

5. AKIM İÇİNDEKİ CİSİMLERDEN AKIŞ

(Ref. e makaleleri)

(Ref. e_makaleleri) Bir akışkanın, içinde bulunan katı cisim üzerinde akım yönünde meydana getirdiği kuvvete "engelleme = drag" denir. Cismin duvarı akım yönüne paralel olduğunda (Şekil-9a) engelleme kuvveti sadece, duvar kaymasıdır (τ_w). Cisim akış yönüne dik olduğunda (Şekil-9b) en büyük kuvvetle karşılaşır. Ayrıca, duvara normal yönde etki eden akışkanın basıncının da akış yönünde bir bileşeni vardır ve engelleme kuvvetine katkıda bulunur. Bir alan elementi üzerindeki toplam engelleme kuvveti, iki bileşenin (basınç ve kayma kuvvetleri) toplamına eşittir.

Bir kanaldan akışta "sürtünme faktöründen", akım yolu içinde daldırılmış cisimler üzerinden akışta ise "engelleme faktörü"nden söz edilir.

$$\text{sürtünme (f) faktörü} = \frac{\text{kayma gerilimi } (\tau_w)}{\text{hız yüksekliği } (V^2 / 2 g_c) \text{ yoğunluk } (\rho)} = \frac{2 g_c \tau_w}{\rho V^2} \quad (37)$$

$$\text{engelleme } (C_D) \text{ faktörü} = \frac{\text{engelleme gerilimi } (F_D/A_p)}{\text{hız yüksekliği } (u_0^2 / 2 g_c) \text{ yoğunluk } (\rho)} = \frac{2 g_c \tau_w}{\rho u_0^2 A_p} \quad (38)$$

u_0 = akım içindeki cisme yaklaşan akımın hızı ($u_0 = V_0$ kabul edilebilir),

F_D = toplam engelleme kuvveti,

A_p = cismin akıma karşı olan alanı,

F_D / A_p = ortalama engelleme kuvveti/alan dır.

Cisim küresel bir tanecik ise, alan en büyük daireye, $(\pi/4)D_p^2$, eşittir. ($\tau = \text{lb}_f / \text{ft}^2$, $g_c = 32.17 \text{ ft} \cdot \text{lb} / \text{lb}_f \cdot \text{sn}^2$, $\rho = \text{lb}/\text{ft}^3$, $V = u = \text{ft}/\text{sn}$, $F_D = \text{lb}_f$, $A_p = \text{ft}^2$, f = boyutsuz, C_D = boyutsuzdur, D_p = tanecik çapını gösterir).

Engelleme katsayısı (C_D) cismin şekline göre değişir. Küresel bir tanecik için, düşük Reynolds sayılarında engelleme kuvveti, Stokes Kanunu ile verilir.

$$F_D = 3 \pi \frac{\mu u D_p}{g_c} \quad (39)$$

Bunun 1/3 ü şekil engellemesinden, 2/3 ü duvar engelleme kuvvetinden gelir. Yukarıdaki denklemden, yararlanılarak drag katsayısı-Reynolds sayısı bağıntısı yazılır (Şekil-.14 a, b).

$$C_D = \frac{24}{N_{Re,p}} \quad (40)$$

$$(N_{Re,p} = \frac{D_p \rho u_0}{\mu} \quad \text{Denklem-9})$$

Stoks Kanunu, sadece,

$$N_{Re,p} < 1$$

olduğu zaman geçerlidir. Kanunun uygulanabildiği düşük hızlarda, cisim akışkan içinde (akımı bozarak) hareket eder. Reynolds sayısı arttığında (Şekil-.15 a) cismin tam önünde akımda ayrılma olur; yarı-küreyi kaplayan bir iz meydana gelir. Böylece büyük bir sürtünme kaybı ve büyük bir engelleme kuvveti doğar.

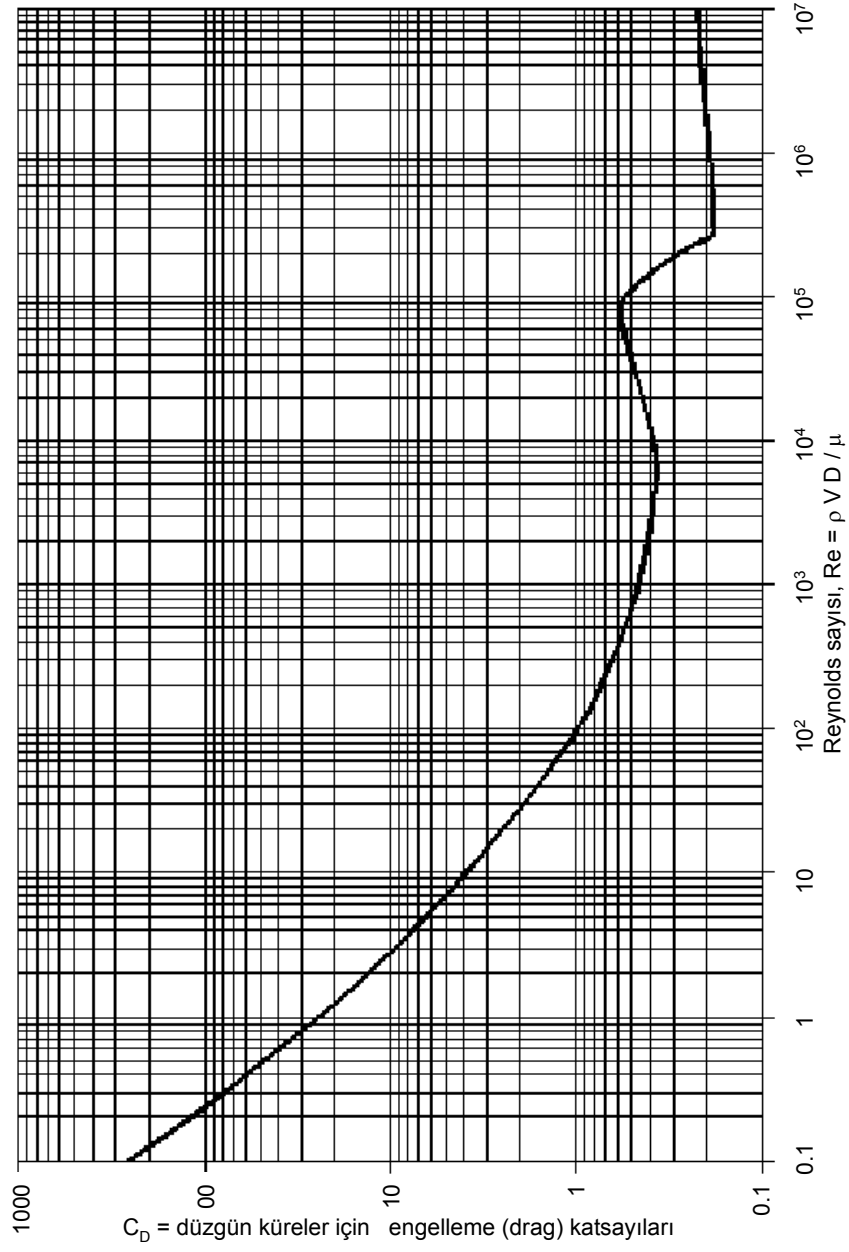
Daha yüksek Reynolds sayılarına çıkıldığında akım türbülens karaktere döner, (Şekil-.15b) sürtünme ve engelleme kuvvetleri azalır;

$$N_{Re} = 250\ 000 \text{ dolayında,}$$

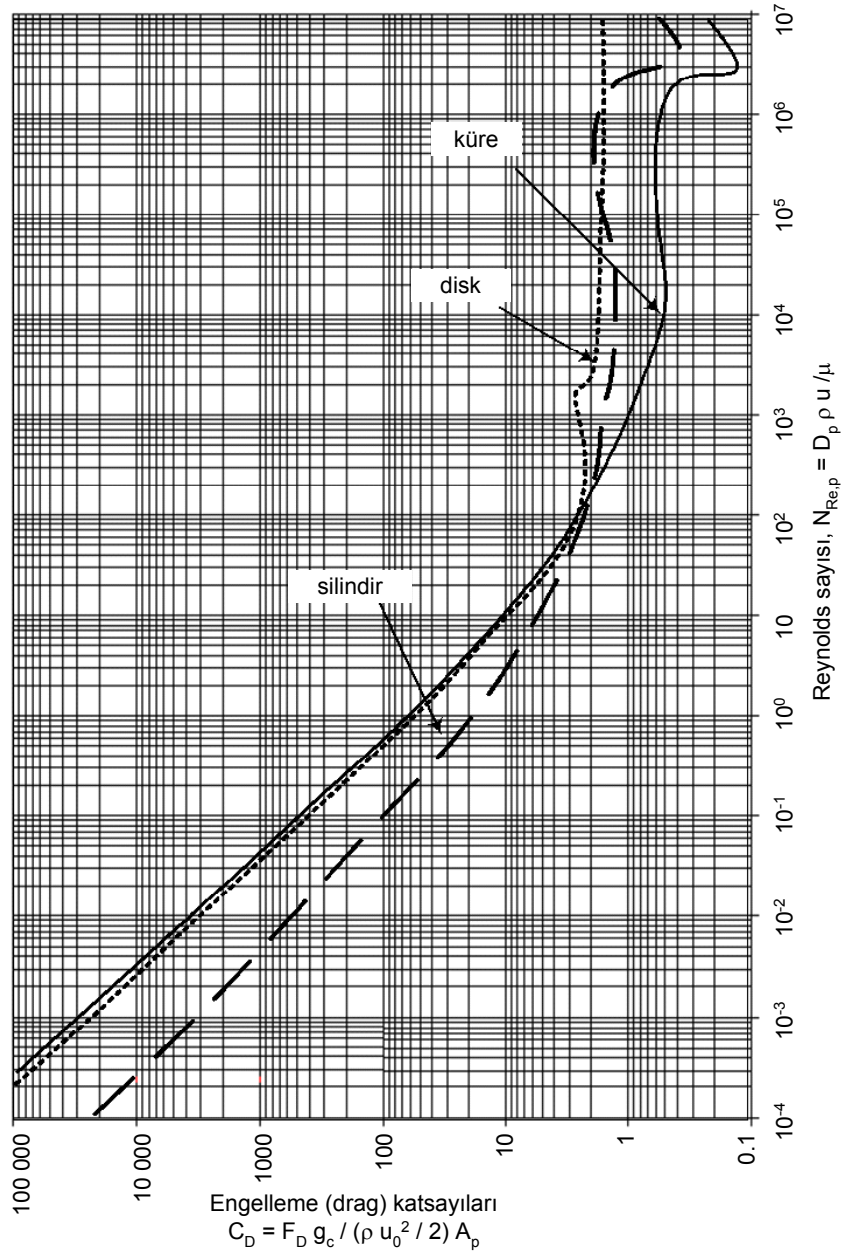
engelleme katsayısı 0.45 ten 0.10 a düşer ve,

$$N_{Re} > 300\ 000 \text{ in üzerinde,}$$

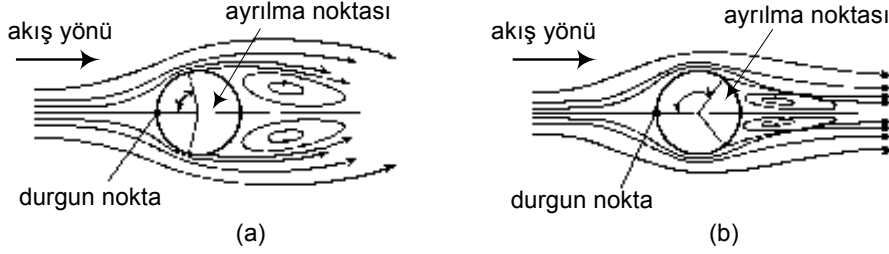
$$C_D = \text{sabit olur.}$$



Şekil-14: (a) Küreler için engelleme katsayıları.



Şekil-14: (b) küreler, diskler ve silindirler için engelleme katsayıları.



Şekil-15: Tek bir küreden geçen akımda ayrılma ve iz oluşumu; (a) laminar akım, (b) türbülent akım

Akışkanlaşma

Dolgulu bir kulede olduğu gibi, bir sıvı veya gazın, düşük hızlarda gözenekli (poröz) katı taneciklerden geçmesi halinde tanecikler hareket etmez, fakat akımda basınç düşmesi gözlenir.

Böyle sabit-yataklı katı taneciklerdeki basınç düşmesi Kozeny-Carman denklemiyle verilir (Laminer akış).

$$\frac{\Delta p g_c D_p^2 \varepsilon^3}{L V_0 \mu (1 - \varepsilon)^2} = 150 \quad (41)$$

Δp = basınç düşmesi ($\text{lb}_f / \text{ft}^2$)

$g_c = 32.17 \text{ ft} \cdot \text{lb} / \text{lb}_f \cdot \text{s}^2$

D_p = küresel taneciğin çapı (ft)

L = yatağın uzunluğu, ft

V_0 = yüzey veya boş-kule hızı, ft/sn

μ = mutlak viskozite, $\text{lb}/\text{ft} \cdot \text{sn}$

ε = porozite veya boşlukların hacim kesri (boyutsuz)

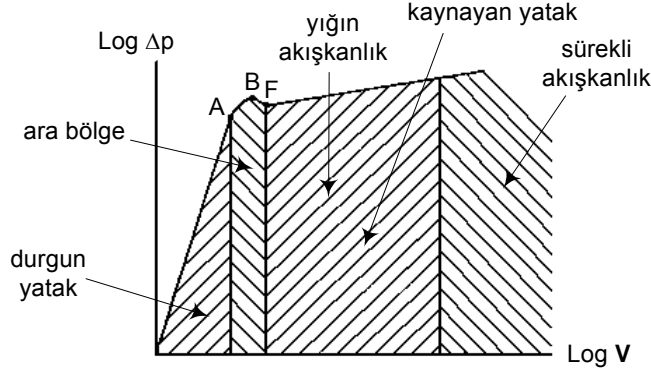
Yüksek Reynolds sayıları için Denklem(41), aşağıdaki Blake-Plummer eşitliği şekline döner.

$$\frac{\Delta p}{L} \frac{g_c}{V_0^2} \frac{D_p \varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)} = 1.75 \quad (42)$$

Akışkanın hızı düzgün bir şekilde artırılırsa taneciklerin artık sabit halde kalamadıkları bir hıza erişilir; bu noktada katı tanecikler akışkan hale geçer.

Örneğin, kısmen ince kumla doldurulmuş kısa ve dik bir tüpü inceleyelim. Tüpün altından çok düşük hızla hava akımı verilsin; hava taneciklerde herhangi bir hare-

ket yaratmadan tüpün tepesinden basıncı azalarak çıkar. Havanın akış hızı yavaş yavaş artırılınsın; hız arttıkka, basınç düşmesi de artar (şekil-.16'da OA doğrusu). Basınç düşmesi, taneciklerdeki ağırlık kuvvetine eşit olduğunda, tanecikler hareket etmeye başlar; bu nokta grafikte A ile gösterilmiştir.



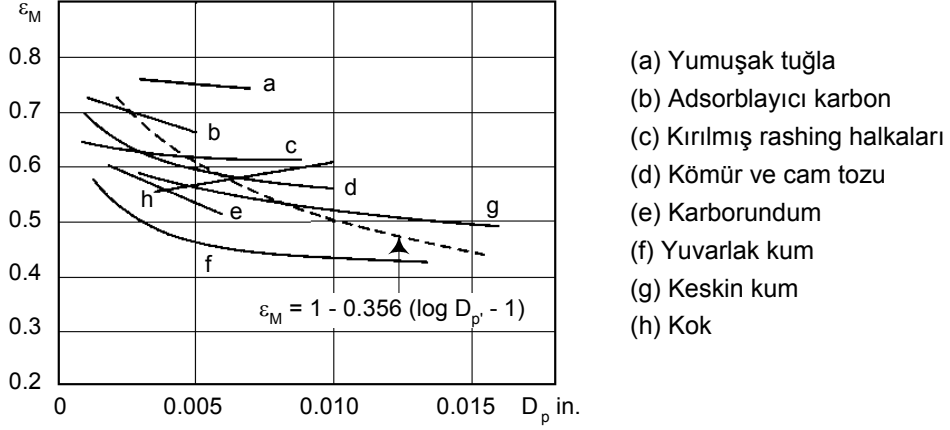
şekil-.16: Akışkanlaşan katılarda basınç düşmesi

Başlangıçta taneciklerin oluşturduğu yatak yavaş yavaş genişler, fakat tanecikler birbiriyle temastadır. Porozite artar, yataktan geçen havanın basınç düşmesi başlangıçtakinden çok daha az seviyelerde yükselir. B noktasına gelindiğinde yatak hala taneciklerle beraber hareket eder. Hız daha da artırıldığında tanecikler birbirinden ayrılır ve akışkanlık başlar. Basınç düşmesi B den F ye kadar azalır. F noktasından sonra taneciklerin hareketi hızlanır, rasgele yönlerde gidiş gelişler başlar ve tüpteki malzeme kaynayan bir sıvıya benzer. Bu şekilde akışkanlaşan katılara "kaynayan yatak" denir.

Minimum Porozite

Akışkanlaşma başlamadan önce yatak bir miktar genişler, porozite (gözeneklilik) artar. Akışkanlaşma başladığında yatağın porozitesine "minimum porozite, ϵ_M " denir. şekil-.17 de çeşitli yatak malzemelerinin minimum poroziteleri görülmektedir. ϵ_M , taneciğin şekline ve byklğine bağlıdır ve tanecik çapı bydkke değeri azalır. D_p' = mikron cinsinden tanecik çapını gösterdiğinde,

$$\epsilon_M = 1 - 0.356 (\log D_p' - 1) \text{ dir.}$$



Şekil-17: Akışkanlaşmada minimum porozite-tanecik büyüklüğü ilişkisi.

Yatak Yüksekliği

Akışkanın hızı, katı yatağın akışkanlaşması için gerekli minimum değerini üzerine çıktığında yatak genişler ve porozite artar. Kabın kesit alanı yükseklikle değişmiyorsa, porozite yatak yüksekliği ile doğru orantılıdır. L_0 = porozite sıfır olduğunda yatağın yüksekliğini, L = akışkan yatağın yüksekliğini gösterdiğinde, porozite (ε),

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L} = 1 - \frac{L_0}{L} \quad (43)$$

Bir koşuldaki porozite, çoğu kez bilinir; örneğin, durgun yatağın (veya minimum akışkanlaşma) porozitesi gibi. Bunu karşılayan yatak yüksekliği de biliniyorsa, yeni bir porozite için yatak yüksekliği aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$L_2 = L_1 - \frac{1 - \varepsilon_1}{1 - \varepsilon_2} \quad (44)$$

1 ve 2, L_1 ve L_2 yüksekliklerdeki porozitelerdir.

Akışkan Yatakta Basınç Düşmesi

Akışkanlaşma olayı başladığında yatak boyunca olan basınç düşmesi, katılar üzerindeki ağırlık kuvveti ile dengededir (zıt yönde). Gerçek basınç düşmesi, elektrostatik ve diğer etkiler nedeniyle bundan biraz daha büyüktür.

1 ft yatak için basınç düşmesi,

$$-\frac{\Delta p}{L_M} = \frac{p_a - p_b}{L_M} = \frac{g}{g_c} (1 - \varepsilon_M) (\rho_p - \rho) \quad (45)$$

Denklem(44) ve (45) ten,

$$-\frac{\Delta p}{L (1 - \varepsilon)} = \frac{g}{g_c} (\rho_p - \rho) = \text{sabit} \quad (46)$$

Akışkan Yataklarda Genişleme

Bir akışkan yatak boyunca yüzey akış hızıyla porozitenin, dolayısıyla yatak yüksekliğinin değişmesi şöyle incelenebilir: Küçük taneciklerden oluşan bir yatak düşünelim. Yataktaki basınç düşmesi Kozeny-Carman denklemiyle (sabit yataklar için) verilsin. Tanecikler çok küçük ve akışkanın hızı düşük olduğundan Reynolds sayısının küçük olduğu kabul edilebilir ve Denklem(41) den V_0 çekilir.

$$V_0 = -\frac{\Delta p g_c D_p^2 \varepsilon^3}{150 L \mu (1 - \varepsilon)^2} \quad (47)$$

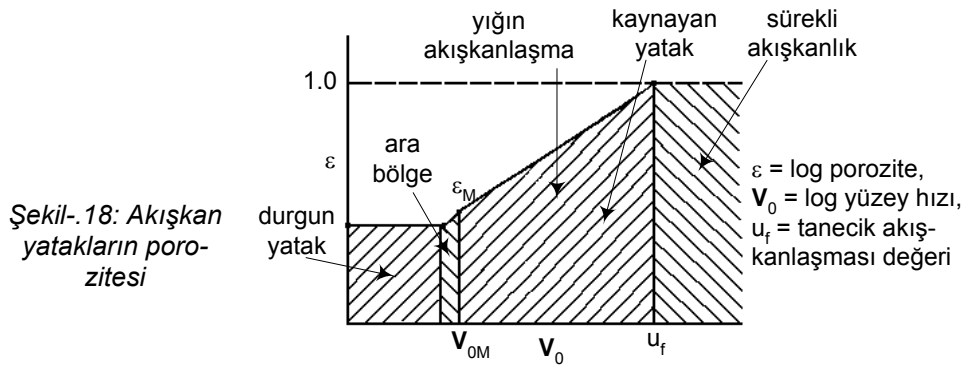
Denklem(46)'dan,

$$-\Delta p L (1 - \varepsilon) = \text{sabit}$$

olduğundan, verilen bir katı-katı sistemde porozite dışındaki tüm terimlerin sabit olduğu görülür ve yukarıdaki eşitlik,

$$V_0 = k_3 \frac{\varepsilon^3}{1 - \varepsilon} \quad (48)$$

şeklini alır; k_3 = sistemin sabitidir. Akışkan yatakların porozitesi, Şekil-18 deki eğriyle tanımlanır.



Akışkanlaşma Hızları

Yığın (batch) akışkanlaşmasında akışkan hızları orta derecelerdir. Küçük küresel tanecikler için gerekli kritik hız (V_0), Denklem(46) ya L_M ve ε_m konular ve (47) ile birleştirilerek çıkarılır.

$$V_0 = \frac{g (\rho_p - \rho) D_p^2 \varepsilon^3 \mu}{150 \mu (1 - \varepsilon_M)} \quad (49)$$

ÖRNEK:

10 ft çapındaki silindirik bir kapta bulunan 36 ton 100 meshlik kum, 400 °C ve 250 lb_f / in² (mutlak) basınçlı hava ile akışkan hale getirilecektir. Kumun yoğunluğu 168 lb / ft³, havanın çalışma koşullarındaki viskozitesi 0.032 santipois dir (cp).

- Akışkanlık için minimum porozite (ε_M) nedir?
- Akışkan yatağın minimum yüksekliği (L_M) ne kadardır?
- Yataktaki basınç düşmesi ($-\Delta p$) ne olur?
- Kritik yüzey hava hızı (V_0) ne kadardır?

100 mesh taneciğın, çapı = 0.0058 in = 4.83 x 10⁻⁴ ft = 0.1473 cm,

R = 1.314 ft³ atm / lb mol K, 1 ton = 2000 lb, g / g_c = 1,

1 g / cm³ = 62.37 lb / ft³,

1lb / in² = 0.07031 kg / cm²

1 cp = din.sn/cm² = 0.672 x 10⁻³ lb / ft.sn,

Havanın yoğunluğu,

$$PV = n R T$$

$$V \text{ (ft}^3\text{)} = \frac{g \text{ (lb)}}{\rho \text{ (lb / ft}^3\text{)}} \quad n = \frac{g \text{ (lb)}}{M \text{ (lb / lb mol)}} \quad p \frac{g}{\rho} = \frac{g}{M} RT$$

$$\rho = \frac{M p}{RT} = \frac{29 \text{ lb / lb mol} \times 250 / 14.7 \text{ atm}}{1.314 \text{ ft}^3 \text{ atm/lb mol K} \times (273 + 400) \text{ K}}$$

$$\rho = 0.557 \text{ lb / ft}^3 \quad \rho = 0.557 / 62.43 = 0.00892 \text{ g / cm}^3$$

Havanın viskozitesi, μ ,

$$\mu = 0.032 \times 0.672 \times 10^{-3} = 2.15 \cdot 10^{-5} \text{ lb / ft.sn}$$

a. Akışkan için minimum porozite

Tanecik çapı, $D_p = 0.0058$ in. için ε_M =minimum porozite değeri doğrudan Şekil-17 deki g eğrisinden okunur, $\varepsilon_M = 0.55$.

b. Akışkanlaşan yatağın minimum yüksekliği

$$\text{kati hacmi} = \frac{36 \times 2000}{168} = 428.6 \text{ ft}^3$$

Bu hacmin, porozite sıfır olduğunda kulede kaplayacağı yükseklik, $L < MV > 0 < D >$,

$$L_0 = \frac{4V}{\pi R^2} = \frac{4 \times 428.6}{3.14 (10)^2} = 5.45 \text{ ft}$$

Akışkan yatağın yüksekliği, L_M ($\varepsilon_0 = 0$ da),

$$L_M = L_0 \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon_D}$$

$$L_M = 5.45 \frac{1}{1 - 0.55} = 12.1 \text{ ft} = 12.1 \times 0.3048 = 3.69 \text{ m}$$

c. Basınç düşmesi Denklem (45) ten hesaplanır

$$-\frac{\Delta p}{L_M} = \frac{p_a - p_b}{L_D} = \frac{g}{g_c} (1 - \varepsilon_M) (\rho_p - \rho)$$

$$-\Delta p = 12.1 (1 - 0.55) (168 - 0.557)$$

$$-\Delta p = 912 \text{ lb}_f / \text{ft}^2 = 6.33 \text{ lb}_f / \text{in}^2 = 6.33 \times 0.07031 = 0.44 \text{ kg/cm}^2$$

d. Küçük taneciklerin akışkanlaşması için gerekli kritik hız Denklem(49) ile bulunur

$$V_0 = \frac{g(\rho_p - \rho) D^2 \rho \varepsilon_M^3}{150 \mu (1 - \varepsilon_M)}$$

$$V_0 = \frac{32.17 (168 - 0.557) (4.83 \times 10^{-4})^2 0.55^3}{150 \times 2.15 \times 10^{-5} (1 - 0.55)} = 0.141 \text{ ft/sn}$$

$$V_0 = 0.141 \times 0.3048 = 0.043 \text{ m/sn}$$

ÖRNEK:

35 meshlik pulvarize kömür yatağı viskozitesi 15 sentipoise olan sıvı bir petrol fraksiyonuyla akışkanlaştırılacaktır.

Statik (durgun) yatağın yüksekliği 6 ft, porozitesi 0.38 dir. Kömür taneciklerinin yoğunluğu $84 \text{ lb} / \text{ft}^3$, akışkan sıvınıniki $55 \text{ lb} / \text{ft}^3$ tür. Yatağın akışkan hale getirilmesindeki basınç düşmesini hesaplayın.

$$1 \text{ lb} / \text{in}^2 = 144 \text{ lb} / \text{ft}^2 = 0.07031 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

$$1 \text{ lb} / \text{ft}^3 = 16.02 \text{ kg} / \text{m}^3 \quad g / g_c = 1.$$

Tanecikler kaba olduğundan ve akışkanlaştırılmasında bir sıvı akımı kullanıldığından minimum akışkanlaşma porozitesi ε_M , durgun yatağın porozitesine eşittir, $\varepsilon_M = 0.38$. Basınç düşmesi, Denklem(45) ten hesaplanır.

$$\frac{\Delta p}{L_M} - \frac{p_a - p_b}{L_M} = \frac{g}{g_c} = \frac{g}{g_c} (1 - \varepsilon_M) (\rho_p - \rho)$$

$$- \Delta p = L_M \frac{g}{g_c} (1 - \varepsilon_M) (\rho_p - \rho)$$

$$- \Delta p = 6 \times 1 (1 - 0.38) (84 - 55)$$

$$- \Delta p = 108 \text{ lb}_f / \text{ft}^2 = 0.75 \text{ lb}_f / \text{in}^2$$

$$- \Delta p = 0.053 \text{ kg} / \text{cm}^2$$