

Taneli Tarımsal Ürünler İçin Akış Profilleri ve Silolamada Karşılaşılan Sorunlar

Turgut Öztürk Hakan Kibar Bilge Esen

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, 55139 Samsun

Özet: Bu çalışmada zengin besin maddeleri nedeniyle çok değerli ve kullanım çeşitliliği olan taneli tarımsal ürünlerin (tahıllar) depolandığı silolarda tasarım parametresi olarak özel önem arz eden akış profilleri ele alınmıştır. Çalışma kapsamında silo içerisinde oluşan akış profilleri tanımlanarak; taneli ürünlerin akışkanlığı üzerinde etkili olan; kemerlenme, kanallanma ve ayrışma gibi bazı silo akış problemleri detaylı olarak açıklanmıştır.

Anahtar kelimeler: Silo, tahıl, akış profilleri

Silo Flow Profiles for Grainy Agricultural Products and Encountering Problems in Silos

Abstract: In this study, the flow profiles of silo that is more important for designing of silos of grain crop (cereals) used in various areas because of nutrient features was taken up. In the study scope, flow profiles for silos were introduced and some flow problems as factors influencing on the flowability of grainy products arching, ratholes (also called pipes) and segregation was explained in detail.

Keywords: Silo, cereals, flow profiles

1. Giriş

Buğday, arpa, mısır, soya ve çeltik gibi taneli tarımsal ürünlere hem insan beslemesi hem de hayvan beslemesi açısından yıl boyunca gereksinim duyulmaktadır. Bunun yanında piyasa gereksinimin yıl boyu düzenli olarak sağlanabilmesi için bu ürünlerin kalite ve kantite den ödün vermeden mühendislik tasarım özellikleri uygun silolarda depolanması özel önem arz etmektedir. Bu ürünlerin siloya doldurma ve boşaltma işlemlerinin düzenli olarak yapılabilmesi ve siloların güvenli bir şekilde uzun yıllar hizmet verebilmesi ise silo akış özelliklerine bağlıdır. Siloların kompleks yapısı yüzyıldan daha fazla zaman boyunca gerek mühendisler ve gerekse araştırmacıların ilgi alanını oluşturmuştur. Yıllar boyunca silolarda gözlemlenen akış problemleri matematiksel modellemeler yoluyla basit olarak açıklanmaya çalışılmış, bu arada gerçeğe uygun olarak simüle edilmiş silolar üzerinde de deneysel testler uygulanmıştır. Modern siloların inşası 19. yüzyıldan sonra tarım teknolojilerinde yaşanan gelişmelere bağlı olarak taneli tarımsal ürün üretimindeki artış ve de özellikle demiryolu ulaşımının yaygınlaştırılması ve bu alandaki yatırımların yoğunlaşmasıyla birlikte ortaya çıkmıştır (Ayuga ve ark., 2005).

Özel bir yapı olan silolarda akış koşulları ile ilgili ülkemizdeki literatür çalışmalarının

sayısı oldukça sınırlıdır. Bazı ürünler diğerlerine kıyasla kolay bir şekilde akarlar. Nemli ve ince taneli ürünlerin zor aktığı ve akışta tıkanmalara neden olduğu bilinmektedir. Depolama esnasında genel olarak meydana gelen problemler ürünün topaklaşması, düzensiz besleme, taşma, kemerlenme, kanallanma ve silo duvarlarına yapışmasını içermektedir. Bu problemler silo kapasitesini belirleyen değerlerin altına düşürmektedirler (Çağlı, 2005).

Taneli malzemelerde akış indeksi olarak 1960 yılı öncesinde yığın açısı değerleri kullanılmaktaydı. Ancak 1961 yılında Jenike taneli ürünlerde akışkanlığın tahmininde zemin mekaniğinde çok iyi bilinen direkt kesme yöntemini kullanarak elde ettiği test sonuçlarını yayınladı ve Jenike'nin önerisinden sonra akış fonksiyonu olarak direkt kesme yöntemi geniş kabul gördü ve hala günümüzde de pratik olarak uygulanmaktadır (Molenda ve Horabik, 2005).

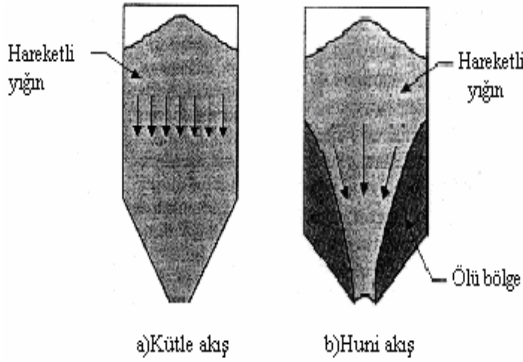
Silolardaki akış karakteristiklerini saptamaya yönelik olarak Jenike (1964) tarafından yapılan çalışmaları takiben Watson ve Rotter (1996) konu ile ilgili çeşitli araştırmalar yapmış ve akış karakteristiklerini kütle akışı, yarı kütle akışı, huni akışı ve boru akış koşulları olarak sınıflandırmıştır. Günümüzde projelene silolarda kütle akışı ve

huni akışı genel kabul gören akış koşullarıdır. Akış bölgelerindeki akışın tipi ve şekli ile ilgili pek çok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda silolarda akış üzerinde etkili faktörlerin; huni geometrisi, silo içerisindeki ürün yığın yüksekliği, ürün birim hacim ağırlığı, ürün şekil yapısı ve geometrisi ile ürün-duvar yüzeyi arasındaki sürtünmenin olduğu belirlenmiştir (Takahashi ve Yanai 1973; Watson ve Rotter 1996; Waters ve Drescher 2000).

Tarımsal taneli ürün silolarında olası akış problemlerini ortadan kaldırmak depolanan ürünün akış karakteristiklerini göz önüne alan bir projelendirilme ile mümkündür. Bu bağlamda tarımsal taneli ürün silolarının projelendirilmesinde öncelikle ürüne yönelik (çeşit bazında) şekilsel, fiziksel ve mekaniksel özellikler saptanmalı ve buna bağlı olarak ta en uygun akışı verebilecek model uygulamaya konulmalıdır.

2. Taneli Ürün Silolarındaki Akış Profilleri

Silolarda önemli sorun iyi projelenmemiş akış koşullarının ürün kalitesinin bozulmasına ve konstrüksiyon malzemesinde zarara yol açmasıdır. Akışla ilgili herhangi bir problemin olup olmayacağı ürünün akış şekline bağlıdır. Tarımsal taneli ürün silolarında kütle akışı ve huni akışı olmak üzere iki önemli akış tipi oluşmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Taneli tarımsal ürünler için akış modelleri

2.1. Kütle Akış

Kütle akışta silodaki malzemenin tamamı boşaltım sırasında hareket halindedir. Bu akış modeli silonun konik kısmı yeterince dik ve düzgün olduğunda sağlanır. Siloda keskin geçiş bölgeleri ile konik kısımda akış olmayan bölge

yoktur. Siloda çıkış boyunca tüm alan aktif durumdadır.

Bu akış türünün karakteristik özellikleri ise aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- İlk giren ilk çıkar (first in-first out),
- Kanallanma, tıkanma, dalgalanma ve taşmalar yoktur,
- Depolanan ürün çok az ayrışma gösterir,
- Silo içerisindeki hızın yavaş olması nedeniyle sabit akım ve iyi kontrol edilebilir boşaltma kapasitesi sağlanabilir,
- Depolanan ürünlerde bozulma, çürüme ve tanelerin cidarlara yapışıp kalması yok denecek kadar azdır,
- Depolanan ürün silo yatay kesit alanı boyunca üniform bir basınç alanı oluşturduğundan silo içerisinde üniform bir konsolidasyon sağlamaya olanak verir (Kobiak ve Shalouf 1999; Marinelli, 2001; Çağlı 2005; Chase, 2006).

Tarımsal taneli ürünlerin depolandığı silolarda kütle akış tasarımına uygun silo kesit geometrilerinden bazı örnekler şekil 2.'de verilmiştir.

2.2. Huni Akış

Bu akış modelinde depolanan taneli ürün silo kesitinin orta kısımdan akar ve kenarlarda bazı bölümlerde ölü bölgeler oluşur. Duvar açısı değerleri göz önüne alındığında huni akış siloları geometrik tasarım açısından kütle akış silolarına göre nispeten daha kısa ve yassıdır. Bu bağlamda silo içi ölü bölgeler yığın yüzeyine kadar ulaşabilmektedir (Çağlı 2005; Özel 2007).

Yukarıda belirtilen nedenlere dayalı olarak tarımsal taneli ürünlerin depolandığı silolarda huni akış modeli; uzun süre silo içerisinde kalsa bile çürüme ve bozulma riski taşımayan, iri taneli ve serbest akışa olanak tanıyan ürünlerin depolanması durumunda kullanılabilir.

Bu akış türünün karakteristik özellikleri ise aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- İlk giren son çıkar (first in-last out),
- Akış hızı düzensizdir,
- Düzensiz akış hızı depolanan üründe segregasyona yol açar,
- Hareketsiz bölgelerin aniden yıkılması sonucunda kontrolsüz akım ve buna bağlı olarak silo içerisinde kayda değer dinamik kuvvetler oluşabilir.

Huni akış siloları uzun süre silo içerisinde kalsa bile çürüme ve bozulma riski taşımayan

özümlü ağırlığı yüksek ve aşındırıcı özelliği olan, iri taneli ve de serbest akışa olanak tanıyan taneli tarımsal ürünler için uygundur. Bunun yanında huni akışta silodaki ürün hareketsiz ürün üzerinden akacağından dolayı silo duvarlarında nispeten daha az bir aşınma meydana gelir. (Roberts, 1992; Farnish, 2002; Çağlı, 2005).

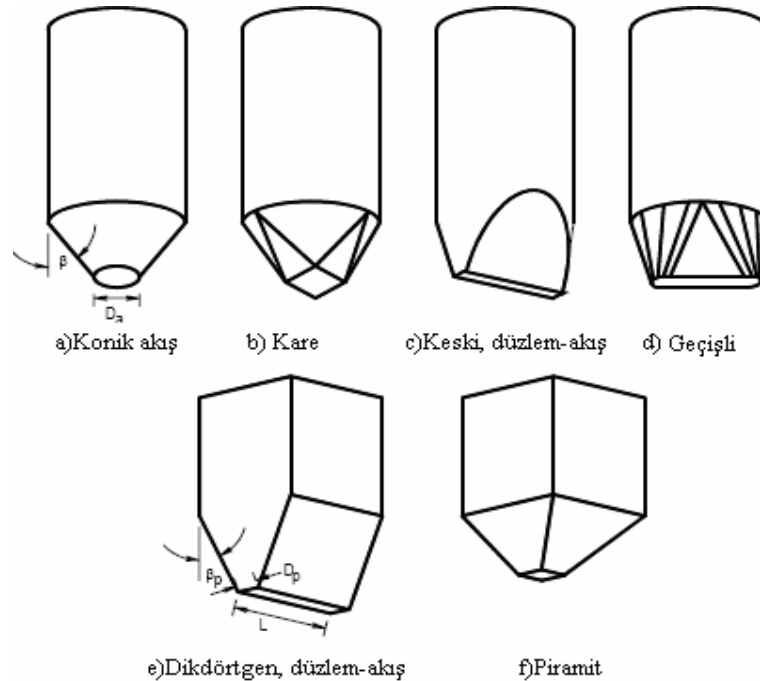
Tarımsal taneli ürünlerin depolandığı silolarda huni akış tasarımına uygun silo kesit

geometrilerinden bazı örnekler şekil 3'te verilmiştir (Chase, 2006).

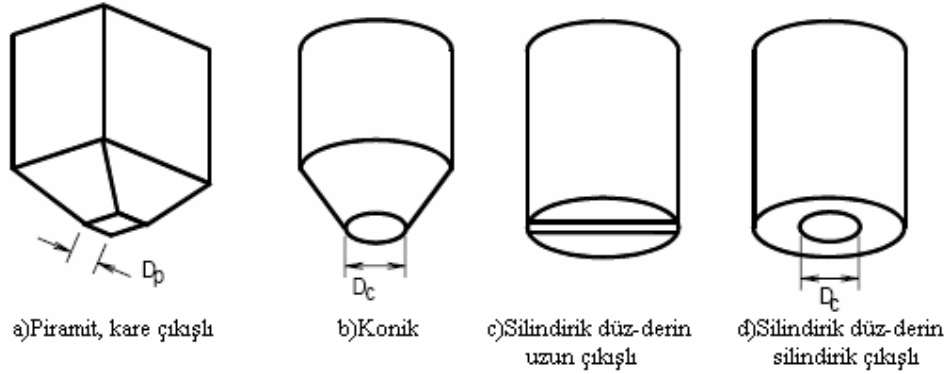
Silolarda iki akış modeline göre sağlanacak olan avantaj ve dezavantajlar Tablo 1.'de verilmiştir. Tablo 1.'den de görülebileceği gibi verilen avantaj ve dezavantajlar aynı zamanda bu iki akış modelinin de genel özelliklerini oluşturmaktadır (Jacob, 2000; Çağlı, 2005; Chase, 2006).

Tablo 1. Silolarda kütle ve huni akışın avantaj ve dezavantajları

Kütle Akış	Huni Akış
<p>Avantajlar</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Akış oldukça kararlı ve üniformdur, ✓ Radyal ayrışma azdır, ✓ Duvar basınçları tahmin edilebilir, ✓ Silonun tüm kesit alanı etkili bir şekilde kullanılabilir, ✓ İlk giren ilk çıkar, ✓ Hareketsiz bölgeler oluşmaz. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Duvarlarda aşınma fazla olmadığından kullanım ömrü uzundur, ✓ Duvarlara yakın yerlerdeki tane hızları düşük olduğundan tanelerin yıpranması ve duvar aşınması azdır, ✓ Servis ömrü boyunca birden fazla ürünü depolamak için kullanılabilir.
<p>Dezavantajlar</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Duvar yüzeylerinin aşınımı fazladır, ✓ Akış sırasında duvarlarda büyük gerilmeler oluşur, ✓ Bir ürün çeşidine veya aynı grup ürünlere özgü olduğundan pahalıdır. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Üründe akış esnasında ayrışmalar görülür, ✓ Hareketsiz bölgeler oluşur, ✓ İlk giren son çıkar akış sisteminin ürün kalitesi üzerine olan etkisi, ✓ Silo duvarlarındaki gerilmelerin dengesiz dağılımı patlamalara neden olabilir, ✓ Kemerlenme, kanallanma ve köprülenme olasıdır.

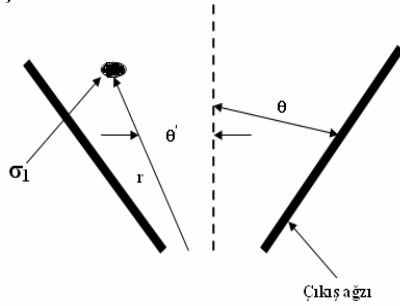


Şekil 2. Kütle akışı için silo kesit geometrileri



Şekil 3. Huni akış siloları için kesit geometrileri

Şekil 2 ve 3'te verilen kesit geometrileri, silonun yakınsayan kısmının şekline göre konik veya düzlem akış olarak tertiplenmektedir. Sistemin tertiplenmesinde Jenike (1964) tarafından önerilen kabuller kullanılmaktadır. Bu bağlamda silo çıkış ağzının tertiplenmesinde kullanılan yaklaşımın şematik modeli şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Çıkış ağzındaki kutupsal koordinatlar

$$\sigma_1 = r \cdot g \cdot \rho_b \cdot s \cdot (\Theta' \cdot \Theta \cdot \phi_x \cdot \phi_e) \cdot (1 + \sin \phi_e)$$

Eşitlikte;

σ_1 = Esas gerilme (kPa),

r = Çıkış ağzına olan partikül mesafesi (m),

ρ_b = Ürün hacim ağırlığı ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$),

g = Yer çekimi ivmesi ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$),

s = Tane fonksiyonları

ϕ_e = Efektif içsel sürtünme açısı,

ϕ_x = Duvar sürtünme açısı,

θ = Çıkış ağzı eğim açısı,

θ' = Tane koordinatı (tane açısı)

3. Taneli Ürünlerin Akışkanlığı Üzerinde Etkili Faktörler

Akışkanlık taneli ürün akışının ifadesidir. Akış davranışı depo ortamında çok yönlüdür ve pekçok fiziksel karakteristiklere bağlıdır.

Akışkanlık etkili ürün akışı, çevresel durumlar ve ürünün işlenmesi ve depolanması için kullanılan ekipman gibi ürünün fiziksel özelliklerinin kombinasyonunun bir sonucudur (Prescott and Barnum, 2000). Bu nedenle ürünün akışkanlığı sadece bir nicelik değildir. Akışkanlık üzerinde etkili olan faktörlerden bazıları taneli ürünün nem içeriği, bağıl nemi, sıcaklığı, basıncı, yağ içeriği ve tane şeklidir.

3.1. Nem İçeriği

Taneli ürünün depolanmasında etkili anahtar bir faktör nem içeriğidir, çünkü nem içeriği silo içerisinde mikrobiyal büyümede güçlü bir şekilde etkilidir. Ayrıca çoğu taneli ürünler doğada higroskopik halde buldukları için bu ürünler çeşitli bağıl nem durumlarına maruz kaldıklarında nem kaybederler veya kazanırlar (Johanson, 1978). Bunun sonucu olarak nem içeriği taneli ürünlerde kemerlenmeye sebep olmaktadır. Çünkü ürünün nem içeriği arttıkça adhezyonu (Craig and Miller, 1958) ve kohezyonu (Moreyra and Peleg, 1981) artmaktadır. Nem içeriğindeki küçük bir değişme durumunda ürünün sürtünme özellikleri de (içsel sürtünme açısı, duvar sürtünme açısı vb.) büyük oranda etkilenmektedir (Marinelli and Carson, 1992).

3.2. Bağıl Nem

Bağıl nem silo içerisinde ve ürünün fiziksel özelliklerinde etkilidir. Çoğu taneli ürün higroskopik olduğu için, ürün bağıl neme maruz kaldığından tanenin nem içeriği de artmaktadır. Bu durum tanenin mukavemetini ve kayma açısını artırmaktadır (Marinelli and Carson, 1992). Herhangi bir ürünün akışkanlığı ürünün kayma açısındaki artış ile azalmaktadır. Çoğu

araştırmacı taneli ürünün akışkanlığı ve kohezyonsuzluğu üzerinde yüksek bağıl nemin önemli bir etkiye neden olduğunu gözlemlemişlerdir (Craik and Miller, 1958; Fitzpatrick et al., 2004).

3.3. Sıcaklık

Sıcaklık taneli ürünün akışkanlığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Taneli ürünün içinde ve yüzeyinde nemin donmasında sıcaklık şiddetli bir şekilde etkilidir. Sıcaklık aynı zamanda hem silo konstrüksiyon malzemesi hem de duvar sürtünme açısı üzerinde etkili olmaktadır (Marinelli and Carson, 1992).

3.4. Basınç

Sıkışma basıncı taneli ürünlerin akış özelliklerini etkileyen önemli bir faktördür. Tanenin herhangi bir akış şekliyle akması durumunda veya içsel yüklemde titreşim nedeniyle sıkışma olabilir. Tanenin akışkanlığı üzerinde basınç artışının etkileri iki şekilde etkili olmaktadır: 1) taneler arasındaki bağların fazla sayıda olması taneler arasındaki adhezyonun fazla olmasına sebep olur (Irani et al., 1959), 2) kritik kemerlenme boyutlarında önemli bir artışın olması sıkışma artışına neden olmaktadır (Johanson, 1978).

3.5. Yağ İçeriği

Ürün yüzeyindeki yağ içeriğinin, tanenin akışkanlığı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tahmin edilmekte ancak bu konuda araştırmacılar tarafından yeterli düzeyde çalışmaların yapılmadığı belirtilmektedir (Ganesan et al., 2008).

3.6. Tane Şekli

Tanenin şekli ve tane şekil dağılımı hem akışkanlıkta hemde birim ağırlık, içsel sürtünme açısı ve tanenin sıkışabilirliğinde önemli rol oynamaktadır (Fitzpatrick et al., 2004).

4. Silo Yığımındaki Akış Sorunları

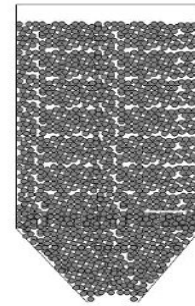
4.1. Kemerlenme

Silo çıkış ağzında sabit bir kemer oluşuyorsa ve de oluşan kemer üzerindeki ürün ağırlığını destekleyecek yeterli kuvvete de sahip olduğundan siloda ürün akışında aksamalar meydana gelebilir (şekil 5). Silo içi akışı normale döndürmek için oluşan kemer uygun bir yöntemle kırılmalıdır. Yığının çıkış açıklığı boyunca sabit bir kemer oluşturma eğiliminin

ana nedenleri; yığında çok ince taneciklerin bulunması ve depolanan ürünün nem içeriğidir. Her ikisi de kohezif etki nedeniyle tanelerin birbirlerine yapışma eğilimini artırırlar. Depolama esnasındaki sıkışmada tanenin kuvvetini artırır ve sonuç olarak silo içi ürün akışı kötüleşir. Taneli ürün silolarında ürün akışı sırasında iki tip sabit kemer oluşumu söz konusudur. Bunlardan biri çıkış açıklığına göre büyük boyuttaki tanelerin kenetlenmesi sonucunda oluşan mekanik kemerdir. Mekanik kemerin oluşumunu engellemek için çıkış boyutu depolanan taneli ürünün efektif çapının en az 10 katı olmalıdır. Kohezif kemer oluşumu ise taneli ürünlerin öğütülüp toz halinde depolanması durumunda oluşabilir. Depolanan ürünün konsolidasyonu sonucu meydana geldiğinden depolama öncesi tahmin etmek zordur. Kohezif kemer oluşumu depolanan ürünün nem içeriği ve silo içi nem difüzyonu kontrol altına alınarak ve de silo çıkış ağzı depolanan ürünün efektif çapı dikkate alınarak engellenebilir (Woodcock and Mason, 1987; Hao, 1998; Çağlı, 2005).

Depolanan ürünün silo dışına akabilmesi için tanelerin bağlayıcılığında oluşan dayanımın yenilmesi gerekmektedir. Silonun kapalı olduğu durumda oluşan kemerlenmenin mukavemeti silonun ağzı açılınca oluşan yerçekimi kuvvetinden küçükse kalıcı kemerlenmeler oluşmaz ve ürün akımı sorunsuz bir şekilde devam eder. Silo içerisinde kalıcı akım köprülerinin oluşup oluşmaması aşağıdaki etkenlere bağlıdır (Anonymous, 2006; Özel, 2007);

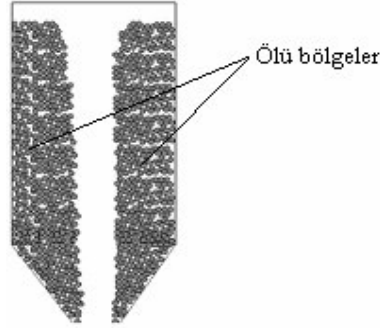
- Ürün özgül ağırlığı,
- Silo geometrisi,
- Ürün - duvar statik sürtünme katsayısı,
- Ürün içsel sürtünme açısı,
- Ürün kohezyonudur.



Şekil 5. Silo çıkışında kemer oluşumu

4.2. Kanallanma

Siloda ürünün bir kısmı merkezden akarken bir kısmı da silo duvarları boyunca hareketsiz kalabilir ve bu bağlamda silo çeperi boyunca ölü bölgeler oluşabilir (şekil 6). Bu durum daha çok huni akışta gözlenir. Bunun nedeni yığının sınırlanmamış akma sınırı kuvvetidir. Eğer ürün depolama süresinin uzamasıyla konsolidasyona maruz kalıyorsa, silo da kanallanma riski de artar. Özellikle huni akışlı bir silo düzenli zaman aralıklarında tamamıyla boşaltılmıyorsa ve bunun yanında ürünün silodaki bekleme süresi uzun ise bu durumda depolanan üründe konsolidasyona bağlı olarak kanallanma olasılığı oldukça yüksektir (Schulze, 1998; Çağlı, 2005).

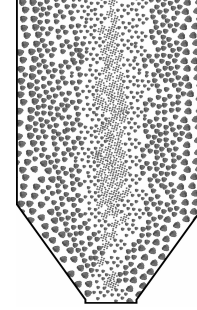


Şekil 6. Siloda kanal oluşumu

4.3. Ayrışma

Siloya dolum sırasında ürünlerin tane boyutu ve yoğunluğuna göre ayrışma eğilimleri vardır. Büyük boyutlu taneler silo duvarlarına yakın yerlerde birikirken küçük taneler silonun merkezinde toplanırlar (şekil 7). Huni akış durumunda, ilk olarak merkeze yakın olan

küçük taneler silodan boşalırken, büyük taneler en son boşalırlar (Schulze, 1998; Çağlı, 2005).



Şekil 7. Tanelerin ayrışması

5. Sonuç ve Öneriler

Taneli tarımsal ürünlerin depolanmasına yönelik konik çıkış ağızlı (hopper) siloların tasarımının ürün akış koşulları gözlemlenmeden yapılması durumunda bazı sorunlarla karşı karşıya kalınmaktadır. En çok gözlemlenen sorunlar akış tipine bağlı olarak kemerlenme, kanallanma ve ayrışmadır. Konuya yönelik araştırma sonuçları göstermiştir ki tarımsal taneli ürün silolarında akış üzerinde etkili faktörler; silo kesit geometrisi, ürün yığın yüksekliği ile ürüne yönelik şekilsel (küresellik, efektif çap), fiziksel (tane nem içeriği, özgül ağırlık, porozite) ve mekaniksel özellikler (içsel sürtünme açısı, statik sürtünme katsayısı) dir. Akışın düzgün olmadığı silolarda depolanan ürünlerde taşlaşma ve bozulmaya bağlı kayıplar fazla olmaktadır. Bu kayıpları önlemek için silo akış koşulları ürünün şekilsel, fiziksel ve mekaniksel özellikleri göz önüne alınarak tasarlanmalıdır.

Kaynaklar

- Anonymous, 2006. Silo design. Bulk solids engineering. <http://www.bulksolids.nl/uk/7silodesi.html>.
- Ayuga, F., Aguado, P., Gallego, P.E., and Ramirez, A., 2005. New steps towards the knowledge of silos behavior. *International Agrophysics* 19, 7-17.
- Chase, G.G., 2006. Solids notes. The University of Akron.
- Çağlı, S., 2005. Katı yığınların akış özelliklerinin belirlenmesi ve silo tasarımı. Yüksek Lisans Tezi (Basılmamış), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 204s.
- Craik D.J., and Miller, B.F., 1958. The flow properties of powders under humid conditions. *Journal of Pharmacology*, 10, 136-144.
- Farnish, R., 2002. Perfecting powder storage&discharge. <http://www.chemicalprocessing.com/articles/2002/214.html>.
- Fitzpatrick, J.J., Iqbal, T., Delaney, C., Twomey, T., and Keogh, M.K., 2004. Effect of powder properties and storage conditions on the flowability of milk powders with different fat contents. *Journal of Food Engineering*, 64, 435-444.
- Ganesan, V., Rosentrater, K.A., and Muthukumarappan, K., 2008. Flowability and handling characteristics of bulk solids and powders – a review with implications for DDGS. *Biosystems Engineering*, 425-435.
- Hao, B., 1998. The effects of inserts on flow behavior of cohesive bulk solids in a model bin. Msc. Thesis. University of Manitoba Winnipeg, Department of Bioystems Engineering, Manitoba, 125p.

- Jacob, K., 2000. Bin and hopper design. The Dow Chemical Company Solids Processing <http://chemical.uakron.edu/fclty/chase/Solids/Bin%20and%20Hopper%20Design%20Lecture.ppt>.
- Jenike, A.W., 1964. Storage and flow of solids. University of Utah Engineering, Experiment Station, Bulletin 123.
- Johanson J.R., 1978. Know your material-how to predict and use the properties of bulk solids. Chemical Engineering, 9-17.
- Kobiela, S., and Shalouf, F.F., 1999. Application of discharge tubes in the grain silos. International Agrophysics 13, 401-403.
- Marinelli, J., and Carson, J.W., 1992. Solve solids flow problems in bins, hoppers and feeders. Chemical Engineering Progress, 85, 22-28.
- Marinelli, J., 2001. Mass flow design considerations? (Arching-Part 1). http://www.solidshandlingtech.com/ask_joe_articles/arching_part_one.html.
- Molenda, M., and Horabik, J. 2005. Mechanical properties of granular agro-materials. Agrophysics Centre of Excellence for Applied Physics in Sustainable Agriculture. Institute of Agrophysics PAS, Lublin.
- Moreyra, R., and Peleg, M., 1981. Effect of equilibrium water activity on the bulk properties of selected food powders. Journal of Food Science, 46, 1918-1922.
- Özel, K., 2007. Çelik hububat silolarının tasarım esasları. Yüksek Lisans Tezi (Basılmamış), Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 184 s.
- Prescott, J.K., and Barnum, R.A., 2000. On powder flowability. Pharmaceutical Technology, 60-84.
- Roberts, A.W., 1992. Basic principles of bulk solids storage, flow and handling, The Institute for Bulk Materials Handling Research, Callaghan, Australia.
- Schulze, D., 1998. Storage of powders and bulk solids in silos; <http://www.dietmar-schulze.de/storage.html>.
- Takahashi, H., and Yanai, H., 1973. Flow profile and void fraction of granular solids in a moving bed. Powder Technology, 7, 205-214.
- Waters, A.J., and Drescher, A., 2000. Modeling plug flow in bins/hoppers. Powder Technology, 113, 168-175.
- Watson, G.R., and Rotter, J.M., 1996. A finite element kinematic analysis of planar granular solids flow. Chemical Engineering Science, 51, 3967-3978.
- Woodcock, P.C., and Mason, J.S., 1987. Bulk solids handling, Chapman&Hall, London.