

OCAK TOZLARININ SU SPREYLERİ İLE BASTIRILMASININ MODELLENMESİ

Modelling of Suppressing Mine Dust by Water Sprays

Geliş (received) 29 Ocak (January) 2008; Kabul (accepted) 04 Nisan (April) 2008

Kutan KORUYAN (*)
Ercüment YALÇIN (**)
Mehmet POLAT (***)

ÖZET

Toz sorunu madencilikte çok önemli bir yere sahiptir. Toz sorunu, insan sağlığına etkilerinden dolayı yeraltı madenciliği çalışmalarında çözümlenmesi gereken bir sorundur. Tozu bastırmak için birçok yöntem bulunmasına karşın, yaygın olarak kullanılan metotlardan biri de tozların su ile spreyleneşidir. Bu çalışmada, toz tanesinin ve su damlasının kurulan bir matematiksel model ile bağılı hareketi incelenmiştir. Damla ve toz yörüngeleri bu model ile gösterilmeye çalışılmıştır. Yeraltı ortam koşulları, damla ve toz çapı, toz yoğunluğu ve toz ve damla yükleri gibi damla veya toz özellikleri değiştirilip incelenmiştir. Ek olarak, farklı koşullar için damlaların nasıl bir verimlilikle tozları bastırabildiği araştırılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Ocak Tozları, Su Spreyleri, Su Damlaları, Matematiksel Modelleme

ABSTRACT

Mine dust problem holds a very important place in mining. In underground mining operations, the mine dust problem needs to be solved for health reasons. Furthermore, there are lots of methods for suppressing dust; one of the widely used is spraying the mine dust with water. In this study, relative motion of a dust particle and a water droplet is examined with a projected mathematical model. With this model, the trajectory of the droplet and the dust particle can be observed. The underground mine conditions and dust or droplet characteristics such as droplet and dust diameter, dust density and, dust and droplet charges have been modified and examined. In addition, for different conditions, how efficiently the droplets can suppress the dust is observed.

Keywords: Mine Dust, Water Sprays, Water Droplets, Mathematical Modelling

(*) Maden Yük. Müh. Dokuz Eylül Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Müh. Bölümü Buca/İZMİR. kutan.koruyan@deu.edu.tr

(**) Prof. Dr. Dokuz Eylül Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Müh. Bölümü Buca/İZMİR.

(***) Prof. Dr. Sardes Nikel Madencilik, Turgutlu/MANİSA

1. GİRİŞ

İşçi sağlığı, çalışma ortamı koşulları ve emniyeti tehdit eden toz oluşumu madenciliğin önemli konularından biridir. Oluşan toz çalışanların sağlığına zarar verirken, iş verimini düşürüp maliyeti de arttırmaktadır. Bunun yanında, yeraltında çalışan makineler üzerinde de ciddi sorunlar yaratabilmektedir. Ocak havasına karışması ile patlayıcı özelliğe sahip olan kömür tozu ise, ileride istenmeyen büyük sorunlara yol açabilmektedir.

Bu nedenle, özellikle yeraltı madenciliğinde oluşan tozun bastırılması veya çalışma ortamından uzaklaştırılması gerekmektedir. Tozun bastırılması için birçok metot geliştirilmiş olsa da yer altı madenciliğinde en çok kullanılan metot tozların su spreyleriyle bastırılmasıdır.

Kuramsal nitelikteki bu çalışmada, belirli varsayımlar altında tozla mücadelede en iyi yaklaşımı ortaya koymak amaçlanmıştır. Kuramsal olarak oluşturulan bu model yardımıyla ulaşılan sonuçlar, pratikte test edilerek uygulanabilirliği kanıtlandıktan sonra en doğru sonucu verebilecektir. Bu yüzden yaratılan modelin yanında, koşulların gerçek dünyada da aynı olması gerekmektedir. Bu çalışmadaki model, gerçek koşullara en uygun şekilde uygulanması için yaratılmıştır.

2. OCAK TOZLARI

Yalçın ve Gürgen (1999) toz oluşumunu "Madencilikte hazırlık, üretim, doldurma, boşaltma, kırma, eleme ve nakliye çalışmaları sırasında cevher ve yan taşın özelliklerine ilişkin toz oluşmaktadır" olarak belirtilmektedir. Hartman vd. (1997) ise, toz tanelerinin çapının 1 ila 100 µm arasında değiştiğini, fakat normal olarak 1–20 µm boyutta olduğunu belirtip, "Gerçek bir olgu olarak 1 µm'nin altındaki taneler sıklıkla oluşmamakta ve çoğunlukla 20 µm'nin üstündeki taneler nispeten çökelmektedir" cümleleriyle tanımlamıştır. Önce ve Saraç (1986) ise, tozun, kaya ve cevher malzemesinin mekanik işlemler sonucu küçük parçacıklara ayrılmasıyla oluştuğunu söyleyerek, "Bu işlemlerin bünye yapısı ana maddesinin aynısı olan, mikroskop ile bile zor görülen küçüklükteki parçacıkların çıplak gözle görülebilen büyüklüğe kadar değişik boyutlarda tozun oluşmasına neden olurlar.

Toz, genel anlamda çapı 1 mm'den küçük hava içinde asılı kalabilen veya zamanla çökebilen parçacıklardır." olarak tanımlanmışlardır.

Polat vd. (1990) ise 10 µm'nin altında kalan havada asılı toz tanelerini solunabilir olduğunu söyleyerek, bu tanelerin çok uzun bir süre havada çökelmeyeceğini ve sonuç olarak işçiler tarafından teneffüs edilip, tozların insan sağlığı için zararlı olacağını belirtmişlerdir.

Bunun yanında, Polat vd.'nin (2001) kuvars, antrasit, taş kömürü ve yüksek uçucu madde içeren taş kömürü ile yaptığı bir çalışmada toz taneleri elektriksel yüklerinin pozitif ve negatif yüklü oldukları gösterilmiş, farklı tane iriliklerinde ve farklı nemlerde nasıl dağılım gösterdikleri açıklanmıştır. Ayrıca, Polat vd. (2000) tarafından mikron boyutunda, değişik süfaktantlar katılan damlacıklar püskürtülürken, havada bu damlacıkların taşıdıkları yükler ölçülmüştür.

Havada asılı toz tanelerinin aglomeratlar halinde olduğu bilinmektedir. Tanelerin aglomerat halinde oluşu basınç ve sıcaklığa bağlı olarak, çok küçük tanelerin daha büyük kütlelerde birleşmesidir. Polat vd. (1990) aglomerasyon miktarının tozun tane fraksiyonunda, -aslında tozun havada asılı olmasında- önemli bir rol oynadığını belirtmişlerdir. Bunun yanında, küçük taneler ne kadar aglomerat halde olurlarsa, o kadar tane irilikleri artacaktır. Bunun yanında, Kaya ve Hogg (1992) toz tanelerinin aglomerasyonun;

- Çökeltme gibi "doğal yolla" tozun azaltılması
- Toz kontrolü için su spreyleri, vs'nin kullanımı
- Akciğerde depolanma özellikleri

üzerinde önemli etkileri bulunduğunu ve aglomeratların varlığının tozun toksik etkisini arttırdığını belirtmişlerdir. Yine Kaya ve Hogg'un (1992) yaptıkları aynı çalışmada açıkça yeraltı kömür madenlerinde havada asılı olan tozların aglomerat halinde olduğu gösterilmiştir. Bunun yanında yaptıkları araştırmada aglomerasyonun miktarı madenden madene ve aynı madende bir konumdan diğerine farklılıklar göstermiştir. Ayrıca, çalışmada aglomerat halinde olan tozların tane irilikleri ölçülen değerlerinin farklı olduğu belirtilmiştir.

Ocak tozları çoğunlukla su spreyleri tarafından bastırılmaktadır fakat bastırma verimi tozun su damlası tarafından tutulması yerine su damlası etrafında hava akımı ile yol alması ile düşük

olmaktadır. Su damlalarının elektriksel olarak yüklenmesi halinde ise, tozların bastırılmasında önemli bir gelişme elde edilmiş olduğu görülmüştür. Su damlalarının elektrik yüküyle yüklenmesi süfaktantlar sayesinde olmaktadır. Kissell (2003) süfaktantların suyun yüzey gerilimini azaltarak, birim hacimdeki daha fazla taneyi mevcut nem ile daha fazla ıslatmasına izin vermiş olduğunu belirtmiş, Chander vd. (1991) ise su damlalarının süfaktant tipine göre toplama verimlerini araştırmıştır. Polat vd. (2000) çalışmalarında, anyonik, katyonik ve anyonik olmayan süfaktantları araştırmıştır. Aynı çalışmada deneysel olarak elde edilen bulgulardan biri, süfaktantlarla yüzey gerilimleri artırılan damlaların çoğunun pozitif yüklü olduğudur.

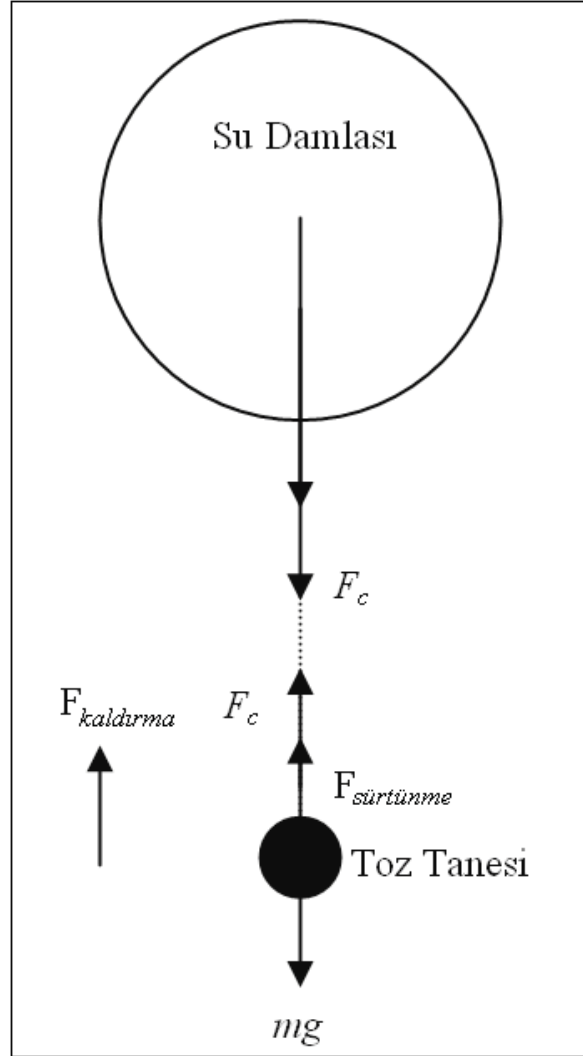
Ocak içindeki zararlı tozların bastırılmasına yönelik birçok metot (etkin bir havalandırma, köpük, ıslatma, filtreler, su spreyleri, vs.) geliştirilse de en çok uygulanan metot su spreyleri kullanılarak yapılan bastırma yöntemidir. Bu yöntemin verimi hiçbir zaman istenilen seviyede olmasa da her geçen gün bu yöntemin geliştirilmesi için çalışılmaktadır.

3. HAVADA ASILI TOZ TANELERİNİN SU SPREYLERİ İLE BASTIRILMASININ MODELLENMESİ

Çalışmada oluşturulan model, havada asılı toz tanelerinin spreylerden püskürtülen su damlaları ile tutulmasının matematiksel modelini içermektedir. Bu model ile ocak ortamı koşulları, tane ve damla özellikleri temel alınarak bir su damlasının toz tanelerini tutması benzeşimi yapılmıştır.

Model; potansiyel akım koşullarında (laminar akış koşullarında), toz tanelerinin küresel olarak kabul edilmesi ile su damlasının toz arasındaki bağıl hız temel alınarak, kuvvetlerin bileşkesiyle net kuvvetin bulunması, buradan yola çıkılarak en son elde edilen eşzamanlı ve yüksek mertebeden diferansiyel denklemlerin sayısal çözümleme yöntemiyle hesaplanıp, toz tanelerinin bağıl hareketinin X ve Y koordinat değerlerinin elde edilmesi şeklinde özetlenebilmektedir. Bu çalışmada önceki yapılan çalışmalar göz önünde tutularak Concha ve Almendra'nın (1979) geliştirdiği her tane iriliğinde doğru sonuçlar veren ve tüm Reynolds sayılarını kapsayan formüller kullanılmıştır.

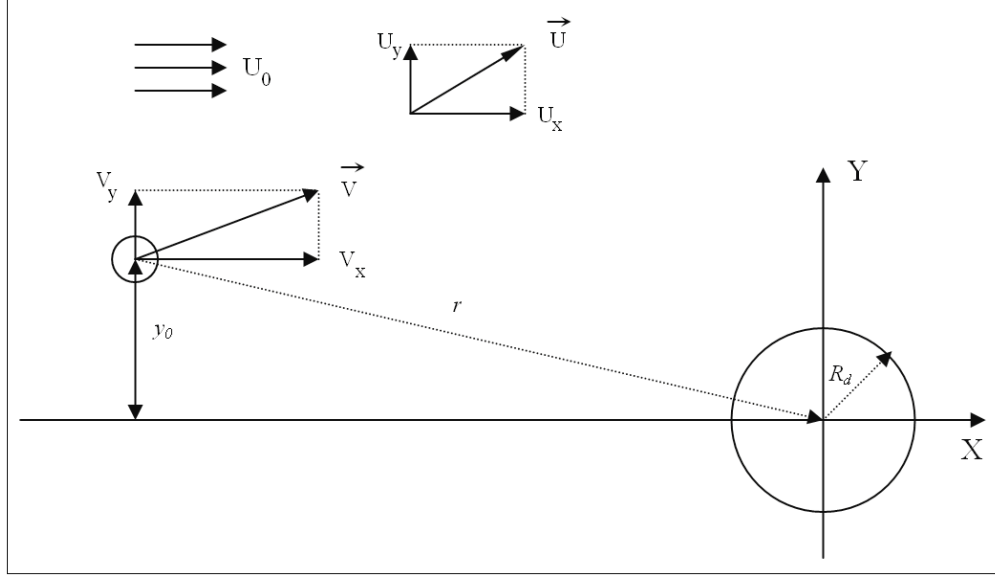
Modelin oluşturulmasında su damlasının ve havada asılı bir toz tanesinin hangi kuvvetlerin etkisinde olduğu önemlidir. Şekil 1 bu kuvvetleri göstermektedir. Şekil 2'de ise toz tanesinin su damlasına göre hareketi verilmiştir.



Şekil 1. Su damlası ve toz taneciğine etkiyen kuvvetler.

Şekil 1'den görüleceği gibi bir su damlası ve bir toz tanesi birçok kuvvetin etkisi altındadır. Bu kuvvetlerin bileşkesi yani net kuvvet $\sum F = m\bar{a}$ ' dan;

$$F_{net} = F_{yerçekimsel} - F_{kaldırma} - F_{sürtünme} + F_{elektriksel} \quad (1)$$



Şekil 2. Toz tanesinin su damlasına göre hareketi [U_0 : Damladan çok uzaktaki hava hızı (m/sn), \vec{U} : Damla etrafındaki vektörel Hız, \vec{V} : Toz tanesinin vektörel hızı, r : Toz ve damla arası uzaklık (m)].

Burada, $F_{yerçekimsel} = mg\vec{x}$ (yerçekimi kuvveti, N) ve $F_{kaldırma} = m'g\vec{x}$ 'dir (havanın kaldırma kuvveti, N). Sürtünme kuvvetini bulmak için de $F_{d_c} = C_D \pi R_p^2 \rho_m u^2 / 2$ bağıntısı kullanılmaktadır.

Ayrıca,

m : Tane kütlesi (kg)

g : Yerçekimi ivmesi (m/sn²)

m' : $\frac{4}{3} \pi R_p^3 \rho_m$ (kg)

\vec{x} : x yönündeki birim vektör (yerçekimi x yönünde kabul ediliyor)

u : Bağlı hız (m/sn)

C_D : Sürtünme Katsayısı (birimsiz)

R_p : Tane yarıçapı (m)

ρ_m : Havanın yoğunluğu (kg/m³)

'dir. Kullanılacak sürtünme katsayısı (C_D) (Concha ve Almendra, 1979)

$C_D = 0,284(1 + 9,06 / R_e^{1/2})^2$ 'dir ve Reynolds

sayısı ise $R_e = 2uR_p\rho_m / \mu$ olarak kullanılmaktadır

[μ : Havanın viskozitesi (kg.m⁻¹.s⁻¹)].

Daha sonra gerekli işlemler yapıldığında sürtünme kuvveti;

$$F_{d_c} = 0,446R_p^2 \rho_m (\vec{U} - \vec{V})^2 + 18,3\mu R_p (\vec{U} - \vec{V}) + 5,71 [R_p (\vec{U} - \vec{V})]^{3/2} (\mu \rho_m)^{1/2} \quad (2)$$

$\vec{U} - \vec{V}$: Damlanın bağlı hızı (m/sn)

ortaya çıkar. Elektriksel yükler toz bastırma veriminde etkili olmaktadır. Toz tutma verimi yüzey gerilimin düşmesiyle artacağından ancak elektrik yükü düşük olan damlalar için mümkün olmaktadır. Kullanılacak elektriksel kuvvet, $F_{elektriksel} = F_c = (Q_d Q_p) / (\epsilon_0 \epsilon r^2)$ 'dir.

Burada;

Q_d : Damlanın elektriksel yükü (C)

Q_p : Tanenin elektriksel yükü (C)

ϵ_0 : Vakumun dielektrik sabiti [C² / (N.m²)]

ϵ : Ortamın dielektrik geçirgenliği (birimsiz)

Böylece;

$$m\vec{a} = mg\vec{x} - m'g\vec{x} - F_{d_c} + \frac{Q_d Q_p}{\epsilon_0 \epsilon r^2} \vec{r} \quad (3)$$

denkleme ulaşılır (\vec{r} : r yönündeki birim vektör).

Daha sonra;

$$\left(\frac{4}{3}\pi R_p^3 \rho_p\right) \frac{d\vec{V}}{dt} = \left(\frac{4}{3}\pi R_p^3 \rho_p\right) g\vec{x} - F_{dc} \frac{Q_d Q_p}{\epsilon_0 \epsilon r^2} \vec{r} - \left(\frac{4}{3}\pi R_p^3 \rho_m\right) g\vec{x} \quad (4)$$

ρ_p : Tane yoğunluğu (kg/m³)

Sadeleştirme işlemleri yapılarak;

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{(\rho_p - \rho_m)}{\rho_p} g\vec{x} - \frac{3F_{dc}}{4\pi R_p^3 \rho_p} + \frac{3Q_d Q_p}{4\epsilon_0 \epsilon \pi R_p^3 \rho_p} \frac{\vec{r}}{r^2} \quad (5)$$

vektörel kuvvet dengesine ulaşılır. Eşitlik boyutsuz olarak ifade edilmek istendiğinde $\vec{U} = \vec{U}/U_0$, $\vec{V} = \vec{V}/U_0$ ve $T = tU_0/R_d$ olarak tanımlanıp, eşitlikte yerine konulursa;

$$\frac{dV}{dT} = \frac{R_d(\rho_p - \rho_m)}{U_0^2 \rho_p} g\vec{x} - \frac{3F_{dc} R_d}{4\pi R_p^3 \rho_p U_0^2} + \frac{3Q_d Q_p R_d}{4\pi \epsilon_0 \epsilon U_0^2 R_p^3 \rho_p} \frac{\vec{r}}{r^2} \quad (6)$$

elde edilir. Boyutsuzlaştırma işlemi (2)'ye uygulandığında ise;

$$F_{dc} = 0,446 R_p^2 \rho_m U_0^2 (\vec{U} - \vec{V})^2 + 5,71 U_0^{3/2} [R_p (\vec{U} - \vec{V})]^{3/2} (\mu \rho_m)^{1/2} + 18,3 \mu R_p U_0 (\vec{U} - \vec{V}) \quad (7)$$

olarak bulunur. Sabitler tek değer altında toplanarak;

$$a = \frac{R_d(\rho_p - \rho_m)}{U_0^2 \rho_p} g, \quad (8)$$

$$b = \frac{3R_d}{4\pi R_p^3 \rho_p U_0^2}, \quad (9)$$

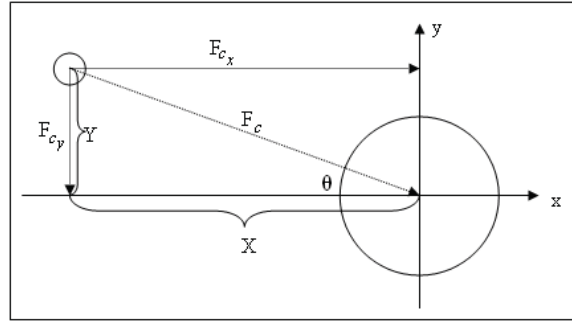
$$c_1 = \frac{3Q_d Q_p R_d}{4\pi \epsilon_0 \epsilon R_p^3 \rho_p U_0^2 r^2} \quad (10)$$

(6)'ıncı eşitlik;

$$\frac{dV}{dT} = a\vec{x} + bF_{dc} + c_1\vec{r} \quad (11)$$

halini almış olur. Daha sonra $\vec{U} = \vec{U}/U_0$ ve $\vec{V} = \vec{V}/U_0 \Rightarrow (\vec{U} - \vec{V}) = U_0(\vec{U} - \vec{V})$ olarak tanımlanarak x ve y yönündeki damlanın bağıl hızı birimsiz olarak $U_0(U_x - V_x)$ ve $U_0(U_y - V_y)$ şeklinde elde edilir.

F_c elektriksel kuvvet yardımı ile (Şekil 3) $X = x/R_d$ ve $Y = y/R_d$ ile beraber $r^2 = x^2 + y^2$ ve $x = XR_d$ ve $y = YR_d \Rightarrow r^2 = R_d^2(X^2 + Y^2)$ olarak elde edilir.



Şekil 3. Toz tanesi ve su damlası arasındaki elektriksel kuvvet

Böylece yeni c sabiti,

$$c = \frac{3Q_d Q_p}{4\pi \epsilon_0 \epsilon R_p^3 \rho_p U_0^2 R_d} \quad (12)$$

olarak bulunur. Elektriksel kuvvet ilişkisi x ve y yönünde (Şekil 3);

$$F_{cx} = F_c \cos\theta = F_c \frac{X}{(X^2 + Y^2)^{1/2}} = c \frac{X}{(X^2 + Y^2)^{3/2}} \quad (13)$$

ve

$$F_{c_y} = F_c \sin\theta = F_c \frac{Y}{(X^2 + Y^2)^{1/2}} \quad (14)$$

$$= c \frac{Y}{(X^2 + Y^2)^{3/2} R_d^2}$$

Daha sonra sürtünme kuvveti x ve y yönünde;

$$F_{d_{cx}} = 0,446 R_p^2 \rho_m U_0^2 (U_x - V_x)^2 \quad (15)$$

$$+ 5,71 U_0^{3/2} [R_p (U_x - V_x)]^{3/2} (\mu \rho_m)^{1/2}$$

$$+ 18,3 \mu R_p U_0 (U_x - V_x)$$

$$F_{d_{cy}} = 0,446 R_p^2 \rho_m U_0^2 (U_y - V_y)^2 \quad (16)$$

$$+ 5,71 U_0^{3/2} [R_p (U_y - V_y)]^{3/2} (\mu \rho_m)^{1/2}$$

$$+ 18,3 \mu R_p U_0 (U_y - V_y)$$

olarak bulunur.

(11)'den x ve y yönündeki hızın zamana göre değişimi;

$$\frac{dV_x}{dT} = a + b F_{d_{cx}} + c \frac{X}{(X^2 + Y^2)^{3/2}} \quad (17)$$

$$\frac{dV_y}{dT} = a + b F_{d_{cy}} + c \frac{Y}{(X^2 + Y^2)^{3/2}} \quad (18)$$

elde edilir. Ayrıca küre etrafından geçen akışkanın x ve y yönündeki potansiyel akış hız denklemleri,

$$U_x = 1 + \frac{Y^2 - 2X^2}{(X^2 + Y^2)^{5/2}} \quad (19)$$

$$U_y = -\frac{3}{2} \frac{XY}{(X^2 + Y^2)^{5/2}} \quad (20)$$

$F_{d_{cx}}$ ve $F_{d_{cy}}$ 'de yerlerine konulduğunda;

$$F_{d_{cx}} = 0,446 R_p^2 \rho_m U_0^2 \left[1 + \frac{Y^2 - 2X^2}{(X^2 + Y^2)^{5/2}} \cdot \frac{dX}{dT} \right]^2 \quad (21)$$

$$+ 5,71 U_0^{3/2} \left[R_p \left(1 + \frac{Y^2 - 2X^2}{(X^2 + Y^2)^{5/2}} \cdot \frac{dX}{dT} \right) \right]^{3/2} (\mu \rho_m)^{1/2}$$

$$+ 18,3 \mu R_p U_0 \left(1 + \frac{Y^2 - 2X^2}{(X^2 + Y^2)^{5/2}} \cdot \frac{dX}{dT} \right)$$

$$F_{d_{cy}} = 0,446 R_p^2 \rho_m U_0^2 \left(-\frac{3}{2} \frac{XY}{(X^2 + Y^2)^{5/2}} \cdot \frac{dY}{dT} \right)^2 \quad (22)$$

$$+ 5,71 U_0^{3/2} \left[R_p \left(-\frac{3}{2} \frac{XY}{(X^2 + Y^2)^{5/2}} \cdot \frac{dY}{dT} \right) \right]^{3/2} (\mu \rho_m)^{1/2}$$

$$+ 18,3 \mu R_p U_0 \left(-\frac{3}{2} \frac{XY}{(X^2 + Y^2)^{5/2}} \cdot \frac{dY}{dT} \right)$$

Ayrıca, Concha ve Almendra'ya (1979) göre bağıl hız için $d^* = d / P$ ve $u^* = U_0 / Q$ ile beraber (d^* : Boyutsuz damla çapı, d : Damla çapı, P : Damlanın karakteristik büyüklük parametresi, u^* : Boyutsuz çökme hızı, Q : Damlanın karakteristik hız parametresi);

$$u^* = \frac{20,52}{d^*} \left[(1 + 0,0921 d^{*3/2})^{1/2} - 1 \right]^2 \quad (23)$$

$$P = \left(\frac{3}{4} \frac{\mu^2}{(\rho_d - \rho_m) \rho_m g} \right)^{1/3} \quad (24)$$

$$Q = \left(\frac{4}{3} \frac{(\rho_d - \rho_m) \mu g}{\rho_m^2} \right)^{1/3} \quad (25)$$

$$U_0 = Q \left\{ \frac{20,52}{d/P} \left[\left(1 + 0,0921 \left(\frac{d}{P} \right)^{3/2} \right)^{1/2} - 1 \right]^2 \right\} \quad (26)$$

olarak U_0 hızı da elde edilmiş olur (ρ_d : Damla yoğunluğu).

Böylece; potansiyel akış denklemleri ile x ve y doğrultularında olmak üzere;

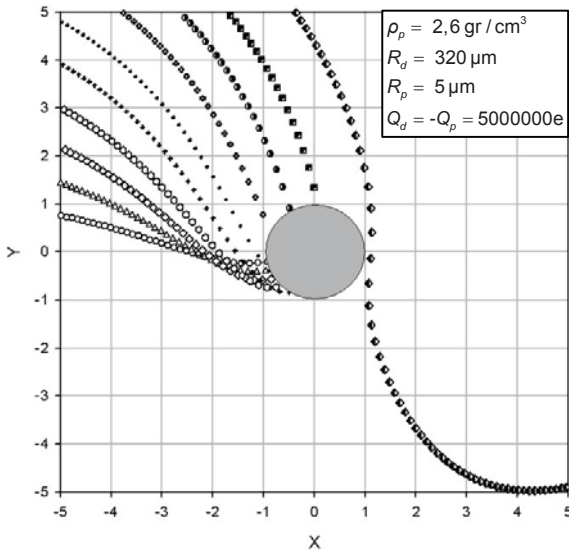
$$\frac{d^2X}{dT^2} = a + bF_{d_{cx}} + c \frac{X}{(X^2 + Y^2)^{3/2}} \quad (27)$$

ve

$$\frac{d^2Y}{dT^2} = bF_{d_{cy}} + c \frac{Y}{(X^2 + Y^2)^{3/2}} \quad (28)$$

nihai yörünge denklemlerine ulaşılmış olur.

Yukarıdaki nihai denklemler görüldükleri gibi birer ikinci dereceden eşzamanlı diferansiyel denklemdir. Bu denklemlerin çözümü mümkün olmadığı için, toz ve damlanın bağıl hareketinin gösterilmesi yazılan bir bilgisayar programı ile elde edilmiştir. Bu bilgisayar programı ile X ve Y koordinatları elde edilmiştir (Şekil 4).



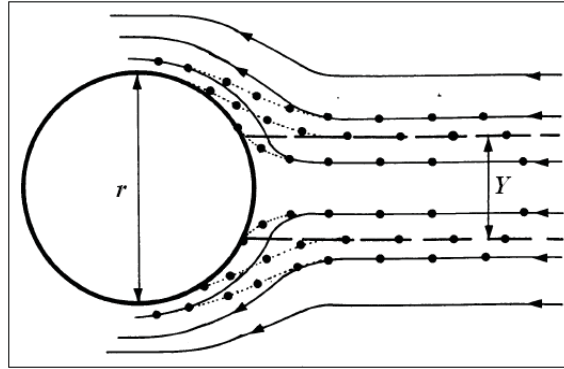
Şekil 4. 320 µm yarıçapındaki bir su damlası ile 5 µm yarıçapındaki bir tanenin havadaki etkileşiminin grafiği.

Yazılan bilgisayar programı ile farklı ortam koşulları (hava yoğunluğu) için; tanenin büyüklüğü, yoğunluğu ve yükü veya su damlasının büyüklüğü ve yükü değiştirilebilmektedir. Böylece program ile farklı koşullar altında, tane veya damlanın farklı özelliklerinde de çalıştırılıp yeni sonuçlar elde edilebilmektedir.

4. MODEL ÜZERİNE ÇALIŞMALAR

Ocak içindeki koşullar, cevheri veya kömürü kesen makine, cevher, kömür veya yantaşın özellikleri toz oluşumunu yakından ilgilendirmektedirler. Bu yüzden, tozların su spreleriyle tutulmasında bu değişkenler göz önünde tutulmalıdır.

Bir su damlasının ne kadar alanı süpüreceği, o spreyn ne kadar verimli olacağına bir göstergesidir. Bir su damlası ne kadar alanı süpürürse o kadar çok tozu tutabilmektedir. Bu yüzden yapılan çalışmada damla çapı, tane çapı, hava yoğunluğu, tane yoğunluğu ve yükler belirli sınır değerlerinde değiştirilerek ne kadar alanı (Y, birimsiz) süpürdükleri, yani damlanın tozları ne kadar bir aralıkta tutabilme kabiliyeti araştırılmıştır (Şekil 5). Şekilde r damla çapıdır (Şekil 5'de Y'nin bir birimi varmış gibi gözükse de modelde Y birimsizdir).



Şekil 5. r çaplı bir su damlasının Y (süpürme alanı) kadar alanı süpürebilmesi.

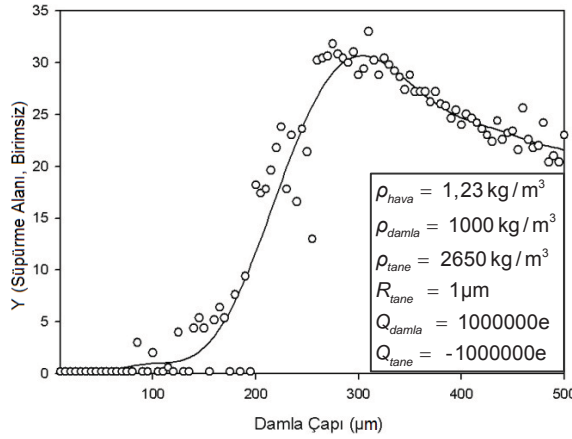
Oluşturulan grafiklerde ise apsis ve ordinat değerleri (damla çapı, Y; yük, Y; vb.) bilgisayar programı ile elde edilen veriler yardımı ile çizilmiştir. Bu değerler farklı koşullarda farklı değerler aldıklarından noktasal olarak grafikte gösterilip, daha sonra bu verilerden elde edilen eğim çizgisi kullanılarak eğriler eklenmiştir.

Model üzerine yapılan bu çalışmalarda değişkenlerin sınır değerleri modelin doğruluğunu gösterecek ve ispatlanmış bazı değerler arasında verilmiştir.

4.1 Damla Çapı Değişimi

Genel olarak su sprelerinden çıkan damla çapları 200–600 µm arasındadır (Xie vd, 2007).

Stairmand'a (1956) göre serbest olarak düşen damlacıkların 600 μm boyutu civarında maksimum çarpışma verimi gösterdiği saptanmıştır. Chander vd.'nin (1991) yaptığı deneysel çalışmalarda ise damla boyutunun 600 μm 'den daha küçük değerlere düşürüldüğünde toplama veriminde bir artış oluşmuştur. Buna göre, küçük damla çapları da değerlendirmeye katıldığında (damla çapı 10–500 μm arasında değiştirildiğinde) damlanın süpürebileceği alanlar hesaplanmış ve Şekil 6'daki grafik elde edilmiştir.



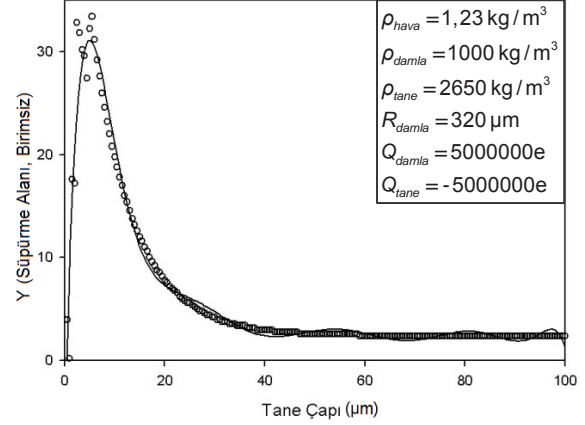
Şekil 6. Damla çapı ve süpürülen alan (Y) ilişkisi.

Damla çapı yaklaşık 10–300 μm arasında değiştirildiğinde genel olarak damla çapı arttıkça süpürme alanının da arttığı gözlenmiştir. 300 μm 'den sonra ise süpürülen alanda bir azalma olmuştur. Süpürme alanındaki bu azalma damlanın çapının artması nedeniyle ağırlığının artması ve böylece yerçekimi etkisiyle damlanın daha çabuk çökmesiyle açıklanabilmektedir. Sonuç olarak, önceden belirlenmiş bu koşullarda toz tutma veriminin en yüksek olması için damla çapının yaklaşık 250–500 μm arası seçilmesi gerekmektedir. Yani, 1 μm 'lik taneler için, su spreyi ağız açıklıklarının yaklaşık bu değerlere yakın değerlerde seçilmesi toz tutmada verimin en yüksek değere ulaşacağını göstermektedir.

4.2 Tane Çapı Değişimi

Çoğunlukla 10 μm 'den büyük ocak tozları yeraltı koşullarında kendiliğinden çökebilmektedir. 5–10 μm arası solunum yollarına ulaşabilmekte fakat dışarı atılabilmektedir. 0,5–5 μm aralığında olan toz taneleri ise akciğere ulaşip dokuyu tahrip etmektedirler. Buna göre; toz tane boyutunun

insan sağlığına etkileri göz önünde tutularak tane çapı 0,5–100 μm arası değiştirilerek Şekil 7 elde edilmiştir.



Şekil 7. Tane çapı ve süpürülen alan (Y) ilişkisi.

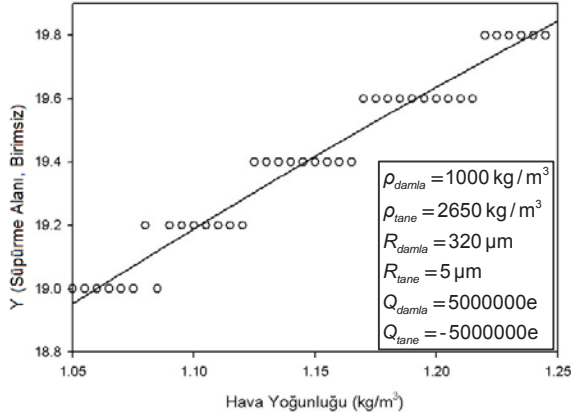
Belirli koşullarda toz tanesinin çapı 0,5–100 μm olarak değiştirildiğinde, 0,5–1 μm arası tozların az bir verimde tutulduğu görülmüştür. 1,5 μm 'den sonra ise süpürme alanında bir artış başlayarak, 5,5 μm 'de süpürme alanları en yüksek değere ulaşmıştır. 5,5 μm 'den sonra damlanın süpürme alanında bir azalma başlamış ve yaklaşık 60 μm 'den sonra damla minimum düzeyde bir süpürme gerçekleştirmiştir. Bu toz tane iriliğinden sonra damlanın bu kadar az bir alanı süpürebilmesi tane ağırlığının çok fazla olmasıyla açıklanabilmektedir. Bunun yanında, tanenin bu büyüklükte olması sebebiyle havada çok fazla askıda kalamayacağını ve belirli bir süre sonra çökeceğini göstermektedir.

4.3 Hava Yoğunluğu Değişimi

Yeraltı maden ocaklarında ocak içi hava yoğunluğu değişiklik göstermektedir. Yaklaşık ocak içi hava yoğunluğu 1,05–1,25 kg/m^3 arası değişmektedir. Bu değişim göz önünde tutulduğunda Şekil 8'deki grafik elde edilmiştir.

Şekil 8'den görüldüğü gibi hava yoğunluğu arttıkça damlanın süpürdüğü alan da artmaktadır. Bu artış 1,217–1,25 kg/m^3 'de en yüksek değere ulaşmıştır. Hava yoğunluğunun 1,05–1,25 kg/m^3 arasındaki artış sırasında süpürme alanındaki artış 0,8 birimlik bir artıştır. Bu yüzden, hava yoğunluğunun değişimi önemli ölçüde toz tutma verimine etki etmemektedir. Ayrıca yazılan bilgisayar programında Y değerleri 0,1 arttırıldığından dolayı (0,1 x 2),

hava yoğunluğu arttıkça Y değerleri 0,2'şer artmaktadır.

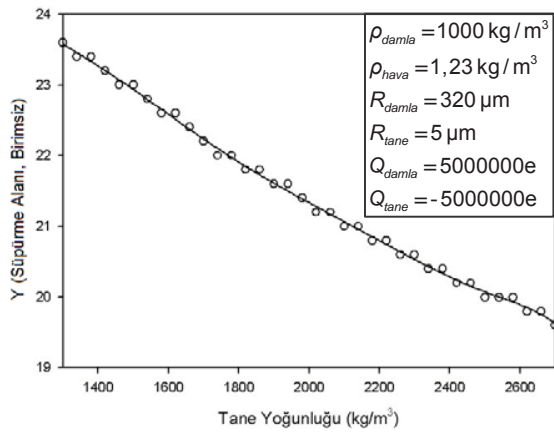


Şekil 8. Hava yoğunluğu ve süpürülen alan (Y) ilişkisi

4.4 Tane Yoğunluğu Değişimi

Kömür üretimi yapılan maden ocaklarında kömürden başka yan kayaç olarak marn ve silikat da üretim sırasında kazılabilmektedir. Kömür ve yan kayaç (taş kömürü, linyit, marn, silikat) yoğunlukları 1,3–2,7 gr/cm³ arasında değiştirilmiş ve su damlasının süpürdüğü alan değişimi Şekil 9'da verilmiştir.

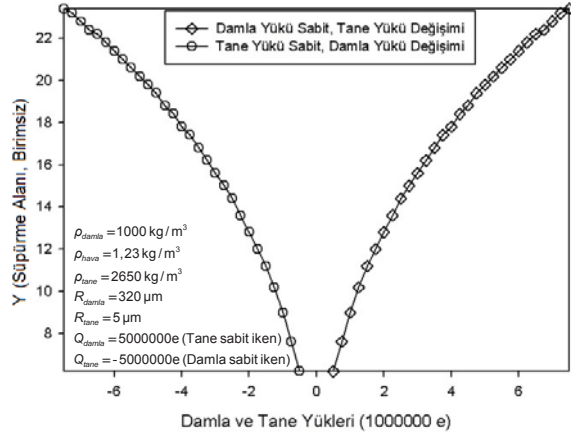
Şekilden görüleceği üzere düşük tane yoğunluklarında bir su damlasının süpüreceği alan fazladır. Yoğunluk arttıkça bu alan azalmaktadır. Bu azalış sebebi ile tozların su spreleri ile bastırılmasında düşük yoğunluklu olan marn ve silikat tozlarının bastırılmasında daha dikkatli olunmalıdır.



Şekil 9. Tane yoğunluğu ve süpürülen alan (Y) ilişkisi.

4.5 Yük Değişimi

Havada bulunan toz taneleri ve su damlalarının elektrik yüklü oldukları bilinmektedir. Buna göre, tane ve damlanın yükleri $\pm 5 \cdot 10^5$ e – $\pm 7,5 \cdot 10^6$ e arasında değiştirilmiştir ve Şekil 10 elde edilmiştir.



Şekil 10. Tane ve damla yükü ve süpürülen alan (Y) ilişkisi.

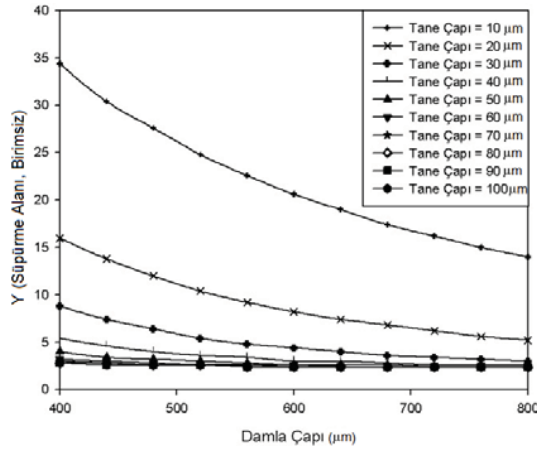
Başta damla yükü sabit tutularak tane yükü değiştirilmiştir. Tane yükü azaltıkça süpürülen alan da azalmaktadır. Tane yükü sabit tutulup damlanın yükü artırıldığında ise yük arttıkça süpürülen alan da artmaktadır.

4.6 Tüm Özelliklerin Birbiri İle Değişimi

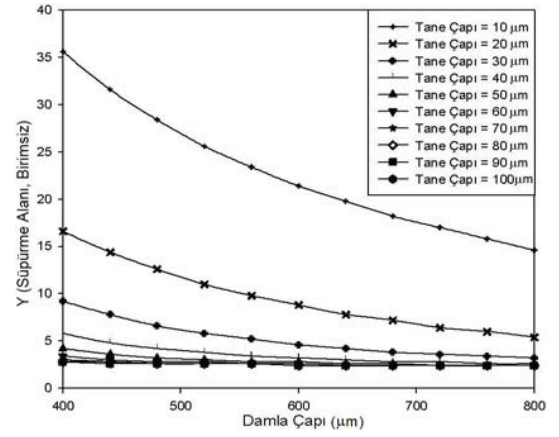
Yapılan incelemede; damla çapı, toz çapı ve hava yoğunlukları ile beraber Y süpürme alanının birbirleri ile değişimi araştırılmaktadır. Bunun için de; hava yoğunluğu 1,05–1,23 kg/m³, tane çapı 10–100 µm ve damla çapı 400–800 µm arasında değiştirilmiştir. 0,06 kg/m³ hava yoğunluğu artırılarak yukarıda belirtilen toz-damla çapı değişimlerine göre bir su damlasının ne kadar alanı süpürdüğü incelenmiştir (Şekil 11-14).

Her bir şekilden de görüleceği gibi, değişen hava yoğunlukları ile süpürme alanlarında belirgin bir değişiklik olmamaktadır. Sadece tane büyüklüğü yaklaşık 10 µm olan tanelerde ve daha küçük damla çaplarında çok fazla olmayan bir artış gözlenmektedir. Ayrıca, küçük taneler daha kolay tutulabilmekte fakat damla çapı arttıkça süpürme alanları da azalmaktadır.

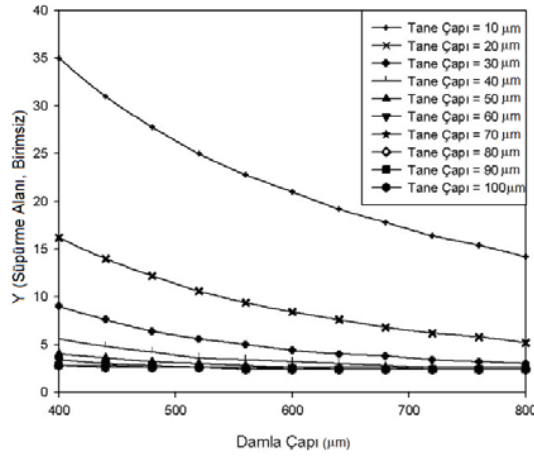
Bunun daha iyi anlaşılması için Y süpürme alanlarının ortalaması alınmış ve toz ve damla büyüklükleri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 15).



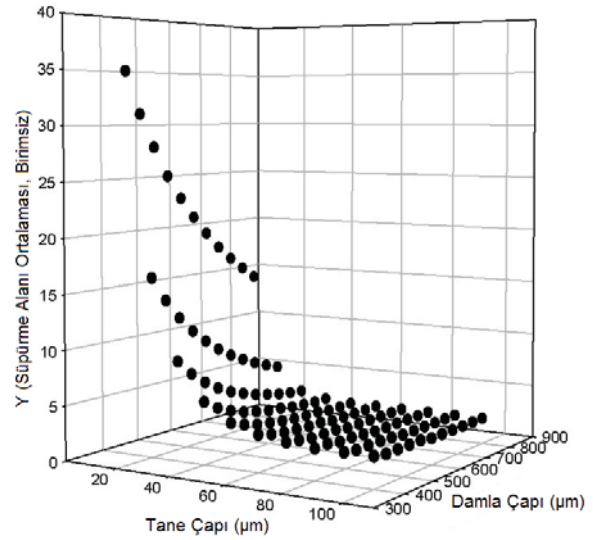
Şekil 11. Hava yoğunluğu $1,05 \text{ kg/m}^3$ iken farklı toz çapları için damla çapı ve süpürülen alan (Y) değişimleri.



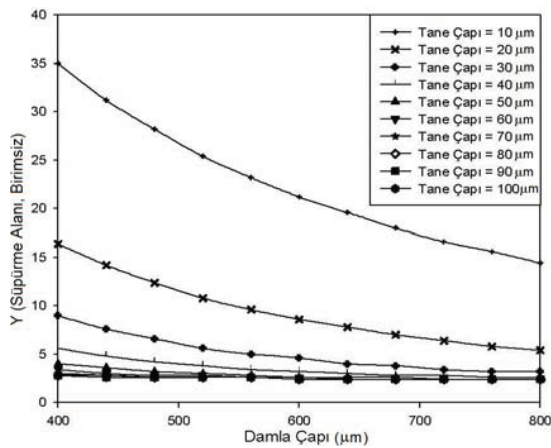
Şekil 14. Hava yoğunluğu $1,23 \text{ kg/m}^3$ iken farklı toz çapları için damla çapı ve süpürülen alan (Y) değişimleri.



Şekil 12. Hava yoğunluğu $1,11 \text{ kg/m}^3$ iken farklı toz çapları için damla çapı ve süpürülen alan (Y) değişimleri.



Şekil 15. Her hava yoğunluğu için süpürülen alan (Y) değerlerinin ortalamaları, toz ve damla çaplarının karşılaştırılması.



Şekil 13. Hava yoğunluğu $1,17 \text{ kg/m}^3$ iken farklı toz çapları için damla çapı ve süpürülen alan (Y) değişimleri.

$1,05\text{--}1,23 \text{ kg/m}^3$ hava yoğunluğu aralığında yapılan incelemede elde edilen grafiklerin birbirine çok yakın sonuçlar vermeleri nedeniyle Y değerleri üzerinde araştırmaya gidilmiş ve elde edilen verilerle hava yoğunluğu ne olursa olsun toz tanelerinin yaklaşık $50 \mu\text{m}$ 'den sonraki tüm taneler için, damlanın süpürdüğü alanın değişmediği görülmüştür. Diğer bir deyişle, farklı hava yoğunlukları ve damla çaplarında Y süpürme alanı değerleri $10 \mu\text{m}$ toz büyüklüğünde çok farklı değerler alırken, tane çapı arttıkça hava yoğunluğu ve damla çapı ne olursa olsun Y değerleri arasındaki fark azalmakta ve en sonunda tüm Y değerleri birbirine eşit olmaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, havada asılı bir toz tanesinin su spreylerinden çıkan bir su damlacığı ile tutulmasının matematiksel modellenmesi yapılmıştır. Bu model ile bir su damlasının toz tanelerini tutması; ocak ortamı koşulları, tane ve damla özellikleri temel alınarak benzeşimi yapılmıştır.

Önceki yapılan çalışmalar göz önünde tutularak Concha ve Almendra'nın (1979) geliştirdiği her tane iriliğinde doğru sonuçlar veren ve tüm Reynolds sayılarını kapsayan formüller kullanılmıştır. Model sonunda damlanın ve tozun bağlı hareket yörünge denklemleri X ve Y koordinatlarını verecek şekilde elde edilmiştir. Elde edilen denklemler birbiri ile bağıntılı, eşzamanlı ve ikinci dereceden diferansiyel denklemler olarak ortaya çıkarılmış, bu denklemlerin çözümü imkânsız oldukları için sayısal çözümlenme yoluyla, yazılan bir bilgisayar programı ile sonuçlar hesaplanmıştır. Ayrıca, yazılan bilgisayar programı yardımı ile ocak içi koşulları, toz ve damlanın özellikleri kullanıcının istediği şekilde değiştirilebilmekte ve farklı sonuçlar elde edilebilmektedir.

Su spreylerinden püskürtülen su damlalarının toz tutma verimi bir su damlasının ne kadar alanı süpürebileceği ile orantılıdır. Bu yüzden çalışmada bazı özellikler sabit tutularak toz-damla özellikleri ve hava yoğunluğu belirli sınır değerleri arasında değiştirilerek ne kadar alanın süpürüldüğü araştırılmıştır.

İlk olarak damla çapı 10–500 µm arasında değiştirilmiş ve 1 µm'lik taneler için optimum damla çapının 250 µm'den fazla olması gerektiği bulunmuştur. Bir başka deyişle spray dizaynında spray ağız açıklıklarının bu değere göre tayin edilmesi gerekliliği görülmüştür.

İkinci olarak toz tane iriliği belirli koşullar altında 0,5–100 µm arası değiştirilerek süpürülen alan araştırılmıştır. 320 µm'lik damla için 0,5–1 µm aralığındaki tanelerin az bir verimle tutulduğu görülmüştür. Yaklaşık 5,5 µm civarlarında ise en yüksek değerde süpürme gerçekleşmiştir. Bu boyuttan sonra süpürme alanı azalmış ve 60 µm'den sonra minimum düzeyde süpürme gerçekleşmiştir.

Diğer bir incelemede hava yoğunluğu 1,05–1,25 kg/m³ aralığında değiştirilmiş ve hava yoğunluğu arttıkça süpürme alanının da arttığı gözlenmiştir.

Fakat bu artış çok az olduğu için yoğunluk değişiminin toz tutma verimine pek de fazla etki etmediği görülmüştür.

Toz tanesi yoğunluğu; taş kömürü, linyit, marn ve silikat temel alınarak 1,3–2,7 gr/cm³ aralığında değiştirildiğinde yoğunluk arttıkça süpürülen alanın da azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca göz önünde tutulması gereken bir başka nokta, çok ince kuvars tozlarının insan sağlığına önemli etkileri olduğu ve yüksek yoğunluklardaki tozların daha az verimle tutulabildiğidir.

Toz tanesi ve damlanın yük değişimi $\pm 5 \cdot 10^5$ e – $\pm 7,5 \cdot 10^6$ e aralığında incelenmiştir. İlk olarak damla yükü sabit tutulmuş ve tane yükü değiştirilmiştir. İncelemede tane yükü azaldıkça süpürülen alanın da azaldığı görülmüştür. Tane yükü sabit tutulup damla yükü değiştirildiğinde ise yük arttıkça süpürülen alanın da arttığı gözlenmiştir.

Tüm özellikler tek tek birbiri ile mukayese edildikten sonra damla çapı, toz çapı ve hava yoğunluğu birbiri ile karşılaştırılmıştır. Hava yoğunluğu 1,05–1,23 kg/m³, tane çapı 10–100 µm ve damla çapı 400–800 µm arasında değiştirilmiştir. Yapılan incelemede değiştirilen hava yoğunlukları ile süpürme alanlarında önemli bir değişim görülmemiştir. Bu yüzden bir sonraki safha için tüm hesaplanan süpürme alanlarının ortalaması alınmış ve yaklaşık 50 µm toz tane büyüklüğünden daha iri taneler için damla çapı veya hava yoğunluğu ne olursa olsun süpürülen alanın değişmediği görülmüştür.

Yapılan çalışmada, toz taneleri küresel olarak kabul edilmiştir. Gerçekte ise tozlar farklı şekillerde olabilmektedir. İleriki çalışmalarda tozların küresel şekilden farklı olarak düşünülerek modele katılması olasıdır.

Ayrıca, önceki yapılan çalışmalarda tozların aglomerat halde olduğu ispatlanmıştır. Bu yüzden, ileriki yapılacak çalışmalarda tozun aglomerasyon özelliğinin hesaba katılabilirliği önemlidir. Aglomerasyondan oluşacak porozite ve yoğunluk farklılıkları bu çalışma kapsamında hesaba katılmadığından, sonraki çalışmalarda bu özellik düşünülerek hesaba dâhil edilmesi önemlidir.

Oluşturulan model belirli varsayımlar altında doğru sonuçlar vermektedir. Ayrıca, model ileriki çalışmalara ışık tutabilecek ve geliştirilebilecek şekildedir. Bunun yanında, modelin

doğruluğunun kanıtlanması ancak deneysel çalışmalarla mümkün olacaktır. Toz tanelerinin küresel kabul edilmesi ve aglomerat halde oluşlarının ihmal edilmesinden ötürü yapılacak bazı deneysel çalışma sonuçları ile tam olarak örtüşemeyebilecektir.

KAYNAKLAR

Chander, S., Alaboyun, A.R. ve Aplan, F.F., 1991; "On the Mechanism of Capture of Coal Dust Particles by Sprays", Proceedings of the Third Symposium on Respirable Dust in the Mineral Industries (Pittsburgh, PA, October 17-19, 1990). Littleton, CO. 193-202.

Concha, F. ve Almendra E.E., 1979; "Settling Velocities of Particulate Systems, 1. Settling Velocities of Individual Spherical Particles", International Journal of Mineral Processing, 5, 349-367.

Hartman, L.H., Muutmansky, J.M., Ramani, R.V. ve Wang Y.J., 1997; "Mine Ventilation and Air Conditionin", John Wiley & Sons, Inc., USA, 77.

Kaya, E. ve Hogg, R., 1992; "In-situ Measurements of Agglomeration of Airborne Dust in Mines", Emerging Process Technology for a Cleaner Environment. SME, Littleton, CO. 259-267.

Kissell, F.N., 2003; "Handbook for Dust Control in Mining" www.cdc.gov/niosh

Önce, G. ve Saraç, S., 1986; "Madenlerde Havalandırma", Anadolu Üniversitesi Basımevi, Eskişehir, 151.

Polat, M., Chander, S. ve Hogg, R., 1990; "Characterization of Freshly Generated Airborne Quartz Dust", Proceedings, International Symposium on Respirable Dust in the Mineral Industries, Pittsburgh, PA, SME, Littleton, Co.

Polat, M., Polat, H. ve Chander, S., 2000; "Electrostatic Charge on Spray Droplets of Aqueous Surfactant Solutions", Journal of Aerosol Science, 31, 5, 551-562.

Polat, M., Polat, H., Chander, S. ve Hogg, R., 2001; "Characterization of Airborne Particles and Droplets: Relation to Amount of Airborne Dust and Dust Collection Efficiency", Particle and Particle Systems Characterization, 18, 1-9.

Stairmand, I., 1956; "Institute of Fuel", 29, 58.

Xie Y., Fan G., Dai J. ve Song X., 2007; "New Respirable Dust Suppression Systems for Coal Mines", Journal of China University of Mining & Technology, 17, 3, 321-325.

Yalçın, E. ve Gürgen S., 1999; "Madenlerde Havalandırma", DEÜ Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi Yayınları, İzmir, 91.