

SOĞUK HADDELENMİŞ TİCARİ ALÜMİNYUM LEVHALARIN YORULMA DAYANIMLARININ YAPAY SİNİR AĞLARI İLE TAHMİNİ

Raif SAKİN¹, Ayla TEKİN², Nurcan KUMRU²

ÖZET

Bu çalışmanın temel amacı, soğuk haddelenmiş ticari alüminyum levhaların çekme, eğilme, ve sertlik gibi test verilerini kullanarak yorulma dayanımını tahmin etmektir. Bu tahminler için Yapay Sinir Ağları (YSA) aracı kullanılmıştır. Çalışmanın diğer önemli amacı ise YSA'nın yorulma ile ilgili iyi tahminler yapıp yapmadığının anlaşılmasıdır. Yapay sinir ağı MATLAB yazılımı ile geliştirilmiştir. Yorulma testleri için ankastre-tip ve çok numuneli test makinesi tasarlanmış ve imal edilmiştir. AA1100 ve AA1050 alüminyum levhalar hadde yönüne paralel (HYP) ve hadde yönüne dik (HYD) şekilde kesilmişlerdir. Yorulma testleri, farklı sehim genlikleri kullanılarak sehim-kontrollü ve 50 Hz frekanslı tam değişken yükleme altında gerçekleştirilmiştir. Yorulma testlerinden elde edilen veriler çok katmanlı, ileri beslemeli ve hatanın geri yayılım algoritmasının kullanıldığı YSA modelini eğitmek için kullanılmıştır. YSA modellemesinde giriş parametreleri çekme dayanımı, eğilme dayanımı, sertlik ve yük tekrar sayısı olarak belirlenmiştir. Bu modelleme ile yorulma dayanımı değerleri tahmin edilmiştir. Test sonuçları ile YSA sonuçları olarak karşılaştırıldığında, tasarlanan modelin başarılı bir şekilde uygulandığı ve gerçek test sonuçlarına çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. YSA'nın soğuk haddelenmiş ticari alüminyum levhaların yorulma dayanımı tahmin etmede önemli bir araç olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler : alüminyum levha, yapay sinir ağları (YSA), yorulma-dayanımı tahmini

ESTIMATION OF FATIGUE STRENGTH FOR COLD-ROLLED COMMERCIAL ALUMINUM SHEETS WITH THE APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

ABSTRACT

The main aim of this study is to estimate fatigue strength using as tension, bending and hardness test data for cold-rolled commercial aluminum sheets. Artificial Neural Network (ANN) tool is used for prediction purpose. Another aim is to understand whether the ANN is making good predictions related to fatigue. Artificial neural network program is developed in MATLAB software. Cantilever plane bending and multi-specimen test machine was designed and manufactured for fatigue tests. AA1100 and AA1050 aluminum sheets were cut in longitudinal (RD) and transverse (LT) orientations to the rolling direction. The fatigue tests using different deflection amplitudes were conducted under deflection-control and fully-

¹Balıkesir Üniversitesi Edremit Meslek Yüksekokulu Makine Böl., 10300, Edremit, Balıkesir, rsakin@balikesir.edu.tr

²Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Soma Meslek Yüksekokulu, Makine Böl., 45500, Soma, Manisa, ayla.tekin@cbu.edu.tr , nurcan.kumru@cbu.edu.tr

reversed cyclic load with the frequency of 50 Hz. Data get from fatigue test results obtained from the multi-layered, feed-forward and back propagation algorithm is used to train the artificial neural network (ANN) model. In modelling of ANN; ultimate tensile strength, bending strength, hardness and cycles to failure have been used as input parameters where the output parameter is fatigue strength data. The comparisons of the experimental data against ANN results show that the result of ANN model is resembled to ANN results very closely. Finally, it is concluded that ANN is significant tool to estimate fatigue strength for cold-rolled commercial aluminum sheets

Keywords: aluminum sheet, artificial neural networks (ANN), fatigue-strength estimation

1. GİRİŞ

Alüminyum (2.7 g/cm^3), demir, bakır ve pirinç gibi malzemelerden yaklaşık 3 kat daha düşük yoğunluğa sahip olan hafif bir malzemedir. Atmosfer, su, deniz ve farklı kimyasal ortam gibi çevre şartlarında bile mükemmel bir korozyon direncine sahiptir. Ayrıca, estetik görünümü, kolay işlenebilirliği, yüksek elektrik ve ısı iletkenliği gibi dikkat çekici karakteristik özellikleri vardır [1-3]. AA1100 ve AA1050 alüminyum levhalar, başta otomobil endüstrisindeki plakalar ve aplikler olmak üzere, yüksek mukavemet gerektirmeyen, ancak şekillenebilirlik ve korozyon direncinin yüksek olması istenen yerlerde daha sık kullanılmaktadır. Örneğin, kimyasalların ve yiyeceklerin taşınmasında, depolama ekipmanlarında, derin çekme veya sıvama ile imal edilen tüpler ve genel amaçlı kaplar, ısı değiştirgeçleri, kaynaklı montajlar, ışık reflektörleri gibi aydınlatmada işlerinde kullanılmaktadır [2, 3]. Yorulma dayanım sınırı ve yorulma ömrü, değişken yük altında çalışan mekanik parçaların davranışlarına karar vermede çok önemli bir parametrelerdir. Yapısal bir parçanın yorulma ömrü, mekanik, metalürjik ve çevresel değişkenlerden etkilenir. Yorulma bütün mühendislik hasarlarında %80-90 oranında öncelikli sebeptir. Alüminyum alaşımlarının çok sık kullanıldığı özellikle dinamik uygulamalarda, çalışan elemanın çalışma parametrelerinin yorulmaya etkisinin bilinmesi zorunludur. Hatta, bu elemanın farklı çalışma şartlarından kaynaklanan yorulma özelliklerinin tam doğru değerlendirilebilmesi için yorulma dayanımı-ömür (S-N) bilgilerini içeren geniş veritabanlarının oluşturulması çok önemlidir [1, 3]. Yorulma dayanım sınırına bağlı olan yorulma ömrü tamamen malzeme özelliklerinden değil numunenin özelliklerinden de etkilenmektedir. Numunenin işlenmesi esnasında oluşan mikro boşluklar, yüzey kusurlarının ve soğuk veya sıcak deformasyon ile tane yapısında meydana gelen değişiklikler, numunenin şekli ve boyutları test numunesinin yorulma ömrünü etkiler [3]. Günümüzde, yorulma testlerini yapmak; birçok parametreden etkilendiği, kullanılması gereken numune sayısının çokluğu, uzun zaman harcadığı, zahmetli ve pahalı olduğu için oldukça zordur. Buna rağmen, endüstriyel alanda alüminyum kullanımının artması nedeniyle, yorulma test verilerini uygun modeller ile analiz ederek, "**yorulma dayanım sınırı**" veya "**yorulma ömrü**" gibi hayati bir mekanik özellikleri "**önceden doğru tahmin etmek**" bir çok araştırmacı için önemli bir konu olmuştur. Alüminyum alaşımlarına uygulanan ve genellikle 10^7 yük-tekrar sayısı veya üzerindeki yüksek çevrimlere (YÇY) kadar devam eden testler yapılmaktadır. Özellikle yorulma verilerinin çok geniş bir saçılma göstermesinden dolayı bu malzemelerin yorulma-ömürlerinin tahmini için bir çok model geliştirilmiştir [4-10]. Diğer taraftan YSA'lar tahmin, sınıflandırma, örüntü tanıma, teşhis, yorumlama, veri filtreleme ve ilişkilendirme gibi birçok fonksiyonu gerçekleştirerek endüstri, finansal, askeri, sağlık, iletişim, mühendislik gibi birçok uygulama alanlarında kullanılmaktadır [11, 12]. YSA son derece karmaşık ve doğrusal olmayan davranışları kolay bir şekilde öğrenebilmekte ve öğrenme işlemi tamamlandıktan sonra, fonksiyonel bir yaklaşım gibi sonuca gerçek zamanlı ulaşılabilir. Bu konu ile ilgili olarak Durmuş ve arkadaşları [13] yaşlandırılmış 6xxx serisi alüminyum alaşımının

aşınma davranışını YSA ile incelemişler ve kısa sürede çok az hata oranıyla sonuçlara ulaşmışlardır. Esmeye ve arkadaşları [14] yaptıkları çalışmada AA7075 alüminyum alaşımı malzemelerin yüzey pürüzlülüğünün YSA ile tahmin modelini geliştirmişlerdir. YSA tahmin değerleri ve test sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Mathew ve arkadaşları [15] YSA modellemesini azot alaşımli 316L paslanmaz çeliğin kısa zaman yorulma ömrü tahmini için uygulamışlardır. Karataş ve arkadaşları [16] bilyeli dövme uygulanmış Ç1020 çelik numunedeki kalıcı gerilme değerlerini oluşturulan YSA modeliyle tahmin edilmiştir. Bilyalı dövülmüş çelik malzemelerde artık gerilmelerin hesaplanmasında YSA hızlı, basit ve öğrenme kapasitesinden dolayı klasik metotlardan daha avantajlı olduğu görülmüştür. Abdalla ve Hawileh [17] yaptıkları çalışmada YSA modellemesini, çelik takviye çubukların kısa zaman yorulma davranışlarının tahmini için kullanmışlardır. Karakaş [18] yaptığı çalışmada, alüminyumdan kaynaklı 4 farklı alaşım üzerinde yorulma ömürlerinin yapay sinir ağı yöntemiyle tahmin edilebileceğini göstermiştir. Alüminyum parçalardaki yorulma dayanımı veya yorulma ömrü tahmininde YSA'nın çok faydalı olduğu ve yüksek hızda doğrulukta sonuçlar verdiği literatürlerde kanıtlanmıştır.

Bu çalışmada %99'un üzerinde ticari saflıkta, soğuk hadde ürünü genel amaçlı alüminyum levhaların yüksek çevrimdeki yorulma davranışları incelenmiştir. Alüminyum levhaların yorulma testlerinin yanı sıra çekme, eğilme ve sertlik gibi mekanik testleri de yapılmıştır. Mekanik test sonuçlarından yararlanılarak yapay sinir ağı yoluyla yorulma dayanımları tahmin edilmiştir. Deneysel çalışmanın zor olduğu, zaman ve maliyet açısından sınırlamalar getirdiği durumlarda ve her zaman gerekli laboratuvar ortamının bulunamaması durumunda YSA yaklaşımının uygun bir tahmin yöntemi olup olmadığı araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, modelin hassasiyetinin yüksek olduğunu ve modelin gerçek zamanlı geri hesaplama yapabildiğini göstermiştir. Bu yüksek doğrulukta tahminler, tasarımcıya malzeme kullanımı ve seçimi esnasında çok yardımcı olacaktır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Alüminyum Levha Numuneler

Bu çalışmada kimyasal içerikleri ve standart gösterimleri Tablo 1'de verilen ticari-saflıkta ve soğuk hadde ürünü alüminyum levhalar kullanılmıştır. Türkiye iç piyasasından temin edilen, AA1100 ve AA1050 alüminyum levhalardan, hadde yönüne paralel (HYP) ve dik (HYD) olacak şekilde (Şekil 1) 25x200x3mm boyutlarında kesilerek test numuneleri elde edilmiştir. Hazırlanan alüminyum levhaların sırasıyla TS-EN/485-2 standardına uygun çekme testleri, ISO 7438:2005(E) standardına uygun üç noktadan eğilme testleri ve sertlik ölçümleri yapılarak sonuçların özeti Tablo 2'de verilmiştir [19-22].

Tablo 1. Alüminyum levhaların kimyasal bileşimi (%ağırlık)

Alüminyum	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Ti	Zn	Al
AA1100	0,002	0,001	0,494	0,005	0,001	0,001	0,098	0,0140	0,008	Bal.
AA1050	-	0,006	0,196	0,002	0,117	-	0,065	0,0157	0,004	Bal.



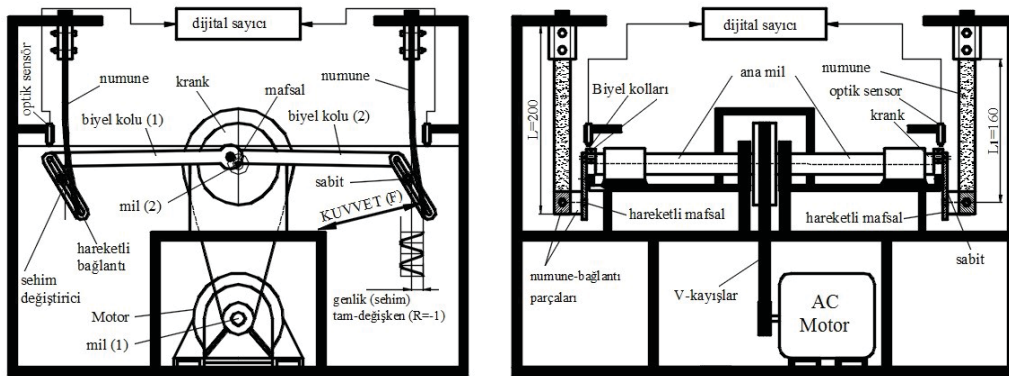
Şekil-1 a) Numuneler için farklı tekstür yapısı (HYP, HYD) ve şematik mikro tane yapısı, b) Hadde yönüne dik (HYD) kırılmış AA1100 alüminyum numune

Tablo 2. Alüminyum levhaların bazı mekanik özellikleri [3, 21-24]

Numuneler ve tekstür	Çekme Dayanımı (σ_{tu})	Akma Dayanımı (σ_{tv})	Elastisite Modülü (E_c)	Eğilme Dayanımı (σ_{fu})	Eğilme Modülü (E_e)	Sertlik (HB)
AA1100 (HYP)	126 MPa	120 MPa	69 GPa	120 MPa	60 GPa	32 HB
AA1100 (HYD)	124 MPa	118 MPa	69 GPa	117 MPa	54 GPa	32 HB
AA1050 (HYP)	117 MPa	106 MPa	69 GPa	106 MPa	54 GPa	30 HB
AA1050 (HYD)	113 MPa	98 MPa	69 GPa	103 MPa	48 GPa	30 HB

2.2. Ankastr-Tip Eğilmeli Yorulma Testleri

Üç noktadan eğilme testlerinden elde edilen maksimum eğilme mukavemeti verileri, S-N eğrilerindeki başlangıç gerilme seviyelerini belirlemede yardımcı olmuştur [3, 23-29]. Bütün testler oda sıcaklığında yapılmış ve kullanılan gerilme oranı (tam değişken) $R=-1$ 'dir. İki farklı tekstür yapısına sahip (HYP ve HYD) dört numune grubu için en az 200 adet numune kırılmıştır. Her grubun S-N eğrilerini elde etmek için 10 gerilme seviyesi belirlenmiştir. Her bir gerilme seviyesi için ortalama beşer adet olmak üzere toplam 50'şer numune kırılmıştır. Eğilme yorulması testleri Şekil 2'de görülen, 50 Hz frekansta, aynı anda dört numune bağlanabilen, sehim-kontrollü ankastr-tip cihazda yapılmıştır. Testlere 10^7 yük-tekrar sayısına kadar devam edilmiştir [3, 21, 22, 24, 25, 27, 28].

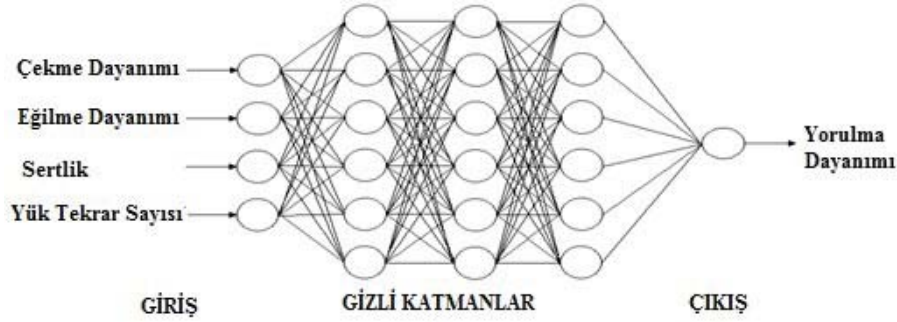


Şekil 2. Ankastr tip düzlemsel-eğme yorulması test cihazının şematik gösterimi; (a) Ön görünüş (b) Yan görünüş

2.3. Yorulma Dayanımının Yapay Sinir Ağları (YSA) ile Analizi

YSA'nın eğitilebilmesi ve hedef çıktılara ulaşabilmesi için çok sayıda girdi ve girdilere ilişkin çıktı dizisine gereksinim duyulur. Bu veri dizilerine "eğitim" ve "test" adı verilir. Öğrenme sürecinden sonra "test" verileri kullanılarak tasarlanan ağın nasıl sonuçlar verdiğinin görülmesi için "test" işlemi gerçekleştirilir. Öğrenme sürecinde YSA'nın istenilen çıktıları üretecek şekilde ağ içindeki ağırlıklarının düzenlenmesini sağlayan mekanizma öğrenme algoritması olarak adlandırılır.

Literatürde birçok YSA mimarisi bulunmaktadır. Bu çalışmada bunlardan tahmin amaçlı olarak mühendislik uygulamalarına uygun olan ileri beslemeli çok katmanlı geri yayılım algoritması kullanılmıştır [16, 18]. YSA modelinde hadde yönüne paralel ve dik yönde kesilerek hazırlanan AA1100 ve AA1050 alüminyum levhalar için gerçek yorulma test verileri kullanılmıştır. Yorulma dayanımına ait YSA modelinin oluşturulmasında ve eğitiminde MATLAB programı kullanılmıştır. Geliştirilen bu dört "giriş", tek "çıkış" ve altı nöronlu "gizli katmanlardan" oluşan YSA'nın genel yapısı Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Tasarlanan YSA ağ yapısı

Yorulma testlerinden elde edilen 40 veriden 28 tanesi eğitim ve 12 tanesi de test ve doğrulama işlemi için kullanılmış, veri tabanı %70 eğitim ve %30 test verisi olarak ayrılmış ve bunlar denklem (1) kullanılarak normalize edilmiştir.

$$V_N = 0,8 \left(\frac{V - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}} \right) + 0,1 \quad (1)$$

Burada V_N bir parametredeki normalize değeri, V bir parametredeki gerçek değeri, V_{\max} ve V_{\min} ise bir parametredeki maksimum ve minimum değeri ifade etmektedir. YSA'nın kararlı yapısı için test amacıyla kullanılan veriler ağın eğitimi aşamasında kullanılmamıştır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. S-N Eğrileri

Yorulma testleri sonucundaki değerlendirmede alüminyum numuneler için hasar kriteri olarak 10^7 yük-tekrar sayısı ve bu yük-tekrar sayısına karşılık gelen yorulma dayanımı esas alınmıştır [21, 22, 24-30]. İki parametrelili Weibull dağılımı kullanılarak elde edilen ve $R \approx 0.50$ güvenilirlikli ortalama yorulma ömürlerine göre elde edilen S-N eğrileri Şekil 5'de verilmiştir. Yorulma test verilerinin değerlendirilmesi için denklem (2)' de verilen basitleştirilmiş Basquin

üstel fonksiyonu kullanılmıştır [3, 24-28, 31-33].

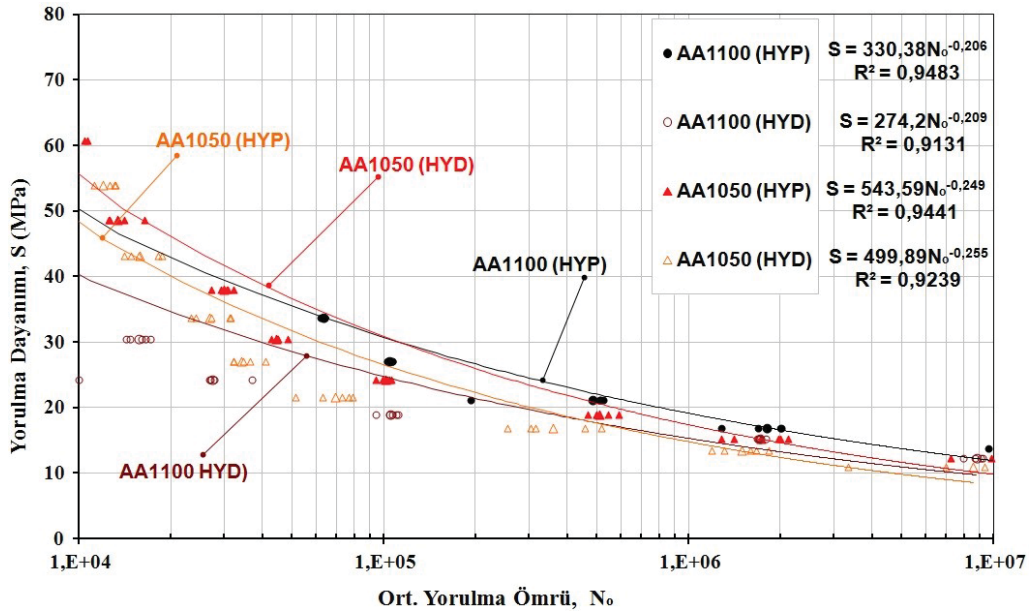
$$S = a.(N_f)^b \quad (2)$$

Bu denklemde ;

S : yorulma dayanımı (gerilme genliği),

N_f : kırılmaya neden olan yük tekrar sayısı (yorulma ömrü),

a ve b : sabitlerdir (Şekil 4’de her malzeme grubu için verilmiştir)



Şekil 4. Ortalama yorulma dayanımı-Ömrü (S-N) eğrileri (güvenirlilik seviyesi $R \approx 0,50$)

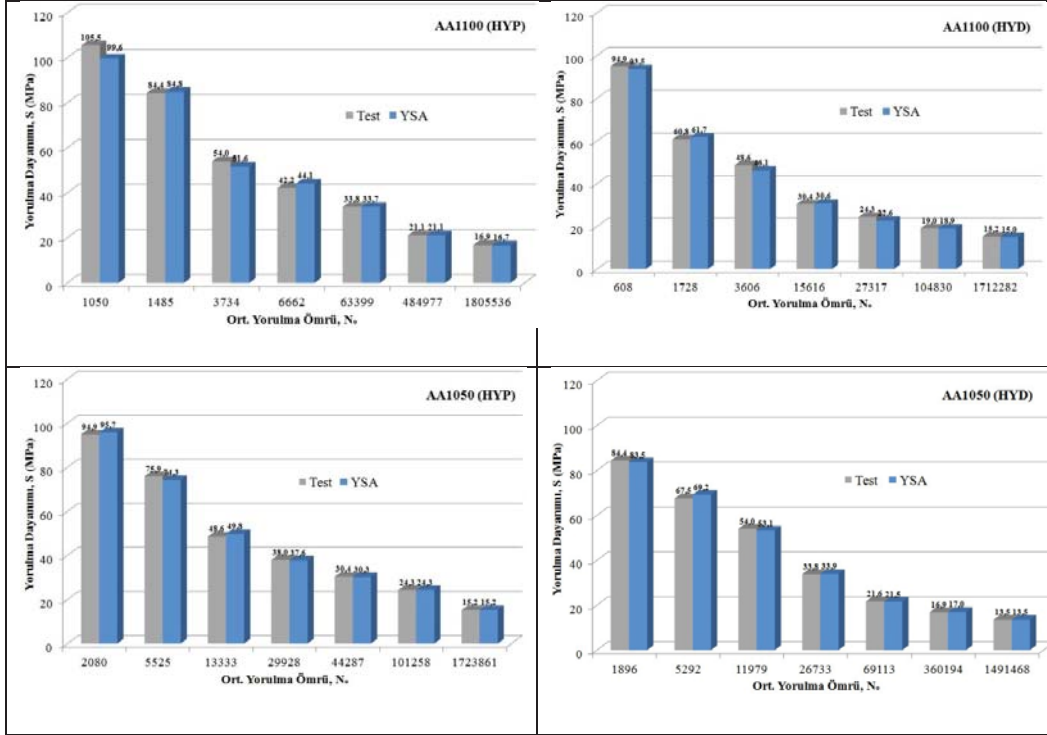
3.2. Yapay Sinir Ağları Sonuçları

YSA daha önce de belirtildiği gibi günümüzde birçok güncel uygulama alanında verimli bir şekilde kullanılmaktadır. Bu alanlardan bir tanesi de yorulmadır. Malzemelerin yorulma davranışlarının incelenmesi, hem maliyeti yüksek hem de uzun bir zaman dilimi gerektiren deneysel çalışmalardan oluşur. Yorulmanın YSA ile modellenmesinin test maliyetlerini ve gerekli zaman dilimini azaltabilecek bir uygulama olduğu düşünülmektedir. Gerçekten günümüzde deneysel çalışmalara göre daha ekonomik ve hızlı olan YSA yöntemi birçok mühendislik uygulamasında başarılı bir şekilde kullanılabilir.

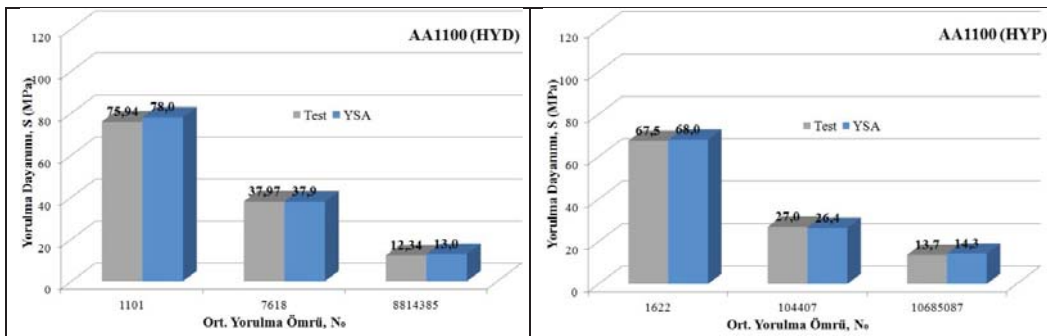
Bu çalışmada, AA1100 ve AA1050 alüminyum levhalar için yorulma dayanımı değerini tahmin edebilecek bir yapay sinir ağı modeli geliştirilmiştir. YSA için giriş verileri 0 ve 1 arasında olacak şekilde normalize edilmiştir. Çalışmada 1000 iterasyon sonunda kabul edilebilir değerlere ulaşılarak ağı eğitimi tamamlanmıştır. Eğitim fazının ortalama hata oranının %1,69 olduğu görülmüştür. Şekil 5’de elde edilen grafikler dikkate alındığında deneysel sonuçlar ile YSA’dan elde edilen değerlerin çok yakın olduğu gözlenmiştir.

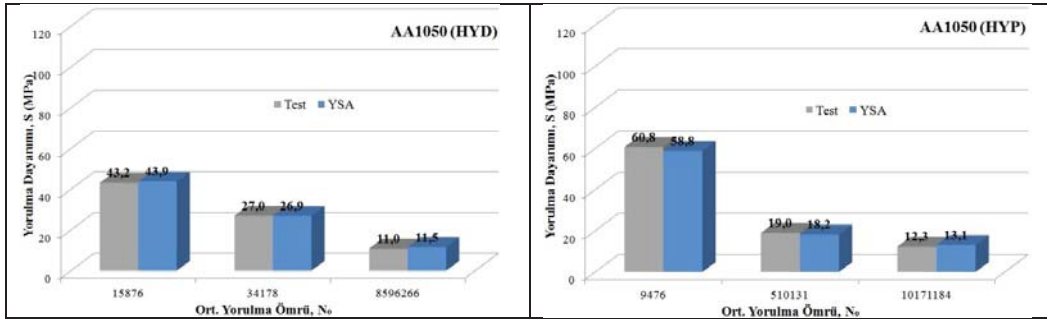
YSA’nın eğitiminde istenen hata sınırına ulaşıldıktan sonra YSA’nın test işlemine

geçilmiştir. Testlerden elde edilen 12 değer eğitme işleminde kullanılmamış, test işleminde özellikle numunenin kırıldığı andaki yorulma gerilmesi değerine ulaşılacak istendiği için son değerler sisteme verilmiştir. Test fazındaki ortalama hata oranı ise %2,96'dır. Gerçek test verileri ile YSA metodu kullanılarak hesaplanmış değerler arasındaki ilişki Şekil 6'de görülmektedir.



Şekil 5. Yük tekrar sayısı - yorulma dayanımı test sonuçları ile YSA sonuçlarının eğitme fazında karşılaştırılması





Şekil 6. Yük tekrar sayısı - yorulma dayanımı gerçek test sonuçları ile YSA sonuçlarının test fazında karşılaştırılması

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada ticari saflıktaki soğuk hadde ürünü alüminyum levhaların yorulma davranışlarının belirlenmesinde deneysel çalışmalara alternatif bir yaklaşım olarak yapay sinir ağları ile tahmin modeli geliştirilmiş ve aşağıdaki temel sonuçlara ulaşılmıştır:

- Bu çalışma, YSA'nın soğuk haddelenmiş ticari alüminyum levhaların yorulma dayanımının tahmininde kullanılabileceğini göstermiştir.
- Dört giriş ve tek çıkışlı tasarlanan ağ yapısı yüksek doğrulukta tahminler vermiştir.
- Eğitime fazının hata oranının düşük olmasından dolayı, YSA'da test fazı için seçilen değer gerçek test sonucuna çok yakın bulunmuştur.
- YSA kullanımı gerçek yorulma dayanımını elde etmek için gerekli olan test sayısını azaltacaktır. Bu ise, çok büyük zaman ve maliyet tasarrufu sağlayacaktır.
- YSA kullanımı deney setinin hassasiyetinden ve ortam sıcaklığından kaynaklanan ölçüm hatalarını elimine eder.
- Alüminyum levhaların çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve sertlik gibi mekanik özellikleri ile istenen yük tekrar sayısına (çalışma ömrü) karşın yorulma dayanımlarının YSA ile doğru olarak tahmin edilebildiği görülmüştür.
- Bu çalışma malzemelerin klasik mekanik testlerinden elde edilen elastisite modülü, poisson oranı, şekil değiştirme yüzdesi vb. diğer mekanik özelliklerin de yorulma özelliklerine doğru ve hızlı olarak hesaplamada kullanılabileceği ümidini vermiştir. Dolayısıyla yapılan bu çalışma yorulma dayanım sınırı ve yorulma ömrü tahmini ile ilgili diğer çalışmalar için bir temel oluşturabilecektir

5. SEMBOLLER

YSA : Yapay sinir ağları

HYP : Hadde yönüne paralel yön

HYD: Hadde yönüne dik yön

σ_{tu} : Çekme dayanımı

σ_{ty} : Akma dayanımı

σ_{fu} : Eğilme dayanımı

E_c : Elastisite modülü

E_e : Eğilme modülü

HB : Brinell sertliği

N_f : Kırılma çevrim (yük tekrar) sayısı

N_o : Ortalama kırılma çevrim (yük tekrar) sayısı
R : Gerilme oranı
 R^2 : Korelasyon katsayısı
S : Yorulma dayanım sınırı (maksimum gerilme genliği)
a, b : Malzeme parametreleri
 V_N : Bir parametredeki normalize değer
V : Bir parametredeki gerçek değer
 V_{max} : Bir parametredeki maksimum değer
 V_{min} : Bir parametredeki minimum değer

6. TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın bir bölümü Balıkesir Üniversitesi ve Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Fonu tarafından desteklenmiştir. Alüminyum ile ilgili testlerin bir bölümü Kara Kuvvetleri Astsubay Meslek Yüksekokulu imkanları ile yapılmıştır. Ayrıca yazarlar desteklerinden dolayı sırasıyla, Prof.Dr. İrfan AY, Öğretmen Binbaşı Muharrem ER, SEAS Mekanik A.Ş. ve Kara Kuvvetleri Astsubay Meslek Yüksekokulu Komutanlığına teşekkür ederler.

7. KAYNAKLAR

1. Sadeler, R., Totik, Y., Gavgalı, M., and Kaymaz, I. (2004). Improvements of fatigue behaviour in 2014 Al alloy by solution heat treating and age-hardening. *Mater Des* 25, 439-445.
2. Rooy, E.L. (2005). ASM International Handbook, Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. In Introduction to Aluminum and Aluminum Alloys, Volume 2. (USA: The Materials Information Company).
3. Sakin, R., and Er, M. (2010). Investigation of Plane-Bending Fatigue Behavior of 1100-H14 Aluminum Alloy. *J Fac Eng Archit of Gazi University* 25, 213-223.
4. Liao, M. (2009). Probabilistic modeling of fatigue related microstructural parameters in aluminum alloys. *Eng Fract Mech* 76, 668-680.
5. Miyazaki, T., Kang, H., Noguchi, H., and Ogi, K. (2008). Prediction of high-cycle fatigue life reliability of aluminum cast alloy from statistical characteristics of defects at meso-scale. *International Journal of Mechanical Sciences* 50, 152-162.
6. Fatemi, A., Plaseied, A., Khosrovaneh, A., and Tanner, D. (2005). Application of bi-linear log-log S-N model to strain-controlled fatigue data of aluminum alloys and its effect on life predictions. *Int J Fatigue* 27, 1040-1050.
7. Zhao, T., and Jiang, Y. (2008). Fatigue of 7075-T651 aluminum alloy. *Int J Fatigue* 30, 834-849.
8. Srivatsan, T.S., Kolar, D., and Magnusen, P. (2002). The cyclic fatigue and final fracture behavior of aluminum alloy 2524. *Mater Des* 23, 129-139.
9. Gruenberg, K. (2004). Predicting fatigue life of pre-corroded 2024-T3 aluminum. *Int J Fatigue* 26, 629-640.
10. Boob, G., and Deoghare, A.B. (2013). Estimation of Strain Controlled Fatigue Properties of Steels Using Tensile Test Data. In International and 16th National Conference on Machines and Mechanisms (iNaCoMM2013). (IIT Roorkee, India).
11. Allahverdi, N. (2011). *Uzman Sistemler, Bir Yapay Zekâ Uygulaması*, (İstanbul: Atlas Yayın Dağıtım).
12. Öztemel, E. (2012). *Yapay Sinir Ağları*, (İstanbul: Papatya Yayıncılık).
13. Durmuş, H.K., Özkaya, E., and Meriç, C. (2006). The use of neural networks for the

- prediction of wear loss and surface roughness of AA 6351 aluminium alloy. *Mater Des* 27, 156-159.
14. Esme, U., Sagbas, A., Kahraman, F., and Kulekci, M.K. (2008). Use of Artificial Neural Network In Ball Burnishing Process For The Prediction Of Surface Roughness Of AA 7075 Aluminium Alloys. *Materials And Technology* 42, 215-219.
 15. Mathew, M.D., Kim, D.W., and Ryu, W.-S. (2008). A neural network model to predict low cycle fatigue life of nitrogen-alloyed 316L stainless steel. *Materials Science and Engineering: A* 474, 247-253.
 16. Karataş, C., Sozen, A., and Dulek, E. (2009). Modelling of residual stresses in the shot peened material C-1020 by artificial neural network. *Expert Systems with Applications* 36, 3514-3521.
 17. Abdalla, J.A., and Hawileh, R. (2011). Modeling and simulation of low-cycle fatigue life of steel reinforcing bars using artificial neural network. *Journal of the Franklin Institute* 348, 1393-1403.
 18. Karakas, Ö. (2011). Estimation of fatigue life for aluminium welded joints with the application of artificial neural networks. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 42, 888-893.
 19. TSE (2010). TS EN 485-2: Aluminium and Aluminium Alloys Sheet Strip and Plate Part 2: Mechanical Properties. In Turkish Standards Institute (TS). (Ankara, Turkey).
 20. ISO (2005). EN ISO 7438:2005(E), Metallic materials. Bend test. (Geneva, Switzerland).
 21. Er, M. (2006). Investigation of Bending Fatigue Behaviour of the 1100-H14 Aluminium Plate and The Design of a Amplitude-Regulated, High Frequency Bending Fatigue Test Machine. In Institute of Science, Department of Mechanical Engineering. (Balıkesir, Turkey: Balıkesir University).
 22. Kumru, N. (2007). Design of Fatigue Test Apparatus for Etial-141, Etial-145 and Etial-160 Type Cast Aluminum and Plate Aluminum Materials and Investigation of Bending Fatigue Behaviours. In Institute of Science, Department of Mechanical Engineering. (Manisa, Turkey: Celal Bayar University).
 23. Ay, I., and Sakin, R. (2006). Production and testing of glass-fiber reinforced plastic axial fan blades for replacement for aluminum ones that are produced in Balıkesir. In Scientific Research Project, Volume 2002/14. (Balıkesir, Turkey: Balıkesir University Research Foundation).
 24. Sakin, R., Kumru, N., Er, M., and Ay, I. (2010). Statistical Analysis of Fatigue-Life Data for Aluminum Alloys and Composites. In 2nd National Congress of Design, Manufacturing and Analysis, A. Oral, ed. (Balıkesir, Turkey).
 25. Sakin, R., and Ay, İ. (2008). Statistical analysis of bending fatigue life data using Weibull distribution in glass-fiber reinforced polyester composites. *Mater Des* 29, 1170-1181.
 26. Sakin, R., Ay, İ., and Yaman, R. (2008). An investigation of bending fatigue behavior for glass-fiber reinforced polyester composite materials. *Mater Des* 29, 212-217.
 27. Ay, İ., Sakin, R., and Okoldan, G. (2008). An improved design of apparatus for multi-specimen bending fatigue and fatigue behaviour for laminated composites. *Mater Des* 29, 397-402.
 28. Sakin, R., Kumru, N., and Ay, İ. (2008). Design of Apparatus for the Stress-Controlled, Multi-Specimen Bending Fatigue Test and an Application for Composites. In 12th International Materials Symposium (IMSP'2008), Volume 531-541, C. Meran, ed. (Denizli, Turkey: Pamukkale University).
 29. Kim, H.Y., Marrero, T.R., Yasuda, H.K., and Pringle, O.A. (1999). A Simple Multi-Specimen Apparatus for Fixed Stress Fatigue Testing. *J Biomed Mater Res* 48, 297-300.
 30. Ben Zineb, T., Sedrakian, A., and Billoet, J.L. (2003). An original pure bending device with large displacements and rotations for static and fatigue tests of composite structures.

Composites Part B 34, 447-458.

31. Khashaba, U.A. (2003). Fatigue and Reliability Analysis of Unidirectional GFRP Composites Under Rotating Bending Loads'. *J Compos Mater* 37, 317-331.

32. Abdallah, M.H., Abdin, E.M., Selmy, A.I., and Khashaba, U.A. (1996). Reliability analysis of GFRP pultruded composite rods. *Int J Qual & Reliab Manage* 13, 88-98.

33. Tai, N.-H., Yip, M.-C., and Tseng, C.-M. (1999). Influences of thermal cycling and low-energy impact on the fatigue behavior of carbon/PEEK laminates. *Composites Part B* 30, 849-865.