



TÜRKÇİMENTO

**ÇİMENTO ÜRETİM PROSESİNDE
BİLYALI DEĞİRMEN, SEPARATÖR VE
ROLLER PRES ETÜDLERİ İÇİN
PRATİK BİLGİLER**

**TÇMB
2019**

ÖNSÖZ

Ülkemiz enerji tüketiminde demir çelik sektöründen sonra ikinci en büyük tüketici konumunda olan ve enerji yoğun olarak nitelendirilen çimento sektöründe enerji maliyetleri toplam maliyetlerin yaklaşık % 65'ini oluşturmaktadır. Bu sebeple, enerji verimliliği sektörel sürdürülebilirlik politikalarının en başında gelmektedir.

Sektör bu kapsamda kısa, orta ve uzun dönem aksiyonlar belirlemekte çeşitli verimlilik uygulamalarını hayata geçirmektedir. Aksiyonların belirlenmesinde enerji etüdü kapsamında yapılan çalışmalar büyük önem arz etmektedir. Zira bu çalışmaların ölçüm ve hesaplama yönünden doğru yapılması ve elde edilen verilerin referans değerler ile kıyaslanarak doğru yorumlanması doğru zamanda, doğru strateji ve maliyetler ile aksiyonların planlanmasını mümkün hale getirmektedir.

Bu amaçla, TÇMB Prosesler Alt Komitesi özellikle proses ölçümlerinde yapılan hataları minimuma indirmek, kıyaslamaların doğru yapılabilmesini sağlamak ve sektöre giriş yapan tüm mühendislere de kaynak sunmak için proses etüd kılavuzları hazırlanmasını çalışmaları kapsamına almıştır.

Hazırlanan “Çimento Fabrikalarında Kullanılan Proses Ölçüm Metodları”, “Çimento Fabrikalarında Kullanılan Taşınabilir Proses Ölçüm Ekipmanları”, “Çimento Fabrikaları için Tipik Proses Referans Değerleri”, “Çimento Döner Fırın Sistemlerinde Enerji Etüdü” ve “Çimento Üretim Prosesinde Dik Değirmenlerde Enerji Verimliliği ve Etüdlere için Pratik Bilgiler” kılavuzlarına ek olarak, elektrik enerjisi tüketiminde en büyük paya sahip öğütme prosesinin enerji etüdünün de yapılabilmesi amacıyla “Çimento Üretim Prosesinde Bilyalı Değirmen, Separatör ve Roller Pres Etüdlere için Pratik Bilgiler” kılavuzu da kaleme alınmıştır. Kılavuz hazırlanırken literatürde yer alan teknik bilgilerin yanısıra yapılması muhtemel yanlışları ve kritik hususları içeren saha deneyimleri de ön planda tutulmuştur.

Kılavuz, TÇMB Prosesler Alt Komitesinin değerli üyesi Bursa Çimento Fabrikası A.Ş. Süreç Geliştirme Müdürü Orçun Berker tarafından hazırlanmıştır. Alt Komite Başkanı Votorantim Çimento San. ve Tic. A.Ş. Hasanoğlu Fabrikası Genel Müdürü Özgür Şahan, TÇMB Enerji Müdürlüğü Birim Sorumlusu Didem Benzer ve diğer değerli üyeler de sundukları görüş, öneri ve değerlendirmeler ile kılavuzun basıma hazır hale getirilmesinde büyük katkı sağlamışlardır. Kılavuzun grafik tasarımları TÇMB Grafikeri Gizem Buzacı tarafından yapılmıştır. Emeklerinden dolayı başta yazarlar olmak üzere kılavuza destek veren tüm Alt Komite üyelerine ve TÇMB çalışanlarına teşekkür ederiz.

Kılavuzun çimento sektöründeki tüm teknik personele ve genç mühendislere faydalı bir kaynak olması dileklerimizle.

TÜRKİYE ÇİMENTO MÜSTAHSİLLERİ BİRLİĞİ

İçindekiler

1. GİRİŞ	1
2. BİLYALI DEĞİRMENLER	1
2.1. Genel Bilgiler	1
3. HAZIRLIKLAR VE ÖLÇÜMLER	14
3.1. Bilyalı Değirmen Etüdü Hazırlıkları Özet Tablosu	14
3.2. Bilyalı Değirmenlerde Etüd Hazırlıkları	15
3.2.1. Duruş Öncesi	15
3.2.2. Duruş Esnasında	15
3.2.2.a. Değirmen Ani Duruşu (Crash Stop)	15
3.2.2.b. Değirmenin Boşaltılarak Durdurulması	19
4. BİLYA ŞARJ YÜKÜ, GÜÇ HESAPLAMALARI VE SPESİFİKASYONLAR	20
4.1. Bilya Şarj Yüğü	20
4.2. Bilyalı Değirmen Kamara Güç Tüketimi	20
4.3. Değirmen Kritik Hızı	21
4.4. Bilyalı Değirmen Spesifikasyonları	23
4.5. Bilya Aşınmasına Karşı Bilya İlave Edilmesi	26
5. ÇİMENTO DEĞİRMENLERİNDE KÜTLE-ISI BALANSI	28
6. DEĞİRMEN VE SEPARATÖRLER İÇİN TİPİK REFERANS DEĞERLER	47
7. SEPARATÖRLER	48
7.1. Separatör Tromp Eğrisi	50
7.2. Tromp Eğrisi Çizerken Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar	57
7.3. Örnek Tromp Eğrisi Analizleri	58
7.4. Sirkülasyon Faktörü Hesabı	61
7.5. Toz Yüğü Hesabı	62
7.6. Separatör Verimi Hesabı	62
7.7. Çeşitli Örnekler	63
8. ROLLER PRES (VALSLİ PRES)	66
8.1. Ön Öğütme Olarak (a)	67
8.2. Yarı Mamül Ürün Olarak Öğütme (b)	68
8.3. Nihai Ürün Olarak Öğütme (c)	68
8.4. Valsli (Roller) Pres Hesaplamaları	69
9. BİLYALI DEĞİRMENLERE GİRİŞ TALİMATI	73
EKLER	74
KAYNAKLAR	80

1. GİRİŞ

Bilyalı değirmen etüdüne (özellikle çimento değirmeni), separatör etüdüne ve roller pres etüdüne yer verilen bu döküman, fabrikalardaki proses uygulamalarında referans olması, sistem performansının ölçülmesine ve iyileştirilmesine rehberlik etmesi amacıyla hazırlanmıştır.

2. BİLYALI DEĞİRMENLER

2.1. Genel Bilgiler

Öğütme, katı taneciklerin elastik sınırlarını aşacak düzeydeki gerilmeler sonucu yenilerek daha küçük boyutlara indirgenmesidir. Diğer bir deyişle; yeni yüzeylerin oluşması ufalama, ufalamanın son aşaması da öğütme olarak tanımlanmaktadır.

Öğütme işleminin yapıldığı ekipmanlara değirmen adı verilmektedir. Değirmenler, başlıca dik (valsli) ve yatay (bilyalı) olarak sınıflandırılmaktadırlar.

Değirmenlerin içi kamara sayısına göre tek veya çok bölmeli (genellikle iki kamaralı) olarak ifade edilmektedir. Öğütme sistemi, açık devre ve kapalı devre olarak ikiye ayrılmaktadır. Açık devrede separatör bulunmazken, kapalı devrede separatör sayesinde iri partiküller değirmene geri dönmekte ve tekrar öğütme işlemine tabii tutulmaktadırlar. Açık bir sistemde değirmen içerisinde malzemenin kalış süresi 30-40 dk iken kapalı bir sistemde bu süre 8-12 dk arasındadır.

Değirmen gövdesinin iç yüzeyi çelik alaşımlı plakalarla kaplanmaktadır. Bu plakaların görevi, değirmen mantosunu aşınmaya karşı korumak, malzemenin yukarıya kaldırılmasını sağlamak ve ufalanan parçaları boyutlarına göre sınıflamaktır.

Değirmenlere verilen toplam enerjinin % 5-20'si öğütmede kullanılmaktadır. Geri kalanı sürtünme, ses, ısı, vibrasyon gibi noktalara harcanmaktadır.

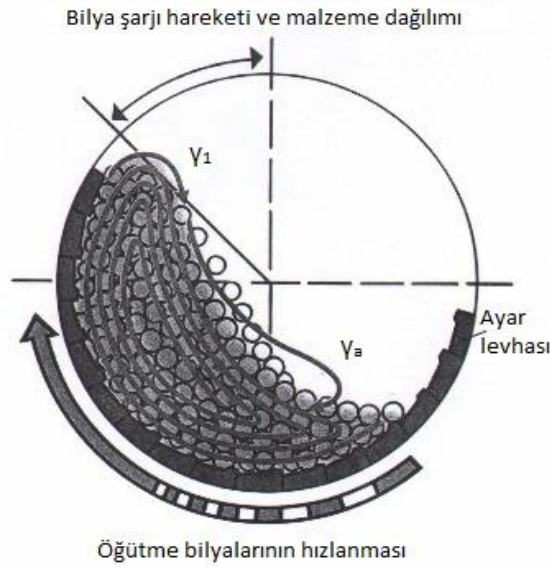
Bir değirmenin optimum şartlarda çalışması aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

- Değirmen hızı (değirmen çapına bağlı olarak)
- Bilya şarj miktarı ve kompozisyon dağılımı
- Değirmenin doğru bir şekilde bölgeleştirilmesi (kamara uzunluğu) ve L/D oranı
- Astar plakaları
- Diyafram plakaları¹
- Malzeme öğünebilirliği
- Hava sürüklenme hızı
- Su püskürtme sistemi
- Bilya kalitesi (kimyasal içeriği)

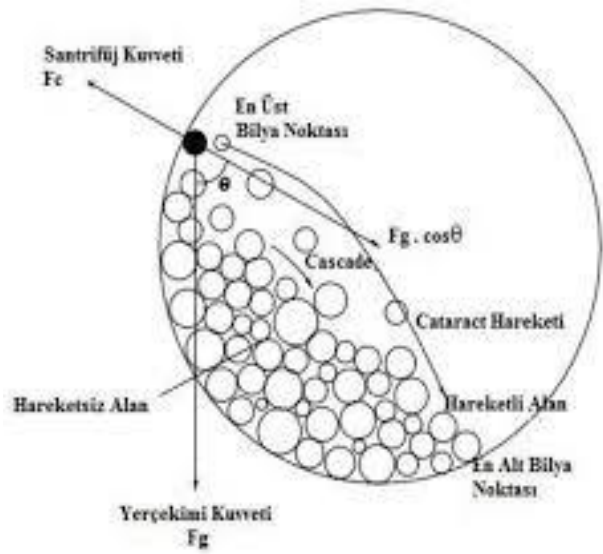
Bilyalı değirmenlerde malzeme ve öğütme elemanları birlikte dönmektedirler ve bu esnada malzeme sürtünme yolu ile öğütülmektedir. Değirmen mantosunun yükselen tarafında malzeme ve öğütme bilyaları birlikte kaldırılmakta ve daha sonra birlikte aşağı düşmektedirler. Bu hareket sonucu malzeme ufalanmaktadır. Öğütme elamanı olarak bilya ve silpepler kullanılmaktadırlar.

Değirmen dönerken içindeki bilyaların üzerine bazı kuvvetler etki etmektedir. Bu kuvvetler, dönmeden kaynaklanan merkezkaç kuvveti ve yerçekimi etkisidir.

Bilyalı değirmenlerdeki bilya dönüş profili Şekil 1a ve b'de görülmektedir.



Şekil 1a- Bilyalı değirmenlerde bilya şarjı hareketi ve malzeme dağılımı



Şekil 1b- Bilyalı değirmenlerdeki bilya dönüş profili

Değirmen her zaman kritik hızın altındaki bir hızla dönmektedir. Çünkü kritik hızda ($n_c = 42,3 / \sqrt{D}$) bilyalar hiç iş yapmazlar. En uygun öğütme etkisi için bilya yükselme açısının (θ) maksimum kinetik enerjiye ulaşabilmesi, dolayısıyla 35° olması gerekmektedir. Bu açıda, değirmen hızının kritik hıza oranı % 76'dır. Değirmen içerisindeki şarjın % 54'ü bu açının tesiri ile hareket ederken % 46'sı yerçekimi kuvveti ile düşerek iş yapmaktadır.

Değirmen kamarası içindeki bilyalar, birinci kamarada değirmen iç hacminin genellikle % 28-34'ünü, ikinci kamarada ise birinci kamaradakinden % 2 daha fazlasını kaplamaktadır. Tecrübelerle dayanarak birinci kamarada % 27-31 ve ikinci kamarada da % 2 daha fazlası ile yapılan bilya şarjının optimum sonuç verdiği söylenebilir. Ancak bazı kaynaklarda ikinci kamarada % 1-2 daha düşük bilya şarjının kullanılabileceği de ifade edilebilmektedir. Bu oranın % 25'ten az olması halinde bilyalar plakalar üzerinde çalkalanmaktadırlar. % 40'tan fazla olması halinde ise bilyalar izledikleri yollar boyunca düzensizlik göstermektedirler.

Değirmenin bir dönüşü ile bir bilya tanesi 1,79- 2,85 arasında düşüş yaparak iş görmektedir. Örneğin şarjda 500.000 adet bilya var ise değirmenin bir dönüşü ile $500.000 \times 1,79 = 895.000$ defa bilya vuruşu gerçekleşmiş olmaktadır. Fakat değirmende öğütülecek bir tanecik, değirmenin altı dönüşünde bir defa bilya darbesiyle karşılaşmaktadır. Bu, şarjın ancak birkaç binde birinin iş görmesi anlamına gelmektedir.

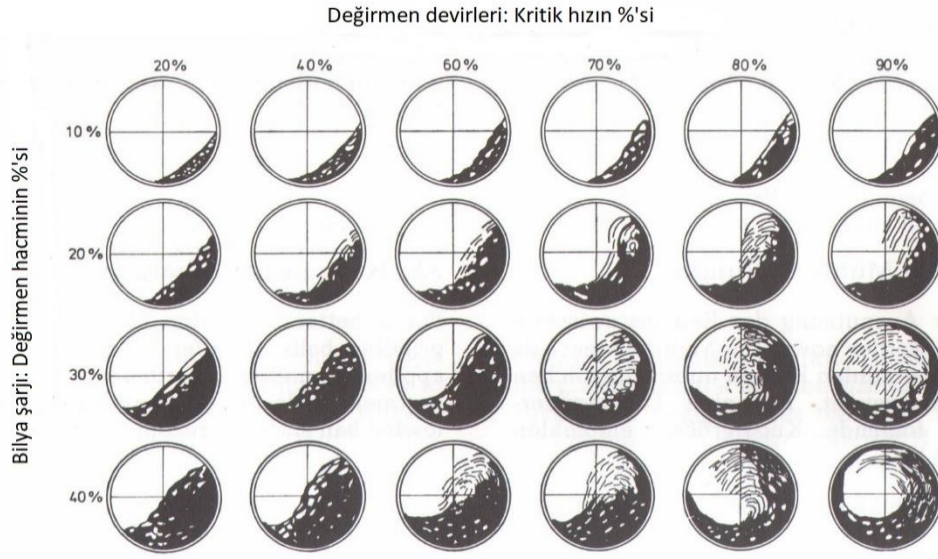
En iyi öğütme, içerideki malzemenin bilya yüzeyini örtecek kadar dolu olması durumunda sağlanmaktadır. Değirmen içerisinde kullanılan bilyalar; dökme çelik, dökme demir veya dövme çelikten üretilebilirler. Plakalar ise genellikle çelik plakalardan seçilmektedirler.

Değirmende taneler ufaldıkça malzemenin akışı kolaylaşmaktadır. Çünkü yığın yoğunluğu yaklaşık % 30 kadar azalmaktadır. Değirmenden geçirilen hava, malzemenin taşınmasına yardımcı olmaktadır.

Bilya hareketi kaskat ve katarak olarak ifade edilen iki çeşit hareket sergilemektedir. Değirmen bilya kütlesinin dönüş sırasındaki düşüşleri Şekil 2'de gösterilmektedir.

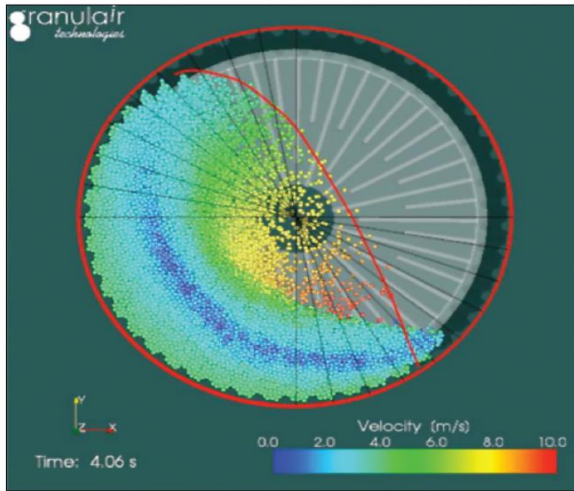
Katarak Hareket (Şelale): İri taneleri kırmakta daha etkilidir.

Kaskat Hareket (Çağlayan): İnce öğütme için daha etkilidir.

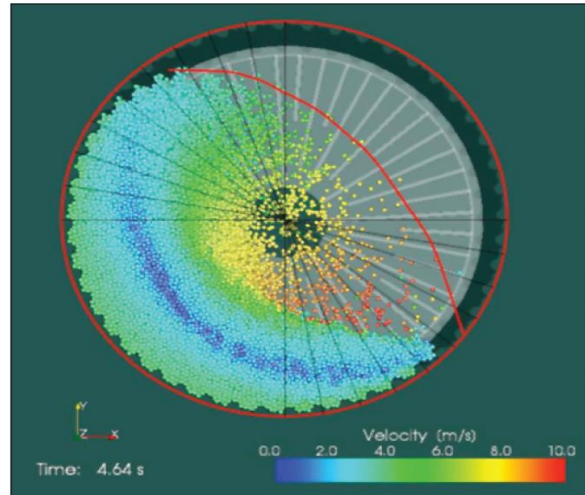


Şekil 2- Değirmen bilya kütlesinin dönüş sırasındaki düşüşleri
(Değirmen devir hızı kritik hızın %'si olarak ve bilya yükü ise değirmen hacminin %'si olarak verilmiştir.)

Şekil 3'te gösterildiği üzere bir bilya tanesi, değirmenin dönmesi sırasında önce cidar ile birlikte yükselmekte, belli bir noktada da teğetsel olarak fırlatılmaktadır. Cidara en yakın bilya en uzun yolu almaktadır ve en etkilisidir. Daha içteki bilyalar ise daha kısa yol almaktadırlar. Bu nedenle değirmen içerisindeki toplam şarj, şelale gibi akarak ve çağlayan gibi kendi etrafında dönerek iki türlü hareket yapmaktadır. Bu iki hareketin işlevi farklıdır. Şelale hareketinde bilyalar mal üzerine düşerek parçalama yaparken, iç taraftaki bilyalar çağlayan gibi dönmeleri neticesinde sürtünme ile malı inceltmektedirler. Bu nedenle inceltici kamaralarda (2. Kamara) daha çok yüzey alanı küçük (küçük çaplı) bilyalar kullanılmaktadır.



Şekil 3a- Uygun bilya yörüngesi



Şekil 3b- Uygun olmayan bilya yörüngesi

Değirmenin kamaraları arasında diyafram adı verilen bir ara bölme bulunmaktadır. Kamaralar çeşitli boyutlarda öğütme işlemi yapılmasına yardımcı olmaktadır. Değirmen çıkışında da ayrıca bir çıkış diyaframı yer almaktadır. Bir değirmenin kamarasının sonunda ızgara plakaları vardır. Bunlar, iri tanelerin sonraki bölüme geçmesini engellemektedirler. Izzaralar, tıkanmanın önlenmesi için çıkış tarafları konik yapılmış yarıklardır. Izzara açıklıklarının, diyaframın tüm alanına oranı % 8-12 arasında olmalıdır. Bu değer, her bölmeden 5 ton/dm² malzeme geçecek şekilde ayarlanmaktadır.

iki kamaralı bir değirmende ilk giriş kamarasında ikinci kamaraya oranla daha büyük çapta (60-90 mm) bilyalar bulunmaktadır. Burada malzeme kırılmakta ve kurutularak kaba öğütme sağlanmaktadır. İkinci kamarada ise 15-50 mm çapında bilyalar bulunmaktadır ve nihai ince öğütme sağlanmaktadır. İkinci kamarada ufak bilya olması, bilya aralarında malzeme kalmaması, boşluk oluşmaması; yani taşıma işleminin kolay yapılabilmesi içindir. Bu noktada her değirmene göre bilya şarjının değişiklik göstereceği unutulmamalıdır.

Değirmende düşük bilya şarj oranıyla çalışmak ürün inceliğini olumsuz olarak etkilemektedir. Örneğin; % 25 bilya dolum oranıyla çalışan bir bilyalı değirmenin bilya dolum oranı % 30'a çıkartıldığı zaman daha ince öğütülmüş ürün elde edilmektedir. Fakat bu oranın % 35'e çıkartılması, daha da ince bir ürün elde edileceği anlamına gelmemektedir. Bu durum sadece güç kaybına neden olmaktadır. Gereken uygun bilya şarjından daha düşük şarjda çalışmak değirmen tonajını da olumsuz etkilemektedir.

Öğütme işleminde Bond iş indeksi (W) ve Hardgrove indeksinden (HGI) yararlanılmaktadır.

- Bond İş İndeksi: 1 ton malzemeyi kırmak için gereken kWh enerji olarak ifade edilmektedir. Örneğin kalker için bu değer 10 kWh iken kil için 7 kWh'tir. Sayısal olarak bu değer arttıkça öğütme zorlaşmaktadır. Literatürde, yapılan bir analiz neticesinde sıcak klinkerin iş indeksinin 14 kWh/t ve soğuk klinkerin ise 16,8 kWh/t olarak tespit edildiği bilgisi yer almaktadır.
- Hardgrove İndeksi (HGI): Genelde petrokok ve kömür öğütülebilirliği için bu indeksten yararlanılmaktadır. Sayısal olarak bu değer düştükçe öğütme zorlaşmakta, tonaj düşmekte ve enerji yükselmektedir. Bu değerler, malzemenin istihraç edildiği ocağa göre değişmekle birlikte Soma kömürü için yaklaşık olarak 36 HGI, Tunçbilek kömürü için 47 HGI, ithal kömür için 70 HGI ve petrokok için de 62 HGI olarak alınabilir. Ancak, yine de bu değerlerin değişiklik gösterebilecekleri ve indeks belirlenmesi gerektiği unutulmamalıdır.

Bond iş indeksi ile Hardgrove indeksi arasında aşağıdaki gibi bir ilişki vardır:

$$W = \frac{435}{HGI^{0,91}}$$

Şarjın dağılımı için öğütülecek malzemenin öğünebilirliği ve tane dağılımı mutlaka bilinmelidir. Şarjdaki en büyük bilya, en büyük taneyi kırarak yeterlilikte olmalıdır. Bond, teorik ve ampirik çalışmalarına göre bir formül vermektedir:

$$dp = 20,17 \times \left(\frac{P}{K}\right)^{1/2} \times \left[\frac{W \times G}{N \times D_{ef}}\right]^{1/3}$$

Burada;

- dp : En büyük bilya çapı (mm)
P : Besleme malzemesinin % 80'inin geçtiği elek açıklığı (mm)
D_{ef} : Plakadan plakaya efektif değirmen çapı (m)
W : Bond iş indeksi
G : Öğütülecek malzemenin özgül ağırlığı (gr/cm³)
N : Değirmen devrinin kritik değirmen devrine oranı
K : Katsayı olup çelik bilyalar için 335'tir.

Bond, formülünü en büyük bilya çapı için vermektedir. Fakat tecrübeler, bu formülün şarjın ortalama bilya çapı için daha gerçekçi olduğunu göstermektedir.

İstenen ürün inceliğine göre diyafram boylarına karar verilmektedir. Genellikle ilk kamara boyu, ikinci kamara boyundan daha kısa olup değirmen boyunun 1/3'üdür. Geriye kalan 2/3'ü ise ikinci kamaradır.

Bölme ızgaraları da bilyaların kamaralar arası ve dışarı geçişini önlemektedir.

Değirmenlerin iç kesiti Şekil 4a- 4b'de resmedilmektedir.

Bilyalı değirmende çimento öğütülürken çimento sıcaklığının 90- 115°C arasında olması istenmektedir. 115°C'nin üzerine çıkması durumunda alçıtaşı çok fazla dehidratasyon olacağından ani donma (yalancı donma) yaşanabilir. Bu bilgi son derece önemlidir zira değirmenlerde başlayan dehidratasyon olayı silolarda da devam edebilir ve topaklanmaya yol açabilir. Bunu önlemek amacıyla değirmene pulverize (püskürtme) su verilebilmektedir. Fakat, 90°C'nin altında olması durumunda da alçıtaşı hiç dehidratasyona uğramamakta ve mukavemet kaybı yaşanmaktadır. Bu nedenle değirmen sıcaklığı sürekli kontrol altında tutulmalıdır.

Değirmenlerde kimyasal kullanılması ile çimento partiküllerinin değirmen içindeki alıkonma süreleri kısalmaktadır. Ayrıca statik elektriklenme de önlenmektedir. Zira tanecikler arasında çekim kuvveti azalmaktadır. Kimyasal kullanıldığında pack set (aglomerasyon etkisi) endeks değeri de düşmektedir. Çimento katkıları, değirmen ve sevk hattı içerisindeki çimentonun akış karakteristiklerini geliştirmektedir. Kimyasalın, değirmene giriş yeri önemlidir ve içeride gaz haline geçmesi gerekmektedir.

Değirmenlerde hava hızı da önemli bir faktördür. Değirmen içerisinde hava akışı kapalı devre öğütme sistemleri için 1-1,5 m/s hıza sahip olmalıdır. Yani içeride 0,20-0,45 m³/kg ürün ventilasyon havası bulunmalıdır. Açık devre öğütme sistemleri için ise hava hızı 0,6-1,0 m/s arasındadır. Etkili havalandırmanın sağlandığı koşullarda değirmen besleme miktarının % 7,5 ila 10'unun hava ile taşınan akışta yer aldığı ifade edilmektedir.

Malzemenin bilyalı değirmen içinde yaklaşık kalma süresi şöyle hesaplanmaktadır:

$$T_R(dk) = 6,7 \times \frac{\text{Değirmendeki Toplam Bilya Miktarı (Ton)}}{\text{Değirmen Tonajı} \left(\frac{\text{Ton}}{\text{saat}} \right)}$$

Örnek 1:

Değirmen tonajı = 175 t/h

1. Kamara bilya toplamı= 95 ton

2. Kamara bilya toplamı= 224 ton

$$T_R(dk) = 6,7 \times \frac{95}{175} = 3,63 \text{ (1. Kamara)}$$

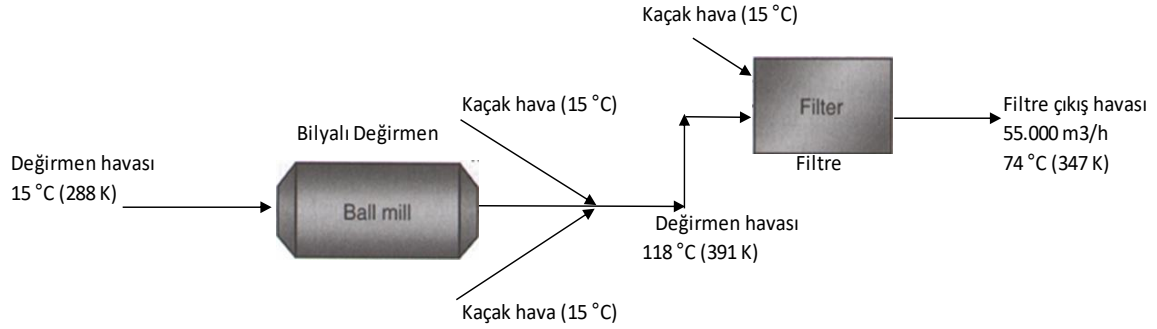
$$T_R(dk) = 6,7 \times \frac{224}{175} = 8,57 \text{ (2. Kamara)}$$

Toplam= 12,2 dk (Kapalı bir devre için literatürde 8-12 dk olması gerektiği ifade edilmektedir.)

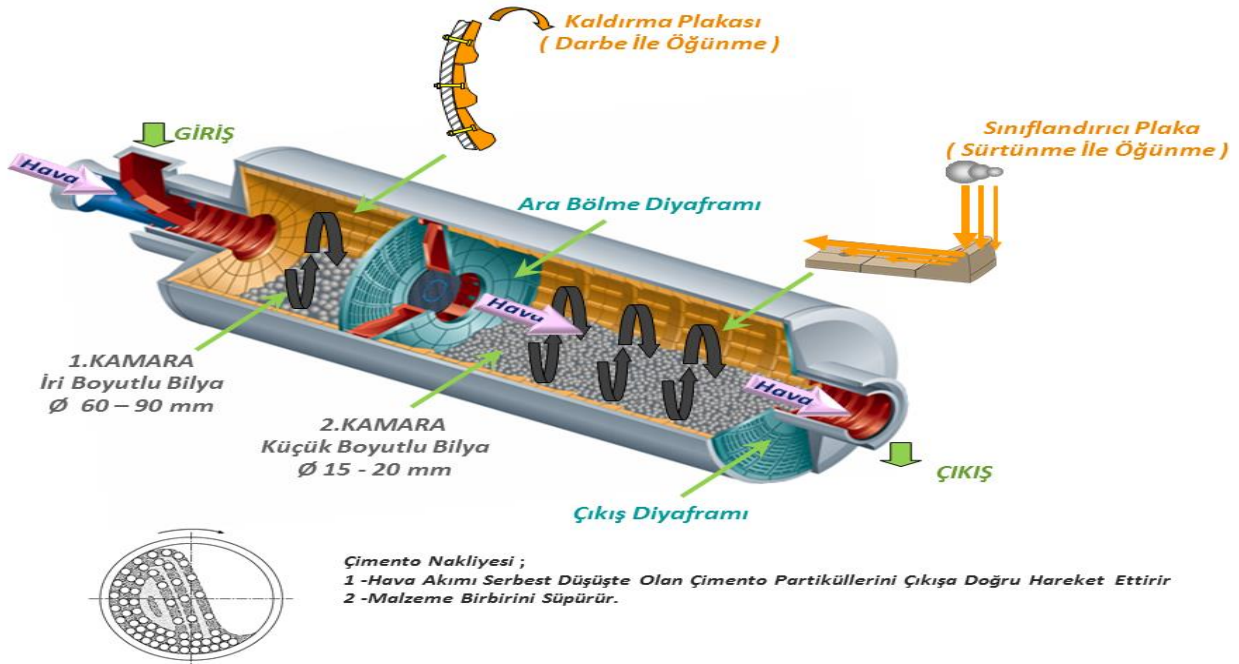
Bilyalı değirmenlerde, değirmen içi hava hızının doğru bir şekilde belirlenmesi, ya değirmen giriş boğazından anemometre (Hava akımı hızının ölçülmesinde kullanılan bir ölçüm aletidir. Detaylı ölçüm

bilgileri için “Çimento Fabrikalarında Kullanılan Proses Ölçüm Metodları” ve “Çimento Fabrikalarında Kullanılan Taşınabilir Proses Ölçüm Ekipmanları” kılavuzlarından faydalanılabilir.) kullanılarak ölçüm yapılmasıyla ya da sistem filtresine bağlı tüm hatlarda ayrı ayrı yapılacak ölçümler neticesinde değirmenden alınacak net debinin hesaplanmasıyla mümkündür.

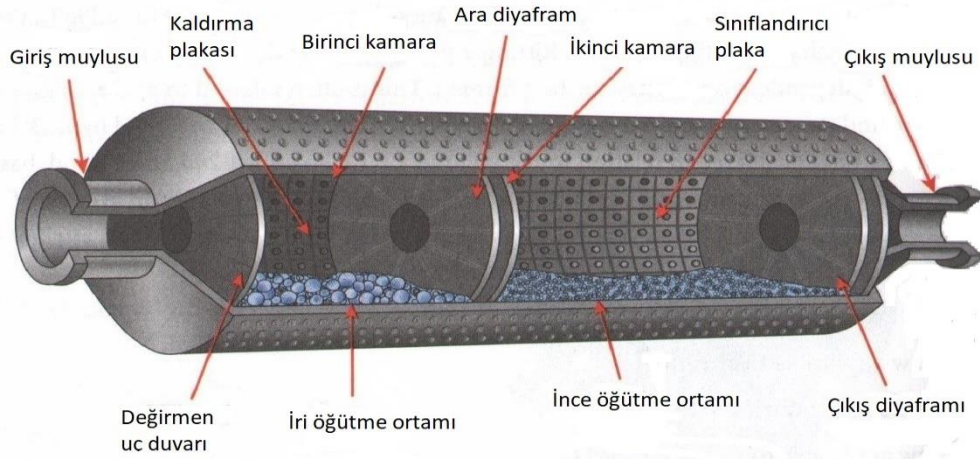
Değirmen Hava Hesabı



Filtre Çıkış Havası = Değirmen Giriş Havası + Kaçak Hava
 Değirmen Havası = $55.000 \times (347-288) / (391-288)$
 Değirmen Havası = 31.500 m3/hr



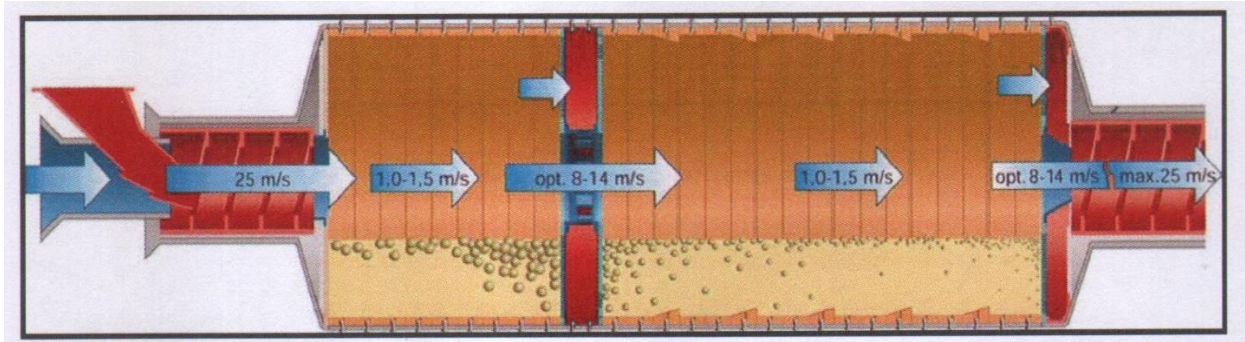
Şekil 4a- Değirmen iç kesitleri



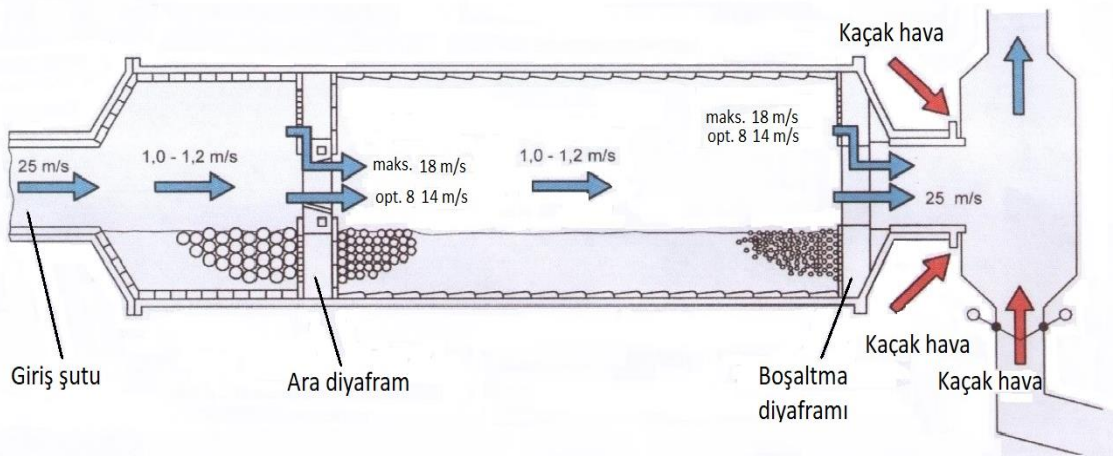
Şekil 4b- Değirmen iç kesitleri

Belirli zamanlarda değirmen etüdları yapılmalı ve değirmen sisteminin verimi takip edilmelidir. Bahse konu bu etüd kapsamında separatör verimi kontrolü (tromp curve), değirmen içi öğütme verimi kontrolü (aksiyal eğrilerin çizimi), değirmen fanı ölçümü, bilya kontrolü (toplam şarj miktarı ve şarj kompozisyonu), plaka kontrolü (aşınmalar ve kırılmalar), ara ve çıkış diyafram kontrolü (delikler, yırtıklar, hasarlar) ve diğer kontroller yer almaktadır.

İki kamaralı bir bilyalı değirmende değirmen içi hız profili Şekil 5a ve 5b’de gösterilmektedir.



Şekil 5a- İki kamaralı bilyalı değirmende değirmen içi hız profili



Şekil 5b- İki kamaralı bilyalı değirmende değirmen içi hız profili

Değirmen havalandırması ile ilgili olarak literatürde açık devre sistemler için 250-300 Nm³/ton çimento, kapalı devre sistemler için ise 300-600 Nm³/ton çimento değerleri yer almaktadır. Literatürde ayrıca, kaçak hava miktarının, değirmene giriş akışının yaklaşık % 20 ila 40'ı arasında normal sayılabileceği ve bu değer minimumda tutulmasının önemi de belirtilmektedir.

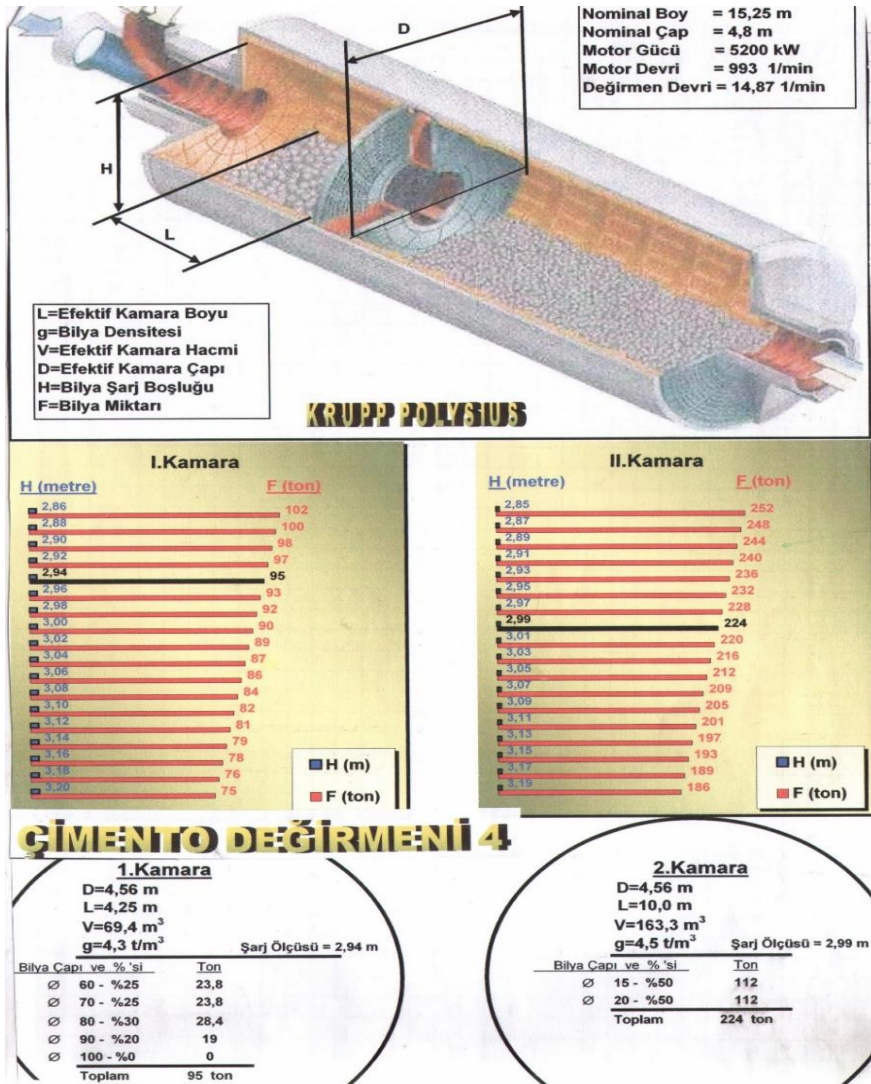
Değirmen İçi Hız Hesabı

$$V \text{ (m/s)} = \frac{\text{Debi (m}^3/\text{h)}}{\text{Serbest Akış Yüzeyi (m}^2) \times 3600} \leq 2,5$$

$$\text{Serbest Akış Yüzey Alanı (m}^2) = \left(1 - \left(\frac{q}{100}\right)\right) \times \left(\frac{\pi}{4}\right) \times (D_{\text{efektif}} - 0,2)^2$$

Örnek 2:

Aşağıda bilgileri verilen değirmen için değirmen içi hızlarını hesaplayınız.



1. Kamara için:

Kamaranın tamamı dolu olsaydı,

1 m³'te 4,3 ton bilya var ise 69,4 m³ hacimde 298 ton bilya olması gerekirdi.

Ancak verilen bilgilere göre 1. kamarada toplam 95 ton bilya vardır. Bu durumda,

$$\text{Bilya Doluluk Oranı} - q (\%) = \frac{\text{Kamaradaki Toplam Bilya Miktarı}}{\text{Kamaranın Tamamında Olması Gereken Bilya Miktarı}} \times 100$$

$$\text{Bilya Doluluk Oranı} - q (\%) = \frac{95}{298} \times 100 = 31,87$$

Değirmen jet filtre debisi= 65.000 m³/h

$$\text{Serbest Akış Yüzey Alanı (m}^2\text{)} = \left(1 - \left(\frac{q}{100}\right)\right) \times \left(\frac{\pi}{4}\right) \times (D_{\text{efektif}} - 0,2)^2$$

$$\begin{aligned} \text{Serbest Akış Yüzey Alanı (m}^2\text{)} &= \left(1 - \left(\frac{31,87}{100}\right)\right) \times \left(\frac{\pi}{4}\right) \times (4,56 - 0,2)^2 \\ &= 10,17 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$V \text{ (m/s)} = \frac{\text{Debi (m}^3\text{/h)}}{\text{Serbest Akış Yüzeyi (m}^2\text{)} \times 3600 \left(\frac{s}{h}\right)} \leq 2,5$$

$$\begin{aligned} V \text{ (m/s)} &= \frac{65.000 \text{ (m}^3\text{/h)}}{10,17 \text{ (m}^2\text{)} \times 3600 \text{ (s/h)}} \\ &= 1,77 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Ara diyafram için:

$$\text{Alan} = \frac{\pi}{4} \times D^2$$

$$\begin{aligned} \text{Alan} &= \frac{\pi}{4} \times (1,070)^2 \\ &= 0,899 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

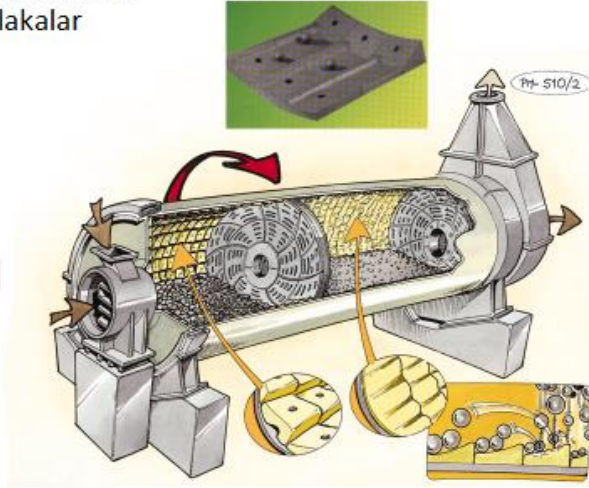
$$\begin{aligned} V \text{ (m/s)} &= \frac{65.000 \text{ (m}^3\text{/h)}}{0,899 \text{ (m}^2\text{)} \times 3600 \text{ (s/h)}} \\ &= 20 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\text{Askıdaki Malzeme (\%)} = 8,4 \times (\text{Hava Hızı})^{2,26}$$

$$\text{Askıdaki Malzeme (\%)} = 8,4 \times (1,77^{2,26}) = 30,52$$

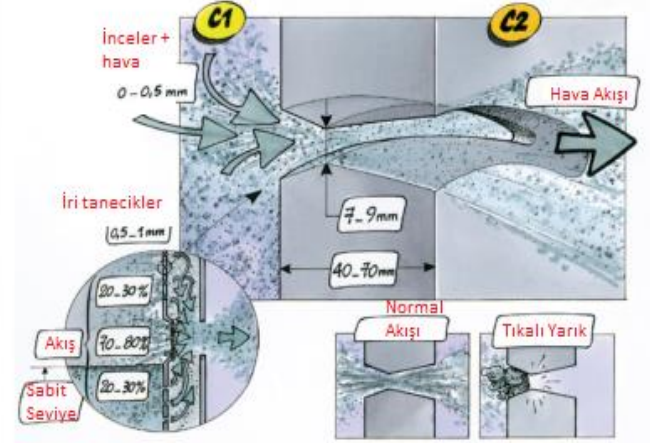
Bilyalı değirmenlerde sınıflandırıcı plakalar Şekil 6'da, plaka yarıkları Şekil 7'de, havalandırma da Şekil 8'de verilmiştir.

Sınıflandırıcı Plakalar



(açıklıkları)

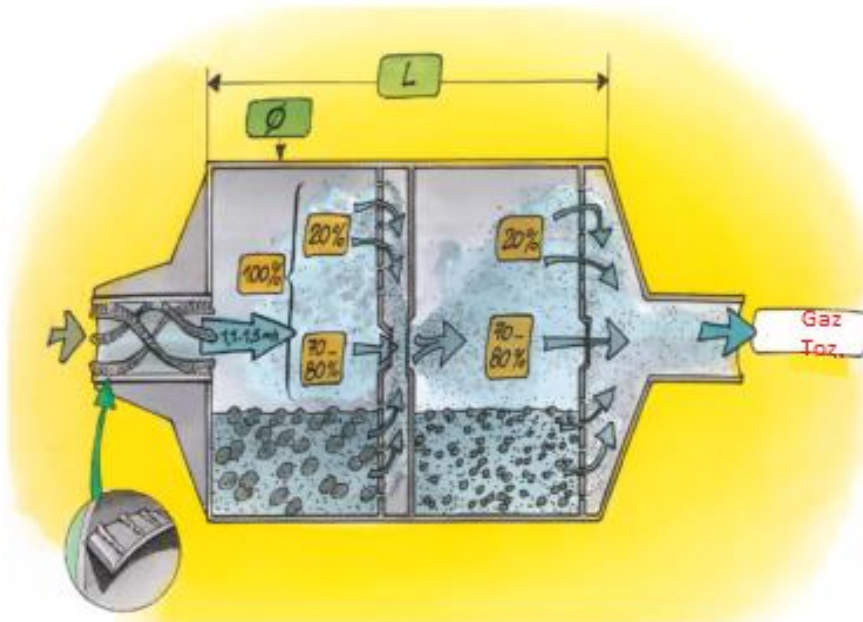
Yarık Kavramı



Şekil 6- Değirmen içi sınıflandırıcı plakaları

Şekil 7- Değirmen plaka yarıkları

Bilyalı Değirmen: Havalandırma



Şekil 8- Değirmen içi havalandırma

Bilyalı değirmen içi plaka- bilya fotoğrafları Resim 1a-1f'te görülmektedir.



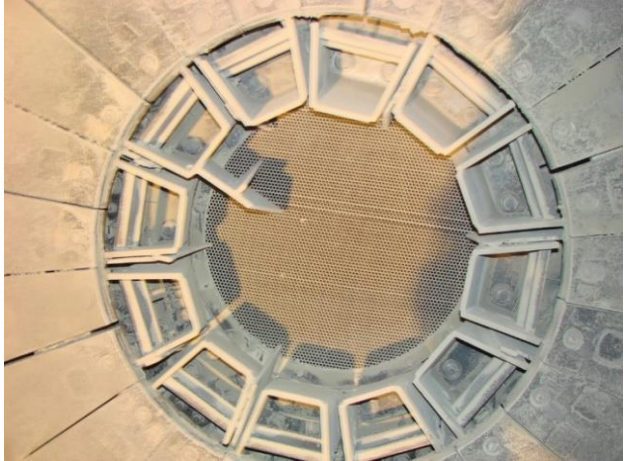
Resim 1a- İki kamaralı bilyalı değirmende 1. kamara



Resim 1b- İki kamaralı bilyalı değirmende 2. kamara



Resim 1c – Değirmen sınıflandırıcı astar plakaları



Resim 1d – Ara Diyafram



Resim 1e- 1. Kamaraya ait bilyalar



Resim 1f- Astar plakaları

Bir bilyalı değirmenin ikinci kamarasında tipik olarak kullanılan astar plaka kesitleri Şekil 9'da gösterilmiştir.

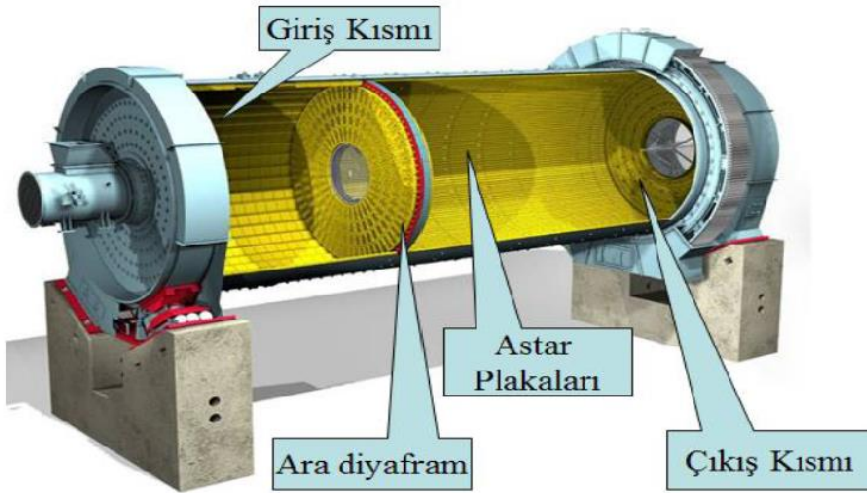


Şekil 9- Bilyalı değirmenin ikinci kamarasında kullanılan astar plaka kesitleri

Bilyalı değirmenin birinci kamarasındaki astar plakalarının görevi, maksimum kırma işlemini sağlamak için bilyaları kaldırma yönündedir.

İkinci kamarada ise kayda değer bir kaldırma işlemine ihtiyaç duyulmamaktadır. Burada daha çok ince öğütme yapıldığından sınıflandırıcı plakalar kullanılmaktadır.

İki kamaralı bir bilyalı değirmene ait kesitteki astar plakalar Şekil 10'da gösterilmektedir.



Şekil 10- Bilyalı değirmende plaka gösterimi

Değirmenin iç kısmındaki plakalar genel olarak şöyle sınıflandırılmaktadırlar:

- Astar Plakaları
- Ara Bölme(diyafram) Plakaları
- Giriş Plakaları
- Çıkış Plakaları

Astar plakaların görevi, değirmenin gövdesini, bilyaların ve öğütülen malzemenin darbesine karşı korumaktır. Sınıflandırıcı olan tipleri sayesinde bilyalar, değirmen çıkışına doğru boyut olarak küçülmektedirler. Yani bilyaların bir tür sınıflandırmasını sağlamaktadırlar.

$L/D > 1,5$ ve de değirmen doluluk oranı $< \%35$ ise sınıflandırıcı plakaların kullanılabileceği ifade edilmektedir.

Bir kamaralı sistemde $L/D = 1,5$, iki kamaralı sistemde $L/D = 3,0$, üç kamaralı sistemde $L/D = 4,5$ olarak ifade edilmektedir.

Ara bölme plakaları, değirmen kamaraları arasında geçiş görevi görmektedirler. İlk kamarada kaba öğütmesi tamamlanmış malzeme, ara bölme plakalarından geçerek ince öğütmenin yapılacağı ikinci kamaraya gelmekte ve nihai öğütme burada tamamlanmaktadır.

Giriş plakaları, değirmenin giriş aynasını darbelere karşı korumaktadır. Bu plakalarda herhangi bir yarıklık (açıklık) bulunmamaktadır. Burada malzeme geçişi de olmamaktadır.

Çıkış plakaları, değirmenin çıkış ayna kısmını darbelere karşı korumaktadır. Bir başka görevi de ikinci kamarada öğütülen malzemenin plaka üzerindeki yarıklardan (açıklıklardan) değirmenin çıkışına verilmesini sağlamaktır.

İstenen ürün inceliğine göre kamara boyları ayarlanabilmektedir. Genellikle 1. Kamara, 2. Kamaradan daha kısadır. 1. Kamaranın boyu, çimento değirmenleri için toplam etkin boyun $\% 30-35$ 'i kadardır.

3. HAZIRLIKLAR VE ÖLÇÜMLER

3.1 Bilyalı Değirmen Etüdü Hazırlıkları Özet Tablosu

Tablo 1- Bilyalı değirmen etüdü hazırlıkları özet tablosu

Planlama	
Görevlendirme	
Gözden Geçirme	
Ölçüm cihazlarının kalibrasyonu	
Separatör performansı için numune alma (Değirmen çalışırken)	Nihai ürün, geri dönüş, separatör besleme noktalarından her bir lokasyon için birkaç dakika aralıkla birkaç kez olacak şekilde numuneleri alıp aynı kaptaki karıştırarak ortalama numune elde edilmelidir. Not: Havalı bantlardan/döküş şutlarından İSG tedbirlerini aldıktan sonra numune alınmalıdır.
Laboratuvara numuneleri gönderme	Separatör performansı için alınan numuneler laboratuvara gönderilerek elek analizi (Tylor serisi) ve belli boyutun altı için lazer analizi yaptırılmalıdır.
Ekran çıktısı alma	Numune alma esnasında merkezi kumanda odasından (CCR) ekran çıktıları alınmalıdır.
Değirmen giriş ve çıkışından debi ölçümü yapılması	Değirmen girişinden (eğer ölçülebiliyorsa) ve çıkışından (genellikle filtre çıkışından) hız, basınç, sıcaklık ölçülmelidir. Kesit alanının tespit edilmesiyle debi değeri hesaplanmalıdır.
Sıcak gaz jeneratöründen debi ölçümü yapılması	Eğer kullanılıyor ise hız, basınç, sıcaklık ölçülmelidir.
Değirmene giren malzemelerin parametrelerinin tespit edilmesi	Sıcaklık ölçümü, nem tayini yapılmalı, kütleler tespit edilmelidir.
Değirmene beslenen su miktarının tespit edilmesi	
Kantar kalibrasyonunun malzeme alınarak doğrulanması	Değirmen dururken kantar çıkışı tartım hattına çevrilmelidir. Kantardan kamyon üzerine malzeme alınarak net ağırlık bulunmalıdır ve kantar sayacıyla karşılaştırılarak % sapma belirlenmelidir. Elde edilen sonuca göre de kantar düzeltme faktörünün hesaplanması ve kantara girilmesi gerekmektedir.
Kullanılan malzemelerin Cp değerlerinin tespiti	Tablo ve grafikler vasıtasıyla bulunabilirler.
Değirmen ana motor gücü tespit edilmesi	Sayaçtan enerji değeri ölçülmelidir. Şayet sayaç yok ise motor girişinden volt, akım ve $\cos \phi$ ölçülmeli veya motorun etiket değerinin okunmasıyla ve kayıpların da hesaba katılmasıyla belirlenmelidir.
Değirmenin ani duruş ile durdurulması	Direkt filtre durdurularak duruş sağlanabilir. Değirmen kapakları açılmalıdır. Değirmen, soğutma fanları ile değil kendi kendine soğutulmalıdır.
Değirmenin normal boşaltılarak durdurulması	Duruştan sonra değirmen kapakları açılmalı ve değirmen soğutma fanları vasıtasıyla soğutulmalıdır.
Ani duruş yapıldıysa buna göre değirmen içinden numune alınması	Belirlenmiş her metrede, en az üç noktadan (sağ-sol-orta) 20-25 cm derinlikten numune alınmalı ve laboratuvara incelik analizi için gönderilmelidir. Değirmen içinde bilyaların malzeme seviyesine kıyasla durumları gözlemlenmelidir.
Normal duruş yapıldıysa bilya şarj boşluk ölçüsü alınması	Bilya seviyesi yatay olarak düz duruma getirildikten sonra değirmenin üst cidar plakasının ortasından bilya seviyesine kadar olan mesafe ölçülmelidir. Bu işlem değirmen boyunca en az üç kez (giriş-orta-çıkış) yapılmalıdır. Ortalaması alınarak şarj boşluğu belirlenmeli ve var ise eksik bilya ilave edilmelidir.
Değirmen içi kontrolünün yapılması	Plaka, bilya, ara ve çıkış bölme diyaframı vb. kontrolü, bilya çap ve plaka kalınlık ölçümü, plaka yarık genişlik ölçümü, diyafram hasar kontrolü, su nozül kontrolü yapılmalıdır.
Değirmen dışındaki ekipman kontrolü	Separatör, jet filtre, havalı bant, elevatör, değirmen civatası, değirmen sızdırmazlıkları, su ve kimyasal besleme sistemi, manyetik separatör (body trap) kontrolü yapılmalıdır.
Değirmen içinde bilya örnekleme yapılması	Her metreden mümkün olduğunca çok bilya alınarak çapları ölçülmelidir ve söz konusu metrede ortalama bilya çapı belirlenmelidir.

3.2. Bilyalı Değirmenlerde Etüd Hazırlıkları

3.2.1. Duruş Öncesi

Etüde başlamadan önce iyi bir planlama yapılmalıdır. Çünkü değirmenlerde hem çalışırken hem de dururken tespit edilmesi gereken parametreler vardır. Etüd için kimlerin hangi işleri yapacağı belirlenerek doğru ve zamanında bir görevlendirme yapılmalıdır. Özellikle değirmene girilmeden alınacak İSG tedbirleri tam ve eksiksiz olarak belirlenmeli ve uygulamaya geçirilmelidir.

Etüd öncesinde ölçüm cihazlarının (hız ölçüm cihazı, sıcaklık ölçüm cihazı vb.) kalibrasyonlarının tam olduğundan emin olunmalıdır.

Separatör ayırma performansını görebilmek amacıyla Separatör Tromp Eğrisi çizebilmek için değirmen stabil koşullarda çalışırken separatör besleme, nihai ürün ve geri dönüş noktalarından anlık olarak, birkaç dakika içerisinde birkaç kez olacak şekilde havalı bantlardan veya dökülüş şutlarından numune alınmalıdır ve bu numuneler daha sonra elek bakiyesi analizi yapılmak üzere laboratuvara gönderilmelidirler. Bu esnada CCR'dan değirmene ait ekran çıktısı da alınmalıdır. Ekran çıktısında görünen değirmen geri dönüş miktarı (t/h), 45-90-200 mikron elek bakiyesi sonucunda ortaya çıkacak olan ortalama sirkülasyon miktarının kullanılmasıyla hesaplanan geri dönüş miktarı ile kıyaslanmalıdır. Kayda değer bir fark olması halinde geri dönüş çarpmalı kantarının kalibrasyonu gözden geçirilmelidir.

Jet filtre basınçları, şoklamaları, değirmen girişinde ve filtre bacasında gaz hızı ölçülmelidir. Bacada ölçülen hız, kaçakları içereceğinden dolayı değirmen hızını hesaplarken bu kaçakların hesaptan düşülmesi önem arz etmektedir. Bu nedenle giriş boğazında yapılacak ölçüm daha doğru sonuç verecektir.

Değirmene giren malzemelerin (klinker, tras, alçıtaşı vb.) sıcaklıkları mümkün ise adyabatik kap kullanılarak, değilse kantar üzerinden termo element vasıtasıyla ölçülmelidir.

Kütle ve ısı balansında kullanılan Cp değeri için aşağıda verilen mevcut formül ve tablolar kullanılarak hesaplama yapılmalıdır.

3.2.2. Duruş Esnasında

Değirmen duruşu aşağıda sunulduğu üzere iki şekilde gerçekleşmektedir:

3.2.2.a. Değirmen Ani Duruşu (Crash Stop)

Bilyalı değirmenin stabil koşullarda çalışırken bir anda durdurulmakta ve fanlar çalıştırılmadan, değirmen kapakları açık bırakılarak kendi kendine soğumaya bırakılmaktadır. Yapılan bu duruşa ani duruş denmektedir.

Bu işlem, değirmen içi öğütme verimini ortaya koymak için yapılmaktadır. Buradaki amaç değirmen soğuduktan sonra içine girilmesi ve daha önce detaylı şekilde anlatıldığı şekilde çimento numunesinin alınarak elek analizi için laboratuvara gönderilmesidir. Analiz sonucunda değirmen aksiyal eğrileri çizilmekte ve böylece değirmenin içindeki öğütme verimi belirlenmektedir.

Ayrıca bu esnada yine daha önce anlatıldığı şekilde bilya çapları ölçülmeli, değirmen içerisindeki bilya dağılımı ortaya konulmalıdır. Aksiyal eğride veya bilya dağılım eğrisinde olması gerekenden daha farklı bir durum gözlenirse değirmenin ilgili noktasındaki plakalar gözden geçirilmelidir.

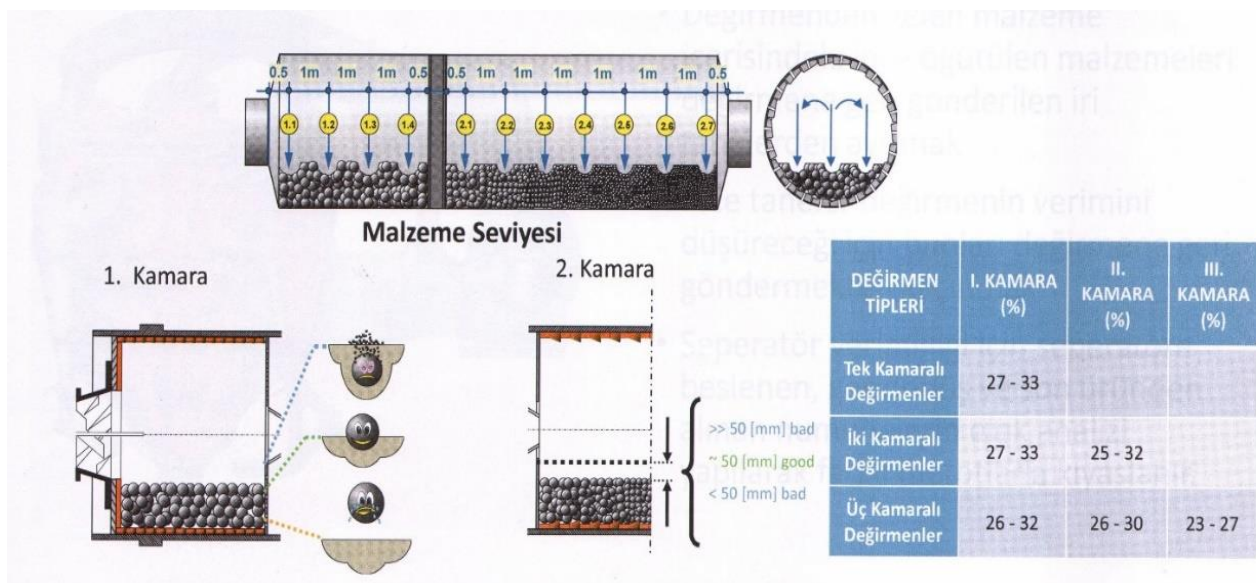
Dolayısıyla değirmen içi aksiyal eğrileri çizilerek bir yorumlama yapılmaktadır. Ani duruş sonrası değirmen içine ait görüntü Resim 2’de gösterilmektedir.



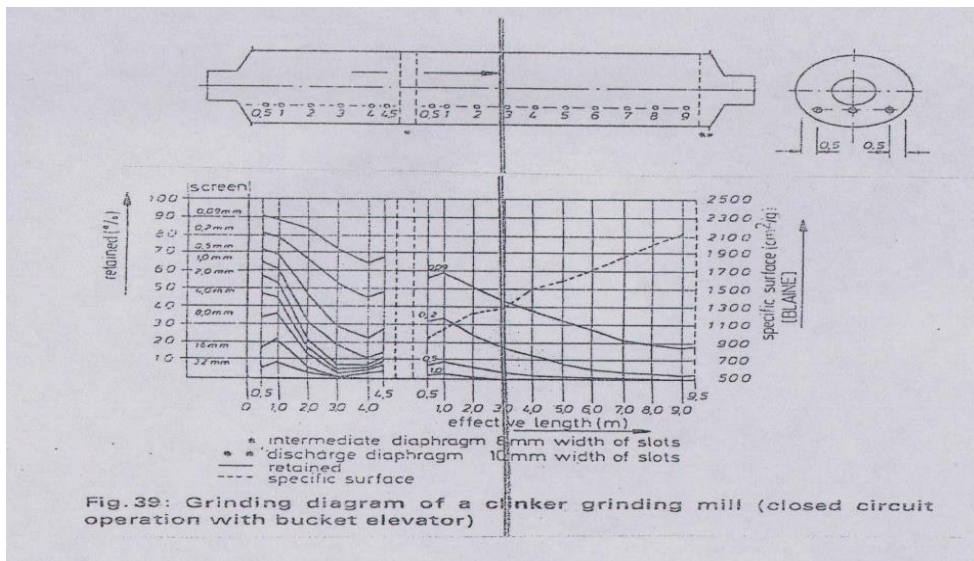
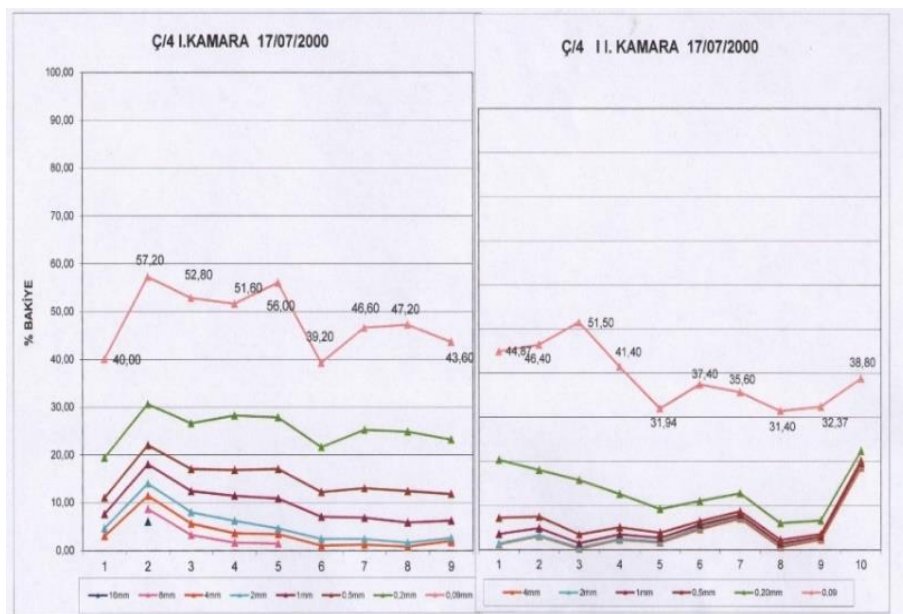
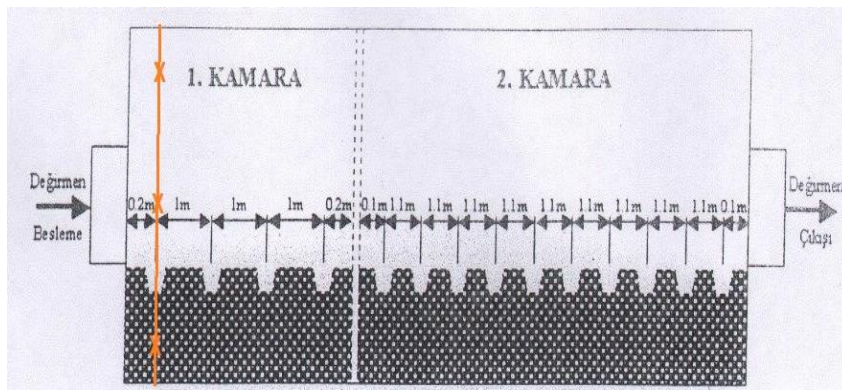
Resim 2- Ani duruş sonrası değirmen içi görüntüsü

İki kamaralı bir bilyalı değirmende ani duruş sonrası değirmen içerisinden alınacak numune noktaları Şekil 11-12’de görülmektedir. Her metrede en az 3 noktadan numune alınarak o metre için karışım numunesi hazırlanmalıdır. Numuneler en az 20-25 cm derinden toplanmalıdır. Bunun sonucunda laboratuvarda incelik analizi yapılarak Şekil 13 ve 14’te görülen grafikler elde edilecektir. Söz konusu grafik iki kamaralı bir değirmende numune alınan noktalara göre çizilmiştir. Bu noktalar her değirmen için değişse de 0,5 veya 1 metre aralıklarla numune alınması önerilmektedir. Grafiğin yorumlanmasıyla hangi noktada öğütmede sorun olduğu anlaşılmaktadır. Ani duruştan sonra ara bölme ızgarasının 0,5 metre önünden alınan örneğin 2,5 mm elek bakiyesi % 5’in altında olmalıdır. Şekil 14’te de iki kamaralı bilyalı bir değirmende numune alma noktalarındaki yüzde bakiyeleri gösteren örnek bir grafik sunulmuştur.

Ani duruş yapıldığında birinci kamaradaki bilyaların bazılarının hafifçe üstü görünmelidir. İkinci kamaradaki bilyaların üstleri ise 3-4 cm malzeme ile kaplanmış olmalıdır. Şekil 15'te ani duruşta bilyalara göre doğru malzeme seviyeleri gösterilmektedir.



Şekil 11- Değirmendeki bilya pozisyonları





Şekil 15- Bilyalara göre doğru malzeme seviyesi

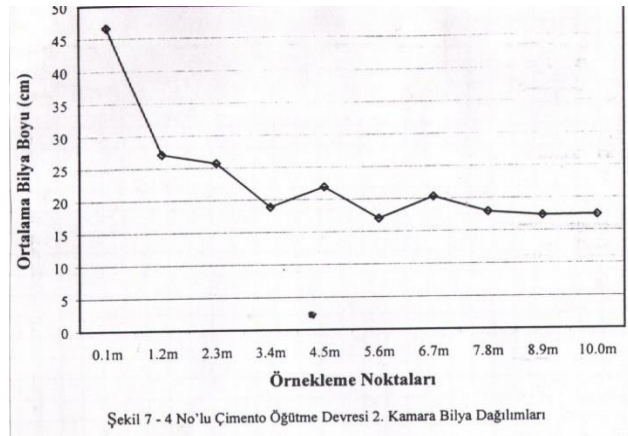
Yukarıdaki aksiyal çizimler; kamarada bulunan bilya miktarı ve şarj kompozisyonu, diyaframın işlevselliği, astar plakaları, değirmene verilen suyun yarattığı etki ve plaka açıklıkları hakkında yorumlar yapılmasına yardımcı olmaktadır.

Klinkerin yapısı ve bilya boyutları, malzeme kırılma hızları açısından önemli birer parametredir.

Uygun bilya boyu dağılımlarının seçilmesiyle kamaralardaki malzemelerin kırılma hızı artırılabilir ve bu sayede değirmenlerde tonaj artışı sağlanabilmektedir. Bunun için kamara içinde her metrede bilyaların çapları ölçülmeli, kaydedilmeli ve ortalaması alınmalıdır. Bu işlem yapılırken mümkün olduğunca çok bilya çapı ölçülmelidir. Sınıflandırıcı plaka kullanılan değirmenlerde, bilya boyunun çıkışa doğru küçülmesi beklenmektedir. Resim 3'te kamara içindeki bilyalarda yapılan çap ölçümü, Şekil 16'da da gerçek bir değirmen verisine ait grafik görülmektedir.



Resim 3- Bilyalı değirmende birinci kamarada öğütme bilyalarının çap ölçümü



Şekil 16- Örnekleme noktalarından hesaplanmış ortalama bilya boylarına ait gerçek bir değirmen verisi

Değirmen kamara sonlarında bir miktar malzeme birikmesi söz konusu olabilmektedir. Bu durum Şekil 13 ve 14'te gözlemlenebilmektedir. Ayrıca ara bölme diyaframının elek ızgara açıklığına göre de birikme yapan tane boyutları mevcuttur.

Değirmenin ani duruş sonrası fanlar çalıştırılmadan kendi kendine soğuması istenmektedir.

3.2.2.b. Değirmenin Boşaltılarak Durdurulması:

Değirmen durdurulduktan ve fanlar çalıştırılıp soğutulduktan sonra değirmen içine girilmektedir. Değirmenin her bir kamarasından daha önce anlatıldığı gibi bilya şarj boşluk ölçüsü alınmaktadır. Bahse konu bu ölçü kullanılarak değirmendeki bilya tonaj miktarı ve ilave edilmesi gereken bilya miktarı tespit edilmekte, genelde büyük çaplı bilyadan başlamak üzere bilya ilavesi yapılmaktadır.

Değirmenin içine girildiğinde aşağıdaki tespitler yapılmaktadır:

- Bilya ve plakalarda keçeleşme kontrolü
- Diyafram ve çıkış plakaları yarıklarında bilya veya malzeme parçaları nedeniyle tıkanıklık
- Giriş ve çıkış su nozullarında deformasyon
- Değirmen plakalarında hasar
- Diyafram ve çıkış ızgaralarında genişleme
- Değirmen içinde bilya kırıkları
- Separatör kursağının kontrolü
- Separatör kanat ve boşluklarının kontrolü
- Jet filtre torbalarının kontrolü
- Değirmen civatalarında eksiklerin kontrolü
- Değirmen giriş sızdırmazlığının kontrolü
- Öğütme kolaylaştırıcı sisteminin kontrolü
- Yabancı cisimlerin separatöre girmesini engelleyen manyetik separatör (body trap) sisteminin kontrolü
- Elevatör döküş ve kovalarının kontrolü
- Havalı bantların kontrolü
- Değirmen yağlama sisteminin kontrolü

vb.

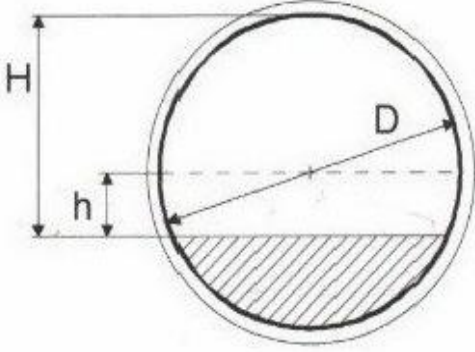
Kütle balansında kullanılan kütle miktarının (değirmen tonajı) doğruluğunu ortaya koyabilmek için kantar kalibrasyonu yapılmalıdır. Kül gibi katkı malzemelerinin de tartıldığı ekipmanların (pfister gibi) kalibrasyonlarının da yapılması gerekmektedir. Kantarlardan alınan ölçümlerin yaş bazda olduğu unutulmamalıdır.

Kantar kalibrasyonu yapılırken aşağıdaki formül ile yeni düzeltme faktörü hesaplanmalıdır:

$$\text{Yeni Düzeltme Faktörü} = \left(\frac{\text{Kamyonun Aldığı Malzeme Miktarı}}{\text{Sayaç tan Okunan Değer}} \right) \times \text{Önceki Düzeltme Faktörü}$$

4. BİLYA ŞARJ YÜKÜ - GÜÇ HESAPLAMALARI VE SPESİFİKASYONLAR

4.1. Bilya Şarj Yüğü



- D (m) : Efektif değirmen kamara çapı
L (m) : Efektif değirmen kamara uzunluğu
V (m³) : Değirmen kamara hacmi

$$V = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times L$$

- h (m) : Değirmen merkezinden bilya seviyesine olan mesafe

$$h = H - \frac{D}{2}$$

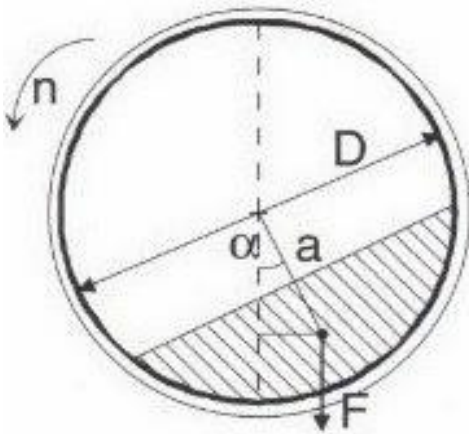
$$\frac{h}{D} = \frac{H}{D} - \frac{1}{2}$$

* h/D değeri Tablo 2'den alınabilir.

- H (m) : Değirmenin üst noktasından (Kamara içi plakadan itibaren) bilya seviyesine olan mesafe
q (%) : Spesifik bilya şarj yükü (Tablo 2'den alınabilir.)
w (t/m³) : Birim hacme düşen ağırlık (Tablo 3'ten alınabilir.)
F (t) : Bilya şarj yükü

$$F = \frac{q}{100} \times w \times V$$

4.2. Bilyalı Değirmen Kamara Güç Tüketimi



- D (m) : Efektif değirmen kamara çapı
a (-) : Değirmen çapına ilişkin olarak yerçekimi kolu
n (rpm) : Değirmen dönüş hızı
g (m/s²) : Yerçekimi ivmesi
 α (°) : Yerdeğişim açısı
N (kWnet) : Değirmen mantosunda kamara başına düşen güç tüketimi

$$N = F \times g \times D \times a \times \sin \alpha \times \pi \times \frac{n}{60} \quad (kWnet)$$

$$g \times \frac{\pi}{60} = 0,514$$

$$N = 0,514 \times F \times n \times \mu \times D \times a \quad (kWnet)$$

- $\sin \alpha$: Tork faktörü (μ) olarak Tablo 3'ten alınabilir.

Standart değerler Tablo 3'den alınabilir.

Tablo 2. Spesifik bilya şarjı tablosu

Charge and power			Specific charge		
h/D	a	q	h/D	a	q
0.000	0.425	50.0	0.200	0.647	25.2
0.005	0.430	49.4	0.205	0.653	24.6
0.010	0.435	48.7	0.210	0.659	24.1
0.015	0.441	48.1	0.215	0.665	23.5
0.020	0.446	47.5	0.220	0.670	22.9
0.025	0.452	46.8	0.225	0.676	22.4
0.030	0.457	46.2	0.230	0.682	21.8
0.035	0.462	45.6	0.235	0.688	21.2
0.040	0.468	44.9	0.240	0.693	20.7
0.045	0.473	44.3	0.245	0.699	20.1
0.050	0.479	43.6	0.250	0.705	19.6
0.055	0.484	43.0	0.255	0.711	19.0
0.060	0.490	42.4	0.260	0.717	18.5
0.065	0.495	41.8	0.265	0.722	17.9
0.070	0.501	41.1	0.270	0.728	17.4
0.075	0.507	40.5	0.275	0.734	16.8
0.080	0.512	39.9	0.280	0.740	16.3
0.085	0.518	39.2	0.285	0.746	15.8
0.090	0.523	38.6	0.290	0.751	15.3
0.095	0.529	38.0	0.295	0.757	14.8
0.100	0.534	37.4	0.300	0.763	14.2
0.105	0.540	36.7	0.305	0.769	13.7
0.110	0.546	36.1	0.310	0.775	13.2
0.115	0.551	35.5	0.315	0.781	12.7
0.120	0.557	34.9	0.320	0.786	12.2
0.125	0.562	34.3	0.325	0.792	11.8
0.130	0.568	33.6	0.330	0.798	11.3
0.135	0.574	33.0	0.335	0.804	10.8
0.140	0.579	32.4	0.340	0.810	10.3
0.145	0.585	31.8	0.345	0.816	9.87
0.150	0.591	31.2	0.350	0.822	9.41
0.155	0.596	30.6	0.355	0.828	8.95
0.160	0.602	30.0	0.360	0.833	8.51
0.165	0.608	29.4	0.365	0.839	8.07
0.170	0.613	28.8	0.370	0.845	7.64
0.175	0.619	28.2	0.375	0.851	7.22
0.180	0.625	27.6	0.380	0.857	6.80
0.185	0.630	27.0	0.385	0.863	6.39
0.190	0.636	26.4	0.390	0.869	5.99
0.195	0.642	25.8	0.395	0.875	5.59

Tablo 3. Bilyalı değirmen tork faktörü tablosu

Charge and power			Torque factors		
Material	Grinding	Lining	Internal fittings	Media Type	Torque
Cement and raw meal (dry)	Coarse and medium	Steel	None	Balls	4.3
			None	Rods	6.0
			Danula	Balls	4.3
			Sonex	Balls	4.3
			None	Balls	4.5
	Fine	Steel	None	Cylpebs	4.7
			None	Minipebs	4.7
			Danula	Balls	4.5
			Danula	Cylpebs	4.7
			Danula	Minipebs	4.7
Slurry (wet)	Coarse and medium	Steel	None	Balls	4.3
			None	Rods	6.0
			Danula	Balls	4.3
			Sonex	Balls	4.3
			None	Balls	4.5
	Fine	Steel	None	Cylpebs	4.7
			Danula	Balls	4.5
			Danula	Cylpebs	4.7
			None	Ceramic	1.9
			None	Stone	1.5
Wash drum	All	Steel Silex	Lifters	Stone	1.5
Coal	Coarse	Steel	None	Balls	4.3
	Medium		None	Balls	4.5
	Medium		None	Cylpebs	4.7
	Medium		Danula	Cylpebs	4.7

4.3. Değirmen Kritik Hızı

$$n_c = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \quad rpm$$

D (m): Efektif değirmen kamara çapı

Normal olarak değirmen hızı, kritik hızın % 70-80'i arasındadır.

Örnek 3:

UMS 42 X 13 bilyalı değirmen 16 rpm hız ile dönmektedir. Birinci ve ikinci kamaraya ait veriler aşağıda verilmiştir. Bilya şarj ve güç tüketim değerlerini hesaplayınız.

	1. Kamara Verileri	2. Kamara Verileri
D (m)	4,01	4,13
L (m)	3,89	8,38
H (m)	2,75	2,81

Birinci Kamara için:

$$V = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times L$$

$$V = \frac{\pi}{4} \times 4,01^2 \times 3,89$$

$$V = 49,1 \, m^3$$

$$\frac{h}{D} = \frac{H}{D} - \frac{1}{2}$$

$$\frac{h}{D} = \frac{2,75}{4,01} - \frac{1}{2}$$

$$\frac{h}{D} = 0,186$$

Tablo 2'den 0,186'ya karşılık gelen q değeri % 27,0 olarak okunur.

Tablo 3'ten de $w = 4,3 \text{ t/m}^3$ olarak okunur.

$$F = \frac{q}{100} \times w \times V$$

$$F = \frac{27}{100} \times 4,3 \times 49,1$$

$$F = 57 \text{ ton}$$

Tablo 2'den $a=0,630$ ve Tablo 3'ten ise $\mu=0,73$ olarak okunur.

$$N = 0,514 \times F \times n \times \mu \times D \times a \quad (kW_{net})$$

$$N = 0,514 \times 57 \times 16 \times 0,73 \times 4,01 \times 0,630 \quad (kW_{net})$$

$$N = 865 \quad (kW_{net})$$

İkinci Kamara için:

$$V = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times L$$

$$\frac{h}{D} = \frac{H}{D} - \frac{1}{2}$$

$$V = \frac{\pi}{4} \times 4,13^2 \times 8,38$$

$$\frac{h}{D} = \frac{2,81}{4,13} - \frac{1}{2}$$

$$V = 112,3 \text{ m}^3$$

$$\frac{h}{D} = 0,180$$

Tablo 2'den 0,180'e karşılık gelen q değeri % 27,6 olarak okunur.

Tablo 3'ten ise $w = 4,5 \text{ t/m}^3$ olarak okunur.

$$F = \frac{q}{100} \times w \times V$$

$$F = \frac{27,6}{100} \times 4,5 \times 112,3$$

$$F = 139,4 \text{ ton}$$

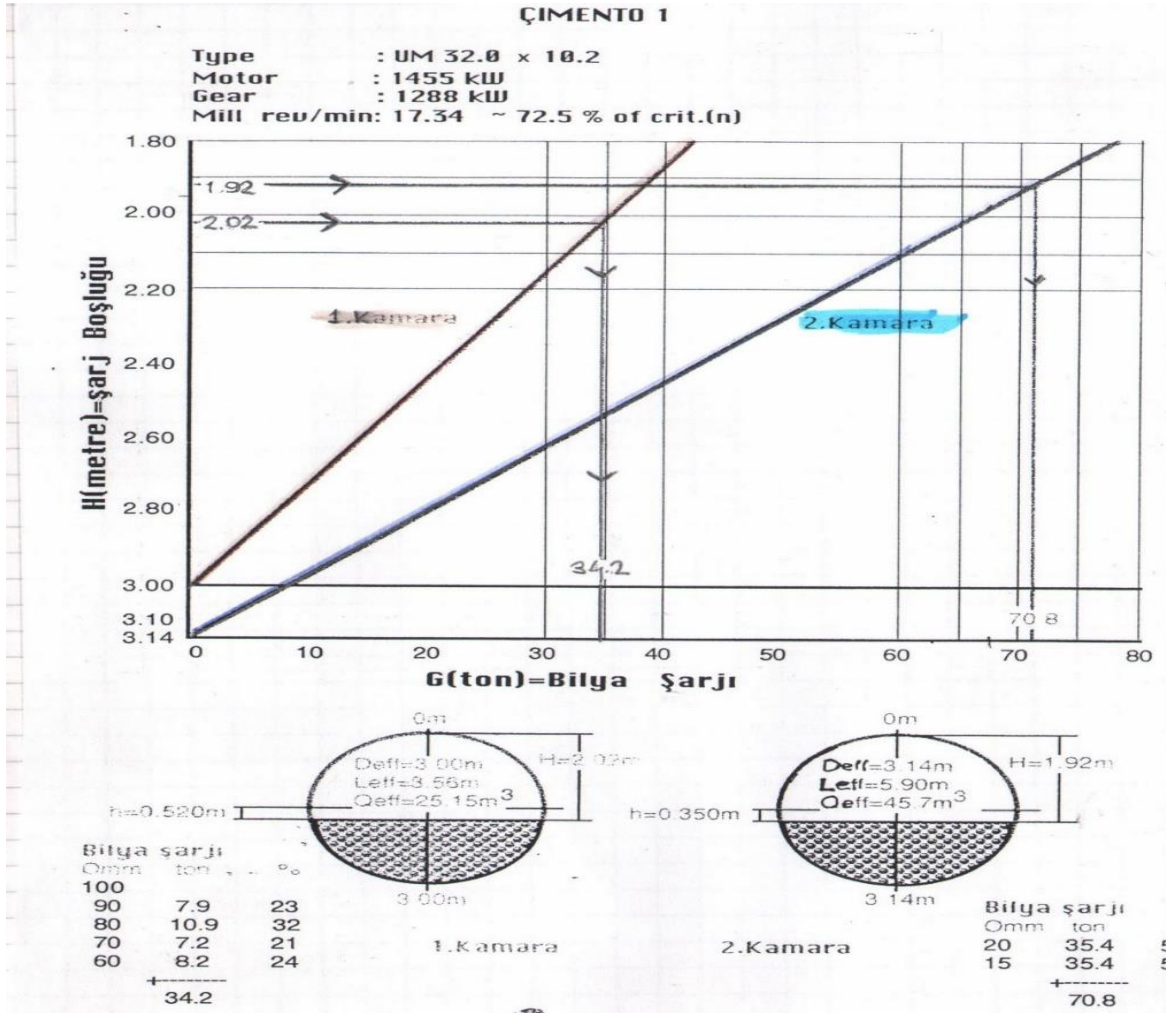
Tablo 2'den $a=0,625$ ve Tablo 3'ten ise $\mu=0,69$ olarak okunur.

$$N = 0,514 \times F \times n \times \mu \times D \times a \quad (kW_{net})$$

$$N = 0,514 \times 139,4 \times 16 \times 0,69 \times 4,13 \times 0,625 \quad (kW_{net})$$

$$N = 2.042 \quad (kW_{net})$$

Bilya aşınmasına karşılık ilave edilecek bilya miktarını gösteren eğri örnek olması amacıyla Şekil 17’de verilmiştir. Bu eğri her değirmen için farklılık göstermektedir.



Şekil 17- Bilya aşınmasına karşılık ilave edilecek bilya miktarını gösteren eğri

4.4. Bilyalı Değirmen Spesifikasyonları

Bilyalı değirmen spesifikasyonları ile ilgili olarak literatürde yer alan bazı veriler Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4- 2 kamaralı kapalı devre bilyalı çimento değirmeni spesifikasyonları

2 Kamaralı Kapalı Devre Bilyalı Çimento Değirmeni		
	Birinci Kamara	İkinci Kamara
Güç Tüketimi	9-10 kWh/t çimento	24-25 kWh/t çimento
Plaka Tipi	Kaldırma plakaları	Sınıflandırma plakaları (veya Wave tip)
Bilya Şarj Spesifik Yüzey Alanı	9,5-10,5 m ² /ton şarj	35-38 m ² /ton şarj
Roller Presli 2 Kamaralı Kapalı Devre Bilyalı Çimento Değirmeni		
Güç Tüketimi	5-6,5 kWh/t çimento	22-25 kWh/t çimento
Plaka Tipi	Kaldırma plakaları	Sınıflandırma plakaları (veya Wave tip)
Bilya Şarj Spesifik Yüzey Alanı	12-14 m ² /ton şarj	38-40 m ² /ton şarj

Literatürdeki bilgiler doğrultusunda genel olarak 1 m³ bilya yükünün 10 kW artışa yol açacağı düşünülebilir.

Çimento değirmeninin spesifik enerjisi aşağıdaki etkenlere bağlıdır:

- Klinkerdeki belit miktarının artması (aşırı pişmiş sert klinker)
- Separatör rotor hızı
- Bilya şarj yükü
- Plaka durumu
- Geri dönüş miktarı
- Filtre tozlarının sisteme geri beslendiği nokta
- Öğütme yardımcısı

Tablo 5'te Northern Area Technical Service tarafından önerilen bilya şarj kompozisyonu örnekleri görülmektedir.

Tablo 5- Northern Area Technical Service tarafından

Bilya Çapı (mm)	% Bilya Şarjı	Birikimli % Bilya Şarjı	Kamara
90	13,5	13,5	I. Kamara
80	4,5	18,0	
70	4,0	22,0	
60	5,5	27,5	
50	5,5	33,0	II. Kamara
40	6,5	39,5	
30	6,0	45,5	
25	13,0	58,5	
20	20,0	78,5	
17	21,5	100,0	

FLS'in tavsiyesine göre ürün bazında bilyalı değirmen kamara sistemlerindeki şarj dağılımları Tablo 6-11 arasında sunulmaktadır:

Tablo 6- Çimento ve farin değirmeni için 1. kamara bilya boyutu ve oranı

90 mm	80 mm	70 mm	60 mm
%23	%32	%21	%24

Tablo 7- Kömür değirmeni için 1. kamara bilya boyutu ve oranı

50 mm	40 mm	30 mm
%25	%40	%35

Tablo 8- Çimento değirmeni için sınıflandırıcı plaka yok ise 2. kamara şarj dağılımı

	25 mm	20 mm	15 mm
Açık Devre	%20	%40	%40
Kapalı Devre	%40	%40	%20

Tablo 9- Çimento değirmeni için sınıflandırıcı plaka var ise 2. kamara şarj dağılımı

50 mm	40 mm	30 mm	25 mm	20 mm	15 mm
%10	%10	%5	%30	%30	%15

Tablo 10- Tek kamaralı farin değirmeni için sınıflandırıcı plaka var ise şarj dağılımı

90 mm	80 mm	70 mm	60 mm	30 mm	25 mm	20 mm
%14	%19	%13	%14	%14	%16	%10

Tablo 11- Tek kamaralı kömür değirmeni için sınıflandırıcı plaka var ise şarj dağılımı

50 mm	40 mm	30 mm	25 mm	20 mm	15 mm
%11	%18	%16	%22	%23	%10

NOT: Bilya eklenmesi gerektiğinde genellikle en yüksek çaplı bilyadan başlanarak ilave yapılmaktadır.

Bilyaların ebatlarının seçilmesinde genel kural aşağıdaki gibidir:

- Kaba öğütme için iri bilyalar seçilmelidir.
- İnce öğütme için küçük çaplı bilyalar seçilmelidir.

Ortalama bilya ağırlığı 1,65 ila 1,85 kg arasındadır. Zor öğünen malzemeler için ortalama bilya ağırlığı arttırılmalıdır.

Genelde bir bilyanın, kendi boyutunun 1/3'ünü kırabildiği ifade edilmektedir. Bu, 100 mm çapında bir bilyanın 35-40 mm çapında bir parçayı kırabileceği anlamına gelmektedir.

Örnek 4:

Şarj boşluğuna karşı bilya şarjının hesaplanması için grafik oluşturulması

Veriler:

$$D= 3,62 \text{ m} \quad L= 4,59 \text{ m} \quad H=2,42 \text{ m}$$

Hesaplama:

$$V = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times L$$

$$\frac{h}{D} = \frac{H}{D} - \frac{1}{2}$$

$$V = \frac{\pi}{4} \times 3,62^2 \times 4,59$$

$$\frac{h}{D} = \frac{2,42}{3,62} - \frac{1}{2}$$

$$V = 47,24 \text{ m}^3$$

$$\frac{h}{D} = 0,169$$

Tablo 2 ve 3'ten her h/D değeri için a, q ve w değerleri okunur. Buna göre:

$$a= 0,613$$

$$q= \% 28,8$$

$$w= 4,3 \text{ t/m}^3 \text{ (1. Kamara)}$$

$$w= 4,5 \text{ t/m}^3 \text{ (2. Kamara)}$$

1. Kamara

$$F = \frac{q}{100} \times w \times V$$

$$F = \frac{28,8}{100} \times 4,3 \times 47,24$$

$$F = 58,5 \text{ ton}$$

2. Kamara

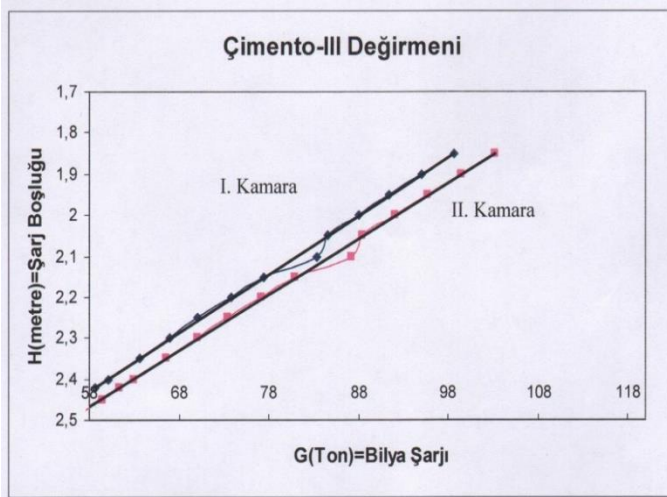
$$F = \frac{q}{100} \times w \times V$$

$$F = \frac{28,8}{100} \times 4,5 \times 47,24$$

$$F = 61,2 \text{ ton}$$

4.5. Bilya Aşınmasına Karşın Bilya İlave Edilmesi:

Her değirmen için Şekil 18a'da gösterilen eğri oluşturularak bilya şarj miktarı belirlenmekte ve Şekil 18b'de örneği verilen değerlendirme tablosuna veriler aktarılmaktadır. Belli periyodlarla (genelde ayda bir yapılmaktadır) değirmen içerisinden bilya şarj boşluk ölçüsü alınarak oluşturulan eğri kullanılarak kaç ton bilya ilave edilmesi gerektiği tespit edilmektedir. Bilya şarj miktarında azalma olduğunda değirmen tonajında düşme, enerji miktarında yükselme görülmektedir. Dolayısıyla bilya şarjı değirmen performansını etkileyen önemli bir unsurdur.

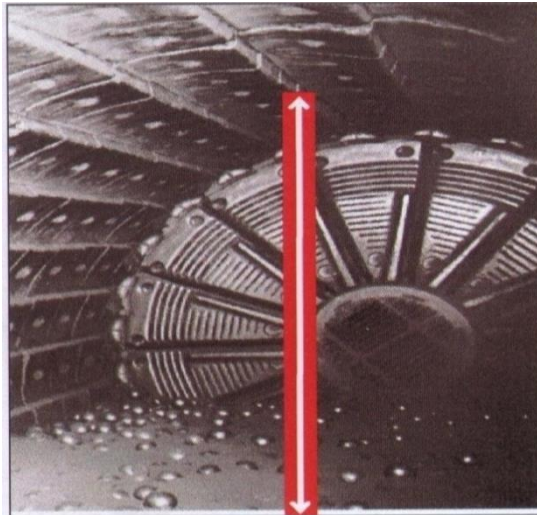


Şekil 18a- Bilya şarj miktarı eğrisi

ÇİMENTO-III DEĞİRMENİ						
H	h	h/D	a	q	F(kamara1)	F(kamara2)
1,85	0,04	0,011	0,433	48,580	98,64	103,23
1,9	0,09	0,025	0,449	46,800	95,03	99,45
1,95	0,14	0,039	0,465	45,040	91,45	95,71
2	0,19	0,052	0,480	43,360	88,04	92,14
2,05	0,24	0,066	0,495	41,660	84,59	88,52
2,1	0,29	0,080	0,501	41,067	83,38	87,26
2,15	0,34	0,094	0,527	38,120	77,40	81,00
2,2	0,39	0,108	0,543	36,340	73,79	77,22
2,25	0,44	0,122	0,560	34,530	70,11	73,37
2,3	0,49	0,135	0,573	33,000	67,01	70,12
2,35	0,54	0,149	0,588	31,320	63,59	66,55
2,4	0,59	0,163	0,604	29,640	60,18	62,98
2,42	0,61	0,169	0,610	28,870	58,62	61,35
2,45	0,64	0,177	0,619	27,960	56,77	59,41
2,5	0,69	0,191	0,634	26,280	53,36	55,84

Şekil 18b- Bilya şarj miktarı değerlendirme tablosu

Şekil 19'da değirmende bilya şarj boşluğu ölçümü gösterilmektedir.



Şekil 19- Değirmende bilya şarj boşluğu ölçümü

Değirmen içinde bilyaların aşınmasına karşın ilave edilmesi gereken bilya miktarının tayini için önerilen başka bir yöntem aşağıda Örnek 5 ile anlatılmaktadır. Bu noktada, aşınma miktarları ile ilgili aşağıda sunulan genellemeler unutulmamalıdır:

- Birinci kamara için bilya aşınma miktarı genelde 21 g/ton çim
- İkinci kamara için bilya aşınma miktarı genelde 23 g/ton çim

Örnek 5:

Değirmene en son yapılan bilya şarjından sonra 70.000 ton çimento üretimi yapılmıştır.

$$Aşınma Payı (kg) = Çimento Üretimi (ton) \times Aşınma Miktarı (g / ton çimento)$$

$$Aşınma Payı (kg) = 70.000 \times \frac{20}{1000}$$

$$Aşınma Payı (kg) = 1.400$$

$$Aşınma Payı (ton) = 1,4$$

Hesaplamaya göre 1,4 ton bilya değirmene atılmalıdır (genelde en yüksek çaplı bilya atılmak üzere)

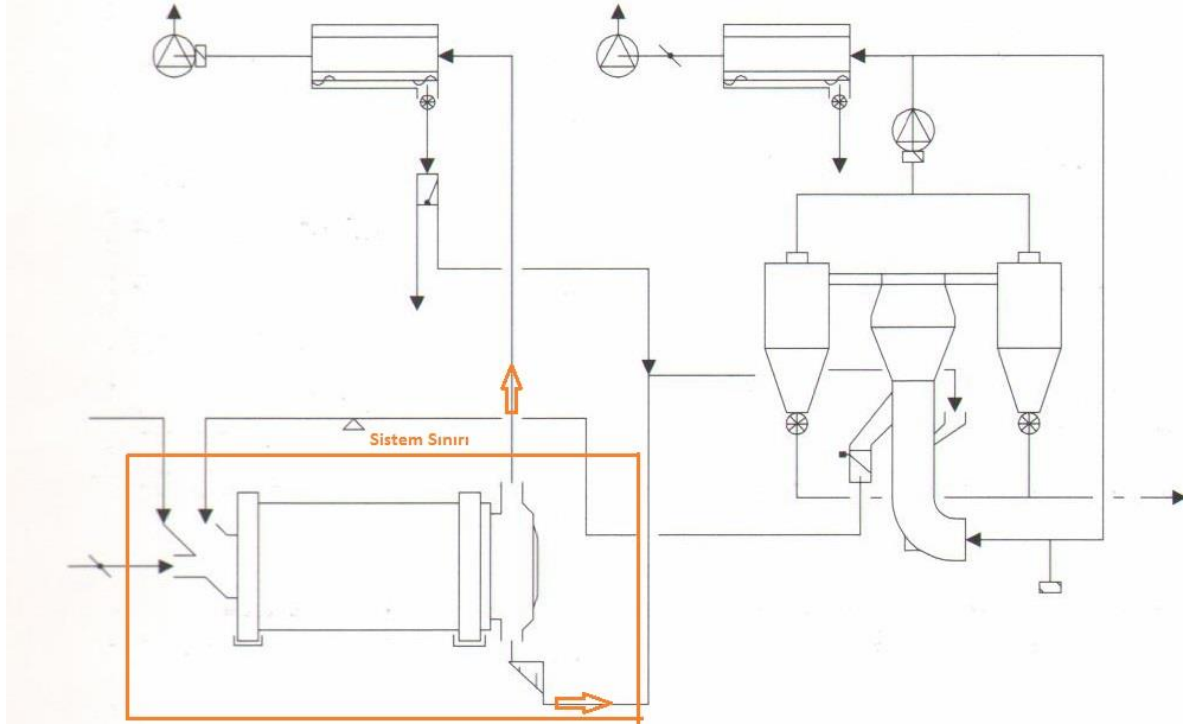
NOT: Ayrıca literatürdeki çeşitli kaynaklarda çimento öğütmede büyük çaplı bilyalar için 2-5 g/kWh aşınma payı ve küçük çaplı bilyalar için de 1-3 g/kWh aşınma payı bilgisi yer almaktadır.

Bilyalı değirmen içerisinden şarj boşluğu ölçüsü almak için değirmen durdurulduktan ve İSG önlemleri de alındıktan sonra değirmen içine girilmeli, öncelikle bilya seviyesi yatay olarak düz bir duruma getirilmelidir. Değirmenin üst cidar plakalarının ortasından bilya seviyesine kadar olan mesafe ölçülmelidir. Bu işlem, değirmen boyunca giriş, orta ve çıkış olmak üzere en az üç noktada yapılmalı ve ölçülen değerlerin ortalaması ile şarj boşluğu belirlenmelidir. Ortalamaya göre de değirmene ilave edilecek bilya miktarına karar verilmelidir. Ayda bir şarj boşluğu alınarak bilya seviyesinin kontrol edilmesi tavsiye edilmektedir.

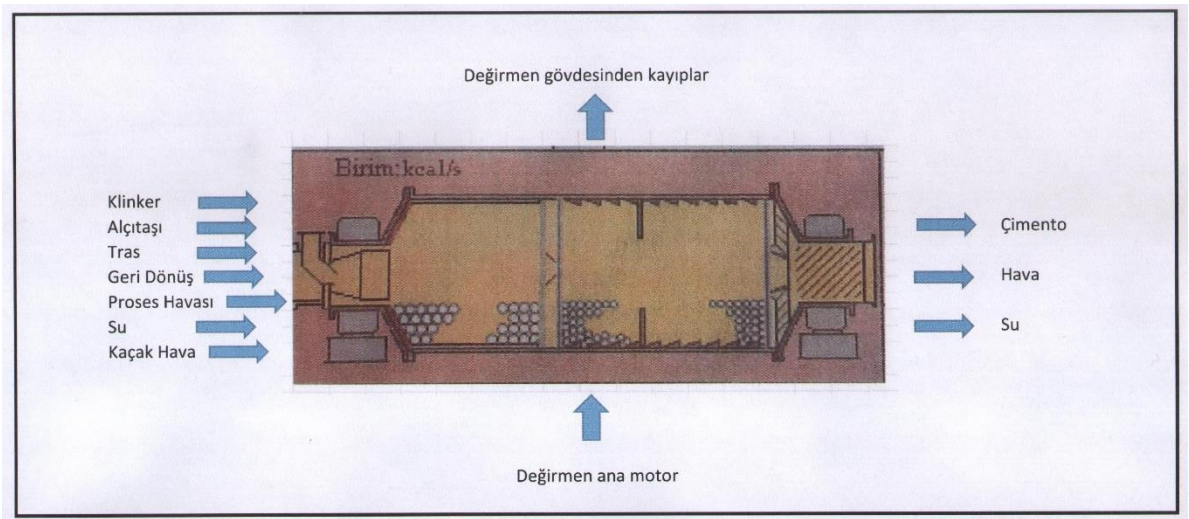
NOT: Değirmene girilmeden önce alınması gereken İSG Tedbirleri tavsiye niteliğinde dökümanın sonunda verilmiştir.

5. ÇİMENTO DEĞİRMENLERİNDE KÜTLE - ISI BALANSI

Kapalı devre bir bilyalı çimento değirmeninde kütle ve ısı balansı yapmak üzere belirlenen sistem sınırı (Şekil 20) ile sisteme giren ve sistemden çıkan parametreler (Şekil 21) doğrultusunda yapılan hesaplamalar aşağıda verilmiştir. Buna göre,



Şekil 20- Kapalı devre bir bilyalı çimento değirmeninde kütle ve ısı balansı yapmak üzere belirlenen sistem sınırı



Şekil 21- Bilyalı değirmende girdi ve çıktılar

Sisteme Giren Kütle Hesaplamaları:

$$\text{Toplam Yaş Değirmen Tonağı (kg/h)} = \text{Yaş Klinker Tonağı (kg/h)} + \text{Yaş Alçıtaşı Tonağı (kg/h)} + \text{Yaş Tras Tonağı (kg/h)}$$

$$\text{Kuru Klinker Tonağı} - m_{KK} \text{ (kg/h)} = \text{Yaş Klinker Tonağı (kg/h)} - (\text{Yaş Klinker Tonağı} \times \% \text{ Nem})$$

$$\text{Kuru Alçıtaşı Tonağı} - m_{KA} \text{ (kg/h)} = \text{Yaş Alçıtaşı Tonağı (kg/h)} - (\text{Yaş Alçıtaşı Tonağı} \times \% \text{ Nem})$$

$$\text{Kuru Tras Tonağı} - m_{KT} \text{ (kg/h)} = \text{Yaş Tras Tonağı (kg/h)} - (\text{Yaş Tras Tonağı} \times \% \text{ Nem})$$

$$\text{Toplam Kuru Değirmen Tonağı (kg/h)} = \text{Kuru Klinker Tonağı (kg/h)} + \text{Kuru Alçıtaşı Tonağı (kg/h)} + \text{Kuru Tras Tonağı (kg/h)}$$

$$\text{Kuru Klinker Besleme Yüzdesi (\%)} = \frac{\text{Kuru Klinker Tonağı (kg/h)}}{\text{Toplam Kuru Değirmen Tonağı (kg/h)}} \times 100$$

$$\text{Kuru Alçıtaşı Besleme Yüzdesi (\%)} = \frac{\text{Kuru Alçıtaşı Tonağı (kg/h)}}{\text{Toplam Kuru Değirmen Tonağı (kg/h)}} \times 100$$

$$\text{Kuru Tras Besleme Yüzdesi (\%)} = \frac{\text{Kuru Tras Tonağı (kg/h)}}{\text{Toplam Kuru Değirmen Tonağı (kg/h)}} \times 100$$

$$\text{Sirkülasyon Yüğü} = \frac{\text{Toplam Yaş Değirmen Tonağı (kg/h)}}{\text{Toplam Kuru Değirmen Tonağı (kg/h)}}$$

$$\text{Yaş Geri Dönüş Yüğü (kg/h)} = \text{Toplam Kuru Değirmen Tonağı (kg/h)} \times \text{Sirkülasyon Yüğü}$$

$$\text{Geri Dönüş Bünyesindeki Su (kg/h)} = \text{Toplam Kuru Değirmen Tonağı (kg/h)} \times \text{Geri Dönüş Malzemedeki \% Nem}$$

$$\text{Kuru Geri Dönüş Malzemesi Tonağı} - m_{KGD} \text{ (kg/h)} = \text{Yaş Geri Dönüş Yüğü (kg/h)} - \text{Geri Dönüş Bünyesindeki Su (kg/h)}$$

$$\text{Giren Yaş Malzemenin Toplam Tonağı (kg/h)} = \text{Toplam Yaş Değirmen Tonağı (kg/h)} + \text{Yaş Geri Dönüş Yüğü (kg/h)}$$

$$\text{Giren Kuru Malzemenin Toplam Tonağı (kg/h)} = \text{Toplam Kuru Değirmen Tonağı (kg/h)} + \text{Kuru Geri Dönüş Tonağı (kg/h)}$$

$$\text{Giren Malzemenin Nem Yüzdesi (\%)} = \frac{\text{Giren Malzemenin Su İçeriğı Toplamı (kg/h)}}{\text{Giren Yaş Malzemenin Toplam Tonağı (kg/h)}} \times 100$$

$$\begin{array}{r} \text{Yaş Klinker Tonağı} \times \% \text{ Nem (kg/h)} \\ \text{Yaş Alçıtaşı Tonağı} \times \% \text{ Nem (kg/h)} \\ \text{Yaş Tras Tonağı} \times \% \text{ Nem (kg/h)} \\ + \text{Geri Dönüş Bünyesindeki Su (kg/h)} \\ \hline \text{Giren Malzemenin Su İçeriğı Toplamı (kg/h)} \end{array}$$

Sisteme Giren Isı Hesaplamaları:

a) Malzeme ile sisteme giren ısı:

Besleme malzemesinin ısı hesabı kuru baz üzerinden aşağıdaki formüle göre yapılmaktadır:

$$\text{Besleme Malzemesinin Isısı } (Q_T) = \sum m \times Cp \times \Delta T$$

$$Q_{Klinker}(kCal/h) = m_{Klinker}(kg/h) \times Cp_{Klinker}(kCal/kg^{\circ}C) \times \Delta T_{Klinker} (^{\circ}C)$$

$$Q_{Alçıtaşı}(kCal/h) = m_{Alçıtaşı}(kg/h) \times Cp_{Alçıtaşı}(kCal/kg^{\circ}C) \times \Delta T_{Alçıtaşı} (^{\circ}C)$$

$$Q_{Tras}(kCal/h) = m_{Tras}(kg/h) \times Cp_{Tras}(kCal/kg^{\circ}C) \times \Delta T_{Tras} (^{\circ}C)$$

$$Q_{Geri Dönüş}(kCal/h) = m_{Geri Dönüş}(kg/h) \times Cp_{Geri Dönüş}(kCal/kg^{\circ}C) \times \Delta T_{Geri Dönüş} (^{\circ}C)$$

$$\text{Toplam Besleme Malzemesi Isısı} - Q_T (kCal/h) = Q_{Klinker} + Q_{Alçıtaşı} + Q_{Tras} + Q_{Geri Dönüş}$$

b) Malzemenin bünyesindeki su ile sisteme giren ısı:

$$\text{Malzeme Bünyesindeki Suyun Sıcaklığı } (^{\circ}C) = \sum (Kuru Malzeme Besleme Yüzdesi \times \text{Malzeme Giriş Sıcaklığı})$$

$$\text{Kuru Klinker Besleme Yüzdesi} \times \text{Klinker Giriş Sıcaklığı}$$

$$\text{Kuru Alçıtaşı Besleme Yüzdesi} \times \text{Alçıtaşı Giriş Sıcaklığı}$$

$$\text{Kuru Tras Besleme Yüzdesi} \times \text{Tras Giriş Sıcaklığı}$$

$$+ \frac{\quad}{\text{Malzeme Bünyesindeki Suyun Sıcaklığı } (^{\circ}C)}$$

$$\text{Yaş Klinker Tonajı} \times \% \text{ Nem } (kg/h)$$

$$\text{Yaş Alçıtaşı Tonajı} \times \% \text{ Nem } (kg/h)$$

$$\text{Yaş Tras Tonajı} \times \% \text{ Nem } (kg/h)$$

$$\text{Geri Dönüş Bünyesindeki Su } (kg/h)$$

$$+ \frac{\quad}{\text{Giren Malzemenin Su İçeriği Toplamı} - m_{su} (kg/h)}$$

$$\text{Giren Suyun Isısı} - Q_{su} (kCal/h) = m_{su} \times Cp_{su} \times \Delta T_{su}$$

$$Cp_{su} = 1,00 \text{ kCal/kg}^{\circ}C$$

c) Değirmene enjeksiyonla verilen su ile giren ısı:

Eğer çimento sıcaklığı 100°C'nin altındaysa

$$\text{Değirmene Enjeksiyonla Verilen Suyun Isısı} - Q_{Enj.Su} (kCal/h)$$

$$= m_{Enj.Su} (kg/h) \times Cp_{su} (kCal/kg^{\circ}C) \times [(\text{Çimento Sıcaklığı } (^{\circ}C) - \text{Değirmen İçinde Kullanılan Su Sıcaklığı } (^{\circ}C))]$$

Eğer çimento sıcaklığı 100°C'nin üstündeyse

* Değirmene enjeksiyonla verilen suyun ısı miktarı üç kademeli olarak aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır. Burada suyun sıvı hali ve buhar hali için Cp katsayılarının farklı olduğu unutulmamalıdır.

$$\begin{aligned}
& \text{Değirmene Enjeksiyonla Verilen Suyun Isısı} - Q_{Su \text{ Buharı}} \left(\frac{kCal}{h} \right) \\
& = [m_{Enj.Su} \left(\frac{kg}{h} \right) \times Cp_{su(sıvı)} \left(\frac{kCal}{kg} \right) \times [(Suyun Kaynama Sıcaklığı (^{\circ}C)) \\
& - \text{Değirmen İçinde Kullanılan Su Sıcaklığı (^{\circ}C)] + \left(m_{Enj.Su} \times \text{Suyun } 100^{\circ}C'de \text{ buharlaşma ısısı} \left(\frac{kCal}{kg} \right) \right) \\
& + [m_{Enj.Su} \times Cp_{su(buhar)} \left(\frac{kCal}{kg} \right) \times [(Çimento Sıcaklığı (^{\circ}C)) - \text{Suyun Kaynama Sıcaklığı (^{\circ}C)}]]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Cp_{su} &= 1,00 \text{ kCal/kg}^{\circ}C \\
\text{Suyun } 100^{\circ}C'de \text{ Buharlaşma Isısı} &= 540 \text{ kCal/kg} \\
Cp_{su \text{ buharı}} &= 0,46 \text{ kCal/kg}^{\circ}C
\end{aligned}$$

d) Motor ile sisteme giren enerji:

- Sayaçtan enerji değeri ölçülebiliyor ise ölçülen değer kayıplarıyla birlikte net değer olup direkt bu değer alınabilir:
- Şayet sayaç yok ise motor girişinden V (Gerilim), I (Akım), Cos Ø (Güç Faktörü) ölçülerek elektriksel güç formülünden hesaplanmaktadır:

$$Motorun \text{ Elektriksel Gücü} - P (W) = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \emptyset$$

$$\cos \emptyset = 0,88$$

$$Motor \text{ ile Sisteme Giren Enerji} - Q_{mot}(kCal/h) = Motorun \text{ Elektriksel Gücü} (kW) \times 860 (kCal/kWh)$$

- Eğer sayaçtan enerji ölçülemiyor ise motorun etiket değerinden güç okunmalıdır. Bu noktada, değirmen elektrik motor gücünün yaklaşık % 95'inin ısıya dönüştüğü unutulmamalıdır.

$$Motor \text{ ile Sisteme Giren Enerji} - Q_{mot}(kCal/h) = Motorun \text{ Elektriksel Gücü} (kW) \times Verim (\%) \times 860 (kCal/kWh)$$

$$Verim = \% 95$$

e) Proses havası ile sisteme giren ısı:

Değirmene giren gaz debisi iki şekilde bulunmaktadır.

Birincisi, eğer ölçülebiliyorsa anemometre ile değirmen giriş boğazından ölçüm yapılmasıdır.

İkincisi ise girişten ölçümün yapılamadığı durumlarda, değirmen filtre bacasından debi ölçümü yapılarak geriye doğru kaçak havaların çıkartılmasıyla giriş debisi hesaplanmaktadır.

Sıcaklıkların Kelvin cinsine çevrildiği unutulmamalıdır. $0^{\circ}C = 273 \text{ K}$

$$Proses \text{ Gazı ile Sisteme Giren Isı} - Q_{Pros.Gaz} (kCal/h) = m_{Pros.Gaz} (Nm^3/h) \times Cp_{Hava} (kCal/Nm^3^{\circ}C) \times \Delta T (^{\circ}C)$$

$$Cp_{Hava} = 0,31 \text{ kCal/Nm}^3^{\circ}C$$

Hava sıcak gaz jeneratörü ile sağlanmaktadır.

Proses gazı ile sisteme giren ısıнын kaç kg yakıtı eşdeğer olduğunu bulmak için:

$$\text{Isıl Gücün Eşdeğer Yakıt Miktarı (kg/h)} = \frac{\text{Proses Gazı ile Sisteme Giren Isı } \left(\frac{\text{kCal}}{\text{h}}\right)}{\text{Sıcak Gaz Jeneratöründe Kullanılan Yakıtın Isıl Değeri } \left(\frac{\text{kCal}}{\text{kg}}\right)}$$

f) Kaçak hava ile sisteme giren ısı:

$$\text{Kaçak Hava ile Sisteme Giren Isı} - Q_{\text{Kaçak Hava}} (\text{kCal/h}) = m_{\text{Kaçak Hava}} (\text{Nm}^3/\text{h}) \times C_{p\text{Kaçak Hava}} (\text{kCal/Nm}^3\text{°C}) \times \Delta T (\text{°C})$$

$$C_{p\text{Kaçak Hava}} = 0,29 \text{ kCal/Nm}^3\text{°C}$$

Sisteme giren tüm kuru kütle ve ısı değerleri Tablo 12'deki gibi yerleştirilmelidir:

Tablo 12- Sisteme giren tüm kuru kütle ve ısı değerleri

GİRENLER	KÜTLE (Kuru)	ISI (kCal/h)
Klinker	m_{KK}	Q_{Klinker}
Alçıtaşı	m_{KA}	$Q_{\text{Alçıtaşı}}$
Tras	m_{KT}	Q_{Tras}
Geri Dönüş Malzemesi	m_{KGD}	$Q_{\text{Geridönüş}}$
Malzeme Bünyesindeki Su (Klinker + Alçıtaşı + Tras + Geri Dönüş)	m_{su}	Q_{su}
Proses Havası	$m_{\text{Pros.Gaz}}$	$Q_{\text{Pros.Gaz}}$
Su Enjeksiyonu	$m_{\text{Enj.Su}}$	$Q_{\text{Enj.Su}}$
Kaçak Hava	$m_{\text{Kaçak Hava}}$	$Q_{\text{Kaçak Hava}}$
Değirmen Ana Motor		Q_{mot}
Σ GİRENLER		$Q_{\text{Klinker}} + Q_{\text{Alçıtaşı}} + Q_{\text{Tras}} + Q_{\text{Geridönüş}} + Q_{su} + Q_{\text{Enj.Su}} + Q_{\text{mot}} + Q_{\text{Pros.Gaz}} + Q_{\text{Kaçak Hava}}$

Sistemden Çıkan Kütle ve Isı Hesaplamaları:

a) Çimento ile çıkan ısı:

$$\text{Toplam Kuru Değirmen Tonajı (kg/h)} = \text{Kuru Klinker Tonajı (kg/h)} + \text{Kuru Alçıtaşı Tonajı(kg/h)} + \text{Kuru Tras Tonajı (kg/h)}$$

$$\text{Giren Kuru Malzemenin Toplam Tonajı (kg/h)} = \text{Toplam Kuru Değirmen Tonajı (kg/h)} + \text{Kuru Geri Dönüş Tonajı (kg/h)}$$

$$\text{Çimentonun Su İçeriği} \left(\frac{kg}{h} \right) = \text{Giren Kuru Malzemenin Toplam Tonajı} \left(\frac{kg}{h} \right) \times \text{Çıkan Çimentonun \% Nemi}$$

$$\text{Kuru Çimento Tonajı} - m_{\text{Çimento}} \left(\frac{kg}{h} \right) = \text{Giren Kuru Malzemenin Toplam Tonajı} \left(\frac{kg}{h} \right) - \text{Çimentonun Su İçeriği} \left(\frac{kg}{h} \right)$$

$$Q_{\text{Çimento}} \left(\frac{kCal}{h} \right) = m_{\text{Çimento}} \left(\frac{kg}{h} \right) \times C_{p \text{ Çimento}} \left(\frac{kCal}{kg}^{\circ}C \right) \times \Delta T_{\text{Çimento}}(^{\circ}C)$$

$$C_{p \text{ Çimento}} = 0,19 \text{ kCal/kg}^{\circ}C$$

b) Çimentonun içerisindeki su ile çıkan ısı:

$$\text{Çimentonun Su İçeriği} \left(\frac{kg}{h} \right) = \text{Giren Kuru Malzemenin Toplam Tonajı} \left(\frac{kg}{h} \right) \times \text{Çıkan Çimentonun \% Nemi}$$

$$C_{p_{su}} = 1,00 \text{ kCal/kg}^{\circ}C$$

$$Q_{\text{Çimento Bünyesindeki Su}} \left(\frac{kCal}{h} \right) = m_{\text{Çimentonun Su İçeriği}} \left(\frac{kg}{h} \right) \times C_{p_{su}} \left(\frac{kCal}{kg}^{\circ}C \right) \times \Delta T_{\text{Çimento}}(^{\circ}C)$$

c) Buharlaştıran su ile açığa çıkan ısı:

Hammadde içindeki rutubet nedeniyle buharlaştırılan su ile sistemden çıkan ısıyı ifade etmektedir.

$$\text{Yaş Klinker Tonajı} \times \% \text{ Nem (kg/h)}$$

$$\text{Yaş Alçıtaşı Tonajı} \times \% \text{ Nem (kg/h)}$$

$$\text{Yaş Tras Tonajı} \times \% \text{ Nem(kg/h)}$$

$$\text{Geri Dönüş Bünyesindeki Su (kg/h)}$$

+

$$\text{Giren Malzemenin Su İçeriği Toplamı (kg/h)}$$

$$\text{Çimentonun Su İçeriği} \left(\frac{kg}{h} \right) = \text{Giren Kuru Malzemenin Toplam Tonajı} \left(\frac{kg}{h} \right) \times \text{Çıkan Çimentonun \% Nemi}$$

$$\text{Buharlaştıran Su} \left(\frac{kg}{h} \right) = \text{Giren Malzemenin Su İçeriği Toplamı} \left(\frac{kg}{h} \right) - \text{Çimentonun Su İçeriği} \left(\frac{kg}{h} \right)$$

$$Q_{\text{Buharlaştıran Su}} \left(\frac{kCal}{h} \right) = m_{\text{Buharlaştıran Su}} \left(\frac{kg}{h} \right) \times C_{p \text{ Suyun Belirtilen Sıcaklıktaki Buharlaşma Isısı}} \left(\frac{kCal}{kg}^{\circ}C \right)$$

$$\text{Suyun } 0^{\circ}C' \text{ de Buharlaşma Isısı} = 595 \text{ kCal/kg}$$

$$\text{Suyun } 26^{\circ}C' \text{ de Buharlaşma Isısı} = 590 \text{ kCal/kg}$$

d) Filtre Bacasında Ölçülen gaz ile çıkan ısı:

$$\text{Bacadaki Gaz Miktarı} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right) = \text{Proses Gazı} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right) + \text{Kaçak Hava} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right) + \left(\text{Buharlaşan Su} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) / \frac{1 \text{ mol H}_2\text{O'nun Molekül Ağırlığı}}{1 \text{ mol Gazın Hacmi}} \right)$$

$$C_{p_{\text{Hava}}} = 0,31 \text{ kCal/Nm}^3\text{°C}$$

Normal şartlar altında 1 molün 22,4 lt geldiği ve suyun molekül ağırlığının 18 olduğu unutulmamalıdır.

$$\text{Filtre Bacasında Ölçülen Gazın Isısı} - Q_{\text{Filtre Gazı}} (\text{kCal/h}) = m_{\text{Filtre Gazı}} (\text{Nm}^3/\text{h}) \times C_{p_{\text{Hava}}} (\text{kCal/Nm}^3\text{°C}) \times \Delta T (\text{°C})$$

e) Yüzeysel Isı Kayıpları (Radyasyon + Konveksiyon):

Çimento değirmeni sistemlerinde yüzeysel ısı kayıpları radyasyon ve konveksiyon türü ısı kayıplarının toplamından oluşmaktadır.

$$\text{Radyasyon kayıpları} (Q_{\text{rad}}) = 4 \times 10^{-8} \times (T_w - T_a) \quad \text{kCal/sm}^2\text{K}$$

$$\text{Konveksiyon kayıpları} (Q_{\text{kon}}) = 80,33 \times \left(\frac{T_w + T_a}{2} \right) - 0,724 \times (T_w - T_a) \times 1,333 \quad \text{kCal/sm}^2\text{K}$$

$$T_w = \text{Yüzey sıcaklığı (K)} \quad (\text{K} = \text{°C} + 273,15)$$

$$T_a = \text{Ortam sıcaklığı (K)}$$

Yukarıdaki formüller haricinde aşağıdaki yüzeysel ısı kaybı hesabı da kullanılabilir.

$$Q_D = \text{Değirmen gövdesindeki ısı kaybı}$$

$$\text{Değirmen Gövdesinin Alanı (m}^2\text{)} = 2 \times \pi \times r \times L$$

$$r = \text{Değirmen gövdesinin yarıçapı}$$

$$L = \text{Değirmenin uzunluğu}$$

$$Q_{\text{Değirmen Gövdesindeki Isı Kaybı}} \left(\frac{\text{kCal}}{\text{h}} \right) = \text{Değirmen Gövdesinin Alanı (m}^2\text{)} \times \text{Değirmen Yüzeyindeki Isı Kaybı} \left(\frac{\text{kCal}}{\text{h.m}^2} \right)$$

NOT: Değirmen yüzeyindeki ısı kaybı her değirmene göre değişmektedir. Örnek bir değer olması amacıyla bir hesapta 600 kCal/h.m² olarak alınmıştır.

- Genel olarak “Yüzey Isı Kaybı” hesabı Giren Isı – Çıkan Isı farkından gidilerek de yapılmaktadır. Ortaya çıkan farkın, toplam giren ısı miktarının yaklaşık % 5'i olacak şekilde çıkması durumunda yapılan hesapların da tutarlı olacağı sonucuna ulaşılmaktadır. Yani,

$$\text{Yüzey Isı Kaybı} = \text{Toplam Giren Isı} - \text{Toplam Çıkan Isı}$$

$$\frac{\text{Yüzey Isı Kaybı}}{\text{Toplam Giren Isı}} \times 100 \approx \% 5$$

Sistemden çıkan tüm kuru kütle ve ısı değerleri Tablo 13'teki gibi bir tabloya yerleştirilmelidir:

Tablo 13- Sistemden çıkan tüm kuru kütle ve ısı değerleri

ÇIKANLAR	KÜTLE (KURU)	ISI (kCal/h)
Çimento	<i>Kuru Çimento Tonajı</i> $\left(\frac{kg}{h}\right)$	$Q_{\text{Çimento}}$
Çimento İçerisindeki Su	<i>Çimentonun Su İçeriği</i> $\left(\frac{kg}{h}\right)$	$Q_{\text{Çimento Bünyesindeki Su}}$
Buharlaştıran Su (Giren Malzemedeki – Çimentodaki Su) (Klinker + Alçıtaşı + Tras + Geri Dönüş + Çimento)	<i>Buharlaştıran Su</i> $\left(\frac{kg}{h}\right)$	$Q_{\text{Buharlaştıran Su}}$
Filtre Bacasında Ölçülen Gaz	<i>Bacadaki Gaz Miktarı</i> $\left(\frac{Nm^3}{h}\right)$	$Q_{\text{Filtre Gazı}}$
Yüzeyden Isı Kaybı (Giriş – Çıkış Arasındaki Isı Kaybı)		$Q_{\text{Değirmen Gövdesindeki Isı Kaybı}}$
Σ ÇIKANLAR		$Q_{\text{Çimento}} + Q_{\text{Çimento Bünyesindeki Su}} + Q_{\text{Buharlaştıran Su}} + Q_{\text{Filtre Gazı}} + Q_{\text{Değirmen Gövdesindeki Isı Kaybı}}$

Örnek 6:

Bilyalı Değirmen Çapı	= 4,5 m
Bilyalı Değirmen Boyu	= 10 m
Değirmen Ana Motor Gücü	= 2850 kW

Sisteme Giren Kütle Hesaplamaları:

Yaş Klinker Tonajı	= 43.700 kg/h
Klinker Sıcaklığı	= 35°C
Klinker Özgül Isısı	= 0,186 kCal/kg°C
Klinker Nem	= % 0,85
Yaş Alçıtaşı Tonajı	= 3.600 kg/h
Alçıtaşı Sıcaklığı	= 12°C
Alçıtaşı Özgül Isısı	= 0,259 kCal/kg°C
Alçıtaşı Nem	= % 4,85
Yaş Tras Tonajı	= 23.500 kg/h
Tras Sıcaklığı	= 15°C
Tras Özgül Isısı	= 0,33 kCal/kg°C
Tras Nem	= % 15,95
Geri Dönüş Malzeme Sıcaklığı	= 73°C
Geri Dönüş Malzeme Özgül Isısı	= 0,19 kCal/kg°C
Geri Dönüş Malzeme İçindeki Nem	= % 0,5

$$\text{Toplam Yaş Değirmen Tonajı (kg/h)} = \text{Yaş Klinker Tonajı (kg/h)} + \text{Yaş Alçıtaşı Tonajı (kg/h)} + \text{Yaş Tras Tonajı (kg/h)}$$

$$\text{Toplam Yaş Değirmen Tonajı (kg/h)} = 43.700 + 3.600 + 23.500$$

$$\text{Toplam Yaş Değirmen Tonajı (kg/h)} = 70.800$$

$$\text{Malzeme Bünyesindeki Su } \left(\frac{kg}{h} \right) = \text{Yaş Malzeme Tonajı} \times \% \text{ Malzeme Nem}$$

$$\text{Klinker Bünyesindeki Su } \left(\frac{kg}{h} \right) = 43.700 \times \frac{0,85}{100} = 371$$

$$\text{Alçıtaşı Bünyesindeki Su } \left(\frac{kg}{h} \right) = 3.600 \times \frac{4,85}{100} = 174,6$$

$$\text{Tras Bünyesindeki Su } \left(\frac{kg}{h} \right) = 23.500 \times \frac{15,95}{100} = 3.748$$

$$\text{Kuru Malzeme Tonajı (kg/h)} = \text{Yaş Malzeme Tonajı (kg/h)} - \underbrace{(\text{Yaş Malzeme Tonajı} \times \% \text{ Nem})}_{\text{Malzeme Bünyesindeki Su}}$$

$$\text{Kuru Klinker Tonajı } \left(\frac{kg}{h} \right) = 43.700 - 371 = 43.328$$

$$\text{Kuru Alçıtaşı Tonajı } \left(\frac{kg}{h} \right) = 3.600 - 174,6 = 3.425$$

$$\text{Kuru Tras Tonajı } \left(\frac{kg}{h} \right) = 23.500 - 3.748 = 19.751$$

$$\text{Toplam Kuru Değirmen Tonajı (kg/h)} = \text{Kuru Klinker Tonajı (kg/h)} + \text{Kuru Alçıtaşı Tonajı (kg/h)} + \text{Kuru Tras Tonajı (kg/h)}$$

$$\text{Toplam Kuru Değirmen Tonajı (kg/h)} = 43.328 + 3.425 + 19.751$$

$$\text{Toplam Kuru Değirmen Tonajı (kg/h)} = 66.504$$

$$\text{Kuru Malzeme Besleme Yüzdesi (\%)} = \frac{\text{Kuru Malzeme Tonajı (kg/h)}}{\text{Toplam Kuru Değirmen Tonajı (kg/h)}} \times 100$$

$$\text{Kuru Klinker Besleme Yüzdesi (\%)} = \frac{43.328}{66.504} \times 100 = 65,15$$

$$\text{Kuru Alçıtaşı Besleme Yüzdesi (\%)} = \frac{3.425}{66.504} \times 100 = 5,15$$

$$\text{Kuru Tras Besleme Yüzdesi (\%)} = \frac{19.751}{66.504} \times 100 = 29,70$$

$$\text{Sirkülasyon Yüğü} = \frac{\text{Toplam Yaş Değirmen Tonajı (kg/h)}}{\text{Toplam Kuru Değirmen Tonajı (kg/h)}}$$

$$\text{Sirkülasyon Yüğü} = \frac{70.800}{66.504} = 1,06$$

$$\text{Yaş Geri Dönüş Yüğü (kg/h)} = \text{Toplam Kuru Değirmen Tonajı (kg/h)} \times \text{Sirkülasyon Yüğü}$$

$$\text{Yaş Geri Dönüş Yüğü} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 66.504 \times 1,06 = 70.490$$

$$\text{Geri Dönüş Bünyesindeki Su (kg/h)} = \text{Toplam Kuru Değirmen Tonajı (kg/h)} \times \text{Geri Dönüş Malzemedeki \% Nem}$$

$$\text{Geri Dönüş Bünyesindeki Su} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 66.504 \times \frac{0,5}{100} = 350$$

$$\text{Kuru Geri Dönüş Malzemesi Tonajı (kg/h)} = \text{Yaş Geri Dönüş Yüğü (kg/h)} - \text{Geri Dönüş Bünyesindeki Su (kg/h)}$$

$$\text{Kuru Geri Dönüş Malzemesi Tonajı (kg/h)} = 70.490 - 350 = 70.140$$

$$\text{Giren Yaş Malzemenin Toplam Tonajı (kg/h)} = \text{Toplam Yaş Değirmen Tonajı (kg/h)} + \text{Yaş Geri Dönüş Yüğü (kg/h)}$$

$$\text{Giren Yaş Malzemenin Toplam Tonajı} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 43.700 + 3.600 + 23.500 + 70.490 = 141.290$$

$$\text{Giren Kuru Malzemenin Toplam Tonajı (kg/h)} = \text{Toplam Kuru Değirmen Tonajı (kg/h)} + \text{Kuru Geri Dönüş Tonajı (kg/h)}$$

$$\text{Giren Kuru Malzemenin Toplam Tonajı} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 43.328 + 3.425 + 19.751 + 70.140 = 136.640$$

Yaş Klinker Tonajı x % Nem (kg/h)	371
Yaş Alçıtaşı Tonajı x % Nem (kg/h)	174,6
Yaş Tras Tonajı x % Nem(kg/h)	3.748
Geri Dönüş Bünyesindeki Su (kg/h)	350
Giren Malzemenin Su İçeriği Toplamı (kg/h)	4.650 (kg/h)

$$\text{Giren Malzemenin Nem Yüzdesi (\%)} = \frac{\text{Giren Malzemenin Su İçeriği Toplamı (kg/h)}}{\text{Giren Yaş Malzemenin Toplam Tonajı (kg/h)}} \times 100$$

$$\text{Giren Malzemenin Nem Yüzdesi (\%)} = \frac{4.650}{141.290} \times 100 = 3,29$$

Sisteme Giren Isı Hesaplamaları:

g) Malzeme ile sisteme giren ısı:

$$\text{Besleme Malzemesinin Isısı } (Q_T) = \sum m \times Cp \times \Delta T$$

$$Q_{Klinker} \left(\frac{kCal}{h} \right) = 43.328 \times 0,186 \times 35 = 282.068$$

$$Q_{Alçıtaşı} \left(\frac{kCal}{h} \right) = 3.425 \times 0,259 \times 12 = 10.646$$

$$Q_{Tras} \left(\frac{kCal}{h} \right) = 19.751 \times 0,33 \times 15 = 97.771$$

$$Q_{Geri Dönüş} \left(\frac{kCal}{h} \right) = 70.140 \times 0,19 \times 73 = 972.783$$

$$\text{Toplam Besleme Malzemesi Isısı} - Q_T \left(\frac{kCal}{h} \right) = 282.068 + 10.646 + 97.771 + 972.783 = 1.363.269$$

h) Malzemenin bünyesindeki su ile giren ısı:

$$\text{Malzeme Bünyesindeki Suyun Sıcaklığı } (^{\circ}C) = \sum (\text{Kuru Malzeme Besleme Yüzdesi} \times \text{Malzeme Giriş Sıcaklığı})$$

$$\text{Malzeme Bünyesindeki Suyun Sıcaklığı } (^{\circ}C) = (0,6515 \times 35) + (0,0515 \times 12) + (0,2970 \times 15) = 27,88$$

$$\text{Giren Malzemenin Su İçeriği Toplamı} - m_{su} \left(\frac{kg}{h} \right) = 371 + 174,6 + 3.748 + 350 = 4.650$$

$$\text{Giren Suyun Isısı} - Q_{su} (kCal/h) = m_{su} \times Cp_{su} \times \Delta T_{su}$$

$$\text{Giren Suyun Isısı} - Q_{su} \left(\frac{kCal}{h} \right) = 4.650 \times 1 \times 27,88 = 129.530$$

$$Cp_{su} = 1,00 \text{ kCal/kg}^{\circ}C$$

i) Değirmene enjeksiyonla verilen su ile giren ısı:

$$\text{Değirmen içinde kullanılan su sıcaklığı } (T_w) = 15^{\circ}C$$

$$\text{Enjeksiyon ile değirmene beslenen su miktarı} = 300 \text{ kg/h}$$

$$Cp_{su} = 1,00 \text{ kCal/kg}^{\circ}C$$

$$\text{Suyun } 100^{\circ}C' \text{ de Buharlaştırma Isısı} = 540 \text{ kCal/kg}$$

$$Cp_{su \text{ buharı}} = 0,46 \text{ kCal/kg}^{\circ}C$$

$$\begin{aligned} \text{Değirmene Enjeksiyonla Verilen Suyun Isısı} &= Q_{Enj.Su} \left(\frac{kCal}{h} \right) \\ &= m_{Enj.Su} \left(\frac{kg}{h} \right) \times C_{p_{Su}} (kCal/kg^{\circ}C) \times [(Çimento Sıcaklığı (^{\circ}C)) - \text{Değirmen İçinde Kullanılan Su Sıcaklığı (^{\circ}C)}] \end{aligned}$$

$$\text{Değirmene Enjeksiyonla Verilen Suyun Isısı} = Q_{Enj.Su} \left(\frac{kCal}{h} \right) = 300 \times 1 \times (90 - 15) = 22.500$$

NOT: Eğer çimento sıcaklığı 125 °C olsaydı

$$\begin{aligned} \text{Değirmene Enjeksiyonla Verilen Suyun Isısı} &= Q_{Su Buharı} \left(\frac{kCal}{h} \right) \\ &= [m_{Enj.Su} \left(\frac{kg}{h} \right) \times C_{p_{Su (sivi)}} \left(\frac{kCal}{kg} \right) \times [(Suyun Kaynama Sıcaklığı (^{\circ}C)) - \text{Değirmen İçinde Kullanılan Su Sıcaklığı (^{\circ}C)}] \\ &+ (m_{Enj.Su} \times \text{Suyun } 100^{\circ}C \text{ de buharlaşma ısısı (kCal/kg)}) \\ &+ [m_{Enj.Su} \times C_{p_{Su (buhar)}} \left(\frac{kCal}{kg} \right) \times [(Çimento Sıcaklığı (^{\circ}C)) - \text{Suyun Kaynama Sıcaklığı (^{\circ}C)}]] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Değirmene Enjeksiyonla Verilen Suyun Isısı} &= Q_{Su Buharı} \left(\frac{kCal}{h} \right) \\ &= [300 \times 1 \times (100 - 15)] + (300 \times 540) + [300 \times 0,46 \times (125 - 100)] \end{aligned}$$

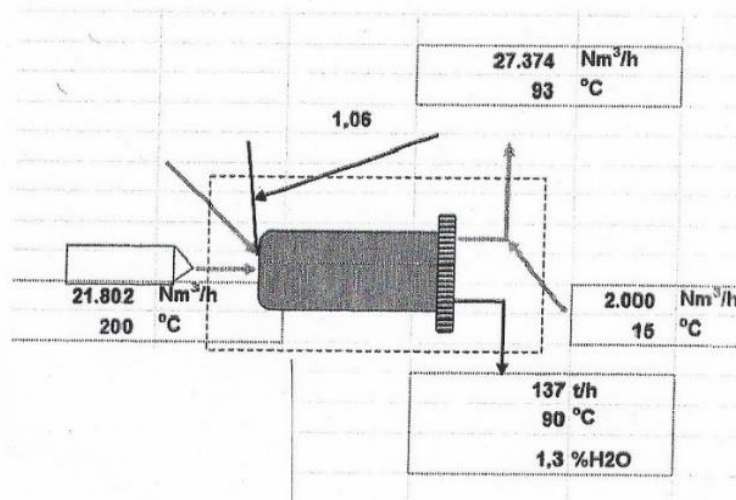
j) Motor ile sisteme giren enerji:

Değirmen ana motor gücü= 2.850 kW

$$\text{Motor ile Sisteme Giren Enerji} = Q_{mot} (kCal/h) = \text{Motorun Elektriksel Gücü (kW)} \times \text{Verim (\%)} \times 860 (kCal/kWh)$$

$$\text{Motor ile Sisteme Giren Enerji} = Q_{mot} \left(\frac{kCal}{h} \right) = 2.850 \times 0,95 \times 860 = 2.328.450$$

k) Proses havası ile sisteme giren ısı:



$$\text{Proses Gazı ile Sisteme Giren Isı} - Q_{\text{Pros.Gaz}} \text{ (kCal/h)} = m_{\text{Pros.Gaz}} \text{ (Nm}^3/\text{h)} \times C_{p_{\text{Hava}}} \text{ (kCal/Nm}^3\text{°C)} \times \Delta T \text{ (°C)}$$

$$C_{p_{\text{Hava}}} = 0,31 \text{ kCal/Nm}^3\text{°C}$$

$$T_{\text{Proses Gazı}} = 200\text{°C}$$

$$\text{Proses Gazı ile Sisteme Giren Isı} - Q_{\text{Pros.Gaz}} \left(\frac{\text{kCal}}{\text{h}} \right) = 21.802 \times 0,31 \times 200 = 1.351.736$$

$$\text{Sıcak Gaz Jeneratöründe Kullanılan Yakıtın Isıl Değeri} = 10.000 \text{ kCal/kg}$$

$$\text{Isıl Gücün Eşdeğer Yakıt Miktarı (kg/h)} = \frac{1.351.736}{10.000} = 135,2$$

I) Kaçak hava ile sisteme giren ısı:

$$\text{Kaçak Hava ile Sisteme Giren Isı} - Q_{\text{Kaçak Hava}} \text{ (kCal/h)} = m_{\text{Kaçak Hava}} \text{ (Nm}^3/\text{h)} \times C_{p_{\text{Kaçak Hava}}} \text{ (kCal/Nm}^3\text{°C)} \times \Delta T \text{ (°C)}$$

$$C_{p_{\text{Kaçak Hava}}} = 0,29 \text{ kCal/Nm}^3\text{°C}$$

$$\text{Kaçak Hava ile Sisteme Giren Isı} - Q_{\text{Kaçak Hava}} \left(\frac{\text{kCal}}{\text{h}} \right) = 2.000 \times 0,29 \times 15 = 8.700$$

$$\text{Sisteme Giren Toplam Isı} - Q_{\text{Toplam}} \left(\frac{\text{kCal}}{\text{h}} \right) = Q_{\text{Klinker}} + Q_{\text{Alçıtaşı}} + Q_{\text{Tras}} + Q_{\text{Geridönüş}} + Q_{\text{su}} + Q_{\text{Enj.su}} + Q_{\text{mot}} + Q_{\text{Pros.Gaz}} + Q_{\text{Kaçak Hava}}$$

$$\text{Sisteme Giren Toplam Isı} - Q_{\text{Toplam}} \left(\frac{\text{kCal}}{\text{h}} \right) = 1.363.269 + 129.530 + 22.500 + 2.328.450 + 1.351.736 + 8.700 = 5.204.186$$

Sistemden Çıkan Kütle ve Isı Hesaplamaları:

f) Çimento ile çıkan ısı:

$$\text{Toplam Kuru Değirmen Tonajı (kg/h)} = \text{Kuru Klinker Tonajı (kg/h)} + \text{Kuru Alçıtaşı Tonajı (kg/h)} + \text{Kuru Tras Tonajı (kg/h)}$$

$$\text{Giren Kuru Malzemenin Toplam Tonajı (kg/h)} = \text{Toplam Kuru Değirmen Tonajı (kg/h)} + \text{Kuru Geri Dönüş Tonajı (kg/h)}$$

$$\text{Toplam Kuru Değirmen Tonajı} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 43.328 + 3.425 + 19.751 = 66.504$$

$$\text{Giren Kuru Malzemenin Toplam Tonajı} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 66.504 + 70.140 = 136.640$$

$$\text{Çimentonun Su İçeriği} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = \text{Giren Kuru Malzemenin Toplam Tonajı} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) \times \text{Çıkan Çimentonun \% Nemi}$$

Çıkan Çimentonun Nem Yüzdesi= % 1,3

$$\text{Çimentonun Su İçeriği} \left(\frac{kg}{h} \right) = 136.640 \times \frac{1,3}{100} = 1.780$$

$$\text{Kuru Çimento Tonağı} - m_{\text{Çimento}} \left(\frac{kg}{h} \right) = \text{Giren Kuru Malzemenin Toplam Tonağı} \left(\frac{kg}{h} \right) - \text{Çimentonun Su İçeriği} \left(\frac{kg}{h} \right)$$

$$\text{Kuru Çimento Tonağı} - m_{\text{Çimento}} \left(\frac{kg}{h} \right) = 136.640 - 1.780 = 134.870$$

Çimentonun Çıkış Sıcaklığı= 90°C

$$Q_{\text{Çimento}} \left(\frac{kCal}{h} \right) = m_{\text{Çimento}} \left(\frac{kg}{h} \right) \times C_{p \text{ Çimento}} \left(\frac{kCal}{kg} \right) \times \Delta T_{\text{Çimento}} (^\circ C)$$

$$C_{p \text{ Çimento}} = 0,19 \text{ kCal/kg}^\circ C$$

$$Q_{\text{Çimento}} \left(\frac{kCal}{h} \right) = 134.870 \times 0,19 \times 90 = 2.306.194$$

g) Çimentonun içerisindeki su ile çıkan ısı:

$$\text{Çimentonun Su İçeriği} \left(\frac{kg}{h} \right) = \text{Giren Kuru Malzemenin Toplam Tonağı} \left(\frac{kg}{h} \right) \times \text{Çıkan Çimentonun \% Nemi}$$

$$\text{Çimentonun Su İçeriği} \left(\frac{kg}{h} \right) = 136.640 \times \frac{1,3}{100} = 1.780$$

$$C_{p_{su}} = 1,00 \text{ kCal/kg}^\circ C$$

Çimentonun Çıkış Sıcaklığı= 90°C

$$Q_{\text{Çimento Bünyesindeki Su}} \left(\frac{kCal}{h} \right) = 1.780 \times 1 \times 90 = 159.871$$

h) Buharlaştıran su ile açığa çıkan ısı:

Yaş Klinker Tonağı x % Nem (kg/h)

Yaş Alçıtaşı Tonağı x % Nem (kg/h)

Yaş Tras Tonağı x % Nem(kg/h)

Geri Dönüş Bünyesindeki Su (kg/h)

$$\begin{array}{r} + \\ \hline \text{Giren Malzemenin Su İçeriği Toplamı (kg/h)} \end{array}$$

$$\text{Giren Malzemenin Su İçeriği Toplamı} \left(\frac{kg}{h} \right) = 371 + 174,6 + 3.748 + 350 = 4.650$$

Çimentonun Su İçeriği $\left(\frac{kg}{h}\right) = \text{Giren Kuru Malzemenin Toplam Tonajı} \left(\frac{kg}{h}\right) \times \text{Çıkan Çimentonun \% Nemi}$

$$\text{Çimentonun Su İçeriği} \left(\frac{kg}{h}\right) = 136.640 \times \frac{1,3}{100} = 1.780$$

Buharlaşan Su $\left(\frac{kg}{h}\right) = \text{Giren Malzemenin Su İçeriği Toplamı} \left(\frac{kg}{h}\right) - \text{Çimentonun Su İçeriği} \left(\frac{kg}{h}\right)$

$$\text{Buharlaşan Su} \left(\frac{kg}{h}\right) = 4.650 - 1.780 = 2.870$$

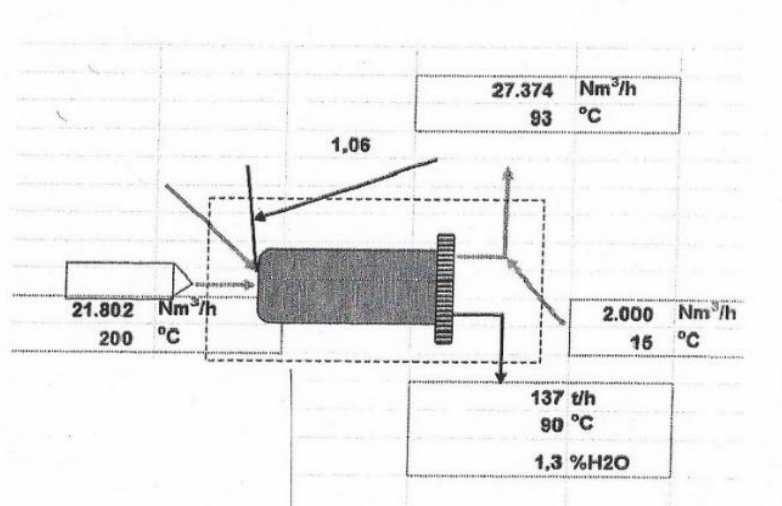
$$Q_{\text{Buharlaşan Su}} \left(\frac{kCal}{h}\right) = m_{\text{Buharlaşan Su}} \left(\frac{kg}{h}\right) \times C_p \text{ Suyun Belirtilen Sıcaklıktaki Buharlaşma Isısı} \left(\frac{kCal}{kg}^{\circ}C\right)$$

Suyun 0°C'de Buharlaşma Isısı = 595 kCal/kg

Suyun 26°C'de Buharlaşma Isısı = 590 kCal/kg

$$Q_{\text{Buharlaşan Su}} \left(\frac{kCal}{h}\right) = 2.870 \times 590 = 1.693.537$$

i) Filtre Bacasında ölçülen gaz ile çıkan ısı:



$$\text{Bacadaki Gaz Miktarı} \left(\frac{Nm^3}{h}\right) = \text{Proses Gazı} \left(\frac{Nm^3}{h}\right) + \text{Kaçak Hava} \left(\frac{Nm^3}{h}\right) + \left(\text{Buharlaşan Su} \left(\frac{kg}{h}\right) / \frac{1 \text{ mol H}_2\text{O'nun Molekül Ağırlığı}}{1 \text{ mol Gazın Hacmi}}\right)$$

$$\text{Bacadaki Gaz Miktarı} \left(\frac{Nm^3}{h}\right) = 21.802 + 2.000 + \left(2.870 \times \frac{18}{22,4}\right) = 27.374$$

$$C_{p_{Hava}} = 0,31 \text{ kCal/Nm}^3^{\circ}C$$

$$T_{\text{Filtre Gazı}} = 93^{\circ}C$$

$$\text{Filtre Bacasında Ölçülen Gazın Isısı} - Q_{\text{Filtre Gazı}} (kCal/h) = m_{\text{Filtre Gazı}} (Nm^3/h) \times C_{p_{Hava}} (kCal/Nm^3^{\circ}C) \times \Delta T (^{\circ}C)$$

$$\text{Filtre Bacasında Ölçülen Gazın Isısı} - Q_{\text{Filtre Gazı}} \left(\frac{kCal}{h}\right) = 27.374 \times 0,31 \times 93 = 789.200$$

j) Yüzeysel Isı Kayıpları (Radyasyon + Konveksiyon):

$$\text{Sistemden Çıkan Toplam Isı} - Q_{\text{Çıkan}} \left(\frac{k\text{Cal}}{h} \right) = Q_{\text{Çimento}} + Q_{\text{Çimento Bünyesindeki Su}} + Q_{\text{Buharlaşan Su}} + Q_{\text{Filtre Gazı}} + Q_D$$

$$\text{Sistemden Çıkan Toplam Isı} - Q_{\text{Çıkan}} \left(\frac{k\text{Cal}}{h} \right) = 2.306.194 + 159.871 + 1.693.537 + 789.200 = 4.948.801 \text{ (Yüzey ısı kaybı hariç)}$$

$$\text{Yüzey Isı Kaybı} = \text{Toplam Giren Isı} - \text{Toplam Çıkan Isı}$$

$$\text{Yüzey Isı Kaybı} = 5.204.186 - 4.948.801 = 255.385$$

$$\frac{\text{Yüzey Isı Kaybı}}{\text{Toplam Giren Isı}} \times 100 \approx \% 5$$

$$\frac{255.385}{5.204.186} \times 100 = \% 4,9$$

$$\text{Sistemden Çıkan Toplam Isı} - Q_{\text{Çıkan}} \left(\frac{k\text{Cal}}{h} \right) = 4.948.801 + 255.385 = 5.204.186 \text{ (Yüzey ısı kaybı dahil)}$$

$$\mathbf{GİREN ISI = ÇIKAN ISI = 5.204.186 \text{ kCal/h}}$$

Örnek 6'dan elde edilen sonuçlar Tablo 14 ve Tablo 15'e işlenmiştir.

Tablo 14- Sisteme girenler

GİRENLER	KÜTLE (KURU)	ISI (kCal/h)
Klinker	43.328 kg/h	282.068
Alçıtaşı	3425 kg/h	10.646
Tras	19.751 kg/h	97.771
Geri Dönüş Malzemesi	70.140 kg/h	972.783
Malzeme Bünyesindeki Su (Klinker + Alçıtaşı + Tras + Geri Dönüş)	4650 kg/h	129.530
Proses Havası	21.802 Nm ³ /h	1.351.736
Su Enjeksiyonu	300 kg/h	22.500
Kaçak Hava	2000 Nm ³ /h	8700
Değirmen Ana Motor	2850 kW	2.328.450
Σ GİRENLER		5.204.186

Tablo 15- Sistemden çıkanlar

ÇIKANLAR	KÜTLE (KURU)	ISI (kCal/h)
Çimento	134.870 kg/h	2.306.194
Çimento İçerisindeki Su	1780 kg/h	159.871
Buharlaştan Su (Giren Malzemedeki – Çimentodaki Su) (Klinker+Alçıtaşı+Tras+Geri Dönüş) - Çimento	2870 kg/h	1.693.537
Filtre Bacasında Ölçülen Gaz	27.374 Nm ³ /h	789.200
Yüzeyden Isı Kaybı (Giriş – Çıkış arasındaki ısı kaybı)		255.385
Σ ÇIKANLAR		5.204.186

Bilyalı Değirmende Çimento Öğütülmesi Esnasında Enerji Kullanımı

Bilyalı değirmende çimento öğütülmesi esnasında enerji kullanımı aşağıda sunulan örnek üzerinden açıklanmıştır.

Örnek 7:

Değirmen Çapı	= 2,0 m
Değirmen Boyu	= 12,0 m
Değirmen Yüzey Alanı	= 86 m ²
Değirmen Kurulu Gücü	= 450 kW
Değirmen Tonajı	= 18 t/h (18.000 kg/h)
Mantodan Isı Işınması (Radyasyon Enerjisi)	= 200 kCal/m ² h
Klinker Giriş Sıcaklığı	= 15 °C
Dış Ortam Sıcaklığı	= 15 °C
Klinker Çıkış Sıcaklığı	= 95 °C
Çimentonun Cp Değeri	= 0,185 kCal/kg°C
Değirmen Manto Sıcaklığı	= 40 °C
Değirmen Süpürme Havası	= 0,35 m ³ /kg çimento
Değirmen Havaının Cp Değeri	= 0,312 kCal/m ³ °C

1 kW = 860 kCal

1 kCal = 4,184 kJ

Öğütme sırasındaki ısı kayıpları:

$$\text{Besleme Malzemesinin Isınması} \left(\frac{\text{kCal}}{\text{h}} \right) = m_{\text{Besleme}} \times C_{P \text{ Besleme}} \times \Delta T$$

$$\text{Besleme Malzemesinin Isınması} \left(\frac{\text{kCal}}{\text{h}} \right) = 18.000 \times 0,185 \times (95 - 15) = 266.400$$

$$\text{Besleme Malzemesinin Isınması} \left(\frac{\text{kW}}{\text{h}} \right) = \text{Besleme Malzemesinin Isınması} \left(\frac{\text{kCal}}{\text{h}} \right) \times \left(\frac{1 \text{ kW}}{860 \text{ kCal}} \right)$$

$$\text{Besleme Malzemesinin Isınması} \left(\frac{\text{kW}}{\text{h}} \right) = 266.400 \times \left(\frac{1}{860} \right) = 310$$

$$\text{Mantodan Işıma ile Olan Isı Kaybı} \left(\frac{\text{kCal}}{\text{h}} \right) = \text{Mantodan Isı Işınması} \left(\frac{\text{kCal}}{\text{m}^2 \text{h}} \right) \times \text{Değirmen Yüzey Alanı (m}^2\text{)}$$

$$\text{Mantodan Işıma ile Olan Isı Kaybı} \left(\frac{\text{kCal}}{\text{h}} \right) = 200 \times 86 = 17.200$$

$$\text{Mantodan Işıma ile Olan Isı Kaybı} \left(\frac{\text{kW}}{\text{h}} \right) = \text{Mantodan Işıma ile Olan Isı Kaybı} \left(\frac{\text{kCal}}{\text{h}} \right) \times \left(\frac{1 \text{ kW}}{860 \text{ kCal}} \right)$$

$$\text{Mantodan Işıma ile Olan Isı Kaybı} \left(\frac{\text{kW}}{\text{h}} \right) = 17.200 \times \left(\frac{1}{860} \right) = 20$$

$$\begin{aligned} & \text{Süpürme Havaının Isınması} \left(\frac{kCal}{h} \right) \\ &= \text{Değirmen Süpürme Havaı} \left(\frac{m^3}{kg \text{ çim.}} \right) \times \text{Değirmen Tonajı} \left(\frac{kg \text{ çim.}}{h} \right) \times \text{Değirmen Havaının Cp Değeri} \left(\frac{kCal}{m^3 \text{ } ^\circ C} \right) \times (\text{Manto Sıcaklığı} \\ & - \text{Dış Ortam Sıcaklığı}) \end{aligned}$$

$$\text{Süpürme Havaının Isınması} \left(\frac{kCal}{h} \right) = 0,35 \times 18.000 \times 0,312 \times (40 - 15) = 49.140$$

$$\text{Süpürme Havaının Isınması} \left(\frac{kW}{h} \right) = \text{Süpürme Havaının Isınması} \left(\frac{kCal}{h} \right) \times \left(\frac{1 kW}{860 kCal} \right)$$

$$\text{Süpürme Havaının Isınması} \left(\frac{kW}{h} \right) = 49.140 \times \left(\frac{1}{860} \right) = 57$$

Titreşim, gürültü oluşum kaybı 3 kWh olarak alınmıştır.

$$\text{Toplam Enerji Kaybı} \left(\frac{kW}{h} \right) = 310 + 20 + 57 + 3 = 390$$

$$\text{Sağlanan Enerjinin Isıya Dönüşen Bölümü (\%)} = \frac{\text{Toplam Enerji Kaybı} \left(\frac{kW}{h} \right)}{\text{Değirmen Kurulu Gücü (kW)}} \times 100$$

$$390 / 450 \times 100 = \%87$$

Yani, enerjinin sadece % 13'ü öğütme için kullanılmıştır.

6. DEĞİRMEN VE SEPARATÖRLER İÇİN TİPİK REFERANS DEĞERLER

TÇMB Prosesler Alt Komitesinin 2017 yılında hazırlamış olduğu “Çimento Fabrikaları için Tipik Proses Referans Değerleri Kılavuzu”nda verilen değirmen ve separatörlerdeki farklı parametreler için tipik referans değerler Tablo 16- 19 arası tablolarda sunulmuştur.

Tablo 16- Farklı tip değirmenlerde 3200 Blaine ve CEM I 42,5 tip çimento için güç tüketimlerini gösteren tipik referans değerler

DEĞİRMEN TİPLERİ	KAPALI DEVRE BİLYALI DEĞİRMENLER	DİK DEĞİRMENLER	HOROMILL
Güç Tüketimi (kWh/t)*	40,7	33,2	33,3

*Değirmen tipleri için sunulan güç tüketimi değerleri YEGM 2016 Yılı Çimento Sektörü Kıyaslama Çalışmasından çıkan Türkiye ortalamalarıdır. Bilyalı değirmenler için ortalama güç tüketimi değerine önünde roller pres sistemi olanlar da dahil edilmiştir.

Tablo 17- Farin ve çimento değirmenlerinde boy- çap oranı için tipik referans değerler

	FARİN DEĞİRMENLERİ	ÇİMENTO DEĞİRMENLERİ
L/D	1,5 < L/D < 3,2	2,5 < L/D < 3

Tablo 18- Değirmenlerde havalandırma için tipik referans değerler

DEĞİRMEN HAVALANDIRMASI	HAVA HIZI (m/s)
Giriş Boğazı	22 - 25
Ara Bölme	8 - 14 (< 20)
Çıkış Davlumbazı	< 5
Değirmen Malzeme Dökülüş Şutu	< 2
Değirmen İçi (Bilya Üstü)	Minimum 1,4 – Maksimum 2,2
Değirmen İçi (Boş Değirmen)	Minimum 1,0 – Maksimum 1,5

Tablo 19- Değirmenlerde bilya dolgu oranları için tipik referans değerler

DEĞİRMEN TİPLERİ	I. KAMARA (%)	II. KAMARA (%)	III. KAMARA (%)
Tek Kamaralı Değirmenler	27 - 33		
İki Kamaralı Değirmenler	27 - 33	25 - 32	
Üç Kamaralı Değirmenler	26 - 32	26 - 30	23 - 27

7. SEPARATÖRLER

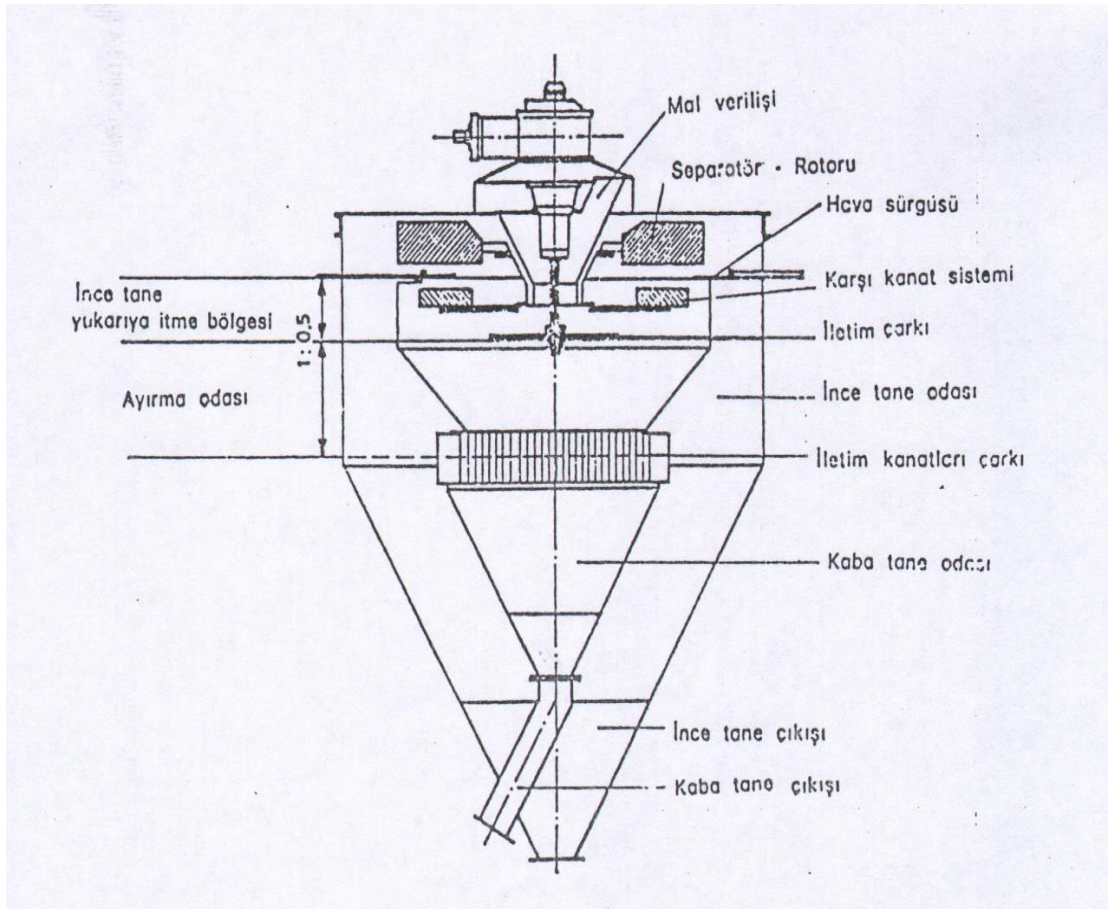
Separatörün görevi mal akımını birisi ince diğeri kalın olmak üzere ikiye ayırmaktır. Çimento endüstrisinde separatör genellikle kapalı devre öğütme sistemlerinin bir parçası olarak kullanılmaktadır. Değirmen, malı belli bir inceliğe kadar öğütmektedir. Daha sonra separatör değirmen çıkışındaki malı almakta ve belli inceliğe gelmiş malzemeyi nihai ürün olarak dışarı, kaba partikülleri ise tekrar değirmene öğütülmek üzere geri göndermektedir. 3. jenerasyon bir separatör çizimi Şekil 22a, b ve c’de gösterilmektedir.

Separatörler başlıca statik ve dinamik separatör olarak ikiye ayrılmaktadırlar.

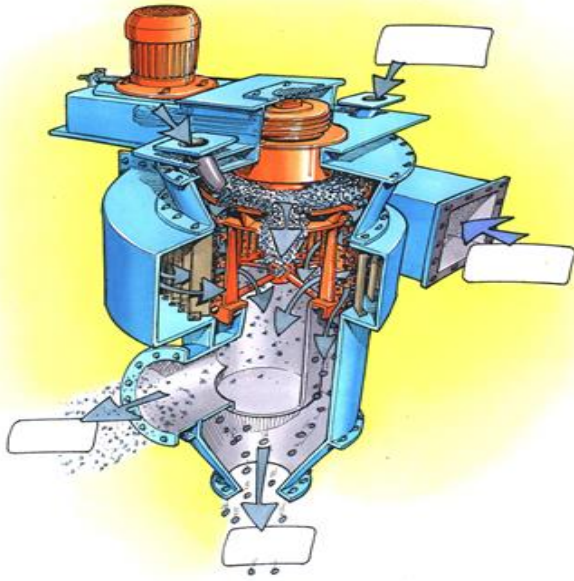
- Statik Separatör: Hiçbir döner parçaya sahip değildir. Malzeme taneciği üzerine sadece yerçekimi kuvveti etki etmektedir. Kaba bir ayırma yapılmaktadır.
- Dinamik Separatör: Ayırma işlemi dönen kanatlar yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Dönen kanatların hızının değiştirilmesiyle ürünün inceliğini değiştirmek mümkündür. Malzeme taneciği üzerine yerçekimi kuvveti, merkezkaç kuvveti ve kaldırma kuvveti etki etmektedir. Böylece kısa sürede daha etkin bir ayırma yapılmaktadır.

Separatörün verimliliğini (tane ayırma) belirlemek için “Tromp Eğrisi”nden yararlanılmaktadır. Bu methodda çeşitli tane büyüklüklerinin her üç malzeme akışı içerisinde (geri dönüş – separatör besleme – nihai ürün) ağırlık olarak yüzdeleri bulunmaktadır. Sonuç ise bir dağılım eğrisi olarak çizilmektedir.

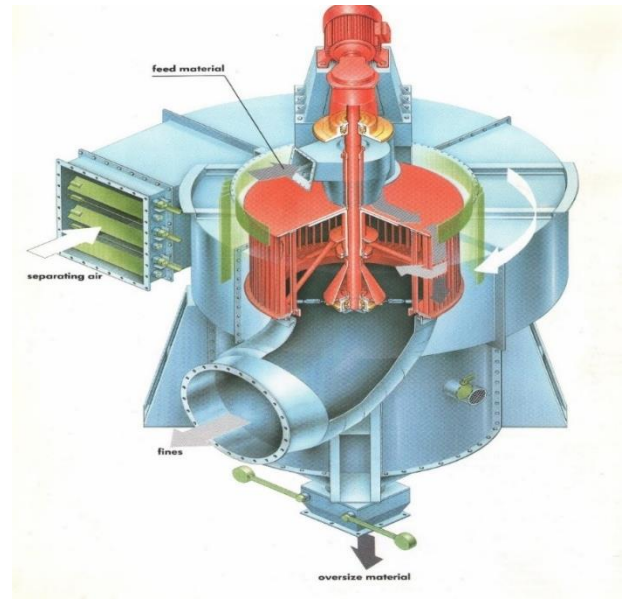
Sınıflandırıcının verimine bağlı olarak sirkülasyon miktarı yaklaşık % 200 civarında seyretmektedir.



Şekil 22a- Tipik bir separatör çizimi (3. Jenerasyon)

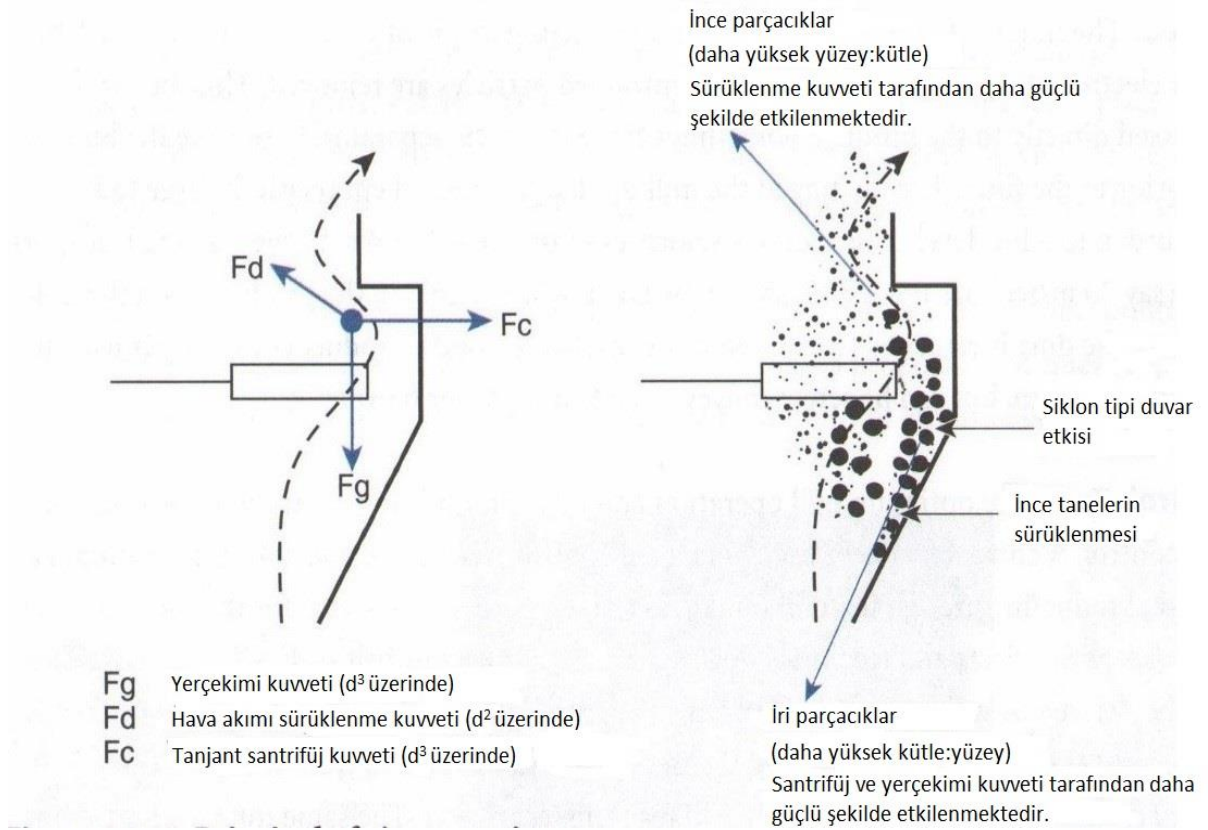


Şekil 22b- 3. jenerasyon separatör gösterimi



Şekil 22c- 3. jenerasyon separatör gösterimi

Hava separasyon prensibi de Şekil 23'te görülmektedir.

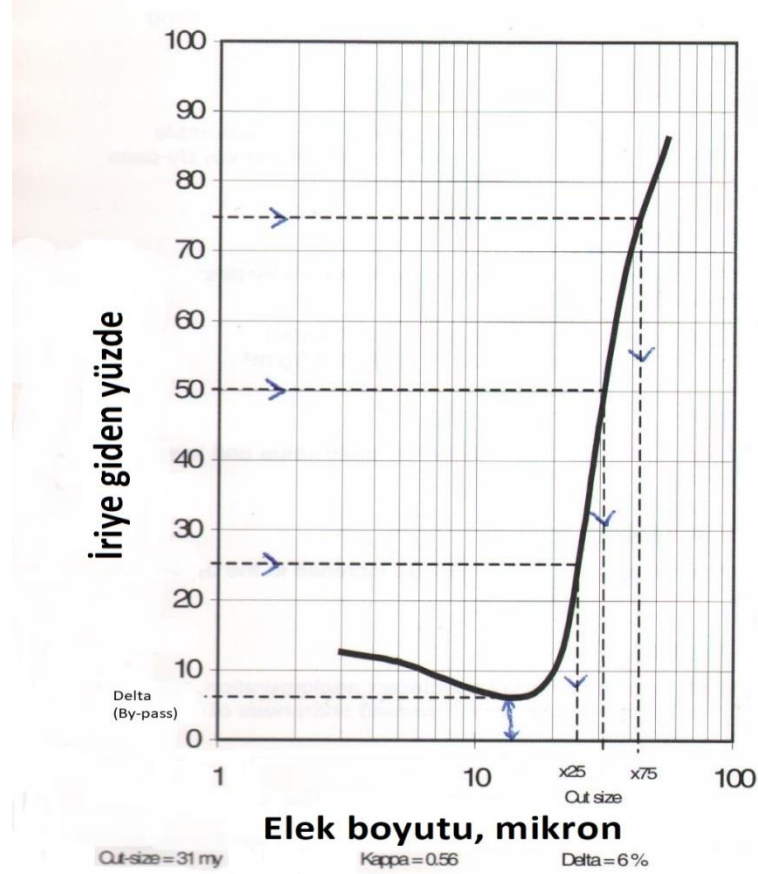


Şekil 23- Hava separasyon prensibi

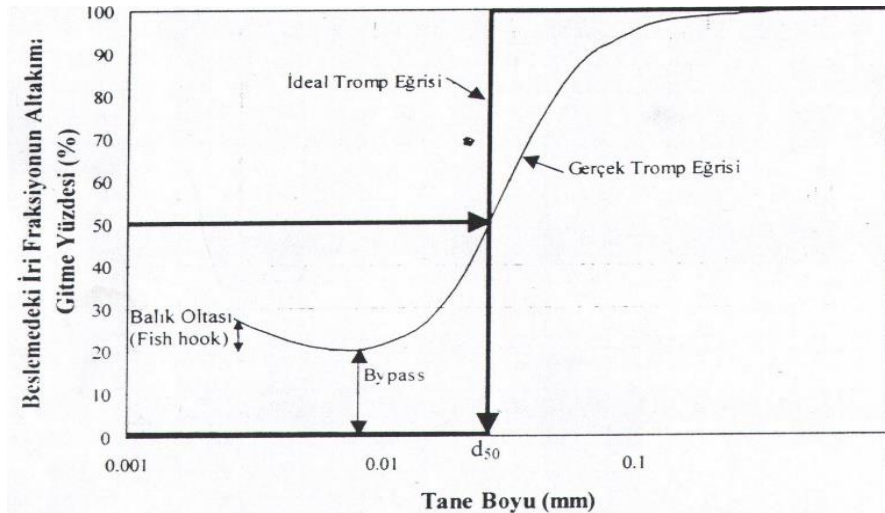
7.1. Separatör Tromp Eğrisi

Tromp eğrisi, separatörün performansının değerlendirilmesinde kullanılan bir araçtır ve beslemede herhangi bir boyut aralığında bulunan tanelerin ne kadarının geri dönüşe gitme olasılığı olduğunu göstermektedir.

Beslemenin iri ürün yüzdesine karşılık gelen tane boyutu grafiği logaritmik olarak Şekil 24 ve 25'te verilmektedir.



Şekil 24- Tromp eğrisi genel gösterimi



Şekil 25- Tromp eğrisi gösterimi

Tromp eğrisinde yer alan ifadeler aşağıda açıklanmaktadır:

Keskinlik (Sharpness) (Kappa): 25 mikron değerinin 75 mikrondaki değere oranı olarak ifade edilmektedir. Separatör Tromp Eğrisinde performans eğrisinin dik olması, separatördeki ayırma işleminin iyi yapıldığını göstermektedir ve bu eğrinin mümkün olduğunca dik ve $x_{25} / x_{75} = 0,6-0,7$ arasında olması istenmektedir. Eğri ne kadar dikse (bu değer 1'e yaklaşması, ayırım keskinliğinin artması anlamına gelmektedir) separatör verimliliği o kadar fazla demektir. Yani daha yüksek yüzdede ince parçacık nihai ürüne, daha yüksek düzeyde kalın parçacık geri dönüşe gönderilmiştir.

By-pass (Delta): Separatöre girip hiç sınıflandırmaya tabii olmadan geri dönüşe giden malzeme miktarıdır. Bu oranın mümkün olduğunca az olması istenmektedir. Normal değeri % 5-15 aralığındadır (3. tip jenerasyon için).

Fish Hook (Balık Oltası Etkisi): İnce tanelerin irilere yapışması (aglomerasyonu) sonucu iriye kaçan ince malzeme miktarıdır. Özellikle havalı separatörlerde performans eğrisi minimum değere ulaştıktan sonra tane boyutu incelidikçe bir artış göstermektedir. Buna balık oltası denilmektedir. İnce tanelerin başlangıçta aglomere olduğu ve bu nedenle separatörde daha iri tane gibi davrandığı fakat boyut analizinde dağıldığı tespit edilmiştir.

- Separatör besleme kapasitesi artar ise bypass ve balık oltası artmaktadır.
- Hava hızı artar ise bypass ve balık oltası düşmektedir.

Cut Size (Kesme Boyutu) (d50): Ayırım boyu anlamına gelmektedir. Sınıflandırılmış tanelerin % 50'sinin incelere, % 50'sinin de iri tanelere gittiği boyutu göstermektedir. Dolayısıyla d50 değerinin küçültülmesi separatörün daha ince bir ayırma yaptığını göstermektedir. Rotor hızına ve öğütme inceliğine bağlıdır.

- Rotor hızı artar ise d50 düşmektedir.
- Separatör çapı artar ise d50 düşmektedir.
- Hava hızı artar ise d50 artmaktadır.
- Fan kapasitesi artar ise d50 artmaktadır.
- Separatör besleme kapasitesi ile d50 değişmemektedir.

Imperfection (Düzgünsüzlük): Separasyon verimlilik göstergesidir. İdeal separatör ayırımından ne kadar sapma olduğunu göstermektedir. Değer olarak sifıra yaklaşıldıkça separatörün ayırım keskinliği artarak ideal ayırma yaklaşmaktadır.

$$I = (d_{75} - d_{25}) / (2 \times d_{50})$$

Çok iyi separatör	I=0,2-0,3
İyi separatör	I=0,3-0,4
Ortalama separatör	I=0,4-0,5
Vasat separatör	I=0,5-0,6
Çok kötü separatör	I> 0,7

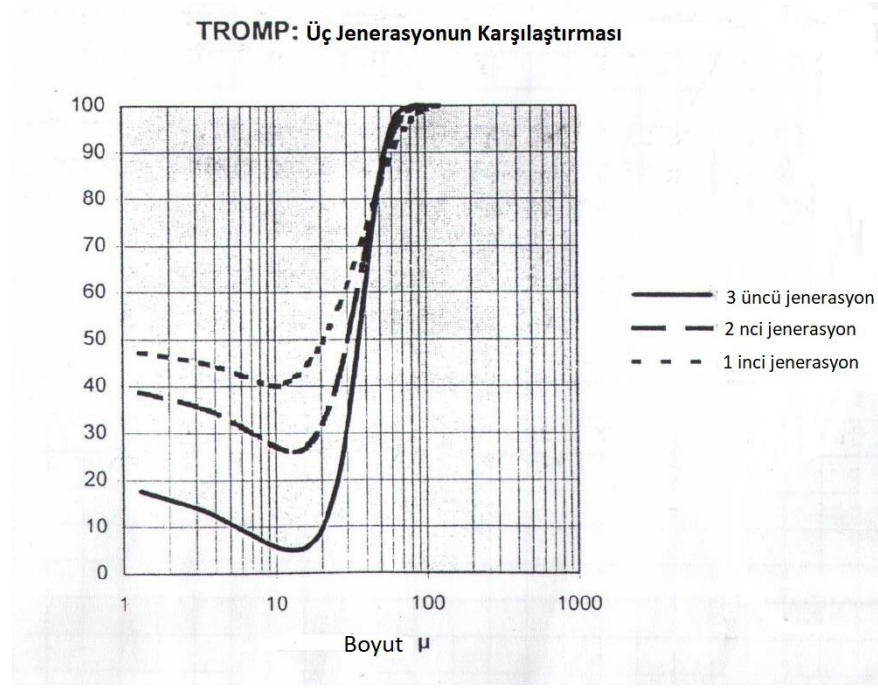
Tromp eğrisine göre separatör verimliliği, x mikrondaki separatöre beslenen malzemenin 0 – x mikron aralığında **inceye (nihai ürün) gönderilen yüzdesi olarak tanımlanmaktadır.**

Tromp eğrisinde x ekseninde okumak istediğimiz ürün boyutundan eğriye dik çıkılmakta ve y eksenine yatay gidilerek alt akıma (geri dönüş) giden değer okunmaktadır. Okunan değer 100 birimden geri kalanı ise üst akıma (ince ürüne) gönderilen yüzdedir.

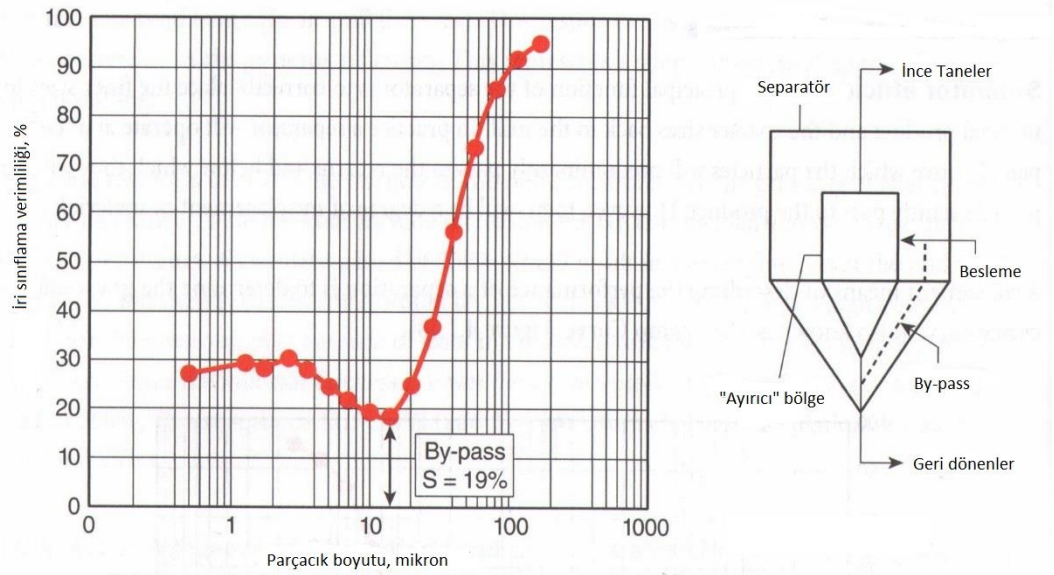
Farklı tip jenerasyonlara bağlı olarak tipik separatör performansları Tablo 20’de ve Tromp eğrisi farklılıkları da Şekil 26’da sunulmaktadır.

Tablo 20- Tipik separatör performansları

	1. Jenerasyon	2. Jenerasyon	3. Jenerasyon
By-pass (%)	30-60	10-35	5-10
d50 (mm)	>20	15-20	<15
Imperfection	>0,45	0,30-0,40	<0,30



Şekil 26- Separatör jenerasyonlarına göre Tromp eğrisi farklılıkları



Şekil 27- Tromp eğrisi analizi

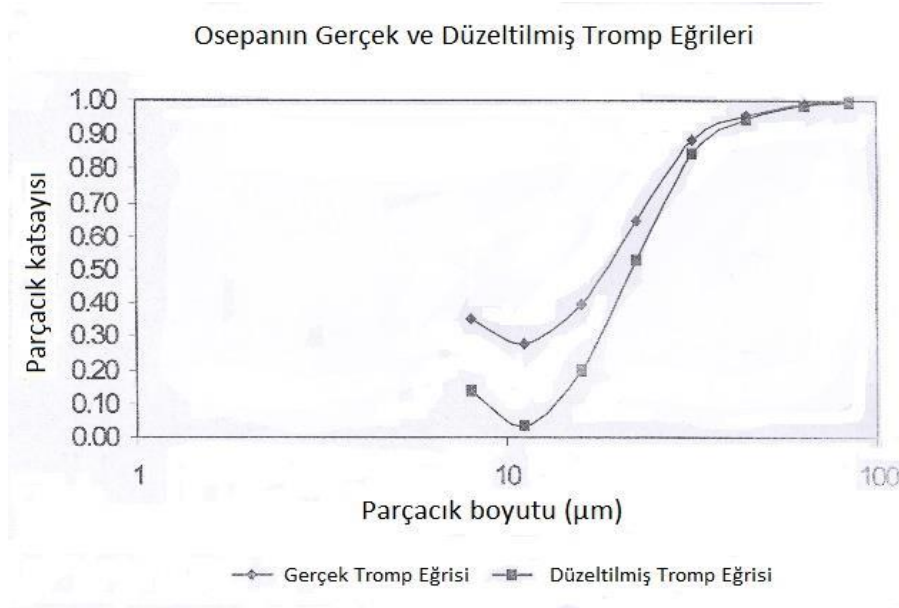
AÇIKLAMA: Separatör kesme noktası (d_{50}) 45 μ okunduğunda (55 μ değerine göre kıyaslandığında) separatör daha inceden kesiyor demektir. Yani 45 μ 'nın % 50'sinin inceye ve % 50'sinin de kalına gittiği şeklinde ifade edilmektedir (Şekil 27).

Rotor hızının artması tromp eğrisinin yukarı doğru kaymasına neden olmaktadır.

By-pass miktarı da kapasiteyle doğru orantılıdır.

Normalde sirkülasyon faktörünün 2-2,5 arasında olması tavsiye edilmektedir. Belli orana kadar sirkülasyon faktörü arttıkça enerjide düşme gözlenmektedir.

Tromp eğrisi çizerken gerçek ve düzeltilmiş değerler üzerinden değerlendirme yapılmaktadır. Bu iki kavram arasındaki fark Şekil 28'deki grafikte örnek bir Osepa separatörü için gösterilmiştir.



Şekil 28- Gerçek ve düzeltilmiş Tromp eğrisi gösterimi

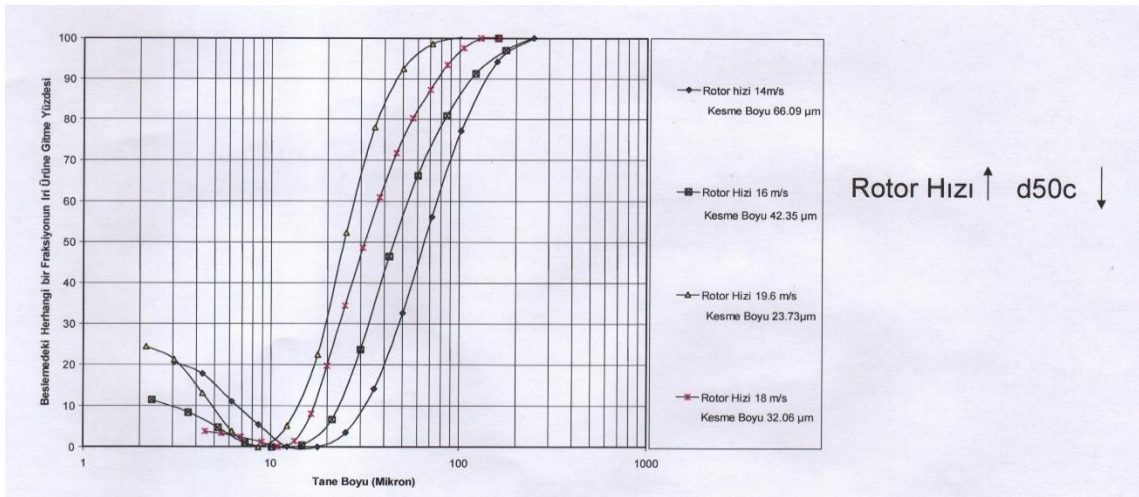
Tromp eğrisi aşağıdaki faktörlerden etkilenmektedir:

- Separator dizaynı: Son dönemdeki separatörlerde daha yüksek değerde Kappa değeri ve daha düşük değerde by-pass değeri elde edilmektedir. Bu işletme açısından arzu edilen bir durumdur.
- Malzeme yükü: Aşırı malzeme miktarı, bypass miktarını arttırmaktadır ve Kappa değerini düşürmektedir. Bu işletme açısından istenmeyen bir durumdur. Normal değer aralığı şöyledir:
 - Nihai ürün yükü: 0,85 kg/m^3
 - Besleme ürün yükü: 2,0-2,5 kg/m^3
- Hava akışı: Yetersiz hava akışı, yüksek bypass ve düşük Kappa değerine yol açmaktadır. Bu işletme açısından istenmeyen bir durumdur.
- Sirkülasyon faktörü: Sirkülasyon faktörünün artması bypass miktarının artmasına yol açmaktadır.
- Öğütme kolaylaştırıcı kimyasallar: Bu kimyasalların kullanılması çimento taneciklerinin aglomerasyonunu (topaklaşmasını) engelleyebilir. Bu da by-pass değerinin düşmesi ve separasyon eğrisinin dikleşmesiyle sonuçlanabilir. Bu işletme açısından istenen bir durumdur.
- Analiz metodu: Farklı lazer analiz metodları farklı sonuçlar verebilir. Tromp eğrilerinin karşılaştırılması aynı analiz metoduyla yapılmış olanlar için yapılmalıdır.

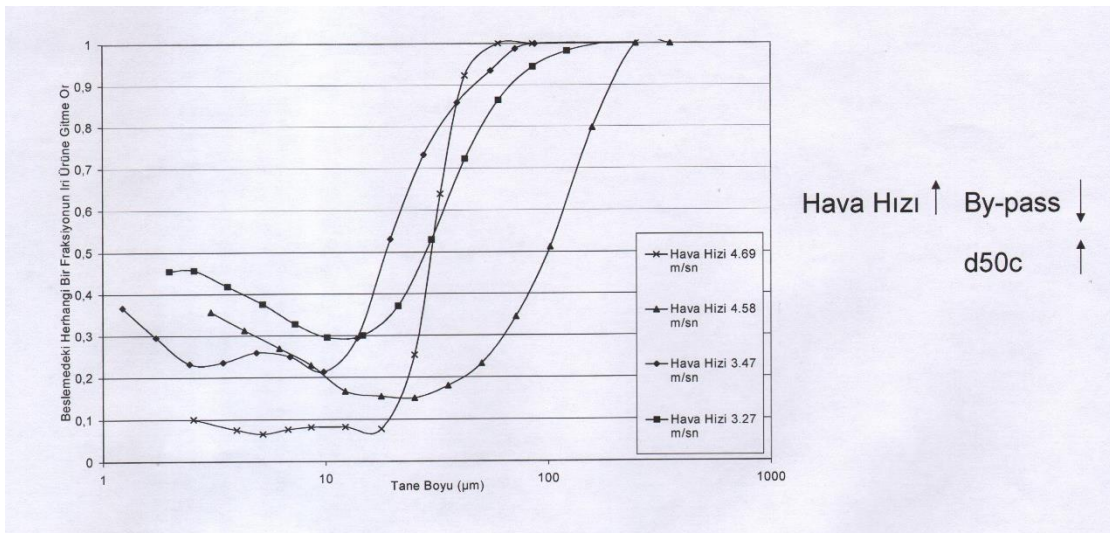
Şekil 29- 31 arasında bazı kriterlerin Tromp eğrisini nasıl etkilediğine dair örnekler görülmektedir.



Şekil 29- Tromp eğrisi üzerinde separatör besleme hızı etkisi

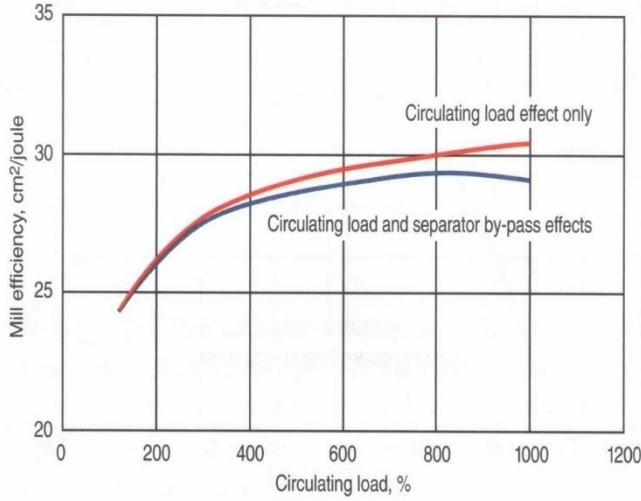


Şekil 30- Tromp eğrisi üzerinde rotor hızının etkisi

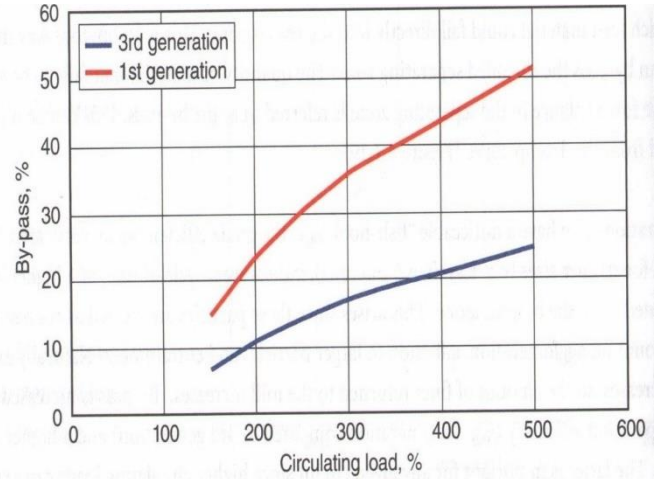


Şekil 31- Tromp eğrisi üzerinde separasyon havasının etkisi

Şekil 32a ve b’de sirkülasyon yük ve by-pass miktarının değirmen verimliliği üzerine etkileri görülmektedir.



Şekil 32a- Değirmen verimi üzerinde sirkülasyon yükü ve separator by-pass etkisi

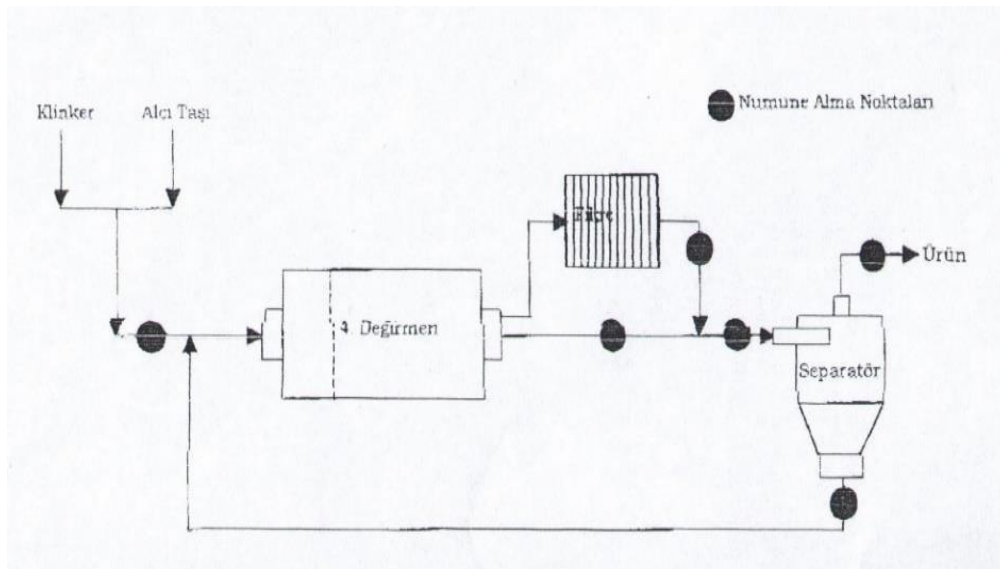


Şekil 32b- Separator bypass üzerinde sirkülasyon yükü etkisi

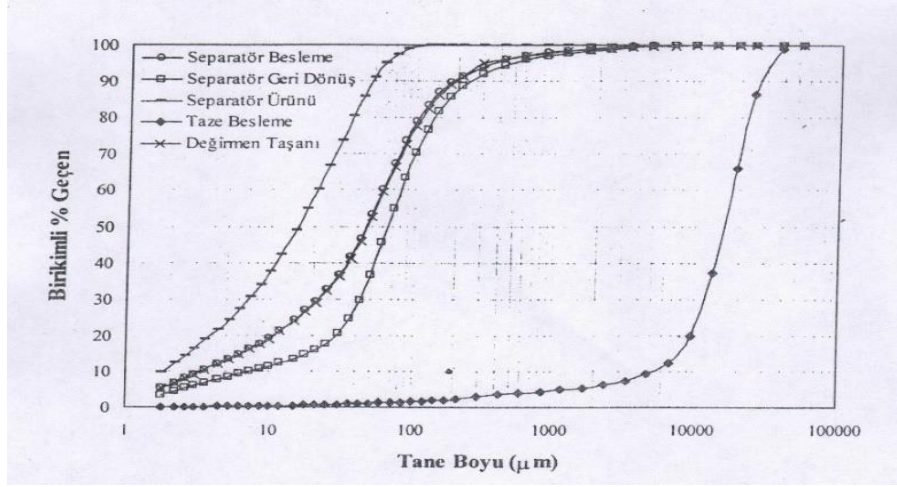
Tablo 21’de separator jenerasyon tiplerine göre sirkülasyon yükü ve by-pass arasındaki ilişki görülmektedir.

Tablo 21. Sirkülasyon yükü ve separator verimliliğinin değirmen verimliliği üzerine etkisi

Değirmen Devresi	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı
Separator	Yok	1 inci Jenerasyon	1 inci Jenerasyon	3 üncü Jenerasyon
SSA Üretimi	370	370	370	370
SSA Geri Dönüşleri	N/A	220	220	90
Sirkülasyon Yükü, %	100	300	500	300
Değirmen Çıkışı SSA	370	270	250	183
cm²/joule	22,9	26,2	26,8	27,5
kWh/t	44,9	39,2	38,3	37,4
Değirmen ürünü, %	100	114	117	120



Şekil 33- Değirmen devresinde numune alma noktaları

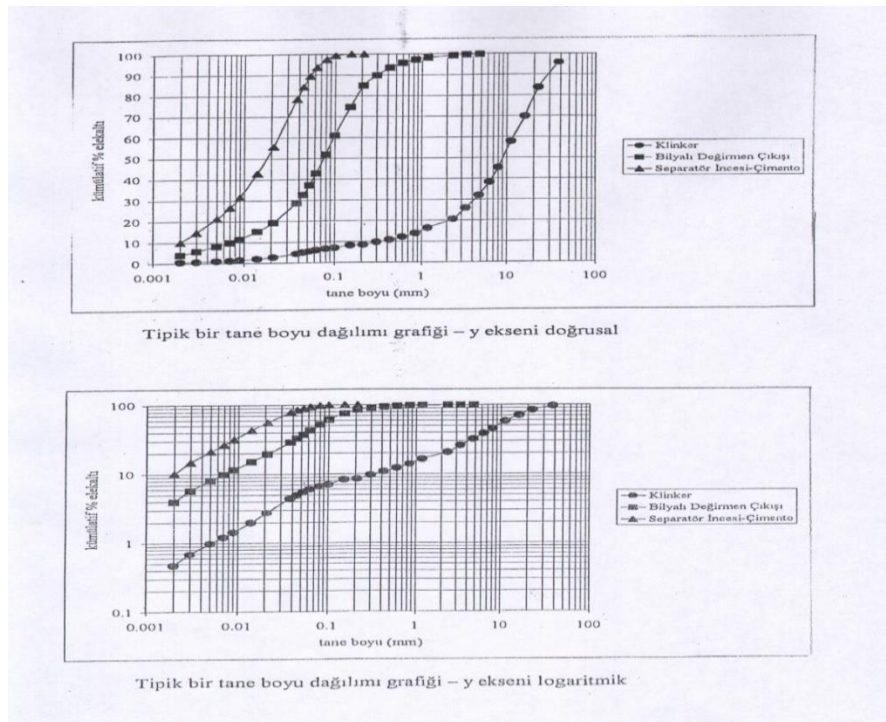


Şekil 34- Farklı noktalar için elek bakiyesi gösterimi

Şekil 33 ve 34'te değirmen devresindeki numune alma noktaları ile alınan numunelere ait elek bakiyesi grafiği görülmektedir.

Şekil 35'te örneği verilen separatör Tromp eğrisi, söz konusu separatörün verimini ortaya koymaktadır. Bu analizin sonucunda separatör ayarları kontrol edilmektedir. Kontrol edilmesi gereken bazı noktalar şöyle sıralanabilir:

- Stator (louvres) kanat açıklığı,
- Stator ile Rotor arasındaki uzaklık,
- Stator kanat genişliği,
- Rotor üst tabla ile kanat arası uzaklık,
- Rotor yan sızdırmazlık sacı
- Rotor kanatlar arası açıklık vb.



Şekil 35- Tipik tane boyu dağılımı gösterimleri

Separatör ayarları ve etkileri Tablo 22’de özetlenmiştir.

Tablo 22- Separatör ayarları ve etkileri

SEPARATÖR	Sonuçlanan Değişim		
Ayarlama Tipi	By-pass	İncelerin Çıkışı	İncelik
ANA FAN			
Daha fazla kanat veya daha büyük boyut	↘	↗	↘
Daha az kanat veya daha küçük boyut	↗	↘	↗
Daha yüksek hız	↘	↗	↘
AYIRICI KANATLAR			
Daha fazla kanat	↗	↘	↗
Daha az kanat	↘	↗	↘
Daha yüksek hız (çift milli ise)	↗	↘	↗
DİYAFRAM VEYA VALFLER (% açıklık)	↘	↗	↘
SEPARATÖR BESLEME HIZI	↗	Değirmen devresi tipi ile değişkenlik gösterir.	
SEPARATÖR BESLEME İNCELİĞİ	↗	Değirmen devresi tipi ile değişkenlik gösterir.	↗
ROTOR HIZI *	↗	↘	↗
HAVA AKIŞI *	↘	↗	↘

Sadece 2 nci ve 3 üncü jenerasyonlara uygulanmaktadır.

7.2. Tromp Eğrisi Çizerken Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar

Performans değerlendirmesi için yapılan bu analizde en önemli nokta doğru bir şekilde numune alınmasıdır.

Separatör besleme, nihai ürün ve geri dönüş noktalarından alınacak olan numunelerin, numune alınan akışı tam temsil ediyor olması önemlidir. Numune alınmadan önce sistemin kararlı (steady state) bir şekilde çalıştığından emin olunmalıdır. Stabil koşullara ulaşıldığında numune alma işlemine başlanmalıdır. Numune alma işlemi, havalı bant içerisinden spot olarak birkaç dakika boyunca birkaç kez alınmalı ve bu alınan numuneler karıştırılıp temsili numune elde edildikten sonra laboratuvara elek analizine gönderilmelidir. Alınacak olan numunelerin üzerinde yapılması gereken en önemli analiz boyut dağılımlarının belirlenmesidir.

Boyut dağılımı belirlemede maksimum boydan başlanıp $\sqrt{2}$ elek serisi ($\sqrt{2} = 1,41$ ise $150/1,41 = 106$ mikron) ile 150 mikrona kadar kaba elek, 150 mikrondan aşağısı için ise lazer saçılımı ile 2 mikrona kadar ölçüm alınmaktadır. Sonuçta malzemenin her boyu belirlenmiş olmaktadır. Kullanılacak en iri eleğin, üzerinde % 5’ten az malzeme kalacak şekilde seçilmesi uygun olmaktadır. Elek boyutlarına göre aralık değerleri Tablo 23’te yer alan tanecik boyut skalasından görülebilir.

Daha sonra sonuçlar ekte verilen Tromp eğrisi çiziminde görüleceği üzere grafiğe yansıtılmakta ve değerlendirme yapılmaktadır.

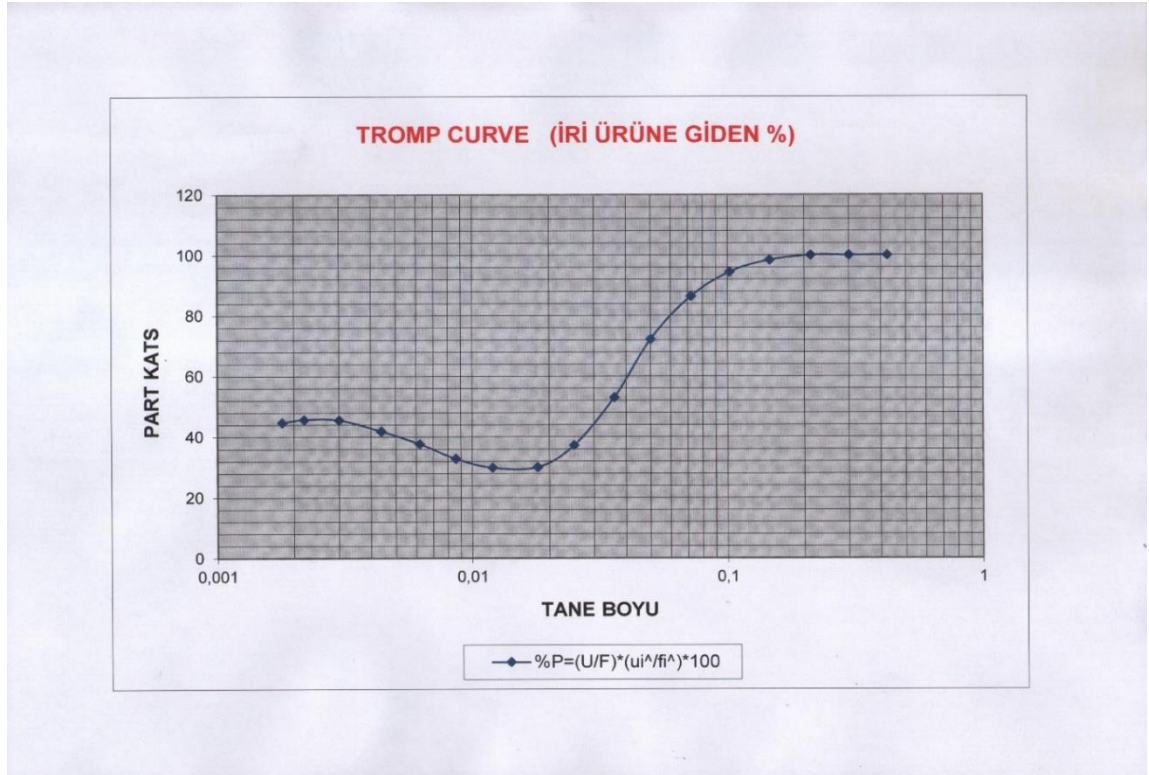
Tablo 23- Tanecik boyut skalası

Amerikan Elek Boyutu	Tyler Elek Boyutu	Aralık (mm)	Aralık (inç)
-	2 ½	8,00	0,312
-	3	6,73	0,265
No 3 ½	3 ½	5,66	0,233
No 4	4	4,76	0,187
No 5	5	4,00	0,157
No 6	6	3,36	0,132
No 7	7	2,83	0,111
No 8	8	2,38	0,0937
No 10	9	2,00	0,0787
No 12	10	1,68	0,0661
No 14	12	1,41	0,0555
No 16	14	1,19	0,0469
No 18	16	1,00	0,0394
No 20	20	0,841	0,0331

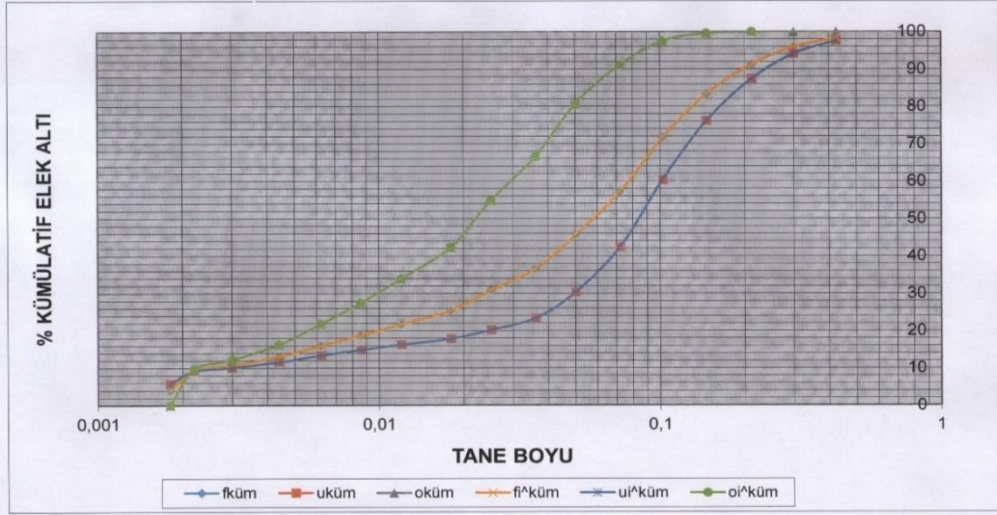
NOT: mm değerlerinin birbirleri arasında $\sqrt{2}$ ilişkisi vardır.

Elek analizinde en üstte ve en altta % 5'ten az malzeme kalmalıdır.

7.3. Örnek Tromp Eğrisi Analizleri



Şekil 36- Tromp eğrisi



Şekil 37- Elek bakiyesi gösterimi

KONUM: ÇİM 3 GERİ DÖNÜŞ

TARİH: 24.11.2018

1000 gr malzemenin elek analizi sonucu

TANE BOYU Mikron	Her elek üstünde		Her elek üstünde			
	Kalan gr	Birikimi Ağırlık gr	Kalan Kısım %	Birikimi Kalan %	Birikimi Geçen %	
2360	0	0,000	0,000	0,000	100,00	
1700	0	0,000	0,000	0,000	100,00	
1180	0,02	0,020	0,002	0,002	100,00	
850	0,14	0,160	0,014	0,016	99,98	
600	0,62	0,680	0,062	0,068	99,93	
425	1,73	2,410	0,173	0,241	99,76	
300	4,28	6,690	0,428	0,428	99,57	
212	10,33	17,020	1,033	1,033	98,97	
150	24,11	41,130	2,411	4,113	95,89	
Numune gr	-150	958,87				
		1000				

150 Mikrondan geçen malzemenin lazer saçılımı boyut dağılımı:

TANE BOYU Mikron	Birikimi Elek Altı %	Birikimi Kalan % (ANALİZDE OKUNAN)	Birikimi Ağırlık gr	
150	100	0,00	0,00	95,89
106	85,18	14,82	145,94	81,68
74,95	69,05	30,95	312,11	66,21
53	39,59	60,41	610,80	37,96
37,48	22,90	77,10	772,75	21,96
26,5	9,19	90,81	894,82	8,81
18,84	6,38	93,62	915,15	6,12
13,25	5,65	94,35	919,27	5,42
9,37	5,25	94,75	924,16	5,03
6,63	4,26	95,74	934,32	4,08
4,68	3,68	96,32	938,93	3,53
3,31	3,05	96,95	941,80	2,92
2,34	2,65	97,35	943,34	2,54
1,56	1,88	98,12	947,17	1,80
Numune gr	958,87			

ÖRNEK sınıflandırma işleminde -150 Mikron ayırma boyutu olarak ele alındığında:

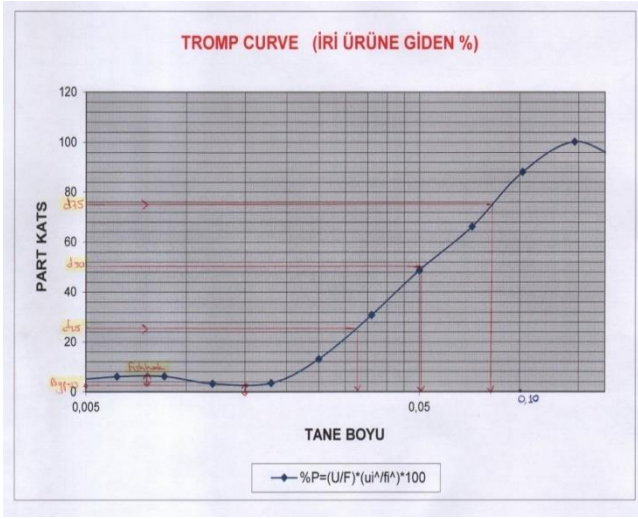
► Sınıflandırılacak 500 gr malzemenin içinde "90 gr" ayırma boyutu altında "ince", "410 gr" (110+95+85+65+55) ayırma boyutu üzerinde "iri" malzeme içmektedir.

ELEK ANALİZİNDEN GELEN SONUÇ İLE LAZER ANALİZİN BİRLEŞTİRİLMESİ

TANE BOYU Mikron	Birikimi Elek Altı % (GRAFİĞE KOYULACAK DEĞERLER)
2360	100,00
1700	100,00
1180	100,00
850	99,98
600	99,93
425	99,76
300	99,33
212	98,30
150	95,89
106	81,68
75	66,21
53	37,96
37	21,96
27	8,81
19	6,12
13	5,42
9	5,03
7	4,08
5	3,53
3	2,92
2	2,54
1	1,80

NOT : √2 Serisi ; √2 = 1,4142 ; 150/1,4142 = 106 ; 106/1,4142 = 74,95 ; 74,95/1,4142 = 53

Şekil 38- Tromp eğrisi numune elek bakiyesi hesabı



Şekil 39- Tromp Eğrisi Gösterimi

Şekil 39'daki grafik ile ilgili değerler aşağıda verilmiştir:

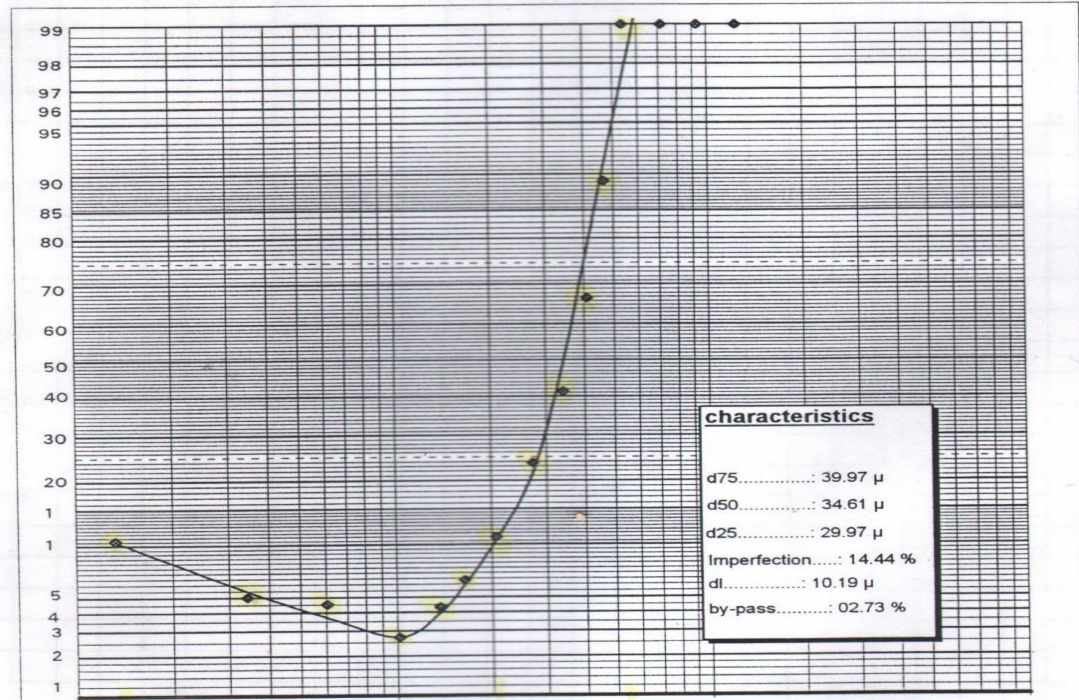
Bypass	= % 3
Kesme boyutu (cut size, d50)	= 50 μ
d25	= 33 μ
d75	= 80 μ
Balık oltası (fish hook)	= %5,5
Keskinlik (Kappa) (d25 / d75)	= 33/80= 0,41
Imperfection (düzgünsüzlük)	=(d75-d25)/(2 x d50)= 0,47

Farklı örnek değerler için bir Tromp eğrisi de Şekil 40'ta verilmektedir.

dim. μ	feed %.P	fines %.P	rejects %.P	efficiency %	dim μ	effic. (i) %	Tromp %
2.65	10.09	16.81	2.54	93.42	1.325	88.15	10.58
4.18	13.57	23.02	2.96	95.12	3.415	94.31	5.03
7.91	20.85	35.76	3.73	96.17	6.045	95.18	4.52
12.47	28.43	48.89	4.20	96.42	10.19	97.28	2.73
14.96	32.07	55.11	4.56	96.36	13.715	95.65	4.34
17.94	36.10	61.89	5.15	96.13	16.45	93.50	6.38
23.58	43.29	73.24	6.93	94.87	20.76	89.24	10.94
30.99	52.72	86.46	12.19	91.96	27.285	73.44	23.76
37.17	60.46	94.87	19.75	87.98	34.08	23.01	41.32
44.6	69.00	99.35	31.22	80.74	40.885	21.99	66.73
48.85	73.35	100.00	38.04	76.44	46.725	5.98	89.15
58.61	81.61	100.00	52.24	68.71	53.73		100.00
84.36	93.85	100.00	76.34	59.75	71.485		100.00
101.2	97.35	100.00	84.42	57.60	92.78		100.00
145.7	100.00	100.00	93.57	56.07	123.45		100.00

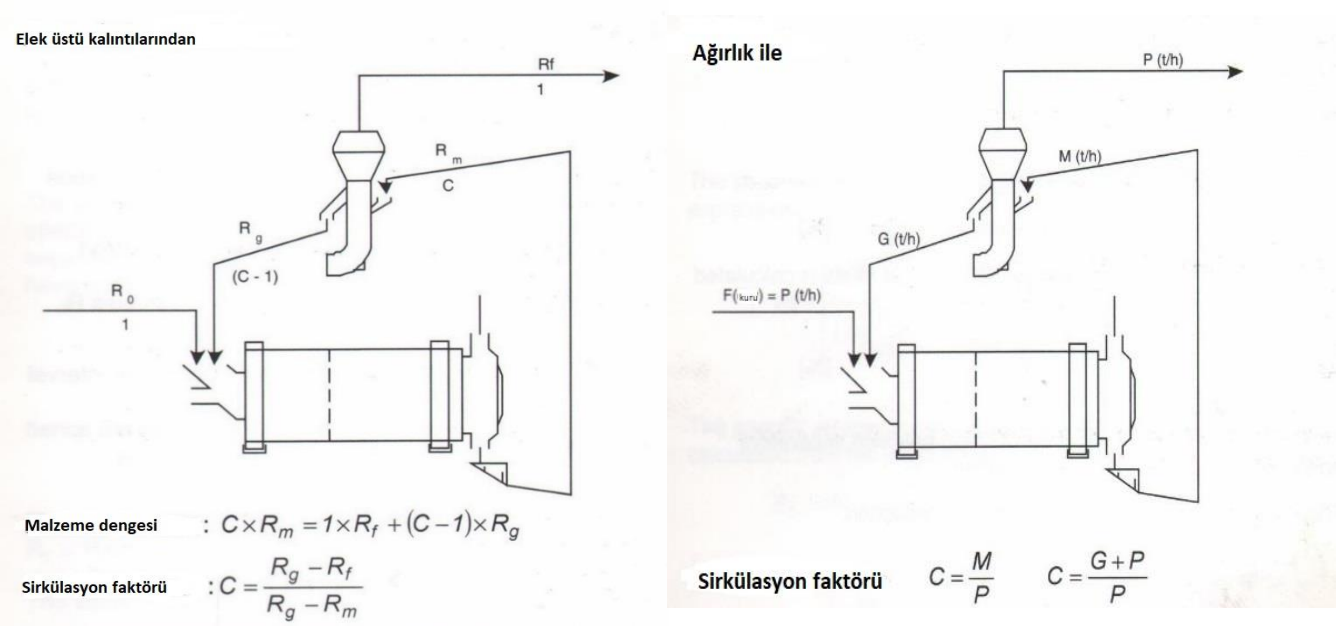
Blaine: 1971cm²/gr 3746cm²/gr

circulating load: 1.78 correlation : 0.9909 vf= 0.561 vg= 0.439



Şekil 40- Tromp eğrisi gösterimi

7.4. Sirkülasyon Faktörü Hesabı



SİMGELER:

- M = Separatör Besleme
- F(P) = Değirmen Besleme
- G = Değirmene Geri Dönüş
- C = Sirkülasyon Faktörü
- Rg = Geri Dönüş Elek Üstü Bakiyesi
- Rf = Nihai Ürün Elek Üstü Bakiyesi
- Rm = Separatör Besleme Elek Üstü Bakiyesi

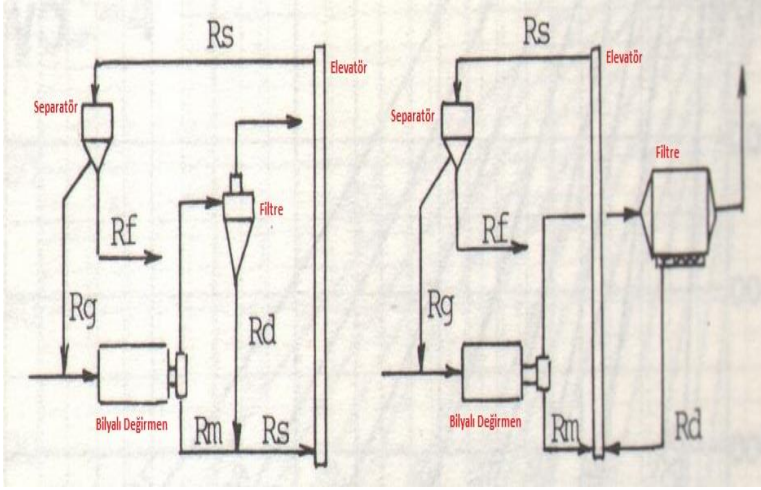
$$Tromp Eğrisi Değeri - T (\%) = \frac{(C - 1)}{C} \times \left(\frac{\Delta R_g}{\Delta R_m} \right) \times 100$$

$$Geri Dönüş Yüğü = C - 1$$

$$M = G + F(P)$$

$$M = C \times F(P)$$

7.5. Toz Yükü Hesabı



SİMGELER:

- D = % Toz yükü (değirmen çıkışındaki)
 Rg = Geri Dönüş Elek Üstü Bakiyesi
 Rf = Nihai Ürün Elek Üstü Bakiyesi
 Rs = Separatör Besleme Elek Üstü Bakiyesi
 Rd = Filtre Çıkış Elek Üstü Bakiyesi
 Rm = Değirmen Çıkışı Elek Üstü Bakiyesi (Filtre ile birleşmeden)

$$D = 100 \times \frac{(Rm - Rs)}{(Rm - Rd)}$$

$$Filtre Toz Yükü \left(\frac{t}{h} \right) = M \times D / 100$$

NOT: Separatör besleme akımının ilk şemada Rm, ikinci şemada ise Rs olarak (yani filtre malı ile birlikte) gösterildiği unutulmamalıdır. Sirkülasyon faktörü hesabında bu noktaya dikkat edilmelidir.

7.6. Separatör Verimi Hesabı

Aşağıda görüleceği üzere iki açıdan verim hesaplanmaktadır.

- 1) Uf: Separatör verimi (ince ürünlerin geri kazanımı)(%)

Bu formül, aynı sirkülasyon faktörüne sahip separatörlerin karşılaştırılması amacıyla kullanılmaktadır.

$$Uf = \left(\frac{1}{C} \right) \times \frac{(100 - Rf)}{(100 - Rm)} \times 100$$

Tecrübeler göstermiştir ki verimlilik tayinlerinde kalın parçacıklara doğru gidildikçe verimlilik düşmekte, ince parçacıklara doğru gidildikçe verimlilik artmaktadır.

- 2) Güç tüketimindeki azalma cinsinden verim (Vs) şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$Vs (\%) = \left[\frac{\log \frac{R_0}{R_f} - C \times \log \frac{R_0 + R_g \times (C - 1)}{R_f + R_g \times (C - 1)}}{\log \frac{R_0}{R_f} - C \times \log \frac{R_0 + 100 \times (C - 1)}{R_f + 100 \times (C - 1)}} \right] \times 100$$

7.7. Çeşitli Örnekler

Örnek 8:

Geri Dönüş 45 µ (Rg)	= %66,6
Separatör Girişi 45 µ (Rm)	= %46,4
Nihai Ürün 45 µ (Rf)	= %7,4

$$C = \frac{(Rg - Rf)}{(Rg - Rm)}$$

$$C = \frac{(66,6 - 7,4)}{(66,6 - 46,4)} = 2,93$$

Örnek 9:

Değirmen Besleme (P)	= 157 t/h
Geri Dönüş Miktarı (G)	= 148 t/h

Separatör Besleme (M)

$$M = G + F(P)$$

$$M = 148 + 157 = 305 \text{ t/h}$$

Sirkülasyon Faktörü (C)

$$C = \frac{M}{P}$$

$$C = \frac{305}{157} = 1,94$$

Geri Dönüş Yüğü

$$\text{Geri Dönüş Yüğü} = C - 1$$

$$\text{Geri Dönüş Yüğü} = 1,94 - 1 = 0,94$$

Devreden Yüğü

$$\text{Devreden Yüğü} = \frac{\text{Geri Dönüş Miktarı}}{\text{Değirmen Besleme}} \times 100$$

$$\text{Devreden Yüğü (\%)} = \frac{148}{157} = 94$$

Örnek 10:

	Elek Üstü Bakiyesi						
Elek Boyut	Rg	Rm	Rs	Rd	Rf	C (Sirk. Fak.)	C (Ort)
200μ	21,6	16,6	12,2	0,7	0,4	2,26	2,3
90 μ	58,3	44,0	37,3	14,6	9,4	2,33	

$$C = \frac{(Rg - Rf)}{(Rg - Rs)}$$

200 mikron

90 mikron

$$C = \frac{(21,6 - 0,4)}{(21,6 - 12,2)} = 2,26$$

$$C = \frac{(58,3 - 9,4)}{(58,3 - 37,3)} = 2,33$$

$$Ortalama Sirkülasyon Faktörü (C) = \frac{C_{200} + C_{90}}{2}$$

$$Ortalama Sirkülasyon Faktörü (C) = \frac{2,26 + 2,33}{2} = 2,30$$

$$D = 100 \times \frac{(Rm - Rs)}{(Rm - Rd)}$$

200 mikron

90 mikron

$$D = 100 \times \frac{(16,6 - 12,2)}{(16,6 - 0,7)} = 27,67$$

$$D = 100 \times \frac{(44,0 - 37,3)}{(44,0 - 14,6)} = 22,78$$

$$Ortalama D = \frac{D_{200} + D_{90}}{2} \quad (\text{Değirmen Çıkışındaki Toz Oranı})$$

$$Ortalama D = \frac{27,67 + 22,78}{2} = 25,23$$

Tonaj= 96 t/h olduğu varsayılır ise,

$$M = C \times F(P)$$

$$M = 2,30 \times 96 = 221$$

221 ton separator beslemenin

$$Filtre Toz Yüğü \left(\frac{t}{h} \right) = M \times D / 100$$

$$Filtre Toz Yüğü \left(\frac{t}{h} \right) = 221 \times \frac{25,23}{100} = 55$$

Örnek 11:

Aşağıdaki grafikte görülen tromp eğrisinin kesme boyutu(d_{50}) ve düzgünsüzlük (Imperfection) değerlerini bulunuz.

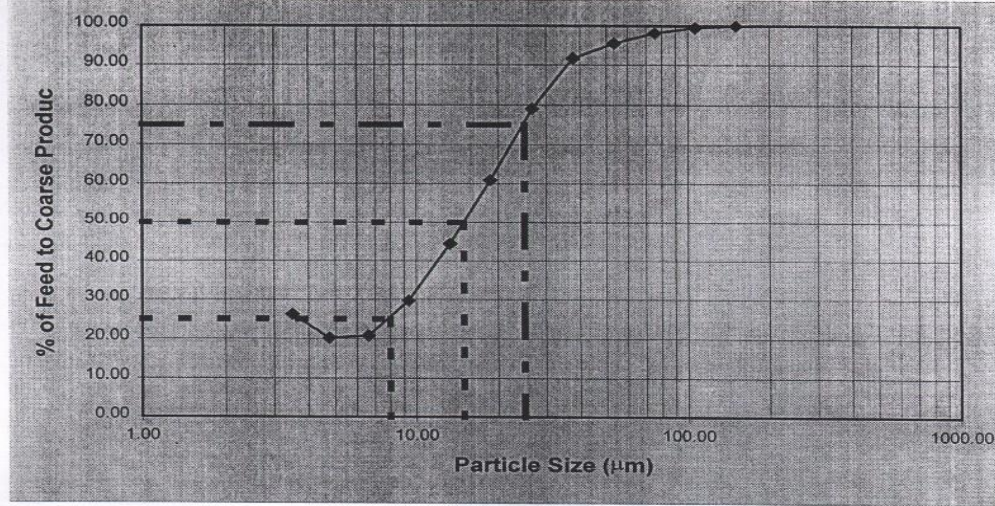


Figure 1. Performance Curve

From graph;

$$d_{50} = 15 \mu m$$

$$d_{25} = 8 \mu m$$

$$d_{75} = 25 \mu m$$

$$I = (25 - 8) / 2 \cdot 15 = 0.567$$

Tablo 14: Separatörler için tipik referans değerler

PARAMETRELER	SEPARATÖRLER			AÇIKLAMALAR
	I. JENERASYON	II. JENERASYON	III. JENERASYON	
Separatör Spesifik Besleme Yüğü [$Q_{besleme}/Q_{hava}$] (kg/m^3)	~1,0	~1,6	2,0-2,5	
Separatör Spesifik İncelik Yüğü (kg/m^3)	<0,75	<0,75	<0,75	
Sirkülasyon Faktörü [Besleme/Ürün]	3-4	3-4	3-4	Çok düşük sirkülasyon yükü: Değirmen içindeki malzeme akışı çok düşüktür, fazla öğütme ve sarıntılara neden olmaktadır, üretim kapasitesini düşürür.
Sirkülasyon Yüğü [$100 \cdot \text{Geri Dönüş}/\text{Ürün}$] (%)	200 - 300	200 - 300	200 - 300	Çok yüksek sirkülasyon yükü: Değirmen içindeki malzeme akışı çok fazladır, separatöre beslenen malzeme çok iridir, separatöre fazla yüklenilmiştir, by-pass oranı yüksektir, üretim kapasitesini düşürür.
By-pass (%)_Kaçak(%)	30 - 60	10 - 35	5 - 10	Separatör beslemesindeki bir miktar malzemenin, separatörün sınıflandırma bölgesine ulaşmadan (sınıflandırmaya tabi olmadan) geri dönüşü geçme oranıdır. Ne kadar küçük olursa, malzemenin hava içerisine dağılımının o kadar fazla olduğunu gösterir. Hava miktarının fazla olması, kaçak oranını azaltır.
Imperfection (Düzensüzlük) [$(d_{75}-d_{25})/2d_{50}$]	> 0,45	0,30 - 0,45	< 0,30	İdeal separatör ayırımından ne kadar sapıldığını gösterir. Sıfıra yaklaştıkça, separatörün ayırım keskinliği artarak ideal ayırma yaklaşmaktadır.
Sharpness (Keskinlik) [d_{25}/d_{75}]	0,3 - 0,4	0,5 - 0,6	0,6 - 0,7	Imperfection parametresi ile birlikte ideal separatör ayırımından ne kadar sapıldığını gösteren bir diğer parametredir. Oran 1'e yaklaştıkça, separatörün ayırım keskinliği artarak ideal ayırma yaklaşmaktadır.
Cut size (Duyarlılık Limiti) (μm)	> 20 μm	15-20 μm	< 15 μm	Hangi tanecik boyutunun yarısının ürüne, diğer yarısının ise geri dönüşü gideceğini gösteren ifadedir.
Rosin-Rammler Eğimi (n)	0,80 - 0,85	0,85 - 0,95	0,95 - 1,20	Eğim ne kadar yüksek olursa o kadar dar bir alanda (daha ince bir alanda) incelik dağılımı olur. Ne kadar düşük olursa malzeme inceliği o kadar geniş bölgeye (ince ve kalın parçacık arasında) yayılır.
D Limit				Separatörün ayıramayacağı maksimum boyutu ifade eder. Bu değerin altında separatör malzemeyi ayıramaz.

8. ROLLER PRES (VALSLİ PRES)

Yüksek basınçlı öğütme valsleri (silindirleri); klinker, kalker, tras gibi endüstriyel minerallerin ezilmesinde kullanılmaktadırlar. Ezme veya öğütme işlemi, aralarında gap diye adlandırılan bir boşluk bulunan ve zıt yönde dönen iki silindir arasında yüksek basınçta gerçekleşmektedir. Besleme malzemesi, biri sabit diğeri yüksek basınçta hareketli ve zıt yönde dönen silindirler arasından geçerken incelmış bir yapıya dönüşmektedir. Çıkan malzemeye ezilmiş kek denmektedir. Hareketli olan silindirin (valsın) baskısını aşağıda şekilde görülen yay temin etmektedir. Günümüzde yay yerine basıncı emniyetli bir şekilde sağlayan hidrolik sistemler gelişmiştir. Valsli preste ezilen bu malzemeler, bir sonraki ekipmanda (değirmende) öğünmeyi kolaylaştırmakta, tonaj artışı ve spesifik enerjide düşüş sağlamakta ve değirmen gibi yapıların iç unsurlarının (plaka gibi) aşınmasını azaltmaktadır. Şekil 41 a ve b'de valsli pres gösterimleri sunulmuştur.

Roller pres, üründe (klinker) yüksek oranda mikro çatlakların oluşmasını sağlamaktadır, yani darbe etkisine göre sıkıştırma yaparak daha efektif kırma yapmaktadır. Bond iş indeksinin azalmasına da neden olduğundan bir sonraki öğütme işlemi için önemli avantaj sağlamaktadır.

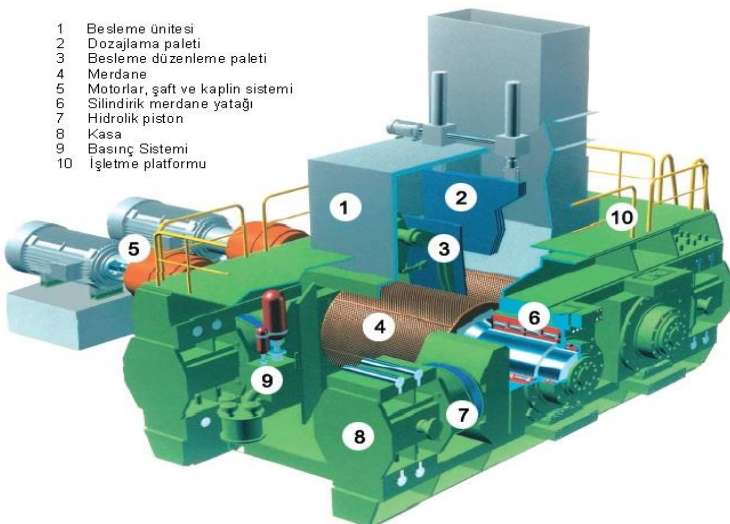
Ezilmemiş malzeme iş indeksi ile preslenmiş malzemenin iş indeksi arasında yaklaşık 4-4,5 kWh/t fark bulunmaktadır. Yani değirmende birinci kamaranın yapacağı işi (4-4,5 kWh/t) valsli pres yapmış olmaktadır. Bir değirmene pres ilavesi ile,

- 1. kamara boyu kısaltılabilmektedir.
- 1. kamara bilya boyu küçültülebilmektedir.

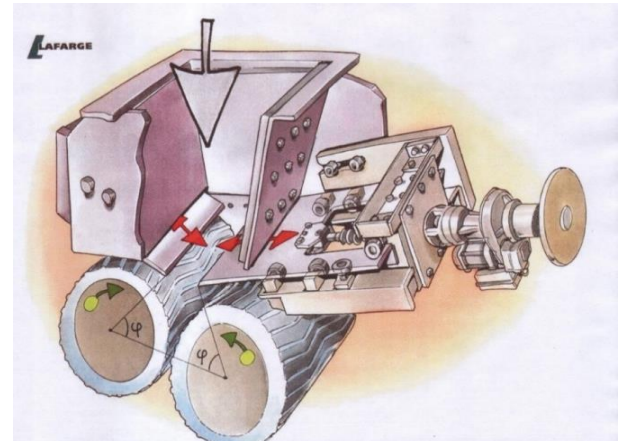
Pres, sıkıştırmada enerjinin tamamını malzemeye aktarmaktadır. Bilyalı değirmende ise enerjinin ancak % 10-15'i öğütmeye aktarılmaktadır.

Aşağıda çizimde preslenmiş (kek haline gelmiş) ve preslenmemiş (taze besleme) klinker için değirmen besleme boyut dağılımı görülmektedir.

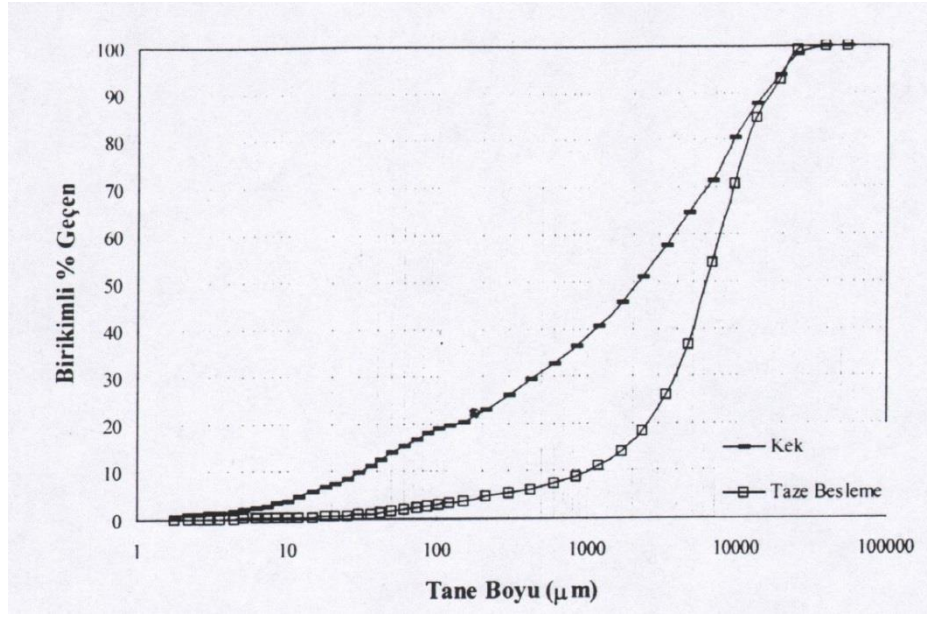
Roller preslerin performansının izlenmesi için besleme/ürün boyut indirgeme oranı takip edilmelidir (Şekil 42). Roller pres devre tasarımına bağlı olarak bu değişebilmektedir. Ancak tüm sistemlerde indirgeme oranı periyodik ölçümlerle izlenerek sistem performansı kontrol edilebilir. Bununla beraber valsler arasındaki açıklık (gap), basınç, sirkülasyon oranı gibi parametreler indirgeme oranı izlenerek iyileştirilebilir.



Şekil 41a- Valsli pres genel gösterimi



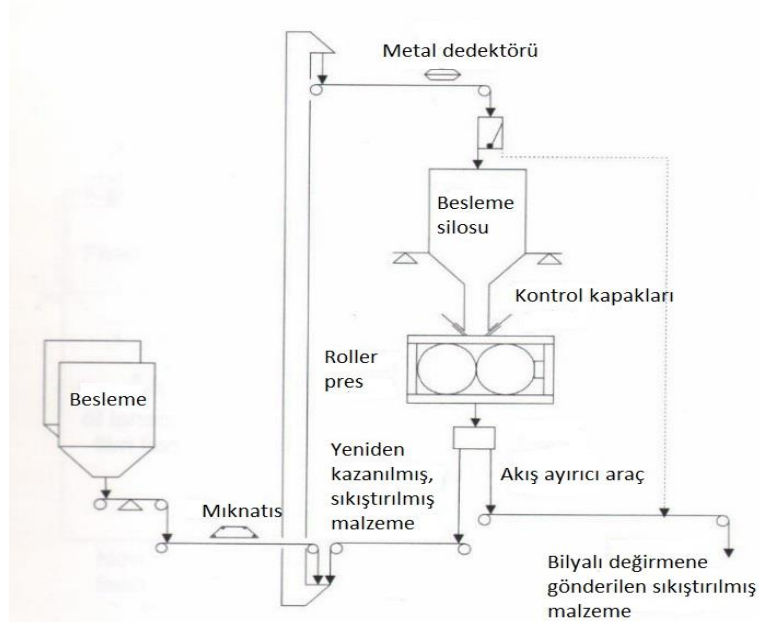
Şekil 41b- Valsli pres gösterimi



Şekil 42- Valsli pres beslemesinin ve ürünün boyut dağılımı grafiği

Kullanılan ekipmanlara göre çeşitli valsli (roller) pres sistemleri Şekil 43-46 arasında görülmektedir.

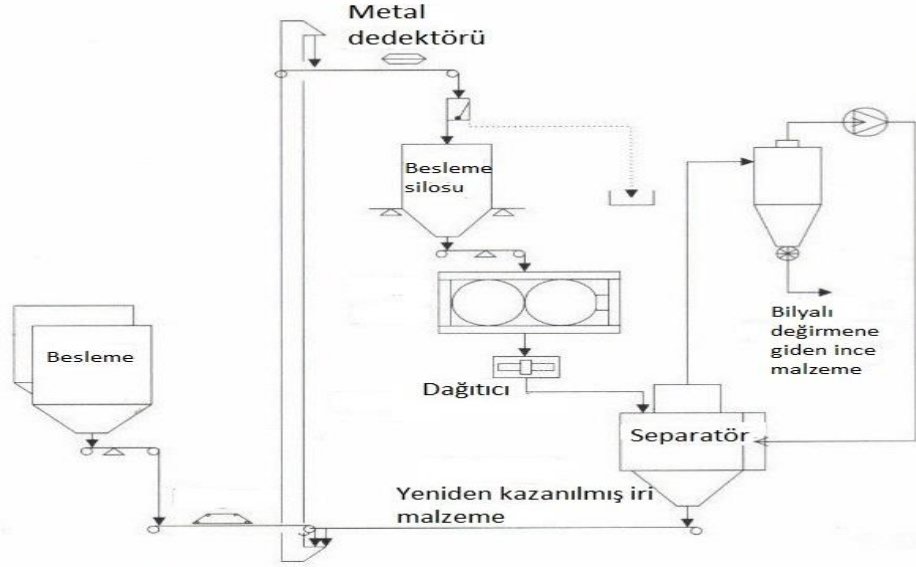
8.1. Ön öğütme olarak (pre-grinding) (a)



Şekil 43- Ön öğütme olarak (pre-grinding)

- Valsli pres ünitesinde valslerin altında bulunan geri dönüş klapesi vasıtasıyla (motor kW değeri de göz önünde bulundurularak) ezilen malzemenin bir kısmı geri dönüş ile tekrar valslerin arasına beslenmekte (% 20-30 gibi), bir kısmı da (% 70-80) ezilmiş kek olarak çimento değirmen bunkerine gönderilmektedir.
- Spesifik güç tüketimi 2-5 kWh/ton arasında değişmektedir.
- Sirkülasyon faktörü 1 ile 2,1 arasında değişmektedir.

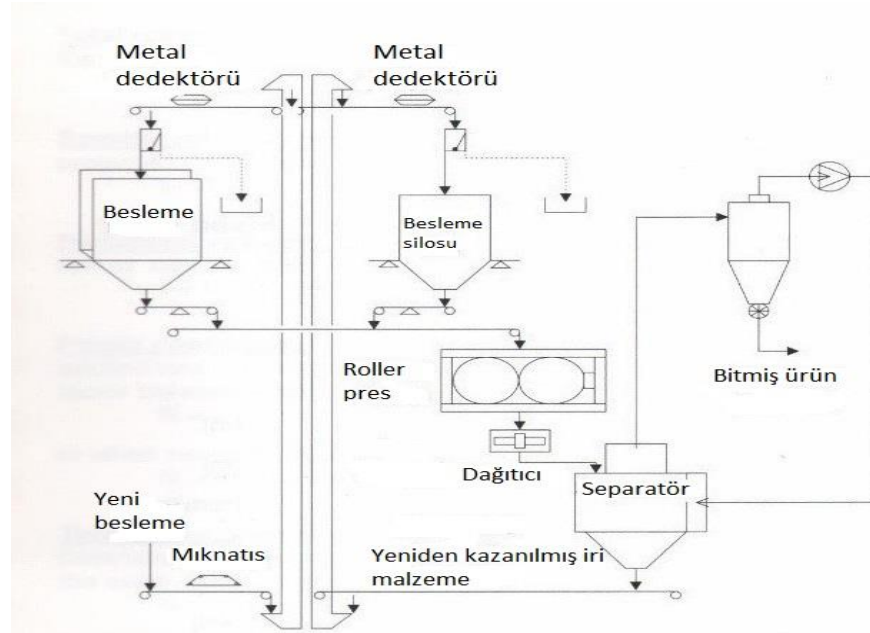
8.2. Yarı mamul ürün olarak öğütme (semi-finish grinding) (b)



Şekil 44- Yarı mamul ürün olarak öğütme (semi-finish grinding)

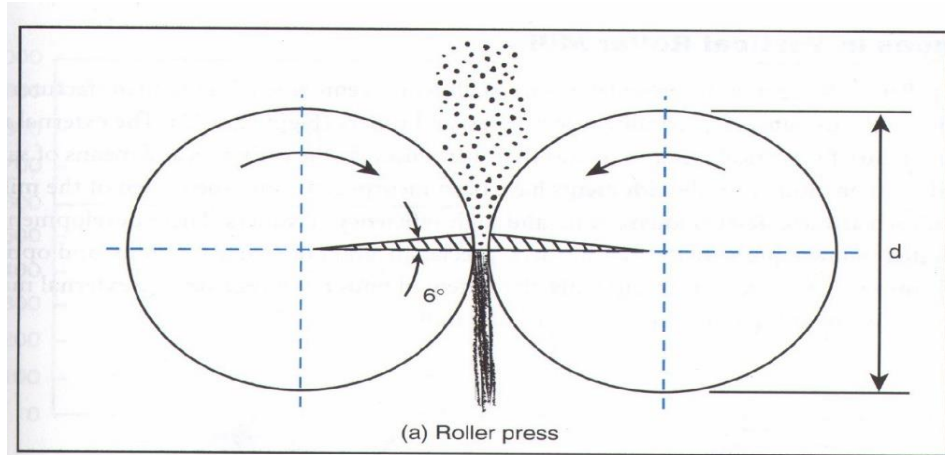
- Spesifik güç tüketimi 6 ile 14 kWh/ton arasında değişmektedir.
- Sirkülasyon faktörü 2,5 ile 6,0 arasında değişmektedir.

8.3. Nihai ürün olarak öğütme (finish grinding) (c)



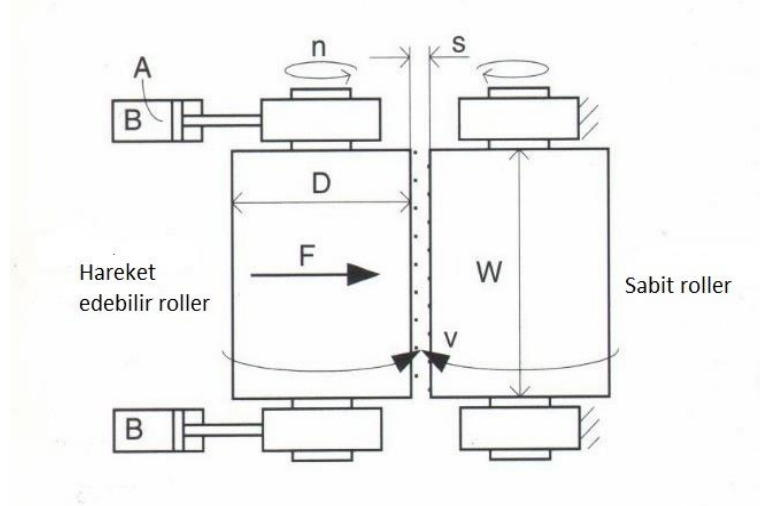
Şekil 45- Nihai ürün olarak öğütme (finish grinding)

- Spesifik güç tüketimi 14 ile 30 kWh/ton arasında değişmektedir.
- Sirkülasyon faktörü 6,0 ile 14 arasında değişmektedir.



Şekil 46- Valsli pres valslerinin gösterimi

8.4. Valsli (Roller) Pres Hesaplamaları



Semboller

D	= Vals çapı (m)
W	= Vals genişliği (m)
n	= Vals hızı (rpm)
v	= Vals çevresel hızı (m/s)
s	= Öğütme yatak kalınlığı (m)
F	= Vals kuvveti (kN)
B	= Hidrolik basınç (bar)
A	= Piston alanı (m ²)
c	= Hidrolik silindir sayısı (-)
δ	= Ezilmiş malzeme yoğunluğu (kg/m ³)
μ	= Tork faktörü (-)
k _T	= Spesifik Vals basıncı (kN/m ²)
M	= Valsli pres kapasitesi (t/h)
N	= Güç tüketimi (kW)
E	= Spesifik güç tüketimi (kWh/t)
C	= Valsli pres sirkülasyon faktörü (-)
P	= Valsli prese yeni besleme miktarı (t/h)

İlgili Formüller

$$\text{Toplam Vals Kuvveti} - T \text{ (kN)} = c \times A \times B \times 102$$

$$\text{Spesifik Vals Basıncı} - k_T \left(\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) = \frac{T}{D \times W}$$

$$\text{Valslerin Çevresel Hızı} - v \text{ (m/s)} = \frac{P \times D \times n}{60}$$

$$\text{Güç Tüketimi} - N \text{ (kW)} = \mu \times T \times v = \mu \times k_T \times D \times W \times v$$

$$\text{Valsli Pres Kapasitesi} - M \left(\frac{\text{t}}{\text{h}} \right) = 3,6 \times s \times \delta \times W \times v$$

$$\text{Spesifik Güç Tüketimi} - E1 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{t}} \right) = N/M$$

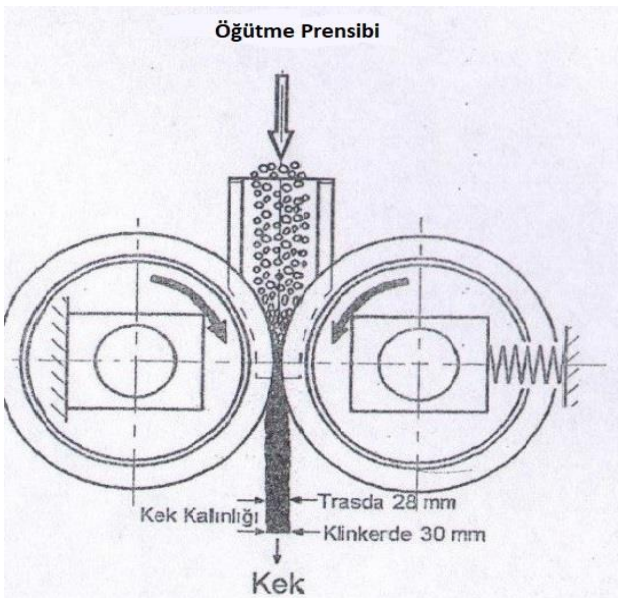
$$\text{Valsli Pres Sirkülasyon Faktörü} - C = M/P$$

$$\text{Spesifik Güç Tüketimi} - E \left(\frac{\text{kWh}}{\text{t}} \right) = C \times E1$$

Tipik Valsli (Roller) Pres Parametreleri

Valsli Pres Hızı (m/s)	1,3 - 1,6
Spesifik Vals Basıncı (kN/m ²)	6.000 (Çimento ve cüruf) 4.500 (Hammadde)
Tork faktörü (-)	0,07 - 0,1
Öğütme yatağı (% D)	1,8 - 2,3
Ezilmiş malzeme yoğunluğu (t/m ³)	2,2 - 2,7

Örnek bir roller prese ait teknik bilgiler



POLYCOM:

Gap aralığı	: 12 mm
Rulo çapı	: 1450 mm
Rulo genişliği	: 780 mm
Kek hızı	: 1,52 m/s
Rulo devri	: 20 dev/dk
Motor gücü	: 700 kW x 2
Motor devri	: 1400 dev/dk
Hidrolik basınç	: 170 bar
Başlangıç basıncı	: 85 bar klinker 65 bar tras
Azot basıncı	: 40 bar
Valslerde kayma miktarı (skewing)	: 12 mm (maks)
Kayma	: < 5 mm
Azot kapasitesi	: 35 lt
Hidrolik yağ kapasitesi	: 400 lt
Hidrolik yağ sıcaklığı	: 20 < T < 70 C
Hidrolik pompa debisi	: 37,5 lt/dk
Hidrolik pompa gücü	: 15 kW

$$Ezme Kapasitesi (t) = Rulo Aralığı (m) \times Rulo Genişliği (m) \times Kek Hızı \left(\frac{m}{s}\right) \times 3.600 (s) \times Malzeme Yoğunluğu (t/m^3)$$

$$Klinker Ezme Kapasitesi (t) = 0,03 \times 0,78 \times 1,52 \times 3.600 \times 2,3 = 295$$

$$Tras Ezme Kapasitesi (t) = 0,03 \times 0,78 \times 1,52 \times 3.600 \times 2,0 = 255$$

Roller Preslerin kullanılmasında dikkat edilecek hususlar aşağıda belirtilmiştir:

- Valsler üzerinde srekli olarak malzeme yığıını bulunmalıdır.
- Bu malzeme yığıını içindeki sıkışmış hava, malzemenin valsler arasında ilerlemesine ve basıncın etkili bir şekilde tanelere ulaşmasına engel olacağından uygun havalandırma klapeleri ile boşaltılmalıdır.
- Besleme malzemesi içindeki maksimum tane iriliği, valsler arası ağııklığın 3 katından fazla olmamalıdır. Besleme malzemesinin çok fazla iri tanelerden ya da çok miktarda ince tanelerden oluşmaması gerekmektedir. Her iki durumda da özgül enerji tüketimi artacak ve valslerin vibrasyon yarattığı gözlenecektir.
- Valslerde farklı malzemeler bir arada öğütülecekse bu malzemeler iyice karıştırılmalıdır. Çünkü valsler arasındaki kalma süresi, saniyenin onda birleri mertebesinde. Bu nedenle, sistemin, besleme malzemesine olan duyarlılığı çok fazladır.

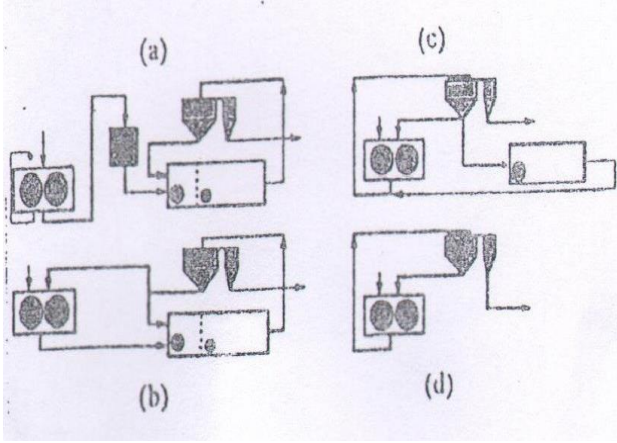
şekil 47’de valsli presten geğirilmiş (ezilmiş) ve de geğirilmemiş (ezilmemiş) klinkere ait elek analizi görölmektedir. Boyut olarak indirgeme oranı buradan anlaşılabilmektedir.

BURSA ÇİMENTO FABRİKASI A.ř					
FİRİN 1 TARTIM KLİNKERİ ELEK ANALİZİ					
Numunenin Cinsi : KLİNKER					
Alınış Tarihi : 24.26.09.2018					
Deney Tarihi : 26.09.18					
Rapor No : 00/18					
ELEK AÇIKLIğI (mm)	Her Elek Üstünde Kalan (g)	Kümülatif Ağırlık (g)	Her Elek Üstünde Kalan Kısım (%)	Kümülatif Kalan (%)	Kümülatif Geęen (%)
40	0		0,00	0,00	100,00
31,5	66	66	3,30	3,30	96,70
25	32	98	1,60	4,90	95,10
16	352	450	17,60	22,50	77,50
8	514	964	25,70	48,20	51,80
4	334	1298	16,70	64,90	35,10
2	372	1670	18,60	83,50	16,50
1	184	1854	9,20	92,70	7,30
0,5	56	1910	2,80	95,50	4,50
0,2	34	1944	1,70	97,20	2,80
0,09	16	1960	0,80	98,00	2,00
0,09 Elek Altına Geęen	40	2000	2,00	100,00	0,00
Numune Ağırlığı	2000				

BURSA ÇİMENTO FABRİKASI A.ř					
VALSLİ PRES					
Yayın Tarihi: 16/09/2004					
Revizyon No/Tarih: 00/					
Sayfa No: 1/1					
Numunenin Cinsi : KLİNKER					
Alınış Tarihi : 19.11.2018					
Deney Tarihi : 19.11.2018					
Rapor No : 37/18					
ELEK AÇIKLIğI (mm)	Her Elek Üstünde Kalan (g)	Kümülatif Ağırlık (g)	Her Elek Üstünde Kalan Kısım (%)	Kümülatif Kalan (%)	Kümülatif Geęen (%)
31					
25					
16	0		0,00	0,0	100,0
8	35	35	2,33	2,3	97,7
4	137	172	9,13	11,5	88,5
2	173	345	11,53	23,0	77,0
1	117	462	7,80	30,8	69,2
0,5	268	730	17,87	48,7	51,3
0,2	135	865	9,00	57,7	42,3
0,09	117	982	7,80	65,5	34,5
0,09 Elek Altına Geęen	518	1500	34,53	100,00	0,00
Numune Ağırlığı	1500				

şekil 47- Valsli presli ve pressiz elek bakiyesi

Roller pres çıkışında kekleşme olduğundan numunenin çok iyi hazırlanarak parçalanması gerekmektedir.



- a- Ön Öğütme
- b- Hibrit Öğütme
- c- Yarı-Son Öğütme
- d- Son Öğütme

Yüksek basınçlı merdaneli preslerde (roller pres) öğütülen malzeme ne denli ince ürün içerirse, öğütme enerjisi tüketimi o denli az olmaktadır. Bu nedenle, tüm öğütmenin mümkün olduğunca roller preslerde yapılması amaçlanmaktadır.

Şekil 48- Roller pres uygulama konfigürasyonları

Roller pres uygulama konfigürasyonları Şekil 48a, b, c ve d’de verilmiştir. Buna göre,

- İlk uygulama şekli olan ön öğütme konfigürasyonunda, malzeme valsler arasından geçirildikten sonra bir kısmı son ürün elde etmek üzere bilyalı değirmene gönderilmektedir. Kek’in diğer kısmı ise tekrar valsler döndürülerek özgül enerji tüketimi azaltılmakta, kapasite arttırılmakta ve daha da önemlisi besleme malzemesinin reolojik özellikleri optimize edilerek valsler tarafından daha kolay kavranması sağlanmaktadır. Bu konfigürasyonda % 10-15 enerji tasarrufu ve % 30-40 kapasite artışı sağlanmaktadır.
- Mevcut bir bilyalı değirmenin öğütme kapasitesi daha fazla arttırılmak isteniyorsa bu kez hibrit konfigürasyonu kullanılmaktadır. Burada separatör alt akımının bir kısmı yeni besleme malzemesi ile birlikte beslenmekte, diğer kısmı ise bilyalı değirmene gönderilmektedir. Bu sistemde son öğütmeye önemli bir katkı sağladığından özgül enerji tüketimi ve kapasite artışı sırasıyla % 10-20 ve % 60-80 oranlarında iyileşmektedir.
- Yarı-son öğütme konfigürasyonunda malzeme % 60-80 oranında ürün inceliğine kadar roller preste öğütülmektedir. Valslerden çıkan kek, bir separatörde ayrılmakta ve separatör altı iri malzemenin bir kısmı bilyalı değirmene diğer kısmı ise tekrar öğütülmek üzere valsler gönderilmektedir. Bilyalı değirmen çıkışı malzeme de kek ile birlikte separatöre gönderilmektedir. Bu sistemde enerji tasarrufu % 15-30 ve kapasite artışı ise % 80-200’e çıkmaktadır.
- Son öğütme konfigürasyonunda ulaşılan enerji tasarrufu en fazladır (% 50’ye çıkmaktadır). Bu konfigürasyonda öğütmenin tamamı valslerde yapılmaktadır.

Örnek ve tavsiye niteliğinde hazırlanmış olan Bilyalı Değirmenlere Giriş Talimatı aşağıda verilmiştir.

NOT: Bilyalı Değirmen içinden alınan numunelerin incelik analizlerine göre canlı çizilen öğütme eğrisi diyagramı, separatör tromp eğrisi çizimleri ve de kütle-enerji madde balansı dijital ortamda ekte sunulmuştur. Verilen değerlerde yapılacak değişikliklere göre bu grafikler otomatik olarak çizilecektir.

9. BİLYALI DEĞİRMENLERE GİRİŞ TALİMATI

- 1) Değirmene girmeden enerjiyi kestir. EKED'i uygula (Enerjiyi Kes- Kilitle- Etiketle-Dene)
(Değirmen ana tahrik, yardımcı tahrik, besleme bandı, elevatör, değirmen fanı (gerekmesi durumunda vb.)
- 2) Sıcak gaz hattı klapesininin kapalı olduğunu yerinde kontrol et ve EKED uygula.
- 3) Değirmene malzeme besleyen noktaların klapelerini kapattır ve EKED uygula.
- 4) Değirmen içerisindeki yağ ve su sistemlerini kapat ve EKED uygula.
- 5) Değirmen içerisinde uygun emiş fan vasıtasıyla operatöre ayarlatır/kapattır (malzeme ve sisteme göre)
- 6) Kapalı alan çalışma iznini doldur.
- 7) Değirmenin dışında mutlaka bir gözcü (yanında telsizi olan) bulundur.
- 8) Kişisel koruyucu donanımını kullan (baret, iş eldiveni, iş güvenlik gözlüğü, toz maskesi, reflektif tulum, kulaklık, bot tipi iş güvenlik ayakkabısı vb.)
- 9) Merkezi Kontrol Odasına (CCR) ve MCC Odasına ilgili değirmenin ekranının olduğu yere “değirmende çalışma var” tabelasını astır.
- 10) Güvenli giriş için (değirmen üst kapaktan) düşme tehlikesini değerlendir ve gerekli önlemleri al (yaşam hattına bağlanmadan değirmen üstünde yürüme)
- 11) Düşmeyi önleyici ekipmanları (Paraşüt tipi emniyet kemeri vb.) önceden kontrol ve hazır et.
- 12) Değirmen içerisinde mobil olarak kullanılan gaz analiz cihazının değirmene girmeden şarjını ve çalıştığını kontrol et.
- 13) Değirmen giriş kapağını açtıktan sonra girişten uzak bir pozisyonda konumlandır (değirmenin içerisine düşme riskine karşı)
- 14) Değirmen içi sıcaklığı 50 °C oluncaya kadar değirmeni soğut (fanlar vasıtasıyla). Değirmene girmeden mobil gaz analiz cihazını (sesli-görüntülü uyarı veren) değirmen içerisine ipe sallandırarak gaz ölçümü yap. Değirmen içi aydınlatmaları ve uygun merdiveni sağladıktan sonra değirmene kontrollü bir şekilde gir.
- 15) Değirmen içerisinde sıcak malzeme var ise içeri kalas attır.
- 16) Değirmen içerisinde çalışırken mobil gaz analiz cihazını sürekli açık tut ve cihazdan alarm geldiğinde hemen değirmeni terket. Gerektiğinde değirmen içerisinde oksijen maskesi ve oksijen tüpleriyle çalış (herhangi bir gaz sızıntısına karşı)
- 17) Değirmen içerisine aktarılacak malzeme, bilya, plaka vb. için uygun ve kontrolü yapılmış monoray vinci, caraskal, opçuk, zincir, halat, el aletleri kullan.
- 18) Çalışma bitince değirmen içi ve çevresini kontrol et, değirmen kapağını kapat ve enerjiyi beslettir. Değirmenin etrafındaki koruyucu zincirleri, bariyeri etkin hale getir.
- 19) İş başlangıcında ve bitiminde amirine haber ver.

EKLER

Özgöl Isı (Cp) Hesaplamaları- Tabloları ve Grafikleri

EK 1- ÖZGÜL ISI HESAPLAMA FORMÜLLERİ

Tahmini Cp (kCal/kg K) = Tanımlanmış sıcaklıkta

$$Cp(T) = (a + b \times T + c \times T^2 + d \times T^{-2})$$

Tahmini Cp (kCal/kg K) = 0°C ile T°C sıcaklıkları arasında

$$Cp(T) = a \times (T - T_0) + b \times \frac{(T^2 - T_0^2)}{2} + c \times \frac{(T^3 - T_0^3)}{3} - d \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)$$

$$T_0 = 273,15$$

T = Mutlak sıcaklık (°K)

a, b, c, d= Sabit (kCal/mol) (Ek 3'te verilmiştir.)

EK 2- ÖZGÜL ISI TABLOLARI

Materyal	Sıcaklık Limit	a	b	c	d	En üst limit
O ₂	298 to 999 K	1.66341 E-1	1.52333 E-4	-5.93194 E-8	1.14618 E+3	0.2408
	1000 to 3299 K	2.51162 E-1	1.77998 E-5	-6.07722 E-10	-7.85447 E+3	0.2736
	3300 to 6000 K	2.83126 E-1	1.27044 E-5	-9.60847 E-10	-1.30952 E+5	0.2928
N ₂	298 to 799 K	2.32210 E-1	2.14938 E-5	2.76050 E-8	6.53840 E+2	0.2553
	800 to 2199 K	2.42450 E-1	5.44079 E-5	-1.05755 E-8	-7.11335 E+3	0.2838
	2200 to 6000 K	3.20296 E-1	1.05070 E-7	2.16255 E-10	-5.84722 E+4	0.3079
H ₂	298 to 999 K	3.71752 E+0	-6.54182 E-4	5.30928 E-7	-1.34162 E+4	34.904
	1000 to 2099 K	2.11603 E+0	1.38511 E-3	-2.23797 E-7	3.03508 E+5	37.051
	2100 to 6000 K	3.79977 E+0	2.54376 E-4	-8.12917 E-9	-8.44345 E+5	43.278
CO ₂	298 to 799 K	1.49625 E-1	2.42420 E-4	-9.77776 E-8	-1.01938 E+3	0.2446
	800 to 1799 K	2.60434 E-1	6.27757 E-5	-1.38167 E-8	-1.43928 E+4	0.2858
	1800 to 3999 K	3.32286 E-1	3.92911 E-6	-9.13715 E-11	-4.80845 E+4	0.3158
	4000 to 6000 K	3.58571 E-1	-5.30873 E-6	7.85626 E-10	-1.07169 E+5	0.3267
CO	298 to 799 K	2.20543 E-1	5.60021 E-5	8.37651 E-9	9.48925 E+2	0.2575
	800 to 2199 K	2.55445 E-1	4.61682 E-5	8.98815 E-9	9.24077 E+3	0.3259
	2200 to 6000 K	3.17217 E-1	1.74111 E-6	3.30179 E-11	4.64873 E+4	0.3276
SO ₂	298 to 799 K	9.79544 E-2	2.00701 E-4	-9.82007 E-8	-2.45323 E+1	0.1749
	800 to 2599 K	2.06945 E-1	9.10368 E-6	-1.25453 E-9	-1.13897 E+4	0.2044
	2600 to 6000 K	2.17009 E-1	2.34333 E-6	-6.36079 E-13	-1.79038 E+4	0.2172
NO	298 to 1199 K	1.81362 E-1	1.28289 E-4	-4.08850 E-8	1.92938 E+3	0.2566
	1200 to 6000 K	2.92103 E-1	3.55985 E-6	-1.76784 E-10	-2.64192 E+4	0.2918
H ₂ O (vap)	298 to 1199 K	3.75618 E-1	1.68470 E-4	4.13071 E-10	1.72986 E+3	0.5052
	1200 to 2599 K	4.14544 E-1	1.91743 E-4	-2.78523 E-8	-3.59274 E+4	0.5997
	2600 to 6000 K	7.48058 E-1	1.29251 E-5	-3.91557 E-10	-4.02480 E+5	0.7009
SiO ₂	298 to 846 K	1.74571 E-1	1.54435 E-4	0.00000 E+0	-3.84423 E+3	0.2444
	847 to 1078 K	2.34315 E-1	3.99401 E-5	0.00000 E+0	0.00000 E+0	13.490
	1079 to 1994 K	2.89399 E-1	5.15893 E-6	0.00000 E+0	-1.64753 E+4	0.7851
	1995 to 2200 K	3.42819 E-3	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.7015
Al ₂ O ₃	298 to 599 K	1.58181 E-1	3.16316 E-4	-1.99797 E-7	-4.40115 E+3	0.2295
	600 to 1599 K	2.70931 E-1	3.61871 E-5	-4.81287 E-9	-9.75318 E+3	0.2784
	1600 to 2327 K	3.56484 E-1	-2.66895 E-5	7.55563 E-9	-5.22846 E+4	0.2929
	2328 to 4000 K	3.92311 E-1	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.3375
Fe ₂ O ₃	298 to 499 K	2.62773 E-1	-2.71539 E-4	3.64815 E-7	-5.24040 E+3	0.1754
	500 to 799 K	1.93927 E-1	1.68039 E-5	5.79035 E-8	-4.88997 E+3	0.0898
	800 to 1099 K	9.36550 E+0	-1.24510 E-2	4.70597 E-6	-1.39500 E+6	0.1423
	1100 to 1599 K	2.27310 E-1	-1.91821 E-5	8.86418 E-9	-7.56606 E+3	0.1691
CaO	298 to 1399 K	2.11063 E-1	2.41220 E-5	-2.70785 E-9	-3.42270 E+3	0.2201
	1400 to 3199 K	2.09137 E-1	2.15260 E-5	-7.61534 E-10	0.00000 E+0	0.2412
	3200 to 4000 K	2.67475 E-5	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.1894
MgO	298 to 899 K	2.56115 E-1	8.67130 E-5	-3.47648 E-8	-5.23329 E+3	0.2725
	900 to 4000 K	2.92535 E-1	1.98752 E-5	-3.78829 E-11	-8.79060 E+3	0.3274
K ₂ O	298 to 499 K	1.72260 E-1	3.18402 E-4	-3.33239 E-7	-2.24501 E+3	0.2276
	500 to 799 K	7.41409 E-2	3.14076 E-4	-1.12686 E-7	9.04108 E+3	0.2417
	800 to 2000 K	1.87709 E-1	9.96111 E-5	1.09170 E-9	-4.40135 E+2	0.3025
Na ₂ O	298 to 599 K	1.04965 E-1	5.91884 E-4	-3.72410 E-7	1.61265 E+3	0.2988
	600 to 1023 K	3.12327 E-1	8.43466 E-5	-2.18119 E-8	-8.84785 E+3	0.3287
	1024 to 1405 K	3.18377 E-1	4.76363 E-5	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.3447
	1406 to 3500 K	4.03356 E-1	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.3828
CaCO ₃	298 to 1200 K	2.49575 E-1	5.23529 E-5	0.00000 E+0	-6.19443 E+3	0.2692
MgCO ₃	298 to 599 K	1.90758 E-1	2.12990 E-4	-1.43661 E-10	-3.39798 E+3	0.2628
	600 to 799 K	1.34623 E-1	3.85987 E-4	-1.47945 E-7	-1.38980 E+3	0.2879
	800 to 1000 K	1.25484 E-1	4.04459 E-4	-1.53722 E-7	-2.64523 E+3	0.3081

Materyal	Sıcaklık Limit	a	b	c	d	En üst limit
K ₂ SO ₄	298 to 599 K	1.58125 E-1	1.54102 E-4	-3.18000 E-8	-1.89092 E+3	0.2074
	600 to 856 K	-7.13991 E-1	1.36132 E-3	-3.64171 E-7	9.43877 E+4	0.2331
	857 to 1341 K	-3.72465 E-1	4.47300 E-4	-2.64252 E-10	1.88203 E+5	0.2556
	1342 to 3000 K	2.69999 E-1	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.2643
Na ₂ SO ₄	298 to 521 K	1.38524 E-1	2.59737 E-4	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.2417
	522 to 979 K	2.44072 E-1	9.18685 E-5	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.2879
	980 to 1156 K	2.40087 E-1	9.98029 E-5	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.2997
	1157 to 3500 K	3.32160 E-1	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.3233
CaSO ₄	298 to 1400 K	1.23255 E-1	1.73351 E-4	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.2683
CaSO ₄ +1/2H ₂ O	298 to 1000 K	1.16776 E-1	2.68688 E-4	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.2878
CaSO ₄ +2H ₂ O	298 to 1000 K	1.26844 E-1	4.41399 E-4	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.4078
KCl	298 to 699 K	1.61827 E-1	1.89934 E-5	2.40342 E-8	-4.62219 E+2	0.1747
	700 to 1043 K	4.60282 E-1	-5.38732 E-4	3.19498 E-7	-2.63462 E+4	0.1862
	1044 to 2000 K	2.35949 E-1	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.2138
NaCl	298 to 1073 K	2.29593 E-1	-5.18511 E-5	8.87734 E-8	-1.37371 E+3	0.2350
	1074 to 1499 K	5.09687 E-1	-3.28475 E-4	1.14261 E-7	0.00000 E+0	0.2499
	1500 to 2500 K	2.73785 E-1	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.2606
CaCl ₂	298 to 599 K	1.66077 E-1	6.89417 E-6	2.86392 E-9	-1.02094 E+3	0.1634
	600 to 1044 K	1.95989 E-1	-7.99550 E-5	7.04763 E-8	-1.79242 E+3	0.1708
	1045 to 3000 K	2.20815 E-1	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.2067
CaF ₂	298 to 599 K	3.29378 E-1	-2.80694 E-4	2.60932 E-7	-5.23867 E+3	0.2269
	600 to 1423 K	1.74378 E-1	9.21586 E-5	6.35505 E-9	3.01806 E+3	0.2635
	1424 to 1690 K	3.30558 E-1	3.20184 E-5	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.2855
	1691 to 3500 K	3.05840 E-1	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.2969
C ₃ S	298 to 2600 K	2.18324 E-1	3.77524 E-5	0.00000 E+0	-4.44532 E+3	0.2663
C ₂ S	298 to 969 K	2.02438 E-1	5.65457 E-5	0.00000 E+0	-3.63425 E+3	0.2238
	970 to 1709 K	1.86705 E-1	6.39768 E-5	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.2488
	1710 to 2403 K	2.84470 E-1	8.22990 E-5	0.00000 E+0	0.00000 E+0	0.3156
C ₃ A	298 to 2500 K	2.21910 E-1	2.77202 E-5	0.00000 E+0	-4.36714 E+3	0.2540
C ₄ AF	298 to 2500 K	1.84143 E-1	3.58039 E-5	0.00000 E+0	-1.79020 E+2	0.2335

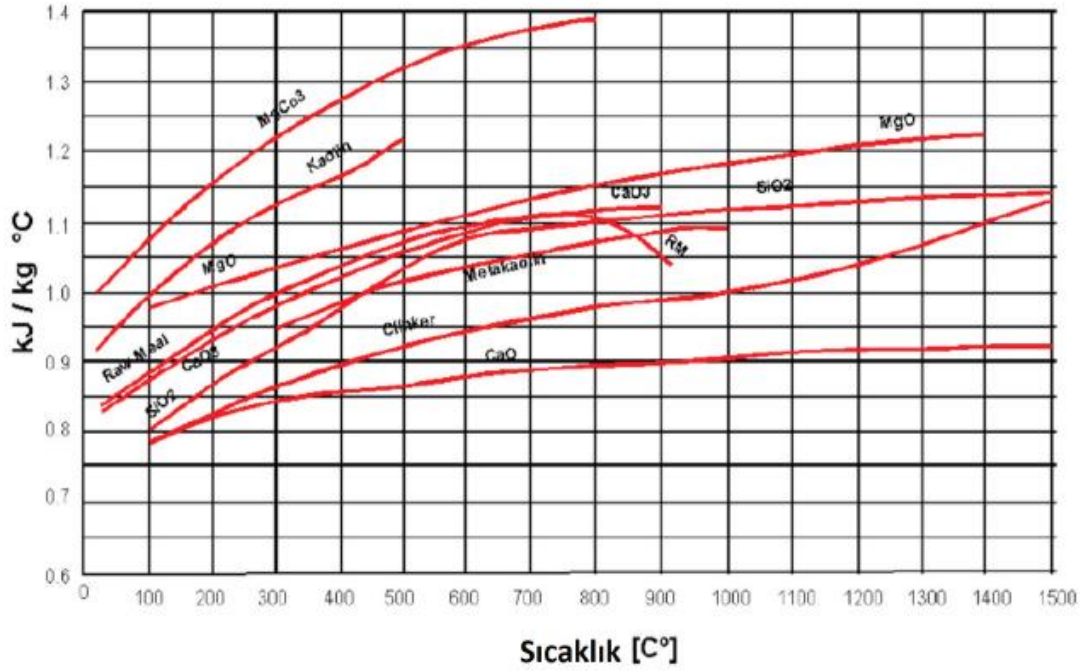
EK 3- HİSSEDİLİR ISI (Q)

Hissedilir ısı, enerji denkliği sınırları içerisindeki bütün gaz, sıvı ve katı fazlar (farin, yakıt, bacagazı, toz kayıpları, yanma havası, soğutma havaları, kaçak hava ve klinker) için aşağıdaki genel formülle hesaplanmaktadır:

$$Q = m \times C_p \times (T - T_{ref}) \quad \text{kJ/kg klinker veya kCal/kg klinker}$$

- m = Spesifik kütle (kg/kg klinker veya Nm³/kg klinker)
 C_p = Ortalama özgül ısı (kJ/kg°C, kJ/Nm³°C, kCal/kg°C, kCal/Nm³°C)
 T = Sıcaklık (°C, K)
 T_{ref} = Referans sıcaklık (Genellikle 20°C)

Önemli bazı katı fazların spesifik ısı katsayıları aşağıdaki şekilde yer alan grafikte verilmektedir. Farin için; yani 60-80 °C aralığı için ortalama 0,214 kCal/kg°C alınabilir.



Klinker özgül ısısı, sıcaklığa bağlı olarak aşağıdaki formül ile de hesaplanabilmektedir:

$$C_{p \text{ klinker}} = 0,1742 + 1,415 \times T \times 10^{-4} - 1,283 \times T^2 \times 10^{-7} + 5,077 \times T^3 \times 10^{-11} \text{ kCal/kg}^\circ\text{C}$$

T= Sıcaklık (°C)

Örnek

1400°C'de klinker özgül ısısının hesaplanması:

T= 1400 °C

$$C_{p \text{ klinker}} = 0,1742 + 1,415 \times 1400 \times 10^{-4} - 1,283 \times 1400^2 \times 10^{-7} + 5,077 \times 1400^3 \times 10^{-11}$$

$$C_{p \text{ klinker}} = 0,260 \text{ kCal/kg}^\circ\text{C}$$

Sıvı (fuel oil) ve katı yakıt (kömür) için Cp değerleri yukarıdaki grafikten yararlanılarak belirlenebilmektedir.

Isı Sığası (Cp) Hesaplanması

t	Sıcaklık	°C
Cp	Özgül Isı Sığası	kJ/kg-K
		K= °C + 273
CO2	0,80 + 0,000461 t	
H2O (buhar)	1,76 + 0,000775 t	
Fırın Çıkış Gazı	0,96 + 0,000209 t	
Farin	0,88 + 0,000293 t	
Klinker	0,76 + 0,000297 t	

t °C	20	100	200	250	300	350
CO ₂	0,809	0,846	0,892	0,915	0,938	0,961
H ₂ O (buhar)	1,776	1,838	1,915	1,954	1,993	2,031
Fırın Çıkış Gazı	0,964	0,981	1,002	1,012	1,023	1,033
Farin	0,886	0,909	0,939			
Klinker	0,766	0,790	0,819			

20- 2000 °C BÖLGESİNDE Cp DEĞERLERİ

Cp mean – reference 0°C

kcal/kg°C	20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C	900°C	1000°C
O ₂	0.2190	0.2206	0.2236	0.2271	0.2306	0.2340	0.2372	0.2401	0.2428	0.2451	0.2473
N ₂	0.2487	0.2485	0.2492	0.2506	0.2525	0.2547	0.2572	0.2597	0.2623	0.2648	0.2671
H ₂	3.4073	3.4304	3.4453	3.4541	3.4610	3.4681	3.4767	3.4872	3.5000	3.5144	3.5308
CO ₂	0.1977	0.2077	0.2183	0.2275	0.2356	0.2428	0.2493	0.2550	0.2602	0.2649	0.2891
CO	0.2489	0.2488	0.2500	0.2519	0.2542	0.2568	0.2644	0.2719	0.2780	0.2834	0.2882
SO ₂	0.1466	0.1522	0.1587	0.1644	0.1695	0.1739	0.1777	0.1810	0.1839	0.1864	0.1886
NO	0.2385	0.2374	0.2383	0.2403	0.2429	0.2456	0.2483	0.2510	0.2536	0.2560	0.2583
H ₂ O	0.4450	0.4471	0.4519	0.4580	0.4648	0.4721	0.4796	0.4873	0.4951	0.5031	0.5111
Air	0.2418	0.2420	0.2433	0.2452	0.2474	0.2499	0.2525	0.2562	0.2578	0.2602	0.2625
SiO ₂	0.1703	0.1868	0.2025	0.2154	0.2267	0.2372	0.2455	0.2491	0.2524	0.2557	0.2586
Al ₂ O ₃	0.1768	0.1962	0.2137	0.2286	0.2366	0.2444	0.2509	0.2563	0.2609	0.2650	0.2687
Fe ₂ O ₃	0.1497	0.1620	0.1729	0.1347	0.1066	0.0923	0.1093	0.1286	0.1401	0.1480	0.1544
CaCO ₃	0.1870	0.2057	0.2212	0.2322	0.2407	0.2476	0.2536	0.2589	0.2637	0.2681	
Raw	0.1835	0.2018	0.2172	0.2277	0.2359	0.2431	0.2496	0.2549	0.2596	0.2639	
Slag	0.211	0.211									
CaO	0.1749	0.1850	0.1932	0.1989	0.2032	0.2057	0.2096	0.2121	0.2143	0.2162	0.2180
C ₃ S	0.1735	0.1869	0.1980	0.2059	0.2120	0.2170	0.2213	0.2251	0.2286	0.2318	0.2347
C ₂ S	0.1731	0.1851	0.1954	0.2032	0.2094	0.2148	0.2196	0.2240	0.2275	0.2309	0.2344
C ₃ A	0.1752	0.1880	0.1985	0.2057	0.2113	0.2157	0.2195	0.2228	0.2257	0.2283	0.2308
C ₄ AF	0.1920	0.1940	0.1961	0.1982	0.2001	0.2020	0.203	0.2058	0.2076	0.2095	0.2113
Clinker	0.1780	0.1881	0.1985	0.2069	0.2137	0.2190	0.2233	0.2289	0.2302	0.2334	0.2370

kcal/kg°C	1100°C	1200°C	1300°C	1400°C	1500°C	1600°C	1700°C	1800°C	1900°C	2000°C
O ₂	0.2493	0.2511	0.2528	0.2545	0.2560	0.2574	0.2588	0.2602	0.2614	0.2627
N ₂	0.2694	0.2715	0.2735	0.2754	0.2772	0.2789	0.2805	0.2820	0.2834	0.2847
H ₂	3.5490	3.5685	3.5892	3.6107	3.6327	3.6549	3.6772	3.6994	3.7213	3.7430
CO ₂	0.2729	0.2764	0.2795	0.2825	0.2852	0.2876	0.2899	0.2920	0.2940	0.2958
CO	0.2927	0.2969	0.3011	0.3051	0.3091	0.3130	0.3170	0.3209	0.3249	0.3261
SO ₂	0.1906	0.1924	0.1939	0.1954	0.1967	0.1979	0.1900	0.2000	0.2010	0.2019
NO	0.2604	0.2623	0.2641	0.2668	0.2673	0.2687	0.2701	0.2713	0.2724	0.2735
H ₂ O	0.5191	0.5269	0.5346	0.5420	0.5492	0.5562	0.5629	0.5694	0.5757	0.5817
Air	0.2647	0.2668	0.2687	0.2706	0.2723	0.2739	0.2755	0.2770	0.2783	0.2796
SiO ₂	0.2611	0.2634	0.2655	0.2673	0.2690	0.2706	0.2720	0.2605	0.2469	0.2348
Al ₂ O ₃	0.2720	0.2749	0.2777	0.2802	0.2826	0.2847	0.2867	0.2886	0.2904	0.2921
Fe ₂ O ₃	0.1597	0.1643	0.1682	0.1717	0.1748	0.1776	0.1801	0.1825	0.1847	0.1868
CaO	0.2197	0.2212	0.2227	0.2241	0.2254	0.2267	0.2279	0.2291	0.2303	0.2314
C ₃ S	0.2375	0.2402	0.2428	0.2453	0.2478	0.2502	0.2525	0.2548	0.2570	0.2592
C ₂ S	0.2377	0.2411	0.2444	0.2477	0.2505	0.2536	0.2567	0.2596	0.2625	0.2651
C ₃ A	0.2331	0.2353	0.2373	0.2393	0.2413	0.2431	0.2449	0.2467	0.2485	0.2502
C ₄ AF	0.2131	0.2150	0.2168	0.2186	0.2204	0.2222	0.2240	0.2258	0.2276	0.2294
Clinker	0.2412	0.2464	0.2529	0.2610	0.2711	0.2836	0.2987	0.3167	0.3382	0.3632

Çizelge 17.13: Bazı katıların değişik sıcaklıklarda özgül ısıları

°C	Klinker	CaCO ₃	CaO	MgCO ₃	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Kaolin	Metakaolin
20	0.174	0.19	0.18	0.23	0.21	0.17	0.19	0.15	0.21	0.18
100	0.186	0.20	0.19	0.25	0.23	0.19	-	-	0.23	0.20
200	0.197	0.21	0.20	0.27	-	0.20	0.21	0.17	0.25	0.21
300	0.206	0.22	0.20	0.29	0.24	0.22	-	-	0.26	0.22
400	0.214	0.23	0.21	0.30	-	0.22	0.24	0.19	0.27	0.23
500	0.219	0.24	0.21	0.31	0.26	0.24	-	-	0.28	0.24
600	0.224	0.24	0.22	0.32	-	0.25	0.25	0.20	-	0.24
700	0.228	0.25	0.22	-	0.26	-	-	-	-	0.25
800	0.232	0.25	0.23	-	-	0.25	0.27	0.21	-	0.25
900	0.234	0.26	0.23	-	0.28	-	-	-	-	0.26
1.000	0.237	0.26	0.23	-	-	0.26	0.28	0.22	-	0.26
1.100	0.241	-	0.23	-	0.28	-	-	-	-	0.26
1.200	0.247	-	-	-	-	0.27	0.29	0.23	-	0.27
1.300	0.253	-	-	-	-	-	-	-	-	0.27
1.400	0.261	-	-	-	-	0.28	0.30	0.24	-	0.27
1.500	0.268	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Çizelge 17.14: Gazların değişik sıcaklıklarda özgül ısıları

°C	O ₂	N ₂	Hava	CO	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
20	0.218	0.248	0.240	0.249	0.198	0.435	0.143
100	0.220	0.248	0.240	0.249	0.211	0.447	0.147
200	0.223	0.249	0.242	0.250	0.221	0.452	0.150
300	0.227	0.250	0.243	0.252	0.230	0.457	0.154
400	0.230	0.252	0.246	0.254	0.238	0.463	0.157
500	0.234	0.254	0.248	0.257	0.246	0.471	0.161
600	0.237	0.256	0.250	0.259	0.252	0.478	0.164
700	0.240	0.258	0.253	0.262	0.258	0.486	0.167
800	0.243	0.261	0.256	0.265	0.263	0.495	0.170
900	0.245	0.264	0.258	0.268	0.268	0.502	0.173
1.000	0.247	0.266	0.260	0.270	0.271	0.512	-
1.100	0.249	0.268	0.263	0.273	0.275	0.519	-
1.200	0.251	0.271	0.265	0.275	0.278	0.527	-
1.300	0.253	0.272	0.267	0.277	0.281	0.532	-
1.400	0.255	0.275	0.269	0.278	0.284	0.542	-
1.500	0.256	0.276	0.271	0.280	0.286	0.547	-
1.600	0.258	0.278	0.272	0.282	0.289	0.553	-
1.700	0.258	0.280	0.273	0.283	0.291	0.561	-
1.800	0.260	0.281	0.274	0.285	0.293	0.567	-
1.900	0.262	0.282	0.276	0.286	0.294	0.573	-
2.000	0.263	0.284	0.277	0.287	0.296	0.578	-

KAYNAKLAR:

- 1) FLS, 2001, Comminution Manuel
- 2) PCA, 2011, Innovations in Portland Cement Manufacturing, Volume 1, 160, p 605-639
- 3) Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Öğütme Simülasyonu Eğitim Notları
- 4) Bursa Çimento Bilyalı Değirmen Performans Verileri
- 5) Çimento Endüstrisinde Kullanılan Öğütme ve Separasyon Teknolojileri
- 6) Holderbank, Cement Seminar Process Technology – Comminution Engineering
- 7) Yıldız N., 2012, Çimento Üretimi, Ankara, VI.93 – XV.309, 358 p
- 8) Shabana N., 2010, Cemeny Industry Cement Mill Notebook, Katar Ulusal Çimento Şirketi, web sitesi: <https://www.slideshare.net/na2ell/cement-mill-notebook>
- 9) Kuleli Ö., 2009, Çimento Mühendisliği El Kitabı, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, 4-1 – 4-32
- 10) Benzer, H., 2007. Çimento Öğütme Devrelerinde Bazı İşlem Değişkenlerinin Performans Üzerine Etkileri, 6. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, Ed: M. Kemal, T. Batar, E. Kaya ve A. Seyrankaya, İzmir, p 133-143
- 11) Hosseinzadehgharehgheshlagh H., 2014, Bilyalı Değirmenlerde Ölçek Büyütme Üzerine Bir İnceleme, 271 p
- 12) TÇMB, 2017, Çimento Fabrikaları İçin Tipik Proses Referans Değerleri Kılavuzu, 9 p
- 13) Dökme F., Güven O., 2014, Bilyalı Değirmenlerde Hızın Performansa Olan Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Mühendis ve Makine, Cilt 55, Sayı 657, p 38-50
- 14) Cemex Mexico, 2009, Handbook, Chapter IV
- 15) Lafarge, 2009, Process Knowledge for Non Process Engineers
- 16) Italcementi Group, 2005, PIC Grinding
- 17) Alsop P. A., 2001, Cement Plant Operations Handbook for Dry Process Plants, 3rd Edition, International Cement Review, web sitesi: <https://tr.scribd.com/doc/125453692/Cement-Plant-Operation-Handbook-pdf>, 317 p
- 18) Lafarge Eğitim Notları
- 19) Labahn O., 1965, Cement Engineers Handbook, p 239-265
- 20) Duda W., 1985, Cement Data Book, Vol. 1, 3rd Edition, p 121-228
- 21) Öner M., 2000, Air Separation, Hacettepe University