

Beş Delikli Pitot-Statik Tüp Tasarımı ve Hava Araçları için Kullanımı

Bülent Ünsal¹, Ahmet Türk² ve Ahmet Hacıoğlu³
TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, Kocaeli

ÖZET

Bu çalışmada özellikle düşük hızlarda (örn. maksimum 0,3 Mach hıza kadar) kullanılan hava araçlarında kullanılabilecek bir beş delikli Pitot-Statik tüpün (PS) aerodinamik tasarımı ve açısı (hücum ve yana kayma) kalibrasyon yöntemi bilgileri anlatılmaktadır. Var olan kalibrasyon yöntemleri ile çok delikli problemlerin açısı doğruluğu genelde $\pm 0,2^\circ$ civarlarındadır. Bu çalışmada 0,1 ile 0,3 Mach aralığında HAD (hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizleri ile elde edilen basınç verileri kullanarak standart bir kalibrasyon yöntemine alternatif olarak geliştirilen yöntem ile $-0,05^\circ$ / $+0,1^\circ$ doğruluk elde edilmiştir.

GİRİŞ

Çok delikli Pitot tüpler rüzgar tüneli testleri gibi bir çok uygulamalarda hız vektörünün ölçümü için sıklıkla kullanılmaktadır. Hava araçlarında hız vektörünün ölçümü için Pitot tüpler sadece toplam ve statik basınç ölçümü için kullanılmakta ve hız vektörünün tayini için genellikle kanatçık (İng. vane) sensörleri kullanılmaktadır. Bunun başlıca sebebi, çok delikli Pitot geometrisinin buzlanma koşullarına uygun hale getirilmesindeki zorluklar ve deliklerin çevresel etkilerden dolayı daha kolay tıkanabilme ihtimalidir. Bu bildiride tasarlanan beş delikli bir Pitot-statik tüpün açısı kalibrasyon yöntemi, HAD çözümlemelerinden elde edilen verilere dayanarak, verilecektir. Ayrıca hava araçları için muhtemel kullanım uygulamaları tartışılacaktır.

5-delikli problemler iki farklı yöntemle kullanılır. Bunlardan ilki nulling metodudur. Bu yöntemde prob rüzgar tüneline yerleştirilen bir travers sisteme bağlıdır. 5-delikli probun dış deliklerinde okunan basınç değerleri eşit oluncaya kadar prob travers sistem tarafından sürekli olarak çevrilir. Basınçların eşitlendiği durumda probun bulunduğu açısı değerleri akışa ait hücum ve yana kayma açısı değerlerini verir. Ancak bu yöntem hız vektörünün doğru hesaplanabilmesi için çok fazla hücum ve yana kayma açısı kombinasyonunun denenmesini gerektirdiğinden oldukça uzun sürebilmektedir [Morrison, Schobeiri ve Pappu, 1998].

Diğer yöntem ise non-nulling method olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemde prob nulling yöntemin aksine sabit olarak durmaktadır. Hava akışının probun deliklerinde neden olduğu basınç değerleri kullanılarak hız vektörü bulunabilir. Ancak probun non-nulling metot ile kullanılabilmesi için kullanım öncesinde kalibrasyonunun yapılması gereklidir. Kalibrasyon farklı hızlarda ve farklı akış açılarında (hücum ve yana kayma açıları) yapılan ölçümler ve bu ölçüm sonuçlarının değerlendirilip kullanım esnasında ölçülen basınç değerlerinden hız vektörü ölçümünü sağlayan uygun yöntemin belirlenmesini kapsamaktadır. Non-nulling metot ile ölçümler rüzgar tüneline bilinen bir hava akışı içerisinde probun farklı hücum ve yana kayma açılarındaki döndürülmesi ile yapılır. Ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesinde ise genellikle 5 delikten ölçülen basınç değerleri, toplam ve

¹ Ens. MÜD. Yrd., Mekanik Grubu, E-posta: bulent.unsal@tubitak.gov.tr

² Uzman Araştırmacı, Akışkanlar Laboratuvarları, E-posta: turk.ahmet@tubitak.gov.tr

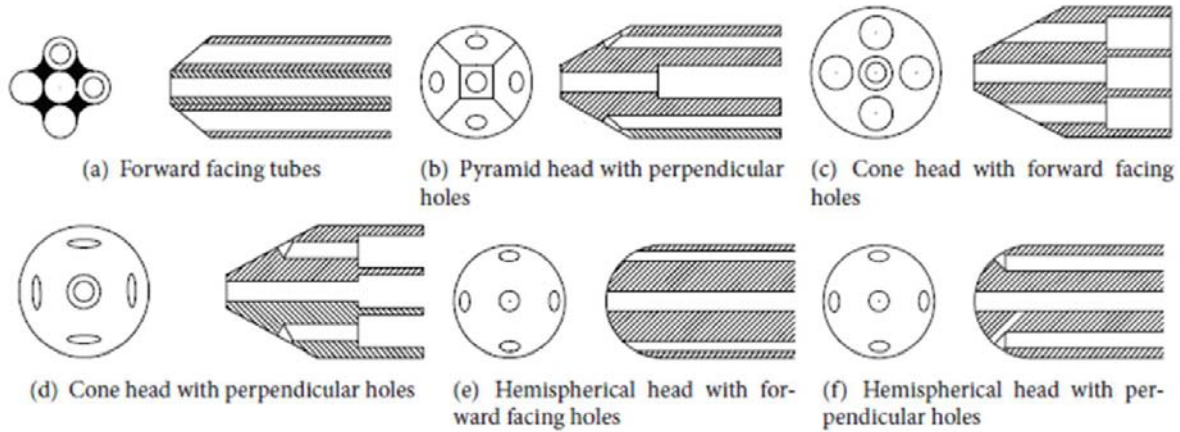
³ Stajyer öğrenci, Akışkanlar Laboratuvarları, E-posta: ahmethacioglu@gmail.com

statik basınç değerleri kullanılarak hesaplanan birimsiz katsayılardan yararlanılır. Yana kayma açısı, hücum açısı, toplam basınç ve statik basınç için ayrı ayrı katsayılar elde edilir. Bu katsayıların hızdan bağımsız ve sadece akış açısının bir fonksiyonu olması istenir. Bu amaçla genellikle katsayılar oluşturulurken hesaplanmak istenilen parametreye uygun deliklerdeki basınç farkları, merkez delikteki basınç değeri ile diğer deliklerdeki ortalama basınç değeri arasındaki farka bölünmesi ile normalize edilir. Belirli yana kayma ve hücum açıları için yapılan ölçümler, interpolasyon teknikleri kullanılarak tüm açı değerleri için elde edilir. Böylelikle akış esnasında 5-delikli probun her deliğinden elde edilen basınç değerlerinden hesaplanan katsayılar kullanılarak mevcut hava akışına ait hücum açısı, yana kayma açısı, toplam basınç ve statik basınç değerleri hesaplanabilir [Treaster ve Yocum, 1979].

Bildiride, tasarlanan 5-delikli prob HAD çözümlerinden elde edilen verilere dayanarak kalibre edilmiştir. Yapılan çalışma örneklendirilerek açıklanacaktır.

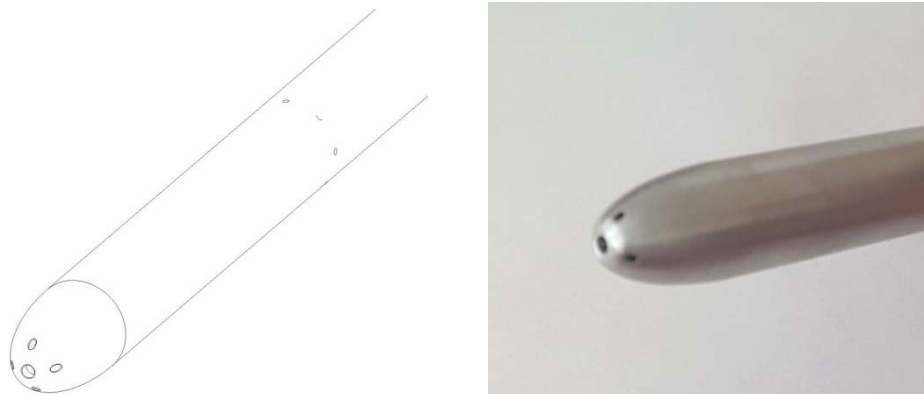
YÖNTEM

Şekil 1’de yaygın olarak kullanılan 5 delikli prob geometrilerinden bazıları gösterilmektedir. Burada gösterilen prob geometrilerin uygulamaya yönelik (örn. hız ve açı aralığı) bazı avantajları ve dezavantajları vardır ve literatürde [Namin, 2014] ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil 1: Yaygın olarak kullanılan beş delikli prob geometrileri.[Namin, 2014].

Prob geometrisi tasarımı noktasında en önemli ister; hedeflenen en düşük açıda ölçülebilecek düzeyde basınç farkının oluşabilmesi ve en büyük açı değerinin uygulanacak kalibrasyon yöntemi ile ölçülebilir olmasıdır. Bu çalışmada 0,1 ile 0,3 Mach aralığı için hedeflenen açı aralığı $\pm 20^\circ$ ve minimum ölçülebilir açı $0,1^\circ$ ’dir. Bu aralıkta gerekli basınç çözünürlüğünün sağlanabilmesi için tasarlanan prob Şekil 2’de gösterilmiştir. Tasarım ayrıntılarına gizlilik nedeni ile bu yayında yer verilmemiştir.

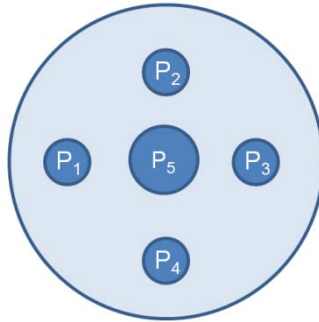


Şekil 2: Probun üç boyutlu görüntüleri.

Kalibrasyon yöntemi geliştirme ve doğrulama çalışmaları için $\pm 20^\circ$ hücum ve yana kayma açısı ve 0,1 ile 0,3 Mach aralığında yaklaşık 500 nokta için yapılan HAD çözümlemelerinden elde edilen veriler kullanılmıştır. HAD çözümlemeleri için FLUENTTM çözücüsü kullanılmıştır. Sıkıştırılabilir akış ve uygun sınır koşulları ile birlikte türbülanslı akış modellemesi yapılmıştır. Türbülans modeli olarak SST k-omega, transitional k-kl omega modelleri uygulanmış ve sonuçların değerlendirilmesiyle SST k-omega modelinde karar kılınmıştır. Her ne kadar burada verilen simülasyon sonuçlarının doğrudan deneysel sonuçlar ile doğrulaması yapılmamış olsa da, hem benzer yöntemlerin kullanıldığı çalışmada [Koç, Ünsal, Tabanlı ve Yüceil 2016] hem de gizlilik nedeni ile paylaşılabilen farklı geometrilere sahip problemlere ait test sonuçları, kullanılan HAD yöntemlerinin tatmin edici doğrulukta olduğunu göstermektedir.

UYGULAMALAR

Şekil 3'te basınç ölçüm noktalarından elde edilen verilerin kodlaması şema üzerinde gösterilmektedir. P_1 ve P_3 noktalarından geçen eksenin dikey eksen ile yaptığı açı yana kayma açısı (AoS) ve P_2 ve P_4 noktalarından geçen eksenin yatay eksen ile yaptığı açı hücum açısıdır (AoA). P_5 ölçülen toplam basınç, P_t referans toplam basınç, P_6 ölçülen statik basınç, P_s referans statik basınçtır. P_{ort} ise P_1 , P_2 , P_3 ve P_4 basınç verilerinin aritmetik ortalamasıdır.



Şekil 3: Basınç ölçüm noktalarının şema üzerinde gösterimi.

HAD çözümlemelerinden elde edilen verilerden AoA ve AoS açılarının hesaplanabileceği denklemler dizisi elde etmek için iki farklı yöntem kullanılmıştır. Birinci yöntemde basınç verileri aşağıdaki denklemler kullanılarak normalize edilir.

$$K_{AoS} = \frac{P_3 - P_1}{(P_t/P_s)} \quad (1)$$

$$K_{AoA} = \frac{P_4 - P_2}{(P_t/P_s)} \quad (2)$$

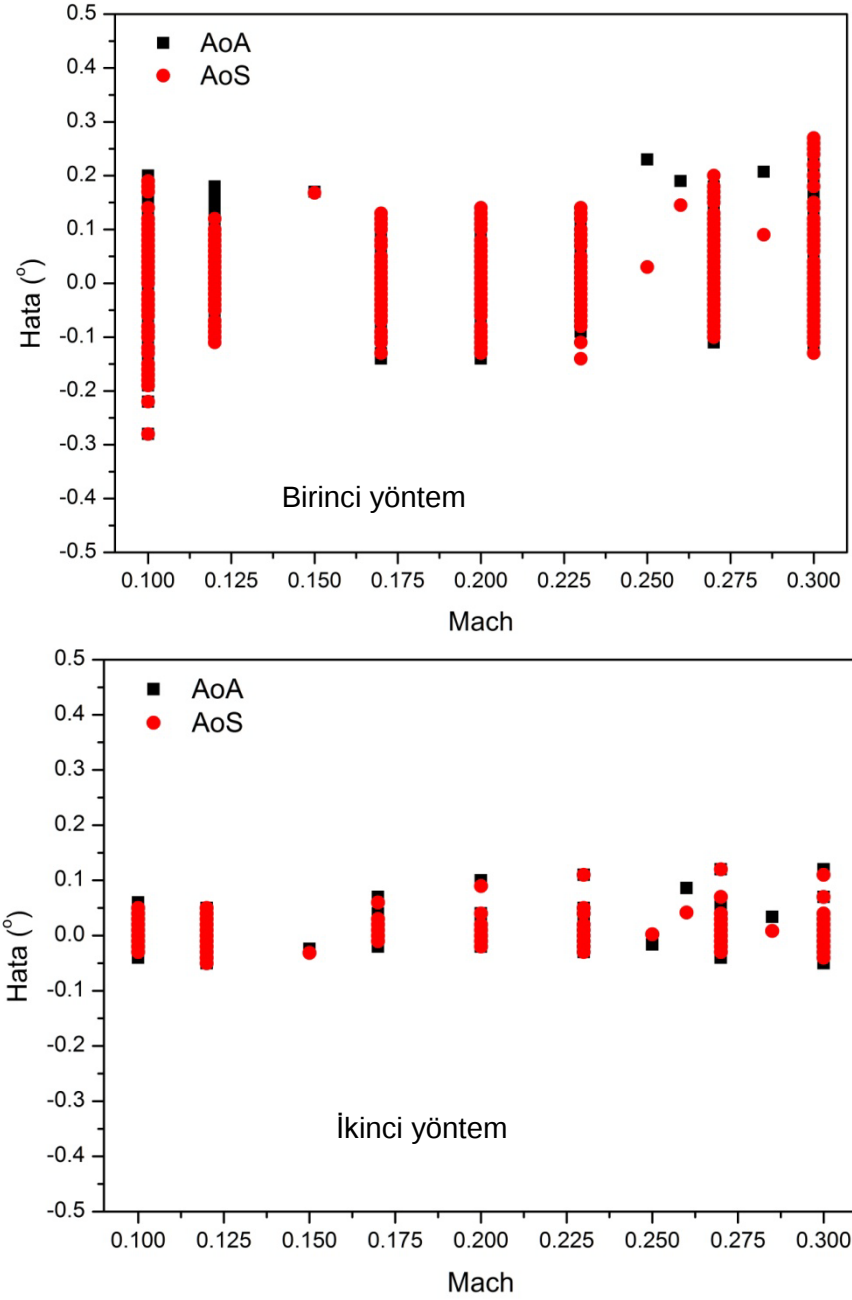
Basınç verilerinin yukarıdaki denklemlerde gösterildiği gibi boyutsuz hale getirilmesinden sonra AoA ve AoS için iki adet çok dereceli polinom fonksiyon elde edilir. Bu fonksiyonlar Mach, K_{AoA} ve K_{AoS} değişkenlerini içerir ve ölçülen basınç değerlerine karşılık açıların bulunması için iki fonksiyon iteratif olarak çözülür.

$$C_{AoA} = \frac{P_4 - P_2}{P_5 - P_{ort}} \quad (3)$$

$$C_{AoS} = \frac{P_3 - P_1}{P_5 - P_{ort}} \quad (4)$$

İkinci yöntem için yukarıda verilen denklemler kullanılarak basınç verileri normalize edilir. Birinci yöntemde göre boyutsuz katsayıların Mach (ya da Reynolds) sayısından bağımsız olması için

ölçülen toplam basınç ile dört delikten ölçülen basınçların aritmetik ortalamasının farkı kullanılmaktadır. Açı hesabı doğrudan kalibrasyon verilerinden elde edilen C katsayıları ile açılar arasındaki ilişkiden elde edilir.

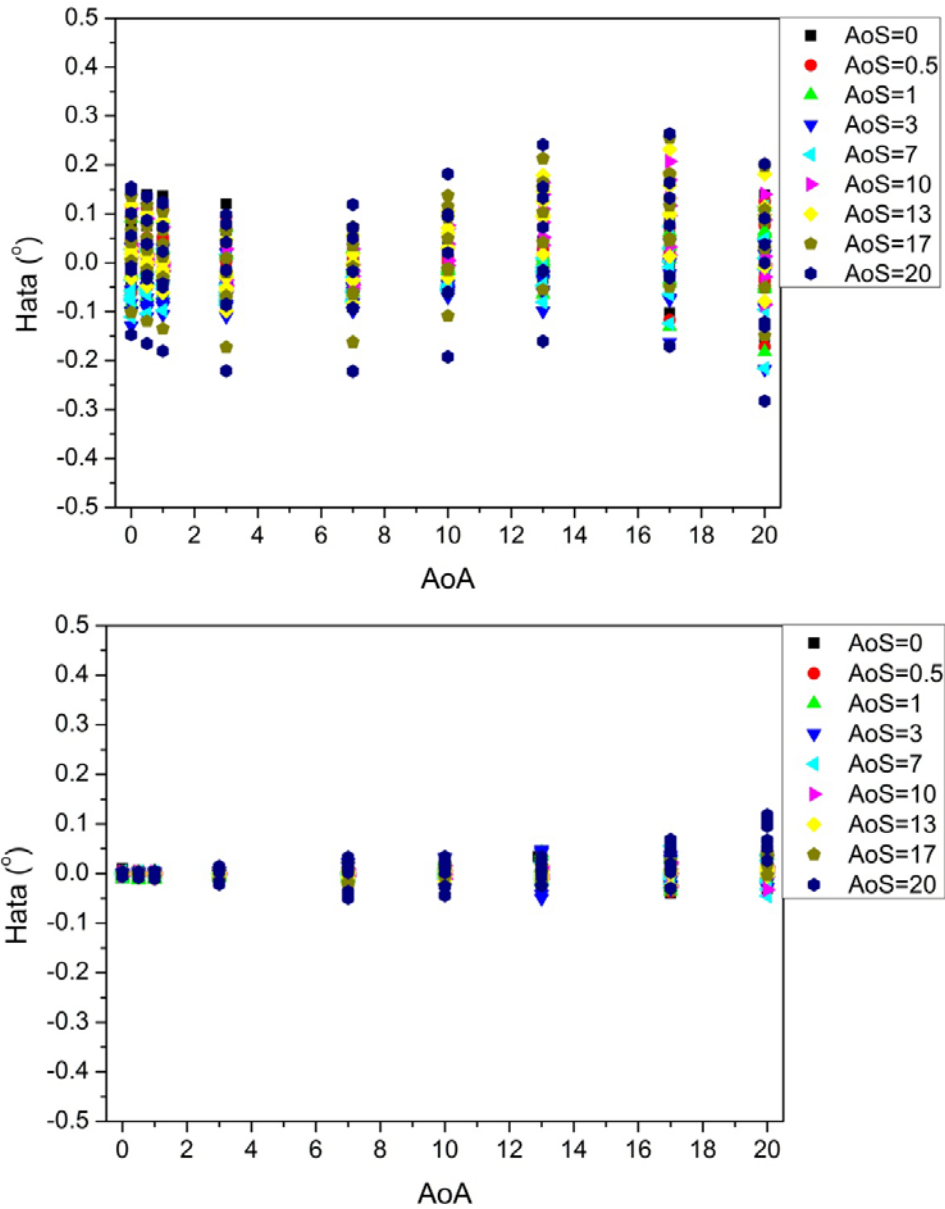


Şekil 4: Hataların hız ile değişimi.

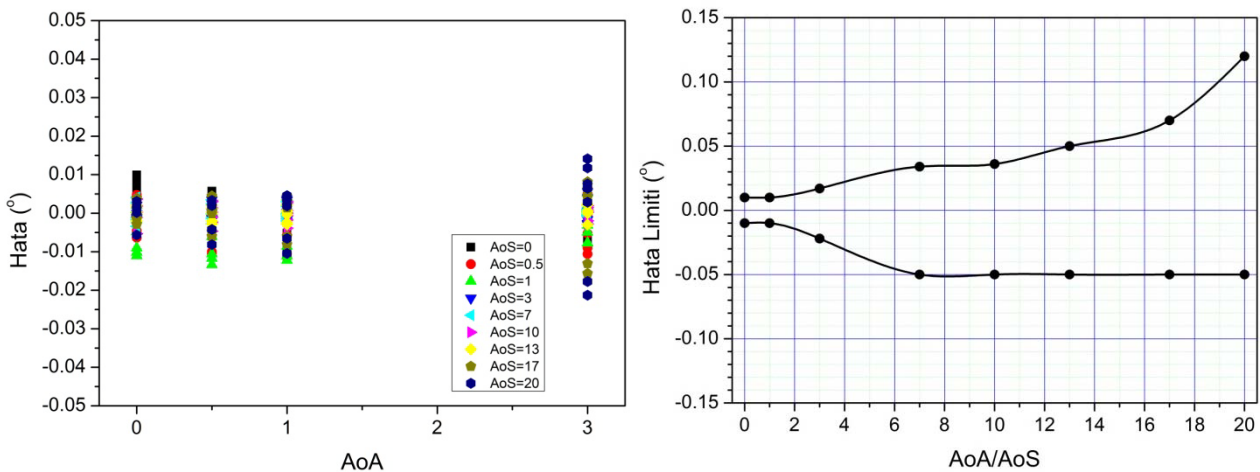
Şekil 4'de iki farklı yöntemlerden elde edilen açı hatalarının hız ile değişimi verilmiştir. Burada 0,1, 0,12, 0,17, 0,23, 0,27 ve 0,3 Mach hızları için verilen veriler kalibrasyon denklemleri için kullanılan çözümleme noktalarına ait ve kalibrasyon noktaları dışındaki dört hız değeri (0,15, 0,25, 0,26 ve 0,29 Mach) kalibrasyon yönteminin kontrolü için yapılan çözümlemelerden elde edilen sonuçlar için yapılan açı hesabına ait hata değerleridir. Şekil 4'de iki yöntemden elde edilen hata sonuçları karşılaştırıldığında; birinci yöntem için hata aralığı yaklaşık olarak $\pm 0,2^\circ$ iken ikinci yöntem için -0,05 ile +0,1° aralığında olduğu görülmektedir. Her iki yöntem için de belirgin bir hız bağımlılığı görülmemekte ve her bir hız için hata dağılımı eş genliktedir.

Hataların açı bağımlılığını tespit edebilmek için Şekil 5'te verildiği üzere hataların açı ile değişimi incelenmiştir. Bu şekilde hücum açısına göre hataların değişimi farklı yana kayma açıları için gösterilmektedir. Burada her iki yöntem karşılaştırıldığında; ikinci yöntem artan açı (hem AoA hem

de AoS) ile hatanın arttığını işaret etmektedir. Diğer taraftan birinci yöntem için açı hatası değişen açılara göre sabit kaldığı görülmektedir. Bu sonuca dayanarak, birinci yöntemde kullanılan polinom uydurmadan kaynaklı hataların önemli ölçüde büyük olduğu söylenebilir.

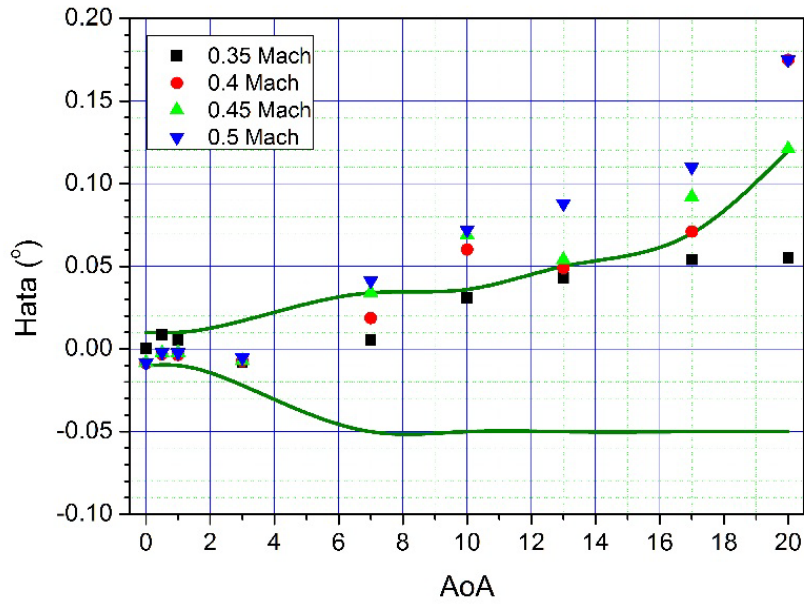


Şekil 5: Hataların açı ile değişimi.



Şekil 6: Sağda küçük açılar için hataların değişimi ve solda hata limitlerinin açı ile değişimi.

Şekil 5’de görüleceği üzere ikinci yöntem küçük açılarda oldukça düşük hata değerleri vermektedir. Bu durumu daha iyi göstermek için Şekil 6’da 3° ye kadar olan hataların değişimi ve ayrıca hata limitlerinin açı ile değişimi verilmiştir. 0 ile 1° arasında hata $0,01^\circ$ civarındadır ve bu doğruluk $0,05^\circ$ gibi çok küçük açılarda kabul edilebilir bir doğrulukla ölçülebilmesini mümkün kılar.



Şekil 7: Yüksek hızlarda (0,35-0,5 Mach), 0° yana kayma açısı ve farklı hücum açıları için elde edilen hata değerleri.

İkinci yöntem ile 0,1 ve 0,3 Mach aralığı için yapılan kalibrasyon sonucunda elde edilen denklemlerin yüksek hızlar için ekstrapolasyonu durumundaki hataları görmek için 0,35, 0,40, 0,45 ve 0,50 Mach değerlerinde, 0° yana kayma açısı ve 0° , $0,5^\circ$, 1° , 3° , 7° , 10° , 13° , 17° ve 20° hücum açılarında HAD çözümlmeleri gerçekleştirilmiştir. Buradan elde edilen basınç değerleri için yapılan açı hesabı sonuçlarından elde edilen hata değerleri Şekil 7’de gösterilmiştir. Bu Şekil aynı zamanda 0,1 ve 0,3 Mach aralığı için oluşturulan kalibrasyon yönteminin hata limitlerini de göstermektedir. Yüksek hızlara ekstrapolasyon durumunda Şekil 7’den görüleceği üzere açı hataları hız ve açı ile artmaktadır. 3° ’den küçük açılar için hızdan bağımsız olarak hatalar limit içerisinde kalmakta. Büyük açılar için hız artışı ile hatalar limit dışına çıkmakta en büyük hata $0,2^\circ$ değerinden daha küçüktür.

SONUÇ

Bu çalışmada 5 delikli bir Pitot-Statik tüp (PS) tasarımı yapıldı ve bu prob için 0,1 ile 0,3 Mach arasında ± 20 hücum ve yana kayma açıları için HAD analizleri ile basınç verileri oluşturuldu. Bu verileri kullanarak iki farklı yöntem ile kalibrasyon denklemleri oluşturuldu. Bu yöntemlerden birincisi yaygın olarak kullanılan polinom uydurma ve lookup-table metotlarına benzerdir. İkinci yöntem ise Reynolds bağımlılığını az indiren katsayılar üzerinden yapılan bir doğrulama metoduna dayalıdır. Her iki yöntemden hesaplanan açı hataları hız ve açıya göre analiz edildi ve bu hata analizlerine dayanarak şu sonuçlar çıkarılabilir;

- Birinci yöntem ile elde edilen hatalar hız ve açıdan bağımsız olarak $\pm 0,2^\circ$ aralığındadır ve bu hata değeri çoğu ticari problemler için geçerlidir.
- İkinci yöntemden elde edilen hatalar açıya bağımlı olarak değişmektedir. 0 ile 3° arasında hata değeri $\pm 0,01^\circ$ gibi çok küçük kalmaktadır. Artan açı ile artan hata değerleri 20° için $-0,05$ ile $+0,1^\circ$ arasında kalmaktadır.
- İkinci yöntemin en önemli özelliği hız bağımlılığının az olması ve uygulanan doğrulama yöntemi ile hataların, yaygın yöntemlere göre, daha düşük değerlere indirilebilmesidir. Bu özelliği sayesinde kalibrasyon hız aralığı dışındaki hız değerlerine ekstrapolasyon yapmak mümkündür.

- İkinci yöntem için elde edilen denklemlerin yüksek hızlara (0,35 ile 0,5 Mach arası) ekstrapolasyonu durumunda; küçük açılar ($<3^\circ$) için hata değeri $\pm 0,01^\circ$ aralığında kalmaktadır. Büyük açılar ($>3^\circ$) için hız ve açı artışı ile hatalar artmakta ve en büyük hata $0,2^\circ$ değerinden daha küçüktür.

Bu çalışmada performans sonuçları verilen kalibrasyon yöntemi ile çok delikli problemlerin açı hatalarını önemli derecede düşürmek mümkündür. Özellikle, bazı uygulamalarda, küçük açılarının yüksek doğrulukta ölçümü, burada sunulan yöntem sayesinde, söz konusudur.

Kaynaklar

- Koç, E., Ünsal, B., Tabanlı, H., ve Yüceil, B., K., *Transonik hız bölgesi için hız ve yükseklik ölçüm sistemi; Pitot-Statik prob tasarımı ve rüzgar tüneli testleri*, UHUK 2016, Kocaeli, 28-30 Eylül
- Krause, L. N. ve Dudzinski, T. J., 1969. *Flow-direction Measurement with Fixed-Position Probes*, Proc. 15th Int. ISA Aerospace Instrumentation Symp. Las Vegas, s.217-223.
- Treaster, A. L ve Yocum, A. M., 1979. *The Calibration and Application of Five-Hole Probes*, ISA Transaction, Cilt.18, s.23-34.
- Morrison G.L., Schobeiri M.T. ve Pappu K.R., 1998. *Five-hole pressure probe analysis technique*, Flow Measurement and Instrumentation, Cilt.9, s.153-158.
- Namin S.K.A., 2014. *Evaluation of Low-cost Multihole Probes for Atmospheric Boundary Layer Investigation*, Oklahoma State University Stillwater.