

## MACH SAYISININ YAPAY SINIR AĞLARI İLE HESAPLANMASI

İlke TÜRKMEN<sup>1</sup>  
Erciyes Üniversitesi, Kayseri

Seda ARIK<sup>2</sup>  
Erciyes Üniversitesi, Kayseri

### ÖZET

*Mach sayısı, hava aracı hızının ses hızına oranı olarak tanımlanır ve subsonik ve bazı süpersonik hava araçları için maksimum hızı göstermesi açısından hesaplanması oldukça önemli olan bir uçuş parametresidir. Uçaklarda Mach sayısı Hava Veri Bilgisayarı (Air Data Computer-ADC) kullanılarak hesaplanmaktadır. ADC hava aracı için oldukça önemli bir ekipmandır ve ADC'nin performansı doğrudan uçuşun verimliliğini ve güvenilirliğini etkilemektedir. ADC tarafından Mach sayısının hesaplanmasında kullanılan eşitlik teorik olarak kolayca elde edilebilir olsa da, ADC içinde bu eşitliği üretecek elektronik devrelerin tasarımı son derece karmaşıktır. Bu problemin üstesinden gelmek için bu bildiride Mach sayısı hesaplamak için Yapay Sinir Ağı (YSA)'na dayanan alternatif bir yöntem sunulmuştur. Önerilen bu metod ile Mach sayısı ADC tarafından kullanılan geleneksel doğrusal olmayan eşitlikler yerine daha basit bir yöntem ile hesaplanmaktadır. Geliştirilen modelde YSA'nın eğitimi için Boeing 737-400 uçağına ait Digital Flight Data Acquisition Unit (DFDAU)'ten alınan kayıtlardaki veriler kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları, geliştirilen YSA modelinin Mach sayısını hesaplanmasında kullanılan geleneksel yöntemle başarılı bir alternatif olduğunu açıkça göstermiştir. Önerilen metodun avantajları; basitliği ve elde edilen sonuçların yüksek doğrulukta olmasıdır.*

### GİRİŞ

ADC aviyonik sistemlerin önemli bir parçasıdır ve uçuş kontrol sistemi, navigasyon sistemi gibi pek çok sistem için ihtiyaç duyulan hava verilerini hesaplar. ADC'nin performansı, hava veri parametrelerinin doğru şekilde hesaplanarak güvenli bir uçuş ve doğru bir navigasyon bilgisi gerçekleşmesi ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle ADC'nin gelişimi ve ADC ile ilgili araştırmaların artması dünya çapında çok önemli bir konudur [Hongmei, 2001; Kayton ve Walter, 1997; Erb, 2005].

Hava veri sistemi hava aracını çevreleyen hava kütesinin fiziksel özelliklerini ölçmek için çeşitli algılayıcılar kullanır. Bu algılayıcılar vasıtasıyla doğrudan ölçülen bu parametreler: statik basınç, toplam basınç ve toplam veya statik sıcaklıktır. Bu temel ölçümler tek tek ve kombinasyon halinde kullanılarak hava hızı, irtifa, Mach sayısı gibi birçok uçuş parametresi hesaplanabilir. Güvenli bir uçuş için bu parametrelerin pilot tarafından bilinmesi son derece önemlidir. Bu parametrelerden birisi olan Mach sayısı subsonik ve bazı süpersonik hava araçları için maksimum hızı göstermektedir. Ayrıca, özellikle jetlerde, hava aracının işlemsel verimliliğini maksimize etmek için değerli bir ölçüm sağlar. Mach sayısı uçuşun ağırlıklı (genel) koşulları için hava aracı hızının ses hızına oranı olarak da tanımlanabilir. Mach sayısını hesaplaması için ADC tarafından kullanılan formül teorik olarak kolayca elde edilebilir olsa da, ADC içinde bu formülü üretecek elektronik devrelerin tasarımı son derece karmaşıktır. Mach sayısının hesaplanması için alternatif yöntemlerin geliştirilmesi bu problemin üstesinden gelebilmek için son derece önemlidir.

<sup>1</sup> Doç. Dr. İlke TÜRKMEN, Uçak Elektrik Elektronik Bölümü, E-posta: titi@erciyes.edu.tr

<sup>2</sup> Arş. Gör. Seda ARIK, Uçak Elektrik Elektronik Bölümü, E-posta: arikseda@erciyes.edu.tr

Literatürde, Mach sayısının dışında irtifa, hava hızı, hücum açısı gibi diğer hava verilerinin de ADC yerine alternatif yöntemlerle hesaplanmasına yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin, kaynak [McCool ve Haas, 1996]'da hava hızı farklı metotlar kullanılarak hesaplanmıştır. McCool ve Haas hava hızının analitik hesaplamasında sinir ağına dayanan bir yaklaşım sunmuşlardır. Bu yaklaşımda ilk olarak CH-46E ve HH-60J tipi helikopterlerin test uçuşları sırasında rotor RPM, döngüsel pozisyon gibi uçuş parametreleri elde edilmiştir. Daha sonra bu giriş parametreleri, hava hızını ve rüzgar yönünü bulmak için sinir ağına uygulanmıştır. [McCool ve Haas, 1996]'daki benzetim sonuçları, sinir ağı metodunun uygun doğruluk ile alternatif bir hava hızı hesaplama yöntemi olarak kullanılabilirliğini ve geleneksel düşük hava hızı ölçüm teknolojisi için basit ve ucuz bir alternatif olabileceğini göstermiştir. Başka bir sinir ağı metodu McCool ve arkadaşlarının [McCool ve Haas, 1996] çalışmasına dayanan, hava hızı ve sideslip açısını alternatif bir yöntem ile tahmin etmek için geliştirilmiş olan sürekli ve süreksiz durum manevraları kullanan [Goff, Thomas, Jones ve Massey, 2000]'deki metottur. [Goff, Thomas, Jones ve Massey, 2000]'de OH-6A helikopterinin hava hızı, FLIGHTLAB olarak adlandırılan helikopter simülatöründen elde edilen giriş verileri kullanılarak sinir ağı ile hesaplanmıştır. [Samlioglu, 2002]'de sunulan yaklaşım, mevcut düşük hava hızı ölçüm sistemlerine mekanik olarak basit bir alternatif sunmuş ve uçuş emniyetini artırmıştır. [McCool ve Haas, 2002]'de hava hızı hesaplamak için farklı giriş parametrelerinin kullanıldığı bir sinir ağı sunulmuştur [McCool ve Haas, 2002]. Kaynak [McCool ve Haas, 2002]'de sunulan sinir ağı ile hava hızının yanında hücum açısı ve sideslip değerleri de hesaplanmıştır. Kaynak [Elias, Nathan ve Wesley, 2011]'de yine hava hızının hesaplanması için alternatif bir yöntem sunulmuştur. Kaynak [Foster, 1971]'de ise Mach sayısının hesaplanması için doğrusal bir hesaplama yöntemi geliştirilmiştir. [McCool ve Haas, 1996; Goff, Thomas, Jones ve Massey, 2000; Samlioglu, 2002; McCool ve Haas, 2002; [Elias, Nathan ve Wesley, 2011; Foster, 1971]'de sunulan çalışmaların temel amacı, geleneksel hava veri hesaplama yöntemine alternatif olarak kullanılabilir hesaplama yöntemleri sunmaktır. Sunulan tüm bu alternatif yöntemler, özellikle ADC arızalarında alternatif hesaplama yöntemleri olarak kullanılabilir. Alternatif yöntemlerin bir başka amacı ise geleneksel yöntemlere göre daha basit hesaplama teknikleri sunmaktır.

Literatürdeki alternatif hesaplama yöntemlerine benzer amaçlar ile bu çalışmada, Mach sayısı geleneksel doğrusal olmayan karmaşık eşitlikler yerine basit bir sinir ağı modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Son 20 yıldır, YSA [Haykin, 1994] zor mühendislik problemlerinin çözümü için birçok araştırmacı tarafından yaygın şekilde kullanılmaktadır. YSA'lar farklı uygulamaları modellemek için çok sayıda basit işlem elemanlarından (ya da yapay nöronlardan) oluşmaktadır. İşlem elemanları beyindeki nöronlara benzer şekilde katmanlar halinde düzenlenmiş çok basit hesaplama elemanlarından oluşur. YSA öğrenme yeteneği ve uyumu, genelleştirilebilirlik, daha az bilgi ihtiyacı, hızlı gerçek-zamanlı çalışma ve kolay uygulama özelliklerine sahiptir. Burada sunulan metotta, Mach sayısını hesaplamak için hava veri algılayıcılarından elde edilen sıcaklık ve basınç ölçümleri sinir ağı modelinin girişleri olarak kullanılmıştır. Eğitim ve test veri setleri Boeing 737-400 uçağına ait Digital Flight Data Acquisition Unit (DFDAU)'ten elde edilmiştir.

Aşağıdaki bölümlerde sırasıyla geleneksel Mach sayısı hesaplama yöntemi ve önerilen yöntem kısaca anlatılacak ve simülasyon sonuçları sunulacaktır.

## GELENEKSEL MACH SAYISI HESAPLAMA YÖNTEMİ

Hava veri sistemi, hava hızı, irtifa, Mach sayısı ve hücum açısı gibi temel hava veri parametrelerini hesaplar. Hava veri sistemleri pitot-statik sistemden elde edilen toplam ve statik basınç girişlerini kullanır. Tipik bir pitot tüpü, hava akımı içindeki tüpün açık uçlu kısmından toplam basıncı ( $P_T$ ) alır. Statik basınç ( $P_S$ ) ya pitot tüpü üzerindeki statik basınç portları ya da hava akımına dik yerleştirilen hava aracı gövdesi üzerindeki deliklerden elde edilebilir. Toplam ve statik basınç ölçümleri ADC ile donatılmış bir hava aracında hava hızı, irtifa, Mach sayısı ve hücum açısı gibi temel hava veri parametrelerine dönüştürülebilir.

Mach sayısı subsonik ve bazı süpersonik hava araçları için maksimum hızı göstermesi açısından son derece önemli bir parametredir. Ayrıca, özellikle jetlerde, hava aracının işlemsel verimliliğini maksimize etmek için değerli bir ölçüm sağlar. Mach sayısı, uçuş sırasında hava aracını

çevreleyen havadaki gerçek hava hızının ses hızına oranını gösteren bir sayıdır ve aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$Mach = M = \frac{TAS}{a} \quad (1)$$

Burada TAS gerçek hava hızı,  $a$  ise ses hızıdır. Bununla birlikte hava veri uygulamaları için, daha hassas Mach değerleri gereklidir ve bu hassas değerler basınç ölçümleri kullanılarak hesaplanabilir. Bu durumda Mach sayısı ses altı [Kayton ve Walter, 1997] ve ses üstü akış [Erb, 2005] için sırasıyla şu şekilde ifade edilebilir:

$Mach < 1$  için

$$M = \sqrt{5 \left( \frac{P_T - P_S}{P_S} + 1 \right)^{\frac{2}{7}} - 1} \quad (2)$$

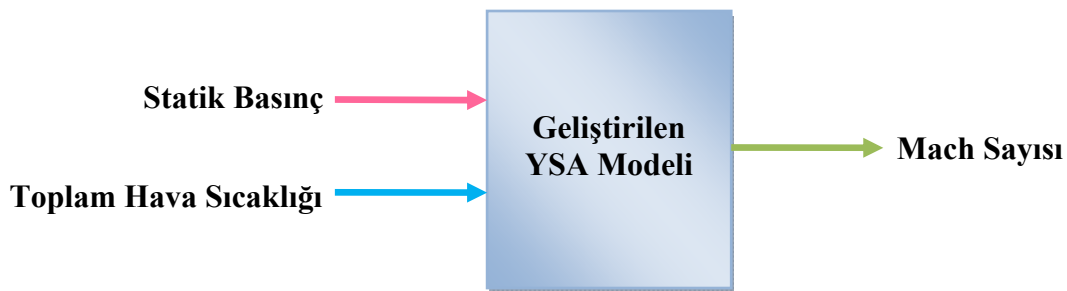
$Mach > 1$  için

$$M = 0.881284 \sqrt{\left( \frac{P_T - P_S}{P_S} + 1 \right) \left( 1 - \frac{1}{7M^2} \right)^{\frac{5}{2}}} \quad (3)$$

Bu çalışmada Boeing-737-400 tipi uçaklar için Mach sayısı Eşitlik (2) yerine önerilen sinir ağı modeli ile hesaplanmıştır.

### GELİŞTİRİLEN SİNİR AĞI MODELİ VE BENZETİM SONUÇLARI

Geliştirilen sinir ağı modelinde Mach sayısını hesaplamak için toplam hava sıcaklığı ve statik hava basıncı olmak üzere iki farklı giriş değişkeni kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan YSA modelinde çok katlı perseptron ağı yapısı seçilmiştir. Geliştirilen sinir ağının blok şeması Şekil 1'de sunulmuştur. Yapılan benzetim çalışmaları sonucunda en uygun ağı yapısının 4x9 işlemci elemanlı iki gizli katman kullanıldığı zaman elde edildiği görülmüştür. Bu katmanlarda aktivasyon fonksiyonu olarak tanjant sigmoid fonksiyonu kullanılmış; geliştirilen YSA modelinde öğrenme algoritması olarak hızlı olması ve başarılı sonuçlar vermesi nedeniyle Levenberg-Marquardt öğrenme algoritması [Hagan ve Menjah, 1994; Levenberg, 1944; Marquardt, 1963] tercih edilmiştir. YSA modelinde 1911 eğitim, 956 adet geçiş ve 956 adet test verisi olmak üzere toplam 3823 veri kümesi kullanılmıştır. Kullanılan bu veriler Boeing 737-400 uçağına ait Digital Flight Data Acquisition Unit (DFDAU)'ten elde edilmiştir.



Şekil 1: Mach Sayısının Hesaplanmasında Kullanılan YSA Modeli

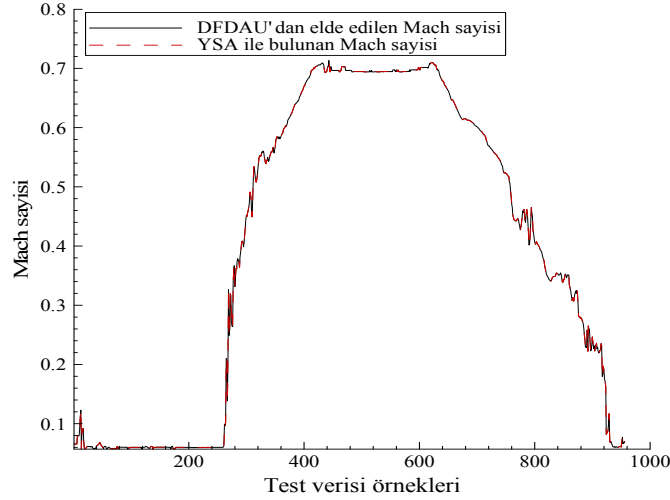
Şekil 2'de her bir test verisi için YSA'dan elde edilen Mach sayısı değerleri ile DFDAU'dan elde edilen Mach sayısı değerlerinin değişimi verilmiştir. Şekil 2'den açıkça görülebileceği gibi tüm test verileri için YSA ile bulunan Mach sayısı değerleri ADC tarafından Mach sayısını bulmak için kullanılan eşitlik ile hesaplanan ve DFDAU'a kaydedilmiş olan Mach sayısı değerlerine oldukça yakındır. Önerilen YSA'nın performansını değerlendirmek amacıyla tüm test verileri için karesel

ortalama hata (RMSE), regresyon katsayısı ( $R^2$ ) ve ortalama yüzde hata (MPE) değerleri hesaplanmıştır.

RMSE aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{di})^2} \quad (4)$$

Burada  $n$  kullanılan veri kümesi sayısı,  $y_i$  sinir ağından elde edilen tahmini değer,  $y_{di}$  ise gerçek değerdir.



Şekil 2: Tüm Test Verileri için DFDAU'dan Elde Edilen Mach Sayısı ve YSA ile Bulunan Mach Sayısı Değerleri

$R^2$  sinir ağı modeli için uygunluk derecesini gösterir.  $R^2$  değerinin 1'e yakın olması, öngörülen değerlerin gerçek değerlere çok yakın bir yaklaşımda olduğunu gösterir.  $R^2$ 'nin en genel tanımı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{di})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{di} - y_m)^2} \quad (5)$$

Burada  $y_m$  gerçek değerlerin ortalamasını ifade etmektedir.

Yüzde hata (PE) sinir ağı modelinin performansını bulmak için başka bir önemli performans göstergesidir ve şu şekilde tanımlanır:

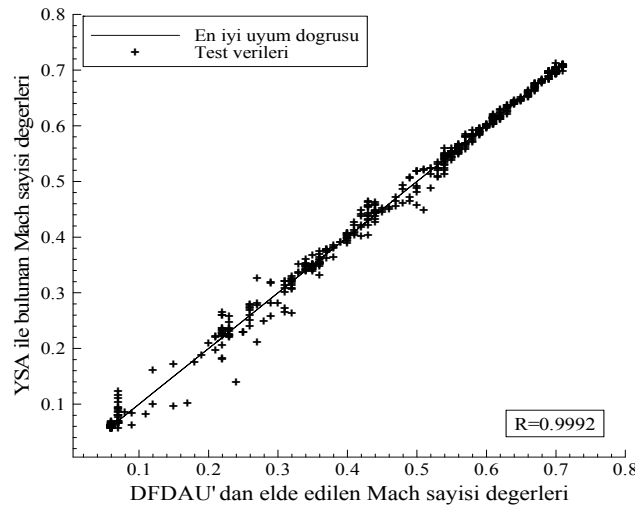
$$PE = \left\{ \sum_{i=1}^n \left( \frac{|y_i - y_{di}|}{y_{di}} \right) \right\} \times 100 \quad (6)$$

Eşitlik 4-6 yardımıyla elde edilen RMSE,  $R^2$  ve PE değerleri farklı ağ yapıları için Tablo 1'de verilmiştir. Sonuçlar farklı ağ yapıları için istenilen aralıklarda olsa da elde edilen en iyi ağ yapısının 4x9x1'lik ağ yapısı olduğu görülmektedir.

Tablo 1: Farklı Ağ Yapıları için RMSE, R<sup>2</sup> ve PE Değerleri

Ağ Yapısı	RMSE	R <sup>2</sup>	PE
3x5x1	0.0189	0.9974	1.5318
4x8x1	0.0142	0.9985	1.3482
4x9x1	0.0104	0.9992	1.0031
5x5x1	0.0174	0.9978	1.4333
5x10x1	0.0134	0.9987	1.2181
8x9x1	0.0111	0.9991	1.0470
8x8x1	0.0122	0.9989	1.1383
9x5x1	0.0129	0.9988	1.2119
9x9x1	0.0113	0.9991	0.9947
9x10x1	0.0142	0.9985	1.1225

DFDAU'dan elde edilen Mach sayısı değerlerinin YSA ile bulunan Mach sayısı değerlerine göre değişimi Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 3'te görüldüğü gibi YSA ile elde edilen değerler DFDAU'dan elde edilen veriler ile oldukça iyi bir uyumluluk göstermektedir. Regresyon katsayısının 1'e oldukça yakın olması, önerilen YSA modelinin Mach sayısı hesaplamada başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 3: DFDAU'dan Elde Edilen Mach Sayısı Değerlerine Karşı YSA'dan Elde Edilen Mach Sayısı Değerleri

### SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, Boeing 737-400 uçaklarına ait DFDAU'dan elde edilen statik basınç ve toplam hava sıcaklığı verileri kullanılarak Mach sayısını hesaplamak için YSA'ya dayalı bir model geliştirilmiştir. Yapılan analizlerden de açıkça görülebileceği gibi YSA kullanılarak hesaplanan sonuçlar ADC tarafından geleneksel eşitlikler ile hesaplanan değerlerle oldukça iyi bir uyumluluk içindedir. Bu nedenle uçaklarda önemli bir parametre olan Mach sayısının hesaplanmasında, geliştirilen YSA modeli başarılı bir şekilde kullanılabilir. YSA modelinin en önemli üstünlüğü Mach sayısının elektronik olarak gerçekleştirilmesi zor olan doğrusal eşitliklere göre daha basit bir şekilde hesaplanması ve elde edilen sonuçların yüksek doğrulukta olmasıdır. Geliştirilen yöntem hesaplama kolaylığı sağlamanın yanında ADC arızalanması durumunda Mach sayısının hesaplanması için kullanılabilecek alternatif bir yöntemdir.

**Kaynaklar**

- Elias, F.R., Nathan, V.T. ve Wesley, P., 2011. *Alternate airspeed computation method when ADC fails*, US Patent 0184592 A1.
- Erb, R., 2005. *Pitot-statics and the standard atmosphere*, Edwards AFB, CA: USAF Test Pilot School Pitot-Statics Textbook.
- Foster, J.L., 1971. *Mach computation from altitude and calibrated airspeed*, US Patent 3, s.617, 721.
- Goff, D.A., Thomas, S.M., Jones, R.P., Massey, C.P., 2000. *A neural network approach to predicting airspeed in helicopters*, Neural Comput & Applic, Cilt. 9, s.73-82.
- Hagan, M.T., Menjah, M., 1994. *Training feedforward networks with the Marquardt algorithm*, IEEE Transactions on Neural Networks Cilt. 5(6), s.989-993.
- Haykin, S., 1994. *Neural networks: a comprehensive foundation*, New York: Macmillan College Publishing Company.
- Hongmei, L., 2001. *Air data computer and automatic test*, Master thesis of Northwestern Industrial University.
- Kayton, M., Walter R. F., 1997. *Avionics Navigation Systems, Second Edition*, New York: John Wiley & Sons, Incorporated.
- Levenberg, K., 1944. *A method for the solution of certain nonlinear problems in least squares*, Quart Appl Math Cilt. 2, s.164-168.
- Marquardt, D.W., 1963. *An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters*, J Soc Ind Appl Math Cilt. 11, s.431-441.
- McCool, K., Haas, D.J., 2002. *Neural network system for estimation of aircraft flight data*, US Patent 6,466,888 B1.
- McCool, K.M., Haas, D.J., 1996. *A NN based approach to helicopter low airspeed and sideslip angle estimation*, Proceedings of the AIAA Flight Simulation Technologies Conference.
- Samlioglu, O., 2002, *A neural network approach for helicopter airspeed prediction*, Storming Media.