

KM 482
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ LABORATUVARI III

BOYUT KÜÇÜLTME ve ELEK ANALİZİ

AMAÇ

Katı maddelerin farklı yöntemlerle parçacık boyutlarının küçültülmesi işlemi önem arz eden bir temel işlemdir.

Bu amaç doğrultusunda kullanılabilecek donanımlardan birisi olan bilyalı değirmenin deneysel ve teorik gücü ile elde edilen ürünün boyut dağılımı elek analizi yöntemleri vasıtasıyla belirlenecektir.

TEORİK BİLGİLER

Taş, cevher veya kömür gibi katı taneciklerin; kaba kırma, ince kırma ve öğütme gibi işlemlere maruz bırakılması suretiyle boyutlarının küçültülmesi, diğer bir ifadeyle partikül yüzeylerinin arttırılması işlemine **ufalama** denir.

Bu işlem sayesinde, katıların reaktivitesi artarken istenmeyen unsurların mekanik olarak uzaklaştırılması sağlanır.

Ufalamanın mümkün olabilmesi cisimleri bir arada tutan kuvvetlerin yenecek ölçüde dış kuvvetlerin uygulanmasına bağlıdır.

Kırma ve öğütme katı taneciklerin daha küçük parçalara ayrılmasını sağlayan işlemlerdir.

Katı tanecikler esas olarak 4 yolla daha küçük boyutlu parçalara ayrılabilirler:

- **Sıkıştırma** (genellikle iri ve sert katılar için uygun olup, ince taneli ürün az olur)
Fındık kıracağı
- **Darbe** (iri, orta ve ince taneli ürün elde edilir)
Çekiç
- **Sürtme** (viskoz ve sert olmayan maddeler için uygun olup, ince taneli ürün alınır)
Zımpara
- **Kesme** (ince taneli ürün ya çok az ya da hiç elde edilemez)
Makas

Kırıcı ve Öğütücülerin Temel Özellikleri

- Kapasite büyük olmalı
- Birim miktar ürün için gerekli güç miktarı az olmalı
- İstenilen boyut dağılımında ürün elde edilebilmeli

Ufalamanın Amaçları

- Taneleri zenginleştirebilmek için tanelerin belli bir boyutta olması gerekir. Bu boyut serbestleşme boyutudur. Ufalamadaki amaç, cevher içerisindeki mineralleri serbest hale getirmektir. Serbest hale gelen mineraller daha sonra cevher zenginleştirme yöntemleri ile birbirinden ayrılabilir.
- Özellikle kimyasal zenginleştirme işlemlerinde, yüzey alanının mümkün olduğunca büyük olması istenir. Yüzey alanı arttıkça değerli mineraller daha kolay çözünür ve zenginleştirme verimi artar. Örneğin siyanür ile altının çözünebilmesi için altın cevheri -38 mikrona öğütülür.
- Özellikle özgül ağırlık farkı ile zenginleştirme papan cihazlarda, tanelerin belli bir büyüklükte ve şekilde olması istenir. Bu büyüklük ve şekildeki taneleri elde etmek için kırma ve öğütme yapılır.
- Belli boyuta kırılmış, yada öğütülmüş maddelerin taşınması daha kolay olur.

Ufalama işlemlerinin tümüne de “**kırma**” ve “**öğütme**” denir.

Kırma ve öğütme arasındaki fark, **kırmada elde edilen ürünün öğütmeye nazaran daha iri** olmasıdır.

Genel olarak: **25 mm’nin üstünde yapılan boyut küçültme işlemine kırma**, **25 mm’nin altında yapılan boyut küçültme işlemine öğütme** denir.

Elde edilecek ürünün boyutuna göre boyut küçültme ya da ufalama işlemi genel olarak 4 ana başlık altında sınıflandırılabilir:

Boyut Küçültme İşlemi	Tanecik Boyutu (cm)	Boyut Küçültme Cihazı
İri Kırma (Primer Kırma)	100-10	Çeneli Kırıcı
İnce Kırma (Sekonder Kırma)	10-1	Konili/Darbeli/Merdaneli Kırıcı
İri Öğütme (Primer Öğütme)	1-0,01	Çubuklu/Halkalı/Diskli Değirmen
İnce Öğütme (Sekonder Öğütme)	$\leq 0,01$	Bilyalı Değirmen

Boyut küçültme oranı (ufalama oranı), kırma işleminin bir göstergesi olup, **kırılacak malzemenin en büyük tane iriliğinin, ufalanan malzemenin en büyük tane iriliğine oranı** olarak adlandırılmaktadır. Kırıcı tipine göre değişim gösterir.

Boyut küçültme oranı, kırıcı seçiminde göz önünde bulundurulması gereken en önemli faktörlerden birisi olup, ufalanan malzemenin tane iriliğine ve kırıcı özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.

Öğütme, prosesin akışına ve cevherin durumuna göre “**Yaş**” ya da “**Kuru**” olarak yapılabilmektedir. Cevherin ıslatılması sakıncalı ise kuru öğütme seçilir.

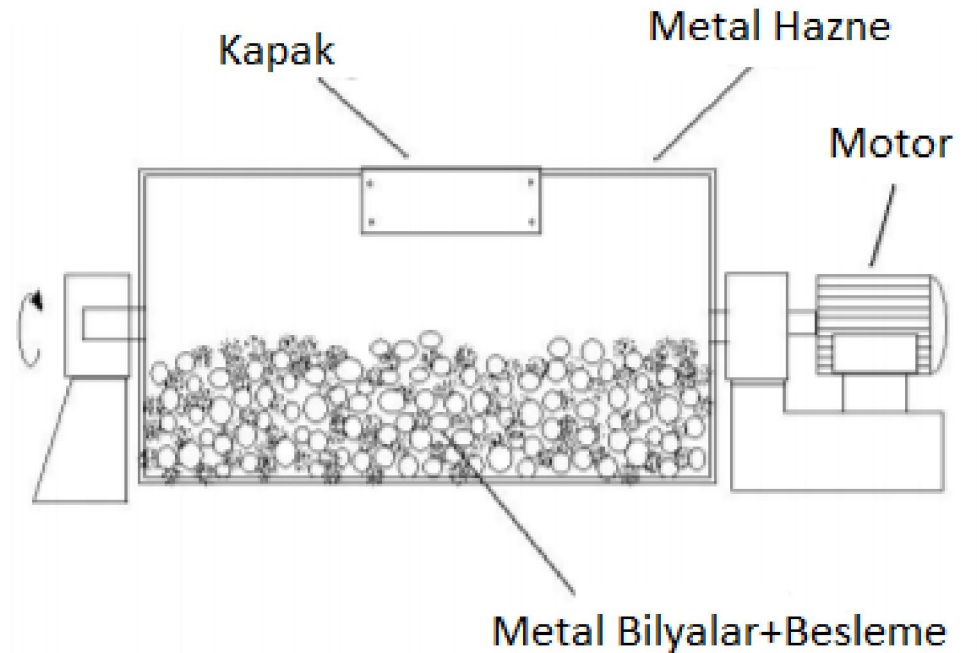
Kuru öğütme: çimento, kömür, fosfat kalsit ve bentonit öğütme için endüstriyel ölçekte kullanılmaktadır.

Yaş Öğütme: Altın, bakır, krom cevherleri, seramik hammaddeleri gibi uygulamalarda ise cevher yaş olarak öğütülür. Çünkü elde edilen öğütülmüş ürün, genellikle yaş bir yöntemle zenginleştirilir.

- Kuru öğütme, yaş öğütmeye göre daha çok güç tüketir (yaklaşık %30).
- Kuru öğütmede birim kapasite yaş öğütmeye göre daha düşüktür.
- Kuru öğütmede, öğünmüş malzemenin sınıflandırılması daha zordur.
- Kuru öğütmede değirmen gövdesi aşırı ısınır, dolayısıyla yüksek hızlarda çalıştırılmazlar.
- Yaş öğütmede klasifikatör ve eleme ile daha kesin ayırma yapılabilir.
- Kuru öğütmede, bilya şarjı (%35-45) yaş öğütmeye göre (%40-50) daha azdır.
- Kuru öğütmede, aşınmalar daha azdır. Yaş öğütmede bilyalar suyun etkisi ile okside olur (paslanır) ve daha kolay aşınır.

BİLYALI DEĞİRMENLER

- Öğütme ortamı çelik bilyalardan oluşan değirmenlere “bilyalı değirmen” denir. Genellikle öğütmenin son kademesinde kullanılır.
- Değirmen haznesi, porselen, seramik veya benzeri sert bir metalden imal edilebilir.
- Bilyalar ise seramik, porselen, çakmaktaşı veya paslanmaz çelikten yapılmış olabilir. Hazne bir motor vasıtası ile döndürüldüğünde, bilyalar yuvarlanarak tozlar üzerine düşmekte ve arada sıkışan tozlar ezilerek partikül çapları küçülmektedir.



- Çubuklu değirmenlere göre daha ince ürün veren bu değirmenlerde boyun çapa oranı 1 ile 1,5 arasında değişmektedir.
- Genel olarak ince öğütmelerde değirmenin boyu daha uzundur.
- Değirmen **boyunun çapa oranı 3 ile 5** arasında ise “**tüp değirmen**” olarak adlandırılır. Tüp değirmenler değişik beslemelere sahip kompartımanlara bölünmüştür ve genellikle **klinker gibi kuru öğütmelerde** kullanılmaktadır.
- Öğütücü ortam çelik bilya yerine **çakmak taşı veya seramik çakıllardan** oluştuğu zaman, buna “**çakıllı değirmen**” adı verilir.
- Bilyalı değirmenlerde öğütme, bilyaların cevher taneleri ile noktasal teması sonucunda gerçekleşmektedir.
- Yeterli süre verilmesi durumunda bu değirmenler ile istenilen incelikte ürün alınabilmektedir.
- Bu yüzden bilyalı değirmenler ile **50 mikronun altına** öğütme yapmak mümkündür.
- Bilyalı değirmenlerin **ekonomik öğütme sınırları 100 μm** ’ ye kadardır. Bu sınırların altına inildiğinde bilyalı değirmenlerin spesifik enerjileri üstel olarak artış gösterir.

Genel Uygulamalara Yönelik Yaklaşık

Bilya Boyutu-Tane Boyutu İlişkisi

(Bilya boyutu maksimum tane boyutundan biraz büyük olmalı)

Öğütme Tipi	En Büyük Bilya Boyutu (mm)	Öğütülen Malzemenin Boyutu d80 (mm)	Bilyalı Değirmen Boy/Çap oranı
<i>İri Öğütme</i>	50-100 mm (5-10 cm)	5-10 mm (10'da 1 oran)	1.0 / 1.0
<i>İnce Öğütme</i>	40-50 mm (4-5 cm)	1-4 mm	1.5 / 1.0
<i>Çok İnce Öğütme</i>	20-30 mm (1-2 cm)	<1 mm (20'de 1 oran)	2.0 / 1.0 (ince öğütmede boy uzar)

Boyut Küçültme için Gerekli Güç Hesabı

- Kırma ve öğütme işlemlerinin temeli büyük taneli katılardan, küçük tane boyutlu katıların eldesidir.
- Küçük taneli parçacıklar **yüzey alanları büyük olacağı** için ya da **şekil, büyüklük ve sayılarından** dolayı istenebilir.
- Boyut küçültme işleminin **enerji açısından verimliliği boyuttaki ufalmaya karşılık elde edilen yeni yüzey** miktarıyla ölçülür.
- Gerçek kırıcı ve öğütücüler tek düze boyutta ürün veremezler, belli bir boyut aralığında ürün elde edilir.
- Boyut küçültmede gerekli güç hesabı için çeşitli teoriler ortaya atılmıştır. Ancak bunların hiçbiri pratik sonuçlara yeterince uymamaktadır.
- Güç hesabı için Rittinger, Kick ve Bond tarafından teoriler önerilmiştir.

- Geliştirilen teoriler **“X” boyutundaki bir tanecikte dx’lik bir değişim yapabilmek için gerekli “E” enerjisinin X boyutunun üssüyle orantılı** olduğunu varsaymaktadır.

$$\frac{dE}{dX} = -\frac{C}{X^n}$$

X: Tanecik boyutu, mm

C, n : Sabitler (maddenin boyutuna, cinsine ve makinanın tipine bağlı)

Rittinger Teorisi: Gerekli gücün oluşan yeni yüzeyle orantılı olduğunu ileri sürmektedir. Alan, uzunluğun karesiyle orantılı olduğu için bu varsayıma göre n=2 olmaktadır. Buna göre yukarıdaki ifade integre edilirse:

$$E = K_R \left(\frac{1}{X_2} - \frac{1}{X_1} \right)$$

K_R : Sabit, X_2 : Ürünün ortalama çapı, X_1 : Beslemenin ortalama çapı

E: Birim miktar besleme boyutunun X_1 'den X_2 'ye indirmek için gerekli iş.

Bu ifadenin genelde küçük tanecikleri öğütme işlemleri için daha doğru sonuç verdiği gözlenmiştir.

Kick Teorisi: Öğütmede gerekli enerjinin doğrudan boyut ufaltma oranı ile orantılı olduğunu öne sürmüştür. Bu durumda ise $n=1$ olacak ve integrasyon sonucu ifade:

$$E = C \ln \left(\frac{X_1}{X_2} \right) = K_K \log \left(\frac{X_1}{X_2} \right)$$

K_K : Sabit,

E: Birim miktar besleme boyutunun X_1 'den X_2 'ye indirmek için gerekli iş.

Bu ifadenin genelde küçük tanecikleri öğütme işlemleri için daha doğru sonuç verdiği gözlenmiştir.

Bond Teorisi: Gerekli işin ürünün yüzey alanı/hacim oranının karekökü ile orantılı olduğu kabul edilmektedir. Bu durumda ise $n=1,5$ olacak ve integre edilmiş ifade:

$$E = K_B \frac{1}{\sqrt{X_2}}$$

- Bu teoriye göre boyut küçültme için gerekli enerji, boyut küçültme birimine beslenen cevherin %80'inin geçtiği boyut ve birimden çıkan ürünün %80'inin geçtiği boyutun terslerinin karekökleri ile orantılıdır.
- Bond öne sürdüğü eşitliği kullanabilmek için **E_i/W_i çalışma ya da iş indeksini** önermiştir.
- Bu indeks malzemelerin kırılma ve öğütülmeye karşı olan direncini ifade eden bir öğütme parametresidir.

E_i : Birim ağırlıktaki iri taneleri **100 μm elekte %80'i geçecek şekilde öğütmek için gerekli kWh/ton cinsinden enerjidir.**

İngiliz birim sisteminde Bond eşitliği aşağıdaki nihai şekle dönüşmektedir:

$$\frac{P}{T} = 1,46E_i \left(\frac{1}{\sqrt{D_P}} - \frac{1}{\sqrt{D_F}} \right)$$

P: Güç, hP,

T: Besleme hızı, ton/dak,

D_F : Beslemenin çapı, ft,

D_P : Ürünün çapı, ft

Bazı Minerallerin Çalışma İndeksi Değerleri

Cevher/kayaç/mineral	W _i , (kwh/t)	Cevher/kayaç/mineral	W _i , (kwh/t)
Altın Cevheri	14,83	Kireçtaşı	11,61
Andezit	22,13	Kömür	11,37
Bakır Cevheri	13,13	Krom Cevheri	9,60
Barit	6,24	Kumtaşı	11,53
Boksit	9,45	Kurşun - Çinko Cevheri	11,35
Çakıl	25,17	Kurşun Cevheri	11,40
Demir cürufu	12,16	Kuvars	12,77
Dolomit	11,31	Kuvarsit	12,18
Feldspat	11,67	Manyetit	10,21
Fosfat Kayası	10,13	Molibden Cevheri	12,97
Gabro	18,45	Nikel Cevheri	11,88
Galen	10,19	Pirit Cevheri	8,90
Gnays	20,13	Pirotin Cevheri	9,57
Granit	14,39	Siyenit	14,90
Hematit	12,68	Takonit	14,87
Kil	7,10	Uranyum Cevheri	17,93

ELEK ANALİZİ

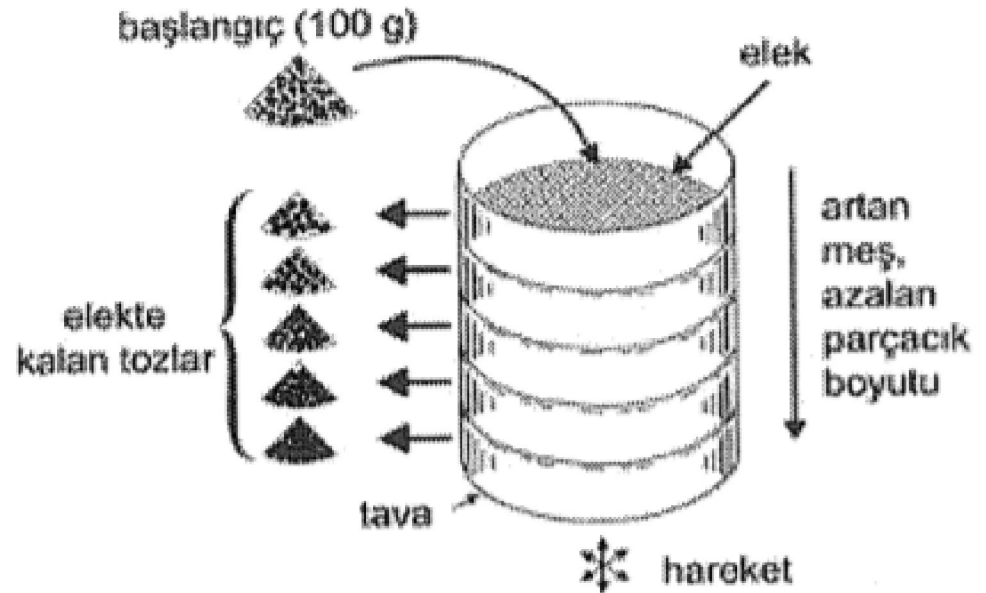
- Eleme, tanelerin belirli büyüklükteki delik veya açıklıklardan geçebilme veya geçememe özelliğine dayanarak yapılan bir boyuta göre sınıflandırma işlemidir.
- Elek analizi ya da elek çözümlemesi ise, farklı büyüklükteki tanelerden oluşan kırılmış ve/veya öğütülmüş malzemenin “**Boyut Dağılımı**”nı belirlemek için yapılmaktadır.

Boyut Dağılımının Faydaları

- ❖ Boyut küçültme işlemlerinin kontrolü
- ❖ Minerallerin tane boyutuna bağlı serbestleşme derecelerinin ve ortalama tane boyutunun belirlenmesi
- ❖ Boyut küçültme cihazlarının karşılaştırılması
- ❖ Cevherlerin kırılgenlik ve ufalanabilirlik derecelerinin tespiti
- ❖ Malzemelerin boyuta bağılı tenörlerinin eldesi

Elek Analizinin Uygulanışı

- Elekler en altta kap/tava olacak şekilde elek açıklık boyutuna göre küçük elek boyutundan
- büyüğe doğru aşağıdan yukarıya doğru sıralanır.
- Hazırlanan elek seti, elek sarsma makinesine yerleştirilir.
- Elek setinin en üstündeki eleğe miktarı bilinen toz numune dökülür.
- Elek setinin kapakları kapatılarak vidaları sıkılır.
- Elek sarsma makinesi uygun süre ve titreşimde çalıştırılır.
- Eleme işlemi sonucunda elek seti sarsma makinesinden alınarak, her elek üzerinde kalan toz miktarı kaydedilir.



- Elek analizinde 2 yöntem mevcuttur: **Türevsel Elek Analizi, Kümülatif Elek Analizi**

Türevsel Elek Analizi: Elek analizi ile tanecik büyüklüğünü tanımlarken taneciğin en son geçtiği elek büyüklükleri verilmelidir.

Örnek: 14/20: 14 No'lu elekten geçip 20 No'lu eleğin üzerinde kaldığını ifade eder.

Mesh	$\Delta\Phi_n$	D_{Pn} (cm)	Mesh	$\Delta\Phi_n$	D_{Pn} (cm)
4/6	0,0251	0,3327	35/48	0,0102	0,0295
6/8	0,125	0,2362	48/65	0,0077	0,0208
8/10	0,3207	0,1651	65/100	0,0058	0,0147
10/14	0,257	0,1168	100/150	0,0041	0,0104
14/20	0,159	0,0833	150/200	0,0031	0,0074
20/28	0,0538	0,0589	Kapta	0,0075	
28/35	0,021	0,0417			

$\Delta\Phi_n$: n numaralı elekte kalan madde kütle kesri

D_{Pn} : n numaralı elek açıklığına eşit olan çap

Kümülatif Elek Analizi: Türevsel elek analizinden yararlanılarak bulunur.

Her bir elekte kalan madde miktarları en büyük elekten başlayarak birbiri üzerine ilave edilir.

Bu toplam değerler toplamın alındığı son mesh değerine karşılık tablo halinde sunulur.

$$\Phi = \Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2 + \dots \dots \dots = \sum_{1}^n \Delta\Phi_n$$

Bu analiz Φ ile D_p (elek n'nin delik büyüklüğü) arasındaki ilişkiyi verir. Φ miktarı D_p 'den daha büyük çapta olan katı taneciklerin miktarını tanımlamaktadır. Örneğin tümü için 1'e eşit olacaktır.

Mesh	D_{pn} (cm)	Φ	Mesh	D_{pn} (cm)	Φ
4	0,4699	0,00	35	0,0417	0,9616
6	0,3327	0,0251	48	0,0295	0,9718
8	0,2362	0,1501	65	0,0208	0,9795
10	0,1651	0,4708	100	0,0147	0,9853
14	0,1168	0,7278	150	0,0104	0,9894
20	0,0833	0,8868	200	0,0074	0,9925
28	0,0589	0,9406	Kapta	-	1,0000

Mesh-Mikron İlişkisi

<u>Mesh</u>	<u>Microns</u>	<u>MM</u>
10	2000	2,00
12	1680	1,68
14	1410	1,41
16	1190	1,19
18	1000	1,00
20	840	0,84
25	710	0,71
30	590	0,59
35	500	0,50
40	420	0,42
45	350	0,35
50	297	0,30
60	250	0,25
70	210	0,210
80	177	0,177
100	149	0,149
120	125	0,125
140	105	0,105
170	88	0,088
200	74	0,074
230	62	0,062
270	53	0,053
325	44	0,044
400	37	0,037
500	31	0,031

DENEY DÜZENEGİ



Bilyalı Değirmen



Elek Sarsma Cihazı

DENEYİN YAPILIŐI

- Bu deneyde boyutları 12,5 mm, 19,0 mm, ve 25,0 mm olan bilyalardan seçilerek deėirmene koyulur.
- Deėirmene k    r y    lenmeden watt-metre yardımıyla 1 devir için gerekli süre kaydedilir.
- 3,15/2 mm boyutlu k    r tartılarak deėirmene beslenir.
- Boyut küçültme işlemi devam ederken watt-metre'den 1 devir için gerekli süre belirlenerek kaydedilir. Bu işlem 6-10 tur için tekrarlanır ve ortalama değer dikkate alınır.



- Elek analizi için, en altında kap bulunan elek açıklıkları birbirinden farklı 5 adet elek (2, 1, 0,5, 0,25, 0,125) elek sarsma cihazına yerleştirilir.



- Değirmenden alınan numune en üsteki eleğin üzerine dökülür ve kapak kapatılır.
- Eleme işleminden sonra her elekteki numune miktarı tartılarak kaydedilir.

HESAPLAMALAR

- Değirmenin deneysel ve teorik gücü hesaplanır.
- Ürünün boyut dağılımı türevsel ve kümülatif elek analizine göre çizelge halinde verilir.
- Türevsel ve kümülatif elek analizlerinden faydalanarak ürünün tanecik sayısı, özgül yüzey alanı ve hacim-yüzey ortalama çapı belirlenir

DENEYSEL VERİLER

Numune Miktarı = 100 g Besleme Boyutu = 3,15/2 mm

Elektrik Sayacı için ; 1kWh=675 devir

Elektrik Sayacına İlişkin Veriler

Devir Sayısı	Devir Süresi (dakika)
Birinci tur boş devir süresi	2,42
İkinci tur boş devir süresi	2,45

Devir Sayısı	Devir Süresi (dakika)
Birinci tur dolu devir süresi	2,30
İkinci tur dolu devir süresi	2,37
Üçüncü tur dolu devir süresi	2,38
Dördüncü tur dolu devir süresi	2,38
Beşinci tur dolu devir süresi	2,40
Altıncı tur dolu devir süresi	2,40

Elek Verileri

Elek Numarası	Elek Çapı (mm)	Toplanan miktar (g)
1	2	48,2
2	1	30,9
3	0.500	12,2
4	0.25	5,1
5	0.125	2,6
Kap	-	1,0
Toplam		100