

SİKLON SEPARATÖRLERDE UZUNLUĞUN VERİME ETKİSİ VE OPTİMİZASYONU

*Atakan AVCI**
*Gazi Kamil EREL***

Özet: Siklonlarda uzunluğun genelde verimi artırıcı yönde etki ettiği düşünülür. Buna karşılık tanımlanan doğal girdap boyunun üzerinde siklon uzunluklarının ise verime yararının olmadığı bilinmektedir. Buna karşılık doğal girdap uzunluğu içerisinde kalan siklonlarda ayırma verimi siklon boyu ile devamlı artar mı sorusuna cevap aramak üzere kuramsal bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda akışkanın akış alanından, sürtünme direncine bağlı olarak, ayrıldığı ve ivmeli bir hareket yaptığı kabul edilmiştir. Akış alanı içerisinde hareket eden parçacığın cidara varabilmesi için radyal yönde öndeki seyahat sürelerinin eşit olması gerektiği basit yaklaşımından hareketle bir bağıntı elde edilmiştir. Bu yaklaşım sonuçlarına göre çalışma şartlarına göre her siklon için optimum bir siklon uzunluğunun tanımlanabileceği ve bu uzunluğun üzerinde siklon uzunluğunun verimi artırmayacağı tersi olarak azaltacağı sonucuna ulaşılmıştır. Model sonuçları bazı deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve modelin kabul edilebilir sonuçlar verdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sklonlar, siklon girdap uzunluğu, siklon verimi.

1. GİRİŞ

Değişik uygulama alanları olan ve yaygın olarak kullanılan siklonların önemli kullanım alanlarından biri de ayırıcı olarak kullanımındadır. Bu amaçla değişik büyüklüklerde ve boyut oranlarında tasarlanmış siklonlar bulunduğu gibi bazı özel konstrüksiyonlar da bulunmaktadır. Ayırma verimi ve basınç kayıpları performansı tanımlayan önemli parametrelerdir. Siklonların performansını iyileştirmeye, değişik parametrelerin etkisini belirlemeye, uygun konstrüksiyonlar elde etmeğe yönelik çok sayıda kuramsal ve deneysel çalışmalar yapılmaktadır Parker (1993).

Siklon ayırma veriminin belirlenmesi iki grupta düşünülebilir. Birinci grupta kritik çapın tahmini ikinci grupta ise fraksiyonel verimlerin tahminidir. Bu alanlarda yapılan kuramsal çalışmaları değişik şekillerde sınıflandırmak mümkündür. Ancak bunlardan bazıları Sepherd ve Lapple (1939), Lapple (1951), Bart (1956), Dietz (1981), İzo ve leith (1990), Liden ve Gudmundsson (1997), Avcı ve Karagöz (2000) ve benzerleridir. Bunların yanında nümerik çalışmalar da yaygınlık kazanmaktadır. Problemin çok karmaşık olması tatminkar sonuçlar verecek çözümlere ulaşmayı güçleştirmektedir. Bazı parametrelerin etkisini bazı modellerde görmemek veya gerçeğin tersini tahmin etmek mümkün olabilmektedir. Bu açıdan genelleştirilebilir, geniş bir alanda kullanılacak bir bağıntıdan bahsetmek mümkün değildir.

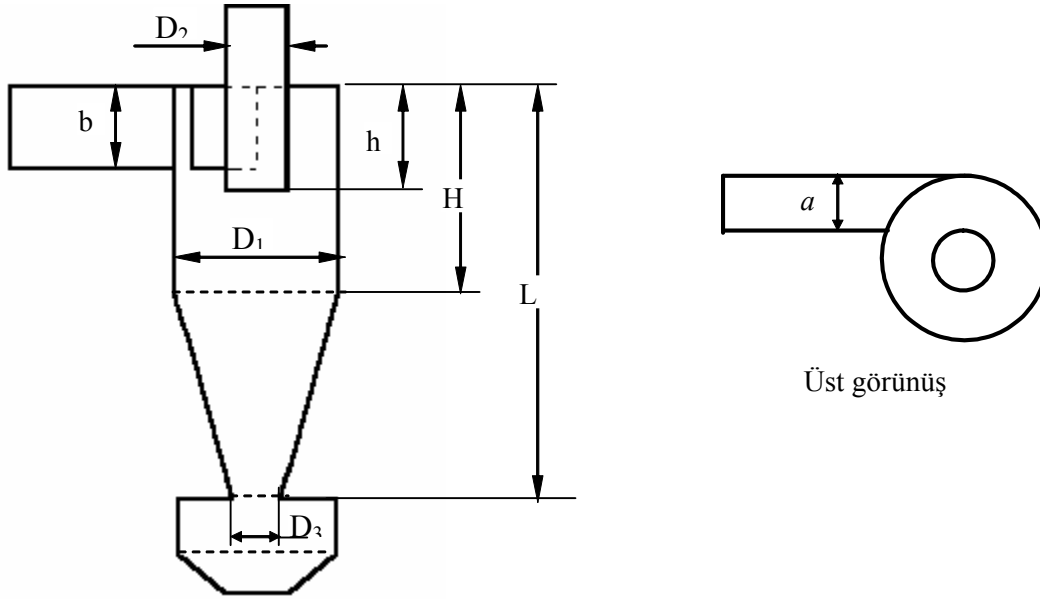
Siklonlarda boyutların performansa etkisini tahmine yönelik çok sayıda deneysel çalışma yapılmıştır. Buna rağmen siklonlarda akışın ve parametrelerin etkisinin tam anlaşıldığını söylemek oldukça zordur. Bu nedenle siklonlar üzerine çalışmaların uzun süre devam edeceği rahatlıkla söylenebilir.

Siklon uzunluğunun etkisini inceleyen çalışmaları, doğal girdap uzunluğunun tahmini ve siklon boyunun performansa etkisini yönelik çalışmalar olarak düşünmek mümkündür. Bu çalışmalar sonucunda öz olarak siklon uzunluğunun sınırlı olması gerektiği ve uzunluğun siklon performansını olumlu yönde etkilediği sonucuna ulaşılabilir. Ancak Zhu ve Lee (1999) tarafından boyu değiştirilen ve diğer boyutları yüksek verimli Stairmand siklonu ile benzer olan siklonlarda yapılan deneysel çalışma sonuçlarına göre doğal girdap sınırları içinde kalmakla birlikte verimin en yüksek olduğu bir optimum uzunluğun bulunduğu anlaşılmaktadır. Diğer bir deneysel çalışmada Hoffmann et.al. (2001) tarafından yapılmış ve benzer sonuçlar gözlenmiştir. Tam açık görünme de benzer eğilimi başka çalışmalarda da görmek mümkündür.

* Uludağ Üniversitesi Müh.-Mim. Fak.Makine Müh. Bölümü Bursa/TÜRKİYE

** Sakarya Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu Sakarya/ TÜRKİYE

Bu çalışmada farklı bir yaklaşımla optimum siklon boyunun tahmini ve bağlı olduğu bazı parametrelerin etkisi kuramsal olarak incelenmekte ve sonuçlar Zhu ve Lee (1999) ve Leineweber (1967)'in deneysel sonuçları ile karşılaştırılmaktadır. Teğetsel girişli siklona ait karakteristik boyutlar Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1.
Teğetsel girişli siklonda karakteristik boyutlar

2. SIKLONLARDA GİRDAP UZUNLUĞU

Siklon ayırıcılarda oluşan girdabın değişik parametrelere bağlı olarak belli bir uzunluğa kadar ilerleyebileceği genel olarak bilinmektedir. Bu uzunluk doğal girdap boyu olarak tanımlanmaktadır. Siklon boyunun daha uzun olmasının siklon performansı açısından olumlu bir etkisi olmayacaktır. Buna karşılık bu girdap uzunluğunun belirlenmesi de kolay görünmemektedir. Bu alanda yapılan çalışmalarda genelde geometrik parametreler ön plana çıkmaktadır. Doğal girdap uzunluğu için yapılan ilk çalışmalardan biri Alexander (1949) tarafından yapılan çalışmadır. Bu çalışma sonucuna göre girdap uzunluğu

$$L_v = 2.3 D_2 \left(\frac{D_1^2}{Ag} \right)^{0.333} \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada girdap uzunluğu L_v , giriş kesit alanı Ag , çıkış borusu kesit alanı A_2 ve diğerleri şekilde verildiği gibidir. Sonuçta siklon boyunu belirleyici faktör olarak giriş ve çıkış ve kesitleri siklon çapı belirleyici görünmektedir. Bu sonuç tahminlerinin yeterli olmadığı bir çok araştırmacı tarafından gözlenmiş ve yeni araştırmalar yapılmıştır. Bu kapsamda Brayant ve diğ. (1983) tarafından

$$L_v = 2.0 D_1 \left(\frac{Ag}{A_2} \right)^{0.5} \quad (2)$$

bağıntısı önerilmiştir. Bu bağıntıda da yine benzer geometrik parametreler ön plana çıkmış görünmektedir. Diğer bir çalışmada Ji ve diğ. (1991) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmanın sonucuna göre girdap uzunluğu

$$L_v = 2.2 D_1 \left(\frac{Ag}{A_1} \right)^{0.36} \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{2.25} \quad (3)$$

şeklinde hesaplanabilir. Bütün yaklaşımlarda aynı parametrelerin farklı şiddette ve farklı yönlerde etki ettiği görülmektedir. Bu durum çalışma şartlarından, kullanılan geometrilerden ve geometri aralığından kaynaklanan bir durum olup her birinin olumlu sonuç verebileceği şartlar olabilecektir. Bu çalışmaların il-

ginç bir yöne sadece belli geometrik parametrelere bağlı görünmesidir. Oysa çalışma şartlarının önemli etkisi olacağı düşünülebilir. Bu çerçevede yapılan bazı deneysel veriler (Zhu ve Lee (1999)) ile bizim yaptığımız deneysel çalışmalarda ki gözlemlerimiz debi veya giriş hızının doğal girdap uzunluğu üzerinde etkili olduğunu açıkça göstermektedir. Bunun dışında akış özellikleri ve ortalama pürüzlülük etkili parametreler olarak düşünülebilir. Bu hususta bazı deneysel gözlemlerden (Özkoca (2001)), aynı giriş hızında farklı ortalama sürtünme katsayılarının girdap boyuna etkili olduğu, açık olarak gözlenebilmiştir.

Siklonlarda toplam verim veya kritik çap genel kanaat olarak siklon boyunun uzaması ile artmakta ve basınç kayıpları azalmaktadır. Bununla birlikte Alexander (1949) ve Zhu ve Lee (1999) gibi bazı araştırmacılar tarafından yapılan deneysel çalışmalardan durumun böyle olmadığı, siklonlarda verimin siklon uzunluğu ile artışının sınırlı olabileceği anlaşılmaktadır. Siklonlarda verim azalışı doğal girdap uzunluğundan daha uzun siklon olmasından kaynaklanabileceği gibi siklon boyunca ortalama hızın azalmasından da kaynaklanabilir.

Siklonlarda doğal girdap uzunluğunun etkisi siklondaki ortalama hızın azalmasından sonra olması durumu daha öncelikli ve önemli olabilir. Sonuçta siklonların doğal girdap uzunluğundan daha kısa yapılması gerekir. Bu durumda öncelik verimin yüksek olduğu uzunluğun veya aralığın belirlenmesi şeklinde ortaya çıkar. Ancak bu durumda basınç kayıpları yüksek olabilir. Böyle bir sonuç ortaya çıktığında verim ve basınç kayıplarının optimizasyonu üzerinde çalışma yapmak gerekir.

3. SIKLONLARDA SIKLON UZUNLUĞUNUN VERİME ETKİSİNE TEORİK YAKLAŞIM

Gerçekte teğetsel veya eksenel olması girdap uzunluğu açısından önemli olup burada ele alınacak yaklaşım özellikle teğetsel giriş için düşünülmeyle birlikte iki giriş hali için kullanılabilir. Böyle bir siklon içerisinde akışkanın temasta olduğu yüzey tarafından akışa direnç gösterilmekte ve akış boyunca hız ve akış profili değişmektedir. Böyle bir ortamda radyal yönde hareket eden parçacığa uygulanan net kuvvet de sürekli değişmektedir. Bu şartlarda hareketi takip ederek parçacığın cidara ulaşması için gerekli uzunluk elde edilebilir.

Parçacığın radyal yönde hareketinde herhangi bir x noktasında radyal yönde sanki-dengeli bir hareket yaptığı ve akış kesiti boyunca ortalama sabit bir teğetsel ve radyal hızla sahip olduğunu düşünelim. Parçacığın limit hıza ulaşma süresinin çok kısa olduğu ve ihmal edilebileceğini kabul edelim. Bu şartlarda radyal yöndeki hareket merkezci kuvvetlerle hidrostatik ve direnç kuvvetleri dengesinden elde edilebilir. Bu yaklaşımda ($\rho_p \gg \rho$) kabulü ile hidrostatik kuvvetler ihmal edilerek,

$$m_p \frac{V^2}{r} = C_D A_{ke} \rho \frac{V_r^2}{2}$$

dengesinden direnç katsayısına bağlı olarak radyal hız

$$V_r = V \left[\frac{4\rho_p d}{3\rho C_D r} \right]^{0.5} \quad (4)$$

şeklinde elde edilir. Hareketin stoks bölgesinde olduğu ($Re_r < 1$ kabul edilirse $C_D = 24/Re_r$ olmak üzere radyal hız

$$V_r = V^2 \left[\frac{\rho_p d^2}{18\mu r} \right] \quad (5)$$

değerini alır. Burada m_p , ρ_p ve d parçacığın kütlesi, yoğunluğu ve çapı, V ve V_r parçacığın teğetsel ve radyal hızı, ρ ve μ akış ortamının yoğunluk ve dinamik viskozitesidir. Parçacığın siklon eksenine uzaklığı ise r ile verilmiştir. Buna göre l uzunluğunda siklonda a giriş genişliğinde yolu radyal yönde alabilmesi için geçen zaman t_1 ve ortalama bir teğetsel hızda siklon boyunca hareket eden parçacığın siklon ucuna ulaşma süresi t_1 kabul edilirse d çapında parçacığın tutulabilmesi için parçacığın siklon ucuna ulaşmaya kadar a

genişliğinde yolu alıp cidara ulaşması gerekir. Kritik durumda bu iki sürenin eşit olması gereği göz önüne alınırsa radyal hız

$$t_r = \frac{a}{V_r} = t_l = \frac{l}{V}$$

$$V_r = V \frac{a}{l}$$
(6)

şeklinde elde edilir. Buradan hareketle radyal hız yerine teğetsel hız cinsinden değeri yerine yerleştirilirse, siklon tarafından tutulabilecek kritik parçacık çapı

$$d_k = \left(\frac{18\mu ar}{\rho_p} \right)^{0.5} \left(\frac{1}{Vl} \right)^{0.5}$$
(7)

olarak elde edilir. Bu bağıntıda hidrostatik kuvvetler, Cunningham düzeltmesi Parker (1993) ve başka faktörlerde göz önüne alınarak daha farklı bağıntılar elde etmek mümkündür. Daha gelişmiş modellerde kullanılabilir. Bununla birlikte çalışmanın amacı açısından bu basit yaklaşım kullanılmıştır. Buradan elde edilen sonuca göre tutulabilecek parçacık çapı siklonun boyu ve hızının karekökü ile ters orantılıdır [$d_k \approx (Vl)^{0.5}$]. Siklon boyunca hareketinde ortalama teğetsel hızın sabit olmayıp değiştiği deneysel gözlemlerden Gupta et. al. (1984) vb. bilinmektedir. Bu hareketin sabit ivmeli bir hareket olduğunu kabul edelim. Bu ivmenin değeri (B_n) giriş (V_0) ve koni ucu hızlarına (V_3) ve siklon boyuna (L) bağlı olarak (Avcı ve Karagöz (2001)),

$$B_n = \frac{V_3^2 - V_0^2}{2L}$$
(8)

şeklinde tanımlanabilir. Bu akış sırasında ivmeleme ve akış alanından olan kaçaklar nedeniyle akış kesitinde değişiklik olmaktadır. Bu değişimin sadece a giriş genişliğinde meydana geldiğini ve düzgün değişim gösterdiğini kabul ederek giriş genişliği ile koni çapı arasında akış genişliğinin (a_1),

$$a_1 = a \left[1 + \left(\frac{D_3 - a}{a L} \right) L \right]$$
(9)

şeklinde değiştiğini kabul edelim (Avcı ve Karagöz (2001)). Bu kabulden hızların tahmini için akış alanından ayrılan kısmının hesaplanması gerekmektedir. Akış alanının iç yüzeyinden olan ayrılmaları etkileyen ana faktörler olarak akış alanına bitişik akışkanla olan sürtünmeler ile cidar boyunca olan sürtünmelerin oluşturduğu direnç sayılabilir. Bunlardan ikincisi diğerine göre önemli olduğundan olayın cidar yüzey direnci ve yerel dirençlerden kaynaklandığını düşünmek mümkündür. Bu düşünceden debi kayıplarının dirençle orantılı olarak değiştiğini kabul ederek α_f bir orantı sabiti olmak üzere dirençleri faning bağıntısına bağlı olarak ifade edecek olursak sürtünmelerle kaybedilen enerjinin akış alanından ayrılan akışkanın kinetik enerjisiyle orantılı olacağı varsayımından hareketle

$$-\frac{V^2}{2} dn = \alpha_f m \frac{f_0 V^2}{2a_1} dL$$

diferansiyel denklemi yazılabilir. Burada f_0 ortalama sürtünme katsayısı, m kütleli debi, V mutlak hız ve L girişten olan aksel uzaklıktır. Bu denklemde akış alanı kesiti tanımları yerleştirilir ve denklem çözülürse, sabit yoğunlukta akış halinde siklon uzunluğu ile debi değişimi arasındaki ilişki için

$$\frac{Q_l}{Q_0} = \left[0.1 \frac{D_3}{a} \right] \left(\frac{\alpha_f f_0 L}{a - 0.1 D_3} \right)$$
(10)

bağıntısı elde edilir. Burada Q_0 girişte ve Q_l ise L konumunda hacimsel debidir. Bu bağıntıdan siklon koni ucunda ulaşılabilir hızı veya maksimum hızı tahmin etmek mümkündür. Diğer taraftan akışı

tanımlayacak ortalama hız ise süreklilik denkleminde elde edilir. Sonuçta ayırma verimini tanımlamak için kritik çap esas alınacak olursa, kritik parçacık çapının d_k , hız ve siklon uzunluğuna bağlı ifadesi

$$d_k = \left[\frac{18\mu ar}{\rho_p} \right]^{0.5} \left\{ V_0 \left(\frac{a}{a_1} \right) L \left[0.1 \frac{D_3}{a} \right] \left(\frac{\alpha_r f_0 L}{a - 0.1D_3} \right) \right\}^{(-0.5)} \quad (11)$$

halini alır. Burada $r=D_1/2$ ve ρ_p parçacık yoğunluğudur. Bu bağıntıda ortalama akış kesiti (a_1 b) şeklinde tanımlanır, a_1 akış alanı genişliği olarak alınır ve bunun giriş ve çıkış kesitleri dışındaki boyutlardan bağımsız olduğu düşünülürse kritik çap bağıntısını

$$d_k = C_{sa} (L)^{(-0.5)} \left[0.1 \frac{D_3}{a} \right] \left(\frac{-0.5\alpha_r f_0 L}{a - 0.1D_3} \right) \quad (12)$$

haline dönüştürmek mümkündür. Burada C_{sa} sabiti değişken olmayan çarpım halindeki diğer parametrelerin çarpımını ifade etmektedir. Bu bağıntıdan verimi maksimum etmek için veya kritik çapı minimum yapmak için aynı boyut oranlarında gerekli siklon uzunluğu elde edilebilir. Sabit akış şartları ve boyut oranlarında kritik çapın siklon boyu ile değişimi için sınır değerlerin olup olmadığı test edilebilir. Bu amaçla $d_k=f(L)$ fonksiyonunun 1. türevi sifıra eşitlenir ve L değeri çekilirse

$$L = \frac{a - 0.1D_3}{\alpha_r f_0 (\ln x)} \quad (13)$$

sonucu elde edilir. Burada $x = 10a/D_3$ olup L değeri daima pozitif olduğundan fonksiyonun bir minimum noktası olduğu anlaşılmaktadır. Buna göre kritik çap, belli bir L değerinde minimum olmakta veya verim maksimum olmaktadır. Bu sınır değer bundan sonra L_t simgesi ile gösterilecektir.

Bu yaklaşım sonucuna göre giriş, çıkış ve akış şartlarına veya sürtünme kayıp katsayısına ve bunun içinde değerlendirilebilecek yerel kayıplara bağlı olarak gerekli siklon uzunluğu değişecektir. Siklon içinde koni ucuna kadar akışın devam ettiği öngörülmekle birlikte doğal girdap uzunluğu yaklaşımı göz önüne alındığında gereğinden çok uzun siklonlarda koni ucuna akışın ulaşmadığı görülmektedir (Girifiths ve diğ. (1996)). Bu durumda benzer akış profilinin oluşup oluşmayacağı veya bu durumda koni ucu çapının ne olacağı üzerinde çalışmak gerekmektedir.

Siklonlarda akışın koni ucuna ulaşmadığı durumlarda akışı sınırlayan parametrenin belirlenmesi, çıkış kanalı çapı ile koni ucu çapı arasındaki ilişkinin belirlenmesi doğal girdap uzunluğunun bulunması açısından önemli görülmektedir. Doğal girdap uzunluğunda akışı sınırlayan faktörün iç konide oluşan negatif basıncın dış akış alanında oluşan kinetik basınçla dengelendiği noktada oluştuğu dolayısıyla çıkış kanalı çapının iç girdap merkezindeki negatif basınca etkisinden dolayı önemli olduğu düşünülmektedir.

Akış alanı boyunca ortalama sürtünme katsayısı tanımı zor bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada ortalama giriş hızı V_0 , ortalama akış genişliği a_0 , pürüzlülük ve akışkan viskozitesine bağlı olarak hesaplanmıştır. Ortalama akış genişliği,

$$a_0 = (0.1aD_3)^{0.5} \quad (14)$$

olarak alınabilir. Akış rejimi ise giriş ve çıkış Re sayılarına bağlı olarak belirlenir. Büyük siklonlarda türbülanslı ve tam türbülanslı akış, küçüklerinde ise türbülanslı, geçiş ve laminer akış rejimleri gözlenebilir. Ayrıca bir siklonda birden çok akış rejiminin gözlenmesi de mümkündür (Girifiths ve diğ. (1996), Kenny 1995)).

Sonuçta belirsiz faktörlerden biri de α_r faktörü olup bunun değeri bire yakın alınabilir. Yerel kayıpların etkisi de bu faktör içinde düşünülebilir. Ancak deneysel bir veri yoksa 0.7-1 aralığında bir değer atanabilir.

Siklonlarda bazı boyutlar için diğer değişkenler sabit tutularak benzer hesaplar yapmak mümkündür. Ancak bunun için kullanılan bağıntının düşünülen parametreler açısından iyi tanımlanmış geçerliliği olan bir bağıntı olması lazımdır. Optimizasyon açısından ise basınç kayıplarının da irdelenmesi gerekir. Çünkü çoğu zaman verimin yüksel olduğu geometride basınç kayıpları da büyük olmaktadır. Bu amaçla basınç kayıpları hesabına yönelik bağıntılar kullanmak mümkündür. Avcı ve Karagöz (2000) vb.

4. SONUÇLAR

Siklon boyu ile verim değişimine farklı parametrelerin etkilerinin incelendiği bazı deneysel sonuçlarla bu yaklaşım sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu amaçla son zamanlarda özellikle küçük siklonlar için Zhu and Lee (1999) tarafından yüksek verimli Stairmand siklonu üzerinde yapılan ve farklı hızlarda siklon uzunluğunu değiştirerek elde edilen verimler ile Leineveber tarafından elde edilen deneysel sonuçlar kullanılmıştır.

Stairmand siklonu için elde edilen kritik çap ile diğer uzunluklardan elde edilen kritik parçacık çapı değerleri oranlanarak ($d_{or} = d_i/d_t d_t = f(L_t)$) verilmiştir. Kuramsal olarak elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bir siklonun L_t uzunluğu siklon boyundan bağımsız görünmekle birlikte ortalama sürtünme katsayısı açısından sınırlı olsa boyuna bağımlıdır. Verilen şartlarda sabit f_0 değeri için $L_t \approx 4D_1$ olarak elde edilmiştir. Ancak kritik çap hesaplarında sürtünme katsayıları her bir uzunluk için ayrıca hesaplanmıştır. Bunun yanında Cunningham düzeltmesi (Parker (1993)), siklon ortalama çapı vb faktörler göz önüne alınmamıştır. Bu nedenle deneysel değerlerden sapma beklenen bir durumdur. Sonuçlar Tablo 1’de görülmektedir. Sonuçlardan görüldüğü gibi standart siklon boyunun artması veya azalması halinde parçacık çapı büyümekte dolayısıyla verim azalmaktadır. Gerek deneysel ve gerekse teorik sonuçlar birbiri ile uyumlu görülmekte ve benzer eğilim elde edilmektedir. Diğer taraftan giriş hızının artması ile sürtünme katsayısındaki değişime bağlı olarak L_t uzunluğunda değişim beklenmekte ancak siklon boyu ile olan değişim benzer kalmaktadır.

Tablo 1. Yüksek verimli Stairmand siklonunda 13.4 m/s hava giriş hızında boyutsuz siklon uzunluğu ile kritik çap oranının değişimi. (Zhu and Lee 1999)

L/L_t	deneysel d_{or}	hesap d_{or}
0.81	1.20	1.12
1.00	1.00	1.00
1.19	1.33	1.27
1.38	1.40	1.38
1.75	1.73	1.58

Aynı siklonda giriş hızının düşük değerlere indirilmesi veya daha yüksek değerlere ulaştırılması halinde sürtünme katsayısının değişmesinden dolayı optimum uzunluğun daha küçük veya daha büyük değerler alacağı açıktır. Buradan çalışma parametrelerinin en verimli siklon uzunluğuna önemli derecede etki ettikleri anlaşılmaktadır. Sonuçta önerilen siklonun geometrisinin veya uzunluğun deney şartlarına benzer durumlarda geçerli olduğu söylenebilir. Buna göre büyük hızlarda siklonu uzatmak ve düşük hızlarda siklonu kısaltmak daha yararlı olabilir. Bu sonuç pratikte küçük siklonların daha kısa olması ve büyüklerin daha uzun olmasının nedenlerinden birini izah eder. Tablo 2’de Leineveber (1967) tarafından elde edilen deneysel sonuçlar ve karşılaştırma görülmektedir.

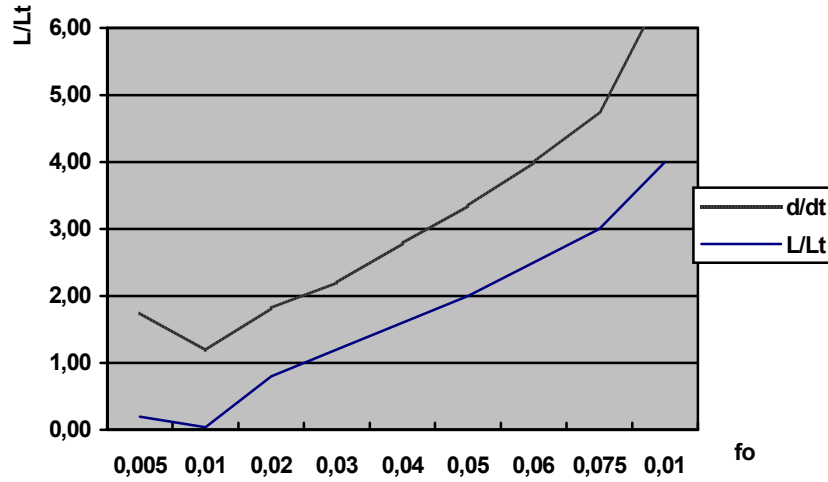
Tablo 2. Leineveber (1967) siklonu için (Avcı (1985)) kritik çap oranının kritik Uzunluk oranlarına bağlı olarak değişimi ($D_3=0.5D_1$)

L/D_1	$a/d_1=0.1 (L_t/D_1=6.0)$		$a/d_1=0.3 (L_t/D_1=10.2)$	
	Deneysel d_{or}	Hesap d_{or}	Deneysel d_{or}	Hesap d_{or}
2.17	1.49	1.44	1.68	1.55
3.42	1.28	1.27	1.33	1.27
5.92	1.04	1.14	1.05	1.06

Siklon giriş genişliği gerek sürtünme katsayısına üzerinde ve gerekse bağımsız olarak sonuca etki etmektedir. Bu tablodan görüleceği gibi giriş genişliği küçüldükçe limit uzunluk küçülmekte, büyüdüğünde

ise artmaktadır. Diğer taraftan giriş genişliğinin artması ile uzunluk etkisi büyümektedir. Burada verilen sonuçlardan bir limite yaklaşıldığı anlaşılmakta ancak limit uzunluktan daha kısa siklonlar kullanıldığından bu sınır Leineveber (1967)'in deneysel sonuçlarından görülmemektedir.

Pürüzlülüğün etkisi için yeterli deneysel veri elde edilemediğinden sadece teorik olarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Farklı pürüzlülüklerin sürtünme katsayısını değiştirdiği düşünülerek hesaplama yapılmış ve sonuçlar Şekil 2'de verilmiştir. Şekilden anlaşılacağı gibi pürüzlülük, sürtünme direncini artırmakta dolayısıyla ortalama hızı düşürmektedir.



Şekil 2.

Pürüzlülüğün limit siklon uzunluğuna ve verime etkisi (Y.V. Stairmand siklonu için farklı pürüzlülüklerde elde edilen sürtünme katsayılarında hesap yapılmıştır)

Sonuçta pürüzlülüğün artması ile belli bir değerden sonra verim ve limit siklon uzunluğu azalmaktadır. Verimin artırılması için yüzeylerin mümkünse pürüzsüz olması gerekir. Mevcut bir siklon için ise verimi maksimum yapacak bir pürüzlülük bazı hallerde oluşturulabilir.

Pürüzlülük için verilen sonuçlar sürtünme kayıp katsayısı için de geçerlidir. Değişik siklon geometrileri için benzer olan ancak verimi maksimum yapan değerleri farklı eğriler elde edilebilir. Buradan farklı siklonlar ve çalışma şartları için farklı sürtünme katsayılarının önerilebileceği sonucu ortaya çıkar.

Doğal girdap uzunluğu (L_v) siklonlarda akışın siklon içinde ulaşabileceği aksel uzunluğu tanımlar. Bu uzunluk, değişik teorik ve ampirik yaklaşımlarda giriş ve çıkış kesitlerine bağlı olarak elde edilmiştir. Diğer geometrilerin ve çalışma şartlarının etkisi dikkate alınmamıştır. Bu çalışmada ise $Q_0 = xQ_1$ olduğu şartlarda girdabın iç girdaba dönüştüğü kabul edilmiştir. Bu şartlarda doğal girdap uzunluğu Q_1/Q_0 bağıntısından

$$L_v = \frac{a - 0.1D_3}{\alpha_r f_0} \quad (15)$$

sonucu elde edilir. Burada girişin tanımı ve koni ucu ile çıkış kesiti ilişkisinin iyi tanımlanması gerekir. Bu haliyle Alexander (1949) sonucundan ziyade Brayant ve diğ. (1983) ve Ji ve diğ. (1991) sonucuna benzer davranış göstermektedir. İlave olarak çalışma şartlarının ve yüzey şartlarının da etkisi dikkate alınmaktadır.

Zhu ve Lee (1999) sonuçlarına göre Stairmand siklonu ($b=0.4D_1$) için doğal girdap uzunlukları üstte verilen çalışmalar ile bu çalışma sonuçları için Tablo 3'de verilmiştir.

Tablodan görüleceği üzere bu çalışmaya göre çalışma şartlarına bağlı olarak doğal girdap uzunluğu değişmekte diğerlerinde sabit kalmaktadır. Deneysel çalışmalar da çalışma şartları ve pürüzlülüğün etkili olduğunu göstermektedir. Bu konuda yapılan çalışmalardan biride Özkoca (2001) olup sonucu doğrulamaktadır.

Tablo 3. Yüksek verimli Stairmand siklonu için doğal girdap uzunlukları (Zhu and Lee (1999))

	$L_v, \text{cm} (fo=0.015)$	$L_v, \text{cm} (fo=0.025)$	$L_v, \text{cm} (fo=0.045)$
Alexander	8.1	8.1	8.1
Brayant et al.	3.9	3.9	3.9
Ji et al.	14.1	14.1	14.1
Bu çalışma	33.0	19.8	11.0

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Siklonlarda, genellikle verim ve/veya basınç kaybı açısından en uygun boyut oranları deneysel olarak belirli deney şartlarında elde edilir. Bu siklonların farklı şartlarda kullanımının aynı sonuçları vermeyebileceği açık olarak bu çalışmanın sonuçlarından anlaşılmaktadır. Benzer sonuçların farklı çalışma şartlarında elde edilemeyeceğinden dolayı aynı verimin elde edilmesi için siklonun geometrik oranlarında veya uzunluğunda değişiklik yapılması gereği ortaya çıkmaktadır.

Bu sonuçlardan siklonlarda sürtünme katsayısının gerek verim ve gerek kayıplar açısından önemli olduğu anlaşılmaktadır. Sürtünme kayıplarının artması girdap boyunu ve yolunu da azaltmaktadır. Böylece siklonun tamamı etkin olarak kullanılamamaktadır. Bu nedenle yüzeylerin pürüzsüz yapılması, yerel kayıplardan kaçınılması ve sürtünme yüzeylerinin azaltılması siklon tasarımında göz önüne alınacak önemli hususlardır.

Siklonlarda sürtünme yüzeyinin azaltılması ortalama sürtünme katsayısını düşüreceğinden aynı giriş şartları için daha verimli ve basınç düşümü az tasarımlar elde edilebilir.

Siklonlarda sürtünme ve uzunluk etkisi arasındaki ilişki için geliştirilen model deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında oldukça başarılıdır. Ancak daha gelişmiş verim modeli kullanılarak diğer boyutların etkisini de göz önüne alacak şekilde hesap yapmak mümkündür. Bu şekilde deneysel verilerle daha iyi uyuşan sonuçlar elde edilir. Bu çalışma ile siklonlarda limit uzunluğun ve maksimum verimin varlığı ve bunun kuramsal hesabı basit bir yaklaşımla gösterilmiştir. Netice olarak gerek pratik tasarımlarda ve gerekse kuramsal çalışmalarda bu yaklaşım ve sonuçlardan yararlanmak mümkündür. Daha kapsamlı verim hesabı yaklaşımları kullanılarak Avcı ve Karagöz (2000) vb. başarılı siklon tasarımları yapılabilir.

Doğal girdap uzunluğuna yönelik çalışmalar deneysel verilerle desteklenerek geliştirilmelidir. Burada verilen yaklaşım daha gerçekçi bir temel oluşturabilir.

6. KAYNAKLAR

1. Alexander, R. M. (1949) Fundamentals of cyclone design and operation. Proc. Aus. Inst. Min. Met. NS 152-153, 203-228.
2. Avcı, A., (1985) Hava Kirliliğinde Siklonların Rolü ve Baca Gazını Siklonla Temizleme Çabası, İTÜ Fen Bilimleri Enst. Yüksek Lisans Tezi, Mayıs 1985.
3. Avcı, A. And Karagoz, I. (2000) A Mathematical model for the determination of a cyclone performance. Int. Comm. Heat Mass Transfer 27, 263-272.
4. Avcı, A. And Karagoz, I. (2001) Theoretical Investigation of Pressure losses in Cyclone Separators. Int. Comm. Heat Mass Transfer 28, 107-117.
5. Barth, W. (1956) Berechnung und Auslegung von Zyklonabscheiden auf Grund neuerer Untersuchungen. BWK 8, 1-9.
6. Bryant, H. S., Silverman, R. W. and Zenz, F. A. (1983) How dust in gas affects cyclone pressure drop. Hydrocarbon Process. 62, 87-90.
7. Dietz, P. W. (1981) Collection efficiency of cyclone separators. AIChE J. 27, 888-892.
8. Girifiths, W. D. And Boysan, F. (1996) Computational fluid dynamics (CFD) and empirical modelling of the performance of a number of cyclone samplers. J. Aerosol Sci. 27, 281-304.

9. Gupta, A. K., Lilley, D. C. And Syred, N. (1984) Swirl Flows. Abacus Press, 295-310.
10. Iozza, D. L. And Leith, D. (1990) The logistic function and cyclone fractional efficiency. *Aerosol Sci. Technol.* 12, 598-606.
11. Ji, Z., Wu, X. And Shi, M. (1991) Experimental research on the natural turning length of the cyclone. In *FilTech Europa 91*, 2, 583-589, Karlsruhe, Germany.
12. Kenny, L. C. And Gussman, R. A. (1995) Characterisation and modelling of a family of cyclone aerosol preseparators. *J. Aerosol Sci.* 26, S777-S778.
13. Lapple, C. E. (1951) Processes use many collector types. *Chem. Engineering.* 58, 144-151.
14. Leith, D. And Licht, W. (1972) The collection efficiency of cyclone the particle collectors- a new theoretical approach. *AIChE Symp. Ser.* 68, 196-206.
15. Liden, G. And Gudmundsson, A. (1997) Semi-empirical modelling to generalise the dependence of cyclone collection efficiency on operating conditions and cyclone design. *J. Aerosol Sci.* 28, 853-874.
16. Parker, C. R. (1993) *Aerosol Science and Technology*, McGraw-Hill Inc. New York.
17. Özkoca, Ö., (2001) *Alternatif Siklon Konstrüksiyonlarının Yük Kayıplarına ve Verime Etkisinin İncelenmesi*, UÜ. Fen Bilimleri Enst. Yüksek Lisans Tezi, Bursa, 2001.
18. Stairmand, C. J. (1951) The design and performance of cyclone separators. *Trans Instn. Chem. Eng.* 29, 356-383.
19. Zhu, Y. And Lee, K. W. (1999) Experimental study on small cyclones operating at high flowrates. *J. Aerosol Sci.* 30, 1303-1315.