

KÜRESEL BAŞLIKLİ BEŞ DELİKLİ PİTOT TÜPLERİN HAVA ARAÇLARI İÇİN KULLANIMI

Bülent Ünsal¹, Mehmet Ali Yeşildağ² ve Furkan Belli²
TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, Kocaeli

ÖZET

Çok delikli Pitot-tüpler, özellikle rüzgar tünellerinde olmak üzere, hız vektörünü ölçebildiklerinden dolayı, test amaçlı olarak, oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır ancak havacılıkta kullanımları oldukça kısıtlı ve bu tür problemleri kapsayan bir havacılık standardı henüz bulunmamaktadır. Bu çalışmada beş delikli Pitot tüplerinin AS8006 standardına benzer olarak havacılıkta kullanımı için gerekli olan tekrarlanabilir üretim konusu ele alınmaktadır. Çalışmanın temel amacı üretilen her bir probun eşdeğer olabilmesi için gerekli üretim toleranslarının ne olması gerektiği sorusuna HAD analizleri ile cevap aranmasıdır. Bunun için, literatürde bilgileri mevcut ticari bir prob geometrisi referans olarak alınmıştır ve olası tolerans senaryoları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürde var olan sonuçlara paralel olarak, tolerans farklılıklarının açılı ölçümlerinde önemli hatalara neden olduğunu göstermektedir.

GİRİŞ

Pitot tüp, temeli Bernoulli denklemine dayanan, oldukça eski bir hız ölçüm yöntemidir ve havacılıkta hava araçlarının hem hız hem de yüksekliğini ölçmek için kullanılan en yaygın ölçüm tekniğidir. Birinci yazarın diğer bir bildirisinde [Koç, Ünsal, Tabanlı ve Yüceil, 2016] Pitot tüpler ile ilgili bazı temel bilgiler bulunmaktadır.

Pitot tüpler sadece toplam ve statik basınç ölçümü için kullanılmakta ve hız vektörünün tayini için genellikle kanatçık (İng. vane) sensörleri kullanılmaktadır [Ünsal, Türk ve Hacıoğlu, 2020]. Çok delikli Pitot tüpler rüzgar tüneli testleri gibi uygulamalarda hız vektörünün ölçümü için sıklıkla kullanılmakta ve havacılık için kullanımları genelde küçük boyutlu insansız hava araçları ile sınırlı kalmaktadır. Çok delikli problemler ile ilgili oldukça kapsamlı literatür incelemeleri [Ramprasadh, Sankaralingam, 2019] ve [Telionis, Yang, 2009] tarafından rapor edilmiştir.

[Čenský, Hanzal, Draxler, Pačes, Vaško, 2010] farklı geometrilere sahip kobra, chisel ve küresel başlıklı 14 probu rüzgar tüneli ve uçuş testleri sonuçlarına göre değerlendirmiştir. Açılı değişimine göre doğrusal basınç farkı oluşturmasından dolayı küresel başlıklı problemlerin havacılık için daha uygun olduğu belirtilmiş ve ayrıca prob çapı, delik çapı ve diğer bazı özellikler açılarından problemler arasındaki sonuçları değerlendirmiştir.

¹ Başuzman Araştırmacı, E-posta: bulent.unsal@tubitak.gov.tr

² Bursiyer Öğrenci

AS8006 standardı [SAE International Aerospace Standard, 2015]. Pitot tüplerin havacılıkta kullanımı için gerekli isterleri belirlemektedir ve her bir prob tasarımının bu isterleri sağlaması gereklidir. Bu standarda göre kalifiye edilecek her bir Pitot tüp tasarımı kullanılacak olan hava aracı üzerinde kalibrasyon uçuşu sonucunda kalifikasyon işlemi sonlandırılmış olur. Ancak kalifikasyon sonrası üretilen her bir probun, kalifikasyon testleri için kullanılan bir referans prob ile 85 knot hızında yapılan rüzgâr tüneli toplam basınç ölçüm performansı için belirli hata limitlerini karşılaması gereklidir [SAE International Aerospace Standard, 2015]. Üretilen problemlerin referans proba göre hata limitlerini karşılayabilmesi için doğal olarak belirli üretim ve montaj toleransları çerçevesinde üretilmesi gerekmektedir. Pratikte günümüz üretim toleransları ve montaj teknikleri performans limitlerini karşılayabilecek şekilde tekrarlanabilir üretimin mümkün olduğunu göstermektedir. AS8006 standardı sadece Pitot ve Pitot-statik tüplerini kapsamaktadır. Bu çalışmada küresel başlıklı beş delikli bir Pitot tüpün AS8006 kapsamına girebilecek bir havacılık uygulaması için kullanılabilirliği sorgulanmaktadır.

Havacılık uygulamaları için, Pitot tüplerin sağlaması gereken, en önemli hususlar;

- Buzlanma koşullarına uygunluk.
- Basınç ölçüm performans limitlerinin sağlanması.
- Tekrarlanabilir üretim.

Çok delikli prob ölçüm tekniğindeki 2009 yılına kadar olan gelişmeleri değerlendiren [Telionis, Yang, 2009], üretimden kaynaklı problemler arası çok küçük farklılıkların ölçüm sonuçlarında, eş değer üretilen problemler arasında, önemli farklılıkların ortaya çıkacağını belirtmektedir.

[Almazov, Kiselev, Tysbina, 2017] çalışmasında, Harco firması tarafından üretilen bir probu referans alarak, 18 adet benzer probu incelemiş ve bu problemler arasında farklar;

- Prob yarıçapı (=küre yarıçapı) 12,4 mm, 12,5 mm ve 12,6 mm.
- Toplam basınç ölçüm deliği çapı 7,5 mm, 8 mm ve 8,5 mm.
- Açık deliklerinin küre merkezine göre açıları 44,5° ve 45° dir.

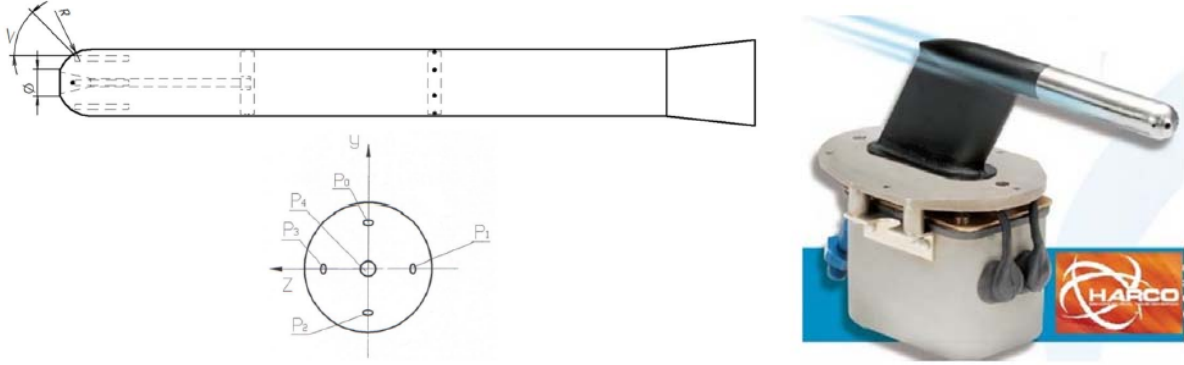
Yapılan HAD (hesaplamalı akışkanlar dinamiği) analizleri sonuçlarına göre küçük tolerans değişikliklerinin ölçüm sonuçlarına önemli ölçüde etki göstermesinden dolayı her bir probun kalibre edilmesi gerektiği sonucuna varmıştır. Ancak bu çalışmada hangi tolerans değişikliklerinin ölçüm sonuçlarına nasıl etki ettiği bilgisi verilmemiştir.

Tolerans farklılıklarını sınıflandırıldığı ve ölçüm sonuçlarına etkilerinin incelendiği bir çalışma literatürde bulunmamasında dolayı, bu çalışmada tekrarlanabilir üretim konusu ele alınmış ve HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yöntemi ile üretimden kaynaklı olası tolerans farklılıklarının toplam basınç ve açı (hücum ve yana kayma açıları) ölçümü sonuçlarına etkileri irdelenmiştir.

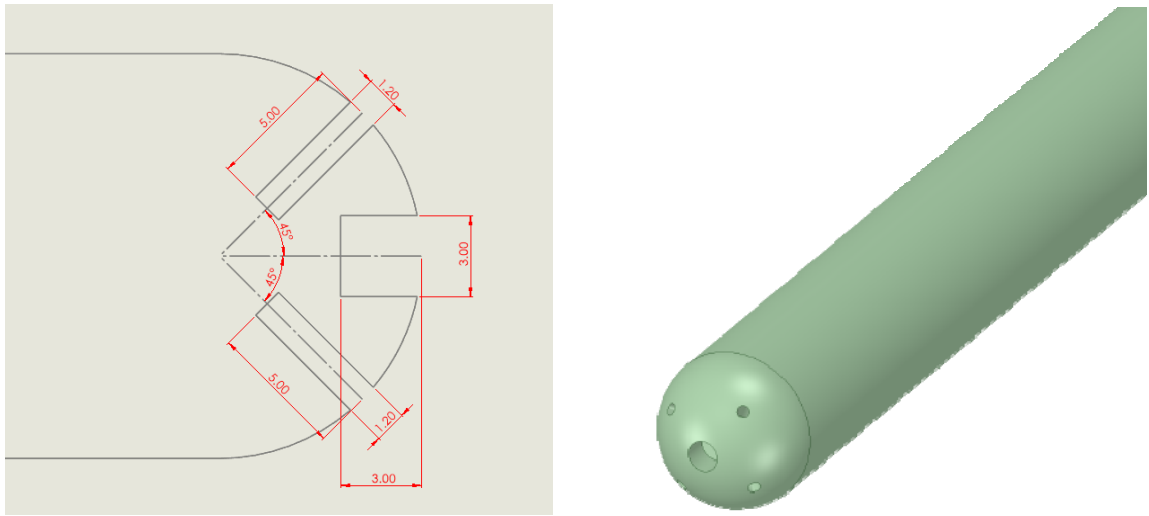
YÖNTEM

Şekil 1' de [Almazov, Kiselev, Tysbina, 2017] tarafından incelenen ticari bir beş delikli probun geometri bilgileri ve görünümü verilmiştir. Bu çalışmada Şekil 1' de verilen geometri referans

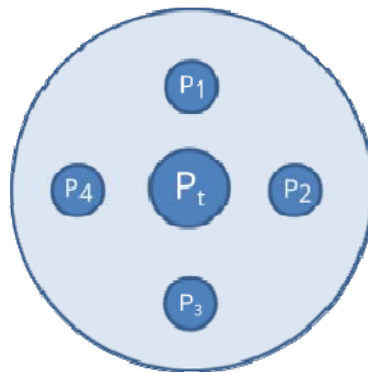
alınmıştır. Şekil 2' de 15 mm çaplı bir prob için geometri bilgisi ve üç boyutlu görünüm gösterilmektedir. Bu Şekilde görüleceği üzere dört adet açılı delikleri 1,2 mm çapında prob eksenine göre 45° açıda konumlandırılmış ve toplam basınç deliği 3 mm çapındadır. Deliklerin derinliği basınç ölçümü açısından çok fazla önemli olmamakta ancak en az bir çap derinliğinde olacak şekilde alınmıştır.



Şekil 1: 5 delikli küresel başlı ticari probun geometrisi ve görünümü [Almazov, Kiselev, Tysbina, 2017].



Şekil 2: Prob deliklerinin geometrisi (solda) ve üç boyutlu görünüm (sağda).



Şekil 3: Basınç ölçüm noktalarının şema üzerinde gösterimi.

Basınç ölçüm deliklerinin isimlendirilmesi Şekil 3' de verilmiştir. Bu Şekilde P_t toplam basınç, P_1 ile P_3 hücum açısı (AoA) ve P_2 ile P_4 yana kayma açısı (AoS) delikleridir.

Bu bildiri çerçevesinde yapılan çalışmalar sırası ile;

- İdeal prob geometrisi için çözüm açısı bağımsızlığının sağlanması.
- İdeal prob geometrisi için 0,1 ile 0,6 Mach hız aralığında ve $\pm 20^\circ$ açı aralığında HAD analizlerin gerçekleştirilmesi.
- Olası tolerans senaryoları için HAD analizlerin gerçekleştirilmesi.
- Elde edilen sonuçların ideal prob geometrisine göre karşılaştırılması.

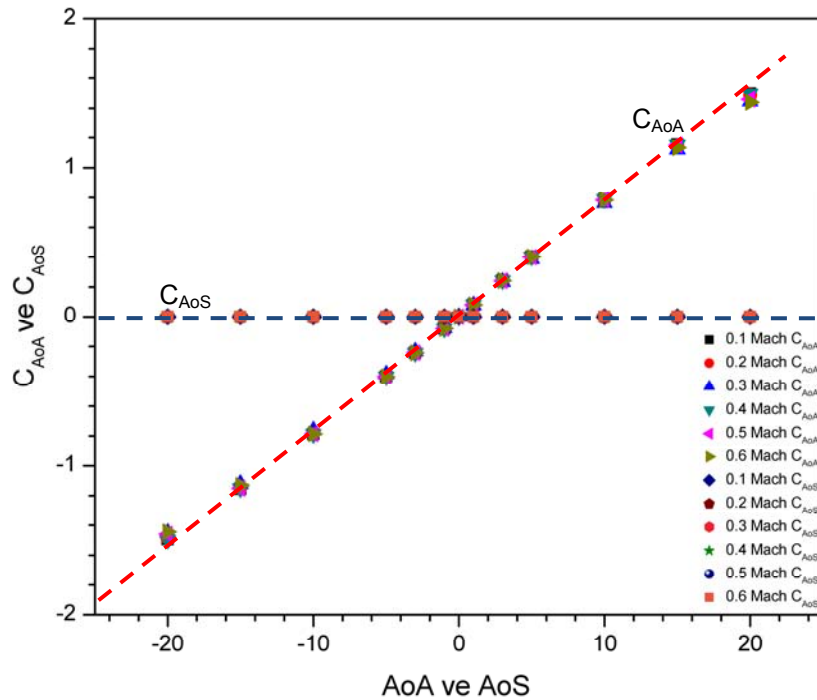
Toplam basınç ölçümünün tolerans değişime karşı duyarlılığının çok az olmasından ve ayrıca AoA ve AoS ekenlerinin simetrik olmasından dolayı, bildiri kapsamında yapılan çalışmalar sadece AoA ölçümlerini kapsamaktadır.

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Şekil 4' de 15 mm çaplı, ideal küresel başlıklı, beş delikli Pitot tüp için AoA ve AoS basınç farklarının AoA açısı ve hız ile değişimi verilmiştir. Literatürde, kalibrasyon amaçlı olarak, boyutsuz basınç katsayıları için farklı tanımlamalar mevcuttur (örn. [Ünsal, Türk ve Hacıoğlu 2020] ve [Namin,2014]). Bu çalışmada, aşağıda tanımlandığı üzere, referans dinamik basınç ($P_{dyn_{ref}}$) kullanılarak ölçüm değerleri normalize edilmiştir.

$$C_{AoA} = \frac{P_1 - P_3}{P_{dyn_{ref}}} \quad (1)$$

$$C_{AoS} = \frac{P_2 - P_4}{P_{dyn_{ref}}} \quad (2)$$



Şekil 4: İdeal prob geometrisi için hız ve AoA açısı ile C_{AoA} ve C_{AoS} değerlerinin değişimi.

Şekil 4' den görüleceği üzere C_{AoS} değerleri AoA ve hızdan bağımsız olarak, kesikli mavi çizgi ile gösterildiği üzere, yaklaşık sıfır değerinde sabit kalmakta. C_{AoA} değerleri AoA' ya göre, kesikli kırmızı çizgi ile gösterildiği üzere, $\pm 15^\circ$ aralığında lineer bir değişim göstermekte ve diğer taraftan hızdan bağımsız olduğu görülmektedir. 20° AoA değerleri gözle görülebilir mertebede lineer çizgi dışına çıkmaktadır.

0° AoA noktasında C_{AoA} değeri ($=0,0003$) sıfır olduğu için 20° ve -20° ' deki C_{AoA} değerleri 1,4312 ve -1,4293 olmakta ve yaklaşık olarak eşdeğer olduğu görülmektedir. Bu durumda bu prob geometrisinin hızdan bağımsız olarak birim AoA açısı için oluşturduğu basınç farkı C^* aşağıdaki formülden hesaplanabilir ve farklı prob geometrileri ile ideal prob geometrisi sonuçlarının karşılaştırılmasında kolaylık sağlayacaktır.

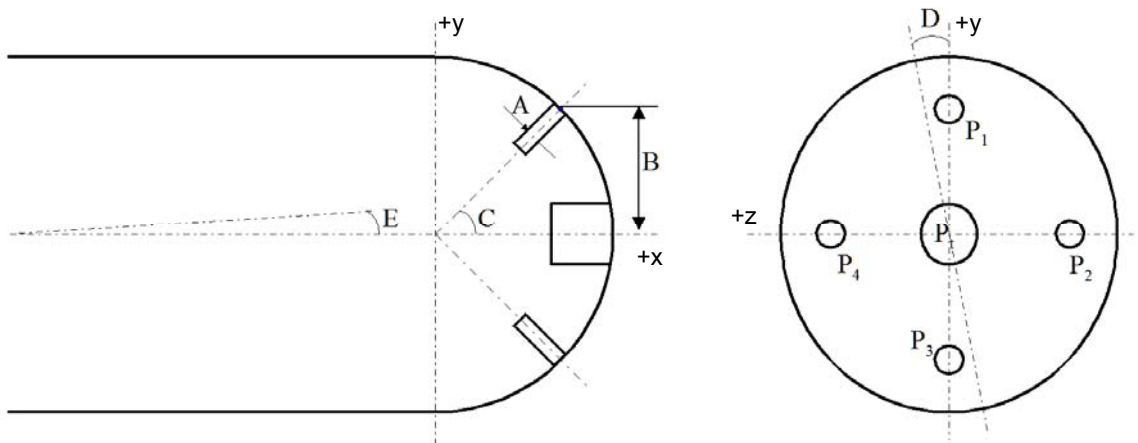
$$C^* = \frac{(C_{AoA})_{@20^\circ}}{20^\circ} = 0,0716 \quad (3)$$

Farklı tolerans senaryolarının referans durum ile karşılaştırılması için aşağıdaki denklem kullanılarak, tolerans farklılığından dolayı AoA açısı ölçümüne (AoA_{meas}) etkisi derece olarak ifade edilebilecektir.

$$\nabla AoA_{meas} = \left[\frac{(C_{AoA})}{C^*} \right]_{ref} - \frac{(C_{AoA})}{C^*} \quad (4)$$

Bildiri kapsamında ele alınacak tolerans senaryoları Şekil 5' de gösterildiği üzere;

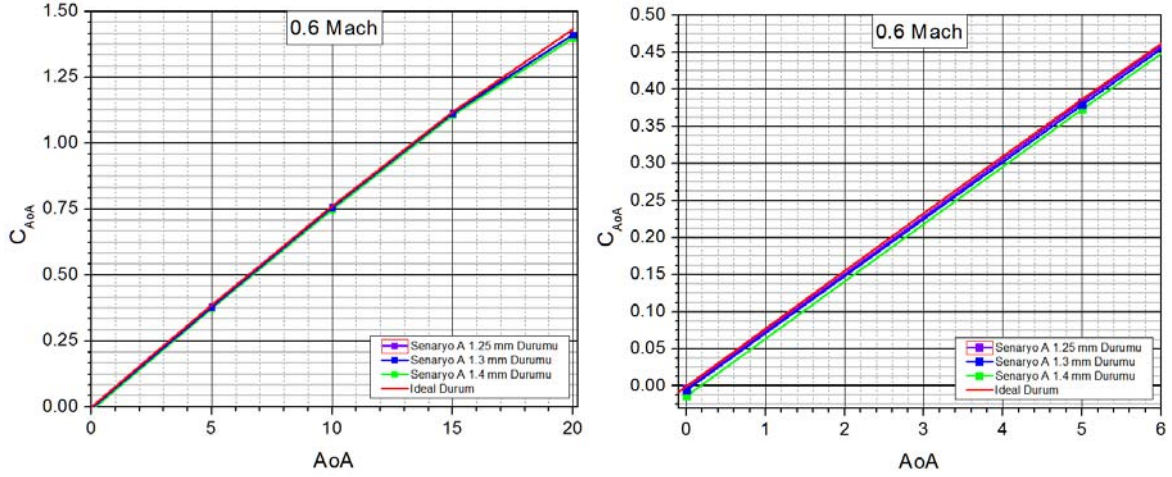
- A- Açık delikleri çapları.
- B- Açık deliklerinin konumları.
- C- Açık deliklerinin prob eksenine ile yaptığı açı (delinme açısı).
- D- Prob eksenine ile açık delikleri merkez noktalarının dik olmaması.
- E- Prob eksenine kayması.



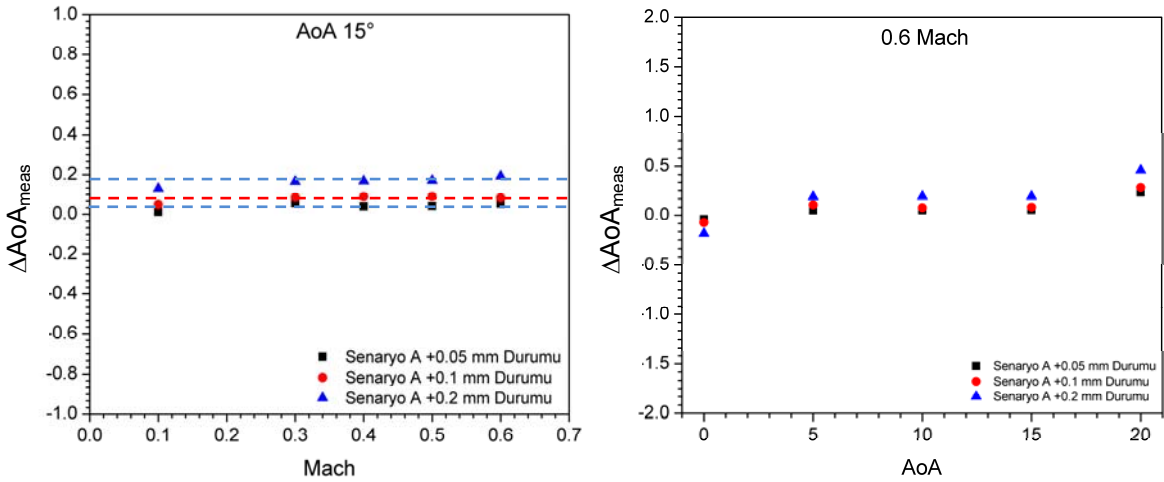
Şekil 5: Tolerans senaryolarının çizim üzerinde gösterimi.

A Senaryosu:

Açı deliklerinin çapının değişmesinin ölçülen basınçta yarattığı farkı gözlemlemek için 1 numaralı deliğin çapı 0,05 mm, 0,1 mm ve 0,2 mm büyütüldü. Elde edilen sonuçlar, Şekil 4'de gösterildiği üzere hıza bağımlılığı çok düşük olduğu için, Şekil 6'da sadece 0,6 Mach hızı için verilmiştir. Bu şekilde, sonuçlar simetrik olduğu için sadece pozitif AoA açıları için sonuçlar gösterilmektedir.



Şekil 6: Senaryo A için 0,6 Mach hızda C_{AoA} değerinin AoA ile değişimi (solda 0° ile 20° ve sağda 0° ile 6° aralıklarında).



Şekil 7: Senaryo A için 15° AoA açısında hıza göre (solda) ve 0,6 Mach için AoA açılarına göre değişimi.

Şekil 6' da verilen sonuçlar referans duruma göre sabit bir farkın olduğunu ve yine referans durumda olduğu gibi $\pm 15^\circ$ AoA aralığında sonuçların lineer olduğunu göstermektedir.

Şekil 7' de, 15° AoA durumunda hıza göre ve 0,6 Mach hızında farklı hücum açıları için ΔAoA_{meas} değişimi verilmiştir. Buradan görüleceği üzere, 0,1 Mach hızında ve dışında $\pm 15^\circ$ AoA durumu dışında ΔAoA_{meas} değerinin sabit olduğu söylenebilir. Elde edilen ortalama değerler;

Senaryo A 0,05 mm çap büyümesi durumu: $\Delta AoA_{meas} = 0,04^\circ$

Senaryo A 0,1 mm çap büyümesi durumu: $\Delta AoA_{meas} = 0,087^\circ$

Senaryo A 0,2 mm çap büyümesi durumu: $\Delta AoA_{meas} = 0,176^\circ$

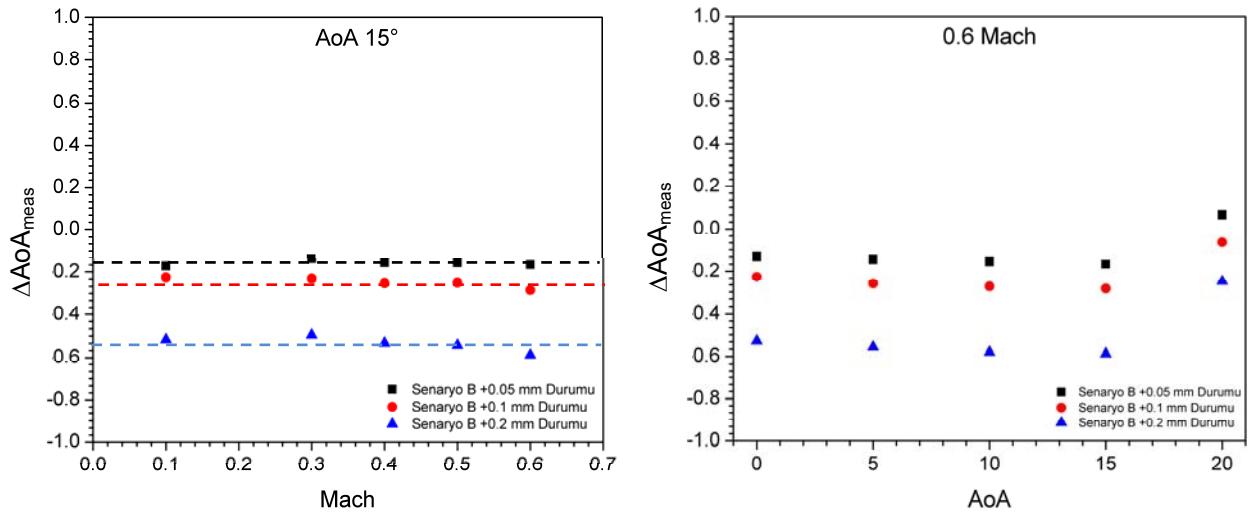
B Senaryosu:

Açı deliklerinin konumlarının dikey yönde ötelenmesinin ölçülen basınçta yarattığı farkı gözlemlenmek için 1 numaralı deliğin konumu 0,05 mm, 0,1 mm ve 0,2 mm dikey yönde (+y) değiştirildi. Elde edilen sonuçlarda hıza bağımlılık düşük olduğu için ve $\pm 15^\circ$ AoA aralığında sonuçlar lineer olduğundan dolayı Şekil 8’de sadece 0,6 Mach hızı için sonuçlar gösterilmiştir. Burada 15° AoA durumunda hıza göre ve 0,6 Mach hızında farklı hücum açıları için ΔAoA_{meas} değişimi verilmiştir. Şekil 8’de görülebileceği üzere ΔAoA_{meas} değerinin sabit olduğu söylenebilir. Elde edilen ortalama değerler;

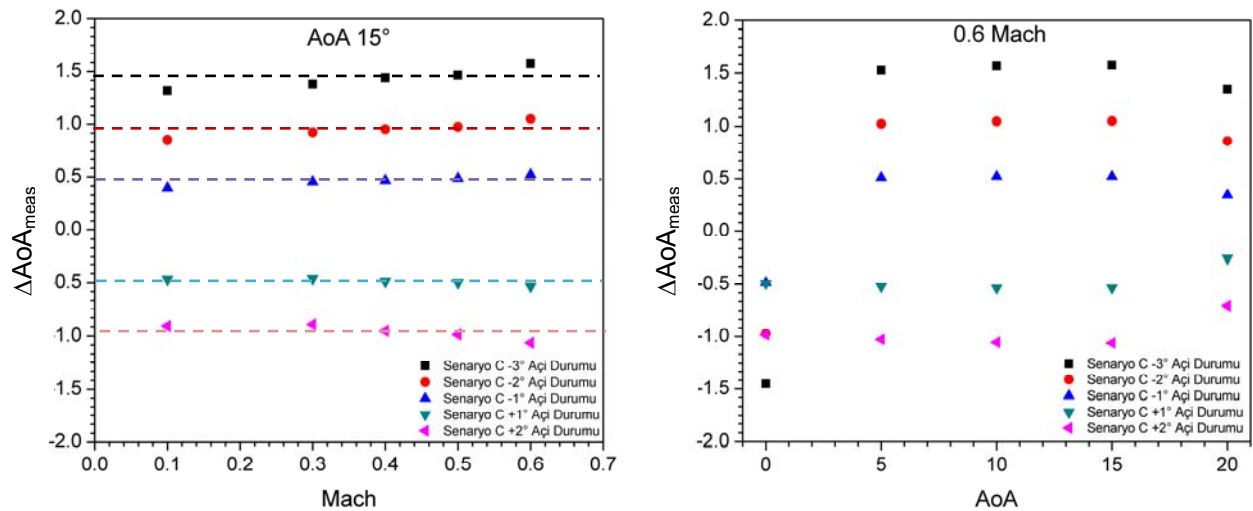
Senaryo B 0,05 mm dikey yönde ötelenme durumu: $\Delta AoA_{meas} = 0,15^\circ$

Senaryo B 0,1 mm dikey yönde ötelenme durumu: $\Delta AoA_{meas} = 0,22^\circ$

Senaryo B 0,2 mm dikey yönde ötelenme durumu: $\Delta AoA_{meas} = 0,57^\circ$



Şekil 8: Senaryo B için 15° AoA açısında hıza göre (solda) ve 0,6 Mach için AoA açılarına göre değişimi.



Şekil 9: Senaryo C için 15° AoA açısında hıza göre (solda) ve 0,6 Mach için AoA açılarına göre değişimi.

C Senaryosu:

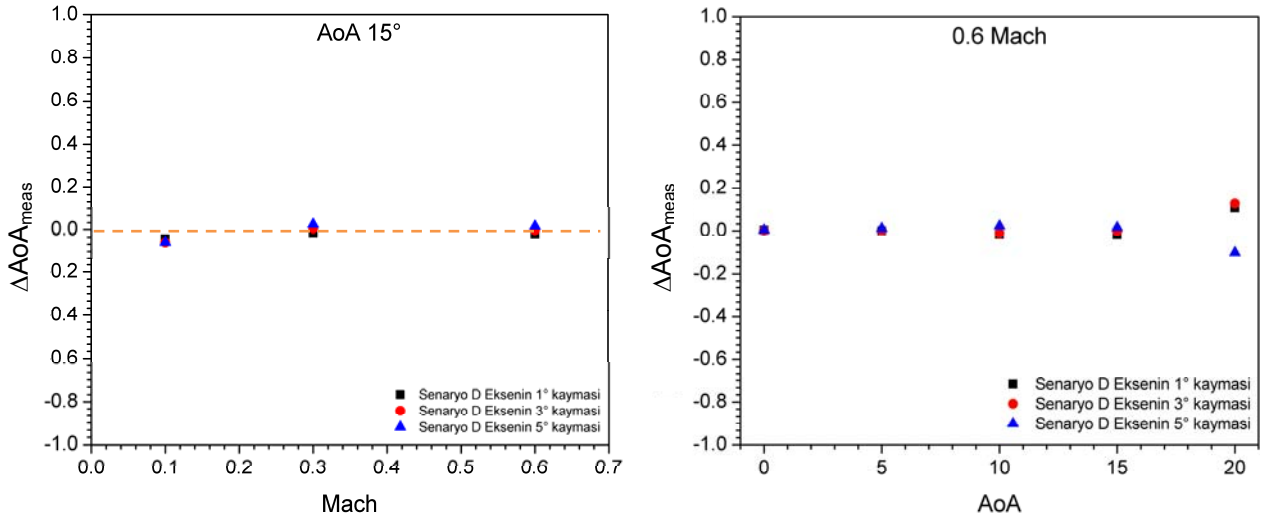
Açı deliklerinin prob eksenini ile yaptığı açının değişiminin ölçülen basınçta yarattığı farkı gözlemlemek için 1 numaralı deliğin prob eksenini ile yaptığı açı $-3^\circ, -2^\circ, -1^\circ, +1^\circ$ ve $+2^\circ$ olarak değiştirildi. Şekil 9'da 15° AoA açısı için ve 0,6 Mach hızı için sonuçlar verilmiştir. Buradan görülebileceği üzere ΔAoA_{meas} değerinin sabit olduğu söylenebilir. Elde edilen ortalama değerler;

Senaryo C $+2^\circ$ açı değişimi durumu:	$\Delta AoA_{meas} = 0,95^\circ$
Senaryo C $+1^\circ$ açı değişimi durumu:	$\Delta AoA_{meas} = 0,47^\circ$
Senaryo C -1° açı değişimi durumu:	$\Delta AoA_{meas} = 0,47^\circ$
Senaryo C -2° açı değişimi durumu:	$\Delta AoA_{meas} = 0,95^\circ$
Senaryo C -3° açı değişimi durumu:	$\Delta AoA_{meas} = 1,46^\circ$

D Senaryosu:

Açı deliklerinin merkez noktalarının prob eksenine dik olmamasından dolayı ölçülen basınçta oluşan farkı gözlemlemek için 1 numaralı deliğin merkez noktalarının prob eksenini ile yaptığı açı $1^\circ, 3^\circ$ ve 5° değiştirildi. Şekil 10'da 15° AoA açısı için ve 0,6 Mach hızı için sonuçlar verilmiştir. Şekilden görülebileceği üzere tüm durumlar için alınan sonuçların benzer ve sabit olduğu görülebilir. Elde edilen ortalama değerler;

Senaryo D 1° eksen kayması durumu:	$\Delta AoA_{meas} = 0,025^\circ$
Senaryo D 3° eksen kayması durumu:	$\Delta AoA_{meas} = 0,02^\circ$
Senaryo D 5° eksen kayması durumu:	$\Delta AoA_{meas} = 0,03^\circ$

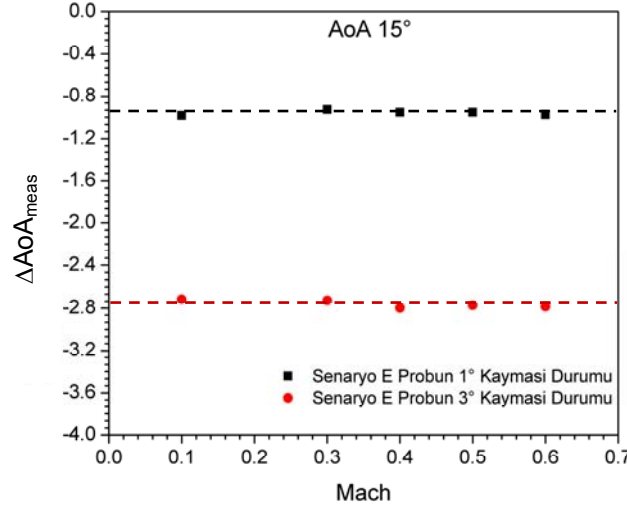


Şekil 10: Senaryo D için 15° AoA açısında hıza göre (solda) ve 0,6 Mach için AoA açılarına göre değişimi.

E Senaryosu:

Prob ekseninin yatay ekseninde kayması sonucunda basınçta oluşan değişimi gözlemlemek için prob eksenini yatay ekseninde 1° ve 3° kaydırıldı. Şekil 11'de AoA 15° durumu için hıza göre elde edilen sonuçlar görülmektedir. Şekilden de görülebileceği üzere, bu senaryoda 1° kayma için

referans duruma göre yaklaşık $0,95^\circ$ ve 3° kayma için $2,8^\circ$ fark tespit edilmektedir. Bu sonuçlar şimdiye kadar elde edilen en büyük tolerans farklarıdır. Her ne kadar $1''$ den daha düşük kaymalar için analizler yapılmamış olsa da, bir dereceden daha küçük kaymalar için, referans duruma göre farkın kayma değerine eşit olması beklenmektedir.



Şekil 11: Senaryo E için 15° AoA açısında hıza göre (solda) ve 0,6 Mach için AoA açılarına göre değişimi.

SONUÇ

Ticari bir beş delikli probun geometrisi [Almazov, Kiselev, Tysbina, 2017] referans alınarak beş farklı tolerans senaryoları için HAD çözümlenmeleri yapıldı. Çözümlenmelerden elde edilen verilerden, referans prob geometrisine göre, AoA ölçüm değişimi/hatası (ΔAoA_{meas}) değerleri hesaplandı. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara göre;

- Sonuçlar $\pm 15^\circ$ AoA aralığında hıza ve hücum açısına göre değişimin önemsiz derecelerde olduğu görülmüştür.
- Tolerans duyarlılığının en düşük olduğu durumlar Senaryo A ve Senaryo D olarak tespit edilmiştir.
- Senaryo E' nin en yüksek tolerans duyarlılığa sahip olduğu görülmüştür. Bu senaryoda, yaklaşık olarak, prob eksenin kayma açısı tolerans farkı açısı ölçümüne eş değer derecede açı hatası olarak yansımaktadır.
- Senaryo C, yani açı deliklerinin delinme açısı toleransı, diğer önemli bir durum olduğu görülmüştür. Bu senaryoda, yaklaşık olarak, bir derece delinme açısı tolerans değerine karşılık, yarım derece açı ölçüm hatası olmaktadır.
- Açı deliklerinin konum toleranslarının değerlendirildiği Senaryo B durumunda; 0,1 mm mertebesindeki bir konum hatasının, yine yaklaşık olarak, $0,24^\circ$ açı ölçüm hatasına neden olduğu tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre yukarıda verilen değerlendirmeler [Telionis, Yang, 2009] ve [Almazov, Kiselev, Tysbina, 2017] tarafından varılan ortak sonuç ile örtüşmekte ve üretimden kaynaklı problemler arası çok küçük tolerans farklılıkların ölçüm sonuçlarında önemli ölçüm hatalarına neden olmaktadır. Bu durumda beş delikli bir probun AS8006 kapsamına girebilecek bir havacılık uygulaması için kullanılabilirliğinin oldukça zor olduğu görülmektedir.

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
- Namin S.K.A., 2014. *Evaluation of Low-cost Multihole Probes for Atmospheric Boundary Layer Investigation*, Oklahoma State University, Stillwater, 2014
- SAE International Aerospace Standard, *Minimum Performance Standard for Pitot and Pitot-Static Tubes*, SAE AS8006, 2015
- Ünsal B., Türk A., Hacıoğlu A., Beş Delikli Pitot-Statik Tüp Tasarımı ve Hava Araçları için Kullanımı, UHUK 2020, Ankara, 9-11 Eylül
- Ramprasad, C., Sankaralingam, L., 2019, *A Comprehensive Survey on the Methods of Angle of Attack Measurement and Estimation in UAV's*, SASTRA Deemed University, India, 18 November
- Čenský, T., Hanzal, V., Draxler, K., Pačes, P., Vaško, O., 2010, *A Combined Angle of Attack and Angle of Sideslip Smart Probe with Twin Differential Sensor Modules and Doubled Output Signal*, SENSORS, 2010 IEEE,
- Telionis, D., Yang, Y., 2009, *Recent Developments in Multi-Hole Probe (MHP) Technology*, 20th International Congress of Mechanical Engineering, 15-20 November
- Almazov, V., Kiselev, S., Tysbina, M., 2017, *Estimation of Air Data Probe Characteristics*, 2017 2nd International Ural Conference on Measurements, Chelyabinsk, Russia, 16-19 October