun mühendislikte ve günlük hayatta ne kadar önemli olduğunun bir göstergesidir. Kritik kesitlerde yorulma dayanımının belirlenmesinde ilk olarak yükleme türü, boyut ve şekil parametreleri kontrol edilmelidir. Eğer kritik kesitlerde yorulma dayanımı yeterli değilse malzemenin yorulma dayanım özellikleri iyileştirilmelidir. Bunun için yüzey pürüzlülüğü giderme, sertleştirme, parlatma, ıslah etme vb. gibi çeşitli yöntemlerin uygulanması gerekmektedir, (Kaya 2016). Yorulma dayanımında sadece yükleme şekli etkiliyse, malzeme buna göre boyutlandırılmalıdır. Malzemenin şekli ve boyutu eğer önceden belirlenmişse, malzemenin üst yükleme sınırı belirlenmelidir. Yorulmada zorlamanın zamana bağlı değişiminde, sinüzoidal zorlamanın en alt ve en üst sınır değerlerinin büyüklüğü önemlidir. Yorulma zorlaması için kuvvet-zaman grafiğinde (Şekil 2.1) kuvvet sıfır noktası üzerindeyken çekme bölgesinde ve kuvvet sıfır noktası altında ise basma bölgesinde uygulanmaktadır. Gerilme oranı (R) Denklem 2.1’de gösterildiği gibi minimum gerilme değerinin ( $\sigma_{\min}$ ), maksimum gerilme değerine ( $\sigma_{\max}$ ) bölünmesi ile elde edilir

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (2.1)$$

Yorulma deneyleri genellikle tam değişken yükleme (R=-1) altında yapılmaktadır. Malzemeye hem çeki hem de bası zorlaması uygulandığından, makine elemanlarının genel çalışma prensipleri ile örtüşmektedir, (Karakaş ve diğ. 2020).



Şekil 2.1: Kuvvet-zaman grafiği ve farklı zorlama türleri

Yorulma çatlakları, gerilme yığılmalarının olduğu bölgede başlar bu nedenle gerilme yığılmaları son derece önemlidir. Malzemede oluşan gerilme yığılmaları parçanın yüzey kalitesi, şekli, boyutu, ortam koşulları, zorlamanın türü, ön gerilme, malzemede bulunan hatalar ve içyapının homojen olmaması sonucunda oluşur. Montaj hataları, kaynak hataları, aşırı zorlama ve malzemenin öz titreşim frekansına yakın bölgelerde zorlanması sonucu oluşan rezonans titreşimleri de yorulma hasarında etkilidir, (Moarrefzadeh ve diğ. 2019).

### 2.2.1 Çatlak Oluşumu

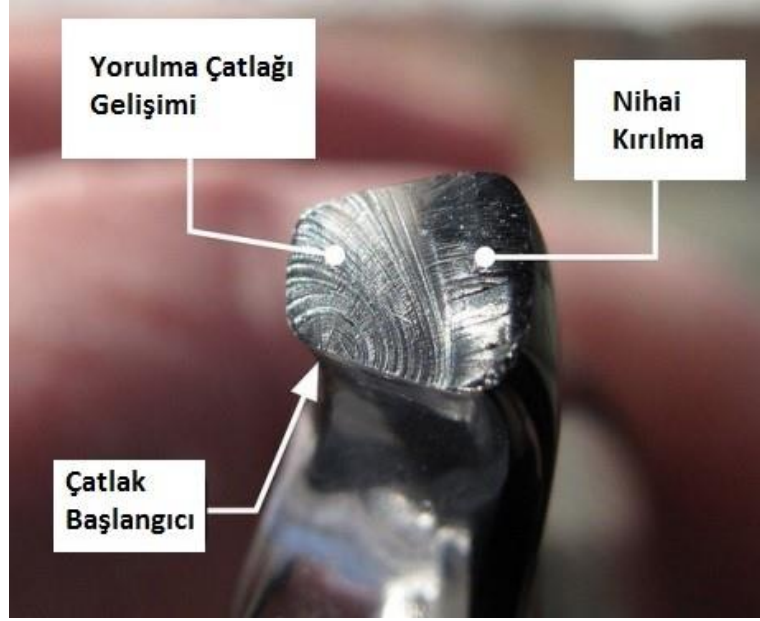
Çatlak oluşumu, malzemede yerel gerilme yüklemesinin varlığına işaretler. Malzemede çatlak oluşumu gözlemlenirse, engellenmesi çok zordur. Çatlak oluşumu fazladan bir çentik etkisi oluşturacağından, malzemenin uygulanan yükü taşıması daha da zorlaşacaktır, (Akkuş 2006). Bu aşamadan sonra çatlak gelişimi hızla büyüyecek, yükü taşıyan kesit sürekli küçülecek ve sonucunda engellenmesi neredeyse mümkün olmayan bir şekilde malzemenin kırılmasına neden olacaktır. Yapılan çalışmalar yorulma çatlaklarının gelişim hızının, çatlak derinliğinin karesi ile arttığını göstermiştir, (Cottell 2022). Çatlak ilerlemesi nadiren de olsa durabilmektedir. Çatlak oluşumu

kesite binen yükü azaltacağından dolayı malzeme daha az zorlanmaya maruz kalır. Uygulanan zorlamanın üst sınırı, malzemenin yorulma dayanımının altında kalırsa veya çatlak çevresinde yerel bir malzeme pekleşmesi oluşursa çatlak ilerlemesi durabilir. Malzemenin kafes yapısındaki atomların birbirlerine göre ötelenmesi sonucu kayma düzlemleri oluşmaktadır. Kayma düzlemleri sonucu malzemenin içyapısında dislokasyonlar oluşur. Yorulma zorlamalarında da bu sayede pekleşme durumu oluşabilmektedir. Yorulma hasarı malzemenin içyapısında çok küçük bir bölgede mikro çatlak olarak başlayıp makro çatlak olarak geliştiğinden, dışarıdan herhangi bir plastik deformasyon gözlemlenemez. Bu nedenle yorulma kırılmasının şekil değiştirmesiz olarak gerçekleştiği varsayılmaktadır, (Tauscher ve diğ. 1983). Yorulma hasarının ilk oluştuğu nokta yüzeyde ya da yüzeye yakın bir bölgededir.

Malzemenin tekrarlı yükler sonucu hasara uğraması üç başlık altında toplanılabilir;

1. Yüksek çevrim sayılarında mikroskobik seviyelerde hasar gelişimi gerçekleşir ve makroskobik çatlak olana kadar büyür.
2. Makroskobik çatlak, kritik seviyeye ulaşıncaya kadar her tekrar sonrasında daha da büyür.
3. Çatlak oluşmuş malzeme, uygulanan yükü daha fazla taşıyamaz ve kırılır.

İkinci aşama çoğu zaman gözlemlenmez çünkü mikro çatlak hızlıca büyür ve malzemenin aniden hasara uğramasına sebep olur. 2. ve 3. aşama genellikle kırılma mekaniği ile alakalıdır ve yorulma çoğunlukla 1. aşama ile ilgilidir. Her ne kadar durum böyle olsa da malzemenin hasar çevrim sayısı son iki aşamayı da kapsamaktadır. Yorulma hasarı ve evreleri Şekil 2.2'de görüldüğü gibi üç aşamada incelenmektedir.



**Şekil 2.2:** Yorulma hasarı ve evreleri (<https://fatigue-life.com/fatigue-physics/>)

1. **Çatlak Başlangıcı:** Çatlak serbest yüzeyde ya da gerilme yığılmalarının olduğu yerde başlar. Yorulma çatlağı malzemenin kristal yapısında yerleşik olan dislokasyon bölgelerinde ortaya çıkar. İçyapıda dislokasyonların oluşması ve ilerlemesi, malzemenin plastik deformasyona karşı dayanımını artırmaktadır ve bu durum pekleşme olarak adlandırılır. Malzeme, pekleşmenin olduğu yerlerde plastik deformasyon kabiliyetini kaybeder ve plastik deformasyon sınırına ulaştığında ise dislokasyon, mikro çatlağa dönüşür.
2. **Çatlak Gelişimi:** Çevrimsel gerilmelerin tekrar etmesi sonucu daha önce oluşmuş olan çatlak başlangıcı yavaşça büyüyerek malzeme için tehlike arz eder.
3. **Hasara Uğrama:** Malzemede meydana gelen kırılma, malzemenin kalınlığına, sıcaklığına ve uygulanan gerilmeye göre sünek veya gevrek olabilir. Yorulma hasarı genellikle hiçbir plastik deformasyon belirtisi göstermeksizin aniden gerçekleşmektedir.

Yorulma çatlağının oluşumu için temel olarak yeterli maksimum çekme gerilmesi, gerilmenin çevrimsel değişiklik göstermesi ve uygulanan gerilmenin yeterli çevrim sayısına ulaşması gerekmektedir. Bunlara ek olarak gerilme yığılması, korozif etkiler, sıcaklık, aşırı zorlama, malzemenin metalürjik yapısı, artık gerilmeler ve

bileşik gerilmeler etkili olmaktadır. Çekme gerilmesinin tek başına etki etmesi nadir bir durumdur. Genellikle çekme gerilmesinin yanında uygulanan kuvvet noktasının eksen kaçıklığı, malzemede eğilme zorlanmasına neden olur. Nihai kırılma yüzeyinin tüm kesite oranı, etki eden yorulma zorlamasının büyüklüğüne bağlıdır. Yorulma zorlamasının büyüklüğü ne kadar artarsa kırılma yüzeyinin tüm kesite oranı da o kadar artmaktadır. Bu oranın yüksek olması, seçilen malzemenin uygulanan yorulma zorlaması büyüklüğü için uygun olmadığını göstermektedir.

Çekme ve eğilme zorlaması altında, çeliklerin kırılma yüzeylerinin görünüşleri birbirlerinden farklıdır. Düzgün ve mat yüzey yorulma çatlaklarını gösterirken kaba kristalli, yarıklar içeren, nispeten kalıcı şekil değişimi ve son çevrimde ani kırılmış bölge ise son kırılma yüzeyini gösterir (Yaşar 2007). Ayrıca duraklama çizgileri, yorulma kırılmasının kesin bir kanıtıdır (bkz. Şekil 2.2). Duraklama çizgileri, zorlama koşulları değiştiği durumda meydana gelmektedir, (Mohamed ve diğ. 2011).

Malzemede çekme ya da eğilme zorlaması durumunda, kırılma yüzeyi her zaman gerilmelere dik yönde olacak şekilde oluşmaktadır. Sünek malzemelerde burulma kırılmaları kayma gerilmesinin en yüksek olduğu yönde yani eksene dik veya paralel olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır. Kırılma yüzeyinin incelenmesi ile zorlamanın şekli, büyüklüğü ve çatlak oluşumu hakkında bilgi edinilebilmektedir. Bu bilgiler ışığında hasar öncelikli olarak aşırı zorlama sonucunda mı yoksa çentik etkisinden mi kaynaklı olduğu anlaşılabilir.

### **2.2.2 Yorulmaya Etki Eden Faktörler**

Malzemenin yorulma kırılmasına etki eden faktörler dış etkenler ve iç etkenler olarak iki ana başlıkta sınıflandırılabilir. Dış etkenler; üretime bağlı oluşan çentikler (kama yuvaları, ani kesit değişimleri, faturalar ve enine delikler), uygulanan kuvvetin yönünün değişmesi (cıvata başları, sıkı geçme durumu ve krank millerinin dirsekleri), kuvvetin uygulanma yeri, talaşlı imalat sırasında oluşan yüzey hataları (taşlama izleri, taşlama çatlakları, torna izleri ve yüzey çizikleri) ve diğer yüzey kusurlarıdır (korozyona uğramış noktalar, aşınmaya uğramış bölgeler, serleştirme

çatlakları, hadde veya dövme hataları). İç etkenler ise; cüruflar ve cüruf kalıntıları, içyapının homojen olmaması, tane sınırlarında oksitlenme, içyapı farklılıkları ve kısaca malzemenin içyapısını etkileyen her türlü olumsuz durumlar iç etkenler olarak kabul edilebilmektedir, (Tauscher 1983).

Gerilme genliği ve zorlama türü, yorulma dayanımına etki eden en önemli parametrelerdendir. Gerilme genliği (S) arttıkça malzemenin hasar çevrim sayısı yani yorulma ömrü (N) azalmaktadır. Zorlama türüne dair yapılan laboratuvar çalışmalarında ise çekme gerilmesinin yorulma dayanımını düşürdüğü, basma gerilmesinin ise artırdığı gözlemlenmiştir. Yüzeide oluşturulan basma gerilmeleri sonucunda, malzemenin yorulma özellikleri iyileşir, (Karakaş ve diğ. 2022). Yorulma dayanımı sınırı, elastik bölgenin oldukça altında bulunmaktadır. Bu nedenle plastik deformasyonlar makro ölçekte değil, malzemenin içyapısında mikro ölçekte gerçekleşir. Çelikler için hareketli dislokasyonlar etrafında karbon atomları küçük parçacıklar halinde çökerek dislokasyonları kilitlerler ve sonucunda mikro çatlaklar oluşur.

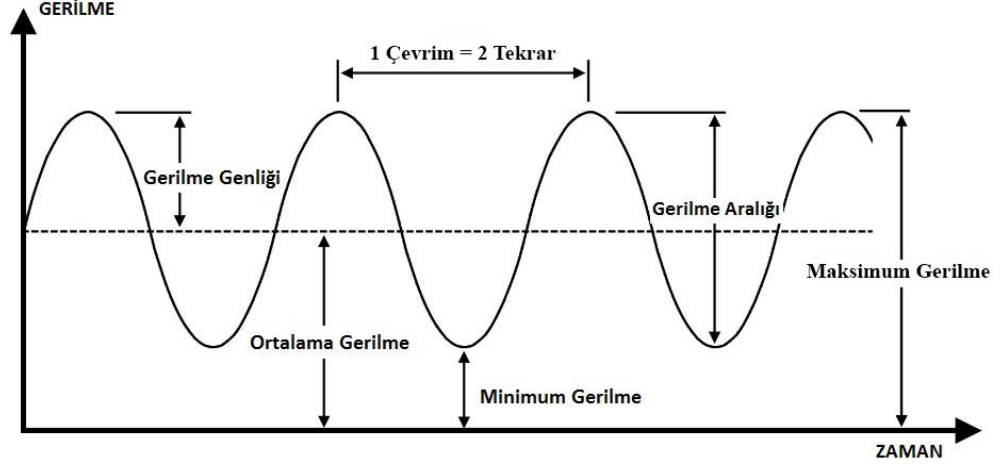
Yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı herhangi bir iş için kullanılacak malzemenin, o işin özelliklerine uygun kriterlerde olması gerekmektedir. Malzeme, iç gerilme ve iç yapı hataları olmadan temiz bir şekilde üretilip aynı şekilde dış yüzeyine uygulanacak her türlü işlem de doğru bir biçimde yapılmalıdır. Çentik etkisi oluşturacak her şey ortadan kaldırılmalı, mutlaka kullanılması gerekiyorsa çentik geçişleri yumuşatılmalı, mümkün olduğunca malzemeye uygulanacak ısı işlemlerde içyapı kontrol edilmeli, kaynak esnasında ısı tesiri altındaki bölgelerden doğacak içyapı hataları engellenmeli, talaşlı imalat yapılırken yüzey pürüzlülükleri giderilmeli, malzeme parlatılmalı, yüzey sertleştirme işlemleri yapılmalı, malzemeyi olabilecek tüm korozif etkilerden korumalı, aşınma ve korozyondan korumak için yüzey kaplamaları yapılmalıdır.

### 2.2.3 Yorulma Ömrü ve Yorulma Dayanımı

Uygulanan tekrarlı yükler sonucunda malzeme, üzerine gelen yükü normalde taşıyabilecek durumdayken artık taşıyamayacak hale gelmesine yorulma denir. Yorulma ömrünün ölçütü çevrim sayısıdır. Yorulma çatlakları, gerilme yığılmalarının yoğun olduğu yerlerde başlar. Tekrarlı yükler sonucunda malzemenin içyapısında değişiklikler meydana gelir, (Suresh 1998). Bu değişiklikler ilk önce mikro çatlak oluşumuna sebebiyet verir ardından da mikro çatlaklar, uygulanan tekrarlı yükler neticesinde makro çatlaklara dönüşür ve bir süre sonra bu makro çatlaklar büyüyerek malzemede nihai kırılmaya yol açar. Yorulma, malzemede çatlak bulunup bulunmamasına ve uygulanan gerilme seviyelerine bağlı olarak değişmektedir. Malzemede çatlak yoksa, malzemenin kırılması çatlak oluşumu ile kontrol edilir. Eğer malzemede çatlak varsa, çatlak ilerlemesi kontrol edilir. Uygulanan gerilme, akma sınırının altındaysa yüksek çevrimli yorulma durumu olur ve kırılmaya kadar olan çevrim sayısı çelikler için  $N > 2 \times 10^6$  olmaktadır. Uygulanan gerilme, akma sınırının üzerindeyse düşük çevrimli yorulma durumu olur ve kırılmaya kadar olan çevrim sayısı  $N < 5 \times 10^4$  olmaktadır, (Sonsino 1990; Karakas ve diğ. 2007).

Yorulma dayanımı veya yorulma limiti, malzemenin belirli bir sınır gerilme seviyesi altında yorulma kırılması olmadan veya belirli bir uzama oranını aşmadan sonsuz çevrim sayısında dayanabileceği gerilme genliğine denir, (Lei ve diğ. 2021). Yorulma ömrü ise malzemenin kaç çevrim sayısından sonra hasara uğrayacağına bir göstergesidir ve aynı zamanda Şekil 2.3'te görüldüğü gibi bir çevrim iki tersinire (tekrar) eşittir. Çevrim sayısı (N) ile tekrarlı çevrim sayısının ( $2N_f$ ) farkı, çevrim sayısında gerilme koşuluna ait tam çevrim sayısını tanımlarken tekrarlı çevrim sayısı minimumdan maksimuma ya da maksimumdan minimum gerilmeye kadar geçen yarım çevrimi ifade etmektedir.



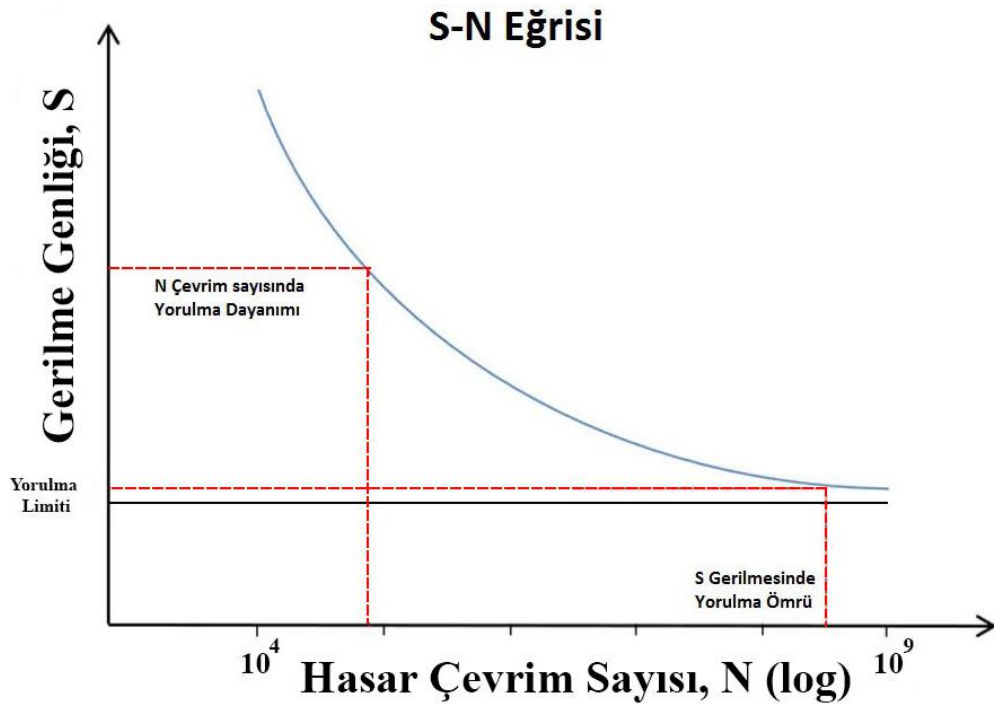


Şekil 2.3: Gerilme-zaman grafiği

Yorulma dayanımı, Wöhler eğrileri ile bulunur (Şekil 2.4). Wöhler eğrisi yüksek çevrimli yorulma için logaritmik eksen takımında gerilme-yorulma ömrü (S-N) olarak, düşük çevrimli yorulma için ise uzama-yorulma ömrü ( $\epsilon$ -N) olarak kullanılmaktadır. S-N eğrileri malzemenin çevrimsel yükleme altındaki gerilmelere dayanma kabiliyetinin, yorulma ömrüne etkisini göstermektedir. S-N eğrileri yüksek çevrimli yorulma koşullarında çalışan, çevrimsel yükleme altında elastik deformasyon gösteren malzemeler için kullanılmaktadır, (Yoh ve diğ. 2002).  $\epsilon$ -N eğrileri ise malzemenin çevrimsel yükleme altında deformasyon kabiliyetinin yorulma ömrüne etkisini göstermektedir.  $\epsilon$ -N eğrilerinde sünek metaller gibi çevrimsel yükleme altında önemli derecede plastik deformasyon gösteren malzemeler için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır, (Huo ve diğ. 2022).  $10^4$  çevrim sayısından daha düşük yorulma ömürlerinde uzama-yorulma ömrü eğrileri ( $\epsilon$ -N), gerilme-yorulma ömrü eğrilerinden daha tutarlı sonuçlar vermektedir, (Dowling 2004). Ayrıca uzama-yorulma ömrü eğrisini oluşturmak için gereken maliyet, S-N eğrilerini oluşturmak için gereken maliyetten daha fazla olsa da uzama-yorulma ömrü eğrileri, yüksek çevrimli yorulma için de tutarlı sonuçlar vermektedir. Yorulma dayanımı saptanacak malzemelerin yüzey kalitesi ve biçimleri özdeş olmalıdır. Deney için en az 8-25 adet, genellikle 60 adet ve üzerinde numune kullanılır. Deney numunesi için ayarlanan yorulma zorlaması, deney boyunca değiştirilmiyorsa tek kademeli yorulma deneyi, eğer deney sırasında yorulma zorlaması kademesi sistematik olarak değiştiriliyorsa iki kademeli yorulma deneyi söz konusudur. Yorulma deneyi aralıksız olarak devam etmelidir. Eğer deney zaman zaman durdurulursa deney numunesinde pekleşme gerçekleşir. Pekleşen deney numunesinde de yorulma dayanımı daha yüksek olmaktadır, (Tauscher ve diğ.

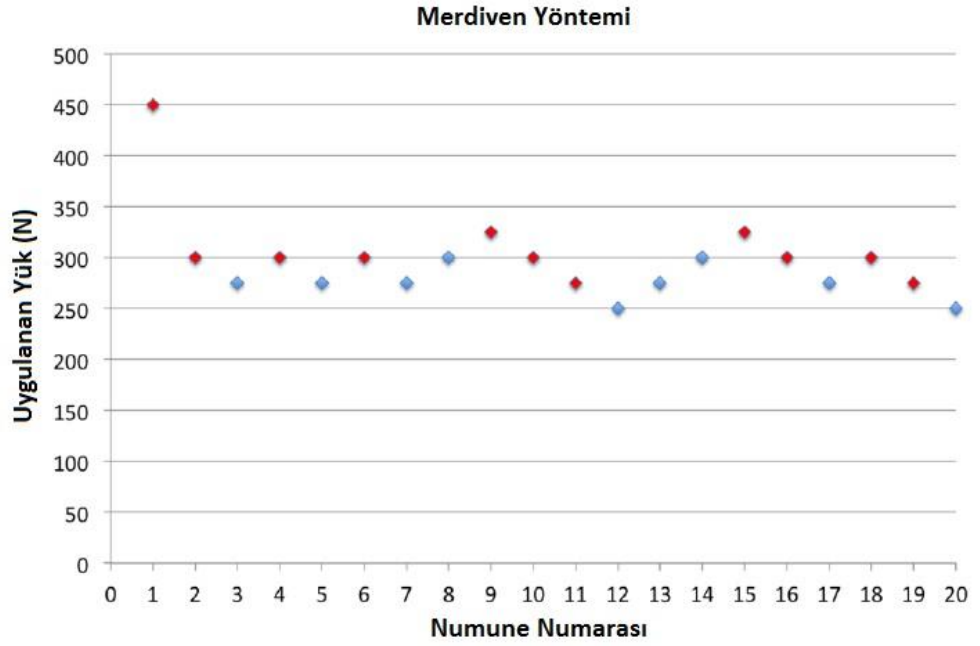
1983). Wöhler eğrisi oluşturmak için tüm deney numunelerinde ortalama gerilme veya alt gerilme büyüklüğü sabit tutularak her deney için ayrı gerilme genliği seçilir. İlk deney numunesinde üst gerilme genellikle akma sınırına yakın yerlerde seçilir ve sonraki deney numunelerinde ise giderek zorlama derecesi düşürülür. Sonuç olarak uygulanan gerilme genlikleri ve kırılmanın gerçekleştiği çevrim sayıları ile Wöhler eğrisi oluşturulur. Sonsuz çevrim sayısında kırılma hasarının görülmediği en büyük gerilme genliği, yorulma dayanımı olarak adlandırılır. Yorulma ömrü ise malzemenin yorulma dayanımından daha yüksek bir gerilme altında kırılmasına kadar gerçekleşen çevrim sayısıdır.

Elastik uzama genliği ile plastik uzama genliği değerlerinin birbirlerine eşit olduğu noktaya geçiş yorulma ömrü ( $N_t$ ) denilmektedir ve bu nokta elastik ile plastik doğrunun kesişimidir. Yorulma dayanım üsteli ile yorulma dayanım katsayısı elastik uzama eğrisi ile hesaplanırken yorulma süneklik üsteli ile yorulma süneklik katsayısı plastik uzama doğrusu ile hesaplanmaktadır. Bu nedenle geçiş yorulma ömrü önemli bir noktadır.



Şekil 2.4: Wöhler (S-N) eğrisi

Yorulma dayanımı değerini istatistiksel olarak daha doğru tahmin etmek için merdiven yöntemi, diğer adıyla yukarı-aşağı yöntemi kullanılmaktadır, (Dixon ve Mood 1948). Şekil 2.5'te gösterildiği gibi merdiven yönteminde belirli bir çevrim sayısına denk gelen gerilme genlikleri merdiven basamaklarına bölünür. Deneyler, belirlenen gerilme genliklerinin ortasındaki bir zorlama ile başlar. Deney numunesi eğer belirli çevrim sayısına denk gelen zorlamada kırılırsa, deney bir alt basamaktaki gerilme genliğine geçilerek yapılır. Eğer deney numunesi kırılmazsa bir üst gerilme genliğine geçilir ve bu şekilde devam eder, (Coelho ve Bromage 2014).



Şekil 2.5: Merdiven yöntemi (Huo ve diğ. 2022)

### 2.2.3.1 Yorulma Ömrünün Hesaplanması

Yorulma ömrünü hesaplamada birçok formül bulunmaktadır. Bunların en başında 1910 yılında bulunan ve Denklem 2.2'de verilen elastik yapıda, yüksek çevrim ve düşük uzamanın ilişkisini açıklayan Basquin, (Basquin 1910) denklemi vardır.

$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b \quad (2.2)$$

Bu denklemde  $\frac{\Delta \varepsilon_e}{2}$  elastik uzama genliği,  $\sigma'_f$  yorulma dayanım katsayısı, E elastisite modülü,  $2N_f$  hasar çevrim sayısı, b yorulma dayanım üsteli ve f indisi ise yorulmayı (fatigue) tanımlamaktadır.

Ardından birbirinden bağımsız olarak Manson, (Manson 1953) ve Coffin'in, (Coffin Jr. 1954) buldukları formülle, düşük çevrimli yorulma ilişkisini Denklem 2.3 ile açıklamışlardır ve bu denklem sonrasında Coffin-Manson denklemi olarak adlandırılmıştır.

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (2.3)$$

Denklemde  $\frac{\Delta \varepsilon_p}{2}$  plastik uzama genliği,  $\varepsilon'_f$  yorulma süneklik katsayısı ve c ise yorulma süneklik üstelidir.

Sonrasında Morrow, (Morrow 1968) Denklem 2.2 ve Denklem 2.3'ü birleştirerek elastik-plastik bölge ve düşük çevrimli-yüksek çevrimli bölgelerde de geçerli Coffin-Manson-Basquin denklemini (Denklem 2.4) bulmuştur. Bu denklem ayrıca Morrow tasarım kuralı olarak da geçmektedir. Denklemde  $\frac{\Delta \varepsilon_t}{2}$  toplam uzama genliğini vermektedir.

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (2.4)$$

Coffin-Manson-Basquin denkleminden türetilmiş ve yorulma ömrünü tahmin etmeye yarayan birçok denklem vardır. Bunlardan en basiti ilk olarak Crews ve Hardrath'ın, (Crews ve Hardrath 1966) bulduğu Denklem 2.5'tir. Denklemde  $\sigma_a$  gerilme genliğidir.

$$N_f = \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_a}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (2.5)$$

Ardından Landgraf, (Landgraf 1969) Denklem 2.5'e ortalama gerilme ( $\sigma_m$ ) değişkeni ekleyerek formülü tekrardan düzenleyip Denklem 2.6'yı elde etti.

$$N_f = \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_a}{\sigma'_f - \sigma_m} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (2.6)$$

Landgraf, (Landgraf 1971), Coffin-Manson-Basquin denklemini de aynı şekilde ortalama gerilme değişkeni ekleyerek tekrardan düzenledi ve Denklem 2.7'yi elde etti.

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = \frac{(\sigma'_f - \sigma_m)}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (2.7)$$

Ardından adını yazarlarından alan SWT (Smith, Watson ve Topper) eşitliğini (Denklem 2.8) elde etmişlerdir, (Smith 1970). Ayrıca hasar parametresi  $P_{SWT}$  Denklem 2.9 ile hesaplanmaktadır ve denklemde  $\varepsilon_a$  yerel uzama genliğidir, (Karakas 2013).

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} \sigma_{max} = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \varepsilon'_f (2N_f)^{b+c} \quad (2.8)$$

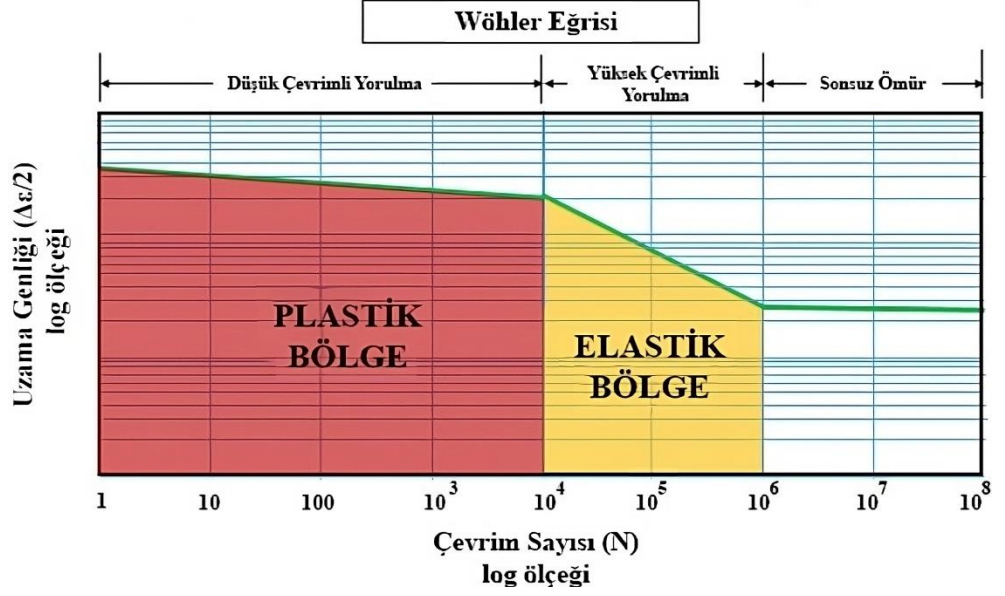
$$P_{SWT} = \sqrt{\sigma_{max} \varepsilon_a E} \quad (2.9)$$

#### 2.2.4 Yüksek Çevrimli Yoruma

Yüksek çevrimli yorulma genellikle  $10^5 < N < 10^7$  çevrim sayısına kadar tanımlanırken, çok yüksek çevrimli yorulma ise  $N \geq 10^7$  çevrim sayısı ve sonrası olarak tanımlanmaktadır. Yüksek çevrimli yorulma sonsuz ve sonlu yorulma ömrü bölgelerinde bulunabilir. Gerilme genellikle düşük, çevrim sayıları yüksek ve baskın olan deformasyon biçimi elastik deformasyondur. Wöhler eğrisi yüksek çevrimli yorulma için Şekil 2.4'te gösterildiği gibi gerilme-yorulma ömrü (S-N) olarak çift logaritmik eksen takımı kullanılmaktadır.

### 2.2.5 Düşük Çevrimli Yorulma

Düşük çevrimli yorulma temel olarak, plastik deformasyon ve düşük çevrim olgusuna dayanmaktadır. Gerilmenin büyüklüğü, yüksek çevrimli yorulmaya kıyasla daha büyüktür. Düşük çevrimli yorulmada uygulanan yük sonucu malzeme, sınırlı bir süreye kadar dayanabilmektedir ve plastik deformasyon hakimdir (Şekil 2.6). Wöhler eğrisi düşük çevrimli yorulma için uzama-yorulma ömrü ( $\epsilon$ -N) olarak logaritmik skalada kullanılmaktadır. Gerilme-yorulma ömrü eğrisinde düşük çevrim bölgesi için, yorulma verilerinin saçılma dağılımı daha az güvenilir sonuçlar vermektedir. Çevrim, tekrar eden gerilmeleri ifade eder ve sonucunda oluşacak çatlak ve yorulma gibi olası hasarlara neden olur. Düşük çevrim, yükün uygulanmasının uzun periyotlara bölünmesi demektir. Yüksek gerilme genlikleri ve düşük frekans, düşük gerilme genliği ve yüksek frekanstan çok daha tehlikelidir. Bu yüzden düşük çevrimli yorulma, yüksek çevrimli yorulmaya göre daha fazla dikkat edilmesi ve önlem alınması gereken bir durumdur. Yapılan çok sayıda deneyler neticesinde düşük çevrimli yorulmanın, malzemenin karakteristik yapısını değiştirebileceğini gözlemlemiştir. Malzeme, düşük çevrimli yorulmada ömrünün çok az bir kısmını çatlak oluşumu sırasında, büyük bir kısmını ise yorulma hasarı nedeniyle oluşan çatlak ilerlemesi safhasında harcamaktadır. Düşük çevrimli yorulma zorlaması uygulanan malzeme, sürekli olarak plastik deformasyona uğramaktadır. Eğer malzeme kalıcı deformasyona uğrayana kadar yüklerle zorlanırsa bu durum düşük çevrimli yorulmanın ilk yarı çevrimi olarak adlandırılmaktadır. Çevrimin tamamen tamamlanması için malzemenin deforme olmuş halinden, geri orijinal şekline dönmesi gerekir. Düşük çevrimli yorulma çevrimlerinde malzemenin hasara uğramadan önceki dayanımı, normal yorulma dayanımına göre çok daha düşüktür. Düşük çevrimli yorulma, az sayıda yükleme çevrimleri altında kırılma başlamadan önce oluşan büyük plastik deformasyonlara neden olmaktadır. Akma sınırını aşan gerilmeler büyük plastik deformasyonlara sebep olabilmektedir. Diğer hasar tiplerinde oluşan çatlaklara göre düşük çevrimli yorulmada çatlaklar çoğunlukla gerilme-uzama yoğunluğu olan küçük bölgelerde başlamaktadır. Düşük çevrimli yorulmada hasara uğrama kriteri belirli bir uzunlukta ve derinlikte makroskobik çatlak ya da malzemede tamamen kırılma olarak tanımlanabilmektedir.



**Şekil 2.6:** Wöhler eğrisinde (ε-N) plastik (düşük çevrimli) ve elastik (yüksek çevrimli) bölge (<https://community.sw.siemens.com/s/article/what-is-a-sn-curve>)

### 2.2.6 Düşük Çevrimli Yorulma Parametreleri

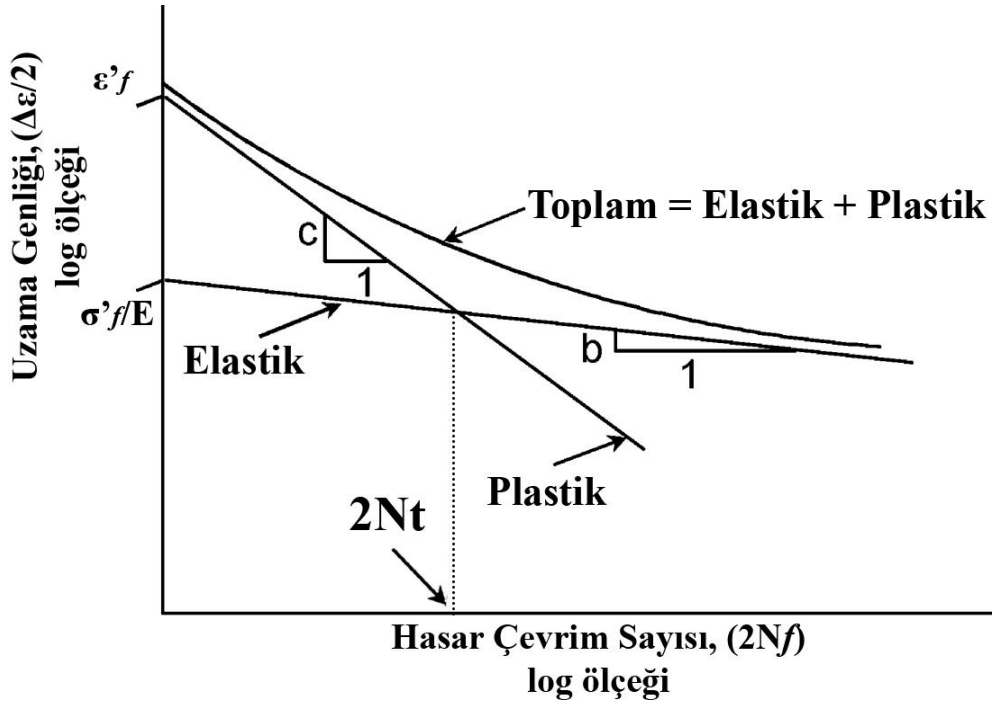
Düşük çevrimli yorulma parametrelerine ilişkin denklemlerin başında Coffin-Manson-Basquin denklemi (Denklem 2.4) yer almaktadır. Bu denklemdeki parametreler başlıca; yorulma dayanım katsayısı ( $\sigma'_f$ ), yorulma dayanım üsteli (b), yorulma süneklik katsayısı ( $\epsilon'_f$ ) ve yorulma süneklik üstelidir (c). Bu parametrelerin yanı sıra Ramberg-Osgood, (Ramberg ve Osgood 1943) parametreleri de kullanılmaktadır. Ramberg-Osgood parametreleri Denklem 2.10 ve Denklem 2.11'de gösterildiği gibi, çevrimsel dayanım katsayısı ( $K'$ ) ve çevrimsel uzama sertleşme üstelidir ( $n'$ ). Bu parametreler aynı zamanda Coffin-Manson-Basquin denklemiindeki düşük çevrimli yorulma parametreleri ile bulunabilmektedirler.

$$K' = \frac{\sigma'_f}{(\epsilon'_f)^{\frac{b}{c}}} \quad (2.10)$$

$$n' = \frac{b}{c} \quad (2.11)$$

### 2.2.6.1 Yorulma Dayanım Üsteli (b)

Yorulma dayanım üsteli “b” harfi ile temsil edilmektedir ve Denklem 2.2’den de görüleceği gibi yorulma hesaplamalarında gerilme genliği ile malzemenin hasar çevrim sayısı arasındaki ilişkiyi tanımlayan malzeme özelliğidir. Yorulma dayanım üsteli malzemenin yorulmadan kaynaklı hasar birikimine karşı duyarlılığını göstermektedir. Yorulma dayanım üsteli genellikle metal olan malzemeler için negatif değer olarak  $-0.12 \leq b \leq -0.05$  arasında değişmektedir, (Holman 2001). Negatif işaretli olması çevrim sayısı arttıkça, yorulma hasarı için gerekli gerilme genliğinin azaldığını göstermektedir. Yorulma dayanım üsteli değerinin düşük olduğu malzemeler, çoğunlukla çevrim sayısının artmasıyla birlikte yorulma dayanımında önemli ölçüde azalma eğilimi göstermektedir. Malzemenin içyapısına etki edecek her türlü işlem, yorulma dayanım üsteli değerini değiştirmektedir. Yüksek mukavemetli malzemeler, elastik deformasyon kabiliyeti açısından zayıf olduğu için yorulma dayanım üsteli değerleri yüksek (-0.12’ye yakın) olmaktadır. Yorulma dayanım üstelinin değeri artarken (-0.05’e yakın) yorulma ömrü artmaktadır, (Shinde ve Dhokey 2017). Şekil 2.7’de görüldüğü gibi yorulma dayanım üsteli, elastik kısmın negatif eğiminden hesaplanmaktadır.



Şekil 2.7: Uzama-yorulma ömrü grafiği (Genel 2004)



Hesaplama yapılırken grafiğin çift logaritmik eksen takımında çizildiğini unutmamak gerekir. Logaritmik ölçekte olduğu için X ve Y eksenlerindeki değerlerin farkı logaritmaları alınarak hesaplanmalıdır.

### 2.2.6.2 Yorulma Süneklik Üsteli (c)

Yorulma süneklik üsteli “c” harfi ile gösterilmektedir ve Denklem 2.3’ten de anlaşılacağı gibi çevrimsel yükleme koşullarında, plastik deformasyon kabiliyetini ifade etmektedir. Yorulma süneklik değeri malzemenin tipi, içyapısı ve uygulanan ısıl işlemler gibi birçok nedenden dolayı farklılık göstermektedir. Yorulma süneklik üsteli malzemeler için genellikle  $-0,7 < c < -0,2$  aralığında değişmektedir (Han ve diğ. 2019; Engelmaier 1982). Negatif işaretli olması gerilme genliğindeki artışın, malzemenin yorulma ömründe bir azalış göstermesinden kaynaklanmaktadır. Sünek malzemelerde yorulma süneklik üsteli daha büyük ( $-0,2$ 'ye yakın) ve yorulma ömrü daha çok olmaktadır, gevrek malzemelerde yorulma süneklik üsteli daha küçük ( $-0,7$ 'ye yakın) ve yorulma ömrü daha az olmaktadır. Şekil 2.7’de görüleceği gibi yorulma süneklik üsteli, plastik kısmın negatif eğiminden hesaplanmaktadır. Hesaplama yorulma dayanım üstelinde olduğu gibi yorulma süneklik üsteli için de aynı şekilde grafikler logaritmik skalada çizildiğinden X ve Y eksenleri arasındaki değerlerin farkı logaritmaları alınarak hesaplanmalıdır.

### 2.2.6.3 Yorulma Dayanım Katsayısı ( $\sigma'_f$ )

Yorulma dayanım katsayısı Basquin denklemi (Denklem 2.2) ile ilişkili bir katsayı ve yorulma parametresidir. Denklemde elastisite modülüne bölünmüş bir şekilde yer almaktadır. Şekil 2.7’ye bakıldığında elastik kısmın, tekrarlı çevrim sayısı  $2N_f = 1$  eşitliğini Y ekseninde kestiği nokta ile bulunmaktadır.

#### 2.2.6.4 Yorulma Süneklik Katsayısı ( $\epsilon'_f$ )

Yorulma süneklik katsayısı Coffin-Manson denklemi (Denklem 2.3) ile ilişkili bir katsayı ve yorulma parametresidir. Şekil 2.7'den de görüldüğü üzere plastik kısmın, tekrarlı çevrim sayısı  $2N_f = 1$  eşitliğini Y ekseninde kestiği nokta ile bulunmaktadır.

### **3. DÜŞÜK ÇEVİRİMLİ YORULMA PARAMETRELERİNİN HESAPLANMASI**

Düşük çevrimli yorulma parametrelerinin hesaplanmasında geleneksel ve geleneksel olmayan yöntemler kullanılmaktadır. Geleneksel yöntemlerde formüller ve bazı ampirik bağıntılar kullanılmaktadır. Bu yöntemler sıklıkla kullanılmasına rağmen günümüzde deneysel olarak elde edilen verilerle karşılaştırıldığında yetersiz kalmaktadır. Yorulma parametrelerinin deneysel sonuçlar neticesinde elde edilmesi çok uzun, maliyetli ve bilgi gerektiren bir süreçtir. Bu nedenle literatürde her bir malzeme için yeterli derecede veri bulunmamaktadır. Literatürdeki bu açıklıkların giderilmesi adına günümüzde makine öğrenmesi yöntemlerine başvurulmaktadır. Genel (2004), yaptığı çalışmada düşük çevrimli yorulma parametrelerini, makine öğrenmesi yöntemi olan yapay sinir ağları (YSA) ile tahmin etmiş ve elde ettiği sonuçları geleneksel formülasyonlarla karşılaştırmıştır. Sonuç olarak yapay sinir ağları tahminlemesi ile elde ettiği sonuçlar, geleneksel formüllere göre çok daha tutarlı ve doğru sonuçlar vermiştir. Makine öğrenmesi yöntemleri zaman açısından daha verimli, maliyet açısından çok daha ucuz ve bilgi birikimi konusunda gelişen teknolojik imkanlar ve olanaklar sonucunda daha az uğraş gerektiren yöntemlerdir. Her bir probleme özgü farklı algoritmalar, tahmin etme yöntemleri, performans kriterleri ve büyük/küçük olsun her türden veri seti ile çalışma imkânı vermektedir.

#### **3.1 Düşük Çevrimli Yorulma Parametrelerinin Hesaplanmasında Kullanılan Geleneksel Yöntemler**

Düşük çevrimli yorulma parametrelerini geleneksel yöntemlerle tahmin edebilmek için birçok araştırmacı tarafından çeşitli çalışmalar yapılmıştır. En çok kullanılan ve literatürde onay almış çalışmalar arasında; Morrow (1965) eğimler yöntemini, Manson (1965) evrensel eğimler yöntemini, Muralidharan ve Manson (1988) düzenlenmiş evrensel eğimler yöntemini, Bäumel ve Seeger (1990) üniform malzeme yasasını, Roessle ve Fatemi (2000) sertlik yöntemini, Mitchell (1996) Mitchell yöntemini, Park ve Song (2003) düzenlenmiş Mitchell yöntemini, Manson (1965) dört nokta korelasyonunu ve Ong (1993) düzenlenmiş dört nokta korelasyonunu literatüre kazandırmışlardır.

### 3.1.1 Yorulma Dayanım Üstelinin (b) Hesaplanması

Morrow (1965), eğimler yöntemini (Slopes method) bulmuştur ve yorulma dayanım üstelini, çevrimsel uzama sertleşme üsteline bağlı olarak hesaplamıştır (Denklem 3.12).

$$b = \frac{n'}{1 + 5n'} \quad (3.12)$$

Manson (1965), evrensel eğimler yöntemini (Universal slopes method) geliştirmiştir (Denklem 3.13). Muralidharan ve Manson (1988), evrensel eğimler yöntemini 47 malzeme ile geliştirerek daha iyi sonuçlar veren düzenlenmiş evrensel eğimler yöntemini (Modified universal slopes method) oluşturmuşlardır (Denklem 3.14). Bäumel ve Seeger (1990), evrensel eğimler yöntemini çelik, alüminyum ve titanyum malzeme tiplerine göre özelleştirip üniform malzeme yasasını (Uniform material law) geliştirmişlerdir (Denklem 3.15). Roessle ve Fatemi (2000) tarafından geliştirilen sertlik yöntemi (Hardness method), Brinell sertlikleri (BHN) 150'den küçük olan malzemeler için uygun değildir. Uygun aralığı genellikle  $150 < \text{BHN} < 700$  olmaktadır. Diğer yorulma parametreleri için Brinell sertliği MPa cinsinden alınmalıdır (Denklem 3.16). Bu denklemlerde yorulma dayanım üsteli sabit değer olarak alınmıştır.

$$b = -0.12 \quad (3.13)$$

$$b = -0.09 \quad (3.14)$$

Alaşımsız ve az alaşımlı çelikler için

$$b = -0.087 \quad (3.15)$$

Alüminyum ve titanyum alaşımları için

$$b = -0.095$$
$$b = -0.09 \quad (3.16)$$

Mitchell (1996), yorulma parametrelerinin hesaplanmasında, sertlikleri 500 Brinell sertliğinden düşük çeliklere uygun olacak biçimde Mitchell yöntemini (Mitchell's method) bulmuştur ve yorulma dayanım üstelini, çekme dayanımına ( $\sigma_u$ ) bağlantılı bir şekilde hesaplamıştır (Denklem 3.17).

$$b = -\frac{1}{6} x \log\left(\frac{2(\sigma_u + 345)}{\sigma_u}\right) \quad (3.17)$$

Park ve Song (2003), Mitchell yönteminde değişiklikler yaparak düzenlenmiş Mitchell yöntemini (Modified Mitchell's method), alüminyum alaşımlar için bulmuşlardır (Denklem 3.18).

$$b = -\frac{1}{6} x \log\left(\frac{\sigma_u + 335}{0.446\sigma_u}\right) \quad (3.18)$$

Manson (1965), yaptığı çalışmada iki adet yeni yöntem bulmuştur. Birincisi Denklem 3.13'te görüldüğü gibi evrensel eğimler yöntemidir. Diğeri ise dört nokta korelasyon (Four-point correlation) yöntemidir (Denklem 3.19). Dört nokta korelasyon denkleminde yorulma dayanım üstelini, gerçek kırılma sünekliğine ( $\epsilon_f$ ) bağlı olarak bulmuştur.

$$b = \frac{\log\left[\frac{2.5(1+\epsilon_f)}{0.9}\right]}{\log\left(\frac{1}{4 \times 10^5}\right)} \quad (3.19)$$

Ong (1993), yaptığı çalışmada farklı çekme deneyi değerlerine sahip 49 adet çelik ile deneyler yapmış olup mevcut dört nokta korelasyonunu geliştirerek daha iyi sonuçlar veren düzenlenmiş dört nokta korelasyonu (Modified four-point correlation) yöntemini bulmuştur (Denklem 3.20). Bu denklemde yorulma dayanım üstelini elastisite modülü, çekme dayanımı ve gerçek kırılma dayanımına ( $\sigma_f$ ) bağlı olarak bulmuştur.

$$b = -\frac{1}{6} x \log\left(\frac{[0.16 \left(\frac{\sigma_u}{E}\right)^{0.81}]}{\left(\frac{\sigma_f}{E}\right)}\right) \quad (3.20)$$

### 3.1.2 Yorulma Süneklik Üstelinin (c) Hesaplanması

Yorulma süneklik üsteli, eğimler yöntemi ile Denklem 3.21'de çevrimsel uzama sertleşme üsteline bağlı olarak hesaplanmaktadır.

$$c = \frac{1}{1 + 5n'} \quad (3.21)$$

Evrensel eğimler yöntemi ile Denklem 3.22'de, düzenlenmiş evrensel eğimler yöntemi ile Denklem 3.23'te, üniform malzeme yasası ile alaşımsız ve az alaşımlı çelikler ve alüminyum ve titanyum malzemeler için farklı değerler olarak Denklem 3.24'te, sertlik yöntemi ile Denklem 3.25'te, Mitchell yöntemi ile Denklem 3.26'da ve düzenlenmiş Mitchell yöntemi ile Denklem 3.27'de yorulma süneklik üsteli sabit bir değer olarak kullanılmaktadır.

$$c = -0.6 \quad (3.22)$$

$$c = -0.56 \quad (3.23)$$

Alaşımsız ve az alaşımlı çelikler için

$$c = -0.58 \quad (3.24)$$

Alüminyum ve titanyum alaşımları için

$$c = -0.69$$

$$c = -0.56 \quad (3.25)$$

$$c = -0.6 \quad (3.26)$$

$$c = -0.661 \quad (3.27)$$

Dört nokta korelasyonu ile Denklem 3.28'de  $10^4$  çevrim sayısında elastik uzama aralığına ( $\Delta\varepsilon^*_e$ ) ve gerçek kırılma sünekliğine bağlı olarak hesaplanmaktadır.

$$c = -\frac{1}{3} \frac{\log\left[\frac{(0.0132 - \Delta\varepsilon^*_e)}{1.91}\right]}{\log\left(\frac{\varepsilon_f^4}{4}\right)} \quad (3.28)$$

Düzenlenmiş dört nokta korelasyonu yöntemi ile Denklem 3.29'da yorulma dayanım katsayısına, yorulma dayanım üsteline, elastisite modülüne ve gerçek kırılma sünekliğine bağlı olarak hesaplanmaktadır.

$$c = -\frac{1}{4} x \log \frac{(0.0074 - \frac{\sigma'_f(10^4)^b}{E})}{2.074\varepsilon_f} \quad (3.29)$$

### 3.1.3 Yorulma Dayanım Katsayısının ( $\sigma'_f$ ) Hesaplanması

Yorulma dayanım katsayısı, evrensel eğimler yöntemi ile Denklem 3.30'da çekme dayanımına bağlı olarak hesaplanmaktadır.

$$\sigma'_f = 1.9\sigma_u \quad (3.30)$$

Düzenlenmiş evrensel eğimler yöntemi ile Denklem 3.31'de elastisite modülü ve çekme dayanımına bağlı olarak hesaplanmaktadır.

$$\sigma'_f = E x 0.623 \left(\frac{\sigma_u}{E}\right)^{0.832} \quad (3.31)$$

Üniform malzeme yasası ile Denklem 3.32'de çekme dayanımına bağlı olarak alaşımsız ve az alaşımlı çelikler için farklı, alüminyum ve titanyum alaşımları için farklı hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} &\text{Alaşımsız ve az alaşımlı çelikler için} \\ &\sigma'_f = 1.5\sigma_u \\ &\text{Alüminyum ve titanyum alaşımları için} \\ &\sigma'_f = 1.67\sigma_u \end{aligned} \quad (3.32)$$

Sertlik yöntemi ile Denklem 3.33'te Brinell sertliğine bağlı olarak hesaplanmaktadır.

$$\sigma'_f = 4.25(BHN) + 225 \quad (3.33)$$

Mitchell yöntemi ile Denklem 3.34'te gerçek kırılma dayanımı ve çekme dayanımına bağlı olarak hesaplanmaktadır.

$$\sigma'_f = \sigma_f = \sigma_u + 345 \text{ MPa} \quad (3.34)$$

Düzenlenmiş Mitchell yöntemi ile Denklem 3.35'te çekme dayanımına bağlı olarak hesaplanmaktadır.

$$\sigma'_f = \sigma_u + 335 \text{ MPa} \quad (3.35)$$

Dört nokta korelasyonu ile Denklem 3.36'da gerçek kırılma dayanımı ve yorulma dayanım üsteline bağlı olarak hesaplanmaktadır.

$$\sigma'_f = 1.25\sigma_f x 2^b \quad (3.36)$$

Düzenlenmiş dört nokta korelasyonu ile Denklem 3.37'de çekme dayanımı ve gerçek kırılma sünekliğine bağlı olarak hesaplanmaktadır.

$$\sigma'_f = \sigma_u(1 + \varepsilon_f) \quad (3.37)$$

### 3.1.4 Yorulma Süneklik Katsayısının ( $\varepsilon'_f$ ) Hesaplanması

Yorulma süneklik katsayısı, evrensel eğimler yöntemi ile Denklem 3.38'de kopma uzamasına (%RA) bağlı olarak hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon'_f = 0.76 \left[ \ln \left( \frac{1}{1 - \%RA} \right) \right]^{0.6} \quad (3.38)$$

Düzenlenmiş evrensel eğimler yöntemi ile Denklem 3.39'da çekme dayanımı ve elastisite modülüne bağlı olarak hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon'_f = 0.0196 \left( \frac{\sigma_u}{E} \right)^{-0.53} \quad (3.39)$$

Üniform malzeme yasası ile Denklem 3.40'ta temsili bir parametreye ( $\psi$ ) bağlı olarak hesaplanmaktadır. Bu parametrenin değeri 0.003'ten büyük ya da küçük olduğu durumlarda hesaplamalar değişmektedir.

$$\begin{aligned} \varepsilon'_f &= 0.59\psi \\ \frac{\sigma_u}{E} &\leq 0.003 \text{ ise } \psi = 1 \\ \frac{\sigma_u}{E} &> 0.003 \text{ ise } \psi = 1.375 - 125 \left( \frac{\sigma_u}{E} \right) \end{aligned} \quad (3.40)$$

Sertlik yöntemi ile Denklem 3.41'de Brinell sertliğine ve elastisite modülüne bağlı olarak hesaplanmaktadır.



$$\varepsilon'_f = \frac{0.32(BHN)^2 - 487(BHN) + 191000}{E} \quad (3.41)$$

Mitchell yöntemi, düzenlenmiş Mitchell yöntemi ve düzenlenmiş dört nokta korelasyonu ile yorulma süneklik üsteli, Denklem 3.42'de olduğu gibi gerçek kırılma sünekliğine eşit olarak alınmaktadır.

$$\varepsilon'_f = \varepsilon_f \quad (3.42)$$

Dört nokta korelasyonu ile Denklem 3.43'te yorulma süneklik üsteli ve kopma uzamasına bağlı olarak hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon'_f = \frac{0.125}{20^c} \times \left[ \ln \left( \frac{1}{(1 - \%RA)} \right) \right]^{\frac{3}{4}} \quad (3.43)$$

### **3.2 Düşük Çevrimli Yorulma Parametrelerinin Hesaplanmasında Kullanılan Geleneksel Olmayan Yöntemler**

Geleneksel olmayan yöntemler (makine öğrenmesi), günümüzde geleneksel yöntemlere kıyasla daha iyi ve etkili sonuçlar elde etme konusunda bir adım öne çıkmışlardır. Samuel (1956), ilk makine öğrenmesi terimini kullanan kişi olmuştur. Makine öğrenmesi kısaca yapay zekâ ve bilgisayar gücü sayesinde verileri ve çeşitli algoritmaları kullanması yoluyla insanların, hayvanların ve doğanın davranışlarını taklit ederek elde edilen sonuçların doğruluk oranlarının arttırılmasını amaçlayan bir yöntemdir. Makine öğrenmesi ve yapay zekâ uygulamaları sayesinde araştırmacılar herhangi bir problemi mantıklı ve düşük hata oranlarına sahip bir şekilde daha kısa sürelerde ve daha az uğraş sarfederek tahmin edebilmektedirler. Kullanılan algoritmalar zamanla değişerek doğada gözlemlenen evrimsel mekanizmalardan esinlenen algoritmalar ortaya çıkmıştır ve bu tür algoritmalara genetik algoritmalar (GA) denilmektedir. Doğayı baz alan tüm evrimsel algoritmalar Darwin'in "en uyumlu olan hayatta kalır" felsefesine dayanmaktadır, (Darwin 1859). Genetik algoritmalar doğal seçilim ve genetik çeşitliliğe dayanmaktadır. Problem çözümünde çok sayıda popülasyonlar kullanılır ve her jenerasyonda seçme, çaprazlama ve mutasyon oranları değiştirilerek farklı çözümler elde edilmektedir. Yapay sinir ağları insan beyninden esinlenerek oluşturulan bir makine öğrenmesi yöntemidir. Bulanık mantık

algoritmasında kesin olmayan verilerle çalışılmaktadır. Kesin doğru ya da kesin yanlış yerine cevaplar 0-1 aralığında üretilir ve cevap 0,7 ise doğruluğa yakın olmaktadır. YSA'lar bir veya birden fazla gizli katmandan oluşmaktadır ve her katmanda sinir hücrelerine benzer gizli nöronlar vardır. Her nöron girdi parametrelerini belirli bir ağırlıkla çarparak ve sonrasında bias katsayısı eklenerek aktivasyon fonksiyona (AF) iletir, oradan da çıktı verisi oluşur. Sürü bilgisine dayanan algoritmalar ise doğadan esinlenerek sürü halinde gezen canlıların yiyecek bulma ve avlanma davranışlarının incelenmesi ile makine öğrenmesi yöntemlerine uyarlanmasıdır. Doğadan esinlenen algoritmalar arasında sürü bazlı algoritmalar yer almaktadır ve bunlar arasında parçacık sürü optimizasyonu, karınca kolonisi optimizasyonu, yapay arı kolonisi algoritması, yarasalar algoritması ve balina optimizasyonu algoritması gibi çeşitli algoritmalar bulunmaktadır.

Kennedy ve Eberhart (1995), parçacık sürü optimizasyonu algoritmasını bulmuşlardır. Parçacık sürü optimizasyonunda parçacıklar hız vektörü ve konuma sahiptir ve en iyi sonuca ulaşmak için iterasyonlar boyunca sürekli güncellenmektedirler. Dorigo ve diğ. (2006), karınca kolonisi optimizasyonunu bulmuşlardır. Karınca kolonisi optimizasyonunda, karıncalar yuvalarından yiyeceklere ulaşana kadar feromon adı verilen bir hormon salgırlar ve feromon yoğunluğuna göre en iyi çözüme doğru hareket etmelerini sağlar. Karaboga (2005), yapay arı kolonisi algoritmasını bulmuştur. Arılar yiyecek kaynaklarını belirlerken nektar miktarlarına göre en iyi çözümleri araştırırlar ve dansa benzer bir hareket sergilerler. Keşif arıları öncelikle rastgele bir şekilde etrafa dağılırlar ve nektar vektörleri belirledikten sonra kendi buldukları nektar vektörleri ile karşılaştırarak en iyi nektar vektörünü güncellerler. İşçi arılar, keşif arılarının bulduğu en iyi çözümleri seçip onları daha detaylı araştırırlar. İzci arılar ise, keşif ve işçi arılarının bulduğu çözümlerden daha iyi bir çözüm adayını bulmaya çalışırlar. Yang (2010), yarasalar algoritmasını bulmuştur. Yarasalar algoritması, yarasaların mesafeyi hissetmesini sağlayan ekolokasyon özelliğine dayanan bir algoritma türüdür. Mirjalili ve Lewis (2016), balina optimizasyonu algoritmasını bulmuşlardır. Bu algoritma temelinde balinaların grup olarak avlanma davranışlarından esinlenmiştir.

### 3.2.1 Literatürde Yorulma Ömrü ve Yorulma Parametrelerinin Tahmin Edilmesinde Kullanılan Çeşitli Makine Öğrenmesi Yöntemleri

Yorulma ömrü ve yorulma parametrelerinin tahmin edilmesinde çeşitli makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmaktadır. Bu alanda yapılan çalışmaların bazıları aşağıda bahsedilmiştir.

Zou ve diğ. (2019), çalışmalarında entropi temelli bir komşuluk kaba küme indirgeme yaklaşımı ve parçacık sürü optimizasyonu ile destek vektör regresyon makinesi algoritmalarını kullanarak titanyum alaşım kaynak bağlantılarının yorulma ömürlerini tahmin etmişlerdir.

Karakas ve diğ. (2008), yaptıkları çalışmada eş değer yapısal uzunluk hesaplamaları ve magnezyum kaynak bağlantılarının yorulma dayanımlarını elde etmek için genetik algoritma kullanmışlardır. Belirsiz eş değer yapısal uzunluğu elde etmek için AZ31'in ana malzemenin, kaynaklı metalin ve ısı tesiri altındaki bölgenin, çentikli ve çentiksiz numuneler için yorulma testlerini yapmışlardır. Sonuç olarak tahmin edilen eş değer yapısal uzunluklardan bulunan yorulma dayanım değerlerini genetik algoritma ile başarıyla etmişlerdir.

Kalayci ve diğ. (2019), çalışmalarında yapay arı kolonisi algoritması kullanarak magnezyum alaşım kaynaklarının yorulma ömürlerini tahmin etmişlerdir. Öncelikle üstel trigonometrik fonksiyon modelini kurmuşlar ardından yapay arı kolonisi algoritmasını kullanarak fonksiyonun ağırlık parametrelerini optimize etmek için kullanmışlardır. Tahmin edilen yorulma ömürleri, deneysel olarak elde edilen yorulma ömürleri ile yüksek doğrulukta uyduğu gösterilmiştir.

Genel (2004), yaptığı çalışmada yapay sinir ağları kullanarak 73 farklı çeliğe ait Coffin-Manson-Basquin parametrelerini başarıyla tahmin etmiş ve geleneksel tahminleme yöntemleriyle karşılaştırdığında daha tutarlı ve düşük hata oranlarına sahip sonuçlar elde etmiştir. Veri setinin 49'unu öğrenmeye 24'ünü de test etmeye ayırmıştır.

Suvvari ve Srinadh (2014), yaptıkları çalışmada aynı şekilde Coffin-Manson-Basquin parametrelerini yapay sinir ağı ile tahmin etmiş ve düşük karbonlu çeliğe ait yorulma parametrelerini tahmin etmiştir.

Tomasella ve diğ. (2011), çalışmalarında 225 farklı malzemeye ait veri seti kullanarak çevrimsel yorulma özelliklerini yapay sinir ağı kullanarak tahmin etmişlerdir.

Karakas ve Tomasella (2013), çalışmalarında YSA ile nüfuz etmeyen alın kaynaklı magnezyum ve alüminyum bağlantılarının yorulma ömürlerini tahmin etmişlerdir. Girdi parametresi olarak gerilme yoğunluk faktörü ve nominal gerilme genliği kullanmışlardır. Sonuç olarak deneysel olarak elde edilen yorulma ömürleri ile tahmin edilen yorulma ömürleri iyi derecede uyum sağlamıştır.

Janežič ve diğ. (2009), çevrimsel gerilme-uzama eğrilerinin saçılmasını yapay sinir ağı yaklaşımı ile başarıyla tahmin etmişlerdir.

Ghajar ve diğ. (2010), yaptıkları çalışmada farklı çeliklere ait veri seti kullanarak Ramberg-Osgood parametrelerini yapay sinir ağı ile tahmin etmişlerdir.

Liu ve diğ. (2022), doğal kauçuk parçaların yorulma ömürlerini YSA ve geliştirilmiş sine-cosine algoritması ile tahmin etmişlerdir. Kullandıkları algoritmayı genetik algoritma, parçacık sürü optimizasyonu ve tek başına sine-cosine algoritmalarıyla karşılaştırmışlardır. Sonucunda doğal kauçuk malzemelerin yorulma ömürlerini %97,5 oranında başarıyla tahmin etmişlerdir ve diğer algoritmalara göre üstünlük sağlamıştır.

Li ve diğ. (2022), seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4V alaşımının yüksek çevrim koşulları altında yorulma ömrünü YSA ile başarılı bir şekilde tahmin etmişlerdir.

Karakas (2011), yaptığı çalışmada alüminyum kaynak bağlantılarının yorulma ömürlerini yapay sinir ağı yaklaşımı ile tahmin etmiştir. Sabit genlikli yükleme altında yorulma ömürlerini elde etmiştir. YSA yaklaşımı ile dört alüminyum alaşımının S-N doğrularının saçılma bandını belirlemiştir.

Bayraktar ve diğ. (2017), 3D (üç boyutlu) yazıcı ile basılmış ve eriyik yığıma modellenmesi ile üretilmiş PLA (polilaktik asit) plastik malzemelerin mekanik özelliklerini yapay sinir ağları kullanarak yüksek doğrulukta tahmin etmiştir.

Chen ve Liu (2022), yaptıkları çalışmada yorulma ile ilgili yapay sinir ağları ile tahmin edilen 1990'dan 2021 yılına kadar 251 makaleyi incelemiş ve en çok kullanılan materyalin çelik olduğu görülmüştür. Ayrıca yorulma ile ilgili yayımlanan çalışmalar yapay sinir ağlarının kullanımının yaygınlaşması ile artmıştır.

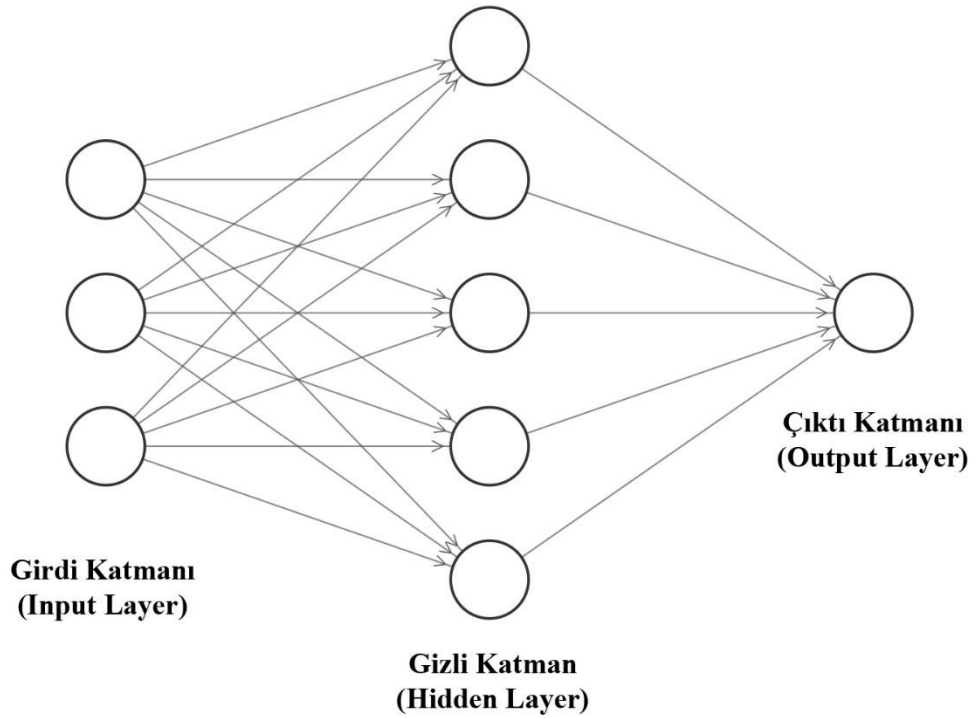
Kalayci ve diğ. (2020), yaptıkları çalışmada 1995 ile 2020 yılları arasında yayımlanan makalelerden yorulma parametrelerinin çeşitli makine öğrenmesi yöntemleriyle tahmin edilmesini araştırmışlardır. Elde ettikleri bulgulara göre yorulma parametrelerinin tahmin edilmesinde yapay sinir ağları ezici üstünlükle kullanılmaktadır.

Geleneksel yöntemlerin kullanımı gün geçtikte popülerliğini yitirmektedir. Ayrıca her malzeme türü için ayrı ayrı formülasyonlara sahip olmamaları ve olanların da sadece çok yaygın kullanılan çelik, titanyum ve alüminyum gibi malzemelerle sınırlı kalması, ayrıca deneysel olarak elde edilen veriler ile aralarında kayda değer bir hata oranı bulunması sebebiyle geçerliliklerini yitirmektedirler. Yapay sinir ağları her türden problemi çözme kabiliyetinin yanı sıra alışımlı, alışısız, metal olan, metal olmayan, kaynaklı, kaynaksız, ısı işlem görmüş ve talaşlı imalat yapılmış her türden malzeme için uygulanabilmektedir. YSA metodu genel olarak çeşitli programların arayüzleri ve hazırda bulunan algoritmaları sayesinde rahatlıkla uygulanabilmektedir. Bu sayede çok fazla bilgi gerektirmeden kolay ve orta zorlukta tahminlemeler rahatlıkla yapılabilmektedir. Daha karmaşık ve zor işlemlerde ise yapay sinir ağlarının özelleştirilmesi ve probleme uygun hale getirilmesi gerekmektedir. YSA'nın içerisinde değiştirilebilecek birçok koşul vardır ve bunlar arasında başlıca veri setinin büyüklüğü, iterasyon sayısı, performans kriteri, hata oranı türleri, gizli nöron sayıları, gizli katman sayıları, aktivasyon fonksiyonları, eğitim fonksiyonları ve veri setinin eğitime, test etme ve doğrulama olarak yüzdelerine ayrılması gibi birçok değişken faktör bulunmaktadır.

Yukarıda verilen çalışmaları göz önünde bulundurarak ve son yıllarda yapay sinir ağı yönteminin parametre tahminlemede yaygın olarak kullanılmasının yanı sıra hibrit algoritmalarda kullanım kolaylığı, veri setinin büyüklüğü az olsa dahi yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilebilmesi, yapısında birçok hiper parametreye yer vermesi nedeniyle bu tez kapsamında yorulma ömrü ve düşük çevrimli yorulma parametrelerinin tahmin edilmesinde yapay sinir ağı (YSA) yöntemi kullanılmıştır.

## 4. YAPAY SİNİR AĞLARI

Yapay sinir ağı temelinde insan beyninden esinlenmiş bir makine öğrenmesi yöntemidir. Her ikisi de bilgiyi işleyip sonuçlar üretmek için büyük miktarda veriye ihtiyaç duymaktadır. İnsan beyninde nöronlar, sinirler üzerinden işlem gerçekleştirmek için görev almaktadır. Yapay sinir ağlarında da bu yapıya benzer bir şekilde yapay nöronlar kullanılır ve her bir nöron birbirleriyle bağlantılıdır. İnsan beyni elde ettiği bilgileri işleyip kullanarak sonrasında sonuç üretme kabiliyetine sahiptir, (Chen ve diğ. 2020). Yapay sinir ağları da bir eğitime/öğrenme (training), test etme (testing) ve doğrulama (verification) aşamalarına sahiptir, (Dayhoff ve DeLeo 2001). Yapay sinir ağları mevcut verilerle eğitilerek daha sonra karşısına çıkacak örneklerde, önceden öğrendiği bilgileri çeşitli algoritmalar vasıtasıyla kullanarak anlamlı sonuçlar üretebilmektedir. Tek katmanlı yapay sinir ağlarının genel yapısı Şekil 4.8'deki gibidir.



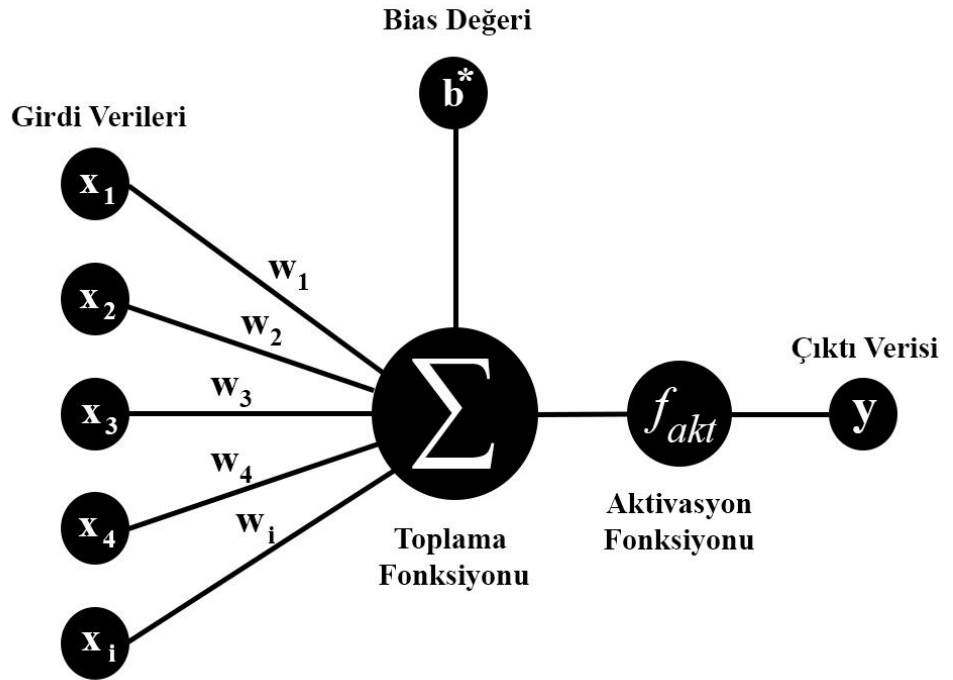
Şekil 4.8: Yapay sinir ağlarının yapısı

Yapay sinir ağlarında, sinir ağı olarak kabul edilen yere veriler (dataset) iletilir. İletilen veriler yapay sinir ağlarının girdi katmanına (input layer) gönderilir. Girdi katmanında birden çok girdi parametresi bulunabilmektedir. Girdi katmanındaki veriyi

sonraki katman olan gizli katmana/katmanlara iletirler. Gizli katman sayısı bir veya birden çok olabilmektedir. Her gizli katmanda aynı veya farklı sayıda gizli nöron bulunabilmektedir. Yapay sinir ağlarında gizli katman sayısı arttıkça sinir ağları derinleşmektedir ve bu ağlara derin öğrenme (deep learning) ya da derin sinir ağları (deep neural networks) denilmektedir. Gizli katmanda işlemler yapıp, veri çıktı katmanına iletilir. Veriler gizli katmanda rastgele üretilmiş ağırlıklar ile çarpılıp toplanır ve ardından aktivasyon fonksiyonunu sağ ya da sol yöne doğru kaydırmaya yarayan bias değeri eklenir. Denklem 4.44'te ve Şekil 4.9'da görüldüğü gibi toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonuna iletilir ve çıktı sonuçları elde edilir.

$$y = f_{akt}\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b^*\right) \quad (4.44)$$

Denklemde  $y$  çıktı verisi,  $f_{akt}$  aktivasyon fonksiyonu,  $w_i$  ağırlık değeri,  $x_i$  girdi verisi ve  $b^*$  ise bias değeridir.



Şekil 4.9: Veri işleme şematığı

Her gizli katmanda bir aktivasyon fonksiyonu ve gizli nöronlar bulunmaktadır. Gizli katman sayısı arttıkça yapılan hesaplamalar da artmakta ve yine bir sonraki katmana bilgiler iletilip tekrar işlenmektedir. Gizli nöron sayısı, gizli katman sayısı,



veri büyüklüğü, epok (epoch) sayısı, öğrenme fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve yapılan replikasyon sayısı hesaplama süresine büyük ölçüde etki etmektedir.

Yapay sinir ağlarında kullanılan birçok aktivasyon fonksiyonu bulunmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda (Asgari ve diğ. 2013; Hu ve diğ. 2022; Zarei ve diğ. 2020) yaygın olarak kullanılan ve bu tez çalışmasında dikkate alınan aktivasyon fonksiyonları; lojistik sigmoid (logsig), lineer (purelin), hiperbolik tanjant sigmoid (tansig) ve hard limittir (hardlim).

Lojistik sigmoid (logsig) aktivasyon fonksiyonu [0,1] arasında değer alabilmektedir ve Denklem 4.45 ile hesaplanmaktadır.

$$\text{logsig}(n) = \frac{1}{(1 + e^{(-n)})} \quad (4.45)$$

Lineer (purelin) aktivasyon fonksiyonunda girdi değeri ne ise çıktı değeri de o olmaktadır ve Denklem 4.46 ile hesaplanmaktadır.

$$\text{purelin}(n) = n \quad (4.46)$$

Hiperbolik tanjant sigmoid (tansig) aktivasyon fonksiyonu [-1,1] arasında değer alabilmektedir ve Denklem 4.47 ile hesaplanmaktadır.

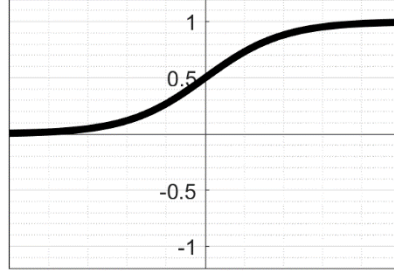
$$\text{tansig}(n) = \frac{2}{(1 + e^{(-2n)})} - 1 \quad (4.47)$$

Hard limit (hardlim) aktivasyon fonksiyonunda girdi değeri 0 veya 0'dan büyükse sonuç 1'dir. Diğer tüm durumlarda ise sonuç 0'dır ve Denklem 4.48 ile hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} \text{hardlim}(n) &= 1, \text{ eğer } n \geq 0; \\ \text{hardlim}(n) &= 0, \text{ eğer } n < 0; \end{aligned} \quad (4.48)$$

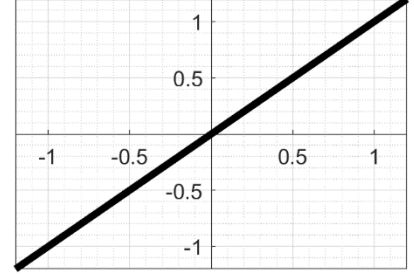
Bu tez çalışması kapsamında kullanılan ve yukarıda bahsedilen aktivasyon fonksiyonlarına ait fonksiyon grafikleri Şekil 4.10'da verilmiştir.

Lojistik Sigmodid Aktivasyon Fonksiyonu  
(logsig)



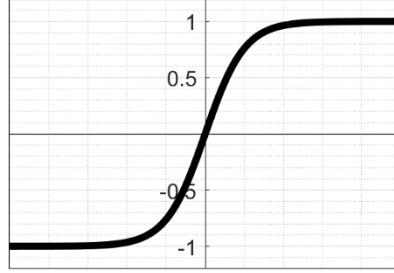
(a)

Lineer Aktivasyon Fonksiyonu  
(purelin)



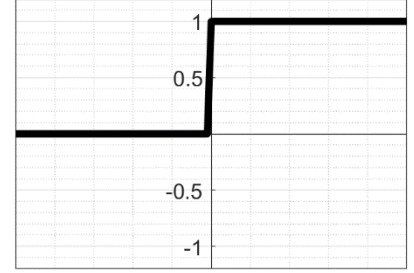
(b)

Hiperbolik Tanjant Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu  
(tansig)



(c)

Hard Limit Aktivasyon Fonksiyonu  
(hardlim)



(d)

**Şekil 4.10:** Aktivasyon fonksiyonları grafikleri a) lojistik sigmoid, b) lineer, c) hiperbolik tanjant sigmoid, d) hard limit

Yapay sinir ağları ile parametre tahminlerinde ileri beslemeli (feed-forward) yapay sinir ağları sıklıkla kullanılmaktadır. Girdi verisi gizli katmana iletilir, gizli katmanda hesaplamalar yapıldıktan sonra çıktı katmanında sonuç üretilir. Bu yapıda akış sadece ileri doğru olduğu için ileri beslemeli olarak adlandırılmaktadır. İleri beslemeli sinir ağlarının eğitilmesi ve hata oranlarının azaltılması için geri yayılım algoritmaları kullanılmaktadır. Geri yayılım algoritmaları yapay sinir ağlarında hata miktarları sürekli hesaplanır ve ağırlıklar güncellenir. Deneysel veriler ile tahmin edilen veriler birbirleri ile karşılaştırılarak hatayı geriye doğru olacak şekilde tekrardan ağırlıkları güncelleyerek en aza indirmeye çalışılmaktadır, (Sazlı 2006). Bu sayede yapay sinir ağları daha iyi bir şekilde eğitilmektedir. Bazı durumlarda eğitme işlemi aşırıya kaçmaktadır ve bu duruma aşırı uyum (overfitting) denilmektedir. Kullanılan algoritma eğitilme verilerine çok fazla uyum sağlayıp yeni gelen verileri tahmin etme konusunda genelleme yapabilme kabiliyetini yitirmektedir. Bu durumun önüne geçilmesi için veri seti boyutunun artırılması, aşırı karmaşıklıktan kurtulma, eğitilme sürecinin azaltılması, farklı fonksiyonlar kullanılması gibi çeşitli yöntemlerle önlenilmektedir, (Santos ve Papa 2022).

Demuth ve Beale (1998), MATLAB yazılımında yapay sinir ağlarında kullanılan en yaygın geri yayılım algoritmaları olarak Levenberg-Marquardt (trainlm), ölçeklenmiş eşlenik gradyan (trainscg), momentum ve adaptif öğrenme oranı ile gradyan inişi (traingdx) ve bayes düzenlemesi (trainbr) olarak bahsetmektedir.

“trainlm” geri yayılım algoritmaları arasında en yaygın kullanılanı ve en hızlı olanıdır. Levenberg-Marquardt metoduna göre ağırlık ve bias değerlerini günceller. Ayrıca MATLAB tarafından seçilecek ilk geri yayılım algoritması olarak önerilmektedir fakat diğer algoritmalara göre daha çok bellek gerektirmektedir.

“trainscg” algoritması, ağırlıkları ve bias değerlerini ölçeklenmiş eşlenik gradyan metoduna göre güncellemektedir.

“traingdx” algoritması, ağırdaki ağırlıkları ve bias değerlerini gradyan iniş momentumuna ve adaptif öğrenme oranına göre güncellemektedir.

“trainbr”, Levenberg-Marquardt algoritmasına göre ağırlık ve bias değerlerini günceller. Karesel hataları ve ağırlıkları minimize etmeye çalışır ve genelleme özelliği iyi olan bir ağ oluşturmaya çalışır.

Yapay sinir ağları çok fazla avantaja sahip olsa da büyük verilere ihtiyaç duyma, aşırı uyum sorunu ve rastgelelik gibi bazı eksik kaldığı noktalar vardır. Bu sorunların aşılması için yapay sinir ağlarının yapısında bulunan gizli nöron sayısı, gizli katman sayısı, aktivasyon fonksiyonları, öğrenme fonksiyonları, verilerin bölünmesi, epok sayısı ve normalizasyon türü gibi hiper parametrelerin en uygun şekilde belirlenmesi, probleme göre özelleştirilmesi ve hiper parametre kombinasyonlarının denenmesi gerekmektedir.

## 5. YAPAY SİNİR AĞLARININ UYGULANIŞI

Bu tez kapsamında çeşitli çeliklerin yapay sinir ağları yöntemi kullanarak düşük çevrimli yorulma parametreleri ile yorulma ömürleri iki model şeklinde tahmin edilmiştir.

Birinci modelde yüksek dayanımlı çeliklerin (YDÇ), düşük çevrimli yorulma parametreleri ve yorulma ömürleri bir gizli katman kullanılarak farklı aktivasyon fonksiyonları, epok sayıları, öğrenme fonksiyonları, öğrenme fonksiyonları kullanırken tahminlemede geçen süreleri ve gizli nöron sayıları test edildikten sonra bu değişkenlerin tahminleme sonuçlarının doğruluğuna ve tahminleme sürelerine olan etkileri incelenecektir. Bu sayede tek katmanlı yapay sinir ağlarının yapısı yakından incelenecek olup hiper parametrelerin tahminleme sonuçları üzerine etkileri daha iyi anlaşılacaktır. Ayrıca tahmin edilen düşük çevrimli yorulma parametreleri ve yorulma ömürlerinin deneysel olarak elde edilmiş parametre değerleri ile tahminlenen parametre değerleri birbirleri ile karşılaştırılacaktır.

İkinci modelde ise çeşitli çeliklerin, düşük çevrimli yorulma parametreleri ve geçiş yorulma ömürleri bir, iki ve üç gizli katman kullanılarak tahmin edilecektir. Tahmin edilirken farklı gizli nöron sayıları ve aktivasyon fonksiyon kombinasyonları kullanılarak gizli katman sayısı arttıkça tahminleme doğruluklarına ve tahminleme sürelerine etkileri incelenecektir. Bu sayede bir, iki ve üç gizli katmanlı yapıda gizli katmanlarda ve çıktı katmanında kullanılacak en uygun aktivasyon fonksiyonu kombinasyonu ve gizli katmanlar için en uygun gizli nöron sayıları belirlenecektir. Ek olarak tahmin edilen düşük çevrimli yorulma parametreleri ve geçiş yorulma ömürlerinin deneysel parametre değerleri ile tahminlenen parametre değerleri birbirleriyle karşılaştırılacaktır. Ayrıca bir, iki ve üç gizli katman kullanımının performans, ortalama kare hatası, regresyon, tahminleme süresi ve yapısal karmaşıklık gibi farklı kriterler göz önünde bulundurularak düşük çevrimli yorulma parametreleri ve geçiş yorulma ömürleri tahmin edilirken farklı gizli katman sayılarının birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları incelenecektir.

Tüm testlerde MATLAB 2022a yazılımı kullanılmıştır. MATLAB yazılımı içerisinde barındırdığı hazır algoritmalar, basit arayüzü, kolay özelleştirilebilme

seçenekleri, işlemci ve bellek tüketiminin optimize edilmiş olması ve uzun yıllardır tahminleme problemlerinin rahatlıkla yapılabilmesi nedeniyle tercih edilmiştir. Tüm testler dört çekirdekli i3-1115G4 3.00 GHz işlemci, 8 GB bellek, 3500-2500 okuma/yazma hızına sahip NVMe M.2 SSD ve Windows 11 işletim sisteminde yapılmıştır.

## 5.1 Model 1'in Uygulanışı

Yüksek dayanımlı çeliklerin, düşük çevrimli yorulma parametrelerinin ve yorulma ömürlerinin tahmin edilmesinde epok sayısı 1'den 1500'e kadar 100 aralık ile arttırılacak şekilde belirlenmiştir. Eğitim hedefi  $1e-6$  olacak şekilde belirlenmiştir.

Girdi parametreleri ve çıktı parametrelerinin büyüklükleri birbirlerinden farklı olmaktadır. Bir parametre değeri  $210 \times 10^9$  büyüklüğündeyken diğer parametre 0.05 değerlerinde olabilmektedir. Hesaplamaların hızlı ve kolay olması için normalizasyon işlemi yapılmalıdır. Normalizasyon işleminde tüm parametreler belirli bir skalada normalize edilmekte ve sonrasında tersine normalize edilerek çıktı değerlerinin gerçek değerleri elde edilmektedir. Normalizasyon işlemi MATLAB yazılımının kendi içerisinde barındırdığı "mapminmax" fonksiyonu ile yapılmıştır ve Denklem 5.49 ile hesaplanmaktadır. Veriler "mapminmax" fonksiyonu ile  $[-1,1]$  değerleri arasında değişmektedir.

$$Q' = 2 \left[ \frac{(Q - Q_{\min})}{(Q_{\max} - Q_{\min})} \right] - 1 \quad (5.49)$$

Denklemde  $Q'$  normalize edilmiş değeri,  $Q$  gerçek değeri,  $Q_{\min}$  minimum değeri ve  $Q_{\max}$  maksimum değeri ifade etmektedir.

Hata kriteri olarak ortalama kare hatası (MSE) kullanılmıştır ve Denklem 5.50 ile hesaplanmaktadır. MSE matematiksel işlem kolaylığı sunduğu ve MATLAB kütüphanesinde YSA kullanılırken en yaygın kullanılan hata kriteri olduğundan tercih edilmiştir.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - o_i)^2 \quad (5.50)$$

Denkleimde  $d_i$  gerçek değer,  $O_i$  tahmin edilen değer ve  $n$  ise veri setinin büyüklüğüdür.

Aktivasyon fonksiyonu olarak “tansig”, “logsig”, “purelin” ve “hardlim” kullanılmıştır.

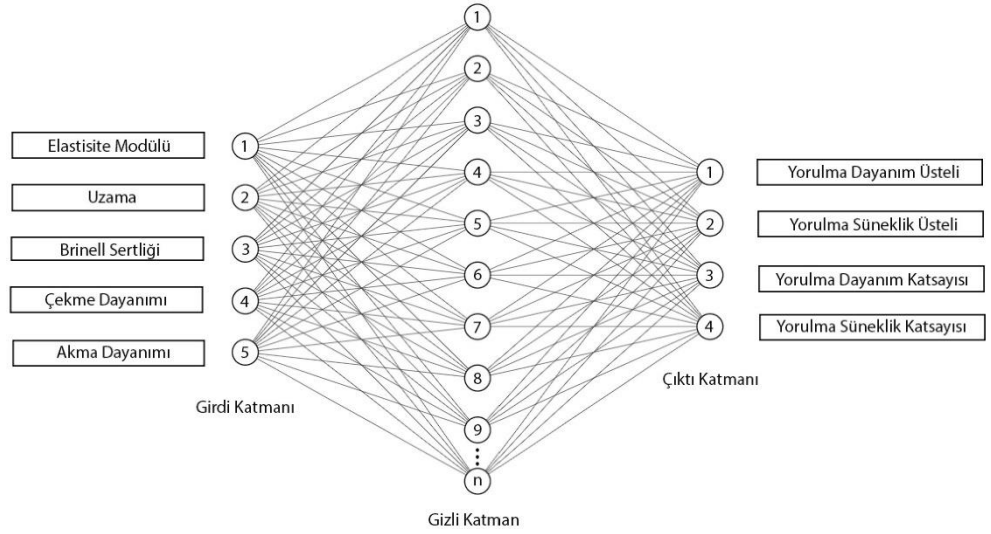
Öğrenme fonksiyonu olarak “trainlm”, “trainscg”, “traingdx” ve “trainbr” kullanılmıştır.

Verilerin bölünmesinde “dividerand” fonksiyonu kullanılarak %90 öğrenme ve %10 test etme olarak ayrılmıştır. Veri seti 38 adet yüksek dayanımlı çelikten oluştuğu için test etme kısmının oranı düşük tutulmuştur. Yüksek dayanımlı çeliklerin basit çekme deneylerinden elde edilen girdi parametreleri ve düşük çevrimli yorulma parametreleri EK A’da verilmiştir.

Yüksek dayanımlı çelikler mühendislik malzemeleri olarak gelişmiş özelliklerinden dolayı geniş çapta kullanım alanına sahiptir. Yüksek dayanımlı çelikler adından da anlaşılacağı gibi yüksek dayanıma ve sertliğe sahiptir. Yüksek dayanım seviyelerinde, düşük sıcaklık tokluğuna ve çatlak yayılmasına karşı dirence sahiptir. Ayrıca iyi derecede şekil verilebilme ve kaynak edilebilme özelliklerine sahiptir, (Sabelkin ve diğ. 2018). Bu nedenle literatürde yüksek dayanımlı çeliklerin düşük çevrimli yorulma parametrelerinin ve yorulma ömürlerinin eksikliğinden dolayı bu parametrelerin tahmin edilmesi büyük önem arz etmektedir. Tez çalışması kapsamında da görülebileceği gibi literatürde yüksek dayanımlı çeliklere ait 38 farklı veriye erişilebilmiştir. Bu verilerden elbette daha fazlası literatürde bulunmaktadır fakat yorulma parametreleri tahmin edilirken kullanılan girdi ve çıktı parametrelerinin de hepsinde mevcut olması gerekmektedir. Bu yüzden parametreler tahmin edilirken literatürde yaygın bir şekilde bulunan ve basit çekme deneylerinden rahatlıkla elde edilebilecek parametreler, girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Bölüm 2.2.3’te de anlatıldığı gibi, malzemelerin yorulma testlerinin yapılması için gerekli numune sayısının fazla olması, yorulma testlerinin uzun süreler alması, bilgi birikimi gerektirmesi ve maliyetli bir işlem olması nedeniyle günümüzde artık bu parametrelerin makine öğrenmesi yöntemi ile tahmin edilmesi önemli hale gelmiştir. Ayrıca yapılacak işin erken aşamalarında malzeme seçimi yapılırken bu tür çeliklere

ait yorulma parametrelerinin bilinmesi, doğru malzeme seçiminde etkili rol oynarken planlama aşamasının da kısalmasını sağlamaktadır.

Girdi parametreleri olarak elastisite modülü (E), uzama, Brinell sertliği (BHN), çekme dayanımı ( $\sigma_u$ ) ve akma dayanımı ( $\sigma_y$ ) kullanılmıştır. Çıktı parametreleri olarak yorulma dayanım üsteli (b), yorulma süneklik üsteli (c), yorulma dayanım katsayısı ( $\sigma'_f$ ) ve yorulma süneklik katsayısı ( $\epsilon'_f$ ) kullanılmıştır. Tek gizli katmanlı yapay sinir ağlarının yapısı Şekil 5.11'de gösterilmiştir.



Şekil 5.11: Tek gizli katmanlı yapay sinir ağlarının yapısı

Yüksek dayanımlı çeliklerin yorulma ömürleri, tahmin edilen çıktı parametrelerinin elde edilmesiyle ( $\sigma'_f$  te yerine koyularak hesaplanmıştır. Gerilme genliği %0,4-1,5 aralığında seçilmiş olup 0,1 artışla artmaktadır. Düşük çevrimli yorulma ve yorulma parametreleri incelendiği için gerilme genliği değeri azaldıkça yorulma ömrü artmaktadır. Bu nedenle %0,4'ten aşağısındaki gerilme genlikleri dikkate alınmamıştır.

Yapay sinir ağlarının rastgeleliğini engellemek için replikasyon kullanmak önemlidir. Algoritma her çalıştırma sonucunda aynı parametreler bile olsa içerisinde bulundurduğu rastgelelik sonucunda her seferinde farklı sonuçlar vermektedir. Algoritma rastgele bir şekilde ilk çalıştırılıştta en iyi sonucu da verebilir en kötü sonucu da. Bu rastgeleliği en aza indirip daha tutarlı ve güvenilir sonuçlar elde etmek için replikasyon yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada her bir kombinasyon için 100 adet

replikasyon yapılmıştır. Replikasyon sonuçlarının ortalaması alındığında, mevcut ağ yapısının ortalama olarak ne kadar tutarlı ve iyi sonuçlar verdiği görülebilmektedir.

Gizli nöron sayısı arttıkça yapay sinir ağlarının karmaşıklığı ve işlem yükü artarken tahminleme doğruluğunda da artış görülebilmektedir. Bu nedenle gizli nöron sayısı 1 ile 100 arasında birer birer artacak şekilde belirlenmiştir ve tek gizli katmanlı yapay sinir ağları yapısı kullanılmıştır.

## 5.2 Model 2'nin Uygulanışı

Model 2'de çeşitli çeliklerin düşük çevrimli yorulma parametrelerinin ve geçiş yorulma ömürlerinin tahmin edilmesinde kullanılacak epok sayısı ve öğrenme fonksiyonu, Model 1'de yapılan testler sonucunda en iyi sonucu veren parametreye göre belirlenecektir. Aktivasyon fonksiyonunda ise en kötü sonuç veren parametre hesaplamalar dışında tutulacaktır.

Verilerin normalize edilmesinde “mapminmax” fonksiyonu kullanılmıştır. Hata kriteri olarak “MSE” kullanılmıştır. Verilerin bölünmesinde “dividerand” fonksiyonu kullanılmıştır ve çeşitli çeliklere ait veri setinin büyüklüğü 73 olduğundan %75 öğrenme ve %25 test etme olarak ayrılmıştır. Çeşitli çeliklerin basit çekme deneylerinden elde edilen girdi parametreleri ve düşük çevrimli yorulma parametreleri EK B'de verilmiştir ve Genel (2004)'ün çalışmasında kullanılan veri setidir.

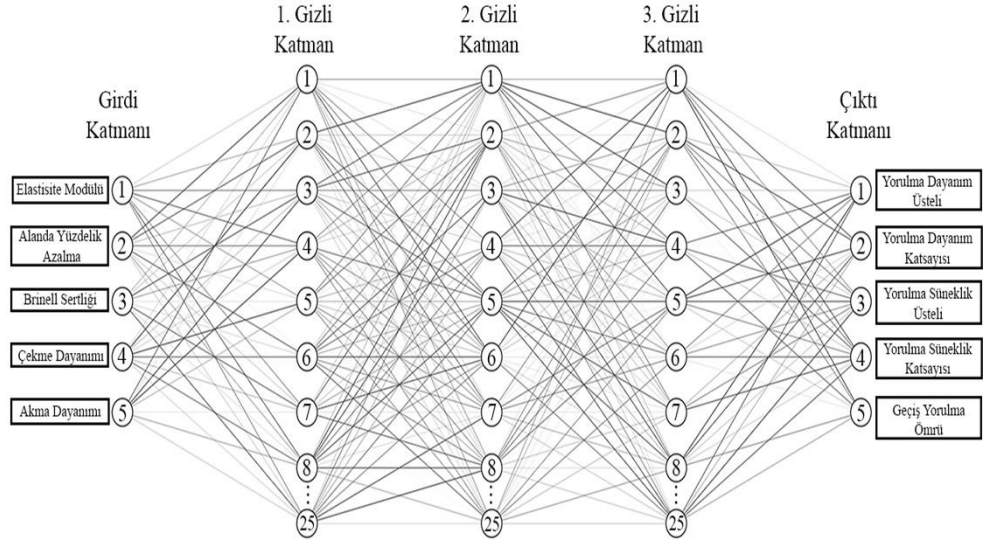
Girdi parametresi olarak elastisite modülü (E), kopma uzaması (%RA), Brinell sertliği (BHN), çekme dayanımı ( $\sigma_u$ ) ve akma dayanımı ( $\sigma_y$ ) kullanılmıştır. Çıktı parametreleri olarak yorulma dayanım üsteli (b), yorulma süneklik üsteli (c), yorulma dayanım katsayısı ( $\sigma'_f$ ), yorulma süneklik katsayısı ( $\epsilon'_f$ ) ve geçiş yorulma ömrü ( $N_t$ ) kullanılmıştır.

Geçiş yorulma ömürleri Denklem 5.51 ile hesaplanmıştır.

$$(2N_t) = \left( \frac{\epsilon'_f E}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{(b-c)}} \quad (5.51)$$



Gizli nöron sayısı Model 1’de elde edilecek sonuçlara göre belirlenecektir. Gizli katman sayısı ise 1, 2 ve 3 olacak şekilde belirlenmiştir. Çok katmanlı yapay sinir ağlarının yapısı Şekil 5.12’de gösterilmiştir.



Şekil 5.12: Çok gizli katmanlı yapay sinir ağlarının yapısı

## 6. BULGULAR

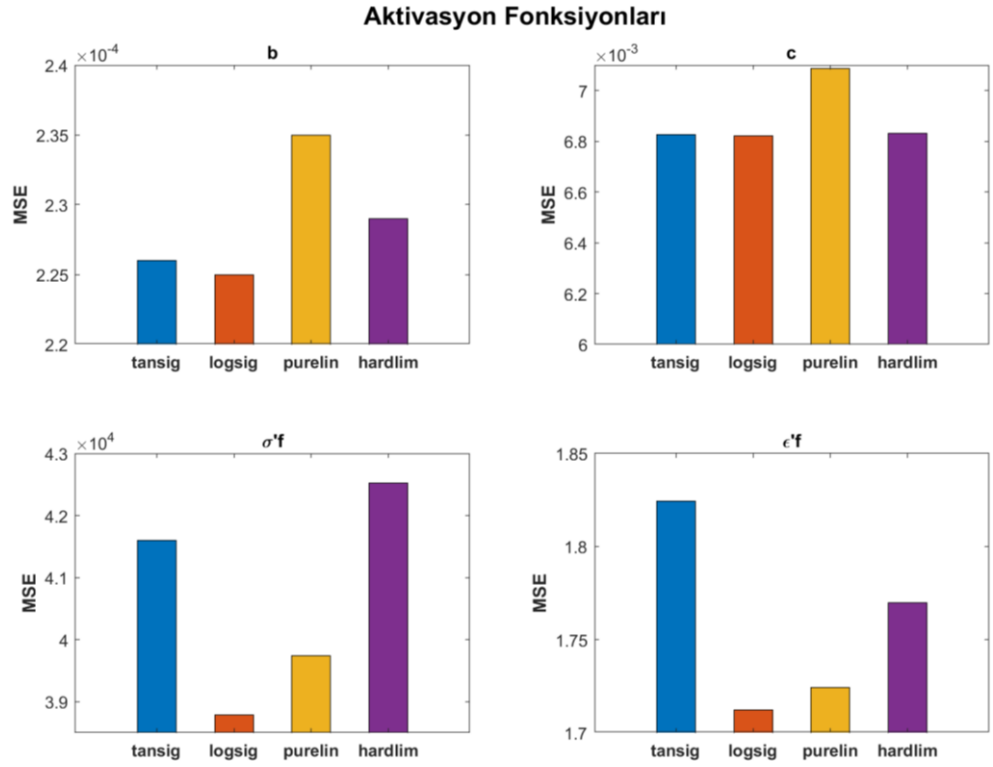
### 6.1 Model 1

#### 6.1.1 Aktivasyon Fonksiyonlarının Belirlenmesi

Aktivasyon fonksiyonu yapay sinir ağı yapısında bulunan en önemli özelliklerden birisidir. Aktivasyon fonksiyonu, gizli nöronların aktifleştirilip aktifleştirilmeyeceğinin kararını vermektedir. Girdilerin ağırlıkla çarpılmış toplamlarının gizli katmanda bias değeri eklenerek ne şekilde bir çıktı değeri elde edileceğini belirlemektedir, (Agatonovic-Kustrin ve Beresford 2000; Sharma ve diğ. 2017). Aktivasyon fonksiyonları basit olarak doğrusal ve doğrusal olmayan olarak ikiye ayrılmaktadır. Çoğu aktivasyon fonksiyonu, ağda çıktı katmanına doğrusal olmayan özellik kazandırmak için kullanılmaktadır. Doğrusal olmama durumu öğrenmeyi ve kompleks problemleri çözmeyi kolaylaştırmaktadır. Bu kısımda denenecek aktivasyon fonksiyonları; “tansig”, “logsig”, “purelin” ve “hardlim” olarak belirlenmiştir.

Yapılan testlerde dört farklı aktivasyon fonksiyonu 1 ile 100 gizli nöron aralığında, “trainlm” öğrenme fonksiyonu kullanılarak ve 100 replikasyon olacak şekilde çalıştırılarak ortalama kare hataları (MSE) elde edilmiştir. Çıktı parametrelerinin tahmin edilmesinde kullanılan aktivasyon fonksiyonlarının en düşük ortalama kare hatasına sahip durumları Şekil 6.13’de gösterildiği gibi birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

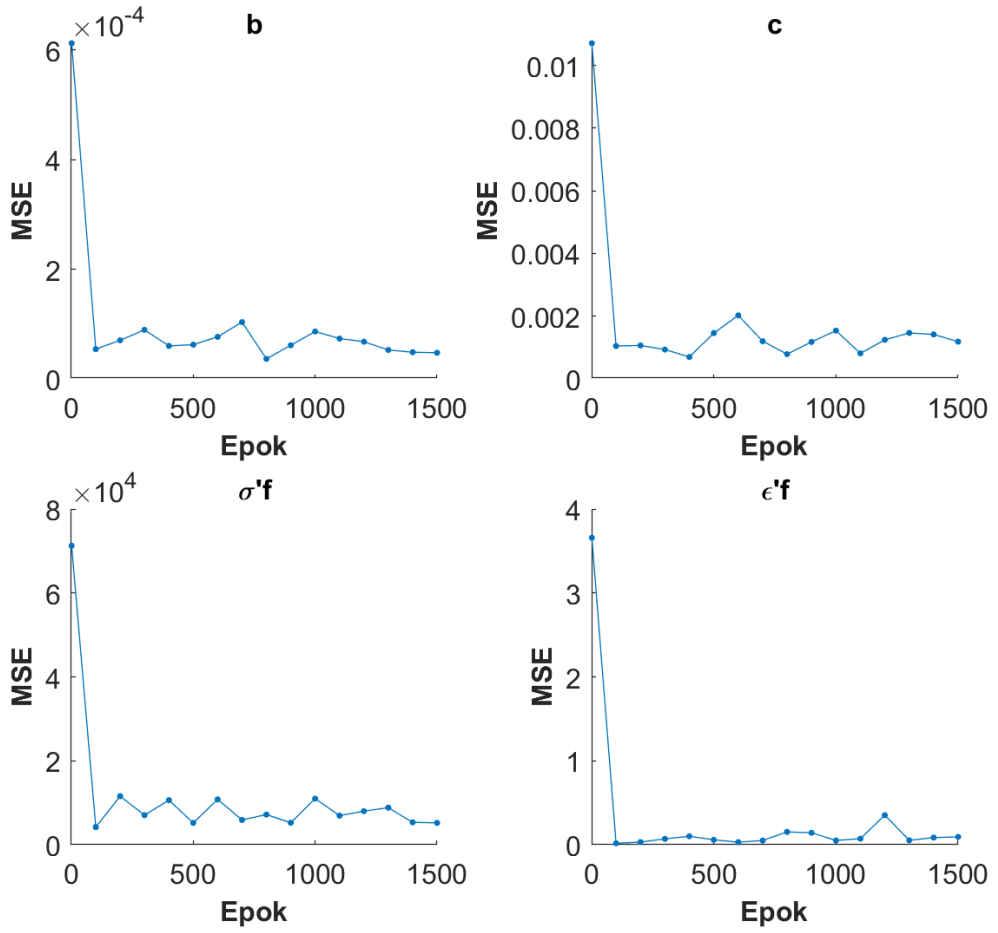
Elde edilen sonuçlara göre en iyi sonuç veren (en düşük MSE) aktivasyon fonksiyonu lojistik sigmoid (logsig) olurken, en kötü sonuç veren (en yüksek MSE) aktivasyon fonksiyonu ise hard limit (hardlim) olmuştur. Aynı zamanda Sibi ve diğ. (2013), çalışmalarında sigmoid fonksiyonunun en çok kullanılan aktivasyon fonksiyonu olduğunu belirtmişlerdir.



**Şekil 6.13:** Tahmin parametrelerinde aktivasyon fonksiyonlarının ortalama kare hatalarının karşılaştırılması

### 6.1.2 Optimum Epok Sayısının Belirlenmesi

Epok, yapay sinir ağlarında kullanılan bir hiper parametredir. Kısaca bir döngü için tüm öğrenme verileriyle yapay sinir ağının eğitilmesidir. Epok sayısının artırılması ile tahminleme süresi ve bellek ihtiyacı artarken, tahminleme sonuçları nispeten artabilmektedir. Çok düşük sayıda epok kullanımı ise çok kötü sonuçlara sebep olmaktadır, (Brownlee 2018). Bu nedenle epok sayısının doğru seçilmesi, tahminleme yaparken performans açısından çok önemlidir. Bu aşamada Şekil 6.14'te görüldüğü gibi epok sayısı dört farklı çıktı parametresi için 1'den 1500'e kadar 100'er artacak şekilde ortalama kare hatalarına göre test edilmiştir.



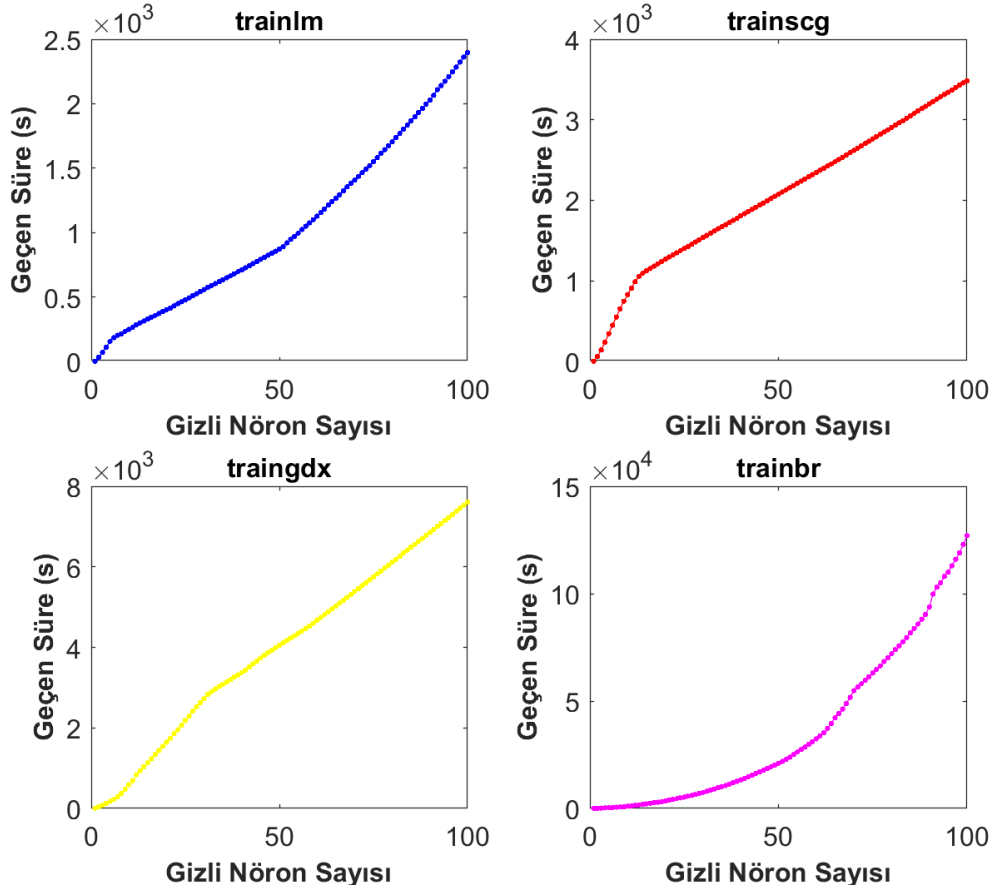
**Şekil 6.14:** Tahmin parametrelerinde farklı epok sayılarının ortalama kare hatalarına göre karşılaştırılması

Şekil 6.14'te de görüleceği gibi tüm tahminleme parametreleri dikkate alındığında en düşük ortalama kare hatası veren ve en optimum epok sayısı 100 olmuştur. Ayrıca epok sayısını arttırmak, performansı önemli ölçüde etkilememekle beraber tahminleme süresini de arttırmıştır.

### 6.1.3 Tahminleme Sürelerinin Karşılaştırılması

Tahminleme süresi, algoritma çalıştırıldığında sonuç elde etmek için geçen sürenin bir göstergesidir. Bazı algoritmalar çok uzun süreler boyunca çalışabilmektedir. Algoritmayı daha iyi ve hızlı olacak şekilde optimize etmek için tahminleme süresinin azaltılması gerekmektedir. Bu yüzden tahminleme süresi, parametreleri tahmin ederken performans, maliyet ve zaman bakımından en önemli kriterlerden biridir. Bu kısmın amacı ise geçen süreyi olabildiğince azaltmaktır.

Parametreleri farklı öğrenme fonksiyonları ile tahmin etmek, Şekil 6.15'te görüldüğü gibi geçen süreyi değiştirmektedir. Kullanılan öğrenme fonksiyonları; “trainlm”, “trainscg”, “traingdx” ve “trainbr” olarak belirlenmiştir. Her öğrenme fonksiyonu 100 farklı gizli nöron sayısı ve 100 replikasyon yapılarak çalıştırılmıştır. Geçen süre, MATLAB yazılımının “cputime” komutu ile hesaplanmıştır.



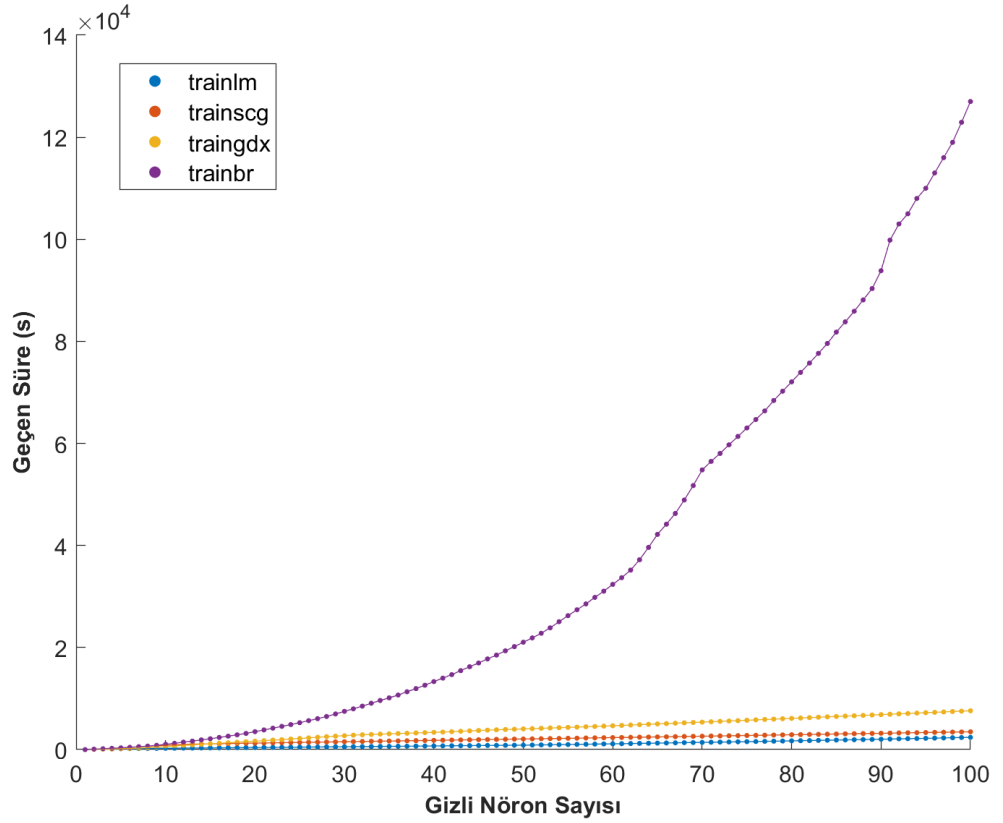
Şekil 6.15: Farklı öğrenme fonksiyonlarının geçen süreye etkilerinin karşılaştırılması

Yapılan testlere göre “trainbr” büyük farkla en yavaş ve zaman alan öğrenme fonksiyonu olmuştur. En hızlı öğrenme fonksiyonu ise birçok araştırmacının da (Men ve diğ. 2007; Sharma ve Kang 2013; Zhang ve diğ. 2003; Wang ve diğ. 2019) test edip gösterdiği gibi “trainlm” olmuştur.

#### 6.1.4 Öğrenme Fonksiyonlarının Karşılaştırılması ve Gizli Nöron Sayısının Belirlenmesi

Gizli nöron sayılarının belirlenmesi oldukça zor bir durumdur. Literatürde yapay sinir ağları ile ilgili birçok çalışma yapılmış olsa da hala gizli nöron sayısı ile regresyon, hata oranı ve performans arasında doğrudan bir ilişki bulunamamıştır. Riadi ve Muhammad (2017), çalışmalarında gizli nöron sayısını arttırmanın ortalama kare hatasına (MSE) önemli bir ölçüde etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. Sekeroglu ve Dimililer (2020), çalışmalarında 14 adet test yapmış ve gizli nöron sayısı ile yapay sinir ağlarının genelleme yeteneği arasında lineer bir ilişki olmadığı kanısına varmışlardır. Ek olarak gizli nöron sayısı ile genelleme yeteneğinin iyileşmesi arasında direkt bir ilişkinin de bulunmadığını vurgulamışlardır. Ke ve Liu (2008), farklı gizli nöron sayıları ve gizli katman sayıları ile testler yapmışlardır. Sonuç olarak gizli nöron sayısının bir üst sınırının bulunmadığına ve gizli nöron sayısının artmasının tahminleme süresine ve sistemin bellek tüketimine olumsuz etkileri olduğunu gözlemlerken, gizli nöron sayısı ve hata oranı arasında hiçbir teorik dayanak olmadığını belirtmişlerdir. Gizli nöron sayısı çok az olduğunda, algoritmanın öğrenme kapasitesi ciddi oranda azalmaktadır. Gizli nöron sayısı çok fazla olduğunda yapay sinir ağlarının performansı artabilmektedir fakat işlemleri gerçekleştirmek için gereken zaman ve sistem belleği artmaktadır.

Parametrelerin tahmin edilmesinde, öğrenme fonksiyonu çok önemli bir değişkendir. Öğrenme fonksiyonu; tahminleme süresini, tahminleme doğruluğunu ve algoritmanın kararlılığını değiştirmektedir. Bu kısımda “trainbr” öğrenme fonksiyonu, Bölüm 6.1.3’te yapılan testler sonuçlarında tahminlemede geçen sürenin diğer fonksiyonlara göre önemli ölçüde fazla olması nedeniyle sadece bir parametre için test edilecek ve tahminleme doğruluğuna göre dikkate alınıp alınmayacağına karar verilecektir. Diğer aktivasyon fonksiyonları ile geçen süre bazındaki farklılığı daha rahat görebilmek için Şekil 6.16’da da görüleceği gibi dört farklı öğrenme fonksiyonunun geçen süre bazında karşılaştırmaları birleşik bir şekilde verilmiştir.



**Şekil 6.16:** Öğrenme fonksiyonlarına ait geçen sürelerin birbirleriyle karşılaştırılması

Gizli nöron sayılarının 1'den 100'e kadar olan değişiminin tahminleme sonuçlarına etkilerini gözlemlemek ve farklı öğrenme algoritmalarıyla kullanıldığı zaman da tahminleme sonuçlarına olan etkilerini incelemek için yapılan testlerde her bir gizli nöron sayısı için yapılan 100 replikasyon içerisinde en iyi 10 replikasyonun ortalaması alınarak elde edilen sonuçlar Tablo 6.1'de ve her bir gizli nöron için yapılan 100 replikasyon içerisinde elde edilen en iyi tekil sonuçlar ise Tablo 6.2'de verilmiştir. Gizli nöron sayılarındaki değişiklikler, tüm tahminleme parametreleri ( $b$ ,  $c$ ,  $\varepsilon'_f$ ,  $\sigma'_f$ ) ile tüm öğrenme fonksiyonu kombinasyonlarına uygulanmıştır.

**Tablo 6.1:** Öğrenme fonksiyonlarına ait 100 replikasyon içerisinde en iyi 10 replikasyonun ortalama sonuçları

| Tahmin Edilen Parametre | Öğrenme Fonksiyonu | Gizli Nöron | MSE      | MSE Öğrenme | MSE Test Etme | Regresyon | Regresyon Öğrenme | Regresyon Test Etme |
|-------------------------|--------------------|-------------|----------|-------------|---------------|-----------|-------------------|---------------------|
| b                       | trainlm            | 37          | 1,92E-05 | 6,86E-07    | 1,77E-04      | 0,9883    | 0,9996            | 0,9864              |
|                         | trainscg           | 20          | 1,78E-05 | 9,89E-07    | 1,61E-04      | 0,9885    | 0,9994            | 0,9776              |
|                         | traingdx           | 87          | 3,76E-05 | 2,03E-05    | 1,85E-04      | 0,9769    | 0,9884            | 0,9814              |
|                         | trainbr            | 63          | 5,92E-04 | 6,08E-04    | 4,51E-04      | 0,5493    | 0,5535            | 0,9459              |
| c                       | trainlm            | 20          | 5,02E-04 | 9,14E-07    | 4,76E-03      | 0,9907    | 1,0000            | 0,9924              |
|                         | trainscg           | 50          | 3,89E-04 | 3,23E-06    | 3,67E-03      | 0,9927    | 0,9999            | 0,9903              |
|                         | traingdx           | 88          | 5,63E-04 | 3,68E-04    | 2,22E-03      | 0,9887    | 0,9925            | 0,9883              |
| $\sigma'_f$             | trainlm            | 60          | 3,83E+03 | 1,18E-06    | 3,64E+04      | 0,9906    | 1,0000            | 0,9897              |
|                         | trainscg           | 98          | 1,90E+03 | 5,92E-01    | 1,81E+04      | 0,9951    | 1,0000            | 0,9877              |
|                         | traingdx           | 41          | 9,51E+03 | 7,30E+03    | 2,83E+04      | 0,9732    | 0,9792            | 0,9865              |
| $\varepsilon'_f$        | trainlm            | 32          | 1,28E-01 | 8,50E-07    | 1,21E+00      | 0,9883    | 1,0000            | 0,9660              |
|                         | trainscg           | 29          | 1,33E-01 | 1,53E-02    | 1,13E+00      | 0,9866    | 0,9985            | 0,9841              |
|                         | traingdx           | 26          | 2,95E-01 | 5,24E-02    | 2,36E+00      | 0,9734    | 0,9952            | 0,9270              |

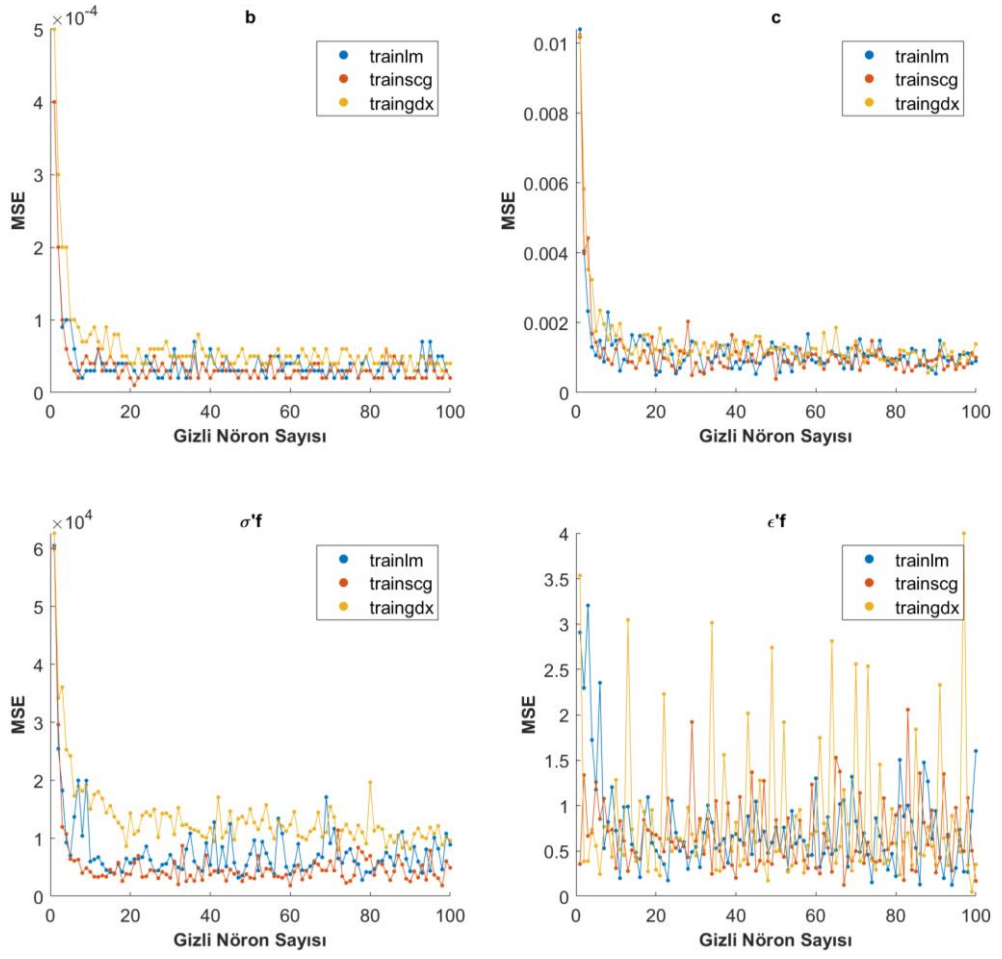
**Tablo 6.2:** Öğrenme fonksiyonlarına ait 100 replikasyon içerisinde elde edilen en iyi tekil sonuçlar

| Tahmin Edilen Parametre | Öğrenme Fonksiyonu | Gizli Nöron | MSE      | MSE Öğrenme | MSE Test Etme | Regresyon | Regresyon Öğrenme | Regresyon Test Etme |
|-------------------------|--------------------|-------------|----------|-------------|---------------|-----------|-------------------|---------------------|
| b                       | trainlm            | 82          | 2,39E-06 | 8,41E-07    | 1,55E-05      | 0,9986    | 0,9995            | 0,9997              |
|                         | trainscg           | 100         | 2,34E-06 | 9,98E-07    | 1,37E-05      | 0,9985    | 0,9994            | 0,9999              |
|                         | traingdx           | 47          | 1,64E-05 | 1,70E-05    | 1,10E-05      | 0,9896    | 0,9904            | 0,9969              |
|                         | trainbr            | 57          | 3,77E-04 | 1,90E-04    | 1,97E-03      | 0,7205    | 0,8634            | 0,9791              |
| c                       | trainlm            | 25          | 2,64E-05 | 6,82E-07    | 2,45E-04      | 0,9995    | 1,0000            | 0,9997              |
|                         | trainscg           | 77          | 1,75E-05 | 9,76E-07    | 1,58E-04      | 0,9996    | 1,0000            | 0,9990              |
|                         | traingdx           | 88          | 3,04E-04 | 1,86E-04    | 1,30E-03      | 0,9941    | 0,9966            | 0,9996              |
| $\sigma'_f$             | trainlm            | 82          | 4,66E+02 | 1,26E-06    | 4,43E+03      | 0,9988    | 1,0000            | 0,9990              |
|                         | trainscg           | 49          | 2,65E+02 | 2,39E-01    | 2,51E+03      | 0,9993    | 1,0000            | 0,9997              |
|                         | traingdx           | 62          | 3,66E+03 | 3,68E+03    | 3,47E+03      | 0,9903    | 0,9907            | 0,9982              |
| $\varepsilon'_f$        | trainlm            | 24          | 5,44E-03 | 9,87E-07    | 5,17E-02      | 0,9996    | 1,0000            | 1,0000              |
|                         | trainscg           | 15          | 5,28E-03 | 1,27E-04    | 4,90E-02      | 0,9994    | 1,0000            | 0,9994              |
|                         | traingdx           | 21          | 2,18E-02 | 2,28E-02    | 1,35E-02      | 0,9977    | 0,9979            | 0,9970              |

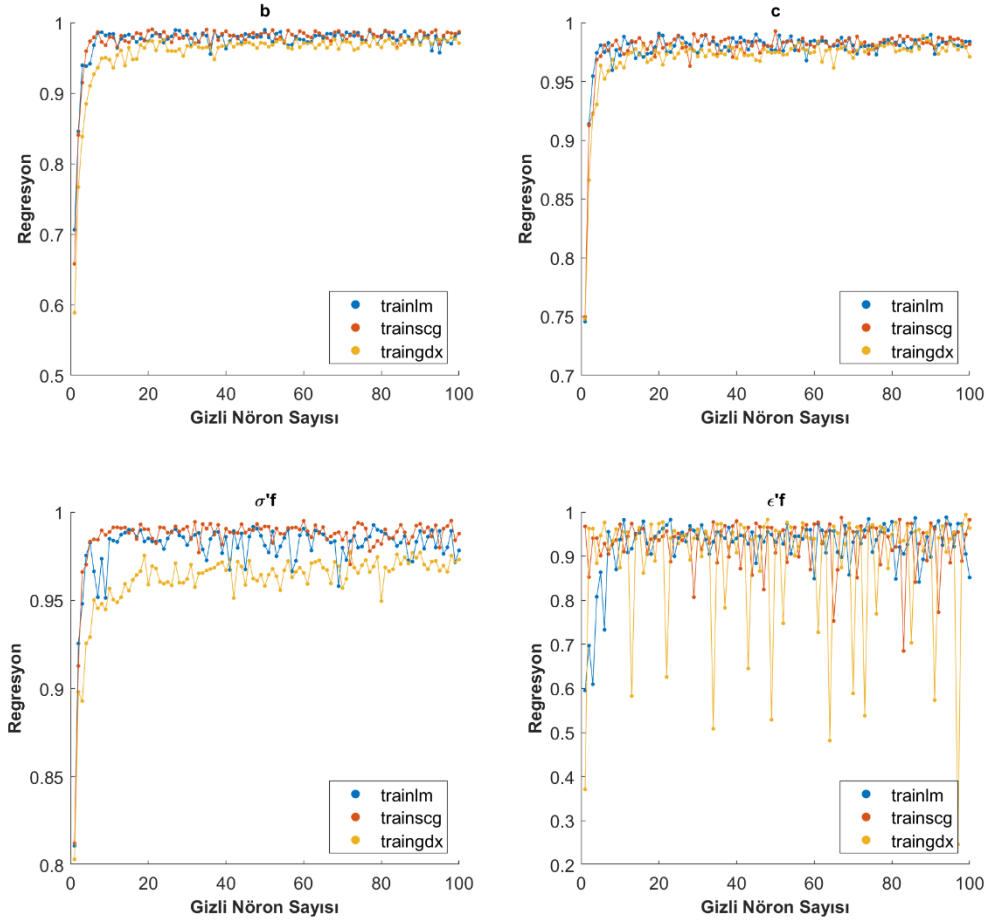
Tablo 6.1 ve Tablo 6.2’de yorulma süneklik üstelinin tahmin edilmesinde uygulanan “trainbr” öğrenme fonksiyonu, diğer öğrenme fonksiyonlarına kıyasla ciddi ölçüde kötü sonuçlar vermiştir. Bu nedenle diğer parametrelerin tahmin edilmesinde “trainbr” öğrenme fonksiyonu dikkate alınmamıştır. Düşük çevrimli yorulma parametreleri elde edilen ortalama regresyon değerlerine bakıldığında en az %98,83, tekil regresyon değerlerine bakıldığında ise en az %99,86 oranında tahmin edilmiştir.

Ayrıca her bir tahminleme parametresi için yapılan test sonuçlarının ortalama kare hataları bazında karşılaştırılmaları Şekil 6.17’de verilirken, regresyon değerleri bazında karşılaştırılmaları ise Şekil 6.18’de verilmiştir. Tüm sonuçlar, her gizli nöron sayısı için 100 replikasyonun ortalama sonuçlarına göre elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ortalama kare hataları ve regresyon değerleri bazında karşılaştırılmıştır.





**Şekil 6.17:** Öğrenme fonksiyonlarının farklı gizli nöron sayılarına ait ortalama kare hatalarının karşılaştırılması



**Şekil 6.18:** Öğrenme fonksiyonlarının farklı gizli nöron sayılarına ait regresyon değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.17 ve Şekil 6.18'den de görülebileceği gibi “traingdx” öğrenme fonksiyonu, yorulma süneklik katsayısını ve yorulma dayanım katsayısını tahmin etmede oldukça kötü sonuçlar vermiştir. Ayrıca önce de bahsedildiği gibi Levenberg-Marquardt “trainlm” öğrenme fonksiyonu içlerinde en hızlı, kararlı ve tahminleme doğruluğu yüksek öğrenme fonksiyonu olduğu gözlemlenmiştir. Öğrenme fonksiyonlarının kendi aralarında elde edilen ortalama kare hataları ve regresyon değerlerine göre sıralaması yapılacak olursa, en iyi öğrenme fonksiyonu “trainlm”, ikincisi “trainscg”, üçüncüsü “traingdx” ve en kötüsü ise “trainbr” olmuştur.

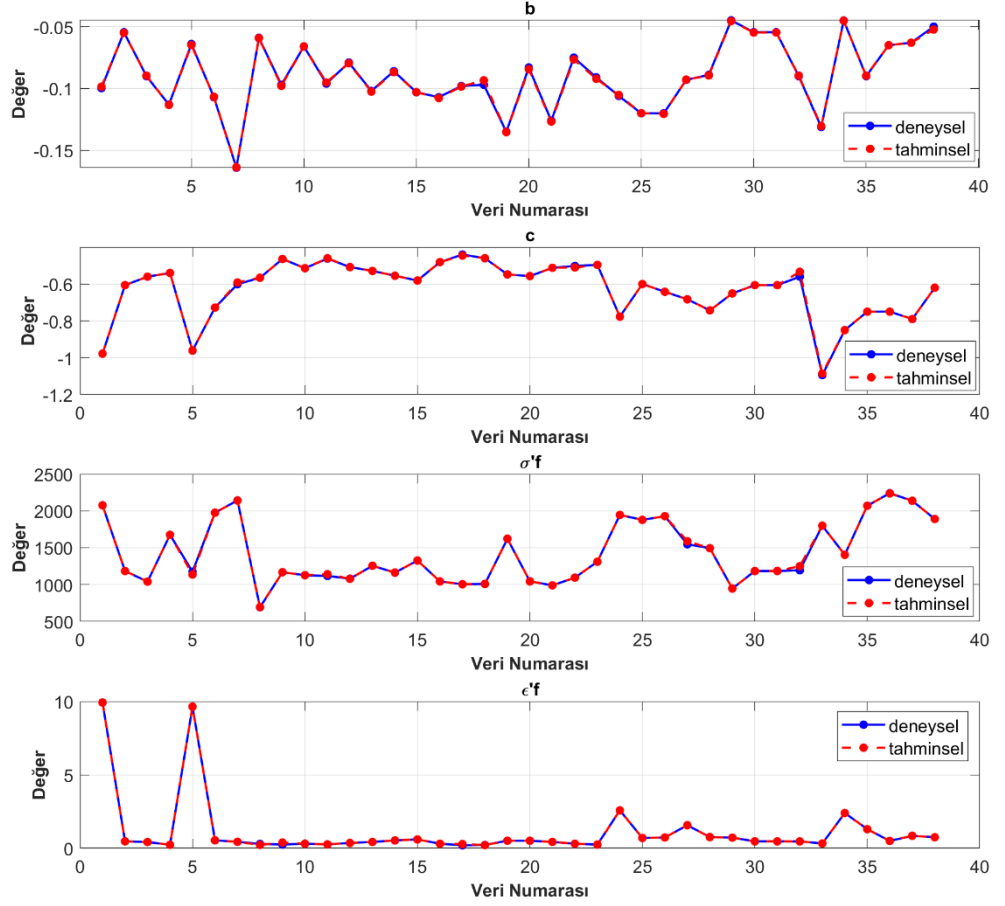
Yapılan deneysel sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, gizli nöron sayısını arttırmanın tahminleme sonuçlarını iyileştirdiği söylenilebilir fakat daha fazla zaman almakla beraber daha çok bellek tüketimine neden olmaktadır. Gizli nöron sayısını çok yüksek sayılarda seçmek performansı önemli ölçüde iyileştirmediği için mantıklı değildir. Bu yüzden tek gizli katmanlı yapay sinir ağları ile tahminleme yaparken

50'den küçük sayılarda gizli nöron sayısı seçmek daha mantıklı olmaktadır. Aynı zamanda gizli nöron sayısını 5'ten daha az sayılarda seçmek ise tercih edilen bir durum olmamakla beraber performansı ciddi derecede düşürmektedir ve yetersiz kalmaktadır.

Şekil 6.17 ve Şekil 6.18'de de görüldüğü gibi regresyon ve ortalama kare hataları değerleri beş gizli nöron sayısından sonra önemli ölçüde değişmemektedir. Bu nedenle tek gizli katmanlı yapay sinir ağlarında en optimum gizli nöron sayısının 5-20 aralığında seçilmesinin mantıklı olduğu söylenilebilmektedir. Tahminleme parametreleri arasında "traingdx" öğrenme fonksiyonu kullanıldığı zaman yalnızca yorulma süneklik katsayısı daha fazla gizli nöron sayısına ihtiyaç duymaktadır. Önerilen gizli nöron sayısı aralığı veri setinin büyüklüğüne ve kullanılan gizli katman sayısına göre çok farklılık göstermektedir. Farklı sayıda gizli katman ve veri seti büyüklüğü kullanıldığı durumlarda ise önerilen gizli nöron sayısı aralığı için Ke ve Liu (2008), çalışmalarında farklı veri seti büyüklüklerinde, farklı gizli katman ve gizli nöron kombinasyonları kullanarak en uygun önerileri tablo halinde sunmuşlardır.

### **6.1.5 Deneysel ve Tahmin Edilen Düşük Çevrimli Yorulma Parametre Değerlerinin Karşılaştırılması**

Parametrelerin tahmin edilmesi kadar, tahmin edilen parametreler ile deneysel yöntemlerle elde edilmiş parametrelerin karşılaştırılması da bir o kadar önemlidir. Bu kısımda tahmin edilen parametre değerlerinin, gerçekteki değerlerine ne kadar yakın olduklarını gözlemleyebilmek için bir karşılaştırma yapılmıştır. Karşılaştırmanın daha anlaşılır ve net bir şekilde görülebilmesi için her tahminleme parametresine ait deneysel ve tahminleme değerleri Şekil 6.19'de verilmiştir.



**Şekil 6.19:** Tüm düşük çevrimli yorulma parametrelerine ait deneysel ve tahminsel parametre değerlerinin karşılaştırılması

Tahminsel veriler ile deneysel veriler tüm düşük çevrimli yorulma parametreleri için birbirlerine son derece yakın çıkmıştır. 38 farklı yüksek dayanımlı çeliğe ait tüm parametre değerlerinin toplam ortalama tahminleme doğruluğu oranı yorulma dayanım üsteli (b) için %99,999, yorulma süneklik üsteli (c) için %99,999, yorulma dayanım katsayısı ( $\sigma'_f$ ) için %99,954 ve yorulma süneklik katsayısı ( $\epsilon'_f$ ) için %99,999 olarak bulunmuştur.

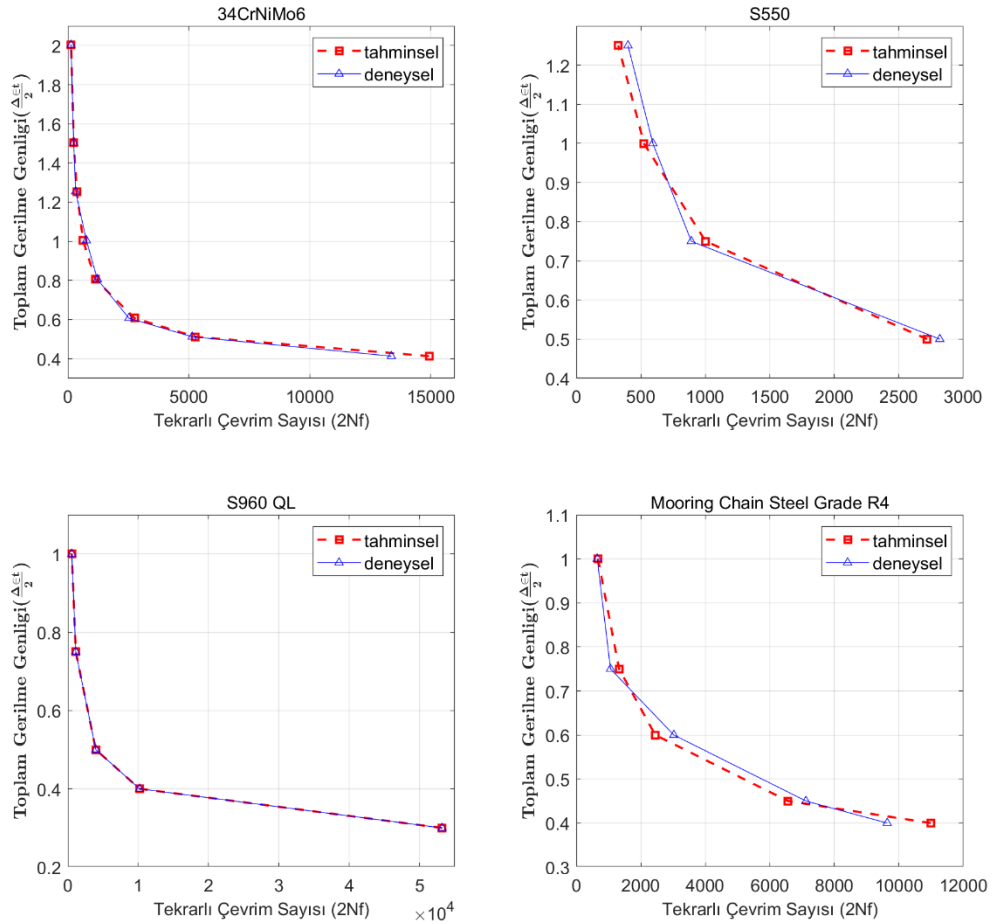
Ayrıca tahmin edilen düşük çevrimli yorulma parametrelerine ait deneysel ve tahminsel değerlerin toplam ortalama hata oranları ve toplam ortalama tahminleme doğrulukları Tablo 6.3'te verilmiştir.

**Tablo 6.3:** Düşük çevrimli yorulma parametrelerine ait deneysel ve tahminsel değerlerin karşılaştırılması

| b                        |         |          | c         |          |          | $\sigma'_f$ |       |          | $\varepsilon'_f$ |         |          |
|--------------------------|---------|----------|-----------|----------|----------|-------------|-------|----------|------------------|---------|----------|
| Tahmin                   | Deney   | Hata (%) | Tahmin    | Deney    | Hata (%) | Tahmin      | Deney | Hata (%) | Tahmin           | Deney   | Hata (%) |
| -0,0985                  | -0,0997 | 1,E-05   | -0,9780   | -0,978   | 1,E-07   | 2075        | 2076  | -6,E-03  | 9,9274           | 9,93    | -3,E-05  |
| -0,0549                  | -0,0545 | -4,E-06  | -0,6059   | -0,6059  | -2,E-07  | 1184        | 1184  | -1,E-03  | 0,46983          | 0,4697  | 1,E-06   |
| -0,0895                  | -0,09   | 5,E-06   | -0,5600   | -0,56    | -1,E-07  | 1040        | 1040  | 2,E-03   | 0,42496          | 0,425   | -4,E-07  |
| -0,1133                  | -0,113  | -3,E-06  | -0,5400   | -0,54    | -3,E-07  | 1675        | 1675  | 2,E-03   | 0,23691          | 0,237   | -9,E-07  |
| -0,0648                  | -0,064  | -8,E-06  | -0,9610   | -0,961   | 3,E-07   | 1136        | 1174  | -4,E-01  | 9,643            | 9,643   | 0,E+00   |
| -0,1067                  | -0,107  | 3,E-06   | -0,7280   | -0,728   | 0,E+00   | 1976        | 1976  | 0,E+00   | 0,54208          | 0,5421  | -2,E-07  |
| -0,1637                  | -0,164  | 4,E-06   | -0,5916   | -0,60078 | 9,E-05   | 2141        | 2142  | -9,E-03  | 0,43857          | 0,43858 | -1,E-07  |
| -0,0593                  | -0,059  | -3,E-06  | -0,5660   | -0,566   | 2,E-07   | 694         | 692   | 2,E-02   | 0,22929          | 0,296   | -7,E-04  |
| -0,0979                  | -0,097  | -9,E-06  | -0,4644   | -0,464   | -4,E-06  | 1168        | 1168  | -4,E-03  | 0,38616          | 0,257   | 1,E-03   |
| -0,0660                  | -0,066  | 4,E-07   | -0,5140   | -0,514   | 0,E+00   | 1127        | 1127  | 1,E-03   | 0,309            | 0,309   | 0,E+00   |
| -0,0951                  | -0,096  | 9,E-06   | -0,4601   | -0,462   | 2,E-05   | 1141        | 1117  | 2,E-01   | 0,264            | 0,264   | 0,E+00   |
| -0,0795                  | -0,079  | -5,E-06  | -0,5082   | -0,508   | -2,E-06  | 1078        | 1080  | -2,E-02  | 0,36102          | 0,361   | 2,E-07   |
| -0,1025                  | -0,102  | -5,E-06  | -0,5289   | -0,529   | 1,E-06   | 1255        | 1255  | 3,E-03   | 0,43             | 0,43    | 0,E+00   |
| -0,0867                  | -0,086  | -7,E-06  | -0,5550   | -0,555   | 4,E-07   | 1163        | 1162  | 1,E-02   | 0,53396          | 0,534   | -4,E-07  |
| -0,1029                  | -0,103  | 1,E-06   | -0,5811   | -0,581   | -9,E-07  | 1327        | 1326  | 6,E-03   | 0,60194          | 0,602   | -6,E-07  |
| -0,1077                  | -0,107  | -6,E-06  | -0,4809   | -0,481   | 6,E-07   | 1043        | 1043  | -1,E-03  | 0,30902          | 0,309   | 2,E-07   |
| -0,0984                  | -0,098  | -4,E-06  | -0,4455   | -0,44    | -5,E-05  | 1004        | 1004  | 2,E-03   | 0,28557          | 0,202   | 8,E-04   |
| -0,0934                  | -0,097  | 4,E-05   | -0,4597   | -0,46    | 3,E-06   | 1009        | 1009  | -3,E-03  | 0,21513          | 0,225   | -1,E-04  |
| -0,1353                  | -0,135  | -3,E-06  | -0,5481   | -0,548   | -8,E-07  | 1622        | 1622  | 2,E-03   | 0,51497          | 0,515   | -3,E-07  |
| -0,0843                  | -0,083  | -1,E-05  | -0,5570   | -0,557   | 3,E-07   | 1044        | 1044  | -5,E-03  | 0,51295          | 0,513   | -5,E-07  |
| -0,1267                  | -0,126  | -7,E-06  | -0,5119   | -0,512   | 1,E-06   | 989         | 989   | 2,E-03   | 0,43299          | 0,433   | -1,E-07  |
| -0,0765                  | -0,075  | -2,E-05  | -0,5102   | -0,502   | -8,E-05  | 1094        | 1094  | 4,E-03   | 0,30904          | 0,309   | 4,E-07   |
| -0,0921                  | -0,091  | -1,E-05  | -0,4960   | -0,496   | -1,E-07  | 1310        | 1310  | -1,E-03  | 0,25008          | 0,25    | 8,E-07   |
| -0,1052                  | -0,106  | 8,E-06   | -0,7770   | -0,777   | -4,E-07  | 1945        | 1945  | 0,E+00   | 2,5805           | 2,58    | 5,E-06   |
| -0,1199                  | -0,12   | 1,E-06   | -0,6000   | -0,6     | 1,E-07   | 1878        | 1878  | 0,E+00   | 0,70003          | 0,7     | 3,E-07   |
| -0,1205                  | -0,12   | -5,E-06  | -0,6420   | -0,642   | -1,E-07  | 1928        | 1928  | -1,E-03  | 0,73411          | 0,734   | 1,E-06   |
| -0,0928                  | -0,093  | 2,E-06   | -0,6830   | -0,683   | -1,E-07  | 1589        | 1547  | 4,E-01   | 1,5699           | 1,57    | -1,E-06  |
| -0,0895                  | -0,089  | -5,E-06  | -0,7430   | -0,743   | 1,E-07   | 1494        | 1494  | -4,E-03  | 0,76101          | 0,761   | 1,E-07   |
| -0,0455                  | -0,0449 | -6,E-06  | -0,6508   | -0,6508  | 0,E+00   | 946         | 946   | 4,E-03   | 0,72503          | 0,725   | 3,E-07   |
| -0,0548                  | -0,0545 | -3,E-06  | -0,6060   | -0,6059  | -5,E-07  | 1183        | 1184  | -5,E-03  | 0,4697           | 0,4697  | 0,E+00   |
| -0,0548                  | -0,0545 | -3,E-06  | -0,6059   | -0,6059  | -2,E-07  | 1185        | 1184  | 8,E-03   | 0,46974          | 0,4697  | 4,E-07   |
| -0,0895                  | -0,09   | 5,E-06   | -0,5335   | -0,56    | 3,E-04   | 1250        | 1194  | 6,E-01   | 0,46693          | 0,467   | -7,E-07  |
| -0,1304                  | -0,1311 | 7,E-06   | -1,0858   | -1,0941  | 8,E-05   | 1799        | 1799  | 3,E-03   | 0,32793          | 0,32784 | 9,E-07   |
| -0,0451                  | -0,045  | -1,E-06  | -0,8500   | -0,85    | 1,E-07   | 1404        | 1404  | -3,E-03  | 2,4002           | 2,4     | 2,E-06   |
| -0,0896                  | -0,09   | 4,E-06   | -0,7501   | -0,75    | -6,E-07  | 2070        | 2070  | 1,E-03   | 1,2998           | 1,3     | -2,E-06  |
| -0,0650                  | -0,065  | 3,E-07   | -0,7501   | -0,75    | -6,E-07  | 2237        | 2240  | -3,E-02  | 0,49991          | 0,5     | -9,E-07  |
| -0,0630                  | -0,063  | 1,E-07   | -0,7901   | -0,79    | -5,E-07  | 2137        | 2137  | 1,E-03   | 0,8497           | 0,85    | -3,E-06  |
| -0,0523                  | -0,05   | -2,E-05  | -0,6200   | -0,62    | -1,E-07  | 1890        | 1890  | 1,E-03   | 0,75025          | 0,75    | 2,E-06   |
| Toplam ortalama hata (%) |         | 6,5E-06  | 1,614E-05 |          | 4,6E-02  |             |       | 7,8E-05  |                  |         |          |
| Tahminleme Doğruluğu (%) |         | 99,999   | 99,999    |          | 99,953   |             |       | 99,999   |                  |         |          |

## 6.1.6 Deneysel ve Tahmin Edilen Yorulma Ömürlerinin Karşılaştırılması

Gerilme genliği, yorulma ömrüne etkisi açısından önemli olmakla birlikte toplam gerilme genliği aralığı %0,4-1,5 arasında belirlenmiştir. Yüksek dayanımlı çeliklere ait deneysel ve tahminsel yorulma ömürleri seçilen gerilme genliği aralığında karşılaştırılmıştır. Ayrıca farklı bir bakış açısı oluşturmak adına çeşitli yazarların (Celin ve Kafexhiu 2021; Karademir ve diğ. 2021; Błacha ve diğ. 2017; Zarandi ve Skallerud 2020) çalışmalarına ait deneysel ve tahminlenen yorulma ömürleri karşılaştırılmıştır. Tahmin edilen yorulma ömrü değerleri, Tablo 6.3'te bulunan parametre değerleri kullanılarak Denklem 2.4 ile bulunmuştur. Farklı çalışmalar ile tahmin edilen yorulma ömürlerinin karşılaştırılmasında, çalışmalarda hangi gerilme genliği oranları kullanılıyorsa o oranlarda tahminleme yapıp elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır ve Şekil 6.20'de verilmiştir.



Şekil 6.20: Yazarların deneysel yorulma ömürleri ile tahminlenen yorulma ömürlerinin farklı YDÇ'ler için karşılaştırılması

34CrNiMo6 için %0,413, 0,512, 0,607, 0,806, 1,004, 1,254, 1,503 ve 2,003 gerilme genliklerinde, S960 QL için %0,3, 0,4, 0,5, 0,75 ve 1 gerilme genliklerinde, S550 için %0,5, 0,75, 1 ve 1,25 gerilme genliklerinde, Mooring chain steel grade R4 için %0,4, 0,45, 0,6, 0,75 ve 1 gerilme genliklerinde, S700 MC için ise %0,397, 0,5, 0,503, 0,554, 0,603, 0,757 ve 0,805 gerilme genliklerinde tahminleme yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar Tablo 6.4'te verilmiştir.

**Tablo 6.4:** Farklı YDÇ'lerin belirlenen gerilme genlikleri altındaki yorulma ömürlerinin deneysel ve tahminsel olarak karşılaştırılması

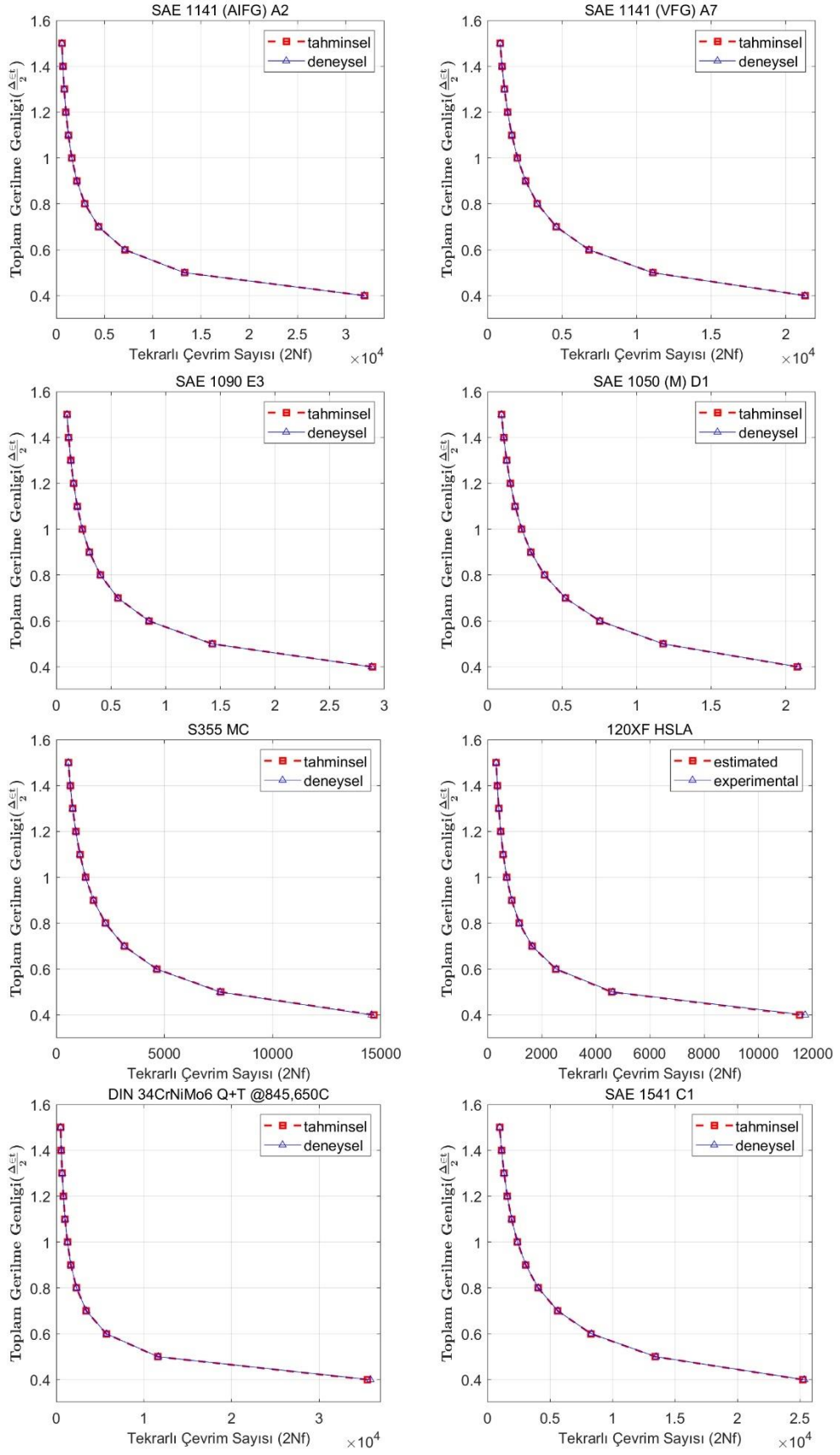
| YDÇ                             | Gerilme Genliği   | Tahminlenen Ömür                  | Deneysel Ömür                     | Hata (%) |
|---------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------|
| 34CrNiMo6                       | 2,003             | 134                               | 131                               | 0,03     |
|                                 | 1,503             | 245                               | 240                               | 0,05     |
|                                 | 1,254             | 368                               | 321                               | 0,47     |
|                                 | 1,004             | 629                               | 767                               | 1,38     |
|                                 | 0,806             | 1132                              | 1219                              | 0,87     |
|                                 | 0,607             | 2754                              | 2523                              | 2,31     |
|                                 | 0,512             | 5275                              | 5140                              | 1,35     |
|                                 | 0,413             | 14939                             | 13378                             | 15,61    |
|                                 | Ortalama Hata (%) | 2,76                              | Ortalama Tahminleme Doğruluğu (%) | 97,24    |
| S960 QL                         | 0,300             | 53207                             | 53203                             | 0,04     |
|                                 | 0,400             | 10197                             | 10195                             | 0,01     |
|                                 | 0,500             | 3974                              | 3974                              | 0,01     |
|                                 | 0,750             | 1122                              | 1122                              | 0,00     |
|                                 | 1,000             | 557                               | 557                               | 0,00     |
|                                 | Ortalama Hata (%) | 0,01                              | Ortalama Tahminleme Doğruluğu (%) | 99,99    |
| S550                            | 0,500             | 2719                              | 2818                              | 0,99     |
|                                 | 0,750             | 1002                              | 891                               | 1,11     |
|                                 | 1,000             | 524                               | 593                               | 0,69     |
|                                 | 1,250             | 325                               | 400                               | 0,75     |
|                                 | Ortalama Hata (%) | 0,88                              | Ortalama Tahminleme Doğruluğu (%) | 99,12    |
| Mooring Chain<br>Steel Grade R4 | 1,000             | 669                               | 646                               | 0,23     |
|                                 | 0,750             | 1324                              | 1058                              | 2,66     |
|                                 | 0,600             | 2446                              | 3022                              | 5,76     |
|                                 | 0,450             | 6563                              | 7119                              | 5,56     |
|                                 | 0,400             | 10990                             | 9640                              | 13,50    |
|                                 | Ortalama Hata (%) | 5,54                              | Ortalama Tahminleme Doğruluğu (%) | 94,46    |
| S700 MC                         | 0,397             | 14627                             | 11188                             | 34,39    |
|                                 | 0,500             | 7364                              | 9252                              | 18,88    |
|                                 | 0,503             | 7255                              | 6510                              | 7,45     |
|                                 | 0,554             | 5768                              | 6884                              | 11,16    |
|                                 | 0,603             | 4801                              | 3900                              | 9,01     |
|                                 | 0,757             | 3109                              | 2800                              | 3,09     |
|                                 | 0,805             | 2795                              | 2160                              | 6,35     |
| Ortalama Hata (%)               | 12,90             | Ortalama Tahminleme Doğruluğu (%) | 87,10                             |          |

Literatürden farklı yazarların çalışmalarına dair elde edilen ve bu kısımda veri setini oluşturan bazı yüksek dayanımlı çeliklerin %0,4-1,5 gerilme genliği aralığında tahmin edilen yorulma ömürleri ile Denklem 2.4 kullanılarak elde edilen yorulma ömürleri Şekil 6.21 ve Tablo 6.5'te karşılaştırılmıştır. Gerilme genliği değeri azaldıkça yorulma ömrü artmaktadır. Bu nedenle düşük gerilme genliklerinde, yorulma ömürlerine ilişkin tahminleme doğruluğu ve hata yüzdeleri artmaktadır.  $5 \times 10^4$ 'ten yüksek yorulma ömürleri, düşük çevrimli yorulma kapsamında değerlendirilemeyeceğinden dolayı %0,4'ten düşük gerilme genlikleri dikkate alınmamıştır.

**Tablo 6.5:** %0,4-1,5 gerilme genliği aralığında yüksek dayanımlı çeliklerin tahminlenen ve deneysel yorulma ömürlerinin karşılaştırılması

| YDÇ                          | Gerilme Genliği    |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |     | Hata (%) |                                   |        |
|------------------------------|--------------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|----------|-----------------------------------|--------|
|                              | 0,4                | 0,5   | 0,6   | 0,7  | 0,8  | 0,9  | 1    | 1,1  | 1,2  | 1,3  | 1,4  | 1,5 |          |                                   |        |
| S355MC                       | 14582              | 7574  | 4638  | 3138 | 2270 | 1722 | 1352 | 1092 | 902  | 758  | 648  | 560 | 1,02     |                                   |        |
| Tahminlenen Yorulma Ömürleri | SAE 1141 (AIFG) A2 | 31912 | 13288 | 7116 | 4392 | 2968 | 2136 | 1608 | 1254 | 1004 | 822  | 686 | 580      | 0,42                              |        |
| SAE 1141 (VFG) A7            | 21286              | 11076 | 6802  | 4618 | 3352 | 2552 | 2012 | 1632 | 1352 | 1140 | 976  | 846 | 0,26     |                                   |        |
| SAE 1541 C1                  | 25362              | 13494 | 8320  | 5630 | 4062 | 3068 | 2402 | 1930 | 1588 | 1328 | 1130 | 972 | 1,26     |                                   |        |
| SAE 1050 (M) D1              | 20852              | 11802 | 7546  | 5224 | 3824 | 2918 | 2298 | 1856 | 1530 | 1282 | 1090 | 938 | 0,76     |                                   |        |
| SAE 1090 E3                  | 28834              | 14248 | 8478  | 5638 | 4034 | 3040 | 2380 | 1918 | 1582 | 1330 | 1136 | 982 | 0,74     |                                   |        |
| 120XF HSLA                   | 11734              | 4632  | 2546  | 1650 | 1178 | 896  | 710  | 582  | 488  | 418  | 364  | 320 | 2,12     |                                   |        |
| DIN 34CrNiMo6 Q+T @845,650   | 35840              | 11634 | 5726  | 3436 | 2310 | 1670 | 1270 | 1004 | 816  | 678  | 574  | 492 | 3,46     |                                   |        |
| S355MC                       | 14684              | 7612  | 4654  | 3146 | 2274 | 1724 | 1354 | 1094 | 904  | 760  | 648  | 560 |          |                                   |        |
| Deneysel Yorulma Ömürleri    | SAE 1141 (AIFG) A2 | 31954 | 13300 | 7120 | 4394 | 2970 | 2136 | 1608 | 1254 | 1004 | 822  | 686 | 580      |                                   |        |
| SAE 1141 (VFG) A7            | 21312              | 11082 | 6802  | 4618 | 3350 | 2550 | 2012 | 1630 | 1350 | 1140 | 976  | 846 |          |                                   |        |
| SAE 1541 C1                  | 25236              | 13440 | 8292  | 5614 | 4050 | 3060 | 2396 | 1926 | 1584 | 1326 | 1128 | 970 |          |                                   |        |
| SAE 1050 (M) D1              | 20776              | 11772 | 7532  | 5218 | 3820 | 2916 | 2296 | 1856 | 1530 | 1282 | 1090 | 938 |          |                                   |        |
| SAE 1090 E3                  | 28908              | 14274 | 8490  | 5646 | 4038 | 3042 | 2382 | 1920 | 1584 | 1330 | 1136 | 982 |          |                                   |        |
| 120XF HSLA                   | 11522              | 4582  | 2528  | 1642 | 1174 | 892  | 708  | 580  | 488  | 418  | 362  | 320 |          |                                   |        |
| DIN 34CrNiMo6 Q+T @845,650   | 35494              | 11574 | 5708  | 3428 | 2306 | 1668 | 1268 | 1002 | 814  | 676  | 572  | 492 |          |                                   |        |
| Ortalama Hata (%)            | 1,255              |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |     |          | Ortalama Tahminleme Doğruluğu (%) | 98,745 |





Şekil 6.21: YDÇ'lerin tahminsel ve deneysel yorulma ömürlerinin karşılaştırılması

Model 1 kapsamında düşük çevrimli yorulma parametreleri ve yorulma ömrü tek gizli katmanlı yapı kullanarak oldukça yüksek doğruluklarda başarıyla tahmin edilmiştir. Bu sayede tek gizli katmanlı yapay sinir ağları yapısının küçük sayıda veri setleri kullanıldığında dahi oldukça iyi sonuçlar elde edilebileceği kanıtlanmıştır.

Pareek ve diğ. (2002), evrensel yaklaşım teorisine göre yeterli sayıda gizli nöron kullanıldığı zaman bir gizli katman kullanımının neredeyse her türden tahminleme problemini çözmek için yeterli olduğunu vurgulamıştır.

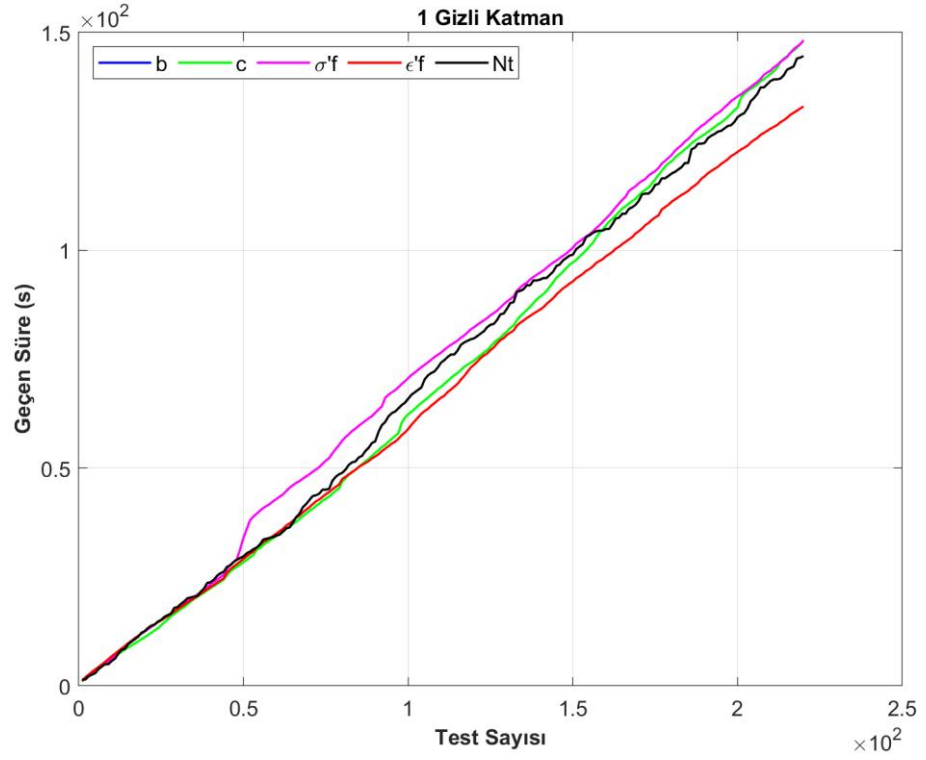
Collins ve Tissot (2015), bir gizli katman kullanarak gök gürültülü fırtınaları yapay sinir ağları kullanarak tahmin etmiştir ve sonucunda bir gizli katman kullanımının yeterli olduğunu belirtmiştir.

Al-kaf ve diğ. (2018), dizel yakıt özelliklerini yapay sinir ağları yöntemiyle tahmin etmişlerdir. Bir gizli katman ile birden fazla gizli katmanın tahminleme performanslarını karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak karmaşık yapay sinir ağları yapılarına göre tek gizli katman kullanımında daha iyi tahminleme doğruluğu elde etmişlerdir.

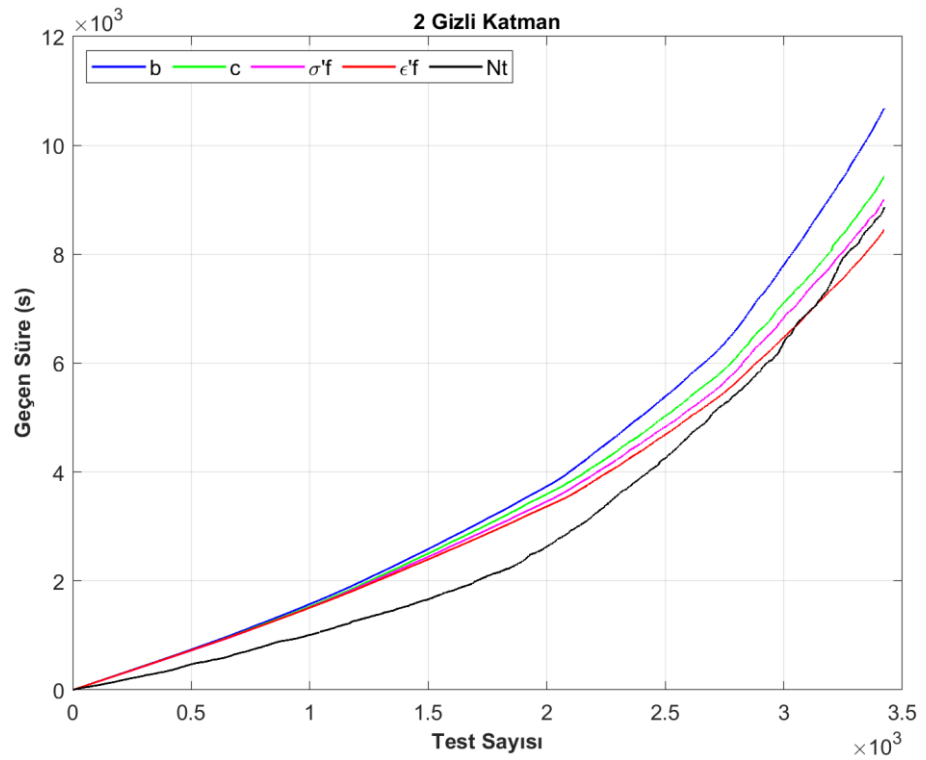
## **6.2 Model 2**

### **6.2.1 Farklı Gizli Katman Sayılarındaki Tahminleme Sürelerinin Karşılaştırılması**

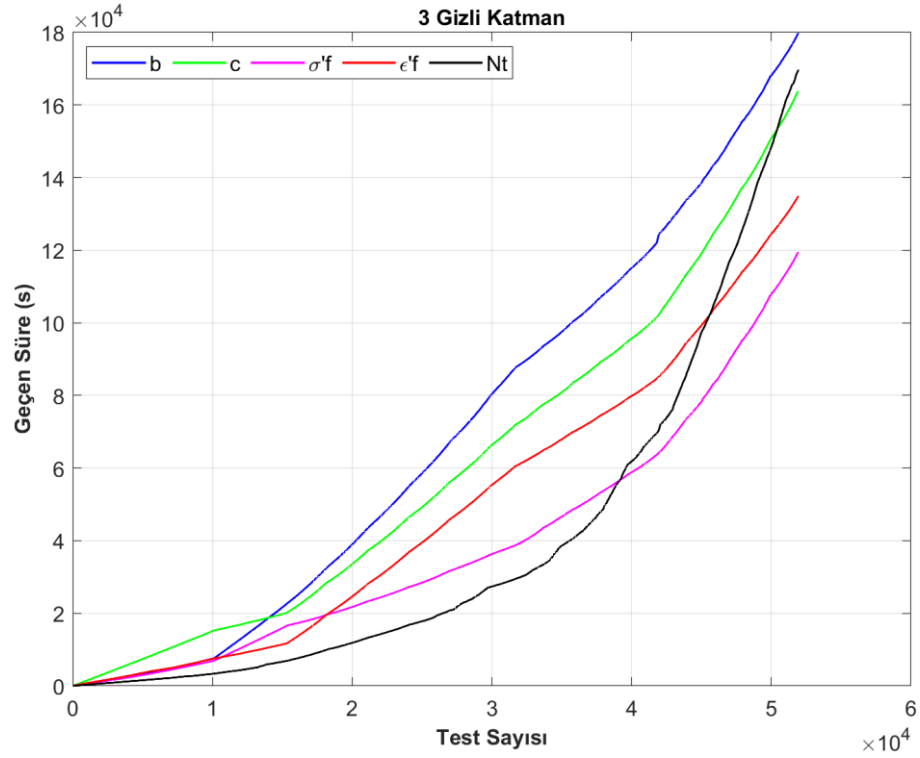
Tahminleme süresinin önemi önceki bölümlerde detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Model 1’de olduğu gibi bu modelde de performansın artırılıp algoritmayı optimize etmek adına geçen sürenin azaltılması gerekmektedir. Geçen süre artıyorsa da tahminleme doğruluğunda artma ve hata oranlarında bir azalma olması gerekmektedir. Bu nedenle bir, iki ve üç gizli katman sayısına sahip yapay sinir ağları yapılarının tahminleme süresine etkilerinin de incelenmesi gerekmektedir. Bir gizli katmanlı yapay sinir ağı yapısının yapılan testler sonucunda elde edilen tahminleme süreleri Şekil 6.22’de, iki gizli katmanlı yapının Şekil 6.23’te ve üç gizli katmanlı yapının ise Şekil 6.24’te verilmiştir.



Şekil 6.22: Bir gizli katman sayısında tahminleme parametrelerinin geçen süre bakımından karşılaştırılması



Şekil 6.23: İki gizli katman sayısında tahminleme parametrelerinin geçen süre bakımından karşılaştırılması



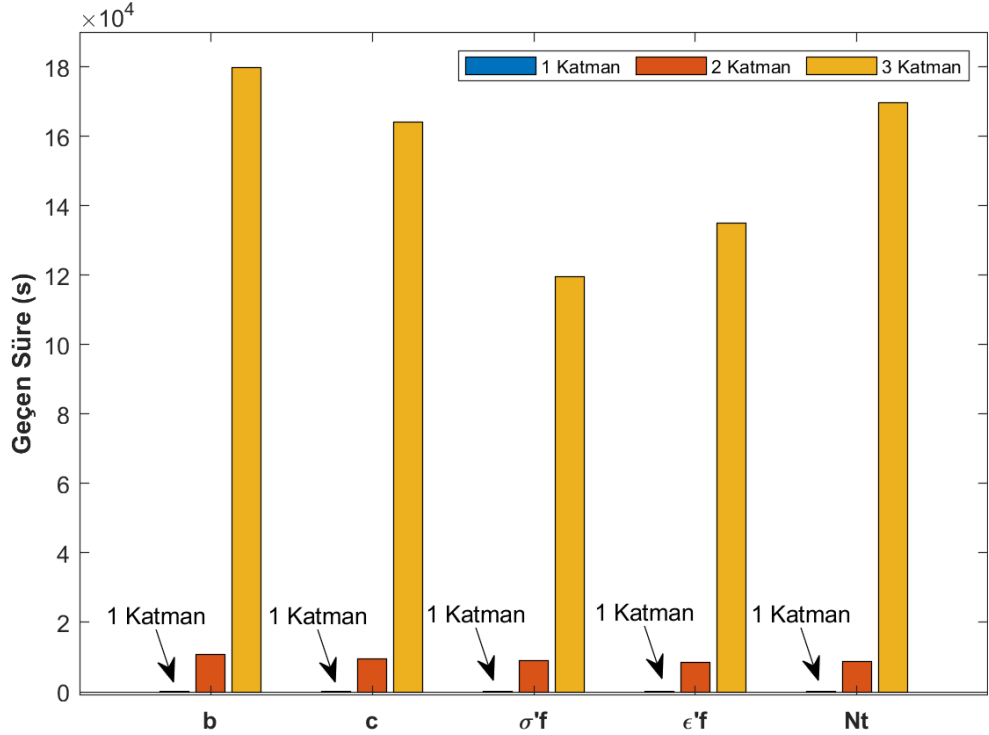
Şekil 6.24: Üç gizli katman sayısında tahminleme parametrelerinin geçen süre bakımından karşılaştırılması

Geçen süredeki değişime en çok etki yapay sinir ağlarının yapısından kaynaklanmaktadır. YSA yapısındaki gizli nöron sayısı, gizli katman sayısı, gizli katman ve çıktı katmanındaki aktivasyon fonksiyonları ve öğrenme fonksiyonlarındaki değişim, geçen süreyi de etkilemektedir.

Bir gizli katmanlı yapay sinir ağları yapısı, bir gizli nöron katmanı (GK1) ve iki aktivasyon fonksiyonu katmanından (GK1 ve çıktı katmanı) oluşmaktadır. İki gizli katmanlı yapay sinir ağları yapısı, iki gizli nöron katmanı (GK1 ve GK2), ve üç aktivasyon fonksiyonu katmanından (GK1, GK2 ve çıktı katmanı) oluşmaktadır. Üç gizli katmanlı yapay sinir ağları yapısı ise, üç gizli nöron katmanı (GK1, GK2 ve GK3) ve dört aktivasyon fonksiyonu katmanından (GK1, GK2, GK3 ve çıktı katmanı) oluşmaktadır. Buradaki temel farklılık gizli nöronlar sadece gizli katmanlarda kullanılabilirken aktivasyon fonksiyonları gizli katmanlar ve çıktı katmanında kullanılabilir. Buradaki temel farklılık gizli nöronlar sadece gizli katmanlarda kullanılabilirken aktivasyon fonksiyonları gizli katmanlar ve çıktı katmanında kullanılabilir.

Gizli nöron sayısı ve gizli katman sayısı artarken yapay sinir ağlarının her katmanında ağırlıklar ve bias değerleri aktivasyon fonksiyonu tarafından hesaplandığından işlem yükünün artmasıyla tahminleme süresi de artmaktadır. Aynı

zamanda Model 1’de yapılan testler sonucunda görüldüğü gibi gizli nöron sayısının artmasıyla yapay sinir ağlarının yapısı karmaşıklaşmakta ve tahminleme süresini önemli ölçüde etkilemektedir. Kısaca yapısal karmaşıklık arttıkça tahminleme süresi de ciddi ölçüde artmaktadır. Bunu daha açık bir şekilde görebilmek adına tüm tahminleme parametreleri için bir, iki ve üç gizli katmanlı yapıların tahminleme süreleri sütun grafiği şeklinde Şekil 6.25’te verilmiştir.



Şekil 6.25: Tüm tahminleme parametrelerinde bir, iki ve üç gizli katmanlı yapıya ait tahminleme sürelerinin karşılaştırılması

Şekilden de açıkça görülebileceği gibi gizli katman sayısı arttıkça tahminleme süreleri çok ciddi miktarda artmaktadır. Üç gizli katmanlı yapay sinir ağları yapısı, ciddi manada zaman ve işlem gücüne ihtiyaç duymaktadır. Buna karşılık bir gizli katmanlı yapay sinir ağları yapısı ise daha az zaman ve işlem gücüne ihtiyaç duymaktadır. Her katman artışı arasındaki tahminleme süresi farklı, sayı olarak kendinden bir önceki katmana göre üstel bir şekilde artmaktadır. Tahminleme parametreleri arasında da tüm gizli katmanlar dikkate alındığında ciddi bir tahminleme süresi farkı bulunmamaktadır. Tahminleme parametrelerinin ihtiyaç duyduğu zamana göre sıralaması yapılırsa en çoktan en aza doğru sırasıyla; yorulma dayanım üsteli (b),

geçiş yorulma ömrü ( $N_t$ ), yorulma süneklik üsteli ( $c$ ), yorulma süneklik katsayısı ( $\epsilon'_f$ ) ve yorulma dayanım katsayısı ( $\sigma'_f$ ) gelmektedir.

Normalde parametrelerin tahminlenmesi için geçen süre bu kadar fazla olmamaktadır. Bu tez çalışması kapsamında tahminleme doğruluğunu arttırmak, hata oranını azaltmak ve yapay sinir ağlarında bulunan hiper parametrelerin tahminleme parametreleri üzerindeki etkilerini gözlemleyebilmek için deneysel bir çalışma yapılmıştır.

### **6.2.2 Düşük Çevrimli Yorulma Parametrelerinin Tahminleme Sonuçlarının ve Farklı Gizli Katman Sayılarında Aktivasyon Fonksiyonlarının Karşılaştırılması**

Bu kısımda kullanılan aktivasyon fonksiyonları; “tansig”, “logsig” ve “purelin” olarak belirlenmiştir. Gizli nöron sayısı aralığı 1-25 seçilip birer birer artmaktadır. Gizli nöron sayıları, her gizli katman sayısı için en optimum sonuçları bulabilmek ve işlem süresini azaltmak adına “1-5”, “6-9”, “10-15”, “16-20” ve “21-25” olarak parçalara ayrılmıştır. Her bir tahminleme parametresi için gizli nöron aralığı eğer parçalara ayrılmasaydı üç gizli katmanlı yapı için (her gizli katmanda 25 gizli nöron ve her gizli katman ve çıktı katmanı için de 3 farklı aktivasyon fonksiyonu)  $25 \times 25 \times 25 \times 3 \times 3 \times 3 \times 3 = 1.265.625$  defa kodun çalışması gerektiğini göstermektedir. Gizli nöronları parçalara böldüğümüz zaman algoritmanın çalışma sayısı üç gizli katmanlı yapı için 53.055 ve iki gizli katmanlı yapı için 3.429'a düşmektedir. Tek gizli katmanlı yapıda sadece tek gizli katman bulunduğu için sonuç değişmemektedir.

Beklenildiği gibi işlem gücü, bellek kullanımı ve tahminleme süresi, gizli nöron sayısının ve gizli katman sayısının artması ile artmaktadır. Ortalama MSE ve regresyon değerleri belirlenirken belirli gizli nöron aralığında en iyi 10 değerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. En iyi sonuçlar ise belirli gizli nöron aralığında en düşük MSE ve en yüksek regresyon oranına sahip kombinasyona göre belirlenmiştir.

Gizli nöron sayısı girdi ve çıktı katmanlarında, aktivasyon fonksiyonu (AF) ise sadece girdi katmanında bulunmamaktadır. Bu kısımda tüm düşük çevrimli yorulma parametreleri ve geçiş yorulma ömrü için üç farklı gizli katman, dört farklı aktivasyon

fonksiyonu ve 25 farklı gizli nöron kombinasyonları test edilmiştir. Düşük çevrimli yorulma parametrelerine ve geçiş yorulma ömrüne ait tahminleme sonuçları ve en iyi yapay sinir ağları yapısı kombinasyonları bir, iki ve üç gizli katman için sırasıyla Tablo 6.6, Tablo 6.7 ve Tablo 6.8’de verilmiştir.

**Tablo 6.6:** Bir gizli katmanlı yapıda düşük çevrimli yorulma parametrelerine ve geçiş yorulma ömrüne ait en iyi sonuçlar

| Parametre        | En İyi Aralık | En İyi MSE | En İyi Regresyon | Ortalama MSE | Ortalama Regresyon | GK1 Nöron | GK1 AF  | Çıktı AF |
|------------------|---------------|------------|------------------|--------------|--------------------|-----------|---------|----------|
| b                | 6-9           | 4,4E-05    | 0,944            | 8,5E-05      | 0,874              | 6         | logsig  | tansig   |
| c                | 21-25         | 3,5E-03    | 0,999            | 5,0E-02      | 0,999              | 22        | purelin | tansig   |
| $\sigma'_f$      | 6-9           | 6,8E+03    | 0,989            | 3,4E+04      | 0,944              | 6         | purelin | tansig   |
| $\varepsilon'_f$ | 10-15         | 1,6E-02    | 0,929            | 3,7E-02      | 0,857              | 10        | logsig  | tansig   |
| $N_t$            | 16-20         | 1,7E+04    | 0,972            | 3,3E+04      | 0,921              | 19        | tansig  | tansig   |

**Tablo 6.7:** İki gizli katmanlı yapıda düşük çevrimli yorulma parametrelerine ve geçiş yorulma ömrüne ait en iyi sonuçlar

| Parametre        | En İyi Aralık | En İyi MSE | En İyi Regresyon | Ortalama MSE | Ortalama Regresyon | GK1 Nöron | GK2 Nöron | GK1 AF  | GK2 AF | Çıktı AF |
|------------------|---------------|------------|------------------|--------------|--------------------|-----------|-----------|---------|--------|----------|
| b                | 10-15         | 4,0E-05    | 0,934            | 5,4E-05      | 0,92               | 10        | 14        | tansig  | logsig | purelin  |
| c                | 1-5           | 5,6E-03    | 0,999            | 8,1E-03      | 0,999              | 3         | 5         | logsig  | tansig | purelin  |
| $\sigma'_f$      | 10-15         | 5,6E+03    | 0,991            | 1,2E+04      | 0,982              | 13        | 11        | tansig  | logsig | purelin  |
| $\varepsilon'_f$ | 16-20         | 1,7E-02    | 0,935            | 2,3E-02      | 0,908              | 20        | 19        | purelin | logsig | tansig   |
| $N_t$            | 10-15         | 3,7E+04    | 0,994            | 1,8E+05      | 0,972              | 15        | 15        | purelin | logsig | tansig   |

**Tablo 6.8:** Üç gizli katmanlı yapıda düşük çevrimli yorulma parametrelerine ve geçiş yorulma ömrüne ait en iyi sonuçlar

| Parametre        | En İyi Aralık | En İyi MSE | En İyi Regresyon | Ortalama MSE | Ortalama Regresyon | GK1 Nöron | GK2 Nöron | GK3 Nöron | GK1 AF  | GK2 AF  | GK3 AF | Çıktı AF |
|------------------|---------------|------------|------------------|--------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|--------|----------|
| b                | 10-15         | 1,8E-05    | 0,971            | 3,1E-05      | 0,954              | 15        | 10        | 15        | tansig  | purelin | tansig | purelin  |
| c                | 10-15         | 1,9E-03    | 0,999            | 2,5E-03      | 0,999              | 13        | 14        | 12        | logsig  | tansig  | tansig | tansig   |
| $\sigma'_f$      | 16-20         | 4,7E+03    | 0,993            | 5,8E+03      | 0,991              | 16        | 17        | 18        | purelin | tansig  | logsig | purelin  |
| $\varepsilon'_f$ | 10-15         | 7,0E-03    | 0,968            | 1,1E-02      | 0,951              | 15        | 12        | 11        | tansig  | purelin | tansig | tansig   |
| $N_t$            | 10-15         | 5,2E+03    | 0,999            | 1,8E+04      | 0,997              | 11        | 14        | 13        | purelin | tansig  | tansig | tansig   |

Daha önce belirtildiği gibi, gizli katman sayısı arttıkça tahminleme doğruluğu artmaktadır. En düşük MSE ve en yüksek regresyon değerleri de bu bağlamda üç gizli katmanlı yapıda elde edilmiştir.

Regresyon değeri “1” rakamına ne kadar yakın olursa o kadar yüksek doğrulukta tahminleme yapılmış olur ve üst sınırı 1’dir. Tahminleme parametrelerine ait en iyi regresyon değerleri ile maksimum regresyon değeri arasındaki yüzdelik farka uzaklık denilmektedir. Tüm tahminleme parametrelerine (b, c,  $\sigma'_f$ ,  $\varepsilon'_f$  ve  $N_t$ ) ait tahminleme süreleri ve uzaklık değerleri Tablo 6.9’da verilmiştir.

**Tablo 6.9:** Tüm tahminleme parametrelerine ait farklı gizli katmanlı yapılardaki toplam tahminleme süresi ve toplam uzaklık değerlerinin karşılaştırılması

| Parametre                    | 3 Gizli Katman | 2 Gizli Katman | 1 Gizli Katman |
|------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| b                            | 2,9            | 6,6            | 5,6            |
| c                            | 0,1            | 0,1            | 0,1            |
| $\sigma'_f$                  | 0,7            | 0,9            | 1,1            |
| $\varepsilon'_f$             | 3,2            | 6,5            | 7,1            |
| $N_t$                        | 0,1            | 0,6            | 2,8            |
| Toplam Uzaklık Değeri (%)    | 7              | 14,7           | 16,7           |
| Toplam Tahminleme Süresi (s) | 768,060        | 46,397         | 737            |

Düşük çevrimli yorulma parametrelerine ve geçiş yorulma ömrüne ait regresyon değerleri, gizli katman sayısı arttıkça önemli ölçüde değişmemiştir. Bu nedenle tahminleme süreleri arasındaki fark önemli ölçüde fazla olduğundan daha fazla gizli katman kullanımı, regresyon değerlerindeki önemli olmayan ölçüdeki farklılıklar nedeniyle kesin bir şekilde daha iyidir denilemez.

Ayrıca tekil en iyi sonuçlar, en iyi gizli nöron aralığını ve aktivasyon fonksiyonu kombinasyonunu belirlemek için yeterince iyi bir gösterge değildir çünkü hiçbir değişken değiştirilmese bile YSA sonuçları algoritmanın her çalışmasında farklı sonuçlar vermektedir. Bu nedenle Model 2 kapsamında en iyi 10 sonucun ortalamasına bakılmıştır. Model 1'de yapıldığı gibi replikasyon yapılması Model 2 için uygun değildir. Üç gizli katman için replikasyon yapılmadan tam faktöriyel deney yapılması 768.060 saniye yani yaklaşık 9 gün sürmüştür. Burada 100 replikasyon ile 3 farklı gizli katman, 3 farklı aktivasyon fonksiyonu, 1-25 arasında değişen 5 farklı gizli nöron aralığı ile bu test 1 replikasyon için 9 gün sürdüyse, 100 replikasyon için 900 gün sürecek demektir. Replikasyon sayısı 10'a düşse bile en iyi ihtimalle 90 gün sürecek demektir. Bu nedenle replikasyon yapılması Model 2 kapsamındaki gibi yüksek karmaşıklıkta deneysel çalışmalar için uygun değildir.

İki ve üç gizli katmanlı yapıda elde edilen her bir gizli nöron aralığına ait en yüksek regresyon ve en düşük MSE değerine sahip 100 sonuç seçilmiştir. Ardından bu sonuçlara ait aktivasyon fonksiyonu ve gizli nöron sayıları Excel yazılımı ile sayılmıştır. Bir gizli katman için ise en iyi 10 değer dikkate alınmıştır çünkü bir gizli katmanda yapılan testlerin sayısı 100'ü geçmemektedir. Her bir tahminleme parametresi için gizli katmanlarda ve çıktı katmanında kullanılan aktivasyon fonksiyonlarının sayısı Tablo 6.10'da verilmiştir.



**Tablo 6.10:** Gizli katmanlar ve çıktı katmanında kullanılan aktivasyon fonksiyonlarının sayısı

| 3 Gizli Katmanlı Yapı |        |        |         | 2 Gizli Katmanlı Yapı |               |        |         | 1 Gizli Katmanlı Yapı |        |               |         |    |     |    |
|-----------------------|--------|--------|---------|-----------------------|---------------|--------|---------|-----------------------|--------|---------------|---------|----|-----|----|
| Katman                | tansig | logsig | purelin | Katman                | tansig        | logsig | purelin | Katman                | tansig | logsig        | purelin |    |     |    |
| b                     | GK1    | 204    | 160     | 136                   | GK1           | 202    | 175     | 123                   | b      | GK1           | 26      | 24 | 0   |    |
|                       | GK2    | 193    | 195     | 112                   | b             | GK2    | 209     | 243                   |        | 48            | Çıktı   | 44 | 6   | 0  |
|                       | GK3    | 167    | 267     | 66                    | c             | Çıktı  | 262     | 30                    | 208    | c             | GK1     | 1  | 4   | 45 |
|                       | Çıktı  | 240    | 0       | 260                   |               | GK1    | 169     | 174                   | 157    | Çıktı         | 25      | 21 | 4   |    |
| c                     | GK1    | 167    | 223     | 110                   | c             | GK2    | 186     | 187                   | 127    | $\sigma'_f$   | GK1     | 4  | 0   | 46 |
|                       | GK2    | 200    | 180     | 120                   |               | Çıktı  | 142     | 142                   | 216    |               | Çıktı   | 26 | 0   | 24 |
|                       | GK3    | 217    | 183     | 100                   | $\sigma'_f$   | GK1    | 181     | 161                   | 158    | $\epsilon'_f$ | GK1     | 22 | 25  | 3  |
|                       | Çıktı  | 345    | 6       | 149                   |               | GK2    | 189     | 201                   | 110    |               | Çıktı   | 41 | 3   | 6  |
| $\sigma'_f$           | GK1    | 203    | 168     | 129                   | Çıktı         | 197    | 0       | 303                   | $N_t$  | GK1           | 21      | 17 | 12  |    |
|                       | GK2    | 217    | 179     | 104                   |               | GK1    | 201     | 185                   |        | 114           | Çıktı   | 29 | 0   | 21 |
|                       | GK3    | 191    | 240     | 69                    | $\epsilon'_f$ | GK2    | 197     | 232                   | 71     | Çıktı         | 308     | 0  | 192 |    |
|                       | Çıktı  | 169    | 0       | 331                   |               | GK1    | 191     | 183                   | 126    |               |         |    |     |    |
| $\epsilon'_f$         | GK1    | 218    | 162     | 120                   | $N_t$         | GK2    | 197     | 226                   | 77     | Çıktı         | 229     | 0  | 271 |    |
|                       | GK2    | 202    | 197     | 101                   |               | Çıktı  | 229     | 0                     | 271    |               |         |    |     |    |
|                       | GK3    | 204    | 228     | 68                    | $N_t$         |        | GK1     | 183                   | 126    | Çıktı         | 304     | 0  | 196 |    |
|                       | Çıktı  | 304    | 0       | 196                   |               | GK2    | 188     | 132                   |        |               |         |    |     |    |
| $N_t$                 | GK1    | 183    | 197     | 120                   | Çıktı         | 188    | 132     | Çıktı                 | 304    | 0             | 196     |    |     |    |
|                       | GK2    | 188    | 180     | 132                   |               | GK3    | 212     |                       | 81     |               |         |    |     |    |
|                       | GK3    | 212    | 207     | 81                    | Çıktı         | 212    | 81      | Çıktı                 | 304    | 0             | 196     |    |     |    |
|                       | Çıktı  | 304    | 0       | 196                   |               | Çıktı  | 304     |                       | 0      | 196           |         |    |     |    |

Her bir tahminleme parametresi için gizli katmanlarda ve çıktı katmanında kullanılan aktivasyon fonksiyonlarının toplam sayıları Tablo 6.11’de verilmiştir. Bu tabloda “Genel” olarak bahsedilen kısım ise tüm tahminleme parametrelerini (b, c,  $\sigma'_f$ ,  $\epsilon'_f$  ve  $N_t$ ) birlikte içeren sonucu temsil etmektedir.

**Tablo 6.11:** Gizli katmanlar ve çıktı katmanında kullanılan aktivasyon fonksiyonlarının toplam sayısı

| b           | tansig | logsig | purelin | c             | tansig | logsig | purelin |
|-------------|--------|--------|---------|---------------|--------|--------|---------|
| GK1         | 432    | 359    | 259     | GK1           | 337    | 401    | 312     |
| GK2         | 446    | 444    | 160     | GK2           | 411    | 388    | 251     |
| GK3         | 429    | 297    | 274     | GK3           | 359    | 325    | 316     |
| Çıktı       | 240    | 0      | 260     | Çıktı         | 345    | 6      | 149     |
| $\sigma'_f$ | tansig | logsig | purelin | $\epsilon'_f$ | tansig | logsig | purelin |
| GK1         | 388    | 329    | 333     | GK1           | 441    | 372    | 237     |
| GK2         | 432    | 380    | 238     | GK2           | 440    | 432    | 178     |
| GK3         | 388    | 240    | 372     | GK3           | 512    | 228    | 260     |
| Çıktı       | 169    | 0      | 331     | Çıktı         | 304    | 0      | 196     |
| $N_t$       | tansig | logsig | purelin | Genel         | tansig | logsig | purelin |
| GK1         | 395    | 397    | 258     | GK1           | 1598   | 1461   | 1141    |
| GK2         | 414    | 406    | 230     | GK2           | 1729   | 1644   | 827     |
| GK3         | 441    | 207    | 352     | GK3           | 1688   | 1090   | 1222    |
| Çıktı       | 304    | 0      | 196     | Çıktı         | 1058   | 6      | 936     |

### 6.2.2.1 Çıktı Katmanı

Bir gizli katmanlı YSA yapısı için yorulma dayanım üsteli (b) tansig'e son derece bağımlı, yorulma dayanım üsteli (c) tansig ve logsig'e bağımlı, yorulma dayanım katsayısı ( $\sigma'_f$ ) tansig ve purelin'e bağımlı, yorulma süneklik katsayısı ( $\epsilon'_f$ ) tansig'e son derece bağımlı ve geçiş yorulma ömrü ( $N_t$ ) tansig ve purelin'e bağımlı olmuştur.

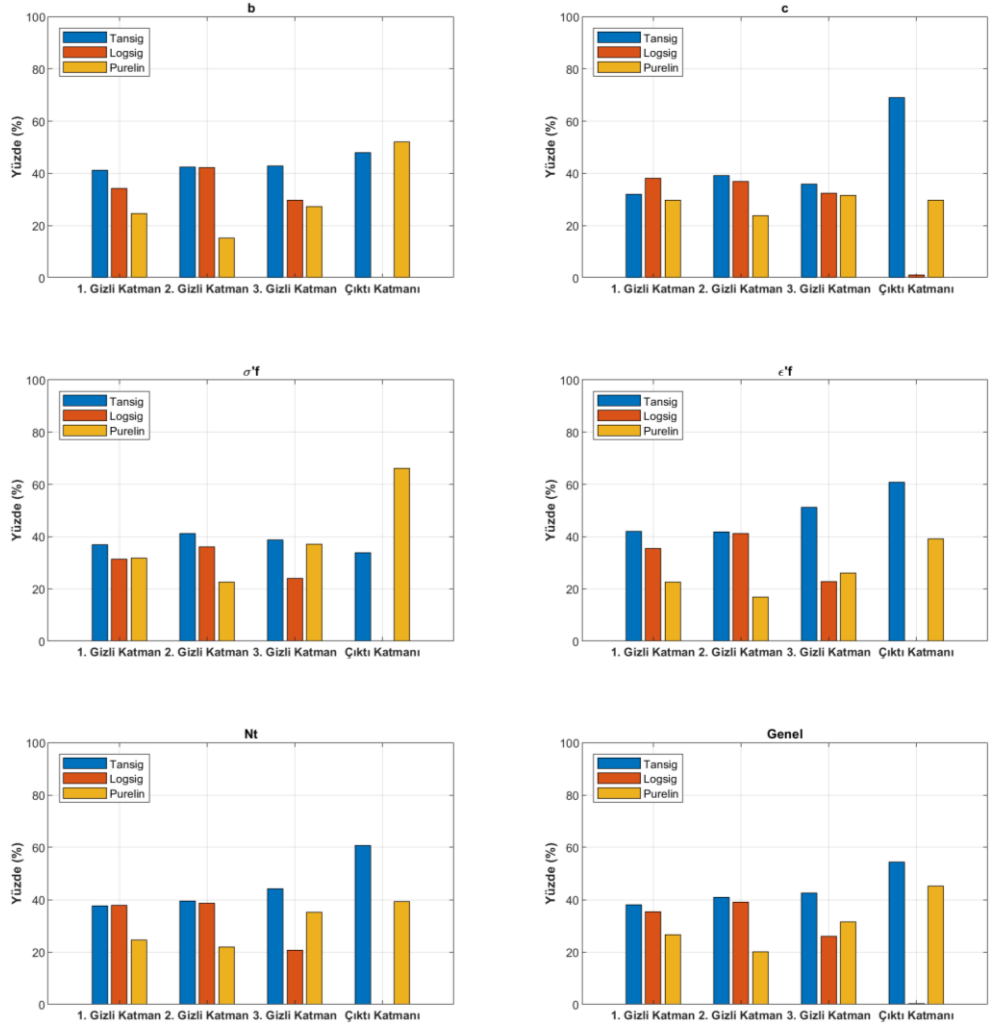
İki gizli katmanlı YSA yapısı için yorulma dayanım üsteli (b) tansig ve purelin'e bağımlı, yorulma dayanım üsteli (c) purelin'e bağımlı, yorulma dayanım katsayısı ( $\sigma'_f$ ) purelin'e son derece bağımlı, yorulma süneklik katsayısı ( $\epsilon'_f$ ) tansig'e bağımlı ve geçiş yorulma ömrü ( $N_t$ ) tansig ve purelin'e bağımlı olmuştur.

Üç gizli katmanlı YSA yapısı için yorulma dayanım üsteli (b) tansig ve purelin'e bağımlı, yorulma dayanım üsteli (c) tansig'e son derece bağımlı, yorulma dayanım katsayısı ( $\sigma'_f$ ) purelin'e son derece bağımlı, yorulma süneklik katsayısı ( $\epsilon'_f$ ) tansig'e son derece bağımlı ve geçiş yorulma ömrü ( $N_t$ ) tansig'e son derece bağımlı olmuştur.

Lojistik sigmoid aktivasyon fonksiyonu (logsig), çıktı katmanında neredeyse hiç iyi sonuç vermemiştir ve bunun sonucunda tüm tahminleme parametreleri için çıktı katmanında kullanılmaya uygun bir aktivasyon fonksiyonu olmadığı sonucuna varılmıştır.

### 6.2.2.2 Gizli Katmanlar

Gizli katmanlar için yorulma dayanım üsteli (b), yorulma süneklik üsteli (c), yorulma dayanım katsayısı ( $\sigma'_f$ ), yorulma süneklik katsayısı ( $\epsilon'_f$ ) ve geçiş yorulma ömrü ( $N_t$ ) tansig ve logsig aktivasyon fonksiyonları ile iyi sonuçlar vermiştir fakat logsig biraz daha iyi gözükmektedir. Tüm tahminleme parametreleri ve genel sonuçlar için çıktı katmanı ve gizli katmanlarda kullanılan aktivasyon fonksiyonlarının yüzdelik oranları Şekil 6.26'da sütun grafiği olarak verilmiştir.



**Şekil 6.26:** Tahminleme parametreleri ve genel sonuçlara ait kullanılan aktivasyon fonksiyonlarının yüzdeler oranları

Farklı yazarların yapay sinir ağları kullanarak çalışmalarında kullandıkları gizli katman sayıları ile gizli katmanlarda ve çıktı katmanında kullanmış oldukları aktivasyon fonksiyonları Tablo 6.12’de verilmiştir. Farklı yazarların yaptıkları çalışmalarda genellikle ilk gizli katmanda hangi aktivasyon fonksiyonu kullanıldıysa diğer gizli katmanlarda da aynı aktivasyon fonksiyonu kullanma eğiliminde oldukları görülmüştür. Gizli katmanlarda ise çoğunlukla lineerlik istendiği durumlar olduğu için purelin aktivasyon fonksiyonu kullanmışlardır. Logsig aktivasyon fonksiyonunu da çıktı katmanında yaygın olarak kullanmışlardır. Düşük çevrimli yorulma parametreleri ve yorulma ömürlerinin tahmin edilmesinde logsig aktivasyon fonksiyonu neredeyse hiç iyi sonuçlar vermediği halde bu çalışmalarda kullanılmasının nedenin ise problemin türüne, veri setinin büyüklüğüne ve kullanılan gizli katman sayısına bağlı

olarak aktivasyon fonksiyonlarının gösterdikleri performanslar değişmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Raghu ve Sriraam (2017), çalışmalarında çoklu katmanlar için en uygun kombinasyonu belirlemeye çalışmışlardır. Aktivasyon fonksiyonları olarak tansig, logsig, purelin ve Elliot simetrik sigmoid kullanmışlardır. Sonuç olarak lineer (purelin) aktivasyon fonksiyonunun gizli katmanlardan daha çok çıktı katmanı için uygun olduğunu ve tansig aktivasyon fonksiyonunun ise gizli katmanlar için daha uygun olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca altı farklı öğrenme fonksiyonunu test etmişler ve sonucunda en iyi öğrenme fonksiyonu Levenberg-Marquardt (trainlm) olmuştur.

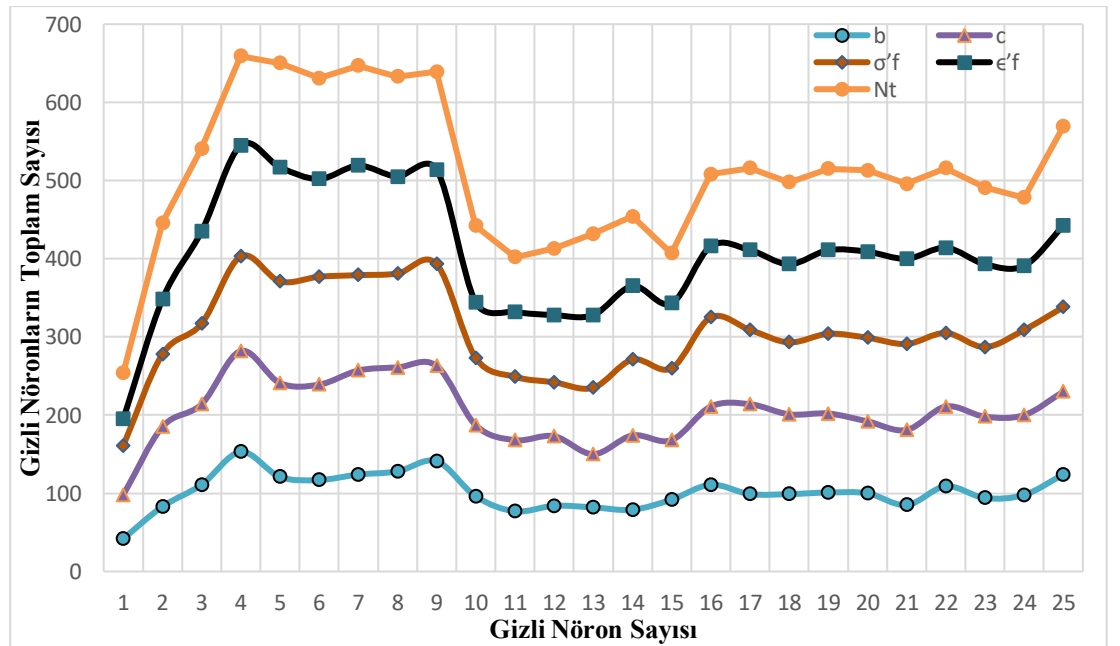
Zadeh ve diğ. (2010), su havzasındaki günlük su çıkışını iki gizli katmanlı YSA ile tahmin etmişlerdir. Tansig-tansig-purelin ve logsig-logsig-purelin olarak iki farklı aktivasyon fonksiyonunu kombinasyonunu 4 ve 6 gizli nöron sayısı kullanıp karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak tansig aktivasyon fonksiyonunun, logsig aktivasyon fonksiyonuna göre gizli katmanlarda daha iyi performans sergilediğini göstermişlerdir.

**Tablo 6.12:** Farklı gizli katman sayılarında kullanılan aktivasyon fonksiyonları

| GK1    | GK2    | GK3    | GK4    | Çıktı Katmanı | GK Sayısı | Kaynak                        |
|--------|--------|--------|--------|---------------|-----------|-------------------------------|
| logsig | logsig | logsig | logsig | logsig        | 4         | Maleki ve diğ. (2022)         |
| tansig | tansig | tansig | -      | tansig        | 3         | Burghardt ve diğ. (2021)      |
| logsig | logsig | logsig | -      | purelin       | 3         | Muñoz-Abella ve diğ. (2015)   |
| tansig | tansig | -      | -      | purelin       | 2         | Hojjat (2017)                 |
| tansig | tansig | -      | -      | purelin       | 2         | Xu ve diğ. (2022)             |
| tansig | tansig | -      | -      | purelin       | 2         | Zhou ve diğ. (2021)           |
| logsig | logsig | -      | -      | purelin       | 2         | Rubio ve diğ. (2018)          |
| tansig | -      | -      | -      | purelin       | 1         | Yetilmezsoy ve Demirel (2008) |
| tansig | -      | -      | -      | purelin       | 1         | Turp ve diğ. (2011)           |
| tansig | -      | -      | -      | purelin       | 1         | Raghu ve Sriraam (2017)       |
| tansig | -      | -      | -      | tansig        | 1         | Nejad ve diğ. (2022)          |
| tansig | -      | -      | -      | purelin       | 1         | Zhang ve diğ. (2022)          |
| logsig | -      | -      | -      | logsig        | 1         | Genel (2004)                  |
| logsig | -      | -      | -      | logsig        | 1         | Pujol ve Pinto (2011)         |
| logsig | -      | -      | -      | logsig        | 1         | Maleki ve diğ. (2018)         |
| logsig | -      | -      | -      | purelin       | 1         | Sulaimann ve diğ. (2009)      |

### 6.2.3 En İyi Gizli Nöron Aralığının Belirlenmesi

Gizli nöron sayısını belirlemenin uzun zaman alan ve çok fazla değişkene bağlı olan bir hiper parametre olduğu Model 1’de gösterilmişti. Gizli nöron aralığını belirlemek ise gizli nöron sayısını belirlemekten özellikle çok katmanlı yapılarda daha zor bir süreçtir. Tekrar hatırlatmak gerekirse problemin türü ve zorluğu ne olursa olsun hiçbir zaman tam olarak doğru bir gizli katman sayısı, gizli nöron sayısı ve gizli nöron aralığı bulunmamaktadır. Ancak YSA yapısında belirli koşullar için hangi durumların daha iyi veya hangi durumların daha kötü olduğu hakkında bazı ipuçları ve öneriler sunulabilmektedir. Her bir tahminleme parametresine ait her gizli nöron aralığı için (1-5, 6-9, 10-15, 16-20 ve 21-25) elde edilen en iyi 100 sonuç belirlenmiş ve gizli katmanlardaki en iyi performans gösteren gizli nöronların sayısı Excel yazılımı ile sayılmıştır ve Şekil 6.27’de gösterilmiştir.



Şekil 6.27: Tahminleme parametrelerinin bütün gizli katmanlarda kullanılan toplam gizli nöron sayıları

Elde edilen bütün bulgulara göre tüm tahminleme parametreleri ve gizli katman sayıları için en iyi gizli nöron aralığı 4-9 ve ikinci en iyi aralık ise 22-25 olarak belirlenirken, en iyi ortalama tahminleme sonuçları ise 10-15 gizli nöron aralığında elde edilmiştir. En iyi 100 sonuç içinden seçilen ve en çok kullanılan gizli nöron aralığı 4-9 ve 22-25 olmasına rağmen en iyi 10 sonuca bakıldığı zaman 10-15 gizli nöron

aralığı daha iyi sonuçlar vermektedir. Yani ilk 10 sonuca bakıldığında en iyi aralık 10-15 olurken en iyi 100 sonuca bakıldığında ise en iyi gizli nöron aralığı 4-9 ve 10-15 olmaktadır.

Altikat (2021), iki gizli katmanlı yapıda gizli katmanlarda logsig aktivasyon fonksiyonu kullanarak karbondioksit emisyonunu tahmin etmiştir. Her gizli katmanda farklı gizli nöron kombinasyonlarını test etmiş ve en düşük mutlak ortalama hata oranını 14 ve 10 gizli nöron kullanıldığı durumda elde etmiştir.

Hojjat (2017), newtonsal olmayan akışkanların Nusselt sayılarını yapay sinir ağları kullanarak tahmin etmiştir. YSA yapısında iki gizli katman ve sırasıyla 6-9 gizli nöron kullanmıştır. Gizli katmanlarda tansig ve çıktı katmanında purelin aktivasyon fonksiyonu kullanmıştır.

Zadeh ve diğ. (2010), iki gizli katmanlı YSA yapısında gizli katmanlarda 4-6 gizli nöron kullanarak su havzasındaki günlük su çıkışını başarıyla tahmin etmişlerdir.

#### **6.2.4 Tahminlenen ve Deneysel Parametre Değerlerinin Karşılaştırılması**

Yapay sinir ağlarının yapısı ve elde edilen sonuçlar, tahminleme sonuçlarının MSE ve regresyon değerlerine bakılarak ne kadar iyi sonuçlar verdiğini öğrenmek adına oldukça iyi bir seçenektir. Ancak sonuçlardan elde edilen parametre değerlerini daha yakından ve açık bir şekilde gözlemlemek için tahminlenen parametre değerlerini deneysel olarak elde edilen değerlerle karşılaştırmak gerekmektedir. Bu yüzden deneysel ve her gizli katmanda elde edilen tahminsel değerlerin karşılaştırılması şekiller üzerinden yapılmıştır. Şekiller bir, iki ve üç gizli katmanlı yapay sinir ağları yapısında tahminlenen değerler ile deneysel değerlerin karşılaştırılmasını içermektedir. Tahminlenen parametre değerleri, en iyi sonuç veren YSA yapısından elde edilmiştir. Yüzdeler hata oranı, ortalama mutlak yüzdeler hata oranı (MAPE) ile Denklem 6.52'ye göre hesaplanmıştır. MAPE, verilerin büyüklüğünden bağımsız olarak bir karşılaştırma sunması ve yorumlama kolaylığı sağladığından kullanılmıştır.

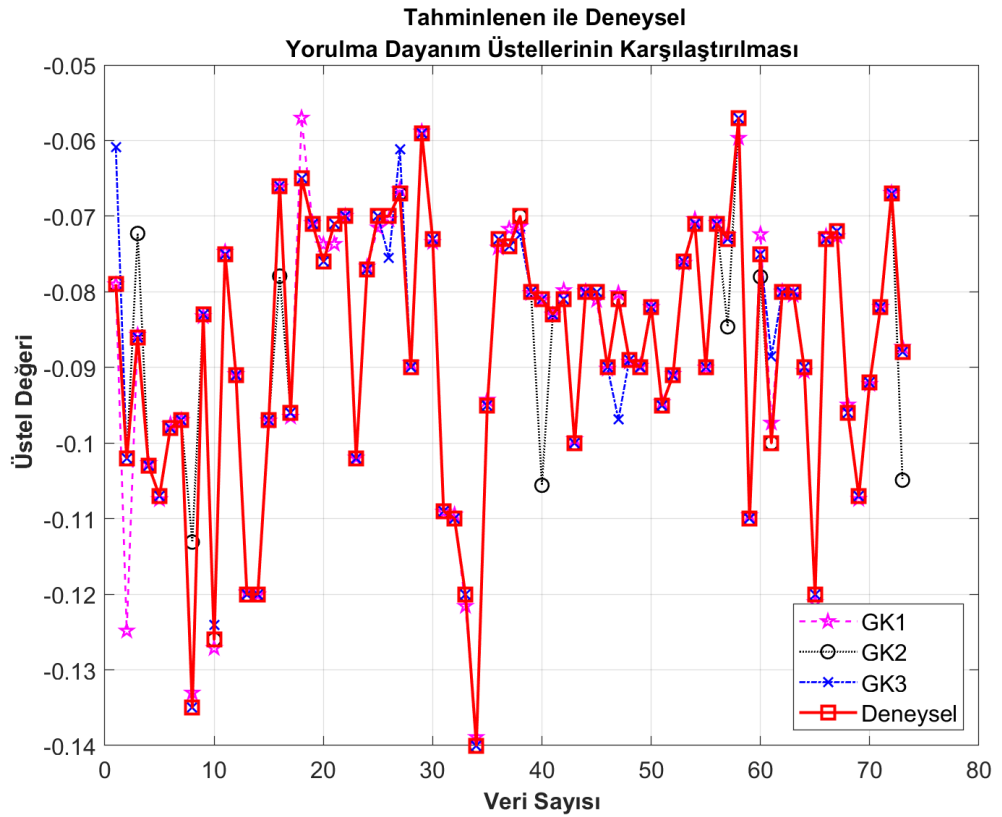
$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_d - P_t}{P_d} \right| \quad (6.52)$$

Denklemden  $P_d$  parametrenin deneysel değerini,  $P_t$  parametrenin tahminlenen değerini,  $n$  toplam veri sayısını ve “100” ise sonuçları yüzdelik orana çevirmek için kullanılan ifadeyi göstermektedir. Tahminlenen parametrelerin MAPE değerleri bir, iki ve üç gizli katmanlı yapı için Tablo 6.13’te verilmiştir.

**Tablo 6.13:** Tahminlenen parametrelerin tüm gizli katmanlardaki MAPE sonuçları

| Parametre        | GK3   | GK2   | GK1   |
|------------------|-------|-------|-------|
| b                | 1,035 | 1,641 | 1,206 |
| c                | 0,326 | 0,411 | 0,285 |
| $\sigma'_f$      | 0,969 | 1,261 | 1,334 |
| $\varepsilon'_f$ | 1,461 | 2,686 | 3,904 |
| $N_t$            | 0,573 | 0,944 | 1,695 |

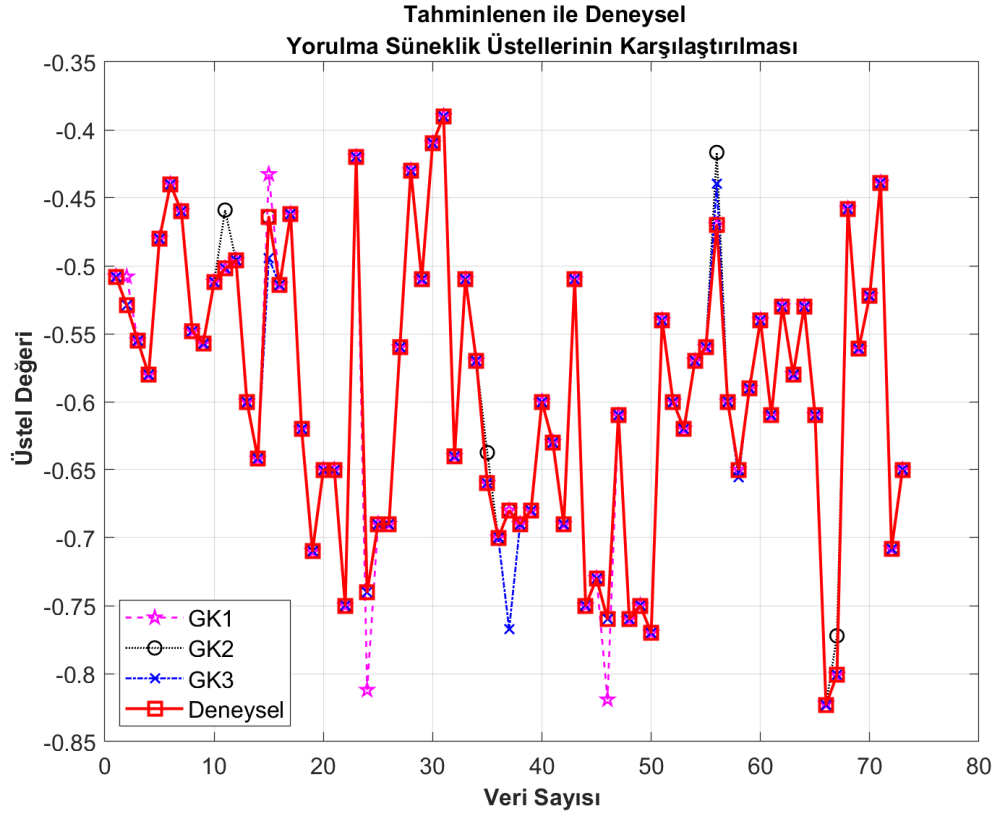
Tüm gizli katmanlar için tahminlenen yorulma dayanım üsteli (b) değerlerinin deneysel değerler ile karşılaştırılması Şekil 6.28’de verilmiştir.



**Şekil 6.28:** Tahminlenen ile deneysel yorulma dayanım üstelleri değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.28'e bakıldığında üç gizli katmanlı yapının en iyi sonuç verdiği görülmektedir ancak üç gizli katmanlı yapı ile tek gizli katmanlı yapı karşılaştırıldığında arada önemli bir fark bulunmamaktadır. Üç gizli katmanlı yapı daha çok tahminleme süresi ve işlem gücü gerektirdiği ve daha çok yapısal karmaşıklık içerdiği için bir gizli katmanlı yapının daha iyi olduğu söylenebilmektedir.

Yorulma süneklik üsteli (c) için tüm gizli katmanlarda elde edilen tahminleme değerlerinin deneysel değerler ile karşılaştırılması Şekil 6.29'da verilmiştir.

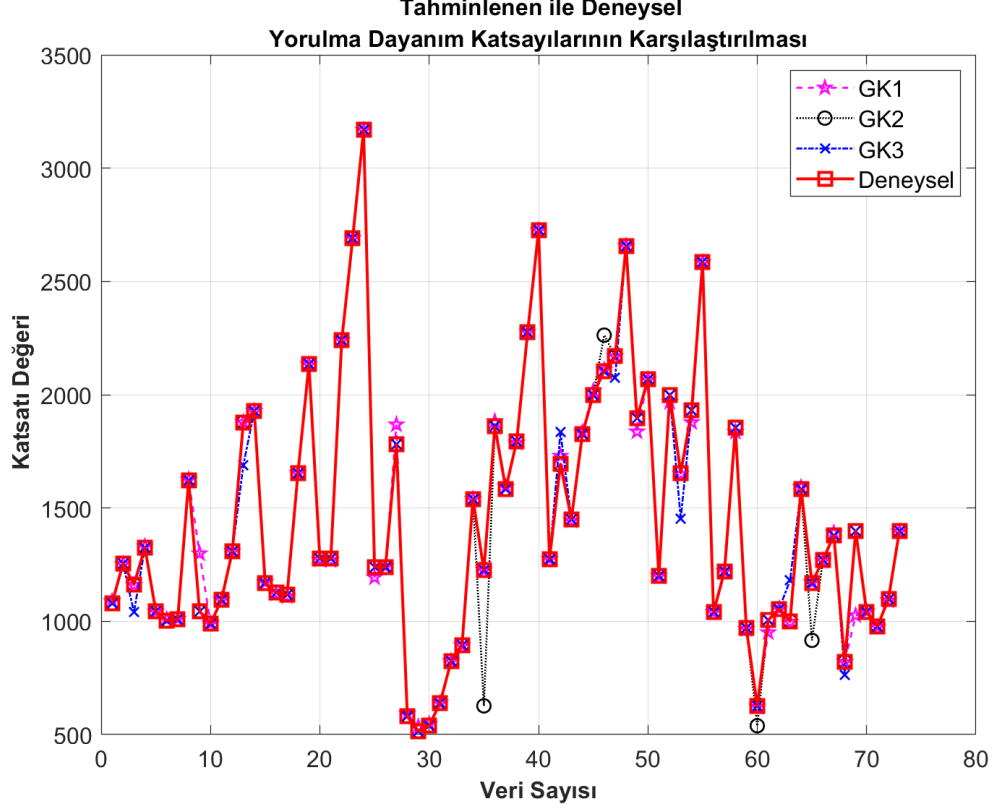


Şekil 6.29: Tahminlenen ile deneysel yorulma süneklik üstelleri değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.29 ve Tablo 6.13'te de görülebileceği gibi tüm gizli katmanlarda oldukça düşük MAPE değerleri elde edilmiştir. Tahminleme süresi, işlem gücü ve yapısal karmaşıklık göz önüne alındığında bir gizli katmanlı YSA yapısının daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca bir gizli katmanlı yapı ile üç gizli katmanlı yapı arasında önemli ölçüde bir fark bulunmamaktadır.



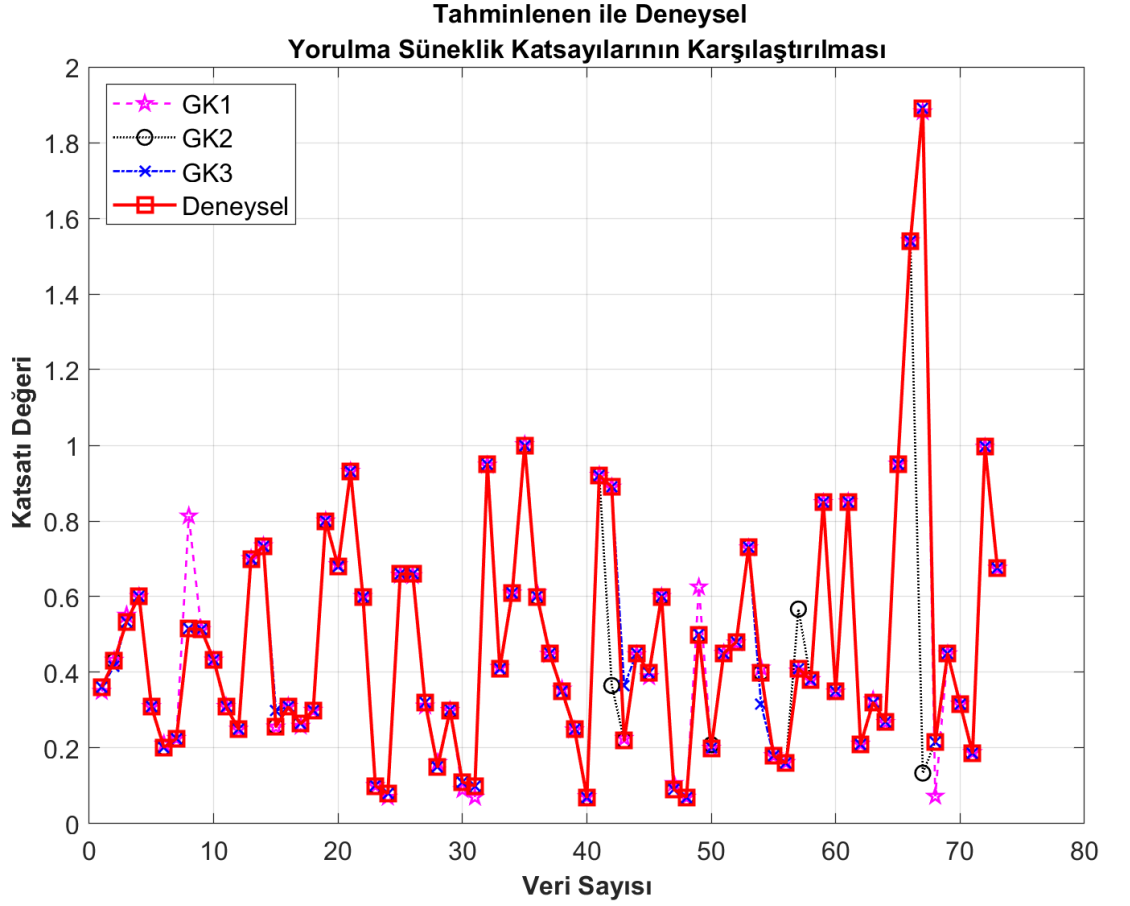
Yorulma dayanım katsayısı ( $\sigma'_f$ ) için tüm gizli katmanlarda elde edilen tahminleme değerlerinin deneysel değerler ile karşılaştırılması Şekil 6.30'da verilmiştir.



Şekil 6.30: Tahminlenen ile deneysel yorulma dayanım katsayısı değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.30'da görülebileceği gibi üç gizli katmanlı yapı en iyi sonuçları vermektedir ve bir ve iki gizli katmanlı yapı için MAPE değerleri arasında önemli bir fark bulunmamaktadır ve neredeyse aynıdır.

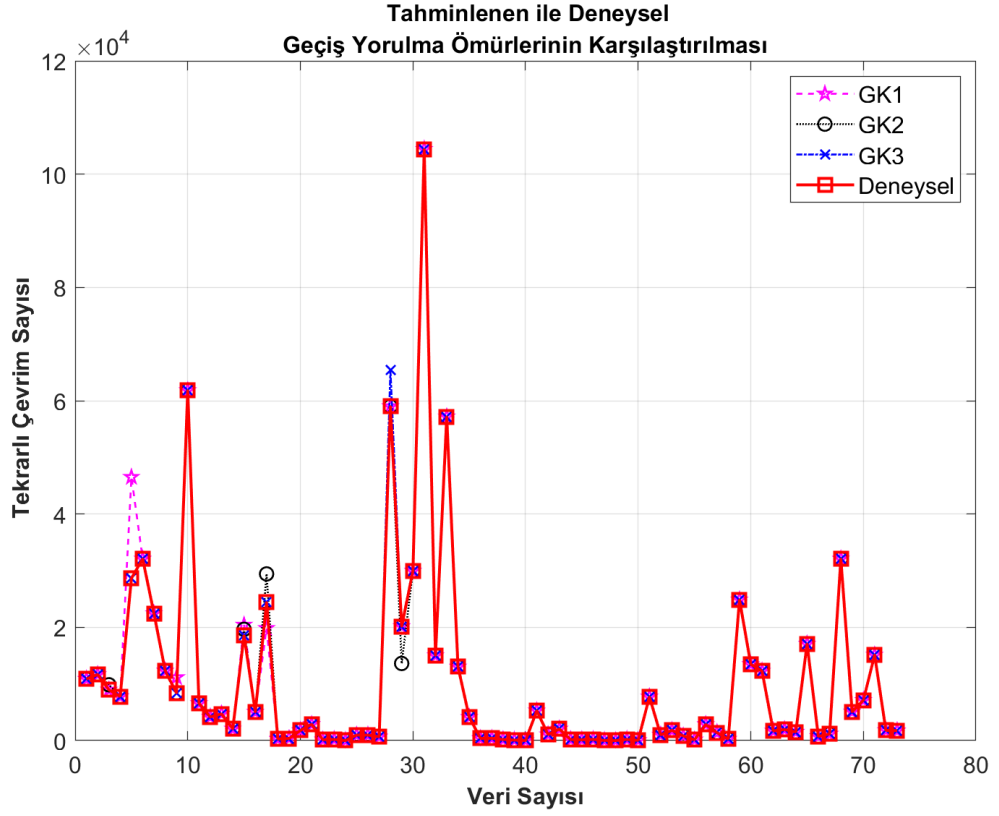
Yorulma süneklik katsayısı ( $\epsilon'_f$ ) için tüm gizli katmanlarda elde edilen tahminleme değerlerinin deneysel değerler ile karşılaştırılması Şekil 6.31'de verilmiştir.



**Şekil 6.31:** Tahminlenen ile deneysel yorulma süneklik katsayısı değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.31’de görülebileceği gibi üç gizli katmanlı yapı dışında bir ve iki gizli katmanlı yapıda MAPE değerleri nispeten yüksek olmaktadır. Üç gizli katmanlı yapı en iyi sonucu ve bir gizli katmanlı yapı ise en kötü sonucu vermiştir. Bu yüzden üç gizli katmanlı yapı, dezavantajlarına rağmen yorulma süneklik katsayısı için en mantıklı tercih olmaktadır.

Geçiş yorulma ömrü ( $N_i$ ) için tüm gizli katmanlarda elde edilen tahminleme değerlerinin deneysel değerler ile karşılaştırılması Şekil 6.32’de verilmiştir.



Şekil 6.32: Tahminlenen ile deneysel geçiş yorulma ömürleri değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.32'ye bakıldığında üç gizli katmanlı yapı en iyi sonucu vermektedir ve farklı gizli katmanlar arasındaki MAPE değerleri arasında önemli farklar bulunmaktadır. Bir gizli katmanlı yapı en kötü sonuçları vermiştir fakat şekilden de görülebileceği gibi sadece tek bir noktada (6. veri sayısında) MAPE değerinde bir artış gözükmemektedir. Bu nedenle en iyi gizli katman kombinasyonunun seçilmesi zorlaşmaktadır. Karar verirken MSE, regresyon, tahminleme süresi, yapısal karmaşıklık, işlem gücü ve tahminlenen ile deneysel parametrelerin MAPE değerlerine birlikte bakılıp göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bir gizli katmanlı yapı için 6. veri eğer göz önünde bulundurulmasaydı MAPE değeri 0,841'e düşmüş olacaktır. Bu durumda tek gizli katmanlı yapının seçilmesi en doğru tercih olacaktır ancak mevcut durumda üç gizli katmanlı yapının seçilmesi daha mantıklıdır.

Tran ve diğ. (2020), yaptıkları çalışmada tek gizli katman kullanımının, iki ve üç gizli katmana göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Ayrıca gereksiz bir şekilde gizli katman sayısını arttırmanın önemli bir ölçüde performans artışı olmaksızın yapısal karmaşıklığa neden olduğunu ve öğrenme sürecini de uzattığını göstermişlerdir.

Uzair ve Jamil (2020), gizli katman sayısının, yapay sinir ağlarına etkilerini incelemişlerdir. alışmalarında çok sayıda gizli katman kullanımının, öğrenme sürecini önemli ölçüde yavaşlattığını göstermişlerdir. Gizli katman sayısını arttırmamanın daha iyi tahminleme doğruluğu sağladığını fakat tahminleme süresi ve performans ana kriter ise gizli katman sayısını mümkün olduğunca azalmanın daha doğru bir zm olduğunu vurgulamışlardır.

Karsoliya (2012), yaptığı çalışmada gizli katman sayılarının gereksiz bir şekilde arttırmamanın yapısal karmaşıklığa neden olacağını ve tahminleme süresini arttıracadığını söylemiştir. Ek olarak eğer asıl amaç tahminleme doğruluğunu arttırmak ise gizli katman sayısını en fazla e kadar yükseltmenin yeterli olduğunu belirtmiştir. ten fazla gizli katman kullanmanın zaman, yapısal karmaşıklık ve aşırı uyum sorunlarının getireceğini ve genellikle bir ve iki gizli katman sayısının lineer olmayan tahminleme problemlerinde yeterli olduğunu vurgulamıştır.

Shen ve diğ. (2021), YSA yapılarını incelemek için çalışma yapmışlar ve sonuç olarak üç gizli katman sayısının her türden problemi yüksek doğrulukta tahmin etmek için yeterli olduğunu göstermişlerdir.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Model 1 ve Model 2 ile yüksek dayanımlı çelikler ve çeşitli çelikler olmak üzere iki farklı veri seti kullanılarak düşük çevrimli yorulma parametreleri ve yorulma ömürleri yapay sinir ağları yöntemiyle farklı gizli katman sayılarında tahmin edilmiştir. Tahminleme yapılırken farklı aktivasyon fonksiyonları, öğrenme fonksiyonları, epok sayıları, gizli katman sayıları, veri tipleri ve gizli nöron sayıları test edilip tahminleme süresine, tahminleme doğruluğuna ve hata oranlarına olan etkileri araştırılmıştır. Ayrıca düşük çevrimli yorulma parametreleri detaylı bir şekilde incelenmiş olup geleneksel ve geleneksel olmayan tahminleme yöntemleri de araştırılmıştır.

Model 1 kapsamında yüksek dayanımlı çeliklere ait veri setinin sayısı 38 olduğu için tek gizli katmanlı YSA kullanılarak ve küçük veri seti için özelleştirildiğinde yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilebileceği gösterilmiştir. Tahminleme yapılırken yüksek dayanımlı çeliklerin düşük çevrimli yorulma özellikleri ve yorulma ömürlerinin de literatürde ve kitaplarda rahatlıkla bulunabilecek basit çekme deneyi ile elde edilen girdi parametreleri kullanılarak tahminlenebildiği de gösterilmiştir. Yapay sinir ağlarını daha kararlı ve iyi hale getirmek için deneme yanılma yöntemi ile testler yapıp farklı kombinasyonların denenmesi gerekmektedir. Bu nedenle yüksek oranlarda tahminleme doğruluğu elde etmek için yapay sinir ağlarının yapısı, kullanılan veri setine göre optimize edilmiştir. Öğrenme fonksiyonları, aktivasyon fonksiyonları, epok sayıları ve gizli nöron sayıları test edilip birbirleri ile karşılaştırılmıştır. YSA'nın performansı elde edilen en iyi sonuca göre ölçülebilir fakat önemli olan her zaman iyi sonuçlar veren kararlı yapıyı bulmaktır. Yüksek dayanımlı çeliklere ait yorulma verilerinin literatürdeki ve kitaplardaki eksikliklerden dolayı sayısının az olmasına rağmen YSA yapısının veri setine göre optimize edilmesiyle birlikte sonuçlar %99'un üzerinde tahminleme doğruluğunda elde edilmiştir. Yüksek dayanımlı çeliklere ait düşük çevrimli yorulma parametreleri ( $b$ ,  $c$ ,  $\epsilon'_f$ ,  $\sigma'_f$ ) sırasıyla %99,999, %99,999, %99,954 ve %99,999 çok yüksek doğrulukta tahmin edilmiştir. Yorulma ömürleri ise ortalama olarak %98,745 oranında doğrulukta başarıyla tahmin edilmiştir. Sonuç olarak tek gizli katmanlı yapay sinir ağlarını, küçük veri setlerine göre optimize ederek ve literatürde kolaylıkla bulunabilen basit çekme deneylerinden elde edilen girdi parametreleri ile yüksek

doğrulukta tahminlemeler elde etmenin mümkün olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca tek gizli katmanlı yapay sinir ağları kullanarak tahminleme yapmak isteyen araştırmacılar için de bazı önerilerde bulunulmuştur. Deneysel sonuçlara göre tek gizli katmanlı YSA yapısında en iyi aktivasyon fonksiyonu lojistik sigmoid (logsig), en iyi epok sayısı 100, en iyi öğrenme fonksiyonu Levenberg-Marquardt (trainlm) ve en iyi gizli nöron aralığı 5-20 olarak bulunmuştur.

Model 2 kapsamında çeşitli çeliklerin düşük çevrimli yorulma parametreleri ve geçiş yorulma ömürleri bir, iki ve üç gizli katmanlı yapay sinir ağları kullanılarak tahmin edilmiştir. Çeşitli çeliklere ait veri setinin büyüklüğü 73 olduğu için birden fazla gizli katmanlı yapı kullanarak tahmin etmeye uygun olmaktadır. Model 2’de düşük çevrimli yorulma parametreleri ile geçiş yorulma ömrü tahmin edilirken ayrıca yapay sinir ağlarının yapısı da kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Beklenildiği gibi gizli katman sayısını arttırmak tahminleme süresinde çok önemli ölçüde artışa sebep olmuştur. Ayrıca gizli nöron artışı ile tahminleme doğruluğunun artması arasında da doğrudan bir ilişki gözlemlenmemiştir. Model 2’de replikasyon yapılmamıştır. Eğer kullanılacak parametre, gizli nöron sayısı, gizli katman sayısı, aktivasyon fonksiyonu ve öğrenme fonksiyonu belirlenmişse o zaman replikasyon yapıp en iyi sonucu elde etmeye çalışmak daha mantıklı olacaktır fakat Model 2’de düşük çevrimli yorulma parametreleri ve yorulma ömürlerini tahmin etmek kadar yapay sinir ağlarının yapısının incelenmesi ve tahminleme parametreleri üzerine etkilerinin araştırılması da oldukça önemlidir. Bu nedenle Model 1’de bulunan en uygun parametre değerleri kullanılarak çeşitli aktivasyon fonksiyonları, farklı katmanlar arasındaki tahminleme süresi farkları, katmanların birbirlerine göre avantaj-dezavantajları ve farklı gizli nöron aralıkları test edilerek her gizli katman sayısı için en uygun hiper parametre değerleri belirlenmiştir. Bir, iki ve üç gizli katmanlı YSA yapısında çıktı katmanı için en uygun aktivasyon fonksiyonu hiperbolik tanjant sigmoid (tansig) ve sonrasında lineer (purelin) olmuştur. Lojistik sigmoid (logsig) ise çıktı katmanında neredeyse hiçbir zaman iyi sonuç vermemiştir. Gizli katmanlar için logsig ve pureline göre tansig daha iyi sonuçlar vermiştir. Üç gizli katmanlı yapı için en iyi kombinasyon tansig-tansig-tansig-purelin ve her gizli katman için 10-15 gizli nöron aralığı, iki gizli katmanlı yapı için tansig-logsig-purelin/tansig ve her gizli katman için 10-15 gizli nöron aralığı ve tek gizli katmanlı yapı için ise purelin-tansig ve 1-5 gizli nöron aralığı olarak bulunmuştur. Üç gizli katmanlı yapıda daha iyi regresyon değerleri ve daha

düşük MSE değerleri elde edildiği halde bir gizli katmanlı yapı ile aralarında önemli ölçüde bir fark bulunmamaktadır çünkü üç gizli katmanlı yapıda tahminleme süresi ve yapısal karmaşık önemli ölçüde arttığı için aralarındaki fark kayda değer olmamaktadır. Sonuç olarak bir gizli katmanlı yapı daha az yapısal karmaşıklığa, bilgiye, tahminleme süresine ve işlem gücüne ihtiyaç duyduğu için iki ve üç gizli katmanlı yapıda elde edilen sonuçlardaki farkı tolere etmektedir. Ayrıca üç gizli katmanlı ve iki gizli katmanlı yapı arasında regresyon ve MSE değerlerinde önemli ölçüde fark bulunmamaktadır. Düşük çevrimli yorulma parametreleri ( $b$ ,  $c$ ,  $\varepsilon'_f$ ,  $\sigma'_f$ ) ve geçiş yorulma ömürleri ( $N_t$ ) sırasıyla bir gizli katmanlı yapıda %94,4, iki gizli katmanlı yapıda %93,4 ve üç gizli katmanlı yapıda %97,1 üzerinde doğruluklarda tahmin edilmiştir. Tüm tahminleme parametreleri için ortalama olarak; tek gizli katmanlı yapı için %1,685, iki gizli katmanlı yapı için %1,389 ve üç gizli katmanlı yapı için %0,873 MAPE oranlarında uyum göstermiştir. Buradan görüleceği gibi gizli katman sayısı arttıkça tahminleme doğruluğunun da arttığı gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında düşük çevrimli yorulma parametrelerinin ve yorulma ömürlerinin yapay sinir ağları yöntemi ile farklı tipte ve büyüklükteki veri setleri göz önünde bulundurularak yüksek doğruluklarda tahmin edilebileceği kanıtlanmıştır. Basit çekme deneyi sonucunda elde edilen parametrelerin literatürde ve kitaplarda rahatlıkla bulunabilmesi sayesinde bu çalışma kapsamında kullanılan yöntem kolaylıkla uygulanabilmektedir. Girdi olarak kullanmak için düşünülen diğer parametreler literatürde kolaylıkla bulunamamakta ve çoğu yazar çalışmalarında farklı parametreler kullanmaktadır. Bu yüzden YSA ile tahminleme yapılacağı zaman yaygın olarak kullanılan ve rahatlıkla elde edilebilecek parametrelerin kullanılması daha mantıklı olacaktır. Ayrıca bu alanda ve farklı problem türlerine ilişkin tahminleme yapmak isteyen araştırmacılar için de kapsamlı bir şekilde yapay sinir ağları yapısı incelenmiş olup tahminleme parametreleri için de en uygun yapay sinir ağları yapısı ve kombinasyonları önerilmiştir. Bu sayede geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek doğrulukta sonuçlar elde ederken geleneksel yöntemlerin en büyük dezavantajları olan zaman, maliyet, bilgi birikimi, erişebilirlik ve deneyim gibi sorunlar mümkün olduğunca en aza indirilmiştir. Bu nedenle günümüzde geleneksel yöntemlerin yerine geleneksel olmayan makine öğrenmesi yöntemleri önem kazanıp literatürde yapılan çalışmaların sayısı da hızla artmaktadır.

Gelecekte düşük çevrimli yorulma parametreleri ve yorulma ömürlerinin yanı sıra enerji parametreleri de yapay sinir ağıları kullanılarak farklı optimizasyon teknikleri ve hibrit algoritmalar ile tahmin edilecektir. Kaynaklı, eklemeli imalat ile üretilmiş ve ısıl işlem görmüş farklı malzeme türleri literatürde bulunabiliyorsa daha büyük veri setleri kullanılarak bulunamıyorsa ise daha küçük veri setleri ile en kısa sürede ve en yüksek tahminleme doğruluğunda tahmin edilerek literatürde oluşan açıklıkların kapatılması planlanmaktadır.



## 8. KAYNAKLAR

Agatonovic-Kustrin, S., & Beresford, R., “Basic concepts of artificial neural network (ANN) modeling and its application in pharmaceutical research”, *J. Pharm. Biomed. Anal.*, 22(5), 717-727, (2000).

Akkuş, A., “Galvanizli ve ostenitik paslanmaz çelik sacların nokta kaynaklı bağlantılarının yorulma dayanımlarının araştırılması”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2006).

Al-kaf, H. A. G., Chia, K. S., & Alduais, N. A. M., “A comparison between single layer and multilayer artificial neural networks in predicting diesel fuel properties using near infrared spectrum”, *Pet. Sci. Technol.*, 36(6), 411-418, (2018).

Altikat, S., “Prediction of CO2 emission from greenhouse to atmosphere with artificial neural networks and deep learning neural networks”, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 18(10), 3169-3178, (2021).

Asgari, H., Chen, X., Menhaj, M. B., & Sainudiin, R., “Artificial neural network-based system identification for a single-shaft gas turbine”, *J. Eng. Gas Turbines Power*, 135(9), (2013).

Basquin, O. H., “The exponential law of endurance tests”, *In Proc Am Soc Test Mater* (Vol. 10, pp. 625-630), (1910).

BÄUMEL, A. J., & Seeger, T., “Materials data for cyclic loading”, *Mater. Sci. Monogr.*, 61, (1990).

Bayraktar, Ö., Uzun, G., Çakiroğlu, R., & Guldaz, A., “Experimental study on the 3D-printed plastic parts and predicting the mechanical properties using artificial neural networks”, *Polym. Adv. Technol.*, 28(8), 1044-1051, (2017).

Błacha, S., Węglowski, M. S., Dymek, S., & Kopyściański, M., “Microstructural and mechanical characterization of electron beam welded joints of high strength S960QL and Weldox 1300 steel grades”, *Arch. Metall. Mater.*, 62, (2017).

Branco, R., Costa, J. D., & Antunes, F. V., “Low-cycle fatigue behaviour of 34CrNiMo6 high strength steel”, *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 58(1), 28-34, (2012).

Branco, R., Costa, J. D., Antunes, F. V., & Perdigão, S., “Monotonic and cyclic behavior of DIN 34CrNiMo6 tempered alloy steel”, *Metals*, 6(5), 98. (2016).

Branco, R., Costa, J. D., Berto, F., Razavi, S. M. J., Ferreira, J. A. M., Capela, C., ... & Antunes, F., “Low-cycle fatigue behaviour of AISI 18Ni300 maraging steel produced by selective laser melting”, *Metals*, 8(1), 32. (2018).

Brownlee, J., “What is the Difference Between a Batch and an Epoch in a Neural Network”, *Machine Learning Mastery*, 20, (2018).

Burghardt, R., Wächter, M., Masendorf, L., & Esderts, A., “Estimation of elastic–plastic notch strains and stresses using artificial neural networks”, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 44(10), 2718-2735, (2021).

Celin, R., Kafexhiu, F., Klančnik, G., & Burja, J., “Properties of the Simulated Coarse-Grained Microstructure of Quenched and Tempered High-Strength Steel”, *Mater. Technol.*, 55(1), 115-120, (2021).

Chen, H., Lu, F., & He, B., “Topographic property of backpropagation artificial neural network: From human functional connectivity network to artificial neural network”, *Neurocomputing*, 418, 200-210, (2020).

Chen, J., & Liu, Y., “Fatigue modeling using neural networks: A comprehensive review”, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 45(4), 945-979, (2022).

Coelho, P., & Bromage, T. G., The Challenges in Engineering and Testing Dental Bioceramics. In High strength ceramics: Interdisciplinary perspectives. *Quintessence Publishing*, (2014).

Coffin Jr, L. F., “A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal”, *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.*, New York, 76, 931-950, (1954).

Collins, W., & Tissot, P., “An artificial neural network model to predict thunderstorms within 400 km<sup>2</sup> South Texas domains”, *Meteorol. Appl.*, 22(3), 650-665, (2015).

Costa, J. D., Ferreira, J. M., & Ramalho, A. L., “Fatigue and fretting fatigue of ion-nitrided 34CrNiMo6 steel”, *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 35(1), 69-79, (2001).

Cottell, G. A., “Fatigue failures, with special reference to fracture characteristics”, *J. Fail. Anal. Prev.*, 1-27, (2022).

Crews, J. H., & Hardrath, H. F., “A study of cyclic plastic stresses at a notch root: Investigation undertaken as a starting point for relating the local plastic stresses to nominal loading”, *Exp. Mech.*, 6, 313-320, (1966).

- Darwin, C., "On the origin of species", 1859, *Routledge*, (2004).
- Dayhoff, J. E., & DeLeo, J. M., "Artificial neural networks: opening the black box" *Cancer: Interdisciplinary International Journal of the American Cancer Society*, 91(S8), 1615-1635, (2001).
- Dixon, W. J., & Mood, A. M., "A method for obtaining and analyzing sensitivity data", *J. Am. Stat. Assoc.*, 43(241), 109-126, (1948).
- Dorigo, M., Birattari, M., & Stutzle, T., "Ant colony optimization", *IEEE Comput. Intell. Mag.*, 1(4), 28-39, (2006).
- Dowling, N. E., "Mean stress effects in stress-life and strain-life fatigue", *SAE Technical Paper*, 32(12), 1004-1019, (2004).
- Engelmaier, W., "A method for the determination of ductility for thin metallic materials", *J. ASTM Int.*, (1982).
- Ewing, J. A., & Humfrey, J. C. W., VI. "The fracture of metals under repeated alternations of stress", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 200(321-330), 241-250, (1903).
- Feng, L., & Qian, X., "Low cycle fatigue test and enhanced lifetime estimation of high-strength steel S550 under different strain ratios", *Mar. struct.*, 61, 343-360. (2018).
- Fleming, S., "Fatigue Crack Growth for Typical CV Siderail Hole-making Processes Applied to Heat-treated Steel (MET1123) and Ultra High Strength Low Alloy Steel (120XF)", (No. 2009-01-2863). *SAE Technical Paper*, (2009).
- Genel, K., "Application of artificial neural network for predicting strain-life fatigue properties of steels on the basis of tensile tests", *Int. J. Fatigue*, 26(10), 1027-1035, (2004).
- Ghajar, R., Naserifar, N., Sadati, H., & ALIZADEH K, J., "A neural network approach for predicting steel properties characterizing cyclic Ramberg–Osgood equation", *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 34(7), 534-544, (2011).
- Glodež, S., Knez, M., Jezernik, N., & Kramberger, J., "Fatigue and fracture behaviour of high strength steel S1100Q", *Eng. Fail. Anal.*, 16(7), 2348-2356, (2009).

- Gothivarekar, S., Coppieters, S., Talemi, R., & Debruyne, D., “Effect of bending process on the fatigue behaviour of high strength steel”, *J. Constr. Steel Res.*, 182, 106662, (2021).
- Han, F., Liu, C., Yuan, F., Zhang, Y., Ali, M., Gu, H., & Li, G., “Microscopic characterization on low cycle fatigue behavior at room temperature of Zircaloy-4 alloy with recrystallized microstructure”, *J. Alloys Compd.*, 778, 318-326, (2019).
- Hojjat, M., “Modeling heat transfer of non-Newtonian nanofluids using hybrid ANN-Metaheuristic optimization algorithm”, *J. Part. Sci. Technol.*, 3(4), 233-241, (2017).
- Holman, A. E. L., “Fatigue of a spring steel with varying levels of non-metallic inclusions”, Research Thesis, *University of Plymouth*, (2001).
- Hu, Z., Yuan, Y., Li, X., Tu, Z., Dacres, O. D., Zhu, Y., ... & Yao, H., “Yield prediction of “Thermal-dissolution based carbon enrichment treatment on biomass wastes through coupled model of artificial neural network and AdaBoost”, *Bioresour. Technol.*, 343, 126083, (2022).
- Huo, J., You, X., Hu, J., & Zhuang, Z., “An elasto-plastic damage accumulation model for fatigue life prediction of ductile metals at the yield stress”, *Int. J. Damage Mech.*, 31(3), 464-476, (2022).
- Janežič, M., Klemenc, J., & Fajdiga, M., “A neural-network approach to describe the scatter of cyclic stress–strain curves”, *Mater. Des.*, 31(1), 438-448, (2010).
- Kalayci, C. B., Karagoz, S., & Karakas, Ö., “Soft computing methods for fatigue life estimation: A review of the current state and future trends”, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 43(12), 2763-2785, (2020).
- Kalayci, C. B., Karagöz, S., & Karakaş, Ö., “Bee colony intelligence in fatigue life estimation of simulated magnesium alloy welds”, *Int. J. Fatigue*, 127, 36-44, (2019).
- Kang, H. S., “Backpropagation in H17 in medical informatics to analysis speed of sending data”, *J. Comput. Sci. Technol.*, 13(D3), 1-3, (2013).
- Karaboga, D., “An idea based on honey bee swarm for numerical optimization”, (Vol. 200, pp. 1-10). Technical report-tr06, Erciyes university, engineering faculty, computer engineering department, (2005).

Karademir, I., Celik, M. B., Husem, F., Maleki, E., Amanov, A., & Unal, O., “Effects of constrained groove pressing, severe shot peening and ultrasonic nanocrystal surface modification on microstructure and mechanical behavior of S500MC high strength low alloy automotive steel”, *Appl. Surf. Sci.*, 538, 147935, (2021).

Karakas, O., Morgenstern, C., Sonsino, C. M., Vogt, M., & Dilger, K., “Application of the micro-support concept for assessment of the fatigue strength of the welded joints of the magnesium wrought alloy AZ31”, *Welding and Cutting*, 3, 176, (2007).

Karakas, Ö., & Tomasella, A., “Fatigue life estimation of non-penetrated butt weldments in light metals by artificial neural network approach”, *Materialwiss. Werkstofftech.*, 44(10), 847-855, (2013).

Karakas, Ö., “Consideration of mean-stress effects on fatigue life of welded magnesium joints by the application of the Smith–Watson–Topper and reference radius concepts”, *Int. J. Fatigue*, 49, 1-17, (2013).

Karakas, Ö., “Estimation of fatigue life for aluminium welded joints with the application of artificial neural networks”, *Materialwiss. Werkstofftech.*, 42(10), 888-893, (2011).

Karakas, Ö., Canyurt, O. E., & Gulsoz, A., “Fatigue strength estimation of butt welded joints in magnesium AZ31 alloy using the genetic algorithm”, *Materialwiss. Werkstofftech.: Entwicklung, Fertigung, Prüfung, Eigenschaften und Anwendungen technischer Werkstoffe*, 39(3), 234-240. (2008).

Karakaş, Ö., Baumgartner, J., & Susmel, L., “On the use of a fictitious notch radius equal to 0.3 mm to design against fatigue welded joints made of wrought magnesium alloy AZ31”, *Int. J. Fatigue*, 139, 105747, (2020).

Karakaş, Ö., Leitner, M., & Tüzün, N., “Application of critical distance approach for fatigue assessment of welded and HFMI-treated steel joints”, *Int. J. Fatigue*, 154, 106534, (2022).

Karsoliya, S., “Approximating number of hidden layer neurons in multiple hidden layer BPNN architecture”, *SSRG Int. J. Eng. Trends Technol.*, 3(6), 714-717, (2012).

Kaya, M. T., SAE 4140 (42CrMo4) “SAE 4140 (42CrMo4) Islah çeliğinin bileşik gerilmeli yorulma davranışının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yozgat, (2016).

Ke, J., & Liu, X., “Empirical analysis of optimal hidden neurons in neural network modeling for stock prediction”, *In 2008 IEEE Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application* (Vol. 2, pp. 828-832), IEEE, (2008, December).

Kennedy, J., & Eberhart, R., “Particle swarm optimization”, *In Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks* (Vol. 4, pp. 1942-1948), IEEE, (1995, November).

Khan, M. U. H., “Fatigue strength of laser CO<sub>2</sub>, fiber laser and plasma cut edges made of S690QC and S1100”, Master’s Thesis, *LUT University*, (2018).

Kim, K. S., Chen, X., Han, C., & Lee, H. W., “Estimation methods for fatigue properties of steels under axial and torsional loading”, *Int. J. Fatigue*, 24(7), 783-793, (2002).

Landgraf, R. W., “Cumulative fatigue damage under complex strain histories”, *J. ASTM Int.*, (1971).

Landgraf, R. W., “Cyclic deformation and fatigue behavior of hardened steels”, Ph.D Thesis, *University of Illinois at Urbana-Champaign*, (1969).

Lei, X., Yuan, L., Peng, L., Sun, C., Wei, B., & Wei, Y., “Fatigue endurance limit and crack front evolution in metallic glass”, *Int. J. Fatigue*, 143, 106004, (2021).

Li, J., Yang, Z., Qian, G., & Berto, F., “Machine learning based very-high-cycle fatigue life prediction of Ti-6Al-4V alloy fabricated by selective laser melting”, *Int. J. Fatigue*, 158, 106764, (2022).

Liu, X., Shangguan, W. B., & Zhao, X., “Residual fatigue life prediction of natural rubber components under variable amplitude loads”, *Int. J. Fatigue*, 165, 107199, (2022).

Maleki, E., Unal, O., & Kashyzadeh, K. R., “Fatigue behavior prediction and analysis of shot peened mild carbon steels”, *Int. J. Fatigue*, 116, 48-67, (2018).

Maleki, E., Unal, O., Seyedi Sahebari, S. M., Reza Kashyzadeh, K., & Danilov, I., “Application of deep neural network to predict the high-cycle fatigue life of AISI 1045 Steel coated by industrial coatings”, *J. Mar. Sci. Eng.*, 10(2), 128, (2022).

Mann, J. Y., “Bibliography on the Fatigue of Materials”, *Components and Structures: Volume 4* (Vol. 4), Elsevier, (2013).

Manson, S. S., “Behavior of materials under conditions of thermal stress”, (Vol. 2933). *National Advisory Committee for Aeronautics*, (1953).

Manson, S. S., “Fatigue-a complex subject-some simple approximations”, (No. *NASA-TM-X-52084*), (1965).

Men, H., Li, X., Wang, J., & Gao, J., “Appliances of neural networks to identify gases based on electronic nose”, In *2007 IEEE International Conference on Control and Automation* (pp. 2699-2704), IEEE, (2007, May).

Mikkola, E., Marquis, G., Lehto, P., Remes, H., & Hänninen, H., “Material characterization of high-frequency mechanical impact (HFMI)-treated high-strength steel”, *Mater. Des.*, 89, 205-214, (2016).

Mirjalili, S., & Lewis, A., “The whale optimization algorithm”, *Adv. Eng. Software*, 95, 51-67, (2016).

Mitchell, M. R., “*Fundamentals of modern fatigue analysis for design*”, (1996).

Moarrefzadeh, A., Shahrooi, S., & Azizpour, M. J., “Evaluating the Effects of Overload and Welding Residual Stress in Fatigue Crack Propagation”, *ADMT Journal*, 12(1), 85-93. (2019).

Mohamed, A. A., Neilson, R., MacConnell, P., Renton, N. C., & Deans, W., “Monitoring of fatigue crack stages in a high carbon steel rotating shaft using vibration”, *Procedia Eng.*, 10, 130-135, (2011).

Morrow, J., “Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals. In Internal friction, damping, and cyclic plasticity”, (pp. 45-87). *J. ASTM Int.*, (1965, July).

Morrow, J., “Fatigue properties of metals, *Fatigue design handbook*”, 4, 21-30, (1968).

Muñoz-Abella, B., Rubio, L., & Rubio, P., “Stress intensity factor estimation for unbalanced rotating cracked shafts by artificial neural networks”, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 38(3), 352-367, (2015).

Muralidharan, U., & Manson, S. S., “A modified universal slopes equation for estimation of fatigue characteristics of metals”, (1988).

Nejad, R. M., Sina, N., Ma, W., Liu, Z., Berto, F., & Gholami, A., “Optimization of fatigue life of pearlitic Grade 900A steel based on the combination of genetic algorithm and artificial neural network”, *Int. J. Fatigue*, 162, 106975, (2022).

Ong, J. H., “An improved technique for the prediction of axial fatigue life from tensile data”, *Int. J. Fatigue*, 15(3), 213-219, (1993).

Pareek, V. K., Brungs, M. P., Adesina, A. A., & Sharma, R., “Artificial neural network modeling of a multiphase photodegradation system”, *J. Photochem. Photobiol., A*, 149(1-3), 139-146, (2002).

Park, J. H., & Song, J. H., “New estimation method of fatigue properties of aluminum alloys”, *J. Eng. Mater. Technol.*, 125(2), 208-214, (2003).

Pujol, J. C. F., & Pinto, J. M. A., “A neural network approach to fatigue life prediction”, *Int. J. Fatigue*, 33(3), 313-322, (2011).

Raghu, S., & Sriraam, N., “Optimal configuration of multilayer perceptron neural network classifier for recognition of intracranial epileptic seizures”, *Expert Syst. Appl.*, 89, 205-221, (2017).

Ramberg, W., & Osgood, W. R., “Description of stress-strain curves by three parameters”, (1943).

Rezaeian Zadeh, M., Amin, S., Khalili, D., & Singh, V. P., “Daily outflow prediction by multi layer perceptron with logistic sigmoid and tangent sigmoid activation functions”, *Water Resour. Manage.*, 24, 2673-2688, (2010).

Riadi, I., & Muhammad, A. W., “Network packet classification using neural network based on training function and hidden layer neuron number variation”, *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, 8(6), (2017).

Roessle, M. L., & Fatemi, A., “Strain-controlled fatigue properties of steels and some simple approximations”, *Int. J. Fatigue*, 22(6), 495-511, (2000).

Rubio, P., Muñoz-Abella, B., & Rubio, L., “Neural approach to estimate the stress intensity factor of semi-elliptical cracks in rotating cracked shafts in bending”, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 41(3), 539-550, (2018).

Sabelkin, V., Mall, S., & Misak, H., “Corrosion fatigue of coated AISI 4340 high strength steel with dent damage”, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 41(3), 653-662, (2018).

Saemi, M., Ahmadi, M., & Varjani, A. Y., “Design of neural networks using genetic algorithm for the permeability estimation of the reservoir”, *J. Pet. Sci. Eng.*, 59(1-2), 97-105, (2007).

Samuel, A. L., “Some studies in machine learning using the game of checkers”, *IBM J. Res. Dev.*, 3(3), 210-229, (1959).



Santos, C. F. G. D., & Papa, J. P., “Avoiding overfitting: A survey on regularization methods for convolutional neural networks”, *ACM Comput. Surv. (CSUR)*, 54(10s), 1-25, (2022).

Sazli, M. H., “A brief review of feed-forward neural networks”, *Communications Faculty of Sciences University of Ankara Series A2-A3 Physical Sciences and Engineering*, 50(01), (2006).

Sekeroglu, B., & Dimililer, K., “Review and analysis of hidden neuron number effect of shallow backpropagation neural networks”, *Neural Netw. World*, 30(2), 97-112, (2020).

Sharma, K., & Kang, H., “Backpropagation in H17 in medical informatics to analysis speed of sending data” *Global Journal of Computer Science and Technology Neural and Artificial Intelligence*, 13(3), (2013).

Sharma, S., Sharma, S., & Athaiya, A., “Activation functions in neural networks”, *Towards Data Sci*, 6(12), 310-316, (2017).

Shen, Z., Yang, H., & Zhang, S., “Neural network approximation: Three hidden layers are enough”, *Neural Networks*, 141, 160-173, (2021).

Shinde, T., & Dhokey, N. B., “Influence of tertiary carbides on improving fatigue limit of H13 die steels”, *Metall. Microstruct. Anal.*, 6, 398-406, (2017).

Sibi, P., Jones, S. A., & Siddarth, P., “Analysis of different activation functions using back propagation neural networks” *J. Theor. Appl. Inf. Technol.*, 47(3), 1264-1268, (2013).

Ślęzak, T., & Śnieżek, L., “A comparative LCF study of S960QL high strength steel and S355J2 mild steel”, *Procedia Eng.*, 114, 78-85, (2015).

Smith, K., “A stress-strain function for the fatigue of metals”, *J. Mater.*, 5, 767-778, (1970).

Sonsino, C. M., “Fatigue design for powder metallurgy”, *Powder Metall.*, 33(3), 235-245, (1990).

Sowards, J. W., Pfeif, E. A., Connolly, M. J., McColskey, J. D., Miller, S. L., Simonds, B. J., & Fekete, J. R., “Low-cycle fatigue behavior of fiber-laser welded, corrosion-resistant, high-strength low alloy sheet steel”, *Mater. Des.*, 121, 393-405, (2017).

Sulaiman, S. I., Rahman, T. A., & Musirin, I., “Partial evolutionary ANN for output prediction of a grid-connected photovoltaic system”, *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, 1(1), 40-45, (2009).

Suresh, S., “Fatigue of materials”, *Cambridge university press*, (1998).

Suvvari, N., & Srinadh, K. S., “Artificial Neural Network Technique as a Method to Evaluate the Strain-Life Fatigue Properties of Steel Weldments on the Basis of Tensile Tests”, *ICARMMIEM-2014*, (2014).

Tauscher, H., Güleç, Ş., & Aran, A., “Çelik ve dökme demirlerin yorulma dayanımı: malzeme davranışı, biçim etkisi ve hesaplama yöntemleri”, *Tübitak*, (1983).

Tello, L., Castejon, L., Malon, H., Valladares, D., Luque, P., Mantaras, D. A., ... & Cuartero, J., “Development of a fatigue life prediction methodology for welded steel semi-trailer components based on a new criterion”, *Eng. Fail. Anal.*, 108, 104268, (2020).

Tomasella, A., El Dsoki, C., Hanselka, H., & Kaufmann, H., “A computational estimation of cyclic material properties using artificial neural networks”, *Procedia Eng.*, 10, 439-445, (2011).

Tran, T. T. K., Lee, T., & Kim, J. S., “Increasing neurons or deepening layers in forecasting maximum temperature time series?”, *Atmosphere*, 11(10), 1072. (2020).

Tucker, L. E., Landgraf, R. W., & Brose, W. R., “Technical report on fatigue properties”, *J1099, SAE*, (1979).

Turp, S. M., Eren, B., & Ates, A., “Prediction of adsorption efficiency for the removal of nickel(II) ions by zeolite using artificial neural network(ANN) approach”, *Fresenius Environ. Bull.*, 20(12), 3158-3165, (2011).

Umezawa, O., Nagai, K., & Ishikawa, K., “Transmission electron microscopy study of high cycle fatigue deformation in Ti-5Al-2.5 Sn extra-low interstitial alloy at cryogenic temperatures”, *Mater. Sci. Eng., A*, 129(2), 223-227. (1990).

Uzair, M., & Jamil, N., “Effects of hidden layers on the efficiency of neural networks”, *In 2020 IEEE 23rd international multitopic conference (INMIC)*, (pp. 1-6), IEEE, (2020, November).

Van Swam, L. F., Pelloux, R. M., & Grant, N. J., “Fatigue behavior of maraging steel 300”, *Metall. Trans. A*, 6, 45-54, (1975).

Wang, S., Wei, C., Wei, Y., Wang, W., & Wu, F., “A model of injury severity prediction in traffic accident based on ga-bp neural network”, *In CICTP 2019*, (pp. 2470-2481), (2019).

Xia, M., Sreenivasan, N., Lawson, S., Zhou, Y., & Tian, Z., “A comparative study of formability of diode laser welds in DP980 and HSLA steels”, (2007).

Xu, T., Ding, S., Zhou, H., & Li, G., “Machine learning-based efficient stress intensity factor calculation for aeroengine disk probabilistic risk assessment under polynomial stress fields”, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 45(2), 451-465, (2022).

Yang, X. S., “A new metaheuristic bat-inspired algorithm. Nature inspired cooperative strategies for optimization”, (*NICSO 2010*), 65-74, (2010).

Yaşar, M., “Dizel otomobil pompa milinin yorulma kırılması analizi”, 8. *Uluslararası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı*, İstanbul, 544(553), 7-9, (2007).

Yetilmezsoy, K., & Demirel, S., “Artificial neural network (ANN) approach for modeling of Pb (II) adsorption from aqueous solution by Antep pistachio (*Pistacia Vera L.*) shells”, *J. Hazard. Mater.*, 153(3), 1288-1300, (2008).

Yoh, E. G., Kim, Y. I., Lee, Y. S., Park, H. J., & Na, K. H., “Integrated analysis for die design including brittle damage evolution”, *J. Mater. Process. Technol.*, 130, 647-652, (2002).

Zarandi, E. P., & Skallerud, B. H., “Cyclic behavior and strain energy-based fatigue damage analysis of mooring chains high strength steel”, *Mar. struct.*, 70, 102703, (2020).

Zarei, M. J., Ansari, H. R., Keshavarz, P., & Zerafat, M. M., “Prediction of pool boiling heat transfer coefficient for various nano-refrigerants utilizing artificial neural networks”, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 139, 3757-3768, (2020).

Zhang, J., Zhu, J., Guo, W., & Guo, W., “A machine learning-based approach to predict the fatigue life of three-dimensional cracked specimens”, *Int. J. Fatigue*, 159, 106808, (2022).

Zhang, S., Liu, H. X., Gao, D. T., & Wang, W., “Surveying the methods of improving ANN generalization capability”, *In Proceedings of the 2003 International Conference on Machine Learning and Cybernetics (IEEE Cat. No. 03EX693)*, (Vol. 2, pp. 1259-1263). IEEE, (2003, November).

Zhou, K., Sun, X., Shi, S., Song, K., & Chen, X., “Machine learning-based genetic feature identification and fatigue life prediction”, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 44(9), 2524-2537, (2021).

Zou, L., Sun, Y., & Yang, X., “An entropy-based neighborhood rough set and PSO-SVRM model for fatigue life prediction of titanium alloy welded joints”, *Entropy*, 21(2), 117, (2019).

# **EKLER**

## 9. EKLER

### EK A Yüksek Dayanımlı Çeliklere Ait Girdi ve Çıktı Parametreleri

| YDÇ                              | E (MPa) | Uzama (%) | BHN (kgf/mm2) | $\sigma_u$ (MPa) | $\sigma_y$ (MPa) | b       | c        | $\sigma'_f$ (MPa) | $\epsilon'_f$ | Kaynak  |
|----------------------------------|---------|-----------|---------------|------------------|------------------|---------|----------|-------------------|---------------|---|
| S1100Q                           | 194889  | 10        | 415           | 1450             | 1148             | -0,0997 | -0,978   | 2076              | 9,93          | Celin ve diğ. (2021)<br>Glodež ve diğ. (2009)           |
| 34CrNiMo6                        | 209800  | 18        | 348           | 1035             | 967              | -0,0545 | -0,6059  | 1183,7            | 0,4697        | Costa ve diğ. (2001)<br>Branco ve diğ. (2012)           |
| S355MC                           | 217193  | 19        | 199           | 624,52           | 359,7            | -0,09   | -0,56    | 1039,85           | 0,425         | Tello ve diğ. (2020)                                    |
| S500MC                           | 209000  | 18        | 212           | 616,3            | 509,8            | -0,113  | -0,54    | 1674,8            | 0,237         | Karademir ve diğ. (2021)<br>Gothivarekar ve diğ. (2021) |
| S700MC Base                      | 211000  | 13        | 277           | 850              | 700              | -0,064  | -0,961   | 1174              | 9,643         | Mikkola ve diğ. (2016)                                  |
| S960QL                           | 220000  | 45,6      | 348           | 1070             | 974              | -0,107  | -0,728   | 1976              | 0,5421        | Blacha ve diğ. (2017)<br>Ślęzak ve Śniezek (2015)       |
| S550                             | 209000  | 15        | 419           | 734              | 640              | -0,164  | -0,60078 | 2142              | 0,43858       | Feng ve Qian (2018)                                     |
| HSLA Base Metal                  | 211000  | 32,1      | 163           | 380              | 470              | -0,059  | -0,566   | 692               | 0,296         | Sowards ve diğ. (2017)<br>Xia ve diğ. (2007)            |
| SAE 1141 (AIFG) A1               | 216000  | 40        | 223           | 771              | 457              | -0,097  | -0,464   | 1168              | 0,257         | Roessle ve Fatemi (2000)                                |
| SAE 1141 (AIFG) A2               | 227000  | 32        | 277           | 925              | 814              | -0,066  | -0,514   | 1127              | 0,309         | Roessle ve Fatemi (2000)                                |
| SAE 1141 (NbFG) A3               | 220000  | 35        | 199           | 695              | 418              | -0,096  | -0,462   | 1117              | 0,264         | Roessle ve Fatemi (2000)                                |
| SAE 1141 (NbFG) A4               | 217000  | 32        | 240           | 802              | 602              | -0,079  | -0,508   | 1080              | 0,361         | Roessle ve Fatemi (2000)                                |
| SAE 1141 (VFG) A5                | 214000  | 32        | 216           | 725              | 450              | -0,102  | -0,529   | 1255              | 0,43          | Roessle ve Fatemi (2000)                                |
| SAE 1141 (VFG) A6                | 215000  | 34        | 250           | 797              | 610              | -0,086  | -0,555   | 1162              | 0,534         | Roessle ve Fatemi (2000)                                |
| SAE 1141 (VFG) A7                | 220000  | 30        | 229           | 789              | 493              | -0,103  | -0,581   | 1326              | 0,602         | Roessle ve Fatemi (2000)                                |
| SAE 1038 B1                      | 201000  | 44        | 163           | 582              | 331              | -0,107  | -0,481   | 1043              | 0,309         | Roessle ve Fatemi (2000)                                |
| SAE 1038 B2                      | 219000  | 38        | 183           | 652              | 359              | -0,098  | -0,44    | 1004              | 0,202         | Roessle ve Fatemi (2000)                                |
| SAE 1038 B3                      | 219000  | 45        | 191           | 649              | 410              | -0,097  | -0,46    | 1009              | 0,225         | Roessle ve Fatemi (2000)                                |
| SAE 1541 C1                      | 205000  | 39        | 180           | 783              | 475              | -0,135  | -0,548   | 1622              | 0,515         | Roessle ve Fatemi (2000)                                |
| SAE 1541 C2                      | 205000  | 29        | 191           | 906              | 475              | -0,083  | -0,557   | 1044              | 0,513         | Roessle ve Fatemi (2000)                                |
| SAE 1050 (M) D1                  | 211000  | 43        | 203           | 821              | 465              | -0,126  | -0,512   | 989               | 0,433         | Roessle ve Fatemi (2000)                                |
| SAE 1050 (M) D2                  | 203000  | 18        | 216           | 829              | 460              | -0,075  | -0,502   | 1094              | 0,309         | Roessle ve Fatemi (2000)                                |
| SAE 1090 E1                      | 203000  | 9         | 255           | 1090             | 735              | -0,091  | -0,496   | 1310              | 0,25          | Roessle ve Fatemi (2000)                                |
| SAE 1090 (M) E2                  | 203000  | 14        | 348           | 1388             | 950              | -0,106  | -0,777   | 1945              | 2,58          | Roessle ve Fatemi (2000)                                |
| SAE 1090 E3                      | 217000  | 67        | 308           | 1147             | 650              | -0,12   | -0,6     | 1878              | 0,7           | Roessle ve Fatemi (2000)                                |
| SAE 1090 E4                      | 203000  | 7         | 277           | 1251             | 760              | -0,12   | -0,642   | 1928              | 0,734         | Roessle ve Fatemi (2000)                                |
| SAE 1090 (M) E5                  | 203000  | 18        | 271           | 1124             | 765              | -0,093  | -0,683   | 1547              | 1,57          | Roessle ve Fatemi (2000)                                |
| 120XF HSLA                       | 197880  | 13        | 271           | 868              | 821              | -0,089  | -0,743   | 1494              | 0,761         | Fleming (2009)  |
| Mooring Chain Steel Grade R4     | 207000  | 7         | 300           | 1010             | 843              | -0,0449 | -0,6508  | 946               | 0,725         | Zarandi ve Skallerud (2020)                             |
| DIN 34CrNiMo6 Q+T 875,660        | 210000  | 18        | 430           | 1035             | 967              | -0,0545 | -0,6059  | 1183,7            | 0,4697        | Branco ve diğ. (2016)                                   |
| DIN 34CrNiMo6 Q+T 845,650        | 210000  | 20        | 419           | 1020             | 860              | -0,0545 | -0,6059  | 1183,7            | 0,4697        | Branco ve diğ. (2016)                                   |
| S1100                            | 210000  | 10        | 262           | 1200             | 1100             | -0,09   | -0,56    | 1194              | 0,467         | Khan (2018)   |
| 18Ni300                          | 193000  | 6         | 341           | 1150             | 915              | -0,1311 | -1,0941  | 1798,73           | 0,32784       | Branco ve diğ. (2018)                                   |
| Maraging Steel 300 Annealed 820C | 180000  | 12        | 290           | 1000             | 952              | -0,045  | -0,85    | 1404              | 2,4           | Van Swam ve diğ. (1975)                                 |
| Maraging Steel 300 Aged 480C     | 180000  | 12        | 504           | 1916             | 1868             | -0,09   | -0,75    | 2070              | 1,3           | Van Swam ve diğ. (1975)                                 |
| % 18Ni300 Maraging               | 180000  | 17        | 469           | 2000             | 1930             | -0,065  | -0,75    | 2240              | 0,5           | Landgraf (1969)   |
| % 18Ni250 Maraging               | 180000  | 17        | 456           | 1860             | 1790             | -0,063  | -0,79    | 2137              | 0,85          | Landgraf (1969)   |
| % 18Ni200 Maraging               | 186000  | 17        | 402           | 1520             | 1480             | -0,05   | -0,62    | 1890              | 0,75          | Landgraf (1969)   |

## EK B Çeşitli Çeliklere Ait Girdi ve Çıktı Parametre Değerleri

| Çelik     | E<br>(GPa) | RA<br>(%) | $\sigma_u$<br>(MPa) | BHN<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_y$<br>(MPa) | b      | c      | $\sigma'_f$<br>(MPa) | $\epsilon'_f$ | N <sub>i</sub><br>(Çevrim) | Kaynak                   |
|-----------|------------|-----------|---------------------|-------------------------------|---------------------|--------|--------|----------------------|---------------|----------------------------|--------------------------|
| 1141      | 217        | 54        | 802                 | 241                           | 602                 | -0,079 | -0,508 | 1080                 | 0,361         | 10862                      | Roessle ve Fatemi (2000) |
| 1141      | 214        | 49        | 725                 | 217                           | 450                 | -0,102 | -0,529 | 1255                 | 0,43          | 11674                      | Roessle ve Fatemi (2000) |
| 1141      | 215        | 58        | 797                 | 252                           | 610                 | -0,086 | -0,555 | 1162                 | 0,534         | 8958                       | Roessle ve Fatemi (2000) |
| 1141      | 220        | 47        | 789                 | 229                           | 493                 | -0,103 | -0,58  | 1326                 | 0,602         | 7776                       | Roessle ve Fatemi (2000) |
| 1038      | 201        | 54        | 582                 | 163                           | 331                 | -0,107 | -0,48  | 1043                 | 0,309         | 28664                      | Roessle ve Fatemi (2000) |
| 1038      | 219        | 53        | 652                 | 185                           | 359                 | -0,098 | -0,44  | 1004                 | 0,202         | 32075                      | Roessle ve Fatemi (2000) |
| 1038      | 219        | 67        | 649                 | 195                           | 410                 | -0,097 | -0,46  | 1009                 | 0,225         | 22446                      | Roessle ve Fatemi (2000) |
| 1541      | 205        | 55        | 783                 | 180                           | 475                 | -0,135 | -0,548 | 1622                 | 0,515         | 12304                      | Roessle ve Fatemi (2000) |
| 1541      | 205        | 42        | 906                 | 195                           | 475                 | -0,083 | -0,557 | 1044                 | 0,513         | 8415                       | Roessle ve Fatemi (2000) |
| 1050      | 211        | 50        | 821                 | 205                           | 465                 | -0,126 | -0,512 | 989                  | 0,433         | 61820                      | Roessle ve Fatemi (2000) |
| 1050      | 203        | 34        | 829                 | 220                           | 460                 | -0,075 | -0,502 | 1094                 | 0,309         | 6563                       | Roessle ve Fatemi (2000) |
| 1090      | 203        | 14        | 1090                | 259                           | 735                 | -0,091 | -0,496 | 1310                 | 0,25          | 4172                       | Roessle ve Fatemi (2000) |
| 1090      | 217        | 22        | 1147                | 309                           | 650                 | -0,12  | -0,6   | 1878                 | 0,7           | 4717                       | Roessle ve Fatemi (2000) |
| 1090      | 203        | 14        | 1251                | 279                           | 760                 | -0,12  | -0,642 | 1928                 | 0,734         | 2070                       | Roessle ve Fatemi (2000) |
| 1141      | 216        | 57        | 771                 | 223                           | 457                 | -0,097 | -0,464 | 1168                 | 0,257         | 18548                      | Roessle ve Fatemi (2000) |
| 1141      | 227        | 59        | 925                 | 277                           | 814                 | -0,066 | -0,514 | 1127                 | 0,309         | 5053                       | Roessle ve Fatemi (2000) |
| 1141      | 220        | 53        | 695                 | 199                           | 418                 | -0,096 | -0,462 | 1117                 | 0,264         | 24402                      | Roessle ve Fatemi (2000) |
| A538Aa    | 185        | 67        | 1515                | 405                           | 1482                | -0,065 | -0,62  | 1655                 | 0,3           | 280                        | Tucker ve diğ. (1975)    |
| A538Ba    | 185        | 56        | 1860                | 460                           | 1793                | -0,071 | -0,71  | 2135                 | 0,8           | 380                        | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 1541F     | 206        | 49        | 951                 | 290                           | 889                 | -0,076 | -0,65  | 1276                 | 0,68          | 1794                       | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 1541F     | 206        | 60        | 889                 | 260                           | 786                 | -0,071 | -0,65  | 1276                 | 0,93          | 2871                       | Tucker ve diğ. (1975)    |
| A538Ca    | 180        | 55        | 200                 | 480                           | 1931                | -0,07  | -0,75  | 2240                 | 0,6           | 149                        | Tucker ve diğ. (1975)    |
| AM-350b   | 180        | 20        | 1905                | 496                           | 1861                | -0,102 | -0,42  | 2690                 | 0,1           | 197                        | Tucker ve diğ. (1975)    |
| H-11      | 205        | 33        | 2585                | 660                           | 2034                | -0,077 | -0,74  | 3170                 | 0,08          | 6                          | Tucker ve diğ. (1975)    |
| RQC-100b  | 205        | 43        | 940                 | 290                           | 896                 | -0,07  | -0,69  | 1240                 | 0,66          | 968                        | Tucker ve diğ. (1975)    |
| RQC-100b  | 205        | 67        | 930                 | 290                           | 883                 | -0,07  | -0,69  | 1240                 | 0,66          | 968                        | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 10B62     | 195        | 38        | 1640                | 430                           | 1510                | -0,067 | -0,56  | 1780                 | 0,32          | 680                        | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 1005-1009 | 205        | 73        | 360                 | 90                            | 269                 | -0,09  | -0,43  | 580                  | 0,15          | 58991                      | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 1005-1009 | 205        | 66        | 470                 | 125                           | 448                 | -0,059 | -0,51  | 515                  | 0,3           | 20158                      | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 1005-1009 | 200        | 64        | 415                 | 125                           | 400                 | -0,073 | -0,41  | 540                  | 0,11          | 29957                      | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 1005-1009 | 200        | 80        | 345                 | 90                            | 262                 | -0,109 | -0,39  | 640                  | 0,1           | 104405                     | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 1015      | 205        | 68        | 415                 | 80                            | 228                 | -0,11  | -0,64  | 825                  | 0,95          | 15010                      | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 1020      | 205        | 62        | 440                 | 108                           | 262                 | -0,12  | -0,51  | 895                  | 0,41          | 57176                      | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 1040      | 200        | 60        | 620                 | 225                           | 345                 | -0,14  | -0,57  | 1540                 | 0,61          | 13028                      | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 1045      | 200        | 65        | 725                 | 225                           | 634                 | -0,095 | -0,66  | 1225                 | 1             | 4127                       | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 1045      | 200        | 51        | 1450                | 410                           | 1365                | -0,073 | -0,7   | 1860                 | 0,6           | 385                        | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 1045      | 205        | 59        | 1345                | 390                           | 1276                | -0,074 | -0,68  | 1585                 | 0,45          | 409                        | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 1045      | 205        | 55        | 1585                | 450                           | 1517                | -0,07  | -0,69  | 1795                 | 0,35          | 192                        | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 1045      | 205        | 51        | 1825                | 500                           | 1689                | -0,08  | -0,68  | 2275                 | 0,25          | 90                         | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 1045      | 205        | 41        | 2240                | 595                           | 1862                | -0,081 | -0,6   | 2725                 | 0,07          | 12                         | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 4130      | 220        | 67        | 895                 | 258                           | 779                 | -0,083 | -0,63  | 1275                 | 0,92          | 5275                       | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 4130      | 200        | 55        | 1425                | 365                           | 1358                | -0,081 | -0,69  | 1695                 | 0,89          | 1042                       | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 4142      | 200        | 29        | 1060                | 310                           | 1048                | -0,1   | -0,51  | 1450                 | 0,22          | 2060                       | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 4142      | 205        | 48        | 1415                | 380                           | 1379                | -0,08  | -0,75  | 1825                 | 0,45          | 175                        | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 4142      | 200        | 42        | 1760                | 450                           | 1586                | -0,08  | -0,73  | 2000                 | 0,4           | 146                        | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 4142      | 200        | 37        | 1930                | 450                           | 1862                | -0,09  | -0,76  | 2105                 | 0,6           | 209                        | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 4142      | 205        | 35        | 1930                | 475                           | 1724                | -0,081 | -0,61  | 2170                 | 0,09          | 29                         | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 4142      | 205        | 27        | 2240                | 560                           | 1689                | -0,089 | -0,76  | 2655                 | 0,07          | 6                          | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 4142      | 200        | 47        | 1550                | 400                           | 1448                | -0,09  | -0,75  | 1895                 | 0,5           | 204                        | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 4142      | 200        | 20        | 2035                | 475                           | 1896                | -0,082 | -0,77  | 2070                 | 0,2           | 37                         | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 4340      | 195        | 43        | 825                 | 243                           | 634                 | -0,095 | -0,54  | 1200                 | 0,45          | 7725                       | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 4340      | 200        | 38        | 1470                | 409                           | 1372                | -0,091 | -0,6   | 2000                 | 0,48          | 1005                       | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 4340      | 195        | 57        | 1240                | 350                           | 1172                | -0,076 | -0,62  | 1655                 | 0,73          | 1799                       | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 5160      | 195        | 42        | 1670                | 430                           | 1531                | -0,071 | -0,57  | 1930                 | 0,4           | 829                        | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 52100     | 205        | 11        | 2015                | 518                           | 1924                | -0,09  | -0,56  | 2585                 | 0,18          | 143                        | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 9262      | 205        | 14        | 925                 | 260                           | 455                 | -0,071 | -0,47  | 1040                 | 0,16          | 2854                       | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 9262      | 195        | 33        | 1000                | 280                           | 786                 | -0,073 | -0,6   | 1220                 | 0,41          | 1399                       | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 9262      | 200        | 32        | 1565                | 410                           | 1379                | -0,057 | -0,65  | 1855                 | 0,38          | 262                        | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 950C      | 205        | 69        | 565                 | 150                           | 324                 | -0,11  | -0,59  | 970                  | 0,85          | 24868                      | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 950X      | 205        | 65        | 440                 | 150                           | 345                 | -0,075 | -0,54  | 625                  | 0,35          | 13457                      | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 950X      | 205        | 72        | 530                 | 156                           | 331                 | -0,1   | -0,61  | 1005                 | 0,85          | 12279                      | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 980X      | 195        | 68        | 695                 | 225                           | 565                 | -0,08  | -0,53  | 1055                 | 0,21          | 1699                       | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 1144      | 195        | 33        | 930                 | 265                           | 717                 | -0,08  | -0,58  | 1000                 | 0,32          | 1947                       | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 1144      | 200        | 25        | 1035                | 305                           | 1020                | -0,09  | -0,53  | 1585                 | 0,27          | 1519                       | Tucker ve diğ. (1975)    |
| 950C      | 205        | 64        | 565                 | 159                           | 315                 | -0,12  | -0,61  | 1170                 | 0,95          | 17069                      | Tucker ve diğ. (1975)    |
| SNCM630   | 196        | 49        | 1100                | 327                           | 951                 | -0,073 | -0,823 | 1270                 | 1,54          | 736                        | Kim ve diğ. (2002)       |
| SNCM439   | 208        | 37        | 1050                | 323                           | 950                 | -0,072 | -0,801 | 1380                 | 1,89          | 1164                       | Kim ve diğ. (2002)       |
| 525C      | 209        | 52        | 508                 | 153                           | 280                 | -0,096 | -0,458 | 821                  | 0,216         | 32086                      | Kim ve diğ. (2002)       |
| 545C      | 206        | 39        | 798                 | 234                           | 590                 | -0,107 | -0,561 | 1400                 | 0,449         | 5102                       | Kim ve diğ. (2002)       |
| SFNCM85S  | 201        | 66        | 825                 | 241                           | 565                 | -0,092 | -0,522 | 1040                 | 0,316         | 7114                       | Kim ve diğ. (2002)       |
| SF60      | 208        | 53        | 820                 | 167                           | 580                 | -0,082 | -0,439 | 978                  | 0,187         | 15120                      | Kim ve diğ. (2002)       |
| SCM435    | 210        | 66        | 951                 | 300                           | 795                 | -0,067 | -0,708 | 1100                 | 0,996         | 1797                       | Kim ve diğ. (2002)       |
| SCM440    | 204        | 36        | 1000                | 319                           | 846                 | -0,088 | -0,65  | 1400                 | 0,675         | 1757                       | Kim ve diğ. (2002)       |