

YÖNTEMLER

Kritik Akışlı Lülede Boğulma İle Debi Kontrolü

Herhangi bir lüle veya orifis gibi bir kısıtlayıcıdan geçen akışın debisi Denklem 1'deki gibi ifade edilir.

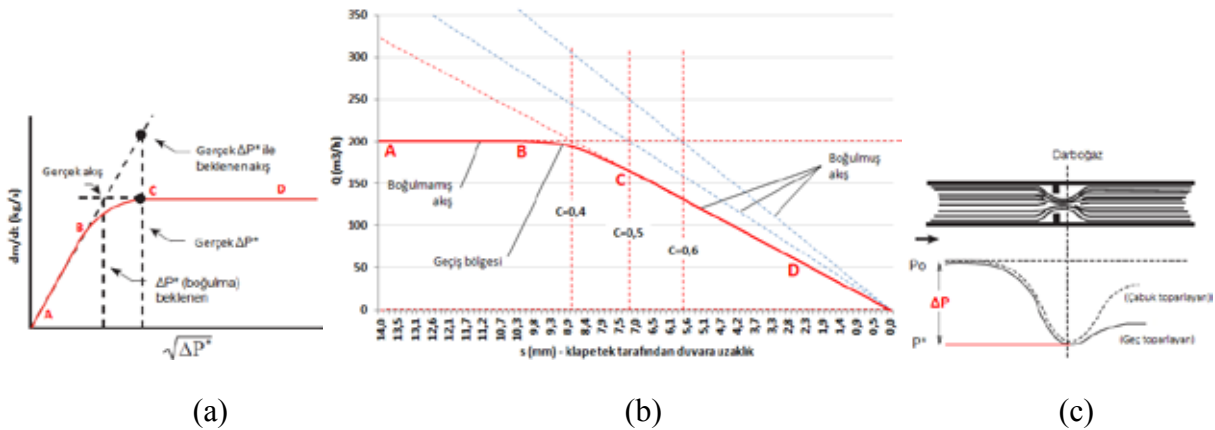
$$\dot{m} = CA^* \sqrt{\frac{2\rho_0(P_0 - P^*)}{1 - \beta^4}}, \quad (1)$$

Boğulma kapanmakta olan bir musluğun veya vananın geçirmekte olduğu debinin azalmasına neden olan fiziksel olaydır. Denklem 2'deki kritik basınç oranı ile tanımlanan koşul oluştuğunda akış boğulmuş olarak tabir edilir ve kısıtlayıcı etrafından geçmesine izin verilen en büyük kütleli debi Denklem 3'deki gibi ifade edilir.

$$r^* = \frac{P_M^*}{P_{M0}} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/(k-1)}, \quad (2) \quad \dot{m} = CA^* \sqrt{k\rho_0 P_0 \left(\frac{2}{k+1}\right)^{(k+1)/(k-1)}, \quad (3)$$

$$Re = L \frac{\dot{m}}{\mu \cdot A^*}, \quad (4) \quad Ma = \frac{U^*}{c} = \frac{U^*}{\sqrt{kR_s T}}, \quad (5) \quad \beta = \frac{s}{L}, \quad (6) \quad D_h = \frac{4A}{S_l}, \quad (7)$$

Doğalgaz için yoğunluk $\rho_0 = 0,72 \text{ kg/m}^3$ sabit değerde alınmıştır. Doğalgaz için ses hızı $c = 446 \text{ m/s}$ 'dir. Artan giriş ve çıkış basınç farkına bağlı olarak geçen debi boğulma sınırına asimptotik olarak (bir eğri çizerek) girer (Şekil 1.a,b). Bu olgu darboğazın oluştuğu yerin açıklık oranı (β) azaldıkça kısıtlayıcıdan akış yönünde yavaşça kaymasıyla ilgilidir (Şekil 1.c).



Şekil 1.Boğulmada beklenen davranış. a) Artan basınç farkı ile, b) Azalan açıklık ile, c) Darboğaz basıncı.

Türkiye'de doğalgaz hatlarından gelen 2H sınıfı ve en büyük giriş toplam fark basıncı 36000 Pa (360 mbar) olan doğalgaz sağlanabildiğinden kelebek vana çalışma giriş fark basıncı bir regülatörden geçtikten sonra 15000 Pa (150mbar) olacak şekilde belirlenmiştir. Hava için boğulma koşulu olan kritik basınç oranı Denklem 2 uyarınca $P_M^*/P_{M0} = 0,528$ ve doğalgaz için de 0,544 'tür. Doğalgaz açısından darboğazda tam boğulma oluşumu için gereken statik fark basıncı $0,544 \times (101000 \text{ Pa} + 15000 \text{ Pa}) - 101000 \text{ Pa} = -38000 \text{ Pa}$ 'dır.

Daire Levha Şeklindeki Bir Klape İle Boğulma Davranışının Deneysel Tayini

Deneysel olarak akış katsayısı, özellikleri bilinen hava için Denklem 3 yardımıyla

$$C = \frac{m}{A^* \sqrt{k \rho_0 P_0 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/(k-1)}}}, \quad (8)$$

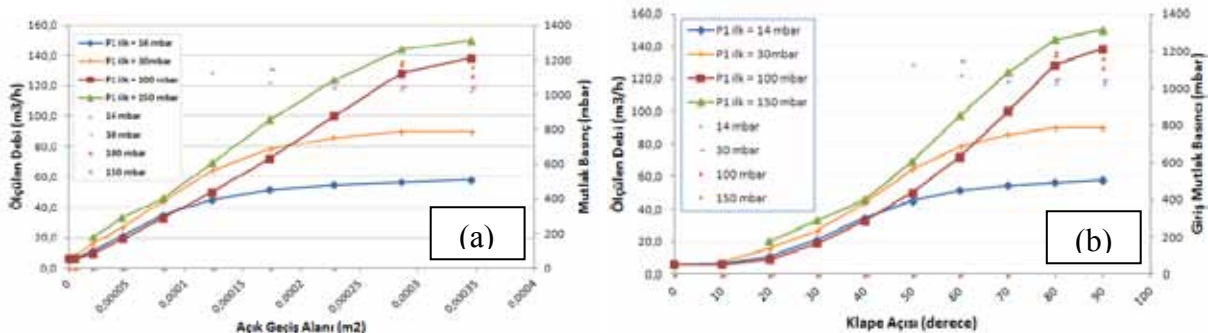
şeklinde hesaplanabilir. Hava için kritik basınç oranı $P_M^*/P_{M0} = 0,528$ 'dir. Ölçümler kanal çapı 21 mm olan bir dairesel kelebek vana ile tam açık ve tam kapalı konumlar arasında 10'ar derecelik aralıklarla alınmıştır. Bu hava deneyinde kaynaktan sağlanan fark basıncı 5 bar yani 500000 Pa'dır. Klape kısıldıkça çıkış tarafı açık atmosfere çok yakın olduğundan fazla etkilenmemiş olup, giriş tarafı basıncı hızla artarak 50°'den sonra okunamamıştır.



Şekil 2. Hava ile boğulma deneyi ekipmanları. a,b) Düzenek, c) Dairesel kelebek vana.

Tablo 1. Hava deneyinde tam açık halde giriş basıncı 1400 Pa için kısılma davranışı.

α (derece)	P_0 (Pa)	Q (m ³ /h)	r^*	A^* (m ²)	β	Re	C
90	1400	58.1	0.977	3.46E-04	100%	1.02E-11	0.24
80	1800	56.3	0.973	2.86E-04	83%	1.22E+04	0.28
70	2900	54.5	0.963	2.28E-04	66%	2.94E+04	0.34
60	6000	51.4	0.935	1.73E-04	50%	5.33E+04	0.42
50	12200	45.0	0.884	1.24E-04	36%	8.39E+04	0.50
40	-	34.6	-	8.10E-05	23%	-	-
30	-	21.2	-	4.64E-05	13%	-	-
20	-	10.9	-	2.09E-05	6%	-	-
10	-	6.3	-	5.26E-06	2%	-	-
0	-	5.8	-	0	0%	-	-

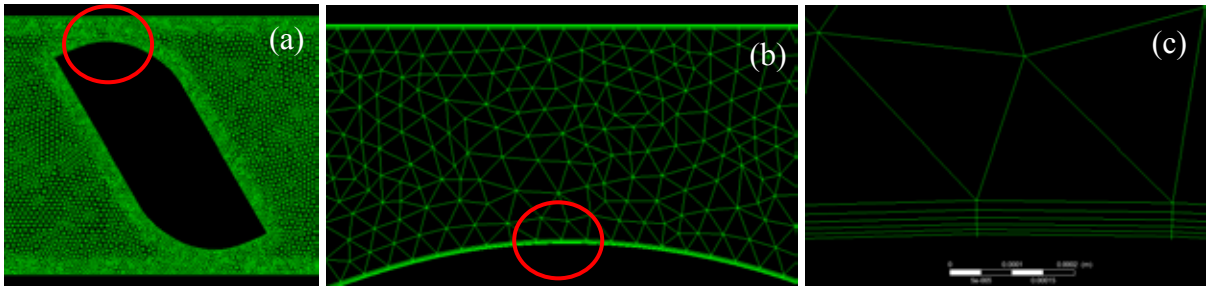


Şekil 3. Dairesel klape ile deney sonuçları. a) Geçiş kesit alanına göre, b) Klape açısına göre.

Hava ile yapılan dairesel klape deneyi sonuçları irdelenirse açık geçiş alanı itibariyle Şekil.1b’de görülen dalış hareketinin oluştuğu görülmektedir. Tablo.1’in 5. satırında okunan akış katsayısı olan $C = 0,5$ değerinin ilk tasarıma yol gösterebileceği düşünülmüş ve tasarımı hedeflenen doğrusal klape için düz levhadan geometrik farklılığının kötü koşul oluşturması varsayımıyla $C = 0,4$ alınarak sabit akış katsayısına göre birinci prototip doğrusal kelep vana tasarlanmıştır.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Benzetimlerinin Yapılandırılması

Sınır koşulları için girişte yüzeye dik gradyeni sıfır olan statik fark basıncı, çıkışta yüzeye dik yönlü kütlese debi kullanılmıştır. Hesaplama uzayı geometrisi giriş yüzeyi kelep vana geometrisinden $5 D_h$ (hidrolik çap), çıkış yüzeyi de tam gelişmiş akışın oluşabilmesi için $15 D_h$ uzaklıkta olacak şekilde oluşturulmuştur.



Şekil 4.Yapılandırılmamış sayısal ağ. a) Klape çevresi, b) Darboğaz, c) Sınır tabaka ağı.

Kısıtlayıcı cisim etrafı akışı sayısal olarak hesaplamada kritik bir rolü olan sınır tabaka kalınlığının belirlenmesinde düz levha için olan Blasius yaklaşımı kullanılmıştır.

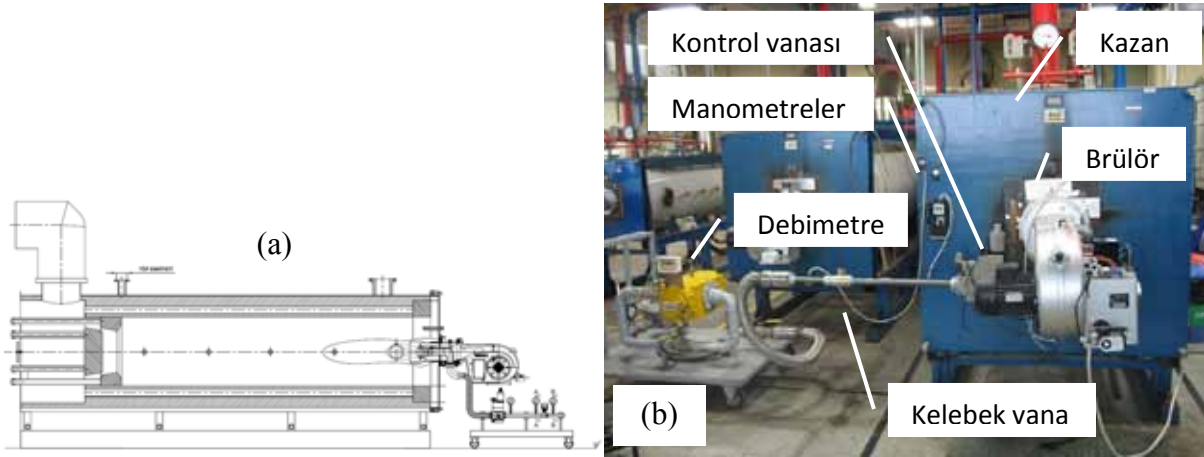
Sabit Akış Katsayısı Kabulü Ve Doğrusal Darboğaz Formuna Sahip Bir Klapeyle Deneysel Akış Katsayısı Fonksiyonu $C(Re)$ Oluşturulması (Birinci Prototip)

Doğrusal kontrole olanak veren klape tasarımının iki boyuta indirgenebilmesi için kelep vana iç kanalının kare kesitli olarak tasarlanmasına karar verilmiştir. Akış katsayısının sabit davranabileceği kabulüyle Denklem 3’e göre darboğaz kesit alanına açılma koordinatlarında $A^*=a\theta + b$ doğru denklemi formunda bir öneri yapılarak yukarıda anlatılan $C = 0,4$ kabulüne göre bir doğrusal klape geometrisi tasarlanmıştır. Klape için tam açık konumundaki kalınlığı Şekil 1b’de $C=0,4$ doğrusu ile $Q=200$ m³/h doğrusunun kesişim noktasına denk gelen s değeri ile yazılırsa $2(L-s)$ kadardır. Doğrusal klape için darboğaz kesit alanı $A^*= 4sL$ ‘dir.

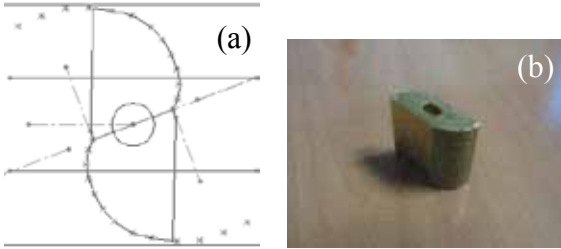
Kare kesitli kanal kenar uzunluğu ilk tahmini için farklı cihazlardan sağlanan verilerle, kullanım olasılığını (N_i) da barındıran ağırlıklandırılmış ortalama kullanılmıştır. Bu hesaba göre $L=0,028$ m olarak tayin edilmiş olup hedef olarak 200 m³/h debide 2750 Pa statik basınç kaybı beklenmektedir.

$$\bar{Q} = \frac{\sum_i N_i Q_i}{\sum_i N_i}, \quad (8)$$

$$\bar{\Delta P} = \frac{\sum_i N_i \Delta P_i}{\sum_i N_i}, \quad (9)$$

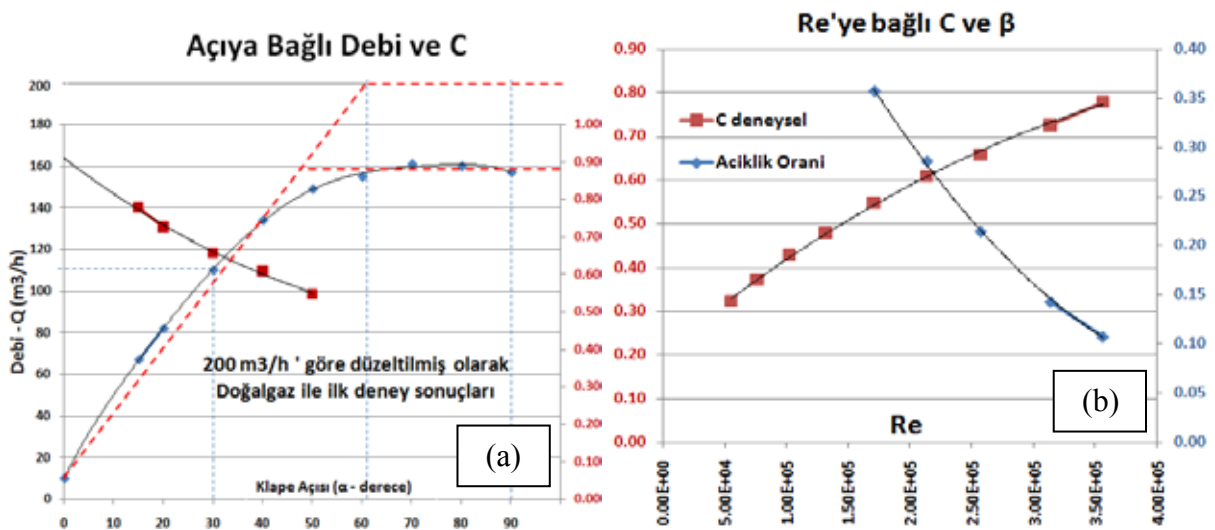


Şekil 5. Doğrusal kelebek vana deney düzeneği. a) Şematik, b) Laboratuvar.



Şekil 6. Birinci prototip kelebek vana. a) Yüzey nokta bulutu, b) Birinci prototip klape.

Debimetreden sonra kelebek vana girişindeki statik fark basıncı farklı klape açıları için neredeyse sabit ve 15000 Pa (150 mbar) dolayındadır. Deneyden elde edilen veriler aşağıdaki gibidir.

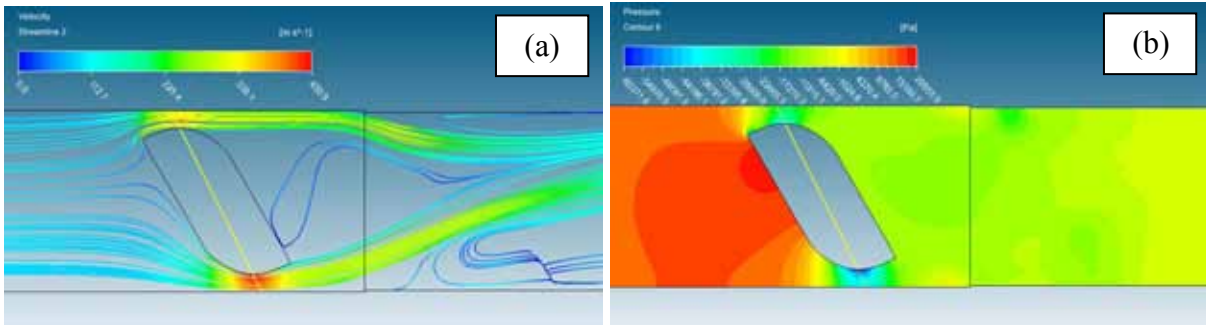


Şekil 7. Birinci prototip deney sonuçları. a) Debi, b) Akış katsayısı C.

Deney sonucunda 200 m³/h 'lık debinin geçirilemediği görülmüştür. Bu durumun kelebek vanada aşırı basınç kaybına bağlı olarak brülör kontrol vanasına yeterli doğalgaz basıncı

sağlanamamasından ileri geldiği düşünülmüştür. Eğer tasarım en büyük debisi olan 200 m³/h debi geçecek olsaydı boğulmuş akışın yaklaşık doğrusal davrandığı bölge en büyük debi doğrusunu yaklaşık 60° klape açısında keseceği (boğulma başlangıcı) söylenebilir. Bu sonuç ve ek olarak 30° için ölçülen debi de, birinci prototip klape için yapılan ve aşağıda anlatılan sayısal benzetim sonuçlarıyla uyumludur.

30° İçin Örnek Hesaplama: Deneysel debi 110 m³/h, sayısal debi ise 100 m³/h'tir. Bunun dışında sarı renkli doğru parçası üzerinden hesaplanan çizgisel ortalama statik fark basıncı değeri de $\overline{P^*} = -38814,5 Pa$ olup boğulma kritik basınç oranı açısından olması beklenen değeri -38000 Pa'dır. Deneysel ve sayısal sonuçların örnek 30° için tutarlı olduğu görülmüştür.



Şekil 8. Birinci prototip klapede 30° için HAD benzetim sonuçları. a) Hız ve akım çizgileri, b) Statik fark basınç kontürleri.

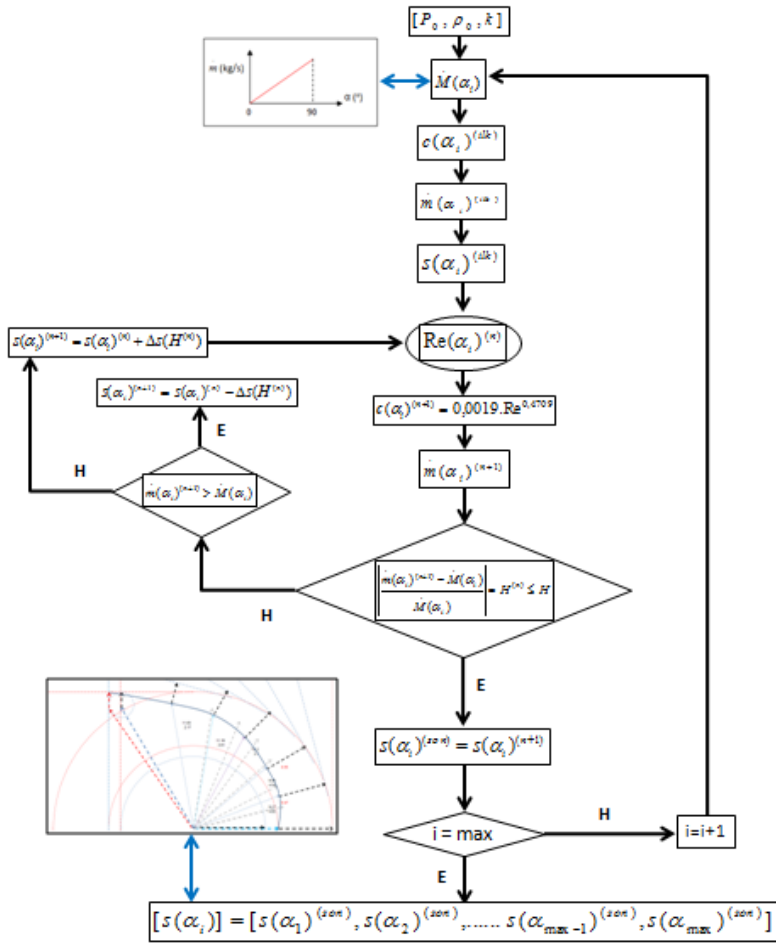
Şekil 7.b 'ye göre Re sayısına bağlı olarak C 'nin davranışı deneysel bir fonksiyona dönüştürülmüştür. Doğrusal kontrol sağlayacak bir klappenin etrafında oluşacak akışın sözkonusu Re sayılarının rejimindeki davranışa benzer olacağı düşünülerek oluşturulan fonksiyon aşağıdaki gibidir.

$$C = 0,0019 \cdot Re^{0,4709} , (10)$$

Değişken Akış Katsayısı Düzeltme Algoritması İle Yüzey İyileştirmesi

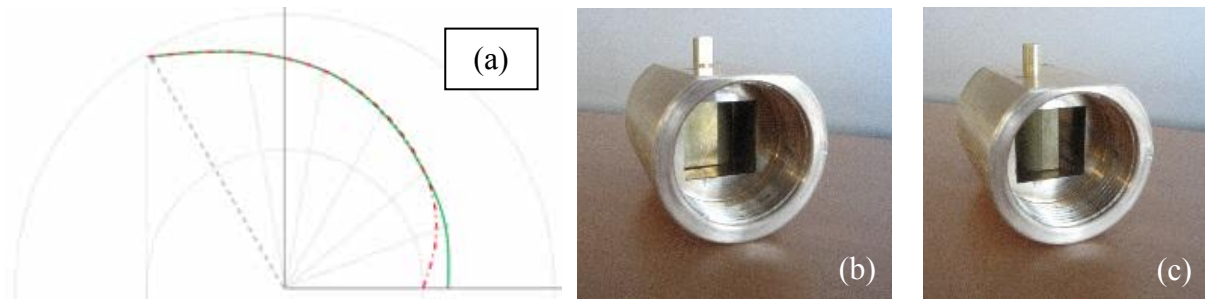
Şekil 7.a 'ye göre farklı klape açılarından ortaya çıkan sonuçlar itibariyle C 'nin 0,4 kadar küçük değil, ortalamada yaklaşık 0,7 gibi bir değerinin kabul edilmesi gerektiği görülmektedir. Yaklaşık değeri daha doğru tahmin edilmiş bir sabit akış katsayısına göre doğrusal darboğaz – ve debi kontrolü – oluşturması istenen ve tasarım hedefi itibariyle tam açık konumda 200 m³/h ve tam kapalı konumda ise 60 m³/h debi geçirecek bir klape yüzeyi nokta bulutu koordinatlarını girdi parametrelerden biri olarak kabul ederek çalışan bir düzeltme algoritması tasarlanmıştır. Bu algoritma, herhangi bir klape açısında geçmesi istenen debiyi aşağıdaki mantıksal süreç itibariyle döngüsel olarak kendine yakınsatarak klape yüzeyini düzeltmektedir.

$$Q(m^3/h) \rightarrow Re \rightarrow C \rightarrow Q^1(m^3/h) \rightarrow Re^1 \rightarrow C^1 \dots \dots Q^{(n)}_{son}(m^3/h) \rightarrow Re^{(n)}_{son} \rightarrow C^{(n)}_{son} , (11)$$



Şekil 9. Klape yüzey formu düzeltme algoritması.

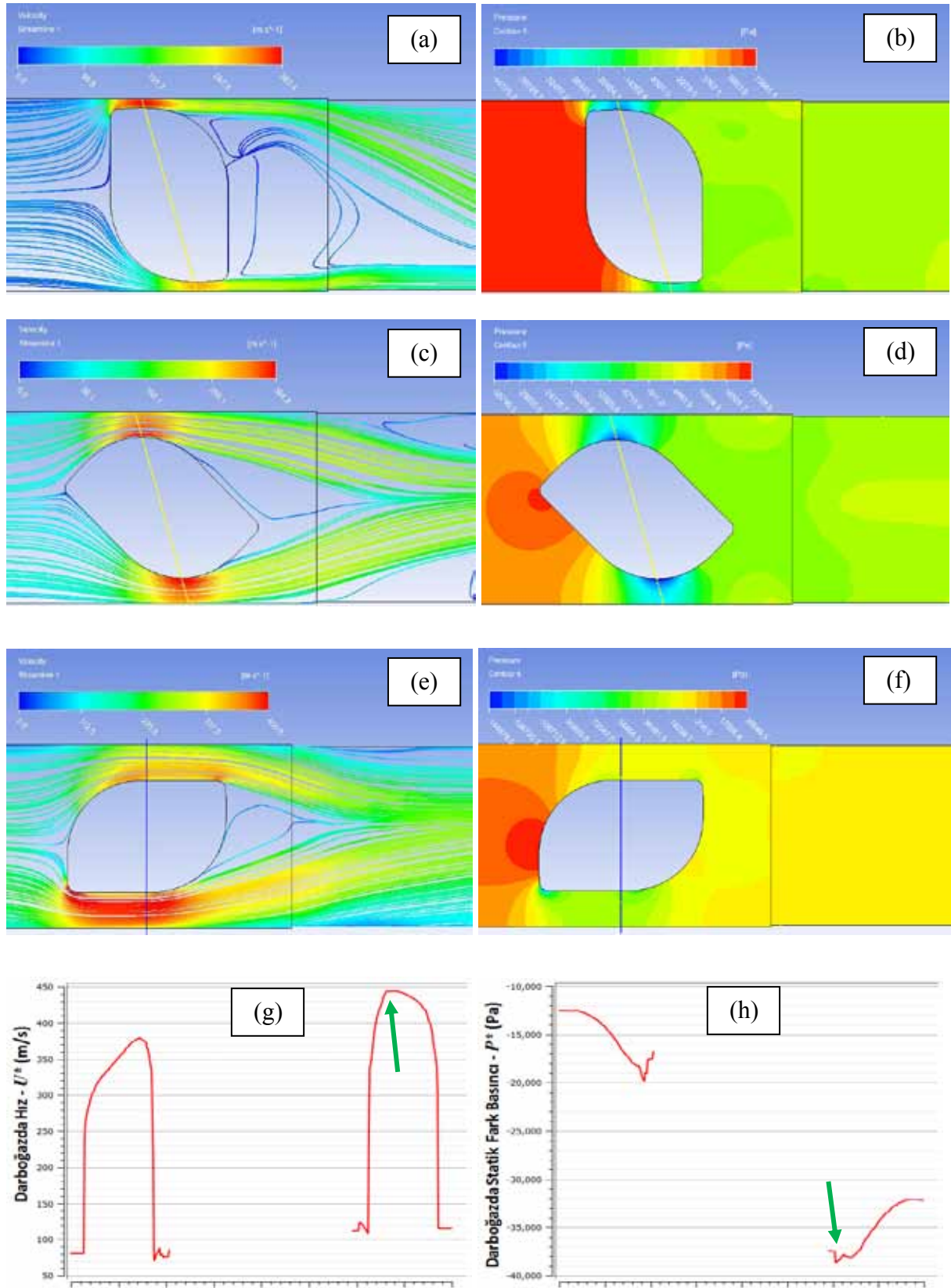
Düzeltilme algoritması EXCEL ortamında yazılan bir makro ile çalıştırılmış ve sonuçta düzeltilmiş akış katsayılarına göre aşağıda şematik şekli görülen doğrusal nihayi klape geometrisi elde edilmiştir.



Şekil 10. İyileştirilmiş doğrusal klape geometrisi. a) Şematik, b) Tam kapalı, c) Tam açık.

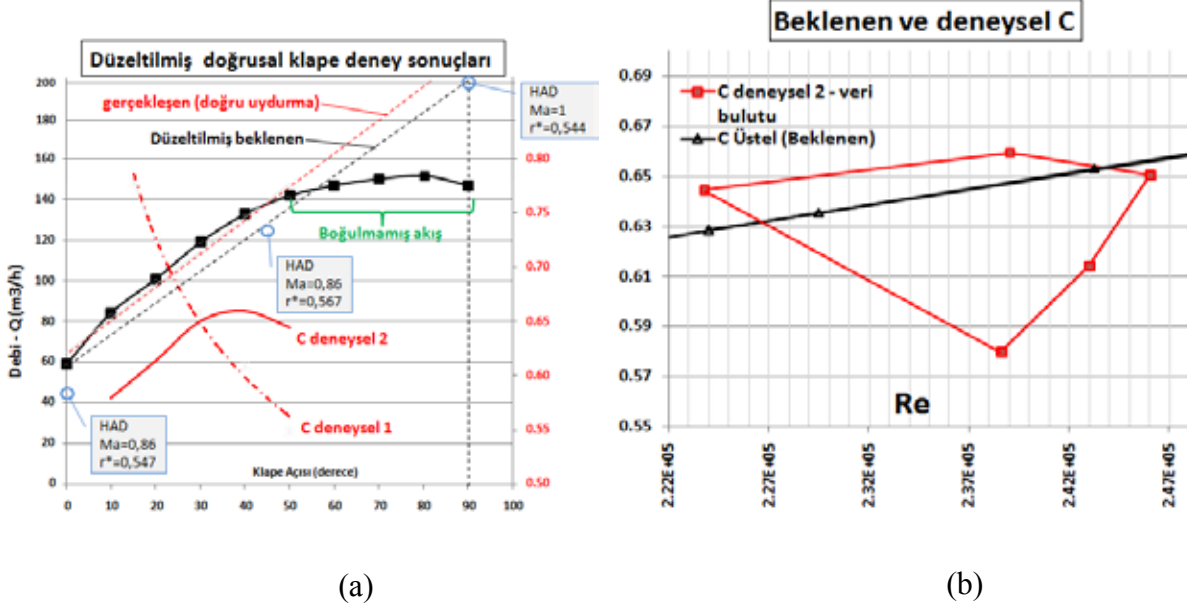
SONUÇLAR

Son yüzey formu ile elde edilen geometri için yapılan sayısal benzetimlerin sonuçları aşağıdaki gibidir.



Şekil 11. İyileştirilmiş prototip klapede HAD benzetim sonuçları. a) 0° Hız ve akım çizgileri, b) 0° Statik fark basınç kontürleri, c) 45° Hız ve akım çizgileri, d) 45° Statik fark basınç kontürleri, e) 90° Hız ve akım çizgileri, f) 90° Statik fark basınç kontürleri, g) 90° Ölçüm doğrusu üzerinde hız dağılımı, h) 90° Ölçüm doğrusu üzerinde statik fark basıncı dağılımı.

İyileştirilmiş doğrusal kelebek vana montajı deney düzeneğine yeniden monte edilmiş ve klape tam açık konumundayken brülör en büyük kapasitesi 155 m³/h debi geçişine izin vermiştir. 90°'den 0°'ye 10°'ar derecelik aralıklarla kısılarak debi değerleri kaydedilmiştir. İyileştirilmiş prototip için deneysel yolla kaydedilen akış katsayıları hem klape açısına bağlı olarak hem de Re sayısına bağlı olarak gösterilmiştir. Kelebek vananın tam açık konumundayken boğulmaya uğradığı debi HAD benzetimiyle çözülmüş olup 200 m³/h (0,04 kg/s) olduğu görülmüştür (Şekil 11.e,f,g,h).



(a)

(b)

Şekil 12. İyileştirilmiş prototip deney sonuçları. a) Debi, b) Akış katsayısı C.

Akış katsayıları karşılaştırıldığında, karşılaştırmanın klape açısı yerine Re 'ye bağlı olarak yapılması gerektiği de anlaşılmaktadır. Klape açısına göre sınıflandırma yanıltıcı olabilir.

TARTIŞMA

İyileştirilmiş yüzey geometrisine sahip doğrusal klape beklenen davranışını boğulmuş akış bölgesinde sağlamış olup doğrusal davranışın bozulduğu bölümde, ilgili debilerin deney tesisatına bağlı olarak geçirilemediği görülmüştür. Hedeflenen 200 m³/h 'lik debinin brülör kontrol vanasından geçebilmesi için girişinde en az 5000 Pa doğalgaz mutlak fark basıncı sağlanmasını gerektirmektedir. Ancak her iki klape deneyinde de sağlanabilen kelebek vana çıkış basıncı yaklaşık 3800 Pa kadardır. Bu durum kontrol vanasının doğalgazı beklenen debide geçirmemesini açıklamaktadır. Basıncıdaki aşırı düşüş kare kanal kenarı için $L=0,028$ m 'nin fazla küçük oluşu ile ilgilidir. Tam açık konumda ağırlıklandırılmış ortalama alınarak bulunan hedef kelebek vananın 200 m³/h debide 2750 Pa statik basınç kaybına uğraması hedeflenmiş olmasına rağmen 7200 Pa kayba uğramıştır. Kelebek vana gövdesi – ve iç kanalının – büyütülmesi durumunda oluşacak kaybın azaltılabileceği düşünülerek bu çalışmada anlatılan tasarım yöntemi kullanılarak istenilen debi aralığında doğrusal kontrol sağlayacak bir kelebek vananın tasarlanabileceği görülmüştür. HAD sonuçları itibariyle iyileştirilmiş kelebek vana beklenen doğrusal çalışmayı tasarım hedefleri içerisinde yapabilmektedir.

Hedeflenen doğrusal kontrolün uygulamadaki beklenen faydaları için aynı işlevi görecek elektronik kontrol ekipmanına duyulacak ihtiyacın azaltımı yoluyla sistem toplam maliyetlerini, brülör kontrol sistemlerinde kolaylık ve güvenilirliği artırarak da arıza ve bakım maliyetlerini düşürmek ve ek olarak da en iyileştirilmiş yakıt/hava oranı ayarlaması ile yakıt harcamı ve yanma ürünü gaz salımlarının azaltımına katkıda bulunmaktadır.

KAYNAKLAR

- 1) “Perry’s Chemical Engineers’ Handbook” (7th Edition), Perry R H, Green D W, Maloney J O, 1997, Mc-Graw Hill, ISBN:1934, 0-07-049841-5.
- 2) “Isıtma + Klima Tekniđi El Kitabı 97/98”, Recknagel, Sprenger, Schramek, TTMD Yayınları, 2003, ISBN:975-97305-7-X.
- 3) “Boundary Layer Theory” (Seventh Edition), Schlichting H, 1979, Mc-Graw Hill, ISBN:0-07-055334-3.
- 4) “Fundamentals of Classical Thermodynamics” (2nd Edition), Van Wylen G J, Sonntag R E, 1978, John Wiley & Sons.
- 5) Del Toro A, “Computational Fluid Dynamics Anlysis Of Butterfly Valve Performance Factors”, M.Sc. Thesis, Dept.Of Mech. Eng., Utah State University, 2012.
- 6) Wotzkowiak J, Oleskowicz-Popiel C, “Investigations Of Butterfly Control Valve Flow Characteristics”, 01.10.2006, Foundations Of Civil And Environmental Engineering 2006/7, ISSN:1642-9303.
- 7) Chaiworapuek W, “The Engineering Investigation Of Water Flow Past The Butterfly Valve”, Erasmus Mundus Master Of Mechanical Engineering Memoire-Thesis, June 2007, ETSEIB, Trinity College Dublin.