



HÜCUM KENARI ŞEKLİNİN EKSENEL FAN PERFORMANSINA ETKİLERİ

Ayhan Nazmi İLİKAN* ve Erkan AYDER**

*İTÜ Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, 34437 Gümüşsuyu, İstanbul, ilikana@itu.edu.tr

** İTÜ Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, 34437 Gümüşsuyu, İstanbul, aydere@itu.edu.tr

(Geliş Tarihi: 19.09.2013, Kabul Tarihi: 07.02.2014)

Özet: Eksenel fan ve kompresör tasarımında, kanadı oluşturan profillerin fan göbeğinden uç kısmına doğru birleştirilme yöntemi, son yıllarda üzerinde çalışılan parametrelerden biridir. Profiller, ağırlık merkezlerinden geçen radyal bir doğru üzerinde dizilebildiği gibi, eksenel ya da başka yönlerde (vetere dik ya da veter yönünde gibi) profilleri kaydırarak da kanat şekli oluşturulabilmektedir. Bu şekilde, iki boyutlu düzlemde, profil üzerinde tasarım değişikliği yapmadan, üç boyutlu akış yapısı üzerinde değişiklik yapmak mümkündür. Bu çalışmada, bir fan rotoru üzerinde, profillerin göbekten uca birleştirilmesinde hücum kenarının aldığı şeklin fan performansı ve üç boyutlu akış yapısı üzerine etkileri ele alınmıştır. İlk olarak, profillerin ağırlık merkezleri radyal bir doğru üzerinde yer alacak şekilde referans bir fan tasarlanmış, bu fan maksimum verimi verecek şekilde, HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) araçları vasıtasıyla optimize edilmiş ve HAD yaklaşımlarının doğrulanması deneylerle desteklenmiştir. Daha sonra, referans fanın profilleri farklı hücum kenarı eğrileri oluşturacak şekilde kaydırılarak yeni fan geometrileri elde edilmiş ve bu fanların HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Fanların aerodinamik performansları ve akış yapıları detaylı bir şekilde incelenip karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, hücum kenarının içbükey ya da dışbükey şekilde olmasının fan performansı üzerinde olumlu bir etkisine rastlanmamış ancak kanat kökü ve kanat ucu gibi aerodinamik açıdan sorunlu bölgelerde fayda sağlanabilecek etkileri görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Eksenel fan, Hücum kenarı, HAD, İkincil akışlar, Üç boyutlu akış.

THE EFFECTS OF THE LEADING EDGE SHAPE ON FAN PERFORMANCE

Abstract: In recent years, the different methods of stacking of the blade profiles from hub to the tip are studied frequently for axial fans and compressors. The blade profiles can be stacked on a radial line where the centers of gravity of the profiles coincide or the blade shape can be obtained by shifting the profiles in axial direction or in other directions (parallel or perpendicular to the chord line of the profile). In this manner, it is possible to make a modification on the 3D flow structure without making any change on the angle of the profile on 2D plane. In this study, the effect of the leading edge shape (related to the stacking process) on the performance and on the 3D flow structure of an axial fan rotor is handled. First, a reference fan where the centers of the gravity of the profiles situate on the radial stacking line is designed. This fan is optimized by means of CFD tools to give the maximum efficiency. The results of the CFD calculations are validated by experiments. Subsequently, new fans are obtained by shifting the profiles in axial direction to give the desired leading edge shape. The performances and the flow structures of the new fans are investigated and compared by means of CFD calculations. The CFD results show that, neither convex nor concave leading edge has positive effects on the aerodynamic performance of the axial fan studied. However, some potential advantages of the new geometries are observed especially at the hub and the tip region of the fans which are aerodynamically the most problematic regions of an axial turbomachine.

Keywords: Axial-flow fan, Leading edge, CFD, Secondary flows, 3D flow, Stacking line.

SEMBOLLER

C_p	Basınç katsayısı
D	Fan dışçapı [m]
ΔP_t	Toplam basınç farkı [Pa]
ε	Türbülans yitim hızı [m^2/s^3]
η_t	Aerodinamik verim
Φ	Boyutsuz debi katsayısı
k	Türbülans kinetik enerjisi [m^2/s^2]
\bar{P}_t	Ortalama toplam basınç [Pa]
Ψ	Boyutsuz toplam basınç artış katsayısı
Q	Hacimsel debi [m^3/h]

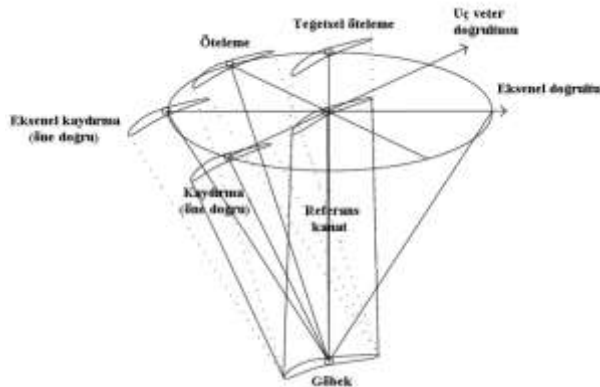
r	Radyal doğrultu
ρ	Akışkan yoğunluğu [kg/m^3]
Θ	Teğetsel doğrultu
U	Çevresel hız [m/s]
W_{mil}	Mil gücü [W]
ω	Özgül türbülans yitim hızı [1/s]
z	Eksenel doğrultu

Alt simgeler

k	Kanat üzerisi
Y	Yersel

GİRİŞ

Eksenel fanlar, havalandırma uygulamaları, elektronik cihazların ve motorların soğutulması, turbofan tipi uçak motorlarının giriş bölümü gibi birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Eksenel bir turbomakinanın geleneksel tasarımı sırasında, ilk yaklaşım olarak, genellikle, akım çizgisinin makinanın girişi ve çıkışı arasında aynı yarıçapta kaldığı varsayılır. Her bir yarıçapta, kanat profiline gelen akış iki boyutlu kabul edilir ve hesaplar her bir yarıçap için ayrı ayrı yapılır. Bu tip makinaların tasarımında sayılamayacak kadar parametre rol oynamaktadır (Örnek: kanat profili, kamburluk, veter uzunluğu, yerleştirme açısı vb.). Daha sonra, genellikle, elde edilen profillerin, ağırlık merkezleri radyal bir doğru üzerinde yer alacak şekilde birleştirilerek kanat şekli oluşturulur. Bu tip bir tasarım, ne iki ne de üç boyutlu olup, "sanki üç boyutlu" bir tasarımdır. Kanat profillerinin bu şekilde birleştirilmeleri yapısal açıdan avantaj sağlamaktadır. Ancak tasarımın yapıldığı iki boyutlu Θ -z düzleminde (Θ teğetsel ve z eksenel doğrultu olmak üzere) bir tasarım değişikliği yapmadan, kanat profillerinin bazılarının eksen yönünde ya da teğetsel yönde kaydırılmasıyla (Şekil 1), aerodinamik ya da gürültü açısından fan performansında değişiklikler elde etmek de mümkündür (Wright ve Simmons, 1990; Beiler ve Carolus, 1999; Vad vd., 2006). Örneğin, profillerin ağırlık merkezlerinin oluşturduğu doğrunun radyal doğrultu ile pozitif açı yaptığı (yüksek yarıçaptaki profillerin yukarı akım yönünde kaydırıldığı) ya da negatif açı (yüksek yarıçaptaki profillerin aşağı akım yönünde kaydırıldığı) çalışmalar sonucunda, bu tarz kanat şekillerinin kanat ucu girdabı, ikincil akışlar, profillerin yersel aerodinamik yükleri, kanadın stola girdığı debi (dolaylı olarak fanın çalışma aralığı), toplam basınç artışı ve fan gürültüsü üzerine etkileri olduğu görülmüştür (Smith ve Yeh, 1963; Sasaki ve Breugelmans, 1998; Beiler ve Carolus, 1999; Clemen ve Stark, 2003; Corsini ve Rispoli, 2004; Vad, 2008; Ramakrishna ve Govardhan, 2009). Bir turbomakina içerisindeki akışın gerçekte iki değil üç boyutlu olması nedeniyle, iki boyutlu düzlemde bir değişiklik yapılmamasına rağmen, yukarıda bahsedilen etkiler gözlemlenebilmektedir.



Şekil 1. Profillerin farklı diziliş biçimleri (Ramakrishna ve Govardhan, 2009).

Bu çalışmada, kanat profillerinin ağırlık merkezleri radyal bir doğru üzerinde yerleşmiş olan bir fan referans olarak kullanılmış ve tasarım debisinde HAD yaklaşımları gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, profilleri eksenel yönde kaydırarak farklı hücum kenar şekilleri oluşturulmuş ve bu hücum kenarı şekillerinin fan ile ilgili yukarıda bahsedilen parametrelere olan etkileri HAD yaklaşımları vasıtasıyla tasarım debisi için araştırılmıştır.

YÖNTEM

Hücum kenarının şeklinin fan performansına etkilerinin incelenmesi için ilk olarak Euler işi dağılımının fan göbeğinden ucuna kadar sabit olduğu (serbest girdap esaslarına göre tasarım), fan çıkışında toplam basınç dağılımının olabildiğince düzgün yayılı olmasını sağlayacak bir eksenel fan tasarımı yapılmıştır. Kanat profillerinin kalınlık dağılımı olarak NACA 6512 profili seçilmiştir. Fanın nihai hali ortaya çıkana kadar, HAD yaklaşımları vasıtasıyla, fan performansını düşüren sorunlu bölgeler belirlenmiş, (göbek ve uç bölgelerinde oluşabilecek akış ayrılmaları gibi) verim maksimum olacak şekilde fan optimize edilmiştir. Optimizasyon sırasında kanat profillerinin kalınlık dağılımları aynı kalırken giriş ve çıkış açıları ile kamburlukları değiştirilmemiştir. Tasarlanan fan, bu çalışmada "Referans fan" olarak adlandırılmıştır. Referans fanın HAD yaklaşımlarından elde edilen verimi, tasarım debisinde % 88 olarak hesaplanmıştır. Bu fanın özellikleri Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Referans fanın özellikleri.

Tasarım Debisi, m ³ /h	1800
Dönme Hızı, d/d	1000
Toplam Basınç Artışı, Pa	65
Dış çap, mm	350
Göbek-uç oranı	0.5
Kanat ucu boşluğu, mm	2.5
Kanat Sayısı	6

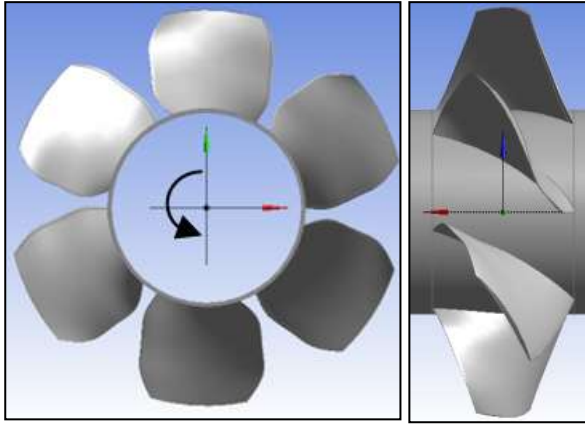
Tablo 1'deki toplam basınç artışı, Eş. (1) 'de ΔP_t ile gösterilmektedir. Bu değer, fan çıkışında ve fan girişinde kütle ağırlıklı ortalama alınarak hesaplanan toplam basınç değerlerinin farkıdır.

$$\Delta P_t = \bar{P}_{t_{rotor\ çıkışı}} - \bar{P}_{t_{rotor\ girişi}} \quad (1)$$

$$\eta_t = (Q \cdot \Delta P_t) / (W_{mil}) \quad (2)$$

Eşitlik (2) 'de gösterilen aerodinamik verim ise, aerodinamik gücün mil gücüne oranı olup Q hacimsel debiyi, W_{mil} ise mil gücünü sembolize etmektedir.

Referans fanın tasarımı sırasında, profiller ağırlık merkezlerinden geçen bir radyal doğru üzerine yerleştirilmiştir. Fanın son hali Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Referans fanın katı modeli.

Kanat profillerinin göbekten uca doğru birleştirilmesi ile ilgili yukarıda bahsedilen yöntem tek seçenek değildir. Profiller, yukarıda bahsedilen radyal doğru ile belli bir açı yapacak şekilde, veter çizgilerine paralel ya da dik yönde kaydırılıp, profillerin ağırlık merkezlerinden geçen doğru, bir eğri ya da eğik bir doğru halini alacak şekilde de kanat şekilleri oluşturulabilir. Bu çalışmada ise Referans fanın hücum kenarının şekli değiştirilerek, profiller bu yeni hücum kenarı şeklini oluşturacak şekilde birleştirilmiş ve oluşan yeni üç boyutlu akışın, tasarım debisinde, fan performansına etkileri araştırılmıştır. Çalışmada oluşturulan yeni kanatların veter, kamburluk ya da profilin giriş çıkış açıları gibi diğer bütün özellikleri ise sabit kalmıştır.



Şekil 3. Fanların r-z düzlemindeki (meridyenel düzlem) görünüşleri.

Şekil 3'te görüldüğü gibi, farklı hücum kenarlarına sahip üç yeni fan oluşturulmuştur. Bu fanların ikisinin göbek ve kanat ucu profilleri, Referans fan ile aynı yerde kalmış, ara profiller ise, r-z düzleminde, çeyrek çember şeklinde bir hücum kenarı görünecek şekilde tasarlanmıştır. Bu çeyrek çemberlerin biri içbükey, diğeri ise dışbükey şekillerdedir. Çalışmanın devamında, içbükey hücum kenarlı fan "İçbükey HK'li fan", dışbükey hücum kenarlı fan ise "Dışbükey HK'li fan" olarak adlandırılacaktır. Bu eğrileri elde edebilmek için, Referans fanın profilleri yalnızca aksel yönde kaydırılmıştır.



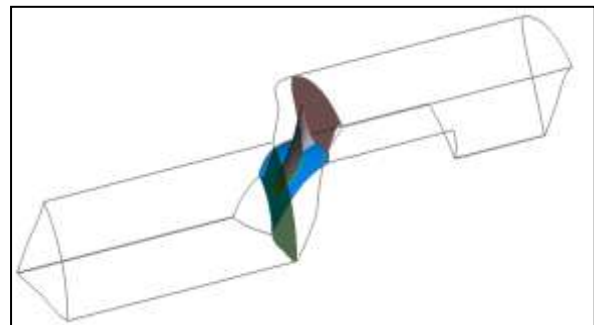
Şekil 4. Fanların perspektif görünüşleri.

Şekil 4'te ise, yeni profil pozisyonlarının kanadın üç boyutlu yapısını nasıl değiştirdiği görülmektedir. Yapılan değişiklik etkisiyle, Dışbükey HK'li fanın kanat ucu kısmı basma kenarına, İçbükey HK'li fanın kanat ucu kısmı ise emme kenarına doğru kavis almıştır.

Çalışmanın bundan sonraki bölümünün büyük çoğunluğu hesaplamalar ile yapılmıştır. Sayısal hesaplamaların doğruluğunun test edilebilmesi amacıyla Referans fanın prototipi üretilmiş ve performans deneyleri gerçekleştirilerek HAD yaklaşımlarının doğrulanması sağlanmıştır.

Sayısal Yöntem

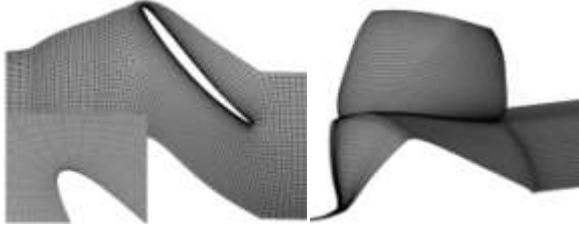
Çalışmada, hücum kenarı şekillerinin aerodinamik akış yapısı üzerine etkileri HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yöntemi ile incelenmiştir. Akış etrafındaki çözüm ağı için ANSYS Turbogrid, akışın modellenmesi ve sonuçların irdelenmesi için ise ANSYS CFX (ANSYS CFX-13.0, 2006) yazılımı kullanılmıştır. Hesaplamalar 3 boyutlu olarak, daimi koşullarda ve 25 °C sıcaklıktaki sıkıştırılmaz hava kabulü ile gerçekleştirilmiştir. RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) denklemleri, kullanılan paket program vasıtasıyla sonlu hacimler yöntemi kullanılarak ayrıklaştırılmış, konveksiyon denklemleri için ise ikinci derece doğrulukta hesaplamalar yapılmıştır. Akışın hesaplandığı hacim üç bölgeye ayrılarak modellenmiştir. Bunlardan ilki akışkanın fana yaklaştığı giriş hacmidir. Bu hacim sabit duracak şekilde modellenmiştir. Fanın da içinde bulunduğu ortadaki akış hacmine ise fan ekseninde dönme hızı sınır koşulu olarak verilmiştir. Çıkış hacmi ise giriş hacmine benzer şekilde sabit olacak şekilde modellenmiştir. Giriş ve çıkış hacimlerinin aksel uzunlukları, fan çapının 1,5 katı olacak şekilde seçilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Hesaplama bölgesi.

Bu şekilde, giriş hacminin önündeki ve çıkış hacminin sonundaki sınır koşulları homojen olacak şekilde tanımlanmış olsa bile, fanın tam önü ve tam arkasındaki üç boyutlu akış koşullarının gerçeğe uygun olacak şekilde hesaplanması sağlanmıştır. Döner ve sabit akış bölgeleri arasındaki ara yüzey "frozen rotor" (Daimi koşullarda çalışıyor iken fanın anlık fotoğrafı çekilmiş gibi) yaklaşımı ile modellenmiştir. Akışın dönme yönünde periyodik olduğu kabul edilmiş ve bu nedenle 6 kanadın tamamı etrafındaki akış yerine, yalnızca bir kanat etrafındaki akış modellenmiştir. Çözüm ağı

oluşturma sırasında ise çözümün kullanılan çözüm ağı noktası sayısından bağımsız olmasının kontrolünü sağlamak amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Önce üç farklı çözüm ağı yoğunluğu için çözüm elde edilmiştir. Çözüm ağı, önce 350000, daha sonra 600000 ve en son 850000 çözüm noktasından oluşacak şekilde oluşturulmuştur. 350000 çözüm noktalı ve 600000 çözüm noktalı çözüm arasındaki sonuçlarda fark görülürken 600000 ve 850000 çözüm noktalı çözümler arasında fark görülmediği için 600000 noktanın yeterli olduğu düşünülmüş ve bundan sonraki hesaplamaların hepsi bu çözüm ağı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Çözüm ağı.

Giriş bölümünde kütle debisi, çıkış bölümünde ise statik basınç sınır koşulu kullanılmıştır. Hesaplamalarda kalıntıların 10^{-5} değerinin altında kalması yakınsama kriteri olarak belirlenmiştir. Hesaplamalarda, yaklaşık 500 yinelemede yakınsama sağlanmıştır. Türbülanslı bir akışın doğru modellenmesinde en önemli unsurlardan biri olan türbülans modeli olarak k- ω SST seçilmiştir. Bu modelin fan, kompresör gibi basıncın akış yönünde arttığı akışlarda (dolayısıyla akışın yüzeyden ayrıldığı bölgenin doğru tahmininde) başarılı olduğu bilinmektedir. Model, yüzeye yakın bölgelerde k- ϵ , yüzeyden uzak bölgelerde ise k- ω türbülans modelini kullanmaktadır (ANSYS CFX-13.0, 2006). Bu çalışmada türbülans modeline ek olarak, laminardan türbülansa geçiş modeli de kullanılmıştır. Buradaki amaç, yine akışın yüzeyden ayrıldığı bölgenin en doğru şekilde hesaplanmasıdır. Model, var olan denklemlere, türbülans kesikliliği ve momentum kalınlığı ile tanımlanmış Re sayısı için birer transport denklemi eklemektedir. Bu model ile ilgili daha fazla ayrıntı (Menter, 1994)'de bulunabilir. Türbülans modellerinin doğru sonuçlar vermesini sağlayacak olan, yüzeye en yakın çözüm ağı noktasının yüzeye olan boyutsuz uzaklığını ifade eden y^+ değeri türbülans modellerinin kullanım koşullarına uygun şekilde beş değerinin altında hesaplanmıştır. Bunlara ek olarak, hesaplamaların doğrulanmasında kullanılan prototip fanın yüzey pürüzlülüğüne uygun olması amacıyla, hesaplamalarda fan yüzeylerine 0,3 mm pürüz yüksekliği verilmiştir.

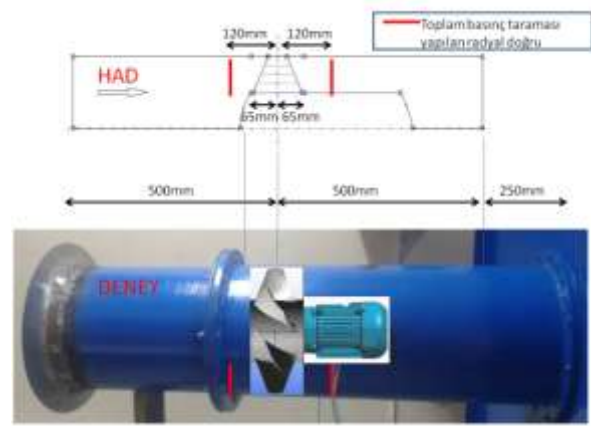
Deneysel Yöntem

Çalışmanın büyük bölümünü oluşturan sayısal hesaplamaların doğru çözüm verip vermediğini kontrol etmek için, Referans fanın performans deneyleri, AMCA 210 (ANSI/AMCA:210, 2007) standardına göre tasarlanmış bir test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 7).

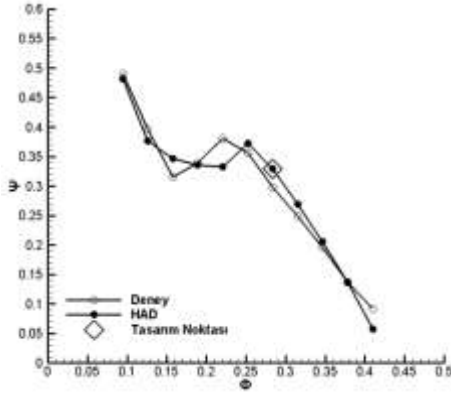


Şekil 7. AMCA 210 deney düzeneği.

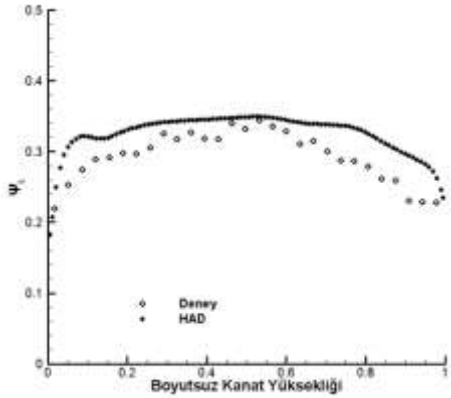
Hava debisi ölçümü, deney düzeneği içinde bulunan, standarda uygun AMCA lüleleri vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. ± 30 dereceler arasında kalibre edilmiş bir üç delikli basınçölçer vasıtasıyla fan çıkışındaki toplam basınç, statik basınç, eksenel hız ve mutlak akış açısı daimi koşullarda ölçülmüştür. Fan göbeği ile kanat ucu arası 30 eşit uzaklığa bölünüp her bir pozisyonda basınçölçer ile ölçüm yapılmıştır. Deney sisteminin test bölümü ve sayısal modelleme yöntemi Şekil 8'de kıyaslanmaktadır. Sayısal modelleme sırasında, sınır şartı olarak, kütle debisi, yüzey üzerinde düzgün yayılı tanımlandığı için, deney düzeneğindeki gibi bir giriş lülesine ihtiyaç duyulmamıştır. Basınçölçer hissettiği basınç, basınç sensörleri ile voltaj sinyallerine çevrilmiş ve bir veri toplama sistemi ile veriler bilgisayar ortamına kaydedilmiştir. Basınç sensörleri oldukça hassas bir manometre olan Betz manometresi ile kalibre edilmiştir. Debi ve basınç ölçümlerindeki belirsizlik değerleri sırasıyla % 1,5 ve % 2 olarak hesaplanmıştır. Fan girişinde ise bir Kiel basınçölçeri vasıtasıyla benzer yöntemle toplam basınç taraması yapılmıştır.



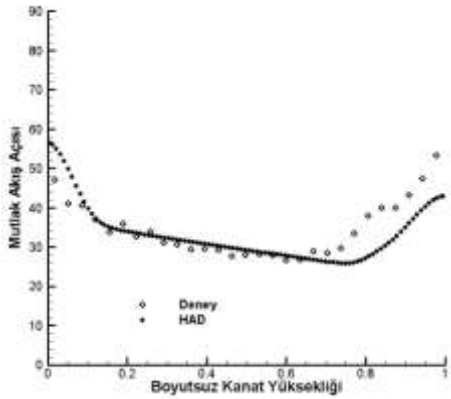
Şekil 8. Test bölümü.



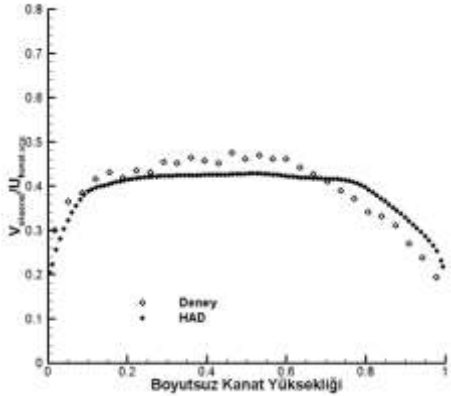
a)



b)



c)



d)

Şekil 9. a) Referans fanın deneysel ve sayısal toplam basınç artışı katsayısı karakteristikleri, b) Yerel toplam basınç artışı katsayısı, c) Mutlak akış açısı, d) Boyutsuz aksel hız.

Fanın toplam basınç artışı, fan çıkışındaki kütle ağırlıklı ortalama ile hesaplanmış olan toplam basınçtan girişte aynı yöntemle hesaplanmış toplam basınç çıkarılarak bulunmuştur. Sayısal hesaplamalarda da, fanın toplam basınç artışı hesabı, deney ile birebir aynı pozisyonlarda, aynı yöntem ile yapılmıştır.

Referans fanın yerel toplam basınç artış katsayısı, mutlak akış açısı ve boyutsuz aksel hızın radyal yöndeki dağılımlarının sayısal ve deneysel sonuçları, tasarım debisi için, sırasıyla Şekil 9 b), c) ve d)'de kıyaslanmıştır. Şekil 9 a)'da ise fanın bütün çalışma aralığı için performans eğrileri kıyaslanmıştır. Bu egrideki toplam basınç artış katsayısı Ψ , toplam basınç artışı ΔP_t 'nin Eş. (3) ile boyutsuzlaştırılmış halidir. Hacimsel debi Q ise, Eş. (4) ile benzer bir şekilde boyutsuzlaştırılmıştır. Bu denklemlerdeki U değeri, çevresel hızı ifade etmektedir.

$$\Psi = \Delta P_t / (0,5 \cdot \rho \cdot U_{kanat\ ucu}^2) \quad (3)$$

$$\Phi = 4Q / (D_{kanat\ ucu}^2 \cdot U_{kanat\ ucu} \cdot \pi) \quad (4)$$

Şekil 9'daki kıyaslamalar, deneysel sonuçların sayısal hesaplamalarla uyum içinde olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, yukarıda detayları anlatılan HAD modelinin, aksel fanın detaylı akış analizinin incelenmesi için kullanılabilir bir araç olduğunu göstermektedir.

SAYISAL SONUÇLAR

Tasarım debisinde HAD analizleri gerçekleştirilen, farklı hücum kenarı şekillerine sahip üç fanın, sayısal hesaplamalar sonucunda elde edilen aerodinamik performansları ve akış yapıları bu bölümde incelenmiştir. İnceleme, toplam basınç artışı, kanat emme kenarı üzerindeki basınç konturu ve kanat aerodinamik yük dağılımı üzerinde yapılmıştır.

Toplam Basınç

Yeni hücum kenarı tasarımı yapılırken, Θ -z düzleminde, profiller üzerinde teğetsel momentumu etkileyecek bir geometri değişikliğine gidilmediği için, performans değerlerinde üç fan arasında çok büyük bir değişiklik beklenmeyebilir. Ancak Tablo 2'de gösterilen üç fanın tasarım debisindeki performans değerleri incelendiğinde farklılıklar görülebilmektedir.

Tablo 2. Performans değerleri.

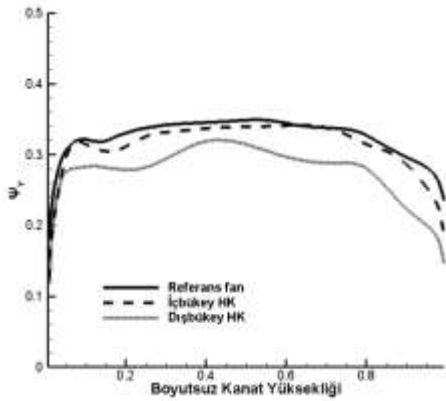
Konfigürasyon	Toplam Basınç Artışı [Pa]	Mil Gücü [W]	Aerodinamik Verim [-]
Referans fan	65.38	37.07	0.881
Dışbükey HK	58.63	34.38	0.853
İçbükey HK	64.31	36.64	0.878

Özellikle dışbükey hücum kenarına sahip fanın toplam basınç artışında % 10'luk bir düşüş görülmüştür. Buna mukabil aerodinamik verimi ise Referans fana göre % 3 daha az hesaplanmıştır. İçbükey hücum kenarına sahip fanın aerodinamik verimi ve basınç artışı ise çok az düşmekle beraber neredeyse aynı kalmıştır.

Sabit kanat yüksekliği (sabit yarıçap) için hesaplanmış, yersel, boyutsuz toplam basınç artış katsayısı Eş. (5) 'te gösterilmektedir. Bu denklemdeki $P_{t_{çıkış}}$ değeri, toplam basıncın rotor çıkışında, sabit kanat yüksekliğinde, çevresel yönde kütle ağırlıklı ortalamasının alınmasıyla elde edilmiştir. $\bar{P}_{t_{giriş}}$ değeri ise fan girişinde, toplam basıncın bütün kesit boyunca ortalamasının alınmasıyla elde edilmiştir.

$$\Psi_Y = (P_{t_{çıkış}} - \bar{P}_{t_{giriş}}) / (0,5 \cdot \rho \cdot U_{kanat\ ucu}^2) \quad (5)$$

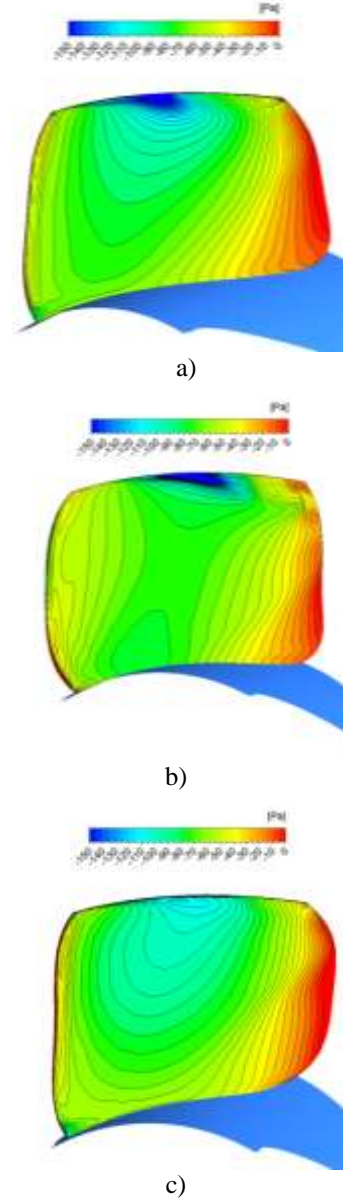
Şekil 10 'da, bu katsayının kanat yüksekliği boyunca dağılımı görülmektedir. Burada 0 değeri kanat köküne, 1 değeri ise kanat ucuna karşılık gelmektedir. Tablo 2'de gösterilen performans değerlerine uygun şekilde, İçbükey HK'li fana ait eğrinin referans fanın eğrisine çok yakın bir şekilde, hemen altında seyrettiği görülmektedir. Dışbükey HK'li fanın referans fana göre % 10'luk toplam basınç düşüşünün ise sadece belirli bir kanat bölgesindeki yeni akış koşulları sonucunda olmadığı, azalmanın kanat yüksekliğinin tamamı boyunca devam ettiği görülmektedir. Bu değişimin, kanat yüksekliğinin tamamı boyunca yaklaşık olarak aynı oranda etkili olduğu söylenebilir.



Şekil 10. Yersel toplam basınç artışı katsayısının kanat yüksekliği boyunca değişimi.

Kanat Üzerindeki Basınç Dağılımı

Tasarım debisinde, kanat emme kenarı üzerindeki hesaplamalar sonucu elde edilen basınç dağılımları, her üç konfigürasyon için Şekil 11'de görülmektedir. Konturların üst kısmındaki düşük basınçlı dairesel bölge kanat ucu girdabının etkisiyle oluşmuştur. İçbükey HK'li fan durumunda bu girdabın etkisinin azaldığı, Dışbükey HK'li fanda ise kanadın uç kısmında veter yönünde daha fazla yayıldığı görülmektedir. Ayrıca Dışbükey HK'li fanın firar kenarının üst bölgelerinde görülen bozulmada, bu girdabın etkisinin kanat üzerinde daha fazla yayılmasının rolünün olması muhtemeldir.



Şekil 11. Tasarım debisinde kanat emme kenarı üzerindeki basınç konturları a) Referans fan, b) Dışbükey HK, (c) İçbükey HK.

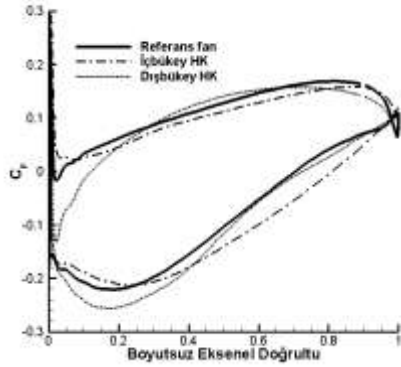
Kanat Aerodinamik Yükü

Şekil 12, 13 ve 14'te, kanat üzerindeki basınç dağılımları, sabit kanat yükseklikleri için boyutsuz olarak verilmiştir. Burada basınç katsayısı C_p , kanat üzerindeki P_k basıncından rotor girişindeki kesitte alan ortalaması alınarak hesaplanmış $\bar{P}_{giriş}$ basıncı çıkarılıp, kanat ucundaki çevresel hız U ile tanımlanmış dinamik basınç ile boyutsuzlaştırılarak hesaplanmıştır (Eş. (6)).

$$C_p = (P_k - \bar{P}_{giriş}) / (0,5 \cdot \rho \cdot U_{kanat\ ucu}^2) \quad (6)$$

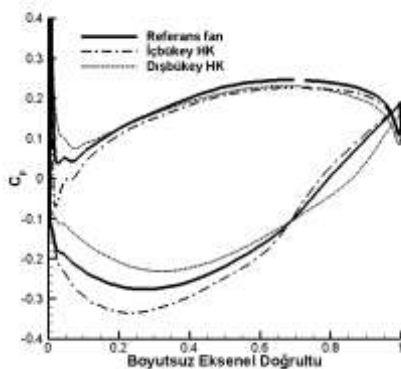
Şekil 12 incelendiğinde, Dışbükey HK'li fanın hücum açısının düştüğü, İçbükey HK'li fanının ise arttığı, hücum kenarı civarındaki basınç dağılımlarından anlaşılmaktadır. Fakat aynı zamanda, Dışbükey HK'li fanın hücum kenarı civarındaki emme kenarı üzerindeki

en düşük basınçlı bölge biraz daha negatife doğru çekilerek kanat yükü bu bölgede artmıştır. İçbükey HK'li fanda ise tam tersi eğilim görülmektedir. Dışbükey HK'li fanın kanadının hücum kenarı bölümünün fazlaca yüklenmesi, emme kenarında, boyutsuz aksel doğrultu 0,6'yı geçtikten sonra akış ayrılmasına yol açmıştır. Aynı durum referans fan için de geçerlidir. İçbükey HK'li fanda ise hücum kenarının yükünün azalması, diğer konfigürasyonlarda, kanadın arka kısmında oluşan akış ayrılmasını engellemiştir.



Şekil 12. Kanat yüksekliğinin % 10'unda kanat üzerindeki basınç dağılımları.

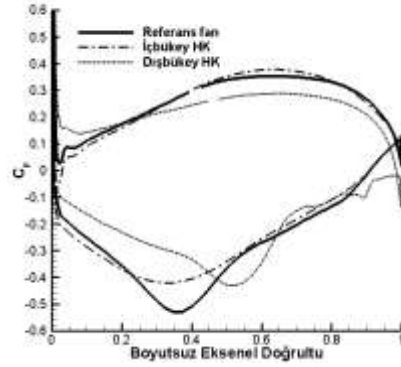
Kanadın tam ortasına gelindiğinde ise (Şekil 13), İçbükey HK'li fanın hücum kenarı fazlaca yüklenmiş, bu ise kanadın aksel doğrultusu üzerinde % 70 değerinden sonra akış ayrılmasına yol açmıştır. Benzer ayrılma referans fanda da gözlenmiştir. Dışbükey HK'li fanda ise hücum kenarı aerodinamik yükü azalmış, bu sayede birim uzunluk başına basınç değişimi azaltılarak akış ayrılması önlenmiştir.



Şekil 13. Kanat yüksekliğinin % 50'sinde kanat üzerindeki basınç dağılımları.

Şekil 14'te gösterilen, kanat yüksekliğinin % 90'ına ait basınç dağılımlarında ise, İçbükey HK'li fanın diğer konfigürasyonlara göre aerodinamik açıdan daha düzgün bir görüntüsü olduğu söylenebilir. İçbükey HK'li fan, daha önceki bölümlerde anlatılan kanat ucu girdabının etkisini azaltarak, hücum kenarından veterin yaklaşık % 30'u uzaklığında bulunan ani basınç düşüşünün olduğu bölümü sönmülemiş ve veterin geri kalanında akış ayrılmasına daha zor yol açacak akış koşullarını sağlamıştır. Zira referans fanda da mevcut

olan bu tepe noktasının nedeni, kanat ucu girdabıdır. Oysaki Dışbükey HK'li fanda, yine daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi, kanat ucu girdabının veterin üzerinde daha fazla yayıldığı gözlenmiş, bu durum Şekil 14'te görüldüğü gibi akışın ayrılmasına yol açmıştır.



Şekil 14. Kanat yüksekliğinin % 90'ında kanat üzerindeki basınç dağılımları.

SONUÇ

Serbest girdap yöntemi ile tasarlanmış aksel bir fanın profilleri, hücum kenarı r-z düzleminde, içbükey ve dışbükey biçimler alacak şekilde tekrar dizilerek yeni kanatlar oluşturulmuş ve yeni fanların HAD yaklaşımları tasarım debisinde gerçekleştirilmiştir. Dışbükey HK'li fanın performansının referans fana göre düştüğü görülmüş, İçbükey HK'li fanının ise neredeyse aynı kaldığı gözlenmiştir. Ayrıca İçbükey HK'li fanın kanat ucu girdabını azaltmada etkisi olduğu belirtilmiştir. Ayrıca kanat aerodinamik yüklerine bakıldığında, hücum kenarının içbükey bir şekil almasının hem kanat ucu hem de kanat kökünde aerodinamik yükü azalttığı ve bu bölgelerdeki akış ayrılması oluşma riskini azaltarak bu bölgeleri daha verimli hale getirdiği söylenebilir. Ancak, bu kez de normalde kanadın en verimli çalışma bölgesi olan tam ortasında kanat yükü artmış ve akış veterin arka bölümlerinde ayrılmıştır. Dışbükey HK'li fanda ise bütün bu etkiler tam tersi şekilde gerçekleşmiştir. Gelecekteki çalışmalarda İçbükey HK'li fanın kanat kökü ve ucundaki faydaları kullanılarak kanadın orta kısmında farklı çözümlere gitmek, fan performansını arttırmak için bir adım olarak kullanılabilir.

KAYNAKLAR

ANSI/AMCA:210, 2007, Laboratory Methods of Testing Fans for Certified Aerodynamic Performance Rating.

ANSYS CFX-13.0, 2006, ANSYS CFX-Solver Theory Guide, ANSYS Inc.

Beiler M. G. and Carolus T. H., 1999, Computation and Measurement of the Flow in Axial Flow Fans with Skewed Blades, *Journal of Turbomachinery-Transactions of the Asme*, 121(1), 59-66.

Clemen C. and Stark U., 2003, Compressor Blades with Sweep and Dihedral: A Parameter Study, *5th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics*, Prague.

Corsini A. and Rispoli F., 2004, Using Sweep to Extend the Stall-Free Operational Range in Axial Fan Rotors, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part a-Journal of Power and Energy*, 218(A3), 129-139.

Menter F. R., 1994, Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Application, *AIAA J*, 32(8), 1598-1605.

Ramakrishna P. V. and Govardhan M., 2009, Study of Sweep and Induced Dihedral Effects in Subsonic Axial Flow Compressor Passages-Part I: Design Considerations-Changes in Incidence, Deflection, and Streamline Curvature, *International Journal of Rotating Machinery*, 2009, 1-11.

Sasaki T. and Breugelmans F., 1998, Comparison of Sweep and Dihedral Effects on Compressor Cascade

Performance, *Journal of Turbomachinery-Transactions of the Asme*, 120(3), 454-463.

Smith L. H. J. and Yeh H., 1963, Sweep and Dihedral Effects in Axial-Flow Turbomachinery, *Journal of Basic Engineering*, 401-414.

Vad J., 2008, Aerodynamic Effects of Blade Sweep and Skew in Low-Speed Axial Flow Rotors at the Design Flow Rate: An Overview, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part a-Journal of Power and Energy*, 222(A1), 69-85.

Vad J., Kwedikha A. R. A. and Jaberg H., 2006, Effects of Blade Sweep on the Performance Characteristics of Axial Flow Turbomachinery Rotors, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part a-Journal of Power and Energy*, 220(A7), 737-751.

Wright T. and Simmons W. E., 1990, Blade Sweep for Low-Speed Axial Fans, *Journal of Turbomachinery-Transactions of the Asme*, 112(1), 151-158.



Ayhan Nazmi İLİKAN, 1983 yılında İstanbul'da doğdu. Ortaöğrenimini Galatasaray Lisesi'nde 2002 yılında tamamladıktan sonra girdiği İ.T.Ü. Makina Mühendisliği bölümünden 2006 yılında mezun oldu. Aynı yıl, mezun olduğu bölümün Hidromekanik ve Hidrolik Makinalar Anabilim Dalı'nda araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Isı-Akışkan programında yüksek lisansını tamamladıktan sonra Belçika'ya giderek von Karman Akışkanlar Mekaniği Enstitüsü Türbomakinalar ve İtke Departmanı'nda araştırma yüksek lisansını yaptı. 2009 yılında görevine dönerek İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı. Doktora tez çalışmasına ve fakültedeki görevine halen devam etmektedir.



Erkan AYDER, 1962'de Balıkesir'de doğdu. Muharrem Hasbi Koray Lisesi'nden 1979 yılında mezun oldu. Makina Mühendisi ve Yüksek Makina Mühendisi ünvanlarını İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ)'nden sırasıyla 1983 ve 1986 yıllarında aldı. 1984-1986 yılları arasında İTÜ Makina Fakültesi Hidromekanik ve Hidrolik Makinalar Laboratuvarında asistan olarak çalıştı. Doktora derecesini von Karman Akışkanlar Mekaniği Enstitüsü, Brüksel-Belçika'dan 1993'de aldı. 1993 yılında İTÜ Makina Fakültesi'nde Yardımcı Doçent olarak göreve başladı. 1995 yılında Doçent, 2002 yılında da profesör unvanını aldı. Şimdiye kadar Akışkanlar Mekaniği, Hidrolik Makinalar, Research Planning, Gaz Türbinleri lisans derslerini ve Viscous Flows ve Türbomakinaların Aerotermodinamiği yüksek lisans derslerini vermiştir. Aynı zamanda Hava Harp Okulu'nda ve Deniz Harp Okulu'nda Ölçme Tekniği, Türbomakina Teorisi, Gaz Türbinleri isimli dersleri vermiştir. Akışkanlar Mekaniği ve Türbomakinalar kapsamına giren birçok endüstriyel ve bilimsel araştırma yapmış olup çok sayıda yayın sahibidir. 1998-2004 yıllarında İTÜ Makina Fakültesi Dekan Yardımcılığı ve 2007-2008 yıllarında İTÜ Yabancı Diller Yüksekokulu müdürlüğü yapmıştır. 2009-2011 yılları arasında TÜBİTAK TEYDEB Makina ve İmalat Teknolojileri Grubu Danışma Kurulu Üyeliğinde bulunmuştur. Halen İTÜ Makina Mühendisliği Bölümünde öğretim üyesi olarak çalışmakta olup, evli ve iki çocuk babasıdır.