



Araştırma Makalesi
www.ziraat.selcuk.edu.tr/ojs
Selçuk Üniversitesi
Selçuk Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi
24 (1): (2010) 28-38
ISSN:1309-0550



YAPAY SİNİR AĞLARI İLE RADYAL SANTRİFÜJ POMPA PARAMETRELERİNİN TAHMİNİ¹

Alper TANER^{2,5}

²Bahri Dağdaş Uluslararası Tarımsal Araştırma Enstitüsü, Konya/Türkiye

S. Sinan GÜLTEKİN³

³Selçuk Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elk.-Elt. Müh. Böl., Konya/Türkiye

Kazım ÇARMAN⁴

⁴Selçuk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları Bölümü, Konya/Türkiye

(Geliş Tarihi: 24.08.2009, Kabul Tarihi: 12.10.2009)

ÖZET

Bu çalışmada çıkış değerleri bilinmeyen tanımlanmış bir sistemin girişlerine uygun çıkışlar üretebilme özelliği olan yapay sinir ağları uygulanmış ve radyal santrifüj pompalara ait yapısal parametrelerin tahmini yapılmıştır.

Yapay sinir ağ yapısı için deneysel parametre verileri kullanılmıştır. Bu amaçla pompanın devir sayısı, debi ve manometrik yükseklik parametreleri giriş verisi; çark giriş çapı, çark çıkış çapı, çark kanat sayısı, pompa giriş borusu çapı ve pompa çıkış borusu çapı parametreleri de çıkış verisi olmak üzere 3 girişi ve 5 çıkışı olan bir yapay sinir ağı modeli oluşturulmuştur.

Yapay sinir ağı modeli için çok katlı perseptron yapısına ait Levenberg Marquart eğitme algoritması kullanılmış ve elde edilen sonuçlar, ölçüm sonuçları, regresyon denklemleri ve teorik hesaplamalar ile elde edilmiş sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, ölçüm sonuçları ile çok iyi uyumluluk içinde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Radyal Santrifüj Pompa, Yapay Sinir Ağları, Levenberg Marquart.

PREDICTION OF THE PARAMETERS RADIAL CENTRIFUGAL PUMPS WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

ABSTRACT

In this study, an estimation of some structural parameters in radial centrifuge pumps was performed with Artificial Neural Networks having properties such as production of suitable outputs for defined system inputs of which the output values are unknown.

For Artificial Neural Network, experimental parameter values were used. Therefore, an Artificial Neural Network model was established with the pump RPM, flow rate and manometer height parameters as 3 input data and impeller inlet diameter, impeller outlet diameter, impeller blade number, pump inlet pipe diameter, pump outlet pipe diameter as 5 output data.

For Artificial Neural Network Model, Levenberg Marquart education algorithm which belongs to Multi-Layer Perceptron structure was used and the results obtained by Artificial Neural Network Model were compared with the results obtained by measurement, regression equations and theoretical calculations. It was observed that the results obtained by Artificial Neural Network were very compatible with the results of measuring.

Key Words: Radial Centrifugal Pump, Artificial Neural Networks, Levenberg Marquart.

GİRİŞ

Ekonomik bir sulama, çeşitli sulama metotları yanında bilgili bir pompaj yapmakla mümkündür. Sulama pompaj tesislerinin kurulmasında, tesisin şartlarına uygun ve bu şartlarda en yüksek verimle çalışabilen pompanın seçimi gerekir. Bu seçimi yapabilmek için sulama pompalarının çalışma karakteristiklerinin iyi bilinmesi gerekir (Ayıkoğlu 1995). Pompanın en yüksek verim noktası civarında çalıştırılması, işletme masrafları bakımından tesisin ekonomik sınırlarda iş görebilmesini sağlar. Bu durumun kontrolü ancak kullanılacak pompanın karakteristiklerini bilmekle mümkündür (Doğuş 1963). Hesap ve proje aşamasında yapılan kabullerin isabetli olmaması ya da çalışma şartlarına tam uymaması, imalatın projeye tamamen uygun bir biçimde gerçekleştirilmemesi, ölçme hataları

gibi çeşitli nedenlerle pompadan beklenen performans ile ölçülen performans arasında farklılıklar meydana gelir bu farklılıklar pompa konstrüksiyonu ve enerji sarfiyatı için çok önemlidir.

Günümüzde mühendislik bilim dalının en çok üzerinde durduğu konulardan biri enerjiyi doğru ve etkili kullanmaktır. Turbo makineler, hem enerji üretiminde hem de kullanımında, mühendislikte önemli bir yer tutmaktadır. Bu bilim dalının bir kolu olan pompalarda ise doğru enerji iletimi hayati önem taşımaktadır. Pompa içerisindeki akış yapısı titreşim ve seslere, dolayısıyla da birçok yapı hatalarına yol açmıştır. Bu problemlerin üstesinden gelmek, verimi artırmak ve çevresel etkilerden arınmak için karmaşık, kararlı ve kararsız akış yapılarını daha iyi anlamak gerekmektedir. Bu amaca uygun olarak geçmişte ve halen birçok

¹Bu çalışma Alper TANER'in Doktora Tezinden özetlenmiştir.

⁵Sorumlu Yazar: alperaner_2000@yahoo.com

araştırmacı tarafından santrifüj pompalar üzerinde deneysel ve sayısal çalışmalar yoğun bir şekilde yapılmaktadır (Pınarbaşı ve Johnson 1995, Sinha 1999, Güleren 2003).

Yapay sinir ağları (YSA), yapay zekâ biliminin altında araştırmacıların çok yoğun ilgi gösterdikleri bir araştırma alanıdır. YSA, insan beyninin işleyişini taklit ederek yeni sistem oluşturulmaya çalışılan yaklaşımlardır. Beynin işleyiş kuralları birçok YSA modelinin geliştirilmesinde kullanılmıştır. YSA mühendislik alanında, imalat sanayinde, endüstriyel ürün tasarımında, bilgi yönetiminde, tıp alanında, tıbbi görüntü işlemede, savunma sanayisinde, tarımsal ve hayvancılık alanlarında kullanılmaktadır (Sağiroğlu ve ark. 2003).

YSA, bir sisteme ilişkin tek veya çoklu parametrelere bağlı olarak tanımlanan giriş verileri ile sistemin yine tek veya çoklu parametrelere bağlı olarak tanımlanabilen çıkışları arasında ilişki kurabilme yeteneğine sahiptir. Bu ilişkinin doğrusal formda olması zorunlu değildir. YSA, çıkış değerleri bilinmeyen tanımlanmış sistem girişlerine uygun çıkışlar üretebilirler (Sağiroğlu ve ark. 2003). Olayların örneklerine bakmakta ve ilgili olay hakkında genellemeler yapmakta, bilgiler toplamakta ve daha sonra hiç görmediği ör-

nekler ile karşılaşınca öğrendiği bilgileri kullanarak o örnekler hakkında karar verebilmektedir (Öztemel 2003).

Santrifüj pompaların kullanımında klasik metotlarla karmaşık matematiksel fonksiyonların hesaplanmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bunun neticesinde fazla hesaplama zamanı ve kullanılan metotların çok sağlıklı sonuç vermemesi, santrifüj pompaların tasarımında verim kayıplarına neden olmaktadır. Ayrıca alışıl-gelmiş tahmin modelleri tek yönlü çalışmaktadır. Yani, bağımlı değişkenlere bağlı olarak bağımsız değişkenlerin tahmin edilmesi mümkün olmaktadır. YSA'ları ile bağımlı değişkenlere bağlı olarak bağımsız değişkenlerin tahmin edilmesi ya da bağımsız değişkenlere bağlı olarak bağımlı değişkenlerin tahmin edilmesi mümkün olabilmektedir. Kısacası modeli iki yönlü çalıştırmak mümkündür. YSA'ların öğrenme, genelleme, hızlı işlem yapma, paralel işlem yapma ve hızlı sonuç verebilme özelliklerinden faydalanılarak yukarıda belirtilen tipteki problemler için iyi sonuç verdiği bilinmektedir (Haykin 1994). YSA'ların bu özelliklerinden faydalanarak santrifüj pompa parametrelerinin tahmini yeni bir yaklaşım olarak bu çalışmada sunulmuştur.

Terimler

YSA yapay sinir ağları

C_o çark giriş ağzındaki hız (m/s)

C_1 çarka girişteki mutlak hız (m/s)

C_{m2} çıkış meridyen hızı (m/s)

C_{m1} giriş meridyen hızı (m/s)

C_{u2} teğetsel hız bileşeni (m/s)

$C_{u2\infty}$ teğetsel hız bileşeni (m/s)

d_g göbek çapı (m)

D_1 çark giriş çapı (mm)

D_2 çark çıkış çapı (mm)

D_e emme borusu çapı (m)

D_o çark giriş ağzı çapı (mm)

H_m manometrik yükseklik (m)

g yer çekimi ivmesi (m/s²)

K sapma katsayısı

k_{u2} hız katsayısı

k_{m2} hız katsayısı

n devir sayısı (min⁻¹)

n_s özgül hız (min⁻¹)

Ne pompa miline verilmesi gereken güç (BG)

Q pompa debisi (m³/s)

Q_T toplam debi (m³/s)

U_1 çark girişindeki çevre hızı (m/s)

U_2 çark çıkışındaki çevre hızı (m/s)

V_e emme borusundaki su hızı (m/s)

z çark kanat sayısı

β_1 suyun çarktan gerçek giriş açısı

β_2 suyun çarktan gerçek çıkış açısı

β_{2k} kanat çıkış açısı

η_t genel verim (%)

η_h hidrolik verim (%)

ψ basınç katsayısı

σ_s Schulz katsayısı (0.90 – 0.95)

γ suyun özgül ağırlığı (1 kg/l)

Çalışır ve ark. (2003), çalışmalarında santrifüj pompaların performans değerlerini, istatistiki tahmin denklemleri ve YSA yardımıyla hesaplamışlardır. YSA'ların eğitilmesinde çok katlı perseptron yapısına sahip genişletilmiş delta-bar-delta öğrenme algoritması, eğitime ve test işleminde 21 farklı pompaya ait

deneysel sonuçları ve ölçülen yapısal parametreleri veri olarak kullanmışlardır. Nöral modelden elde edilen sonuçların, istatistiki tahmin denklemlerinden elde edilen sonuçlara göre deneysel verilere daha yakın sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmada, radyal santrifüj pompa parametrelerinin YSA teknikleri ile tahmini amaçlanmıştır. Bu amaçla santrifüj pompa parametrelerinin hesaplanması için devir sayısı (n), debi (Q) ve manometrik yükseklik (Hm) parametreleri giriş verisi, çark giriş çapı (D₁), çark çıkış çapı (D₂), çark kanat sayısı (z), pompa giriş borusu çapı (D_e) ve pompa çıkış borusu çapı (D_b) parametreleri de çıkış verisi olmak üzere 3 girişi ve 5 çıkışı olan bir YSA modeli geliştirilmiştir. YSA modelinden elde edilen sonuçlar ile önceden alınmış

deneysel sonuçlar ve klasik metotlarla çözümleri oluşturulmuş sonuçlar karşılaştırılmıştır.

MATERYAL VE METOT

Çalışmada yer alan veriler, (Uz 1981, Gürhan ve Ayık 1991, Eryılmaz 2004, Anonim 1984, Anonim 1985, Anonim 1990, Anonim 1991, Anonim 1992, Anonim 1993, Anonim 1997)'e ait olup bu çalışmada materyal olarak kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışma kapsamında, denemeleri yapılan 4" ve 5" lik santrifüj pompalara ait sonuçlar da mevcut veri tabanına ilave olarak kullanılmıştır (Taner 2007) (Tablo 1).

Tablo 1. Çalışmada yer alan tüm deneysel veriler.

Giriş Verileri			Çıkış Verileri				
n (min ⁻¹)	Q (m ³ /s)	Hm (m)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	z (adet)	D _e (mm)	D _b (mm)
3000	0.01439	15.8	78.15	140.9	7	63.5	50.8
2785	0.01898	41.8	79.15	174.9	6	101.6	76.2
.....
1600	0.02628	4.98	110	185	6	100	100
.....
1900	0.03280	23.5	103	206	6	101	98
.....
3000	0.01744	31.45	88	175	7	93	79
.....
800	0.04963	8.18	186	304	6	200	195

Radyal Santrifüj Pompalara Ait Bazı Yapısal Parametrelerin Teorik Hesaplanması

Bir santrifüj pompaya ait mühendislik hesapları için pompanın çalışma koşulları ve buna bağlı olarak karakteristiklerinin bilinmesi gerekir. Tasarım için genellikle devir sayısı, debi ve manometrik yükseklik olmak üzere üç karakteristik büyüklüğün bilinmesi yeterli olmaktadır. Pompa tasarımında, hesapların tam bir teoriye dayandırılması mümkün olmadığından, proje hesapları oldukça karmaşıktır (Baysal 1975).

Santrifüj pompa parametreleri olarak, çark giriş çapı (D₁), çark çıkış çapı (D₂), çark kanat sayısı (z), pompa giriş borusu çapı (D_e) ve pompa çıkış borusu çapı (D_b) dikkate alınmış ve bu parametrelerin teorik hesaplaması yapılmıştır (Baysal 1975, Gürhan 1990).

Pompa giriş borusundaki hızlar (V_e), aşağıdaki denklemlerden elde edilmiştir (Baysal 1975, Gürhan 1990).

$$n = 3000; V_e = (-4.9648/e^{(16.5.Q)}) + 6.4543 \quad (1)$$

$$n = 1500; V_e = (-5.2475/e^{(6.66.Q)}) + 6.4723 \quad (2)$$

$$n = 1000; V_e = (-1.7857/e^{(19.5.Q)}) + 2.709 \quad (3)$$

Bu denklemler ile devir sayısı ve debiye bağlı olarak pompa giriş borusundaki hızlar hesaplanmıştır. Hız ve debi değerlerinden pompa giriş borusu çapı bulunmuştur (Baysal 1975).

$$D_e = \sqrt{\frac{4.Q}{\pi.V_e}} \quad (4)$$

İmalat kolaylığı bakımından çark giriş ağız çapının, pompa giriş borusu çapına eşit alınması uygun olur.

$$D_o = D_e \quad (5)$$

Çark giriş çapı, çark giriş ağız çapından biraz büyük seçilmiştir (Baysal 1975).

$$D_1 = \sigma_s . D_o \quad (6)$$

Basınç katsayısı aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır (Baysal 1975, Gürhan 1990).

$$\psi = 8.10^{-6} . n_s^2 - 5.7.10^{-3} . n_s + 1.455 \quad (7)$$

Önce teğetsel hız ve sonra çark çıkış çapı bulunmuştur (Baysal 1975, Gürhan 1990).

$$U_2 = \sqrt{\frac{2.g.H_m}{\psi}} \quad (8)$$

$$D_2 = \frac{60.U_2}{\pi.n} \quad (9)$$

Bulunan çark çapının kontrolü için hız katsayısı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır (Baysal 1975, Gürhan 1990).

$$k_{u2} = 0.8005 + 8.8813 \cdot 10^{-3} \cdot (n_s / 3.65) + 4.2171 \cdot 10^{-5} \cdot (n_s / 3.65)^2 + 1.8052 \cdot 10^{-7} \cdot (n_s / 3.65)^3 \quad (10)$$

$$U_2 = k_{u2} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_m} \quad (11)$$

Bu eşitlikten bulunan teğetsel hıza göre çark çıkış çapı tekrar bulunmuştur. Bulunan çark çapının (%10) fazlası alınarak olması gereken çark çıkış çapı ve bu çapa göre teğetsel hız bulunmuştur. Çünkü çark çıkış çapının bulunmasında, manometrik yükseklik değeri çok önemlidir. Bu nedenle hesaplanan (D_2) çapına göre imal edilecek olan çarkın ve pompanın manometrik yüksekliği sağlayamaması olasılığı gözden uzak tutulmamalıdır (Baysal 1975).

Çıkış meridyen hızı (C_{m2});

$$C_{m2} = k_{m2} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_m} \quad (12)$$

eşitliğinden bulunmuştur.

Burada hız katsayısı (k_{m2}), özgül hız değerlerine göre deneysel verilerden oluşturulan eğrinin denkleminde hesaplanmıştır (Baysal 1975, Gürhan 1990):

$$k_{m2} = (-0.69608 / e^{(1.01710)^{-3} \cdot n_s}) + 0.74857 \quad (13)$$

Teğetsel hız bileşeni (C_{u2});

$$C_{u2} = \frac{g \cdot H_m}{U_2 \cdot \eta_h} \quad (14)$$

eşitliği ile bulunmuştur.

Eşitlikte yer alan hidrolik verim, radyal akışlı pompalar için belirlenmiş özgül hız değerleri göz önüne alınarak,

$$\eta_h = 1 - \frac{0.8}{\left(\frac{Q \cdot 10^5}{6.30902}\right)^{1/4}} \quad (15)$$

eşitliği ile bulunmuştur.

Pompanın bastığı sıvının özgül ağırlığı, basılan debi, manometrik yükseklik ve genel verim değeri ile pompanın miline verilmesi gereken güç (effektif güç) hesaplanmıştır (Baysal 1975, Gürhan 1990).

$$Ne = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{75 \cdot \eta_t} \quad (16)$$

Radyal santrifüj pompaların özgül hızları göz önüne alınarak, 45...200 arasında özgül hızlar için toplam verim (η_t) eğrilerine ait aşağıdaki denklemler kullanılmıştır (Gürhan 1990).

$$Q = 6.5; \eta_t = \left(-0.5350 / e^{(0.027913 \cdot n_s)}\right) + 0.68 \quad (17)$$

$$Q = 12; \eta_t = \left(-0.5760 / e^{(0.0322757 \cdot n_s)}\right) + 0.71 \quad (18)$$

$$Q = 32; \eta_t = \left(-0.4519 / e^{(0.027516 \cdot n_s)}\right) + 0.78 \quad (19)$$

$$Q = 65; \eta_t = \left(-0.3722 / e^{(0.02897 \cdot n_s)}\right) + 0.82 \quad (20)$$

$$Q = 200; \eta_t = \left(-0.3089 / e^{(0.021885 \cdot n_s)}\right) + 0.88 \quad (21)$$

$$Q = 650; \eta_t = \left(-0.3639 / e^{(0.021865 \cdot n_s)}\right) + 0.91 \quad (22)$$

Adi mil çeliği için kayma gerilmesi $\tau = 120$ kg/cm² alınarak mil çapı aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır (Keskin ve Güner 2002).

$$d_m = 14.4 \cdot \sqrt[3]{\frac{Ne}{n}} \quad (23)$$

Göbek çapı, mil çapının en az 1.5 katı olmalıdır (Baysal 1975). Buna göre,

$$d_g = 1.5 \cdot d_m \quad (24)$$

formülü ile hesaplanmıştır.

Kaçak verim değeri (%90) kabul edilerek toplam debi (Q_T);

$$Q_T = 1.05 \approx 1.1 \cdot Q \quad (25)$$

formülü ile bulunmuştur (Baysal 1975).

Çark giriş ağzındaki hız (C_0) aşağıdaki formül ile bulunmuştur (Baysal 1975).

$$C_0 = \frac{4 \cdot Q_T}{\pi \cdot (D_0^2 - d_g^2)} \quad (26)$$

Çarka girişteki mutlak hız (C_1), meridyen hızına (C_{m1}) eşit alınması gerekir (Baysal 1975).

$$C_{m1} = C_1 = (1.05 \approx 1.1) \cdot C_0 \quad (27)$$

Giriş teğetsel hızı (U_1) ve kanat giriş açısı (β_1) ise;

$$U_1 = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} \quad (28)$$

$$\tan \beta_1 = \frac{C_{m1}}{U_1} \quad (29)$$

formülleri ile hesaplanmıştır (Baysal, 1975).

Suyun çarktan gerçek çıkış açısı (β_2) aşağıdaki formül ile bulunmuştur (Baysal 1975).

$$\tan \beta_2 = \frac{C_{m2}}{U_2 - C_{u2}} \quad (30)$$

Sapma katsayısı (K);

$$K = 1 + \frac{1.2 \cdot (1 + \sin \beta_{2k})}{z} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2} \quad (31)$$

Teğetsel hız bileşeni ($C_{u2\infty}$);

$$C_{u2\infty} = K.C_{u2} \quad (32)$$

Kanat çıkış açısı (β_{2k});

$$tg\beta_{2k} = \frac{C_{m2}}{U_2 - C_{u2\infty}} \quad (33)$$

Kanat sayısı (z);

$$z = 6.5 \cdot \frac{D_2 + D_1}{D_2 - D_1} \cdot \sin \frac{\beta_1 + \beta_{2k}}{2} \quad (34)$$

formülleri ile bulunmuştur (Baysal 1975).

Regresyon Tahmin Denklemleri

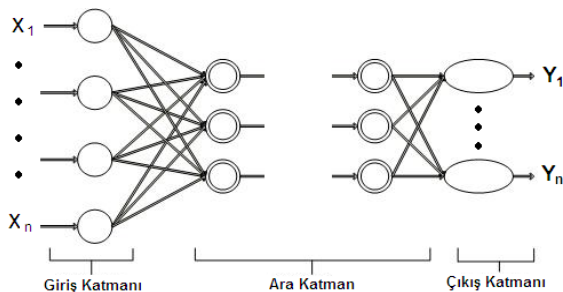
Santrifüj pompaların bazı yapısal parametreleri (D_1, D_2, z, D_e, D_b) için kullanılan verilerden (Tablo 1), regresyon analizi yapılarak, regresyon tahmin denklemleri elde edilmiştir.

Yapay Sinir Ağları

YSA çalışmalarında, MATLAB Paket Programı, 7.01 Neural Network Toolbox'ı kullanılmıştır. Santrifüj pompa parametrelerinin tahmini için YSA teknikleri uygulanmıştır.

Radyal Santrifüj Pompa parametrelerinin hesaplanması için geliştirilen YSA modelinde, İleri Beslemeli (Feed Forward Backprop), Çok Katmanlı Perseptron ağ yapısı kullanılmıştır (Jacobs 1988, Minai and Williams 1990).

Çok Katmanlı Perseptron ağ yapısı, Şekil 1'de gösterildiği gibi, bir giriş katmanı, bir veya birden fazla ara katman ve bir çıkış katmanından oluşan ileri beslemeli bir YSA tipidir. Giriş katmanındaki işlemci elemanlar, giriş sinyallerini ara katmandaki işlemci elemanlara dağıtır. Ara katmandaki işlemci elemanlar, giriş katmanından gelen girişler bağlantı ağırlıklarıyla çarpıldıktan sonra toplanır ve bir transfer fonksiyonundan geçirilerek çıkış katmanına aktarılır. Çıkış katmanındaki işlemci elemanlar ara katman elemanları gibi davranarak ağ çıkış değerini hesaplar.



Şekil 1. Çok Katmanlı Perseptron Yapay Sinir Ağı Yapısı

İleri beslemeli sinir ağı modeli olarak adlandırılan yapıda bilgi akışı, ileri doğrudur ve geri besleme yoktur. Giriş katmanı, ara katmanı ve çıkış katmanındaki işlem elemanı sayıları, uygulanan problemin yapısına

ve buna göre oluşturulacak eğitim ve test setine göre değişebilir (Sağıroğlu ve ark. 2003).

Kullanılan eğitime algoritmasına göre, ağı çıkışı ile arzu edilen çıkış arasındaki hata, minimuma düşüncüye kadar ağı ağırlıkları değiştirilir.

Kullanılan öğrenme algoritması, Levenberg-Marquardt algoritmasıdır. Oldukça başarılı bir optimizasyon metodu olan Levenberg-Marquardt eğitime algoritması, farklı öğrenme tekniklerinden biridir (Levenberg 1944, Marquardt 1963). Öğrenme sürecinde, her giriş, gizli katmanlardaki nöronlarda işlenerek sonuç üretmek üzere çıkışa aktarılır. Çıkış katmanındaki hataları elde etmek için, hedeflenen sonuçla, elde edilen sonuç karşılaştırılır. Elde edilen hataların türevi çıkış katmanından geriye doğru gizli katmanlara aktarılır. Nöronlar hatalarını azaltmak için ağırlıklarını ayarlar ve ağırlık değiştirme denklemleri, ağdaki performans fonksiyonunu en küçük yapacak şekilde düzenler. İleri beslemeli ağlar için kullanılan öğrenme algoritmaları, performans fonksiyonunu en küçük yapacak ağırlıkları ayarlayabilmek için, fonksiyonunun gradyenini kullanırlar.

Geriye yayılım algoritması ise, gradyen hesaplamalarını geriye doğru yapar. En temel geriye yayılım öğrenme algoritması gradyen azalması algoritmasıdır. Gradyen azalması algoritmasında kullanılan ağırlıklar, performans fonksiyonunun azalması yönünde ayarlanmasına karşın pek çok problem için çok yavaş kalmaktadır. Bu sebeple daha yüksek performanslı ve daha hızlı bir algoritma olan, standart sayısal optimizasyon yöntemini kullanan, Levenberg-Marquardt öğrenme algoritması bu çalışmada önerilmiştir. Levenberg-Marquardt algoritması, Newton ve Gradyen Azalması algoritmalarının en iyi özelliklerinden oluşur ve diğer algoritmaların kısıtlamalarını genellikle ortadan kaldırır. Newton yöntemlerinde temel adım Hessian matrisini elde etmektir. Hessian matrisi, performans fonksiyonunun ağırlıklara göre ikinci dereceden türevlerinden oluşan bir matristir ve ağırlık uzayının farklı doğrultularındaki gradyen değişimini gösterir.

$$H(n) = \frac{\partial^2 E(n)}{\partial w^2(n-1)} \quad (35)$$

H , Hessian matrisi, E , performans fonksiyonu ve w , ağı sinaptik ağırlığını verir. Performans fonksiyonu, duruma göre toplam ani hata veya ortalama karesel hata olarak alınabilir. Levenberg-Marquardt algoritması Hessian matrisinin yaklaşık değerini kullanır. Levenberg-Marquardt algoritması için Hessian matrisinin yaklaşık değeri şu şekildedir:

$$H(n) = J^T(n)J(n) + \mu I \quad (36)$$

μ , Marquardt parametresi, I , birim matrisi, J ise, Jakobien matrisi olarak tanımlanır ve ağ hatalarının ağırlıklara göre birinci türevlerinden oluşur:

$$J(n) = \frac{\partial e(n)}{\partial w(n-1)} \quad (37)$$

e , ağ hataları vektörüdür. Jakobien matrisi, hesaplamada Hessian matrisinden daha kolay olduğu için tercih edilir. Buna göre ağıın gradyeni,

$$g(n) = J^T(n) e(n) \quad (38)$$

olarak hesaplanır ve ağırlıklar aşağıdaki denkleme göre değiştirilir:

$$w(n+1) = w(n) - [H(n)]^{-1} g(n) \quad (39)$$

Marquardt parametresi (μ), skaler bir sayıdır. Eğer μ sıfırsa, bu yöntem yaklaşık Hessian matrisini kullanan Newton algoritması; eğer μ büyük bir sayı ise, küçük adımlı gradyen azalması yöntemi haline gelir. Newton yöntemleri, en küçük hata yakınlarında daha hızlı ve kesindir. Her başarılı adımdan sonra, yani performans fonksiyonunun azalmasında μ azaltılır ve sadece deneme niteliğindeki bir adım performans fonksiyonunu yükseltecekse μ artırılır. Bu yöntemle, algoritmanın her iterasyonunda, performans fonksiyonu daima azaltılır. Genel olarak Levenberg – Marquardt algoritması yavaş yakınsama probleminden etkilenmez. Burada hedef, performans fonksiyonun en küçük yapacak ağırlık değerini bulmaktır (Bolat ve Kalenderli 2003, Haykin 1999, Ngia 2000).

Sonuçların performanslarının belirlenmesi amacıyla; hesaplama yöntemleri ile elde edilen değerlerin, ölçülen değerlerle arasındaki hata (ε) aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır (Bağırkan 1993).

$$\varepsilon = \frac{100}{m} \sum_1^m \left| \frac{x - x_1}{x} \right| \quad (40)$$

Burada ε , hata (%), m , pompa sayısı, x , ölçülen değer ve x_1 , hesaplanan değerdir.

Uyuşma derecesi sıfıra ne kadar yakın ise modeller arasında o kadar fazla uyum olduğunu söylemek mümkündür. Uyuşma derecesi aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır (Bağırkan 1993).

$$U^2 = \frac{\sum_1^m (x_1 - x)^2}{\sum_1^m (x_1)^2} \quad (41)$$

Burada U^2 , uyuşma derecesi, m , pompa sayısı, x , ölçülen değer ve x_1 , hesaplanan değerdir.

Çalışmada, YSA test sonuçları “YSA”, pompa parametrelerinin teorik formüllerle hesaplanmasıyla elde edilen sonuçlar “Teorik”, regresyon denklemleriyle elde edilen sonuçlar “Regresyon” ve ölçüm sonuçları ise “Ölçüm” olarak tanımlanmıştır.

ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Regresyon Tahmin Denklemleri

Santrifüj pompaların ölçülen bazı yapısal boyutları (D_1, D_2, z, D_e, D_b) için kullanılan verilerden (Tablo 1) regresyon analizi yapılarak tahmin denklemleri elde edilmiştir. Elde edilen regresyon tahmin denklemleri aşağıda verilmiştir.

Çark Giriş Çapı:

$$D_1 = 434.25 + 0.1473.n + 447.02Q - 0.1279.Hm - 16.13\sqrt{n} - 422.59\sqrt{Q} + 44.75\sqrt{Hm} + 18.55\sqrt{nQ} - 0.5745\sqrt{n.Hm} - 85.84\sqrt{Q.Hm}$$

Çark Çıkış Çapı:

$$D_2 = 461.64 + 0.0537.n + 1012.41.Q - 5.Hm - 11.40.\sqrt{n} - 479.39.\sqrt{Q} + 58.35.\sqrt{Hm} + 9.9.\sqrt{n.Q} - 0.0982.\sqrt{n.Hm} - 15.03.\sqrt{Q.Hm}$$

Çark Kanat Sayısı:

$$z = 1.03 - 0.0026.n - 6.46.Q - 0.0777.Hm + 0.2459.\sqrt{n} + 10.68.\sqrt{Q} - 0.0933.\sqrt{Hm} - 0.4023.\sqrt{n.Q} + 0.0126.\sqrt{n.Hm} + 0.9332.\sqrt{Q.Hm}$$

Pompa Giriş (Emme) Borusu Çapı:

$$D_e = 593.69 + 0.1810.n + 1107.42.Q + 0.0144.Hm - 20.56.\sqrt{n} - 700.81.\sqrt{Q} + 14.46.\sqrt{Hm} + 17.44.\sqrt{n.Q} - 0.1161.\sqrt{n.Hm} - 39.05.\sqrt{Q.Hm}$$

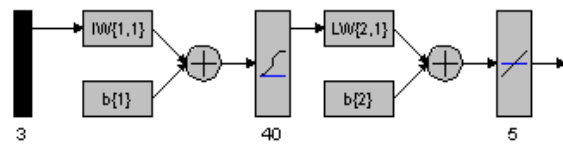
Pompa Çıkış (Basma) Borusu Çapı:

$$D_b = 579.71 + 0.1935.n + 1119.62.Q + 0.9254.Hm - 20.54.\sqrt{n} - 731.87.\sqrt{Q} + 21.09.\sqrt{Hm} + 18.2.\sqrt{n.Q} - 0.4497.\sqrt{n.Hm} - 37.93.\sqrt{Q.Hm}$$

Elde edilen bu denklemlerden her parametre için “Regresyon” değerleri hesaplanmıştır.

Yapay Sinir Ağları

Pompa parametrelerinin tahmininde çark giriş çapı, çark çıkış çapı, çark kanat sayısı, pompa giriş borusu çapı ve pompa çıkış borusu çapı boyutları YSA teknikleri kullanılarak elde edilmiştir. Geliştirilen YSA modelinde 174 eğitim, 16 test verisi olmak üzere 190 veri kullanılmıştır (Tablo 1) ve 3 girişli, 5 çıkışlı ağ modeli Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. YSA ağ modeli

Gizli katmandaki nöron sayıları için 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 200, 300 değerleri kullanılmıştır.

ve en uygun sonucu veren 40 nöronlu gizli katmana sahip ağ seçilmiştir. Buna göre YSA için girişte 3 nöron, gizli katmanda 40 nöron ve çıkışta da 5 nöron olmak üzere üç katman oluşturulmuştur.

Geliştirilen YSA modeli için, giriş katmanına logaritmik, gizli katmanına sigmoid, çıkış katmanına ise lineer transfer fonksiyonu uygulanmıştır.

Kullanılan giriş ve çıkış verilerini modele uydurmak için 0 ile 1 arasında normalize edilmiştir (Purushothaman and Srinivasa 1994). Normalize için;

$$y_{nor} = \frac{y - y_{min}}{y_{max} - y_{min}} \quad (42)$$

ifadesi kullanılmıştır. Normalize değerlerden gerçek değerleri elde etmek için, aynı formülden “y” değeri hesaplanmıştır.

YSA modeli için hazırlanan test seti ve test YSA sonuçları Tablo 2’de verilmiştir.

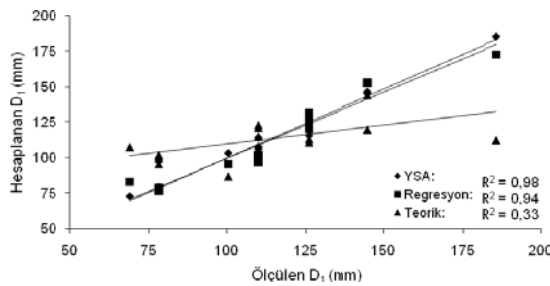
Çark Giriş Çapı

Ölçüm sonuçları ile YSA test sonuçları, teorik hesaplamalardan elde edilen sonuçlar ve regresyon tahmin denklemlerinden elde edilen sonuçlara ait veriler ve hata değerleri Tablo 3’de verilmiştir.

Ölçüm değerlerine yaklaşımda hata (ϵ), YSA için %2.43, regresyon için %5.32 ve teorik için ise %18.02 bulunmuştur. Uyuşma derecesi (U^2) ise, YSA, regresyon ve teorik için sırasıyla 0.0009, 0.0042 ve 0.0495 hesaplanmıştır.

Tablo 2. YSA modeli için hazırlanan test seti

GİRİŞLER			ÇIKIŞLAR				
n (min ⁻¹)	Q (m ³ /s)	Hm (m)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	z (adet)	D _e (mm)	D _b (mm)
1300	0.03194	13.17	124.9	255.3	6.9	102.8	98.4
1400	0.04112	9.7	127.4	254.4	7.1	101.3	99.3
1600	0.02101	24.22	121.3	247.9	6.9	107.7	103.7
1700	0.03333	25.14	115.8	246.5	6.8	96.4	91.7
1000	0.06011	7.74	145.7	272.5	6.0	153.6	147.9
1200	0.08632	7.64	146.8	265.8	6.0	156.5	153.6
700	0.04839	6.24	185.8	305.5	6.1	196.5	190.7
2900	0.0145	29	72.9	162.4	5.6	69.2	61.0
2650	0.00871	61.95	103.5	88.9	6.1	80.3	74.7
3000	0.01036	28.35	78.0	150.9	6.9	63.7	56.7
3000	0.01193	25.03	79.6	151.8	6.8	64.6	58.2
3000	0.0123	23	79.3	150.1	6.8	63.6	56.6
3009	0.0114	20.2	76.5	145.7	6.8	59.2	50.2
1600	0.02351	4.93	107.9	187.5	6.0	97.8	101.2
2220	0.0251	14.25	114.3	180.4	5.8	107.4	106.0
1810	0.02628	7.63	106.5	184.5	6.0	97.0	96.2



Şekil 3. Ölçülen ve tahmin edilen çark giriş çapı değerleri arasındaki ilişki

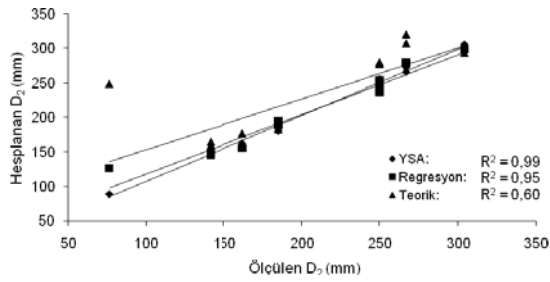
Çark giriş çapı (D_1) ölçüm sonuçları ile tahmin ve hesaplama sonuçları (YSA, regresyon ve teorik) arasındaki ilişkinin determinasyon katsayısı (R^2), YSA için %98, regresyon için %94 ve teorik için %33 bulunmuştur (Şekil 3).

Çark Çıkış Çapı

Ölçüm sonuçları ile YSA test sonuçları, teorik hesaplamalardan elde edilen sonuçlar ve regresyon tahmin denklemlerinden elde edilen sonuçlara ait veriler ve hata değerleri Tablo 4’de verilmiştir.

Ölçüm değerlerine yaklaşımda hata (ϵ), YSA için %3.37, regresyon için %8.06 ve teorik için ise %22.57 bulunmuştur. Uyuşma derecesi (U^2) ise, YSA, regresyon ve teorik için sırasıyla 0.0008, 0.0053 ve 0.0434 hesaplanmıştır.

Çark çıkış çapı (D_2) ölçüm sonuçları ile tahmin ve hesaplama sonuçları (YSA, regresyon ve teorik) arasındaki ilişkinin determinasyon katsayısı (R^2), YSA için %99, regresyon için %95 ve teorik için %60 bulunmuştur (Şekil 4).



Şekil 4. Ölçülen ve tahmin edilen çark çıkış çapı değerleri arasındaki ilişki

Çark Kanat Sayısı

Ölçüm sonuçları ile YSA test sonuçları, teorik hesaplamalardan elde edilen sonuçlar ve regresyon tahmin denklemlerinden elde edilen sonuçlara ait veriler ve hata değerleri Tablo 5’de verilmiştir.

Ölçüm değerlerine yaklaşımda hata (ϵ), YSA için %2.11, regresyon için %5.59 ve teorik için ise %39.83 bulunmuştur. Uyuşma derecesi (U^2) ise, YSA, regresyon ve teorik için sırasıyla 0.0007, 0.0043 ve 0.1082 hesaplanmıştır.

Tablo 3. Ölçüm sonuçları ile YSA, regresyon ve teorik sonuçlara ait çark giriş çapı verileri ve hata değerleri

Ölçüm	YSA		Regresyon		Teorik	
	D_1	D_1	D_1	ϵ	D_1	ϵ
126.00	124.90	0.85	132.13	4.87	113.17	10,18
126.00	127.40	1.12	127.15	0.91	127.83	1,45
126.00	121.30	3.72	123.02	2.36	110.84	12,03
126.00	115.80	8.12	120.60	4.29	129.10	2,46
145.00	145.70	0.48	152.80	5.38	119.82	17,36
145.00	146.80	1.23	153.29	5.72	144.37	0,44
186.00	185.80	0.11	172.94	7.02	112.40	39,57
69.00	72.90	5.60	83.42	20.90	107.47	55,75
100.50	103.50	2.98	96.05	4.43	86.78	13,65
78.15	78.00	0.18	78.02	0.17	95.68	22,43
78.15	79.60	1.80	78.90	0.97	100.91	29,12
78.15	79.30	1.51	78.83	0.86	102.06	30,59
78.15	76.50	2.14	76.74	1.81	99.21	26,94
110.00	107.90	1.93	102.48	6.83	115.02	4,56
110.00	114.30	3.95	97.35	11.50	122.92	11,74
110.00	106.50	3.22	102.27	7.03	120.98	9,98
Ortalama Hata :		2.43		5.32		18.02

Tablo 4. Ölçüm sonuçları ile YSA, regresyon ve teorik sonuçlara ait çark çıkış çapı verileri ve hata değerleri

Ölçüm	YSA		Regresyon		Teorik	
	D_2	D_2	D_2	ϵ	D_2	ϵ
250.00	255.27	2.11	254.11	1.64	277.66	11.06
250.00	254.36	1.74	242.04	3.19	254.04	1.61
250.00	247.86	0.86	236.66	5.34	278.00	11.20
250.00	246.51	1.40	236.36	5.46	280.07	12.03
267.00	272.54	2.08	279.60	4.72	320.46	20.02
267.00	265.81	0.45	279.89	4.83	307.57	15.19
304.00	305.51	0.50	298.52	1.80	293.79	3.36
162.00	162.41	0.25	155.54	3.99	176.74	9.10
76.80	88.86	15.71	127.28	65.73	248.80	223.95
140.90	150.89	7.09	147.30	4.54	164.93	17.06
140.90	151.77	7.71	148.87	5.66	160.38	13.83
140.90	150.14	6.56	148.75	5.57	156.64	11.17
140.90	145.71	3.42	146.00	3.62	149.02	5.77
185.00	187.50	1.35	193.58	4.64	183.02	1.07
185.00	180.43	2.47	189.59	2.48	188.90	2.11
185.00	184.52	0.26	195.71	5.79	189.76	2.57
Ortalama Hata :		3.37		8.06		22.57

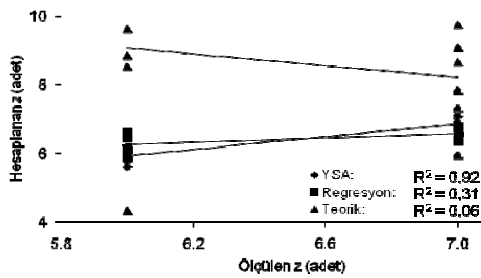
Çark kanat sayısı (z) ölçüm sonuçları ile tahmin ve hesaplama sonuçları (YSA, regresyon ve teorik) ara-

sındaki ilişkinin determinasyon katsayısı (R^2), YSA için %92, regresyon için %31 ve teorik için %6 bulunmuştur (Şekil 5).

Pompa Giriş Borusu Çapı

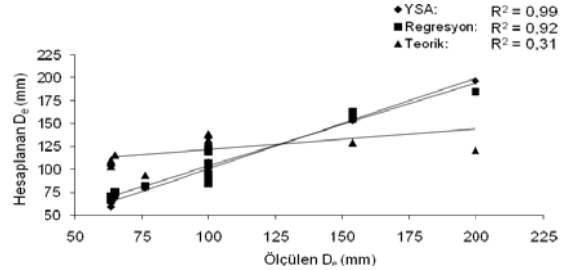
Ölçüm sonuçları ile YSA test sonuçları, teorik hesaplamalardan elde edilen sonuçlar ve regresyon tahmin denklemlerinden elde edilen sonuçlara ait veriler ve hata değerleri Tablo 6'da verilmiştir.

Ölçüm değerlerine yaklaşımda hata (ϵ), YSA için %3.29, regresyon için %10.13 ve teorik için ise %39.61 bulunmuştur. Uyuşma derecesi (U^2) ise, YSA, regresyon ve teorik için sırasıyla 0.0012, 0.0101 ve 0.0982 hesaplanmıştır.



Şekil 5. Ölçülen ve tahmin edilen çark kanat sayısı değerleri arasındaki ilişki

Pompa giriş borusu çapı (D_e) ölçüm sonuçları ile tahmin ve hesaplama sonuçları (YSA, regresyon ve teorik) arasındaki ilişkinin determinasyon katsayısı (R^2), YSA için %99, regresyon için %92 ve teorik için %31 bulunmuştur (Şekil 6).



Şekil 6. Ölçülen ve tahmin edilen pompa giriş borusu çapı değerleri arasındaki ilişki

Pompa Çıkış Borusu Çapı

Ölçüm sonuçları ile YSA test sonuçları ve regresyon tahmin denklemlerinden elde edilen sonuçlara ait veriler ve hata değerleri Tablo 7'de verilmiştir.

Ölçüm değerlerine yaklaşımda hata (ϵ), YSA için %5.11 ve regresyon için %11.79 bulunmuştur. Uyuşma derecesi (U^2) ise, YSA ve regresyon için sırasıyla 0.0019 ve 0.0124 hesaplanmıştır.

Tablo 5. Ölçüm sonuçları ile YSA, regresyon ve teorik sonuçlara ait çark kanat sayısı verileri ve hata değerleri

Ölçüm	YSA		Regresyon		Teorik	
	z	ϵ	z	ϵ	z	ϵ
7.00	6.88	1.68	6.43	8.16	7.31	4.44
7.00	7.06	0.88	6.35	9.23	8.65	23.51
7.00	6.87	1.80	6.48	7.39	5.94	15.17
7.00	6.79	3.01	6.38	8.89	6.82	2.59
6.00	6.03	0.47	6.13	2.21	8.82	47.00
6.00	5.98	0.40	5.94	0.95	9.62	60.35
6.00	6.11	1.91	5.99	0.13	8.85	47.42
6.00	5.62	6.34	6.62	10.26	8.52	42.05
6.00	6.10	1.63	5.87	2.12	4.35	27.53
7.00	6.87	1.86	6.75	3.64	7.81	11.64
7.00	6.75	3.53	6.72	4.01	9.08	29.75
7.00	6.76	3.45	6.72	4.03	9.74	39.13
7.00	6.79	2.98	6.76	3.49	10.26	46.52
6.00	5.99	0.09	6.45	7.58	10.96	82.74
6.00	5.79	3.47	6.55	9.21	10.58	76.29
6.00	6.02	0.30	6.49	8.17	10.87	81.13
Ortalama Hata:		2.11		5.59		39.83

Pompa çıkış borusu çapı (D_b) ölçüm sonuçları ile tahmin ve hesaplama sonuçları (YSA ve regresyon) arasındaki ilişkinin determinasyon katsayısı (R^2), YSA için %98 ve regresyon için %91 bulunmuştur (Şekil 7).

Günümüzde santrifüj pompaların tasarımı klasik metotlarla yapılmaktadır. Bu ise daha fazla hesaplama

zamanının yanı sıra kullanılan metotlarında çok sağlıklı sonuç vermemesi sebebiyle pompalarda yüksek verim kayıplarına neden olmaktadır. Baysal (1975), pompa tasarımında hesapların tam bir teoriye dayandırılmasının mümkün olmadığından, proje hesaplarının oldukça karmaşık olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, bu metotlarla elde edilen sonuçların, ölçüm sonuçları ile tam bir uyumluluk içerisinde olmadığını saptamıştır.

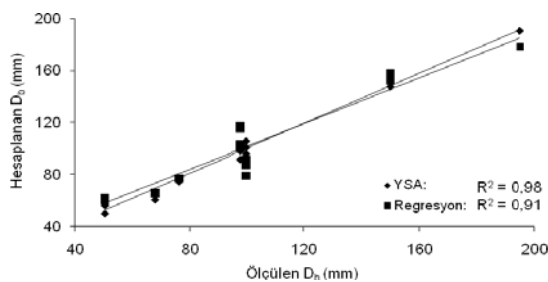
Bu çalışma pompa parametrelerinin hesaplanmasında YSA tekniklerini ön plana çıkarmıştır.

Tablo 6. Ölçüm sonuçları ile YSA, regresyon ve teorik sonuçlara ait pompa giriş borusu çapı verileri ve hata değerleri

Ölçüm	YSA		Regresyon		Teorik	
	D_e	ϵ	D_e	ϵ	D_e	ϵ
100.00	102.79	2.79	122.12	22.12	121.69	21.69
100.00	101.35	1.35	120.32	20.32	137.45	37.45
100.00	107.72	7.72	104.24	4.24	119.19	19.19
100.00	96.37	3.63	106.79	6.79	138.82	38.82
154.00	153.62	0.25	157.80	2.46	128.84	16.34
154.00	156.46	1.60	162.93	5.80	155.23	0.80
200.00	196.48	1.76	184.27	7.86	120.86	39.57
65.00	69.23	6.51	75.13	15.59	115.56	77.78
76.20	80.25	5.32	81.63	7.13	93.32	22.46
63.50	63.73	0.36	69.99	10.22	102.88	62.01
63.50	64.64	1.80	70.79	11.49	108.50	70.87
63.50	63.64	0.22	70.49	11.01	109.74	72.82
63.50	59.19	6.79	68.04	7.16	106.67	67.99
100.00	97.78	2.22	94.76	5.24	123.67	23.67
100.00	107.35	7.35	84.25	15.75	132.17	32.17
100.00	96.95	3.05	91.04	8.96	130.09	30.09
Ortalama Hata :		3.29		10.13		39.61

Tablo 7. Ölçüm sonuçları ile YSA ve regresyon sonuçlarına ait pompa çıkış borusu çapı verileri ve hata değerleri

Ölçüm	YSA		Regresyon	
	D_b	ϵ	D_b	ϵ
98.00	98.38	0.38	117.69	20.09
98.00	99.26	1.28	115.49	17.85
98.00	103.73	5.85	100.83	2.89
98.00	91.74	6.39	103.20	5.31
150.00	147.87	1.42	152.44	1.63
150.00	153.63	2.42	157.95	5.30
195.00	190.69	2.21	178.27	8.58
68.00	60.98	10.32	65.74	3.32
76.20	74.75	1.90	76.88	0.89
50.80	56.66	11.54	60.12	18.35
50.80	58.22	14.61	61.71	21.48
50.80	56.57	11.36	61.97	22.00
50.80	50.24	1.09	60.38	18.86
100.00	101.24	1.24	91.48	8.52
100.00	105.97	5.97	79.04	20.96
100.00	96.23	3.77	87.32	12.68
Ortalama Hata :		5.11		11.79



Şekil 7. Ölçülen ve tahmin edilen pompa çıkış borusu çapı değerleri arasındaki ilişki

Literatürde çoklu giriş ve tek çıkışlı nöral modeller kullanılarak mühendislik problemlerinin çözümü yapılırken bu çalışmada 3 giriş ve 5 çıkışa sahip bir YSA modeli geliştirilerek pompa parametrelerinin tahmini yapılmıştır. Parametreler, Çok Katmanlı Perseptron ağ yapısının Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak eğitilmesi ile elde edilmiştir.

Geliştirilen YSA modeli, literatürdeki hesaplamalar ve regresyon denklemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar ile ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında YSA modeli ile elde edilen tüm sonuçların, ölçüm sonuçları ile oldukça uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Bu çalış-

mada geliştirilen YSA modelinin avantajları basitlikleri, doğrulukları ve esneklikleridir.

KAYNAKLAR

- Anonim, 1984. Deney ve Muayene Raporları. İTÜ Makine Fakültesi, Hidromekanik Lab., İstanbul.
- Anonim, 1985. Deney ve Muayene Raporları. İTÜ Makine Fakültesi, Hidromekanik Lab., İstanbul.
- Anonim, 1990. Deney ve Muayene Raporları. İTÜ Makine Fakültesi, Hidromekanik Lab., İstanbul.
- Anonim, 1991. Deney ve Muayene Raporları. İTÜ Makine Fakültesi, Hidromekanik Lab., İstanbul.
- Anonim, 1992. Deney ve Muayene Raporları. İTÜ Makine Fakültesi, Hidromekanik Lab., İstanbul.
- Anonim, 1993. Deney ve Muayene Raporları. İTÜ Makine Fakültesi, Hidromekanik Lab., İstanbul.
- Anonim, 1997. Deney ve Muayene Raporları. İTÜ Makine Fakültesi, Hidromekanik Lab., İstanbul.
- Ayıkoglu, A. 1995. Türkiye’de İmal Edilen Bazı Derinkuyu Pompaların Karakteristik Değerlerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma. G.Ü. Yüksek Lisans Tezi, Tokat, 53 s.
- Bağırkan, Ş. 1993. İstatistiksel Analiz. Bilim Teknik Yayınevi. s. 301. İstanbul.
- Baysal, B.K. 1975. Tam Santrifüj Pompalar Hesap Çizim ve Konstrüksiyon Özellikleri, İ.T.Ü. Makina Fakültesi Yayını, no: 1038, İstanbul.
- Bolat, S., Kalenderli Ö. 2003. “Levenberg-Marquardt Algoritması Kullanılan Yapay Sinir Ağı İle Elektrot Biçim Optimizasyonu” International XII. Turkish Symposium on Artificial Intelligence and Neural Networks – TAINN.
- Çalışır, S., Gültekin, S.S. ve Çarman, K. 2003. Santrifüj Pompaların Performans Değerlerinin Yapay Sinir Ağlarıyla Hesaplanması. Tarımsal Mekani-zasyon 21. Ulusal Kongresi, 3-5 Eylül 2003, Konya.
- Doğuş, R. 1963. Santrifüj Pompa Deneme Laboratuvarı Projesi ve Projenin Tatbiki. A.Ü. Basımevi, Ankara, Yayın No: 220, 35 s.
- Eryılmaz, T. 2004. Sulamada Kullanılan Santrifüj Pompaların Kaviteasyon Karakteristiklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Güleren, M. 2003. Santrifüj Pompadaki Durgunluğun Nümerik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas.
- Gürhan, R. 1990. Sulama Amaçlı Yatay Milli Santrifüj Pompaların İmalat Karakteristiklerinin Bilgisayar Destekli Tasarımla Geliştirilmesi. Doktora Tezi, A. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Gürhan, R., Ayık, M. 1991. Sulama Pompaları Deney Sonuçlarının Tasarım Parametreleri Olarak Değerlendirilmesi. A.Ü.Ziraat Fakültesi Baskı Ofset Ünitesi, Ankara, Yayın No: 1203, 34 s.
- Haykin, S. 1994. Neural Networks, A Comprehensive Foundation, Macmillan College Publishing Comp. Inc.
- Haykin, S. 1999. Neural Networks: a Comprehensive Foundation, Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall,
- Jacobs, R.A. 1988. "Increased Rate of Convergence Through Learning Rate Adaptation" Neural Networks, 1, s. 295-307.
- Keskin, R. ve Güner, M. 2002. Sulama Makinaları. A.Ü. Ziraat Fakültesi Yayınları No:1524. Ankara.
- Levenberg, K. 1944. "A Method For the Solution of Certain Nonlinear Problems in Least Squares" Quart. Appl. Math., 2, s. 164-168.
- Marquardt, D.W. 1963. "An Algorithm For Least-Squares Estimation Of Nonlinear Parameters" J. Soc. Ind. Appl. Math., 11, s. 431-441.
- Minai, A.A. and Williams, R.D. 1990 "Acceleration of Backpropagation Through Learning Rate and Momentum Adaptation," International Joint Conference on Neural Networks, 1, s. 676-679.
- Ngia, S. H. 2000. "Efficient Training of Neural Nets for Nonlinear Adaptive Filtering Using a Recursive Levenberg-Marquardt Algorithm". IEEE Trans. on Signal Process., Vol 48, pp. 1915-1927.
- Öztemel, E. 2003. Yapay Sinir Ağları, Papatya Yayıncılık, İstanbul.
- Pınarbaşı, A. and Johnson, M. W. 1995. A study of Reynolds Stress Dissipation and Loss Generation in a Centrifugal Compressor Vaneless Diffuser”, ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, 95-GT-150, Houston, Amerika.
- Purushothaman, S., Srinivasa, Y.G. 1994. A back-propagation algorithm applied to tool wear monitoring. Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 34, No:5, pp: 625-631.
- Sağiroğlu, Ş., Beşdok, E. ve Erler, M. 2003. Mühendislikte Yapay Zeka Uygulamaları-1, Yapay Sinir Ağları. Ufuk Kitap Kirtasiye, Kayseri.
- Sinha, M. 1999. Rotor-Stator Interactions, Turbulence Modelling and Rotating Stall in a Centrifugal Pump with Diffuser Vanes, Doktora Tezi, Johns Hopkins University, Baltimore, Amerika.
- Taner, A. 2007. Radyal Santrifüj Pompaların Yapay Sinir Ağları İle Tasarımı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Konya.
- Uz, E. 1981. İzmir ve Çevresinde İmal Edilen Yatay Eksenli Tek Kademeli Santrifüj Zirai Sulama Pompaları Üzerinde Araştırmalar. E. Ü. Ziraat Fakültesi Yayınları, No: 391, İzmir.