



EĞİLME GERİLMESİ ETKİSİNDEKİ MİLLERİN ÇENTİK FAKTÖRÜNÜN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE BELİRLENMESİ

NOTCH SENSITIVITY FACTOR DETERMINATION WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR SHAFTS UNDER THE BENDING STRESS

Murat Tolga ÖZKAN^{1*}, Cengiz ELDEM¹, Erdal KÖKSAL²

¹Makine Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, 06500, Ankara

mtozkan06@yahoo.com, celdem@gazi.edu.tr

²Şehit Sertaç Uzun ATL ve METEM, 06500, Ankara

erdal.koksal@mynet.com

Geliş Tarihi/Received: 13.07.2012, Kabul Tarihi/Accepted: 08.11.2012

doi: 10.5505/pajes.2013.88598

*Yazışılan yazar/Corresponding author: Murat Tolga ÖZKAN

Özet

Makine elemanları tasarımında çeşitli nedenlerle çentik, delik, kademe ve çeşitli kavisler gibi geometrik şekiller veya süreksizlikler bulunabilmektedir. Ani kesit değişiklikleri gerilme yığılmalarına neden olmaktadır. Gerilme yığılmaları, malzemenin boyut özelliklerinden veya kuvvetlerin uygulama doğrultusu sebebiyle oluşabilirler. Bu tür gerilme yığılmaları; malzemede çentik etkisi vardır şeklinde değerlendirilir. Çentik etkisi malzemede kırılmalara, bozulmalara ve deformasyonlara yol açabilir. Bu çalışmada, Eğilme gerilmesi etkisi altındaki millerde çentik faktörü değeri Yapay Sinir Ağları (YSA) ile modellenmiş ve modelin doğruluğu Statistica yazılımı ile kontrol edilmiştir. YSA modeli, Pythia programı kullanılarak hazırlanan bir yazılım ile modellenmiştir. Kullanıcı, milin boyut ölçülerini ve üzerine uygulanan kuvvetin cinsini girerek hesaplamalarda kullanacağı çentik faktörünü, çentik tablolarına bağımlı kalmaksızın ve doğru bir değer ile elde edile bilmektedir.

Anahtar kelimeler: Çentik faktörü, Makine tasarımı, Yapay sinir ağları.

Abstract

Notch, hole, tap and a variety of geometric shapes such as curves or discontinuities can be found with various reasons in the design of Machine Element. Stress is caused by sudden changes in section aggregating. Stress concentration can occur with the reason of material features of size or direction of forces application. This type of stress concentration in the material brings out the effect of notch. Notch impact can lead to distortions and breakage of materials. In this study, the notch sensitivity factor values have been modelled Artificial Neural Networks (ANN) for shafts that is under the influence of bending stress, and the accuracy of the model has been verified by using Statistica software. The model has been developed using Pythia. With this software, the user can be obtained the accurate value by inputing shaft dimension and the applied force without the need for notch sensitivity factor tables and any calculations.

Keywords: Notch sensitivity factor, Machine design, Artificial neural network.

1 Giriş

Güç ve kuvvet iletimi için kullanılan makina parçalarının hemen hemen hepsinde kırılmalar veya deformasyonlar görülür. Bu kırılmaların ve deformasyonların tasarımları olumsuz etkilendiğini bilinmektedir. İşte bu kırılmaların ve deformasyonların oluşmaması için hesaplamalarda çentik faktörü hesaba katılır ve böylece kırılmaların veya deformasyonların oluşması minimuma indirgenir veya engellenir. Hesaplamalarda teorik çentik faktörünü kullanırken, boyut ölçülerinin değişmesine ve mille gelen zorlanma türüne göre hesaplamalarda kullanılan çentik faktörleri de değişiklik gösterir. Ayrıca her bir değişik zorlanma çeşidi için birçok tablo mevcuttur ve bu tablolardan tasarım için gerekli olan değerin elde edilmesi zahmetli bir iştir. Bireysel okuma hata oranı yüksektir. Çentik faktörü seçimi ve ardından yapılacak hesaplamalar için oldukça zaman ve iş gücü kaybı oluşturmaktadır. Günümüz teknolojisinde bu sorunların çözümü için bilgisayar programlarından faydalanmak kaçınılmaz olmuştur.

Bu çalışmanın amacı; çentik faktörüne etki eden malzemenin şekilsel özelliklerini ve mille gelen eğilme gerilmesi etkisini hesaba katarak en iyi çentik faktörü seçimini bir ileri beslemeli çok katmanlı yapay sinir ağı modeli kullanılarak belirlemektir.

Yorulma sonucu oluşan mekanik hasarlar uzun yıllardır mühendislik çalışmalarının konusu olmuştur. Bu konudaki ilk çalışmalardan biri Almanya'da 1828 yılında maden kaldıraç zincirlerini çevrimsel yüklemeler altında test eden W. A. J. Albert olmuştur. Yorulma terimi ilk olarak 1839 yılında J. V. Poncelet tarafından kullanılmıştır [1].

August Wöhler, 1850'li yıllarında Almanya'da yapmış olduğu çalışmalarda; yorulma hasarından kaçınmak için tasarım stratejileri geliştirmeye başlamış. Demir, çelik ve diğer metalleri eğme, burulma ve eksensel yüklemeler altında test etmiştir. Wöhler ayrıca yorulmanın sadece çevrimsel gerilmelerden etkilenmediğini çevrimsel gerilmeler yanında ortalama gerilmeden de etkilendiğini kanıtlamıştır [2].

McClintock boşluk büyümesi olarak gerçekleşen sünek hasarla ilgili ilk teorik araştırmayı yapmıştır. Bu araştırmada boşluk büyüme oranının, hidrostatik eşdeğer gerilme oranı gibi üç eksenli gerilme bölgelerinde kesin olarak ağı olduğu sonucuna ulaşmıştır. McClintock'un yaptığı deneyler sonucunda farklı numuneler daima, çatlak oluşumunda aynı birim şekil değişimine sahip olmadıkları sonucuna varmıştır [3].

Rice ve Tracey, tarafından McClintock 'un çalışmasından daha ileri bir çalışma yapılmıştır. Bu analiz sonucu boşluk büyüme oranının, hidrostatik eşdeğer gerilme oranı gibi üç eksenli

gerilme bölgelerinde kesin olarak ağı olduğu sonucuna ulaşılmıştır [4].

Hancock ve Mackenzie yaptığı deney sonuçları, yapısal malzemeler için, sünekliğin üç eksenli olarak yönlendirilebilirliği fikrini desteklemiş ve malzeme hasarının yüksek derecede hidrostatik gerilmeye yol açmış olduğunu görmüşlerdir [5].

Bridgman, Hancock ve Mackenzie yaptığı deney sonuçlarını kullanarak elde edilen hasar birim şekil değişimi ve üç eksensliliğin gösterim parametrelerini bir kapalı hasar eğrisi olarak belirtmiştir [6].

Hancock ve Brown, çentikli numunede gerilme birim şekil değişimi alanlarını daha fazla ayrıntılı olarak araştırmıştır. Temel olarak, silindirik çentikli numunede üç eksensliliğin en yüksek olduğu minimum kesitin orta noktasındaki hasarı, önceki gözlemlerinde elde ettikleri kanıtlarla destekleyerek ele almışlardır [7].

Yapılan literatür araştırmaları göstermiştir ki, çentikli çekme deneyleri yaygın olarak uygulanan bir deneydir. Bu sonuçlar, çentikli çekme deneylerinin çok sayıda çentik çeşitleri ile gerçekleştirildiğini göstermektedir. Bu nedenle, standart deney sonuçlarından elde edilen veriler ile çentikli çekme deneyi modellenmesi, deneysel çalışmalarda değişkenlerin sayısında kolay bir artış sağlayacağı açıktır.

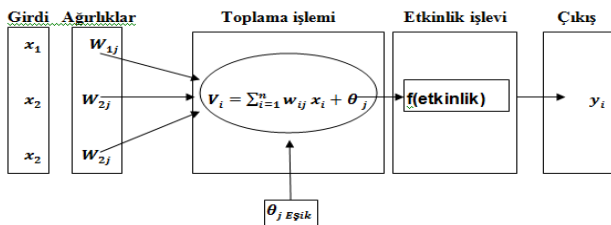
2 Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağı kavramı beynin çalışma ilkelerinin sayısal bilgisayarlar üzerinde taklit edilmesi fikri ile ortaya çıkmıştır. İlk çalışmalar beyni oluşturan biyolojik hücrelerin, ya da literatürdeki ismiyle nöronların matematiksel olarak modellenmesi ile yapılmıştır. Bu çalışmaların ortaya çıkardığı sonuçlara göre her bir nöron komşu nöronlardan bazı bilgiler alır ve bu bilgiler biyolojik nöron dinamiğinin öngördüğü biçimde bir çıktıya dönüştürülür [8].

2.1 Bir Yapay Sinirin Ana Öğeleri

Yapay sinir ağı, birbirine bağlı çok sayıda işlem elemanlarından oluşur. Yapay sinir ağındaki işlem elemanları (düğüm) basit sinirler olarak adlandırılır.

Bir yapay sinir ağı, birbirleri ile bağlantılı çok sayıda düğümlerden oluşur. Yapay sinir ağlarının temel birimi yapay bir sinirdir. Bir yapay sinir, biyolojik sinirlere göre oldukça basittir. Şekil 1'de yapay bir sinir modeli gösterilmiştir. Tüm yapay sinir ağı bu temel yapıdan türetilmiştir. Bu yapıdaki farklılıklar yapay sinir ağlarının farklı sınıflandırılmalarını göstermektedir [9].



Şekil 1: Yapay bir sinir (Düğüm).

2.2 YSA'da Eğitim, Öğrenme ve Test

Yapay sinir ağlarında öğrenmenin anlamı, sinir ağının sunulan probleme ait giriş ve çıkış verileri arasında bir bağlantıları kurarak, doğru çıktıları üretmesini sağlamaktır. Bu işlem, öngörülen çıkış ile istenilen çıkış arasındaki hata, belli bir değerin altına düşene kadar devam eder. Yapay sinir ağı aynen insanlar gibi örnekler ile öğrenirler. Ağlar, yeteri kadar örnek ile eğitilirse problem sonucu o kadar doğru olur [10].

Öğrenme sırasında ağa belli bir girdi girildiği zaman, ağ benzer cevaplar verebilmek için kendi üzerinde değişiklikler yapar. Burada söz konusu olan hata, beklenen çıktı ile oluşan çıktı arasındaki farktır. Eğitimden sonra, YSA'nın verileri ezberlemek yerine gerçekten öğrendiğini anlamak için ağ test edilir. Test bölümünde, eğitim sırasında kullanılmayan veriler kullanılır [11].

3 Mukavemet Azaltıcı Etkenler

Mukavemet diyagramları yüzeyleri parlatılmış standart deney çubukları kullanılarak elde edilirler. Gerçek makine elemanlarının boyut ve yüzey özellikleri deney çubuklarından farklıdır. Bu yüzden sürekli mukavemet diyagramından alınan değerler, mukavemet azaltıcı faktörler göz önüne alınmadan kullanılamazlar [12].

Malzemelerin mukavemet sınırları; çentik, yüzey pürüzlülüğü, boyut, imalat, işli işlem, kaplama, çevre etkisi v.b. gibi faktörler tarafından etkilenmektedir [13].

Makine elemanlarında deneylerle elde edilen sonuçlar, yer yer normal gerilmelerden çok daha büyük gerilmelerin varlığını gösterir. Bunun nedeni parçalardaki geometrik farklılıklardır. Çentik genel adıyla tanımlanan boyut farklılığıdır [14].

Makine elemanları konstrüksiyonunda çeşitli nedenlerle çentik, delik, kademe veya fatura, çeşitli yuvarlatma ve kama yuvası gibi geometrik şekil farklılıkları veya süreksizlikler bulunabilmektedir. Ani kesit değişikliği ve çeşitli süreksizlikler kuvvet akışı ve özellikle gerilme alanında yığılmalara neden olmaktadır. Bu tür gerilme yığılmaları, malzemede çentik etkisi oluşturmaktadır [15].

Gerilme yığılma faktörü (K_t) ve Çentik duyarlılık faktörü (q); Çentik dibinde oluşan en büyük gerilmenin nominal gerilmeye oranı olarak tanımlanır.

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n} \quad (1)$$

örneğin, eğilme zorlamasında;

$$\sigma_n = \frac{M}{W} \quad (2)$$

$$\sigma_n = K_t \frac{M}{W} \quad (3)$$

Makine elemanlarındaki, yukarıda bahsedilen geometrik şekillerin çentik diplerinde, hesaplanan nominal gerilmenin K_t katı kadar fazla gerilme meydana gelir. Malzeme gevrek ise; çentikli malzeme, normal gerilmekten K_t kadar daha az bir statik gerilme ile kırılır. Örneğin, sertleştirilmiş çelikten yapılmış bir makine elemanında gerilme yığılma faktörü değeri $K_t = 3$ olan çentik var ise, bu eleman çentiksiz olana göre üç kat daha kolay kırılır [15].

Gerilme yığılma faktörü (K_t) geometriye bağlı bir değerdir. Malzeme dayanımındaki etkin düşüşü gösteren yorulma dayanımı düşüş faktörü K_c 'dir. Çentik faktörü K_c , çentiğin geometrik şekline ve malzemenin çentiğe karşı hassasiyetine bağlıdır. Çentiğin geometrik şeklinin etkisi, teorik çentik faktörü K_t , malzemenin çentiğe karşı hassasiyeti, çentik hassasiyet faktörü q ile ifade edilirse çentik faktörü;

$$K_c = 1 + q(K_t - 1) \quad (4)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

4 Eğilme Gerilmesi Etkisi Altındaki Millerin Çentik Faktörünün Yapay Sinir Ağları (Pythia) ile Hesaplanması

4.1 Eğitim ve Test Verileri

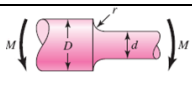
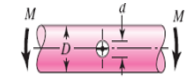
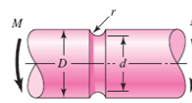
Bu çalışmadaki veriler; Peterson'ın "Design Factors for Stress Concentration" kitabındaki çentik faktörü ile ilgili grafikler incelenerek bu çalışmaya yön veren veriler olarak ele alınmıştır. Tablo 1'de eğitim ve test verileri sayıları görülmektedir. Bilindiği üzere eğilme gerilmesine maruz kalan mil tipleri Kademeli mil, Çentikli (Kademeli) mil ve Delikli millerden oluşmaktadır. Mil, eğilme gerilmesine maruz kalmasına rağmen değişik durumlar söz konusudur. Çentik tabloları doğrusal eğriler değildir ve ara değerler için eğriler mevcut değildir. Ara değerler ancak interpolasyon yapılarak yaklaşık değer olarak makine tasarımı problemlerine aktarılmaktadır (Ek A). Bu sebepten var olan eğri değerleri öncelikle sayısallaştırılmış daha sonra ise bir YSA tabanlı ağ kurularak tüm gerçek ve ara değerlerin tanımlanması sağlanmıştır. Var olan eğrilerden, eğilme gerilmesi etkisinde zorlanan miller için değerler elde edilmiştir.

Tablo 2'de millerde çentik faktörünü belirlerken kullanılan girdi ve çıktı değerleri görülmektedir. Zorlanma türü olarak Eğilme Momenti etkisindeki miller araştırıldığından, "Eğilme Momenti" etkisini belirleyen seçenek tanımlanmıştır. D (Büyük mil çapı), d (Küçük mil çapı) ve r (Pah yarıçapı) değerleri direkt tanımlanmıştır. d/D oranını sağlayan birçok değere karşılık gelmektedir. Gerçek mil değerleri D, d ve r değerleri girilerek, program kendi içerisinde d/D oranını tanımlamakta ve doğrudan mil boyutları ölçülerine göre çentik faktörü değerini YSA ile belirlemektedir. Böylelikle d/D oranına karşılık gelen tüm değerler tanımlanmıştır.

YSA da öğrenme kriterleri belirlenirken; değişik ağ yapıları denenmiş, hatanın minimum olduğu ve öğrenme oranının maksimum olduğu ağ yapısı belirlenmiştir. Öğrenme ve test performanslarına bakılarak değişik ağ yapıları üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Eğilme gerilmesi etkisindeki mil için ayrı ayrı 3 ayrı YSA ağı kurulmuştur. Çentik tablolarındaki her bir durum için ayrı bir ağ oluşturulmuştur. Eldeki verilere göre en yüksek öğrenme oranı ve test performansı değişkenlerine bağlı olarak İleri Beslemeli Çok Katmanlı Perseptron (Backpropagation Multi Layer Perceptron) modeli

YSA modeli olarak belirlenmiştir. Radyal tabanlı ağların eldeki verilerle çok iyi uyum sağlamadığı, hata oranlarının yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Tablo 3'de YSA yapısı hazırlanırken uygun ağ yapılarının denenmesi ile ilgili tablolar gösterilmiştir. Pythia yazılımının güvenilirliği, Statistica yazılımı ile kontrol edilmiştir. Pythia da oluşturulan model ile Statistica'da oluşturulan modeller birbirleri ile uyum sağlamıştır Tablo 4.

Tablo 1: Eğilme gerilmesi etkisi altındaki millerde çentik faktörü için eğitim ve test verileri sayısı.

	Eğitim Verileri Sayısı	Test Verileri Sayısı	Toplam Veri Sayısı
KADEMELİ MİL 	43	8	51
DELİKLİ MİL 	17	6	23
ÇENTİKLİ (KADEMELİ) MİL 	36	11	47

Tablo 2: Millerde çentik faktörü için girdi ve çıktı değerleri.

Millerde çentik faktörü girdi ve çıktıları		
Sembolü	Adı	Girdi/Çıktı
D	Büyük mil çapı	Girdi
d	Küçük mil çapı	Girdi
r	Pah yarı çapı	Girdi
K_{ζ}	Çentik faktörü değeri	Çıktı
M	Zorlanma türü (Çekme (Ç), Eğilme (M), Burulma(T))	Girdi

Tablo 4: Eğilme gerilmesi altındaki millerde uygun ağ yapısının bulunması.

EĞİLME		
	Ağ yapısı	Çıktı
Kademeli mil	Ağ yapısı	3 4 1
Çentikli mil	Ağ yapısı	3 3 1
Delikli mil	Ağ yapısı	2 3 1

Tablo 3: Eğilme gerilmesi altındaki millerde uygun ağ yapısının bulunması (Statistica yazılımı ile kontrol).

	AĞ ADI	ÖĞRENME PERFORMANSI	TEST PERFORMANSI	HATA ÖĞRENME	HATA TEST	ÖĞRENME ALGORİTMASI	GİZLİ AKTİVASYON	ÇIKTI AKTİVASYON
KADEMELİ	MPL 3-4-1	0.996335	0.986242	0.000245	0.001023	BFGS 62	Exponential	Exponential
	MPL 3-10-1	0.984176	0.968840	0.001071	0.002285	BFGS 55	Tanh	Logistic
	MPL 3-11-1	0.981786	0.966179	0.001228	0.002594	BFGS 60	Tanh	Tanh
	RBF 3-22-1	0.961164	0.936108	0.002534	0.004344	RBFT	Gaussian	Identity
	RBF 3-5-1	0.848751	0.875920	0.009301	0.008391	RBFT	Gaussian	Identity
	RBF 3-6-1	0.896507	0.880329	0.006529	0.008112	RBFT	Gaussian	Identity
KANALLI	MPL 3-20-1	0.990632	0.967998	0.000519	0.000910	BFGS 105	Exponential	Logistic
	MPL 3-30-1	0.979495	0.962517	0.001133	0.001077	BFGS 38	Tanh	Tanh
	MPL 3-3-1	0.998147	0.978305	0.000100	0.000633	BFGS 51	Tanh	Exponential
	RBF 3-10-1	0.927823	0.853984	0.003797	0.004189	RBFT	Gaussian	Identity
	RBF 3-14-1	0.952995	0.908589	0.002489	0.002608	RBFT	Gaussian	Identity
	RBF 3-18-1	0.956138	0.876765	0.002314	0.003362	RBFT	Gaussian	Identity
DELİKLİ	MPL 2-8-1	0.994660	0.998820	0.000496	0.000348	BFGS 11	Identity	Identity
	MPL 2-3-1	0.998264	0.999726	0.000168	0.000096	BFGS 41	Logistic	Tanh
	RBF 2-8-1	0.997855	0.999933	0.000199	0.000043	RBFT	Gaussian	Identity
	RBF 2-7-1	0.997850	0.999965	0.000199	0.000042	RBFT	Gaussian	Identity
	RBF 2-11-1	0.998112	0.999834	0.000175	0.000106	RBFT	Gaussian	Identity
MPL 2-8-1	0.994660	0.998820	0.000496	0.000348	BFGS 11	Identity	Identity	

4.2 Pythia ile Bir YSA Modeli Oluşturulması

YSA modeli kurulurken piyasada birçok hazır paket bulunmaktadır. Bun yazılımlar, Matlab neural Network, EasyNN, Pythia, Neuro Dimension, Statistica v.b. Bu yazılımların hepsi kendi alanlarında güvenilirliklerini ispat etmiş yazılımlardır. Bu çalışmada özellikle Matlan Neural Network Tool Box'ının kullanılmamasının sebebi; Matlab'da hazırlanan kod da, YSA türlerine göre birçok iterasyon yapılarak uygun ağ yapısının modelinin belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca; öğrenme, test ve tahmin değerleri kontrol edilerek uygun yağ yapısının belirlenip belirlenmediği kontrol edilmektedir. Daha sonra elde edilen YSA modeline göre öğrenme verileri için ayrı ayrı denklemlerin elde edilmesi gerekmektedir. Bu zaman alıcı ve zahmetli bir işlemdir. Pythia yazılımının avantajı ise; program içinde bir optimizasyon ekranının bulunması ve eldeki verilere göre değişik YSA modellerini önermesidir. Ayrıca modelin ağırlık değerlerini, yazılım otomatik olarak vermektedir. Böylece YSA tahminleri için Excel'de basit işlemler yapılarak modelin matematiksel denklemi kolay bir biçimde hesaplanabilmektedir. Pythia ile Statistica yazılımlarında aynı veriler girilerek, aynı ağ modelleri aynı sonucu verdiği gözlemlenmiştir. YSA modeli oluşturulurken; sadece Pythia da değerler girilip bu değerler ışığında öğrenme tanımlanmamıştır. 2 farklı yazılımla veriler eğitilmiştir.

YSA oluşturulurken deney verilerinin hepsi Pythia yazılımında kullanılmamıştır. Deney verilerinin % 80'lik kısmı öğrenme, % 10'luk kısmı test ve % 10'luk kısmı ise doğrulama değerleri için kullanılmıştır. Bu veriler YSA sisteminin tahminlerinin hata oranlarını görmek için kullanılmıştır.

Pythia yazılımında bulunan "Evolutionary Optimizer" menüsü ile en uygun ağ yapısına ulaşabilmek için denemeler yaptırılmıştır. Deneme sayısı (Population size) mümkün olduğu kadar artırılmıştır. Böylelikle Pythia programı daha çok ağ yapısının uygunluğunu kontrol edip, optimum olası ağ yapıları hakkında öneriler sunmaktadır.

No	Topology	Neurons	Q dev ²	*dev ²	Fitness
81	3,3,3,5,1	12	0.001826	0.025499	84.92202
82	3,4,1	5	0.000949	0.016019	100.00000
83	3,3,3,5,1	12	0.001009	0.025471	85.09641
84	3,4,1	5	0.000949	0.016019	100.00000
85	3,1,6,8,9,1	25	0.049062	0.635688	39.25859
86	3,1	1	0.005884	0.120731	64.42109
87	3,1,1,6,5,1	14	0.014063	0.229385	50.23623
88	3,1	1	0.005884	0.120731	64.42109
89	3,1	1	0.005884	0.120731	64.42109
90	3,1	1	0.005884	0.120731	64.42109
91	3,1,7,5,1	14	0.009772	0.120276	64.45854
92	3,1	1	0.005884	0.120731	64.42109
93	3,1	1	0.005884	0.120731	64.42109
94	3,3,1,6,5,1	16	0.004025	0.082478	74.94911
95	3,1,7,6,5,1	21	0.049189	0.649437	39.16563
96	3,1,7,6,5,1	21	0.010467	0.131981	61.75306
97	3,1,7,7,1	16	0.009442	0.106092	68.28284
98	3,3,1	4	0.002504	0.048967	73.97987
99	3,3,1	4	0.002504	0.048967	73.97987

Şekil 2: Optimizasyon sonuçlarının görülmesi.

Şekil 2'de gösterildiği gibi doğruluk oranı en yüksek değerde olan ağ yapısı alınmıştır. Otomatik optimizasyondan sonra en düşük sapma değerine sahip ağ yapısı seçilmiştir. Şekil 3'de en uygun ağ yapısı (fitness) % 100 olan ve hata oranı ($\emptyset dev^2$) en düşük olan ağ yapılarından; Kademeli mil için (3 4 1), Kanallı mil için (3 3 1) ve Delikli mil için (2 3 1) ağ yapısı seçilmiştir.

Yazılım menüsünde bulunan; "Learn pattern set" araç çubuğu ile Pythia'ya girilen veriler öğretilmiştir. Bu ağ yapısı,

programın döngü (iterasyon) sayısı ve öğrenme oranları değiştirilerek en küçük sapma (Use learn rate) değeriyle eğitilmiştir. Bu değerleri öğrenen Pythia bu öğrenme işleminde ne kadar başarılı olduğunu ortalama sapma (average deviation) miktarları. Şekil 4a, b. ve c'de gösterilmiştir. Şekil 3a, b. ve c'de Eğilme gerilmesi etkisi altındaki kademeli mil için hata payı 0,000287, kademeli mil için 0,000778 ve delikli mil için hata payı 0,000104 olarak görülmektedir. Bu oranlar YSA'nın yapacağı tahminlerdeki hata payının çok az olacağını göstermektedir.

Şekil 3a: Eğilme gerilmesi etkisi altındaki kademeli mil için.

Şekil 3b. Eğilme gerilmesi etkisi altındaki kanallı mil için.

Şekil 3c: Eğilme gerilmesi etkisi altındaki delikli mil için.

Tablo 5a: YSA sisteminin tahminleri (Delikli Mil).

I1	I2	Q1	Q(NET)	SQ DV	I1	I2	Q1	Q(NET)	SQ DV
3	272,727	2,8	2,792437	0,000068	16	106,667	2,12	2,112,315	0,00007
4	200	2,72	2,719943	0	17	104,938	2,08	2,088,531	0,000086
5	200	2,67	2,6668	0,000012	18	102,857	2,06	2,062,306	0,000006
6	193,548	2,6	2,611174	0,000148	19	101,604	2,04	2,043,186	0,000012
7	184,211	2,56	2,559951	0	20	100	2,02	2,022,163	0,000006
8	160	2,48	2,47421	0,00004	21	93,333	1,98	1,969,561	0,000129
9	142,857	2,4	2,399656	0	22	92,827	1,96	1,959,931	0
13	116,071	2,2	2,21438	0,000236	23	92	1,95	1,949,321	0,000001
14	112	2,18	2,174251	0,000039	24	87,273	1,94	1,923,351	0,000327
15	109,489	2,15	2,144772	0,000032	25	83,333	1,88	1,907,279	0,000879

Tablo 5a, b. ve c'de Q1 sisteme girdiğimiz verilerdir. Q(NET) Pythia'nın öğrenme sonrası sistemin tahmin ettiği verileri ve SQ DV sisteme giriş yaptığımız veriler ile sistemin öğrenme sonrası bulduğu veriler arasındaki farkı göstermektedir. Şekil 4a, b. ve c'de olduğu gibi her neronun ağırlığı alınarak Excel'de bir formüle edilmiştir. Ağ yapısını test etmek için öncelikle nöronların formüle edilmesi gerekmektedir. Formülasyon işleminde, YSA eğitiminde kullanılan transfer fonksiyonuna göre yapılmaktadır. Pythia programı, etkinleştirme fonksiyonu olarak Fermi fonksiyonunu kullanarak eğitim yapmaktadır. Bütün nöronların ağırlık ve çıktı değerleri, Fermi Fonksiyonunda yerlerine konularak gerekli formüller oluşturulduktan sonra formüllerin test ve değerlendirmesi yapılmıştır. Bulunan bu formüller Excel sayfasında, girdi alıp çıktı verecek formatta düzenlenmiştir [16].

$$N = \frac{1}{1 + e^{-4(\sum X_i W_i - 0,5)}} \quad (5)$$

Tablo 5'de saklı veriler ile formül sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucu Şekil 6a,b. ve c'deki grafikler ortaya çıkmıştır. Bu grafiğe göre YSA' dan aldığımız ağırlıklar ile oluşturduğumuz fomülazasyon tahminleri kademeli mil için

0.003743 hata, kanallı mil için hata 0.002551, delikli mil için 0.002708201 hata ile tahmin etmektedir. Gerçek sonuçlarla YSA test sonuçları karşılaştırıldığında gerçek öğrenme oranı kademeli mil için % 99.67 ($R^2=0.9967$) kanallı mil için % 99.5 ($R^2=0.995$) delikli mil için % 99.05 ($R^2=0.9905$) bulunmuştur. Eğitime işlemlerinden sonra YSA modelinden elde edilen sonuçlarla teorik (gerçek) hesap sonuçları istatistiksel hata

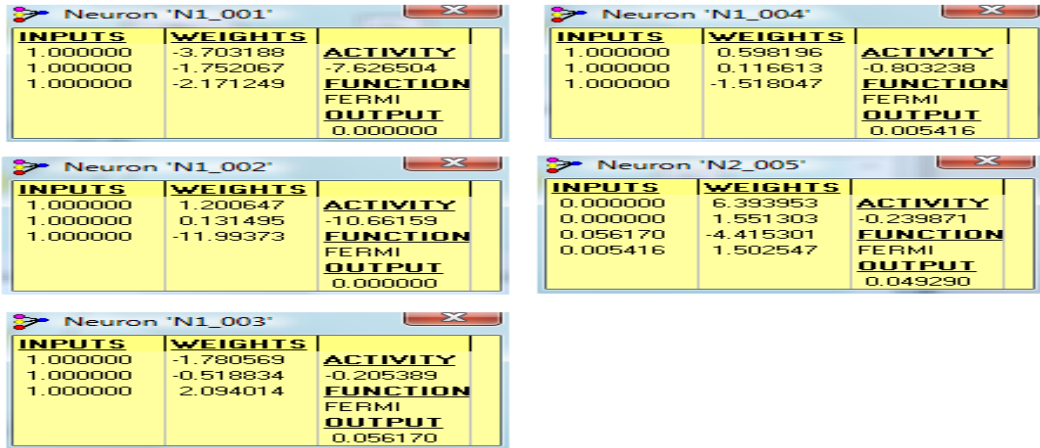
miktarına göre Excel de karşılaştırılır. Hata analizlerinde eğitim ve test verilerinin performansı birlikte değerlendirilir. Şekil 6 incelendiğimizde teorik hesap sonuçları ile YSA modelinden elde ettiğimiz sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülebilir. Şekil 6'daki grafik, yapılan YSA çalışmasının çentik faktörünün belirlenmesinde çok yakın sonuçlar aldığını göstermektedir.

Tablo 5b: YSA sisteminin tahminleri (Kademeli Mil).

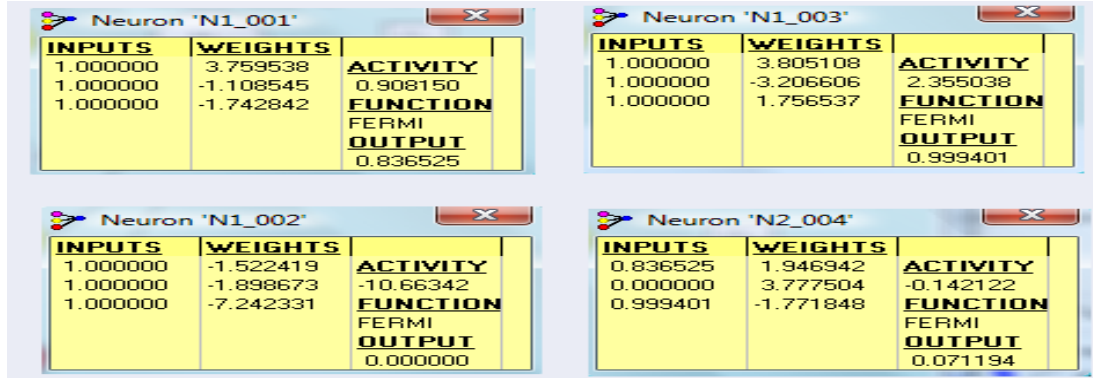
I1	I2	I3	Q1	Q(NET)	SQ DV	I1	I2	I3	Q1	Q(NET)	SQ DV	I1	I2	I3	Q1	Q(NET)	SQ DV
2	2,04	0,024	2,29	2,28146	0,000023	35	36,75	8,75	1,286	1,26601	0,000125	63	94,5	4,725	1,8	1,808073	0,00002
3	3,06	0,051	2,12	2,132656	0,000005	36	37,8	9,9	1,264	1,243937	0,000126	64	96	5,568	1,728	1,742487	0,000066
4	4,08	0,084	2	2,005065	0,000008	37	38,85	11,1	1,242	1,228029	0,000061	65	97,5	6,5	1,66	1,680797	0,000135
5	5,1	0,125	1,926	1,898798	0,000231	38	41,8	0,456	2,7	2,657533	0,000563	66	99	8,25	1,584	1,58389	0
6	6,12	0,216	1,76	1,777689	0,000098	39	42,9	0,663	2,5	2,529221	0,000266	67	100,5	10,05	1,51	1,512368	0,000002
7	7,14	0,35	1,644	1,661984	0,000101	40	44	0,84	2,366	2,420323	0,000921	68	102	11,9	1,45	1,456446	0,000013
8	8,16	0,496	1,574	1,576457	0,000002	41	45,1	1,025	2,26	2,309805	0,000774	69	103,5	13,8	1,4	1,407703	0,000019
9	9,18	0,675	1,518	1,506772	0,000039	42	46,2	1,512	2,046	2,030829	0,000072	76	228	1,596	3	2,95406	0,000659
10	10,2	0,87	1,472	1,456745	0,000073	43	47,3	2,15	1,865	1,830641	0,000368	77	231	1,925	2,862	2,901157	0,000479
11	11,22	1,1	1,44	1,417187	0,000162	44	48,4	2,728	1,75	1,741834	0,000021	78	234	2,808	2,6	2,610572	0,000035
12	12,24	1,5	1,38	1,369182	0,000037	45	49,5	3,375	1,688	1,680001	0,00002	79	237	3,95	2,31	2,321525	0,000041
13	13,26	1,95	1,33	1,336006	0,000011	46	50,6	4,002	1,63	1,636954	0,000015	80	240	4,96	2,14	2,172985	0,00034
14	14,28	2,45	1,297	1,311209	0,000063	47	51,7	4,7	1,58	1,596539	0,000085	81	243	6,075	1,986	2,038239	0,000852
15	15,3	3	1,264	1,29117	0,00023	48	52,8	6	1,5	1,526186	0,000214	82	246	7,134	1,88	1,927122	0,000693
16	16,32	3,6	1,242	1,274082	0,000321	49	53,9	7,35	1,45	1,466393	0,000084	83	249	8,3	1,804	1,82089	0,000089
17	17,34	4,25	1,225	1,259185	0,000365	50	55	8,75	1,4	1,413427	0,000056	84	252	10,5	1,684	1,663128	0,000136
18	18,36	4,95	1,21	1,246279	0,000411	51	56,1	10,2	1,36	1,364755	0,000007	85	255	12,75	1,584	1,562875	0,000139
29	30,45	2,9	1,534	1,490531	0,00059	57	85,5	0,969	3	2,854026	0,00665	86	258	15,05	1,51	1,500146	0,00003
30	31,5	3,75	1,468	1,442016	0,000211	58	87	1,218	2,774	2,76031	0,000058	87	261	17,4	1,457	1,458394	0,000001
31	32,55	4,65	1,412	1,399765	0,000047	59	88,5	1,475	2,6	2,638091	0,000453	88	264	19,8	1,41	1,425618	0,000076
32	33,6	5,6	1,358	1,361054	0,000003	60	90	2,16	2,31	2,271456	0,000464	89	267	22,25	1,374	1,392332	0,000105

Tablo 5c: YSA sisteminin tahminleri (Kanallı Mil).

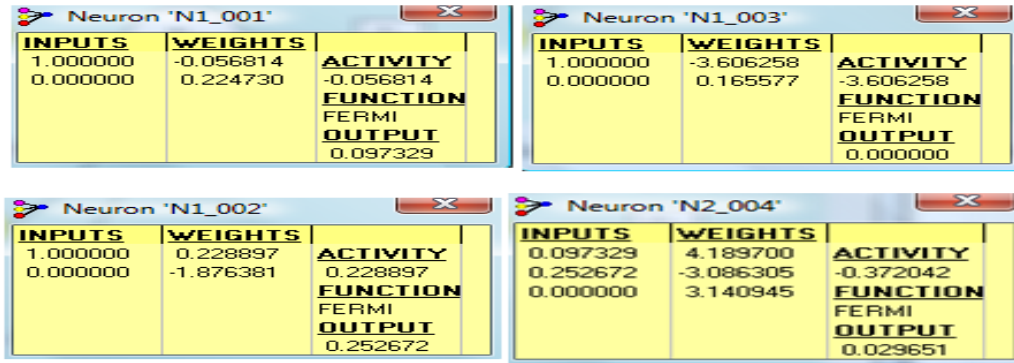
I1	I2	I3	Q1	Q(NET)	SQ DV	I1	I2	I3	Q1	Q(NET)	SQ DV	I1	I2	I3	Q1	Q(NET)	SQ DV
1	1,02	0,025	2,082	2,076703	0,000009	20	21	0,5	2,552	2,397696	0,000032	40	60	1,36	3	2,760509	0,018814
2	2,04	0,068	1,928	1,939041	0,00004	21	22,05	0,714	2,35	2,300575	0,00781	41	61,5	1,64	2,72	2,698474	0,000152
3	3,06	0,12	1,835	1,837573	0,000002	22	23,1	0,88	2,234	2,223234	0,000801	42	63	2,1	2,52	2,588261	0,001528
4	4,08	0,2	1,767	1,753027	0,000064	23	24,15	1,15	2,077	2,107417	0,000038	43	64,5	2,494	2,4	2,478106	0,002001
5	5,1	0,29	1,71	1,697944	0,000048	24	25,2	1,392	1,975	2,013179	0,000303	44	66	2,992	2,244	2,337556	0,002871
6	6,12	0,408	1,65	1,653637	0,000004	25	26,25	1,7	1,889	1,912283	0,000478	45	67,5	3,375	2,144	2,227798	0,002303
7	7,14	0,525	1,62	1,630072	0,000033	26	27,3	1,95	1,84	1,844804	0,000178	46	69	3,956	2,04	2,086902	0,000722
8	8,16	0,688	1,575	1,598677	0,000184	27	28,35	2,322	1,767	1,765791	0,000008	47	70,5	4,7	1,94	1,945151	0,000009
9	9,18	0,9	1,524	1,557595	0,00037	28	29,4	2,8	1,696	1,690447	0	48	72	5,376	1,872	1,84826	0,000185
10	10,2	1,12	1,486	1,521386	0,000411	29	30,45	3,248	1,651	1,641092	0,00001	49	73,5	6,125	1,806	1,771336	0,000394
11	11,22	1,375	1,464	1,479,562	0,000079	30	31,5	3,75	1,618	1,600,997	0	50	75	6,85	1,75	1,718639	0,000323
12	12,24	1,644	1,44	1,440584	0	31	32,55	4,247	1,58	1,573,519	0,000095	51	76,5	7,65	1,707	1,677578	0,000284
13	13,26	1,95	1,414	1,400937	0,000056	32	33,6	4,8	1,546	1,55049	0,000014	52	78	9,1	1,635	1,625804	0,000028
14	14,28	2,45	1,386	1,34304	0,000605	33	34,65	5,775	1,508	1,508499	0,000007	53	79,5	10,6	1,574	1,585945	0,000047
15	15,3	3	1,36	1,305975	0,000957	34	35,7	6,8	1,464	1,472083	0	54	81	12,15	1,53	1,546441	0,000089
16	16,32	3,6	1,325	1,284233	0,000545	35	36,75	7,875	1,425	1,437373	0,000021	55	82,5	13,75	1,486	1,499678	0,000061
17	17,34	4,25	1,3	1,272019	0,000257	36	37,8	9	1,4	1,402588	0,000005	56	84	15,4	1,44	1,442318	0,000002
18	18,36	4,95	1,276	1,265178	0,000038	37	38,85	10,175	1,364	1,367835	0,000002	57	85,5	17,1	1,4	1,378305	0,000154



Şekil 4a: Eğilme gerilmesi etkisi altındaki kademeli mil için ağırlıklar.



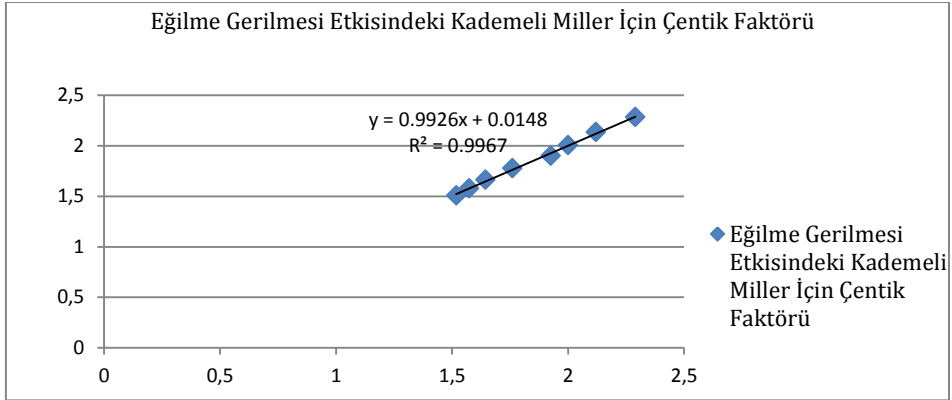
Şekil 4b: Eğilme gerilmesi etkisi altındaki kanallı mil için ağırlıklar.



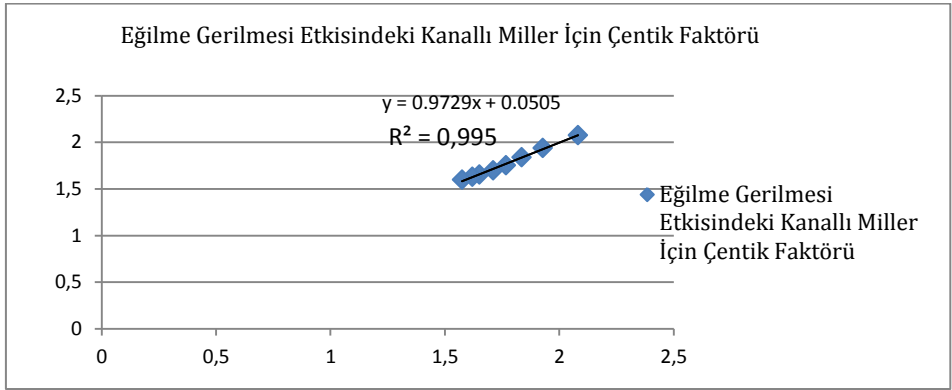
Şekil 4c: Eğilme gerilmesi etkisi altındaki delikli mil için ağırlıklar.

Tablo 6: Saklı veriler ile formül sonuçlarının karşılaştırılması.

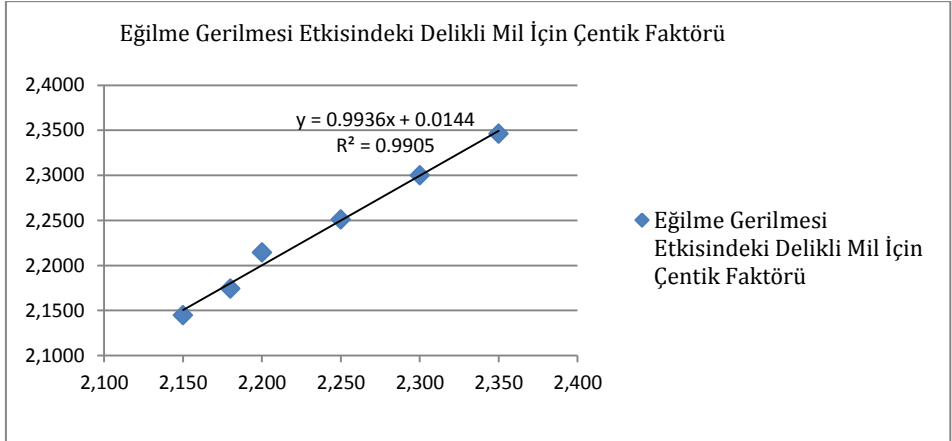
KADEMELİ MİL					DELİKLİ MİL					KANALLI MİL				
d	D	r	Kt	YSA DEĞERLERİ	d	D	kt	YSA DEĞERLERİ	d	D	r	kt	YSA DEĞERLERİ	
2	2,04	0,024	2,29	2,2814598	3	272,72	2,80	2,79244	1	1,02	0,025	2,082	2,07670327	
3	3,06	0,051	2,12	2,1326557	4	200,00	2,72	2,71994	2	2,04	0,068	1,928	1,93904098	
4	4,08	0,084	2	2,0050647	5	200,00	2,67	2,66680	3	3,06	0,12	1,835	1,83757328	
5	5,1	0,125	1,926	1,8987984	6	193,54	2,60	2,61117	4	4,08	0,2	1,767	1,75302672	
6	6,12	0,216	1,76	1,7776895	7	184,21	2,56	2,55995	5	5,1	0,29	1,71	1,69794467	
7	7,14	0,35	1,644	1,6619837	8	160,00	2,48	2,47421	6	6,12	0,408	1,65	1,65363696	
8	8,16	0,496	1,574	1,5764572	9	142,85	2,40	2,39966	7	7,14	0,525	1,62	1,63007246	
9	9,18	0,675	1,518	1,5067720	10	133,33	2,35	2,34611	8	8,16	0,688	1,575	1,59867769	



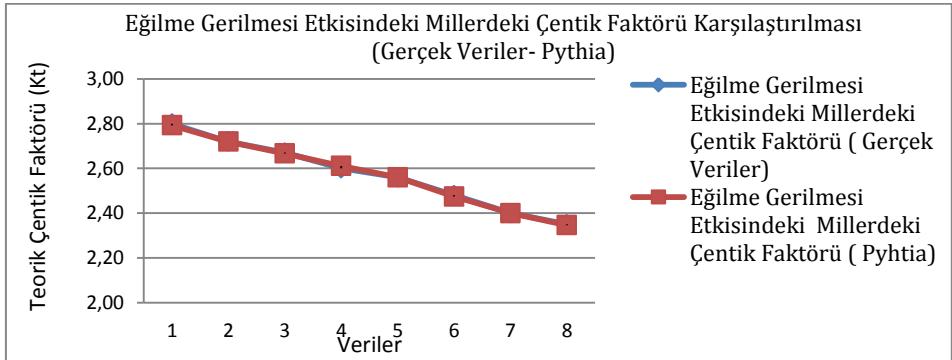
Şekil 5a: Eğilme gerilmesi etkisindeki Kademeli Miller için çentik faktörü.



Şekil 5b: Eğilme gerilmesi etkisindeki Kanallı Miller için çentik faktörü.



Şekil 5c: Eğilme gerilmesi etkisindeki Delikli Miller için çentik faktörü.



Şekil 6: Eğilme kuvveti altında kademeli mil için çentik faktörünün YSA modelinden elde edilen sonuçlarla teorik (gerçek) hesap sonuçlarının karşılaştırılması.

Tablo 7a: Eğilme gerilmesi etkisindeki kademeli mil için çentik faktörünün YSA modelindeki hata miktarları.

d	D	r	Kt	YSA DEĞERLERİ	RMS	R ²	OYH
2	2.04	0.024	2.29	2.281459856	0.00854	0.999986	0.003743
3	3.06	0.051	2.12	2.132655739	0.012656	0.999965	-0.00593
4	4.08	0.084	2	2.005064771	0.005065	0.999994	-0.00253
5	5.1	0.125	1.926	1.898798482	0.027202	0.999795	0.014326
6	6.12	0.216	1.76	1.777689547	0.01769	0.999901	-0.00995
7	7.14	0.35	1.644	1.661983789	0.017984	0.999883	-0.01082
8	8.16	0.496	1.574	1.576457289	0.002457	0.999998	-0.00156
9	9.18	0.675	1.518	1.506772013	0.011228	0.999944	0.007452

Tablo 7b: Eğilme gerilmesi etkisindeki kanallı mil için çentik faktörünün YSA modelindeki hata miktarları.

d	D	r	Kt	YSA DEĞERLERİ	RMS	R ²	OYH
1	1.02	0.025	2.082	2.076703271	0.005297	0.999993	0.002551
2	2.04	0.068	1.928	1.93904098	0.011041	0.999968	-0.00569
3	3.06	0.12	1.835	1.837573285	0.002573	0.999998	-0.0014
4	4.08	0.2	1.767	1.75302672	0.013973	0.999936	0.007971
5	5.1	0.29	1.71	1.697944679	0.012055	0.99995	0.0071
6	6.12	0.408	1.65	1.653636963	0.003637	0.999995	-0.0022
7	7.14	0.525	1.62	1.630072469	0.010072	0.999962	-0.00618
8	8.16	0.688	1.575	1.598677694	0.023678	0.999781	-0.01481

Tablo 7c: Eğilme gerilmesi etkisindeki delikli mil için çentik faktörünün YSA modelindeki hata miktarları.

d	D	Kt	YSA DEĞERLERİ	RMS	R ²	OYH
3	272.727	2.80	2.79244	0.007562482	0.999993	0.002708201
4	200.000	2.72	2.71994	5.72506E-05	1	2.10484E-05
5	200.000	2.67	2.66680	0.003200048	0.999999	0.001199958
6	193.548	2.60	2.61117	0.011174805	0.999982	0.004279608
7	184.211	2.56	2.55995	5.03873E-05	1	1.96829E-05
8	160.000	2.48	2.47421	0.005790369	0.999995	0.00234029
9	142.857	2.40	2.39966	0.000343197	1	0.000143019
10	133.333	2.35	2.34611	0.003891476	0.999997	0.001658694

Bir YSA modelinin performansı, gerçek çıktı değerleri ile YSA modelinin oluşturduğu çıktı değerleri arasındaki sapma miktarına (hata) ağılıdır. Bu hata miktarlarının analizi için üç istatistiksel değer kullanılmıştır. Bunlar RMS istatistiksel hata miktarı (root-mean-squared), R² (mutlak değişim yüzdesi), OYH (ortalama yüzde hata) değerleridir. Çentik faktörü çıktı değerine göre bu hata miktarları hesaplanacak olursa; İstatistiksel Hata Miktarı:

$$RMS = \left[\frac{1}{p} \sum_j |t_j - o_j|^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$RMS = \left[\frac{1}{2,29} \sum_j |2,29 - 2,281459|^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,008541$$

Mutlak Değişim Yüzdesi,

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_j (t_j - o_j)^2}{\sum_j (o_j)^2} \right] \quad (7)$$

$$1 - \left(\frac{(2,29 - 2,281459)^2}{(2,281459)^2} \right) = 0,999986$$

Ortalama yüzde Hata,

$$OYH \% = \frac{\sum_j \left(\frac{t_j - o_j}{t_j} \times 100 \right)}{p} \quad (8)$$

$$OYH \% = \frac{2,29 - 2,281459}{2,29} \times 100 = \% 0,003743$$

değerleri elde edilir.

Bir YSA modelinin performansı, RMS değerinin düşük olmasına, R² değerinin 1'e yakın olmasına ve OYH değerinin düşük olmasına ağılıdır. Buna göre yukarıdaki veri örneği, çok düşük bir sapma ile YSA modeli tarafından çözülür. Tablo 7a, b ve c incelendiğinde yapılan YSA modelinin performansının oldukça iyi olduğu görülebilir. RMS değerleri çok düşük, R²

değeri 1'e oldukça yakın ve OYH değerinin düşük olduğu görülmektedir.

5 Sonuç ve Öneriler

Yapılan bu çalışmada millerin boyut ölçüleri, çentiklerin şekil ve üzerine gelen eğilme gerilmesi parametrelerinin çentik katsayısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Literatürden alınan tablolar incelenmiş ve çalışmamıza yön veren veriler olarak alınmıştır [17]-[18].

Literatürden faydalanılarak alınan sonuçlar ile daha sonra Pythia programında bir YSA yapısı oluşturulmuş ve bu YSA yapısından ağ ağırlıkları alınarak Excel ortamında hesaplamalar hazırlanmıştır. Pythia programında YSA ile yapılan yazılımdan elde edilen deney sonuçlarından şu sonuçlara varılmıştır:

Çentik faktörü belirlenirken bazı olumsuzluklar ile karşılaşmaktadır. Çentik faktörü değerlerine; çentik tablolarından okuma yöntemi ve interpolasyon yöntemi ile elde edilmektedir. Belirli oranların (d/D) dışında mil ölçülerimiz varsa çentik faktörüne ulaşmamız çok zor olmaktadır. Oransız ulaşılan sonucun doğruluğu ise tartışılabilir. Oran tutturulduğunda dahi grafiğin dışında bir mil ölçülerimiz olabilir bu durumda da elde edilen çentik faktörü değeri tam elde edilemeyebilir.

Sonuç olarak hazırlanan bu çalışma ile Eğilme gerilmesi altındaki miller için çentik faktörüne kolayca ulaşılabilir. Hesap hatalarının önüne geçilir. Grafiklerdeki oranların dışındaki mil ölçülerinde de doğru sonuca hızlıca varılabilir. Bireysel tablo okuma hataları minimuma indirilmiştir. Tasarım yapan bireyin çentik tablolarını sürekli yanında bulundurma gerekliliği ortadan kaldırılmıştır.

Öneriler;

Çentik faktörünün hesaplanması ile ilgili ileride yapılması önerilebilecek çalışmalar;

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, mukavemet hesaplama işlemleri yapılacak farklı yerlere aktarılabilir.

1. Çentik faktörü ile ilgili daha fazla deney sonuçları eklenerek programlama işlemleri yeniden yapılabilir,
2. Farklı malzemeler üzerinde de deneyler yapılarak çentik faktörü etkisi araştırılabilir,
3. Bu konuda yapılan çalışmalarda elde edilen deney sonuçları bir araştırmada toplanarak tekrar bir programlama işlemi yapılabilir,
4. Millerde farklı kuvvetler aynı anda verilerek deney sonuçları incelenebilir,
5. Sadece miller ile sınırlanmayıp, sac malzemelerde, döküm malzemelerde, değişik geometri ve boyutlardaki parçalarda da incelenebilir.

6 Kaynaklar

- [1] Nicholas, T., "High Cycle Fatigue: A Mechanics of Materials Perspective", Oxford: Elsevier, 213-238, 2006.
- [2] Doğrusadık, A., "Çentikli Parçaların Yorulma Ömürlerinin Saptanmasında Kullanılan Yöntemlerin Deneysel Tahkiki", İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1-2, 2009.
- [3] McClintock, F., "A criterion of ductile fracture by the growth of holes", J Appl Mech, 35: 363-71, 1968.
- [4] Rice, J., Tracey, D. "On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields", J Mech Phys Solids, 17:201-217, 1969.
- [5] Hancock, J., Mackenzie, A., "On the mechanisms of ductile failure in high-strength steels subjected to multi-axial stress-states", J Mech Phys Solids 24: 69-147, 1976.
- [6] Bridgman, P. "Studies in large plastic flow and fracture", Cambridge, MA: Harvard University Press; 3-5, 1952.
- [7] Hancock, J., Brown, D., "On the role of strain and stress state in ductile failure", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 31 (1): 1-24, 1983.
- [8] Efe, M. Ö., Kaynak, O., "Yapay Sinir Ağları ve Uygulamaları", Boğaziçi Üniversitesi Yayınları, İstanbul, 3:1, 2000.
- [9] Elmas, Ç., "Yapay Sinir Ağları", Seçkin Yayıncılık, Ankara 27-37, 2003.
- [10] Arslan, A., İnce, R., "The neural network approximation to the size effect in fracture of cementitious materials", Engineering Fracture Mechanics, 54, 1996.
- [11] Yao, X., "Evolving artificial neural Networks", Proceedings of the IEEE, 87, 1999.
- [12] Bozacı, A., "Makine Elemanlarının Projelendirilmesi", Seç Yayın Dağıtım, İstanbul 1-6, 1995.
- [13] Akkurt, M., "Makine Elemanları", Birsen Yayın Evi Ltd. Şti. Seç Yayın Dağıtım, İstanbul 29, 2005.
- [14] Koç, E., "Makine Elemanları", Nobel Kitapevi, Adana 47, 2004.
- [15] Can, A. Ç., "Makine Elemanları Tasarımı", Birsen Yayın Evi, İstanbul 43, 2006.

[16] Öztemel, E., "Yapay Sinir Ağları", Papatya Yayıncılık, İstanbul 87, 2006.

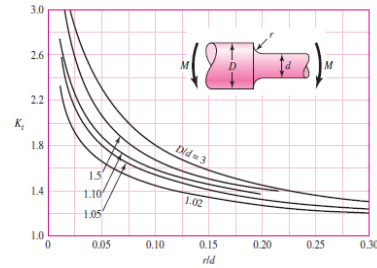
[17] Peterson, R. E., "Design Factors for Stress Concentration," Machine Design, Vol. 23, No. 2, February 1951, p. 169; No. 3, March 1951, p. 161, No. 5, May 1951, p. 159; No. 6, June 1951, p. 173; No. 7, July 1951, p. 155. Reprinted with permission from Machine Design, a Penton Media Inc. Publication, 1951.

[18] Budynas-Nisbett Shigley's Mechanical Engineering Design," McGraw, H., "A.B.D. 1003-1005, 2006.

Ek A: Eğilme Etkisinde Zorlanan Miller İçin Çentik Tabloları

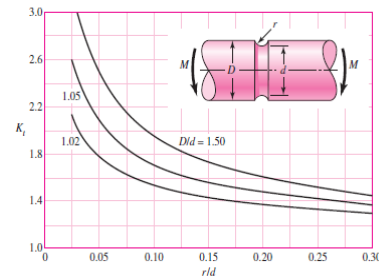
Kademeli dairesel mildeki eğilme (Round shaft with shoulder filet in bending) [18].

$$\sigma_0 = Mc/I$$
$$c = d/2$$
$$I = \pi d^4/64$$



Kanallı dairesel mildeki eğilme (Grooved round bar in bending) [18].

$$\sigma_0 = Mc/I$$
$$c = d/2$$
$$I = \pi d^4/64$$



Enine delikli mildeki eğilme (Round shaft in bending with a transverse hole) [18].

$$\sigma_0 = M/[(\pi D^3/32) - (dD^2/6)]$$

