

YAPAY SİNİR AĞI (YSA) KULLANARAK TİTREŞİM TABANLI MAKİNA DURUM İZLEMESİ VE HATA TEŞHİSİ

Hüseyin DAL¹, Ömer K. MORGÜL¹, İsmail ŞAHİN²

¹ Sakarya Üniv., Müh. Fak., Makine Müh. Bölümü, Adapazarı. hdal@sakarya.edu.tr,

² Sakarya Üniv., Akyazı MYO, Akyazı.

ÖZET

Bu çalışmada titreşim analizi için "Orta Ölçekli Makinaların Titreşim Değerlendirme Standartları ISO-10816" tablosu kullanılarak oluşturulan eğitim seti, Yapay Sinir Ağını (YSA) eğitmek için kullanılmıştır. Üç katmanlı oluşturulan YSA ağını eğitmek için ISO-10816 tablosundan 720x9'luk veri matrisi, test için 200x5'lik veriye sahip bir matris kullanılmıştır. Eğitim, gizli katman hücre sayısı 5, 10, 15, 25, 50 ve 75 olan ağların her biri için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Birbirleriyle karşılaştırılarak en iyi sonucu veren ağ yapısı bulunmuştur. Eğitim için geri yayılım algoritması kullanılmıştır. Eğitimden sonra elde edilen çıkış değerleri gerçek tablo değerleriyle karşılaştırılarak, titreşim analizinde kullanılabilirliği saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Makine sağlığı izleme, yapay sinir ağları, Titreşim, ISO10816-1.

VIBRATION BASED MACHINERY HEALTH MONITORING AND FAULT DETECTION USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK (ANN)

ABSTRACT

In this study, training set was composed using ISO-10816 which is the evaluation standards of medium-size machines and was applied for training of Artificial Neural Networks (ANN). ANN consist three layers which are an input layer, a hidden layer and an output layer. First data matrix which size is 720x9 was composed the table of ISO-10816 for the network training. Nevertheless a test matrix which is 200x5 sizes was composed. Training was tested by changing different types of hidden layers which were consisting of 5, 10, 15, 25, 50 and 75 neurons. Test results were compared with each others and the best performance was found. Back-Propagation was used in training. Suitability was determined with comparing result values and real table values.

Keywords: Machinery health monitoring, Artificial Neural Networks, Vibration, ISO10816-1,

1. GİRİŞ

Mahmod M. Saman, kompleks titreşim sinyallerinin otomatik olarak yorumlanabilmesi için, desen tanıma ve yapay sinir ağlarının birleşiminden oluşan bir metot tanıtmıştır. [1]. Yongjun Wu, özel bir titreşim problemi için CMAC (Cerebellar Model Articulation Controller) yapay sinir ağı uygulamasını incelemiş, CMAC yapay sinir ağının özel bir iki tablıolu sistem için etkili bir titreşim kontrolörü olduğunu göstermiştir[2]. Yildirim S., Uzman I., Radyal tabanlı yapay sinir ağı kullanarak araçların dikey titreşimlerini incelemişler, pratik amaçlar için benzer sistemlerde de kullanılabileceğini belirtmişlerdir[3]. Yaagoub N. Al-Nassar ve arkadaşları,

bir rotor yatağı titreşimlerinin kontrolü için, delta kuralı ve geri yayılım algoritmasının kullanıldığı, çok katmanlı bir yapay sinir ağı kontrolörü tasarlamışlar ve sisteme kontrolör uygulandığı zaman beklenen cevapları elde etmişlerdir[4]. Kumaraswamy S., ve arkadaşları, ISO-10816 ve Kanada standartları gibi titreşim standartlarının, bazı özel makine elemanları için yorumlamanın zorluğuna değinmişler, pompa, motor, jeneratör gibi genel amaçlı kullanılan makinalar için daha kullanışlı olduğunu belirtmişlerdir[5].

Bir makinadan en yüksek verimi almak ve bakımdan kaynaklanan üretim kayıplarını en aza indirmek için bugüne kadar değişik yaklaşımlar benimsenmiştir.

Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı kestirimci bakımdır. Bu bakım anlayışında, makinaların durumu sürekli ölçüm yapılarak takip edilmektedir. Ölçüm ve kontroller ile titreşim seviyesindeki değişiklikler takip edilerek üretimi etkileyecek arızanın oluşabileceği zaman önceden tahmin edilmeye çalışılır. Bu kontrollere göre uygun zamanlarda makinalar bakıma alınır. Toplanan veriler üzerinde yapılan analizler ile arızaların kaynağı ve gelişimleri takip edilir. Böylece makinaların en yüksek verimde kullanılması ve beklenmeyen arıza duruşlarının önlenmesi sağlanır.

Bu çalışmada, ISO-10816-1" tablosu, yapay sinir ağıları kullanılarak modellenmiş ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Model beş giriş ve dört çıkıştan oluşturulmuştur. Eğitim için geri yayılım algoritması kullanılmıştır.

Bu çalışmayla, makina sağlığı izlenmesinde insan unsurunu ortadan kaldırarak daha kolay ve daha hızlı arıza teşhisi ve dolayısıyla gereksiz makina durmalarının önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Kumaraswamy S. ve arkadaşlarının belirttiği kısıtlamalar giderilmeye çalışılmıştır. Simülasyon sonucunda elde edilen çıkış değerleri gerçek tablo değerleriyle karşılaştırılarak uygulanabilirliği teyit edilmiştir. Eğitim ve test işlemleri için Matlab – Neural Network Toolbox'ı kullanılmıştır.

II. GENEL TİTREŞİM ÖLÇÜMLERİNİN DEĞERLENDİRMESİ

Genel olarak titreşim ölçüm değerlerini yorumlayabilmek ve değerlendirebilmek için üç genel prensip kullanılmaktadır.

Standartlar ile karşılaştırma:ISO-10816 ve ISO-7919 Titreşim şiddeti değerlendirme standardındaki limit değerlerle karşılaştırma yapılır.

Geçmişteki değerler ile karşılaştırma: Güncel ölçüm değerleri belirli bir zaman dilimi için esas alınan, daha önceden belirlenmiş temel değerlerle karşılaştırılır.

İmalatçı firmanın değerleriyle veya prototiple karşılaştırma: Benzer tipteki diğer makinalardan, prototiplerden çeşitli şekillerde elde edilmiş yada üretici firma tarafından sağlanan değerlerle karşılaştırma yapılır.

II.1 Titreşim Şiddetinin Ölçümü

Dönen makinaların titreşimlerinin izlenmesindeki yaygın bir prosedür, Titreşim hızının veya Titreşim şiddetinin ölçülmesidir. Titreşim şiddeti yayılan titreşim enerjisinin bir ölçüsüdür. Eğer ilgili makinanın titreşim şiddeti sınırları eldeki mevcut bilgilerle yeterince belirlenemiyorsa, ISO 10816 referans numaralı standartlar kullanılabilir. Bu standartlarda farklı

büyükliklerdeki makinalar için kabul edilebilecek titreşim şiddeti sınırları verilmektedir.

ISO 10816-1 Standartları, 10-200 Hz (600-12000 d/d) frekanslar arasında çalışan makinalardaki titreşim şiddetinin, nasıl değerlendirileceğini gösteren yönergedir. Bu tip makinalara; küçük, doğrudan bağlantılı elektrik motorları ve pompalar, orta büyüklükteki motorlar, jeneratörler, gaz ve buhar türbinleri, turbo kompresörler, turbo pompalar ve fanlar örnek olarak verilebilir. Bu makinaların bağlantıları rijid veya esnek olabilir yada dişlilerle birbirlerine bağlanmış olabilir. Dönen shaftların eksenleri yatay, dikey veya açısız olarak çakılmış olabilir. Dört farklı grup makine için ISO 10816-1, Tablo 1'de görülmektedir[6].

Tablo 1. ISO 10816-1 titreşim değerleri tablosu

TİTREŞİM ŞİDDETİ DEĞERLENDİRME TABLOSU ISO 10816						
Titreşim Hızı V_{rms}	Makina		Sınıf I Küçük Makinalar	Sınıf II Orta Makinalar	Sınıf III Büyük Makinalar	Sınıf IV Büyük Makinalar
	In/s	mm/s				
0.01	0.28					
0.02	0.45					
0.03	0.71					
0.04	1.12					
0.07	1.80					
0.11	2.80					
0.18	4.50					
0.28	7.10					
0.44	11.2					
0.70	18.0					
0.71	28.0					
1.10	45.0					

ISO 10816-1 standardına göre makineler aşağıdaki gibi dört kategoride sınıflandırılmıştır.

Sınıf I: 15 kW'a (20 HP) kadar olan küçük ölçekli bireysel makine ve parçaları.

Sınıf II: 15 kW'tan 75 kW'a (20 HP-100 HP) kadar olan orta ölçekli makinalar ile elektrik motorları, , 300 kW'a (400 HP) kadar rijit olarak monte edilmiş motorlar, özel yatak-plakalı makinalar.

Sınıf III: Ağır tahrik motorları ve rijid ve temel üzerinde ağır döner kütleli makinalar.

Sınıf VI: Çok büyük turbo tahrik motorları ve rijid ve ağır temel üzerinde döner kütleli diğer makinalarla ilişkili olarak civarda da titreşimlere sebep olan 10 MW'dan daha büyük olan turbo jeneratör blokları ve gaz türbinleri.

III. YSA İÇİN VERİLERİN HAZIRLANMASI

Burada yapay sinir ağına, ISO 10816-1 referans numaralı "genel makina titreşim değerlendirme tablosunun" öğretilmesi için gerekli olan düzenlemeler yapılmıştır. YSA'na uygulamayı kolaylaştırmak amacıyla III. ve VI. sınıf makineler tek grup altında toplanarak tablo aşağıdaki gibi yeniden düzenlenmiştir. Buna göre küçük ölçekli makineler 15 kW 'tan az, orta ölçekli makineler 15 kW ile 75 kW arası ve büyük ölçekli makineler 75 kW 'tan büyük olmak üzere üç gruba ayrılmıştır. Her gruptaki makina için çeşitli titreşim değerlerinde ve değişik ölçüm birimlerinde durumlarının ne olacağı Tablo 2'de belirtilmiştir.

Tablo 2. ISO 10816-1 Genel makina titreşim değerlendirme tablosu[7].

HIZ RMS		HIZ PEAK	HIZ PEAK	DURUM	M<15 (küçük)	15<M<75 (orta)	M>75 (büyük)
mm/sn	dB	mm/sn	İnch/sn				
0.28	109	0.40	0.016	İYİ	1 - 3	1 - 4	1 - 5
0.45	113	0.64	0.025				
0.71	117	1.00	0.039				
1.12	121	1.58	0.062	GEÇERLİ	3 - 5	4 - 6	5 - 7
1.80	125	2.54	0.100				
2.80	129	3.96	0.160				
4.50	133	6.37	0.250	DİKKAT	5 - 7	6 - 8	7 - 9
7.10	137	10.00	0.390				
11.2	141	15.80	0.620				
18.0	145	25.40	1.000	ARIZA	7 - 12	8 - 12	9 - 12
28.0	149	39.60	1.560				
45.0	153	63.70	2.500				

Tablo 2 düzenlenerek YSA'na uygulanabilecek şekilde 5 giriş, 4 çıkış ve 720 satırdan oluşan Tablo 3 oluşturulmuştur. Eğitimden sonra yapılacak test için, ISO-10816-1 sınırları içinde 200x9 boyutunda matristen oluşan örnek verilerin bir kısmı Tablo 4'te verilmiştir.

Güç giriş değerleri 250 kW'ta sınırlandırılmıştır. Bu kısıtlama, öğrenme zamanını kısaltmak ve öğrenme performansını arttırmak amacı taşımaktadır.

Tablo 3. Giriş verilerinin hazırlanması

S.NO	GİRİŞ					ÇIKIŞ			
	GÜÇ KW	HIZ MS mm/s	HIZ RMS dB	HIZ PEAK mm/s	HIZ PEAK inch/s	DURUM İYİ	DURUM GEÇERLİ	DURUM ALARM	DURUM ARIZA
1	1	0,28	109	0,4	0,016	1	0	0	0
2	1	0,45	113	0,64	0,025	1	0	0	0
3	1	0,71	117	1	0,039	1	0	0	0
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
297	80	11,2	141	15,8	0,62	0	0	1	0
298	80	18	145	25,4	1	0	0	0	1
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
720	250	45	153	63,7	2,5	0	0	0	1

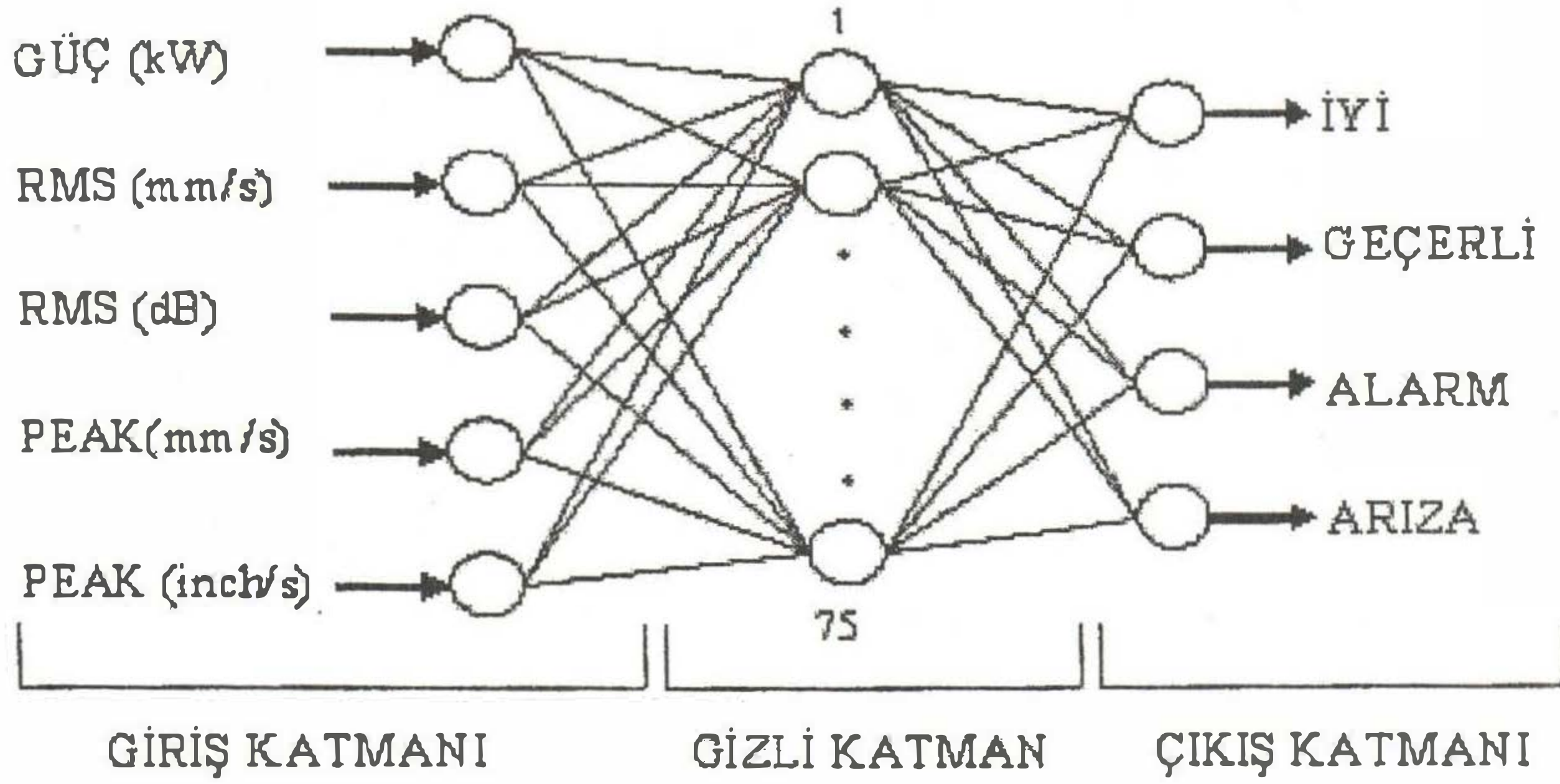
Tablo 4. Test dosyası

GÜÇ KW	GİRİŞ				ÇIKIŞ			
	HIZ RMS mm/s	HIZ RMS dB	HIZ PEAK mm/s	HIZ PEAK inch/s	DURUM İYİ	DURUM GEÇERLİ	DURUM ALARM	DURUM ARIZA
1	0,20	108	0,3	0,01	1	0	0	0
1	0,38	111	0,6	0,02	1	0	0	0
2	1,5	120	2,5	0,1	0	1	0	0
2	2,1	128	3,9	0,14	0	0	1	0
:	:	:	:	:	:	:	:	:
80	39	148	63	2,3	0	0	0	1
:	:	:	:	:	:	:	:	:
200	27	149	39	1,5	0	0	0	1

IV. YSA MODELİNİN HAZIRLANMASI

Eğitim için tek gizli katmana sahip ileri beslemeli yapay sinir ağı modeli hazırlanmıştır. Şekil 1. Modelde sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Kullanılan ağ giriş, bir gizli ve çıkış olmak üzere üç katmandan oluşmaktadır.

Giriş katmanı güç, RMS (mm/s), RMS (dB), peak (mm/s), peak (inç/s) olmak üzere 5 sinirden, çıkış katmanı iyi, geçerli, alarm ve arıza olmak üzere 4 sinirden oluşmaktadır. Tek gizli katmandaki sinir sayısı ise 5, 10, 15, 25, 50, 75 seçilerek 6 değişik ağ yapısı oluşturulmuştur. Şekil 1.



Şekil 1. YSA Eğitim modelinin yapısı

V. YSA EĞİTİM SONUÇLARI

İleri beslemeli yapay sinir ağı kullanılarak, oluşturulan örnek data ile eğitim işlemi yapılmıştır. Kullanılan ağların gizli katman hücre sayıları değiştirilerek en iyi eğitim için en uygun hücre sayısı tespit edilmiştir. Hücre sayılarına ve iterasyon sayısına göre hata oranı grafikleri elde edilmiştir. Öğrenme için data sayısı fazla olduğu için yaklaşık 500 bin iterasyon yapılmış olup çeşitli iterasyonlarda ki değerler elde edilerek en iyi öğrenme için birbirleriyle karşılaştırmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmada gizli katman hücre sayıları değiştirilerek sistemin optimum gizli katman hücre sayısı belirlenmeye çalışılmıştır.

Gizli katman hücre sayıları sırasıyla 5, 10, 15, 25, 50 ve 75 olarak atanmış aktivasyon fonksiyonları ise sabit kalmıştır. Öğrenme algoritması olarak geriye yayılım kullanılarak simülasyon yapılmıştır.

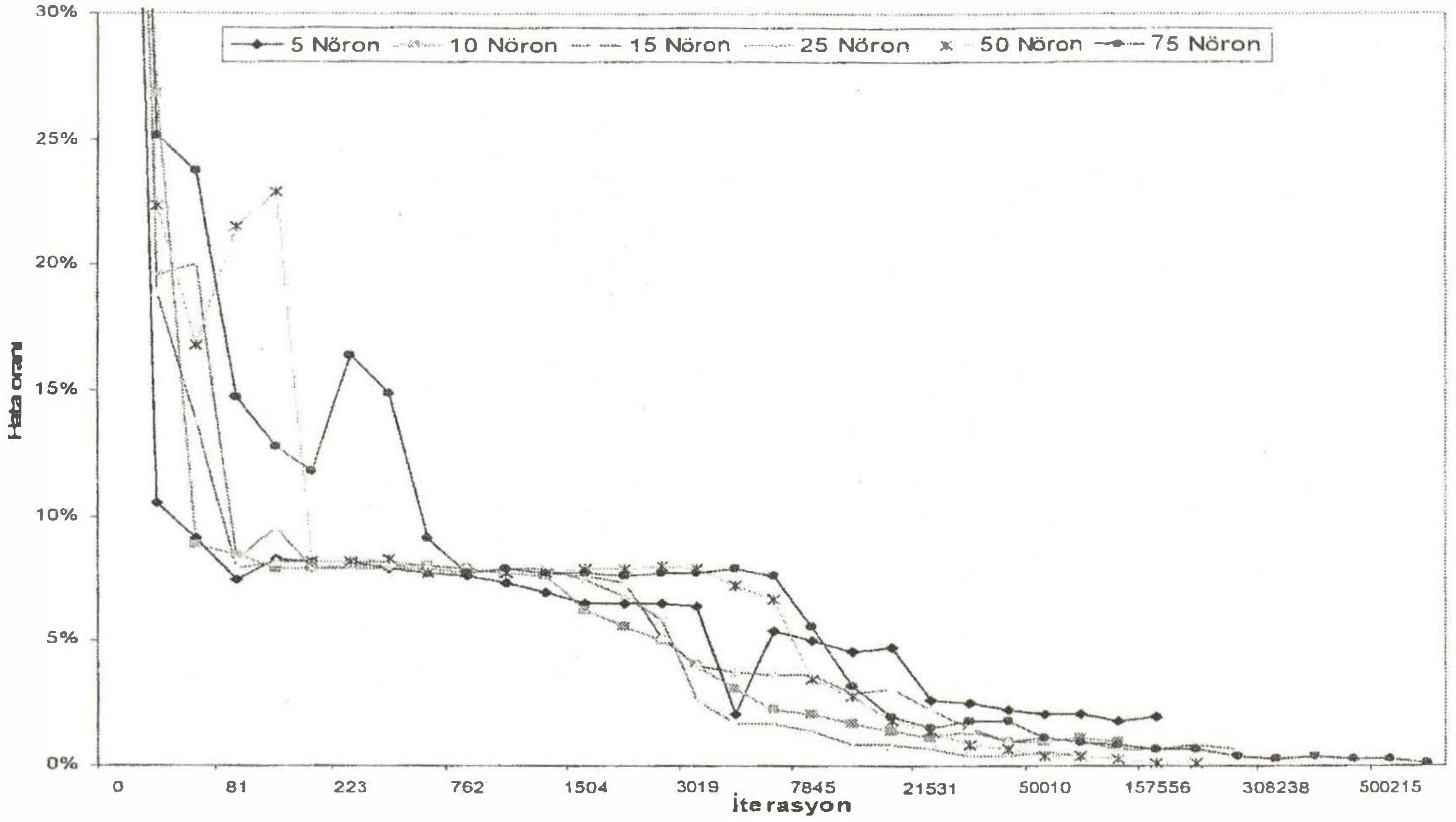
Eğitim sonucunda gizli katman sayısı 50 olan YSA'nın Tablo 5'te 104 iterasyonda, Tablo 6'da 503466 iterasyonda verdiği çıkış değerleri, giriş ve tablo değerleriyle bir arada görülmektedir. Hatalı satırlar italik ve bold karakterdedir. 104 İterasyonda hatalı çıkışlar fazladır, 503466 iterasyonda ise gözükmemektedir. İterasyon sayısına göre hata oranlarının değişimi Şekil 2' de değişik hücre sayıları için görülmektedir.

Tablo 5. 104 İterasyon için çıkış verileri

ISO 10816-1 GİRİŞ VE ÇIKIŞLARI					YSA ÇIKIŞLARI				YSA ÇIKIŞLARI			
GÜÇ KW	HIZ RMS mm/s	HIZ RMS dB	HIZ PEAK mm/s	HIZ PEAK inch/s	İYİ	GEÇERLİ	ALARM	ARIZA	İYİ	GEÇERLİ	ALARM	ARIZA
1	0.71	117	1	0.039	1	0	0	0	1	0	0	0
1	1,12	121	1,58	0,062	0	1	0	0	1	0	0	0
1	1,8	125	2,54	0,1	0	1	0	0	0	0	1	0
1	11.2	141	15.8	0.62	0	0	0	1	0	0	0	1
...
16	18	145	25.4	1	0	0	0	1	0	0	0	1
...
80	1,12	121	1,58	0,062	1	0	0	0	1	0	0	0
...
250	45	153	63.7	2.5	0	0	0	1	0	0	0	1

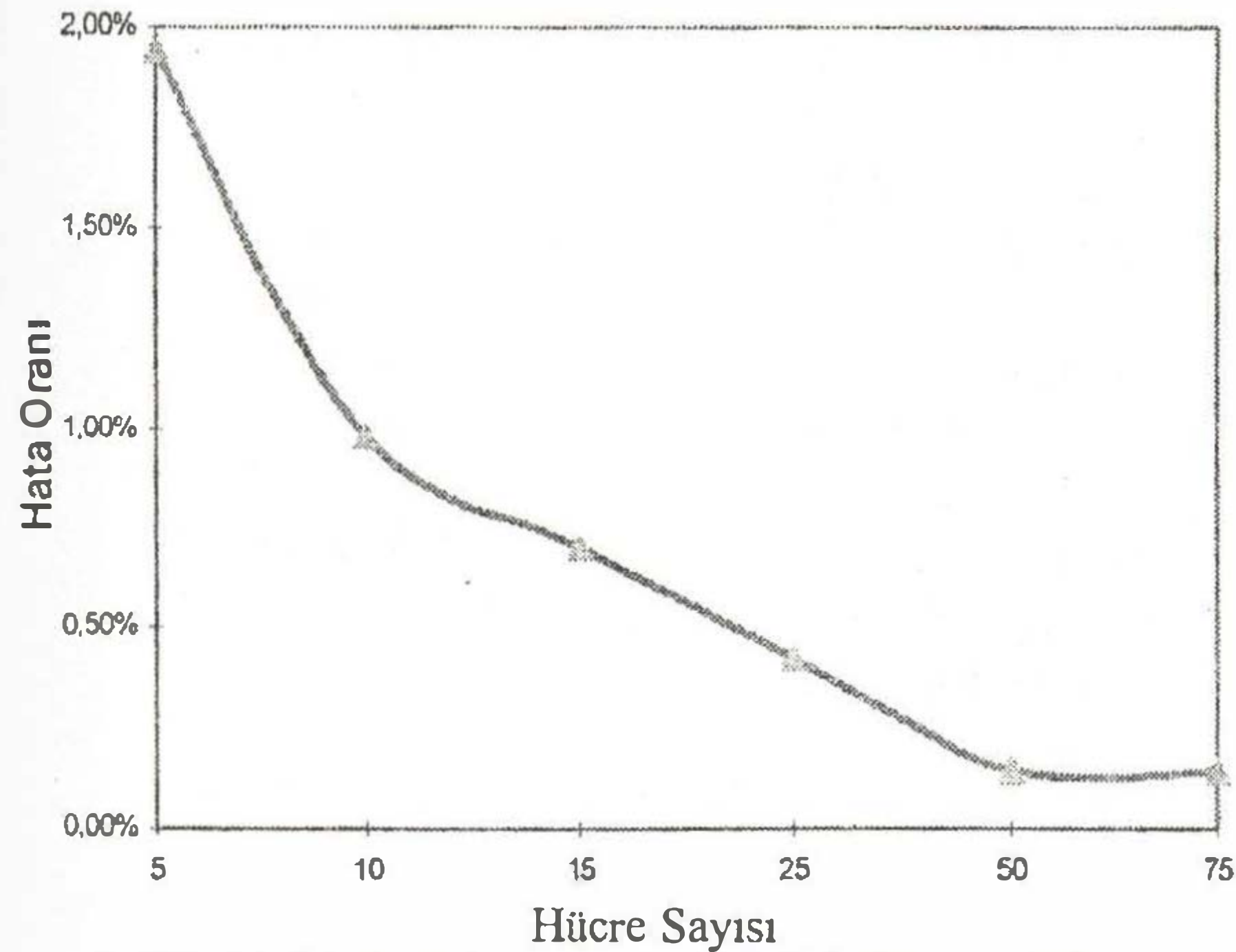
Tablo 6. 503466 İterasyon için çıkış verileri

ISO 10816-1 GİRİŞ VE ÇIKIŞLARI					YSA ÇIKIŞLARI				YSA ÇIKIŞLARI			
GÜÇ KW	HIZ RMS mm/s	HIZ RMS dB	HIZ PEAK mm/s	HIZ PEAK inch/s	İYİ	GEÇERLİ	ALARM	ARIZA	İYİ	GEÇERLİ	ALARM	ARIZA
1	11.2	141	15.8	0.62	0	0	0	1	0	0	0	1
1	18	145	25.4	1	0	0	0	1	0	0	0	1
...
16	18	145	25.4	1	0	0	0	1	0	0	0	1
...
80	2.8	129	3.96	0.16	0	1	0	0	0	1	0	0
...
250	45	153	63.7	2.5	0	0	0	1	0	0	0	1



Şekil 2. Çeşitli hücre sayılarındaki grafiklerin tek grafik üzerinde karşılaştırılması

Şekil 3' de hücre sayısına göre hata oranlarının değişimi görülmektedir. Şekilden, gizli katman hücre sayısını 50'den daha fazla arttırmanın bize daha fazla katkı sağlamayacağı görülmektedir.



Şekil 3. Gizli katman hücre sayısının değişimine göre hata oranı değişim grafiği

VI. SONUÇLAR

Bu çalışmada kestirimci bakım ve titreşim analizi için "ISO-10816 Orta Ölçekli Makinaların Titreşim Değerlendirme Standartları" tablosu kullanılarak oluşturulan eğitim seti, YSA'nı eğitmek için kullanılmıştır. Bunun için giriş, gizli ve çıkış katmanı olmak üzere üç katmanlı yapay sinir ağı oluşturulmuştur. Giriş için kullanılan eğitim data sayısı 720x9'luk bir matristen, test için kullanılan data ise 200x5'lik matristen oluşmaktadır. Eğitim işlemi gizli katman hücre sayısı 5, 10, 15, 25, 50 ve 75 olan ağların, ayrı ayrı eğitimi

gerçekleştirilmiştir. Eğitim esnasında geri yayılım algoritması kullanılmıştır. Birbirleriyle karşılaştırılarak en iyi sonucu veren ağ yapısı bulunmuştur.

Eğitim işlemi yüksek iterasyonlara kadar uygulanmıştır. Altı farklı gizli katman hücre sayılarında elde edilen eğitim sonuçlarında çok iyi sonuçlar elde edilmiştir. Grafik sonuçlarından görüldüğü gibi, altı farklı hücre sayılı gizli katmanlı ağların altısı için elde edilen sonuçların hepsi istenen düzeydedir. Ancak altı farklı ağ yapısının birbirlerine göre eğitim işleminin daha iyi olmasından söz edilebilir. 5, 10, 15, 25, 50 ve 75 sınırlı tek gizli katmana sahip her bir ağ için ayrı ayrı elde edilen eğitim sonuçlarına ait grafikler hata oranının iterasyon sayısı ile değişimi şeklinde gösterilmiştir. Şekil 2'den YSA'nın eğitimi için 1 ile 50000 arasında iterasyonlar gerçekleştirildiği görülmektedir. Yaklaşık 1-300 gibi düşük iterasyonlar da hata oranı hızla iyileşmekte, 300 iterasyondan sonra hata oranı daha yavaş iyileşme göstermektedir. Şekil 3 farklı sinir sayısına sahip 6 değişik YSA modelinin birbirlerine göre hata oranlarının değişimini göstermektedir. Buna göre 50 sınırlı gizli katmana sahip YSA'nın en iyi sonucu verdiği söylenebilir.

Eğitilen her bir YSA Tablo 4 yardımıyla test edilmiş ve test sonuç dosyaları elde edilmiştir. Her bir hücre sayısı için elde edilen test sonuç dosyaları değişik hata oranlarından dolayı birbirinden biraz farklılıklar gösterse de birbirine benzerdir.

5 Hücre için test sonuçları ve tablo değerleri kısaltılarak örnek için Tablo 7'de verilmiştir. 15, 25, 50 ve 75 Hücre için sonuçlar benzer olduğu için burada ayrıca verilmemiştir.

Bu çalışmayla, YSA'nın, makinaların titreşim kullanılabilirliği gösterilmiştir.
şiddetlerinin düzeylerini tespit edebilmede

Tablo 7. Hücre sayısı 5 iken test sonuç ve tablo değerleri

GÜÇ	ISO 10816-1	HESAPLANAN	GÜÇ	ISO 10816-1	HESAPLANAN
1	IYI	IYI	90	IYI	IYI
1	IYI	IYI	90	GEÇERLİ	GEÇERLİ
2	GEÇERLİ	GEÇERLİ	90	GEÇERLİ	ALARM
2	ALARM	ALARM	90	ALARM	ALARM
2	ARIZA	ARIZA	95	ARIZA	ARIZA
5	ARIZA	ARIZA	110	IYI	IYI
5	ARIZA	ARIZA	110	ARIZA	ARIZA
5	ARIZA	ARIZA	125	IYI	IYI
10	IYI	IYI	:	:	:
10	ARIZA	ARIZA	:	:	:
20	IYI	IYI	225	IYI	IYI
20	ARIZA	ARIZA	250	GEÇERLİ	GEÇERLİ
20	ARIZA	ARIZA	250	GEÇERLİ	GEÇERLİ
30	IYI	IYI	250	ALARM	GEÇERLİ
30	IYI	IYI	250	ALARM	ALARM
:	:	:	250	ARIZA	ALARM
:	:	:	250	ARIZA	ARIZA

VII. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Gerçek tablo değerleriyle YSA sonuçlarının karşılaştırılmasında da güce bağlı durum grafikleri elde edilebilir. Bunun için yapay sinir ağı eğitilirken giriş olarak zaman verileri de girilmelidir. Böylece elde edilen veriler zamanın bir fonksiyonu olacağı için birebir kestirimci bakıma uygulanabilir hale gelebilecektir. Güç ve zamanın mevcut olduğu veriler titreşim analiziyle hata teşhisinde nispeten yardımcı olacaktır. Bu grafikler daha da geliştirilerek makine sağlığının seyrini gösteren grafikler elde edilebilir. Bu grafikler yardımıyla da titreşim standartlarına göre kıyaslamalar yapılabilir. Elde edilen bu güce bağlı durum grafikleri üç boyuta dönüştürülüp, üçüncü boyuta zaman değerleri yazılabilir. Böylece değişik güçteki bir çok makinanın alarm düzeylerinin aynı anda izlenmesine olanak sağlanmış olur.

İyi bir kestirimci bakımın alt yapısının arka planını oluşturacak uzman sistem yapılarının geliştirilmesi, makine verilerinin ve benzeri standartların bu yapıya öğretilmesi ile her ölçüm sonunda ölçülen değerlerin anında kontrol edilmesi ve ekrana yansıtılması temel amaçlardan birisidir.

Bu çalışma esas alınıp geliştirilerek, önleyici bakım programı, uzman sistem destekli hibrit sistemler vb. hazırlanabilir. Burada kullanılan YSA algoritmasıyla; Değişik standartlar, benzer tipteki makinalar veya üretici firmanın verdiği veriler, önceki ölçüm bilgileri ile program eğitilerek, daha hızlı karar verebilen, kestirimci bakım programları hazırlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Mahmod M.Samman "A Hybrid Analysis Method for Vibration Signals Based on Neural Networks and Pattern Recognition Techniques", Journal of Vibration and Acoustics, January 2001, Volume 123, Issue 1, pp. 122-124.
- [2] Yongjun Wu, "Modeling and Simulation of Vibration Control Using a CMAC Neural Network", Master of Science in Electrical Engineering, University of New Hampshire, May 1999.
- [3] Yildirim S., Uzmay I., "Neural network applications to vehicles vibration analysis", Mechanism and Machine Theory 38 (2003) 27-41.
- [4] Yaagoub N. Al-Nassar, Mohsin Siddiqui, Ahmed Z. Al-Garni, "Artificial neural networks in vibration control of rotor-bearing systems", Simulation Practice and Theory 7, 729-740, October 1999.
- [5] Kumaraswamy. S., Rakesh. J. Ve Amol Kumar N., "Standardization of Absolute Vibration Level and Damage Factors for Machinery Health Monitoring", Proceedings of VETOMAC-2, 16-18 December, 2002.
- [6] ISO 10816-1, TC 108/SC 2, ICS:17.160, Mechanical vibration, evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts, Part 1: General guidelines, 1995.
- [7] ISO 2372, "Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s – Basis for specifying evaluation standards", 1974.