

EKSENEL, KESME VE MOMENT YÜKÜ ALTINDAKİ FLANŞLAR İÇİN YAPAY SINIR AĞINA DAYALI CIVATALI FLANŞ TASARIM ARACI GELİŞTİRİLMESİ

T. Volkan Sanlı¹, Ahmet Arda Akay², Alper Yıldırım³, Ercan Gürses⁴, Demirkan Çöker⁵, Altan
Kayran⁶

Orta Doğu Teknik Üniversitesi/Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Ankara

ÖZET

Havacılık sektöründe civatalı flanş bağlantıları birçok yapıda görülmektedir. Bu yapıların analizleri de son derece kritik olmaktadır. Analiz için kullanılan yöntemler her alanda isterleri karşılayamadığı için her yöntemin iyi yönlerini içinde barındıran yeni bir analiz aracı geliştirilme ihtiyacı duyulmuştur. Bu yeni yöntem, söz konusu flanşlı bağlantı üzerinde belirli tasarım noktaları için analiz yaparak bu analiz sonuçları üzerinden yapay sinir ağı oluşturulmasını ve geri kalan tüm tasarım noktaları için doğru ve hızlı bir şekilde çözüm alınabilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada bileşik yük altındaki çalışan civatalı flanş bağlantılarındaki flanş gerilimleri çıktı olarak kullanılmıştır. Çalışmanın tasarım ve analiz aşamalarında ANSYS Workbench programı kullanılmıştır. Elde edilen analiz sonuçları kullanılarak yapay sinir ağı oluşturma işlemi MATLAB programı ile yapılmıştır. Oluşan yapay sinir ağının analiz aracına dönüştürülmesi için, yine MATLAB kullanılarak, bir grafik kullanıcı ara yüzü oluşturulmuştur. Çalışma sonucu elde edilen YSA ile sonlu eleman analizlerinin uyumlu olduğu görülmüştür.

GİRİŞ

Havacılıkta sık sık kullanılmakta olan civatalı flanş bağlantılarının temelde iki amacı bulunmaktadır; yapıları bir arada tutarak yapısal bütünlüğü sağlamak ve eklem yerlerindeki olası sızıntıları önlemek [Kumar, 2011]. Yapısal bütünlük açısından önem barındıran bu bağlantıların analizlerinin doğru yapılması yapı açısından kritik öneme sahiptir. Bu analizler teorik hesaplamalar ve sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılmaktadır. Teorik hesaplama kullanılarak yapılan analizler emniyetli tarafta kalındığından ve dolayısıyla ağır tasarımlar verdiği için tercih edilmezken, sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan analizler de aşırı zaman kullanımı yüzünden tercih edilmemektedir [Coro, 2004]. Bu yüzden hem doğru hem de hızlı sonuç alınabilecek bir yöntem geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur.

Yeni bir analiz aracı arayışında iki yöntem ön plana çıkmıştır. Bunlar, Yanıt Yüzeyi ve Yapay Sinir Ağı (YSA) yöntemleridir. İki teknik aracılığı ile de karmaşık problemlere hızlı ve doğru çözümler getirilse de, yapılan karşılaştırmalar sonucu Yapay Sinir Ağı'nın Yanıt Yüzeyi'ne göre daha geniş kullanım alanı olduğu görülmüştür [Gomes, Awruch, 2004][Gosavi, 2003].

¹Yük. Lisans Öğr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: e167992@metu.edu.tr

²Ar. Gör., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: aakay@metu.edu.tr

³Tasarım Müh., ASELSAN, E-posta: yildirim.alper@metu.edu.tr

⁴Yrd. Doç. Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: gurses@metu.edu.tr

⁵Doç. Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: coker@metu.edu.tr

⁶Prof. Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: akayran@metu.edu.tr

Muliana ve ark. tarafından 2002 yılında yapılan bir çalışmada Yapay Sinir Ağı'nın sonlu eleman modeli ile karşılaştırılması yapılmıştır. Bu çalışmada geniş bir malzeme ve geometrik parametre yelpazesini içeren ve sonlu eleman modelinin yük-deplasman eğrilerini modelleyen yapay sinir ağı oluşturulmuş ve yapay sinir ağının yük-deplasman davranışını doğru bir şekilde tahmin edebildiği görülmüştür [Muliana ve ark., 2002].

Konu üzerine daha önce yapılan çalışma, aynı prensiplerin dış eksenel yükler altındaki flanş bağlantılarına uygulanmasını araştırırken, bu çalışma birleşik yükler altındaki yapıların davranışlarıyla ilgilenmektedir [Yıldırım, 2015].

YÖNTEM

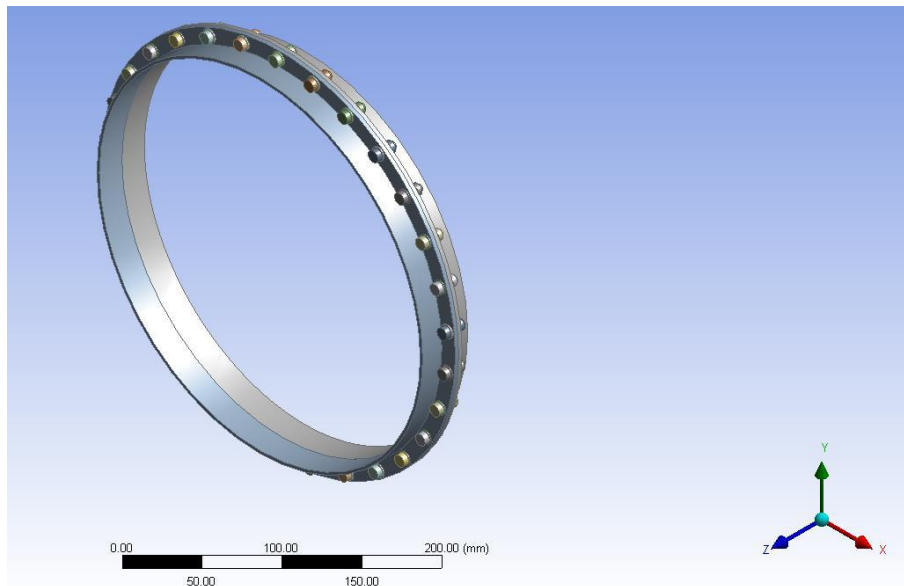
Çalışma, geometrinin belirlenmesi ve analizlerin yapılarak veri tabanı oluşturulmasıyla başlamıştır. Oluşan veri tabanı ile yapay sinir ağı oluşturulmuş ve sonlu elemanlar modeli yardımıyla doğrulama yapılmıştır. Son olarak da oluşturduğumuz ağa kullanıcı ara yüzü yazılmıştır. Şekil 1 çalışmada kullanılan yöntem şemasını vermektedir.



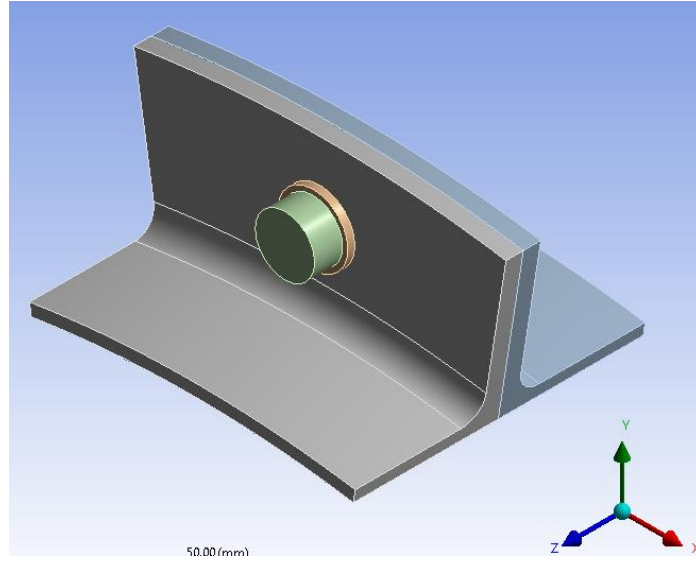
Şekil 1: Çalışmada kullanılan yöntem şeması

Analiz Geometrisi ve Modelleme

Üzerinde çalışılan ana geometri dairesel cıvatalı flanş bağlantısıdır (bkz. Şekil 2). Bu geometri iki adet flanşlı yapı, cıvata ve somun çiftleri ve cıvata başına iki adet puldan oluşmaktadır. Çalışma kapsamında çok sayıda analiz yapılması gerektiğinden ve tüm modelin analizi çok fazla zaman aldığından dolayı, analizler sırasında dilim model yaklaşımı kullanılmış ve cıvata sayısına eşit bölünmüş, tek cıvata ve somun çifti ve iki adet pul içeren dilim üzerinde analizler yapılmıştır (bkz. Şekil 3).

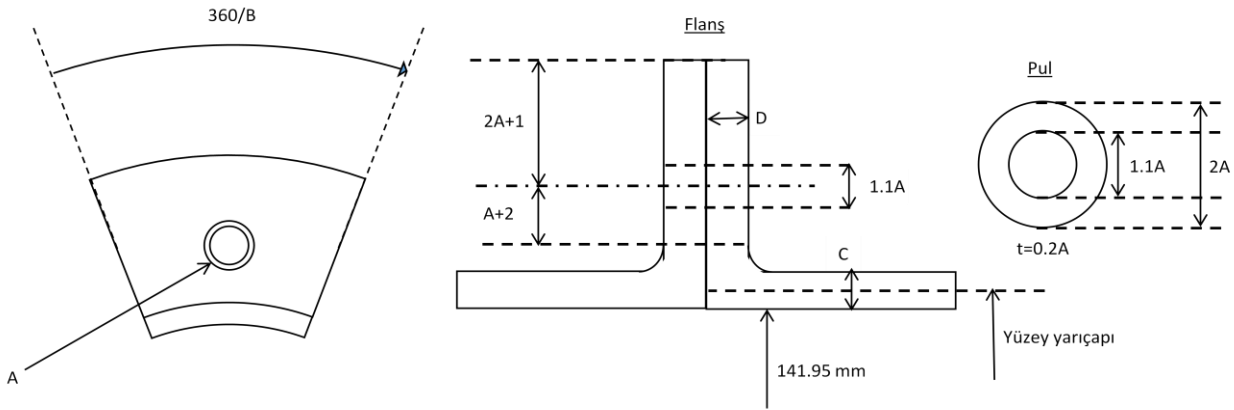


Şekil 2: Dairesel cıvatalı flanş bağlantısı



Şekil 3: Dilim model geometrisi

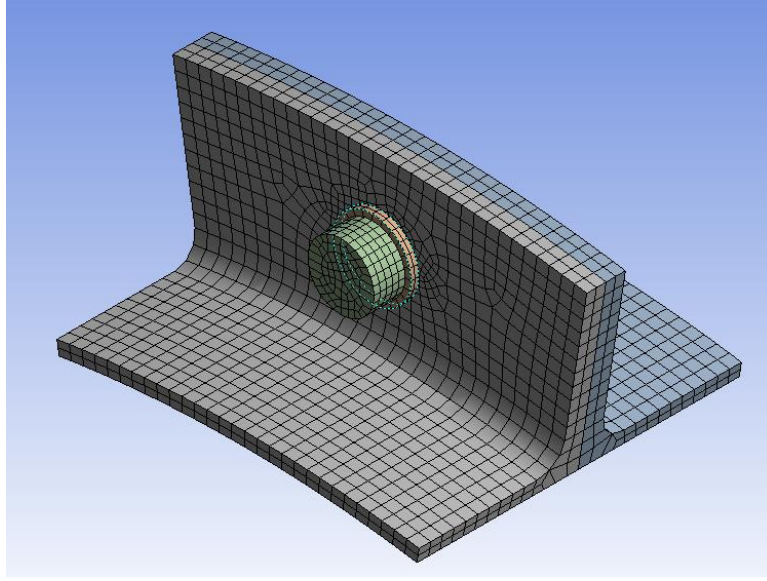
Dilim geometrisinin ANSYS kullanılarak modellenmesinde dört adet geometrik girdi parametrik değişken olarak tanımlanmıştır (bkz. Şekil 4). Flanşların iç yarıçapı tüm analizlerde sabit tutularak geri kalan bütün boyutlar parametrelere bağlı şekilde modellenmiştir.



Civata Boyutu	A (mm)	4.826	5	6	6.35	7	7.937	9	9.525
Civata Sayısı	B	20	24	30	36	-	-	-	-
Gövde Kalınlığı	C (mm)	1.68	1.89	2.1	2.31	2.52	-	-	-
Flanş Kalınlığı	D (mm)	2.4	2.7	3	3.3	3.6	-	-	-

Şekil 4: Geometrik parametreler

Sonlu eleman analizleri için flanş geometrilerinin modellemesinde ANSYS veritabanında bulunan alüminyum alaşımı kullanılırken, civata-somun geometrisinde ve pullarda yapısal çelik kullanılmıştır. Parçalar arasında malzeme verisiyle uygun olacak şekilde temas tanımlaması yapılmış ve orta ölçekte yoğunluğu olan çözüm ağı örgüsü oluşturulmuştur (bkz. Şekil 5). Daha önce yapılmış olan çözüm ağı yakınsama çalışmaları temel alınarak kullanılan çözüm ağı yoğunluğunun yeterli olacağına karar verilmiştir [Yıldırım, 2015].



Şekil 5: Sonlu eleman analizi çözüm ağı

Yük ve Sınır Koşulları

Flanş bağlantısının yükleme koşulları oluşturulurken havacılık sektöründe kullanılan benzer geometriler üzerine etkiyen örnek bir yük seti kullanılmıştır (bkz. Çizelge 1). Çalışmanın başlangıcında burulma momenti dikkate alınmayarak eksenel ve kesme kuvvetleri ile eğme momenti üzerinde durulmuştur. Ayrıca, cıvata-somun çiftleri üzerine, boyutlarına uygun olarak sektörde kullanılan önyüklemeye kuvvetleri uygulanmıştır.

Çizelge 1: Tüm modele etkiyen yük seti (bkz. Şekil 2)

	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Mx (N.mm)	My (N.mm)	Mz (N.mm)
	Kesme Kuvveti	Kesme Kuvveti	Eksenel Kuvvet	Eğme Momenti	Eğme Momenti	Burulma Momenti
Azami	1934.523	366.9471	463.7514	215598.9	868455.5	1809.91
Asgari	-1524.82	-302.678	-349.759	-180241	-1105355	-1797.95

Başlangıçta tüm model üzerinde yapılan sonlu eleman analizleri sırasında kullanılan yük setindeki kesme kuvvetinin flanş gerilimleri üzerinde kayda değer bir etkisi görülmemiş ve analizlerde kullanılmamasına karar verilmiştir. Eksenel kuvvet değerinin de aynı şekilde küçük olmasından dolayı tüm analizlerde azami değerde sabit alınması kararlaştırılmıştır. Eksenel kuvvet dilim modele uygulanırken her cıvatanın eşit yük taşıdığı var sayılarak geometri üzerine toplam cıvata sayısına bölünmüş değer uygulanmıştır.

Cıvata önyüklemeye değerleri cıvatalar arasında boyuttan boyuta farklılık gösterdiği için, birbirine yakın değerdeki her ikili cıvata grubuna üç farklı değer denk gelecek şekilde toplamda 12 farklı önyüklemeye kuvveti belirlenmiştir. Model üzerine yüklenen eğme momentinde de yük setindeki azami eğme momenti temel alınarak beş farklı değer kullanılmasına karar verilmiştir (bkz. Çizelge 2).

Çizelge 2: Yük parametreleri

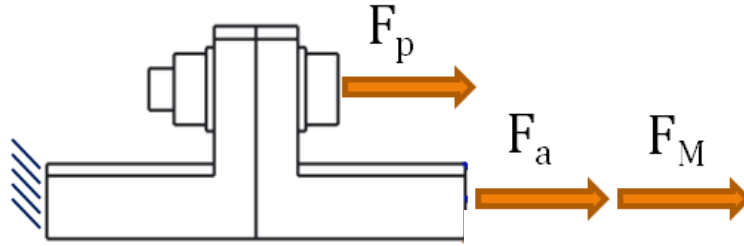
Cıvata Boyutuna Bağlı Önyüklemeye	A (mm)	4.826	5	6	6.35	7	7.9375	9	9.525
P (N)		5700/6100/6500		10000/11150/12300		16000/19000/22000		27000/29500/32000	
Eğme Momenti	M (Nmm)	1126185	1689277	2252370	2815462	3378555	-	-	-

Tüm modelden dilim modele geçilirken, eğme momenti altındaki flanşda, nötr eksen en uzak konumda bulunan gerilme kuvveti altındaki cıvata-somun çiftine etkiyen eksenel kuvvet Denklem 1'de gösterildiği gibi hesaplanmış ve dilim model sonlu eleman analizlerinde kullanılmıştır. Denklem 1'deki yüzey yarıçapı Şekil 4'te gösterilmiştir.

$$F_M = \frac{2 \times M}{\text{Cıvata sayısı} \times \text{Yüzey yarıçapı}} \quad (1)$$

Dilim model analizlerinde kullanılacak sınır koşulları belirlenirken, modelin tüm model analizlerini birebir yansıması hedeflenmiştir. Yapılan deneme analizlerinde çeşitli sınır koşulları uygulandıktan sonra bulunan sınırlandırmaların tüm modele çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür [Akay, 2015]. Bir flanş eksenel yöndeki kesit yüzeyinden bütün serbestlik dereceleri tutulmuş, diğer flanşın ise sadece eksenel yönde hareket etmesine izin verilmiştir. Aynı zamanda her iki flanş diliminin yanıl kesit yüzeyleri teğetsel ve radyal yönlerde sabit tutulmuştur.

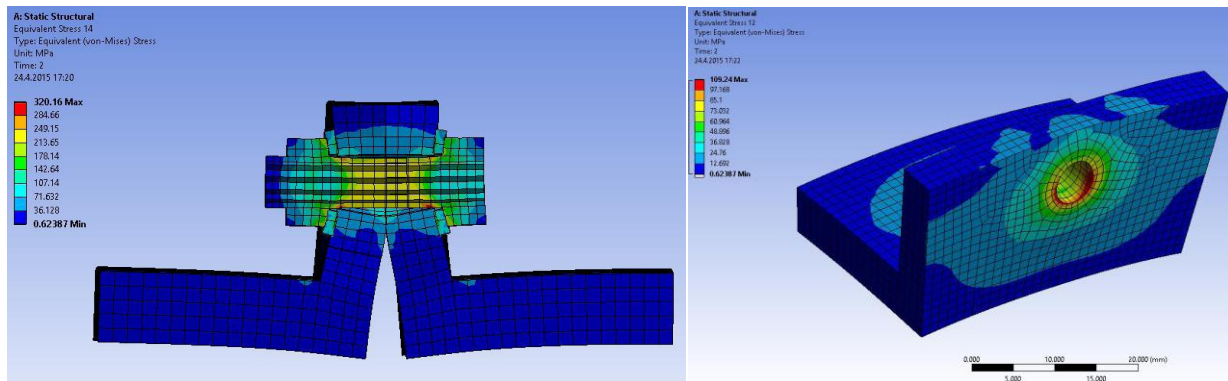
Analizler sırasında yükleme iki aşamalı olarak yapılmış; ilk aşamada cıvata üzerine önyüklem yapılrken ikinci aşamada ön yüklem değeri sabitlenmiş ve eksenel yönde serbest olan flanşın kesit yüzeyine eksenel kuvvetler uygulanmıştır (bkz. Şekil 6). Şekil 6'da F_a sadece eksenel kuvvet, F_M ise moment nedeni ile meydana gelen eksenel kuvveti göstermektedir.



Şekil 6: Yük ve sınır koşulları

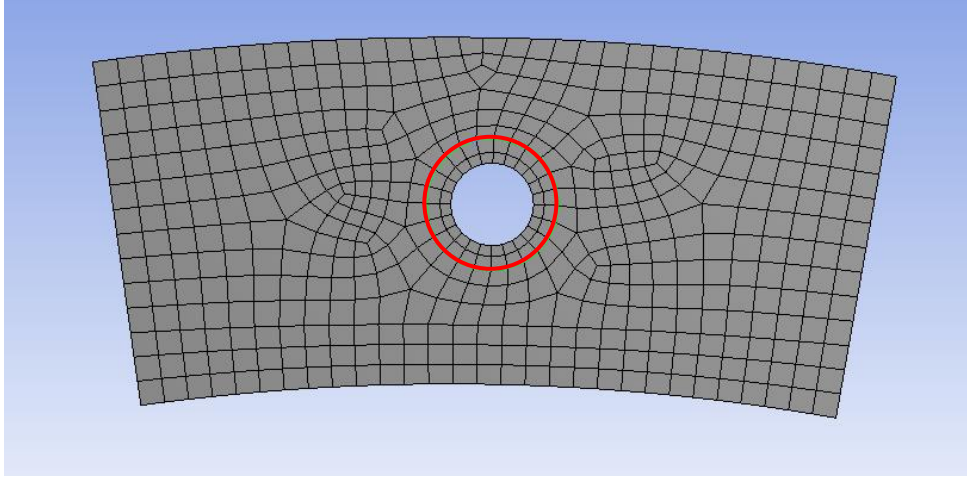
Parametrik Analizler

Dilim model ve tüm model karşılaştırma analizleri, yükleme ve sınır koşulları çalışmaları ve parametrik analiz denemelerinin ardından yük ve sınır koşullarının yanı sıra parametrik girdi sayısına bağlı tasarım noktası sayısı belirlenmiştir. 8 farklı cıvata çapı, 4 toplam cıvata sayısı ve 5'er adet flanş ve gövde kalınlığıyla birlikte her ikili cıvata grubu başına uygulanan 3 farklı ön yüklem değeri ve 5 eğme momenti ile birlikte toplamda 12000 farklı analiz konfigürasyonu ortaya çıkmıştır. Bu tasarım noktaları her cıvata çapı-önyüklem değeri ikilisi için, her biri 500 farklı tasarım noktası içeren 24 analiz setine bölünmüştür. Tasarım çıktısı olarak her tasarım noktasından flanş üzerindeki eşdeğer von-Mises gerilimi toplanmıştır.



Şekil 7: Eşdeğer von-Mises gerilme dağılımı örneği. Soldaki resimde yer değiştirmeler büyütülerek gösterilmiştir.

Flanş üzerinde gerilimin, iki flanşın temas ettiği yüzeyde, civata deliği çevresinde kritik olduğu görülmüştür. Toplanan sonuçların delik köşelerinde yerel olarak meydana gelen azami gerilimlerden dolayı bozulmaması için yüzey üzerinde civata çapının 1.75 katı çapta bir daire üzerindeki 24 noktadaki gerilimlerin ortalaması çıktı olarak kullanılmıştır (bkz. Şekil 8) [Yıldırım, 2015].



Şekil 8: Flanş gerilimi çıktı noktaları

Parametrik analizlerin bitiminin ardından 24 farklı analiz seti tek bir Excel sayfası altında toplanmış, çıktı değerleri de aynı sıralamayla farklı bir sayfa altında tutulmuştur. Bu dosyalar sonraki aşamada yapay sinir ağı oluşturmada girdi ve çıktı değerlerini olarak kullanılacaktır. Çizelge 3 örnek bir analiz girdi-çıkı çizelgesinden 5 satırı göstermektedir.

Çizelge 3: Örnek analiz girdi-çıkı değerleri

	Civata Çapı (mm)	Civata Sayısı	Gövde Kalınlığı (mm)	Flanş Kalınlığı (mm)	Momente Bağlı Eksenel Kuvvet (N)	Önyüklem (N)	Ortalama Eşdeğer Von-Mises Gerilimi (MPa)
TN1	4.826	20	1.68	2.4	788.700161	5700	122.605666
TN2	4.826	24	1.68	2.4	657.250134	5700	109.072983
TN3	4.826	30	1.68	2.4	525.800107	5700	97.0461614
TN4	4.826	36	1.68	2.4	438.166756	5700	95.2649124
TN5	4.826	20	1.89	2.4	788.12062	5700	110.586567

Yapay Sinir Ağı Oluşturma

Yapay sinir ağı oluşturulması, son ürün olan flanş tasarım aracının elde edilebilmesi için, parametrik analizlerin yanı sıra bir başka önemli adımdır. Yapay sinir ağı, tasarım aracının temelini oluşturacağı için, aracın başarısı yapay sinir ağının başarılı bir şekilde oluşturulmasıyla birebir ilgilidir.

Yapay sinir ağı oluşturma işlemi MATLAB yazılımının ANN araç kutusu ile yapılmıştır. Ağ oluşturulurken kullanılan yöntem Levenberg-Marquardt geri yayılım yöntemidir. Ağın girdilerinden olan nöron sayısı çeşitli deneme-yanımların ardından en elverişli değer olarak 12'de tutulmuştur. Nöron sayısının fazla tutulması kimi problemlerde daha iyi sonuç almayı sağlamasına rağmen aşırı uyum sorunu oluşmaması açısından deneme ve yanılma yöntemiyle probleme uygun olarak belirlenmiştir.

Analizler sonucu elde edilen girdi-çıkı değerleri yapay sinir ağı oluşturulması kapsamında 3 gruba bölünmektedir. 12000 tasarım noktası verisinin %90'ı yapay sinir ağını oluşturma, %5'i oluşturma sırasında yapılan her yineleme sonrasında doğrulama ve kalan %5'i de tüm oluşturma işleminden bağımsız olarak, son ürün olan ağın performansının test edilmesinde kullanılmıştır. Her yüzdelik

dilimdeki veriler yazılım tarafından rastgele seçilecek şekilde ayarlanmıştır. Yapay sinir ağının performans değerlendirmesi ortalama karekök hatası hesaplamasıyla yapılmaktadır.

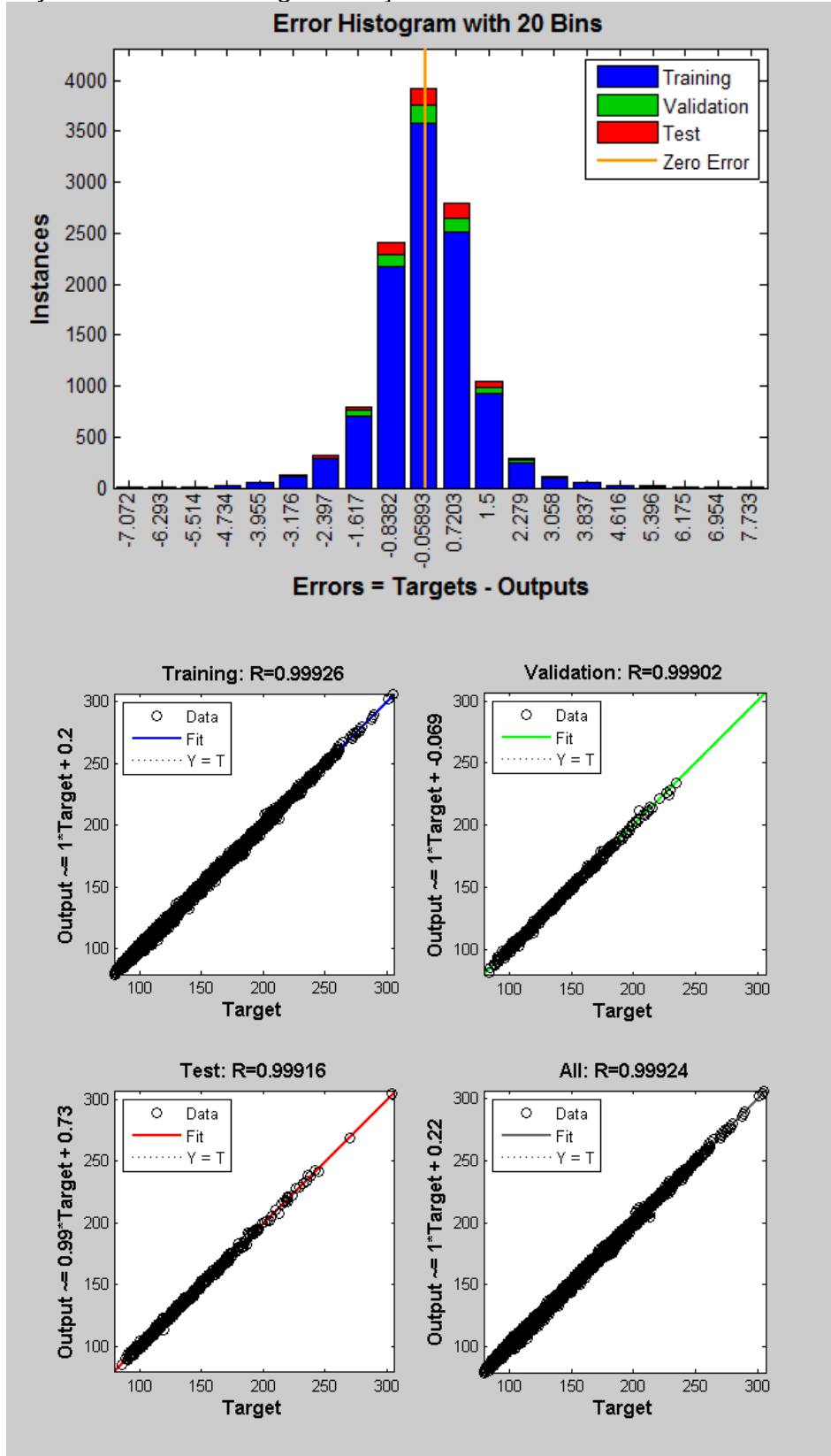
Ağ oluşumunun sonlandırılması için birkaç ölçüt bulunmaktadır. Bu ölçütlerden azami yineleme sayısı 5000'e ayarlanmıştır. 5000 yineleme sonunda diğer ölçütlere bakılmaksızın ağ oluşumu sonlanmaktadır. Bir diğer ölçüt olan performans değeri 0 olan ön tanımlı değerde bırakılmıştır. Performans hesabında kullanılan hata değeri belirlenen değere ulaştığında süreç durdurulmaktadır. Son olarak da doğrulama kontrol değeri 300 olarak alınmıştır. Buna göre, ardı ardına 300 yineleme sonunda performans değerinde herhangi bir azalma olmazsa yapay sinir ağının oluşumu sonlanmaktadır.

Yapılan ayarlamalar ve seçilen yöntemler sonrasında yapay sinir ağının oluşturma işlemi 1.36 'lık performans değeriyle, daha iyi bir sonuca ulaşamaması nedeniyle 4000 yineleme ardından sonlanmıştır (bkz. Şekil 9).



Şekil 9: Yapay sinir ağı oluşturma araç kutusu

Yapay sinir ağı oluşturularak hesap edilen çıktı değerleriyle parametrik analizler sonucu elde edilen çıktı değerleri karşılaştırıldığı zaman sürecin başarılı sonuçlandığı görülmüştür (bkz. Şekil 10). Şekil 10'un ilk kısmında 12000 analiz noktasının her birinin YSA sonucu hesaplanan değeriyle SEA sonucu çıkan değeri arasındaki farklar gösterilmiştir. İkinci kısımda ise oluşturma, doğrulama ve test analiz setlerinde elde edilen YSA gerilimlerinin, YSA gerilimlerinin SEA gerilimlerine eşit olduğu doğru etrafındaki dağılımları ayrı ayrı ve bir arada olarak gösterilmiştir.



Şekil 10: Analiz sonucu elde edilen ve yapay sinir ağı oluşumunda hesaplanan çıktıların karşılaştırılması

Sonlu Eleman Analizleri ve Yapay Sinir Ağı Sonuçlarının Karşılaştırılması

YSA oluşumu sonrası hata grafiklerinde bakıldığında yapay sinir ağının, sonlu eleman analizlerinin sonuçlarına son derece yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu gözlemi test etmek amacıyla 12000 tasarım noktası arasından rastgele 10 konfigürasyon seçilmiştir (bkz. Çizelge 5). Bu 10 konfigürasyon için, sonlu eleman analizleri sonrası elde edilen flanş gerilmeleri ile aynı konfigürasyonların YSA sonrası elde edilen gerilme sonuçları karşılaştırılmış, hata payları çizelge haline getirilmiştir (bkz. Çizelge 5). Bu karşılaştırmada da görüleceği üzere sonuçlar tasarım noktaları için son derece gerçeğe yakındır.

Çizelge 4: Seçilen tasarım noktaları için SEA ve YSA ile elde edilen flanş gerilme sonuçlarının karşılaştırılması

	Civata Çapı (mm)	Civata Sayısı	Gövde Kalınlığı (mm)	Flanş Kalınlığı (mm)	Eğme Momenti (Nmm)	Önyüklem (N)
TN1	4.826	30	2.31	2.4	1126185.0	5700
TN2	4.826	20	1.68	2.4	2815462.4	6100
TN3	5	20	2.31	3.6	2252369.9	6500
TN4	6	20	1.68	2.4	3378554.9	12300
TN5	6.35	36	2.31	3.6	1689277.4	11150
TN6	7	30	2.31	2.7	1689277.4	22000
TN7	7.9375	30	1.68	3.3	1689277.4	19000
TN8	7.9375	30	1.68	2.4	3378554.9	16000
TN9	9	30	2.31	3.6	3378554.9	27000
TN10	9.525	36	1.68	3.6	2815462.4	27000

Çizelge 5: Tasarım noktaları için SEA ve YSA ile elde edilen flanş gerilme sonuçlarının karşılaştırılması

	SEA Sonuçları (MPa)	YSA Sonuçları (MPa)	% Hata
TN1	97.631420	97.622881	0.008747
TN2	258.100600	257.985052	0.044789
TN3	135.106276	135.090299	0.011827
TN4	261.693686	261.651224	0.016229
TN5	103.256997	103.290884	0.032807
TN6	155.604344	155.845314	0.154621
TN7	108.484189	108.462308	0.020174
TN8	163.952188	164.026315	0.045192
TN9	125.928304	126.090561	0.128683
TN10	115.299755	115.175242	0.108108

Kullanıcı Ara Yüzü Oluşturulması

YSA'nın oluşturulmasının ardından elde edilen ağın kullanımını kolaylaştırmak amacıyla MATLAB programının GUI araç kutusu kullanılarak ağa kullanıcı ara yüzü hazırlanmıştır. Oluşturulan bu ara yüz sayesinde kullanıcı istenilen parametreleri ilgili kutucuklara girerek veya ilgili listelerden kullanmak istediği parametrik değerleri seçerek sonuçlara kolayca ulaşabilmektedir (bkz. Şekil 11). Ara yüz geliştirilmesine devam edilecektir.

CIVATALI FLANS TASARIM ARACI

Geometrik Girdiler

Civata Çapı, A, mm: 4.826

Civata Sayısı, B: 30
20 ≤ B ≤ 36

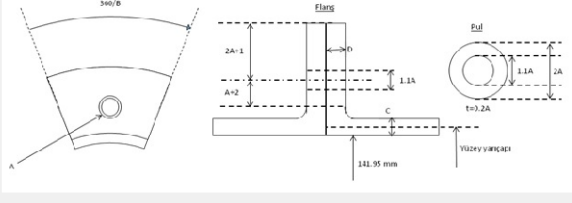
Gövde Kalınlığı, C, mm: 1.68
1.68 ≤ C ≤ 2.52

Flans Kalınlığı, D, mm: 3
2.4 ≤ E ≤ 3.6

Yük Girdileri

Moment, N.mm: 2815462.4
1126184.96 ≤ Moment ≤ 3378554.88

Civata Önyüklemesi, N: 5700
5700 ≤ Pretens. ≤ 32000



ÇALIŞTIR

Çıktı

Von Mises Flange Gerilimi: 161.678

Şekil 11: Grafik kullanıcı ara yüzü

SONUÇ

Havacılıkta sıklıkla kullanılan cıvatalı flanş bağlantılarında kritik önem taşıyan analizlerin doğru yapılması; yapının sağlamlığı, yükün daha faydalı aktarılması ve ağırlık azaltma gibi çeşitli sebeplerden dolayı önem arz etmektedir. Bu analizlerde, doğruluğun yanı sıra çözüme hızla ulaşabilmek de isterler arasındadır. Bu çalışmanın ana amacı, var olan yöntemlere kıyasla hem doğru hem de çok hızlı bir şekilde sonuç verebilen bir analiz aracı geliştirmektir. Analiz yöntemi olarak kullanılan el hesapları genellikle tercih edilmezler. Sonlu eleman modelleri ise değişen tasarım noktaları söz konusu olduğunda son derece yavaş kalmaktadır. Yapay sinir ağı kullanımı sonuca ulaşma hızını oldukça geliştirirken, sonucun doğruluğunu da büyük bir tutarlılıkla sağlamaktadır. Çalışmada kullanılan flanş bağlantısının bütün model analiz süresi saatler, dilim model analiz süresi dakikalar ile ölçülürken yapay sinir ağı sonucu saliseler içerisinde vermektedir. Bu çalışma kapsamında çıktı olarak flanş gerilmelerinin üzerinde durulmakta ve yapay sinir ağından elde edilen gerilmelerin sonlu eleman analizlerinden elde edilen gerilmelerle uyumlu olduğu görülmektedir. İleride civata yükünün de YSA çıktısı olarak flanş gerilimine eklenmesi ve YSA'nın daha da geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Sonuç olarak, kullanımı sadece cıvatalı flanş bağlantılarıyla da sınırlı olmayan yapay sinir ağı yönteminin bu çalışma sırasında son derece etkili olduğunu kanıtlanmış ve endüstride geçerli bir analiz ve tasarım aracı olarak kullanılabileceği gösterilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, “055.STZ.2013-1” kodlu, “Flanş İleri Analiz Arayüzü ve Tasarım Programı Oluşturulması” adlı SANTEZ projesi tarafından desteklenmektedir. Çalışmaya katkılarından dolayı TEİ'ye teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Akay, A. A., Gülaşık, H., Yıldırım, A., Çöker, D., Kayran, A. & Gürses, E., 2015. *Modelling of a circular double flange joint including contact and friction effects*. 8. Ankara Uluslararası Havacılık ve Uzay Konferansı, Ankara, Türkiye.
- Coro, A., 2004. ITP, Flange-Designer: A New Flange Design Methodology Based on Finite Element Analysis.
- Gomes, H. M., & Awruch, A. M. (2004). Comparison of response surface and neural network with other methods for structural reliability analysis. *Structural safety*, 26(1), 49-67.
- Gosavi, A., 2003. *Simulation Based Optimization*., 57-92.
- Kumar, N., Brahmanandam, P. & Papa Rao, B., 2011. 3-D Finite Element Analysis of Bolted Flange Joint of Pressure Vessel. *MIT International Journal of Mechanical Engineering*, 1(1), 35-40.

- Muliana, A., Haj-Ali, R. M., Steward, R., & Saxena, A. (2002). Artificial neural network and finite element modeling of nanoindentation tests. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33(7), 1939-1947.
- Yıldırım, A., 2015. *Development of bolted flange design tool based on finite element analysis and artificial neural network*. Yayınlanmamış yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.