

**ÖĞÜTME YARDIMCILARININ ÇİMENTO ÖĞÜTME
DEVRESİ PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİNİN
MODELLENMESİ ve SİMÜLASYONU**

**MODELLING AND SIMULATION OF THE GRINDING
AIDS EFFECT ON CEMENT GRINDING CIRCUIT
PERFORMANCE**

NURETTİN ALPER TOPRAK

PROF.DR. A. HAKAN BENZER

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır

2015

NURETTİN ALPER TOPRAK'ın hazırladığı “**Öğütme Yardımcılarının Çimento Öğütme Devresi Performansı Üzerine Etkilerinin Modellenmesi ve Simülasyonu**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Yaşar UÇBAŞ

Başkan

.....

Prof. Dr. A. Hakan BENZER

Danışman

.....

Prof. Dr. Volkan BOZKURT

Üye

.....

Prof. Dr. İsmail GİRGİN

Üye

.....

Doç. Dr. Abdullah OBUT

Üye

.....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **DOKTORA TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

10 / 07 / 2015

imza

NURETTİN ALPER TOPRAK

ÖZET

Öğütme Yardımcılarının Çimento Öğütme Devresi Performansı Üzerine Etkilerinin Modellenmesi ve Simülasyonu

Nurettin Alper TOPRAK

Doktora, Maden Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. A. Hakan BENZER

Temmuz 2015, 131 sayfa

Bu çalışmada, çimento endüstrisinde ticari olarak kullanılan öğütme yardımcılarının, bir çimento öğütme devresinde yer alan bilyalı değirmen ve havalı sınıflandırıcının model parametreleri üzerine etkileri incelenmiştir.

Çalışma kapsamında, öğütme yardımcılarını kullanılmadan ve farklı miktarlarda öğütme yardımcılarını kullanarak dört farklı dönemde endüstriyel testler yapılmıştır. Aynı dönem içinde yapılan testler, öğütme yardımcısının kullanıldığı ve kullanılmadığı, her koşul için aynı ürün inceliğinde üretim yapılırken gerçekleştirilmiştir. Testler sırasında devre etrafından alınan örneklerin tane boyu dağılımları belirlenerek madde denkliği çalışmaları yürütülmüştür. Daha sonra havalı sınıflandırıcı ve bilyalı değirmen modelleri oluşturulmuştur. Öğütme yardımcılarının etki mekanizmalarının daha iyi anlaşılabilmesi için laboratuvar ölçekli akışkanlık, öğütme ve havalı sınıflandırıcı testleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmalar sonucunda, öğütme yardımcılarının, malzemelerin öğütülebilme karakteristiğini değiştirmede, ancak ince tanelerin değirmen astar ve bilya yüzeylerine sıvanmasını ve topaklanmasını engelleyerek öğütme verimini arttırdığı anlaşılmıştır. Öğütme yardımcılarının kullanılmasıyla, çimentonun akışkanlığının arttığı, havalı sınıflandırıcının ayırım keskinliğinin değişmediği; fakat kaçak yüzdesinin % 6'ya kadar düşürülerek daha verimli çalıştığı ve öğütme devresinin birim zamanda aynı incelikte daha fazla üretim yapabildiği ve çimento öğütme devresinin özgül enerji tüketiminin %19 azaldığı

görülmüştür. Test edilen her bir öğütme yardımcısının, kullanılan dozajlarına bağlı olarak sınıflandırıcı ve değirmen model parametrelerine etkileri belirlenerek, öğütme yardımcısının da dâhil edildiği bir öğütme devresi modeli oluşturularak farklı simülasyonlar yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Öğütme yardımcısı, çimento öğütme, sınıflandırma

ABSTRACT

MODELLING AND SIMULATION OF THE GRINDING AIDS EFFECT ON CEMENT GRINDING CIRCUIT PERFORMANCE

Nurettin Alper TOPRAK

Doctor of Philosophy, Department of Mining Engineering

Supervisor: Prof. Dr. A. Hakan BENZER

July 2015, 131 pages

This study aims at, investigating the effects of the commercially available grinding aids on the model parameters of cement ball mill and air classifier running on the grinding circuit.

Within the content of this study, industrial tests were performed on four different periods using grinding aids in various dosages and without grinding aid. During the tests carried out in the same period, the circuit produced the same product fineness for each condition. Particle size distribution of the samples collected around the circuit was determined. As a result of mass balancing studies, the flow rates for all streams were calculated and modeling studies were carried out for air classifier and ball mill. For a better understanding of the mechanism of action of the grinding aids, laboratory scale fluidity, grinding and air classifier tests were performed.

Results show that, grinding aids did not affect the grindability characteristics of cement; however, grinding aids increased the grinding efficiency by preventing the agglomeration of fine particles and by preventing the coating of mill liners and ball surfaces by fine particles. Although sharpness of air classifier was not affected by grinding aids, air classifier worked more efficiently due to the reduction of the amount of bypass 6% and the throughput of the grinding circuit was increased at the same product quality. Therefore, it was possible to reduce specific energy consumption of the grinding circuit %19. The model parameters of ball mill and air classifier was determined, depending on grinding aid dosage

A grinding circuit model including the effects of grinding aid dosage has been establish and various simulations has been carried out.

Keywords: Grinding aid, cement grinding, classification

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım sırasında bilgisi ve tecrübesiyle yol gösterici olan, gelişimim için her türlü imkânı sağlayan ve manevi desteğini her zaman hissettiğim tez danışmanım, Maden Mühendisliği Bölüm Başkanı Sn. Prof. Dr. A. Hakan BENZER'e,

Bilgi ve görüşlerinden yararlandığım tez izleme komitesi üyeleri Sn. Prof. Dr. İsmail GİRGIN ve Doç. Dr. Abdullah OBUT'a

Tesislerinde denemeler yapmama izin veren Traçım Çimento Fabrikası yöneticileri Sn. Cumhuri ŞAHİN, Ali FIRAT, Ender YORULMAZ'a,

Firmaları tarafından üretilen kimyasalları kullanamama izin veren Chryso firması yöneticileri Sn. Olivier MALBAULT ve Oytun EMRE'ye

Laboratuvar çalışmalarımındaki ve tez yazım sürecindeki yardımlarından dolayı Yrd. Doç. Okay ALTUN'a

Çalışmalar için gerekli teknik yardımı sağlayan bölümümüz teknisyenleri Mustafa YILMAZ'a, Işın ASLIYÜKSEK'e,

Vermiş oldukları desteklerden dolayı Dr. Namık AYDOĞAN'a, Yrd. Doç. Hakan DÜNDAR'a ve Deniz ALTUN'a,

Deneysel çalışmalarım sırasında ve tezimi yazarken vermiş olduğu manevi desteklerinden ve göstermiş olduğu sabrından dolayı dostum Dr. Özgür ÖZCAN'a,

Sevgili eşim Bircan AKGÜL TOPRAK'a ,

Manevi desteklerinden dolayı anneme, babama, kardeşime ve desteklerini yanımda hissettiğim tüm dostlarıma, teşekkür ederim.

Bu çalışma Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince Desteklenmiştir. Proje Numarası: FDK-2015-6847

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
1. GİRİŞ	1
2. ÖĞÜTME YARDIMCILARI	3
2.1. Çimento Üretimi	8
2.1.1. Çimento Öğütme Devreleri	10
2.1.1.1. Bilyalı Değirmenler	11
2.1.1.2. Valsli Dik Değirmenler	12
2.1.1.3. Horomill	13
2.1.1.4. Yüksek Basıncılı Merdaneli Değirmenler	13
2.1.1.5. Havalı Sınıflandırıcılar	14
2.2. Çimento Endüstrisinde Öğütme Yardımcıları	15
2.3. Öğütme Yardımcılarının Klinker Yüzeyi ile Etkileşimleri	16
2.4. Öğütme Yardımcılarının Öğütme Sırasında Yayılma Mekanizmaları	18
2.5. Öğütme Yardımcılarının Klinker Yüzeyine Soğurulması	19
2.6. Moleküler Modelleme (Bilgisayar Benzetimi)	25
2.7. Öğütme Yardımcılarının Dozaj Etkisi	30
2.8. Öğütme Yardımcıların Malzeme Akışkanlığı Üzerine Etkileri	32
2.9. Öğütme Yardımcılarının Hidratasyon Üzerine Etkileri	36
2.10. Öğütme Yardımcılarının Çimento Öğütme Devreleri Üzerindeki Etkileri	43
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve SONUÇLARI	47
3.1. Laboratuvar Ölçekli Testler	47

3.1.1. Akışkanlık Testleri	47
3.1.2. Öğütme Testleri.....	50
3.1.3. Havalı Sınıflandırıcı Testleri	55
3.2. Öğütme Yardımcıları ile Gerçekleştirilen Endüstriyel Testler	59
3.2.1. Örneklem ve Kütle Denkliği Çalışmaları	61
3.2.1.1. Chryso Labcim 841-001 ve İdea PSI 9604 ile gerçekleştirilen testler	62
3.2.1.2. Chryso Labcim 841-002 ve Idea DNM 164 ile gerçekleştirilen testler.....	66
3.2.1.3. Chryso Labcim 841-003 ile gerçekleştirilen testler.....	73
3.2.1.4. İdea PSI 9604 kimyasalı gerçekleştirilen testler.....	77
3.2.2. Endüstriyel Testlerin Sonuçları	80
3.2.2.1. Öğütme Yardımcılarının Havalı Sınıflandırıcı Üzerindeki Etkileri	81
3.2.2.2. Öğütme Yardımcılarının Bilyalı Değirmen Üzerindeki etkileri	87
4. MODELLEME ve SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI	88
4.1. Havalı sınıflandırıcının modellenmesi	88
4.2. Bilyalı değirmenin modellenmesi.....	96
4.3. Simülasyon Çalışmaları	102
4.3.1. Aynı miktarda üretim yapılırken devreye 250 g/t Chryso Labcim 841-002 eklenmesi.....	102
4.3.2. Devreye 250 g/t Chryso Labcim 841-002 eklenerek aynı ürün inceliğinin elde edilmesi	104
5. SONUÇLAR	106
6. ÖNERİLER	108
KAYNAKLAR.....	109
EK.....	115
ÖZGEÇMİŞ.....	121

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun artmasına ve küreselleşmeye bağlı olarak beşeri ilişkilerin gelişmesiyle daha fazla üretim yapabilmek için gerekli olan hammadde ihtiyacı artmıştır. Yüksek tenörlü ham cevherlerin miktarlarının gün geçtikçe azalmasına bağlı olarak, ince boylarda serbestleşen, düşük tenörlü cevherlerin işlenmesi önem kazanmıştır. İnce boylarda serbestleşen düşük tenörlü cevherlerin işlenebilmesi için daha fazla miktarlarda malzemenin, daha ince boyutlara öğütülmesi gereksinimi ortaya çıkmıştır. Benzer şekilde kâğıt, boya, seramik, plastik, çimento vb. endüstrilerde de daha ince öğütülmüş maddelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum, öğütme için gerekli olan enerji miktarının artmasına neden olmaktadır. Kullanılabilir enerji kaynaklarının azalması ve cevherlerin kalitesinin düşmesiyle beraber, endüstrinin birçok alanında kullanılan öğütme gibi temel işlemlerin enerji verimliliğinin artırılması önemli bir ihtiyaç halini almıştır [1].

Üretim maliyetlerinin artması ve çevresel kaygılar, enerjiyi daha verimli kullanan ekipmanların geliştirilmesine, tanelerin davranışını ve dolayısıyla verimliliği etkileyen yeni ürünlerin kullanılmasına neden olmuştur [2,3]. Öğütme yardımcıları da bu ihtiyaçları karşılamak ve süreçleri iyileştirmek amacıyla, 20. yüzyılın ortalarında geliştirilmiştir. Genelde sıvı fazda olan öğütme yardımcıları, çoğunlukla glikol, alkanolamin ve fenol tipi bileşiklerden oluşmakta ve öğütülecek olan malzemeye belirli oranlarda ilave edilerek, öğütme devresinin verimini arttırmaktadır [4]. Öğütme yardımcılarının kullanımının basit ve etkili bir yöntem olduğu literatürde belirtilmektedir. [5] .

Öğütme yardımcıları kullanılarak, belirli bir kalitede birim ürün başına harcanan enerji miktarı azaltılabilmektedir. Ürün kalitesi, öğütmenin hedefine bağlı olarak, ürünün inceliğine, yüzey alanına veya serbestleşme derecesine bağlı olabilmektedir. Bu bakımdan, öğütme yardımcısı, öğütme işleminin verimini arttırarak, ya aynı miktarda daha ince ürün elde edilmesine, ya da aynı ürün inceliğinde üretim miktarının artmasına katkıda bulunmaktadır. Eğer öğütme yardımcısı, serbestleşmenin daha düşük enerji tüketimi ile gerçekleşmesine yardım ederse, öğütme verimliliğini de arttıracaktır. Diğer bir deyişle, öğütme yardımcıları kullanıldığında, aynı ürün kalitesinde ürün elde edebilmek için harcanan enerji miktarı azalacaktır [2].

Öğütme yardımcılarının genel davranışını açıklamak için, literatüre ve endüstriyel uygulamalara bağlı olarak, birçok hipotez ortaya atılmıştır. Öğütme yardımcılarının öğütme üzerine olan olumlu etkileri deneysel olarak ispatlanmış olmasına rağmen, öğütme

yardımcılarının etki mekanizmalarını açıklayan sınırlı sayıda doğrulanmış bilgi vardır. Öğütme yardımcılarının öğütme devresi üzerine etkilerinin incelenebilmesi için laboratuvar çalışmalarına ek olarak endüstriyel testler yapılması ve buradan elde edilen veriler kullanılarak, her bir ekipman üzerindeki etkilerinin ayrı ayrı incelenmesinin daha faydalı olacağı düşünülmektedir.

Bu tez kapsamında, havalı sınıflandırıcı ile kapalı devre olarak çalışan bir öğütme devresinde, hiç öğütme yardımcısı kullanılmadan ve endüstriyel olarak kullanılan 5 öğütme yardımcısının farklı dozajları ile toplam 19 endüstriyel test gerçekleştirilmiştir. Testler dört farklı dönemde gerçekleştirilmiştir. Aynı dönemde gerçekleştirilen testler sırasında, çimento öğütme devresi aynı ürün inceliğinde üretim yapacak şekilde dengeye getirilerek devre örneklenmiş ve alınan numunelerin tane boyu dağılımları belirlenmiştir. Elde edilen endüstriyel verilerin, hatalardan arındırılması ve her akıştaki madde miktarının belirlenmesi amacıyla madde denkliği çalışmaları yürütülmüştür. Madde denkliği çalışmaları sonrasında öğütme yardımcılarının havalı sınıflandırıcı ve bilyalı değirmen üzerindeki etkileri ayrı ayrı incelenmiştir.

Öğütme yardımcılar ile yapılan her test koşulu için havalı sınıflandırıcının ayırım keskinliği, kaçak miktar ve kesme boyu belirlenerek, öğütme yardımcılarının sınıflandırma verimliliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Öğütme yardımcılarının bilyalı değirmen üzerindeki etkisi ise, birim enerji tüketimi ve indirgeme oranları göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir.

Öğütme yardımcılarının etki mekanizmalarının anlaşılabilmesi için laboratuvar ölçekli, akışkanlık, öğütme ve sınıflandırma testleri yapılmıştır.

Elde edilen veriler kullanılarak, çimento öğütme devresinde yer alan havalı sınıflandırıcı ve bilyalı değirmen modellenmiş ve farklı dozajlardaki öğütme yardımcılarının kullanımı ile model parametrelerinin değişimi ilişkilendirilmiştir.

2. ÖĞÜTME YARDIMCILARI

Daha önceleri öğütme, öğütme sisteminin mekanik koşullarının kontrol edildiği fiziksel bir işlem olarak düşünülmekteydi. Rehbinder'in [6] bazı kimyasalların, malzemenin mekanik kırılması üzerinde olumlu etkilerinin olduğunu gösteren bulgularını yayınlamasından sonra, araştırmacılar, öğütme işleminde kimyasalları da göz önünde bulundurmaya başlamışlardır. Çoğunlukla organik bileşiklerden oluşan bu katkılar öğütme yardımcıları olarak adlandırılmışlardır [7]. Öğütme yardımcıları 50 yıldan daha uzun bir zamandır, belirli bir incelikte veya üretim miktarında enerji tüketimini azaltmak amacıyla kullanılmaktadır [8].

Birçok araştırmacı, öğütme yardımcılarının tane yüzeyi ile etkileşime girdiğini ve tanelerin yüzey enerjisini azaltan bir film oluşturarak topaklanmayı engellediğini savunmuştur [9]. Öğütme yardımcıları, kuru sistemlerde, aynı enerji tüketiminde, öğütme hızını arttırmakta veya ince taneler arasındaki topaklanmayı ve tanelerin bilyalara ve astara sıvanmasını engellemektedirler [7]. Öğütme yardımcıları, öğütülmüş malzemeyi daha akışkan hale getirmekte ve kapalı devre sistemlerde havalı sınıflandırıcıların performansını arttırmaktadırlar [10]. Yaş sistemlerde ise, pulp yoğunluğunu düşürerek ve taneleri ayırıştırarak kırılmanın daha çok mineral sınırlarından gerçekleşmesini sağlayarak, aşırı ince boylara öğütmeye gerek kalmadan minerallerin serbestleşmelerini kolaylaştırmakta ve böylelikle birim zamanda üretilen ürün miktarını artırmaktadır. Ayrıca, şlam boyutundaki malzeme miktarının az olması, zenginleştirme işlemlerinde verimi arttırarak, daha yüksek tenörlü ürün elde edilmesini kolaylaştırmaktadır [7].

Öğütme yardımcıları, kuru sistemlerde daha çok çimento endüstrisinde, yaş sistemlerde ise sülfür mineralleri ve kömürün öğütülmesinde kullanılmaktadır. Öğütme yardımcılarının endüstriyel hammaddelerdeki kullanımı ise sınırlıdır. Diğer bir yandan farklı araştırmacılar tarafından yapılan incelemelerde, öğütme yardımcılarının endüstriyel hammaddeler üzerindeki faydaları konusunda çelişkili sonuçlar ortaya çıkmıştır. Bu çelişkili sonuçların ilk temel nedeni, araştırmalarda kullanılan değirmen tipleri ve değirmen dönüş hızı, bilya doluluğu, besleme boyu vb. etkenlerin öğütme mekanizması ve öğütme yardımcıları üzerinde etkili olmasıdır. Farklı sonuçların ortaya çıkmasının ikinci ana nedeni ise, öğütme yardımcılarının etkilerini test etmek için kullanılan tekniklerin ve ekipmanların farklı olmasıdır. [1]

Energy, Mines and Resources [1] öğütme yardımcılarının kullanımı ile ilgili bilgi edinmek için farklı endüstrilerde çalışan şirketlere bazı anketler yollamıştır. Anket sonuçlarında, çimento endüstrisinde çok yaygın kullanılan öğütme yardımcılarının, endüstriyel minerallerin öğütülmesinde pek kullanılmadığı ortaya çıkmıştır. Öğütme yardımcısı kullanımı ile ilgili diğer anket sonuçları Çizelge 2.1’de verilmektedir.

Çizelge 2.1 Öğütme yardımcısı kullanan şirketlere yapılan anketlerin sonuçları

Öğütme yardımcılarının kullanılmasının ana nedeni

Topaklanmayı engellemek	% 66
Sistem verimliliğini arttırmak	% 63
Enerji tasarrufu sağlamak	% 31
Ürün kalitesini iyileştirmek	% 31
Ürün verimini arttırmak	% 14

Öğütme yardımcılarının kullanılmasının sonuçları:

Enerji tasarrufu	% 77
Öğütmeyi daha iyi kontrol edebilme	% 40
Daha ince ürün elde etme	% 29
Sınıflandırma veriminin artması	% 20

Üretim Maliyetinin düşmesi:

Evet	% 78
Hayır	% 22

Kanada’daki Energy, Mines and Resources şirketinin yaptığı anketlerde öğütme yardımcılarının çimento endüstrisinde çok yaygın kullanılmasına rağmen, endüstriyel mineraller için pek kullanılmadığını göstermektedir [1].

Öğütme yardımcılarının faydaları değerlendirilirken, teknik ve ekonomik unsurlar göz önünde bulundurulmalıdır. Öğütme yardımcılarının faydaları teknik olarak, laboratuvar testlerinden sonra, endüstriyel ölçekli yapılan testlerle değerlendirilmektedir. Ekonomik olarak değerlendirilmeleri, her zaman para ile ölçülmesi kolay olmayan birçok faktör göz önünde bulundurularak yapılmaktadır. Öğütme yardımcılarının en belirgin faydası, kullanıldığı uygulamada, üretim miktarında belirgin bir artış sağlamasıdır. Bu durumda gerçekleşen enerji tasarrufunu ekonomik olarak hesaplamak oldukça kolaydır. Kimi zaman, öğütme yardımcılarının enerji tasarrufundan daha çok göze çarpan diğer etkilerini

ekonomik olarak hesaplamak daha zordur. Öğütme yardımcılarının faydaları şöyle sıralanabilir [11]:

- Hiçbir yapısal değişiklik yapmadan, tesis işlem hızı % 10 ile % 30 arasında arttırılabilmektedir.
- Üretim miktarının artması sonucu toplam ciro artmaktadır.
- Üretim kapasitesindeki artışla beraber, düzenli bakım çalışmalarına daha çok zaman ayrılarak, bakım yetersizliği nedeniyle ekipmanlarda oluşabilecek ve telafisi çok pahalı olacak sorunların önüne geçilebilmektedir.
- Birim malzeme başına düşen aşınma ve değirmen ortamı maliyeti azaltılabilmektedir.
- Üretim kapasitesindeki artış potansiyeline bağlı olarak, ürün talebindeki artışlar daha iyi karşılanabilmektedir.
- Daha yüksek özgül yüzey alana sahip ürün elde edilebilmektedir.
- İyileşmiş bir ürün tane boyu dağılımı elde edilebilmektedir.
- Ürün kalitesindeki iyileşme, üretici firmaların piyasadaki rekabet gücünü arttırmaktadır.
- Malzemenin akışkanlığının artması neticesinde, silolarda ve havalı bantlarda taşınması ve kamyonlara doldurulup boşaltılması kolaylaşmaktadır.
- Değirmen içi sıcaklık azalmaktadır.

Öğütme işlemi sırasında çeşitli öğütme yardımcıları kullanılmaktadır. Öğütme yardımcıları, trietilentetramin (TEAT), tetraetilenpentamin (TEPA) gibi alifatik aminler, dietanolamin (DEA), trietanolamin (TEA) ve triizopropanolamin (TIPA) gibi amin alkoller ve etilenglikol (EG) ve dietilenglikol (DEG) gibi glikollerden üretilirler [12]. Ayrıca, aminoetiletanolamin (AEEA) ve hidroksietil dietilentriamin (HEDETA) gibi daha kompleks bileşikler de öğütme yardımcısı olarak kullanılabilir. Fenol ve fenol türevleri ve amin asetat gibi farklı bileşikler de öğütme yardımcısı olarak kullanılabilir. Öğütme yardımcıları genellikle 50 ile 500 ppm arasında kullanılmaktadır. Öğütme işleminden sonra, öğütme yardımcılarının orijinal kimyasal formlarında değişiklikler olabilir. Ayrıca, öğütme yardımcıları, sadece saf bileşiklerden değil, kompleks hammaddelerin karışımından da oluşabilmektedirler [13].

Öğütme yardımcılarının çalışma mekanizmalarını açıklamak için birçok hipotez ortaya atılmıştır. Reh binder [6], boyut küçültme işlemi sonunda yeni yüzeyler oluştuğundan

öğütme için gerekli olan enerjinin, katının yüzey enerjisinin düşürülerek azaltılabileceğini ileri sürmüştür. Rose ve Sullivan [14] yüzeye soğurulma ile taneciğin yüzey enerjisini düşürme kuramını genişleterek öğütme yardımcılarının tüp değirmenlerdeki çalışma mekanizmasını açıklamaya çalışmıştır.

Diğer bir yandan, Westwood vd. [15] kırılma işlemi sırasında, sadece plastik deformasyonun önemli olduğu durumlarda yüzeye soğurulan yüzey aktif maddelerin malzemenin mukavemetini düşürdüğünü iddia etmişlerdir. Tüp değirmenlerde gevrek kırılma gerçekleştiği için öğütme yardımcılarının etkisinin Rehbinder etkisi ile açıklanamayacağını savunmuşlardır. Plastik deformasyona uğrayabilen malzemelerde bile, öğütme yardımcılarının malzeme dayanımını etkileyebilmesi için, gerilimin uygulandığı zaman aralığı, öğütme yardımcısının tane yüzeyine soğurulmasına olanak sağlayacak kadar uzun olması gerekmektedir. Darbe ile ani kırılmanın gerçekleştiği değirmenlerde bu süreç çok kısadır. Bu tip değirmenlerde çatlağın ilerleme hızı, öğütme yardımcısının çatlak yüzeylerine yayılarak soğurulma hızından çok daha fazladır [16,17,18,19]. Locher ve Seebach. [16] çalışmalarında, (sıvı) öğütme yardımcısının buharı bile malzeme yüzeyine soğurursa, katının yüzey enerjisini düşürerek kırılma verimliliğinin artırılmasının mümkün olamayacağını belirtmişlerdir.

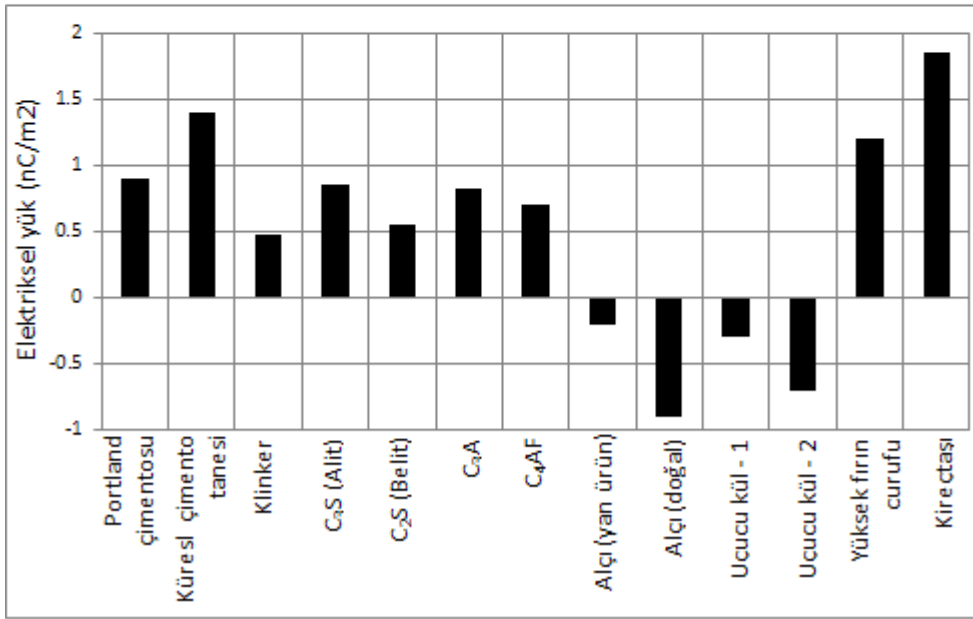
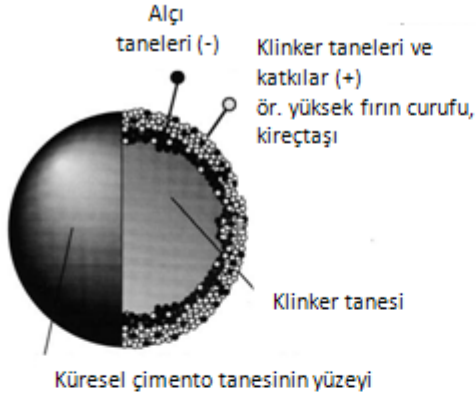
Westwood vd. [15]'nin , katı yüzeyine soğurulan öğütme yardımcısının, gerilim altında düzensizliklerin hareketini zorlaştırarak, düzensizliklerin ilerlemesini engellediğini ileri sürmüşlerdir. Böylece dislokasyonların hareketlerinden kaynaklanan plastisite büyük ölçüde azalmakta ve katı kırılma hale gelmektedir. Bu mekanizmanın tüp değirmenlerdeki öğütme yardımcısının mekanizmasını açıklamak için kullanılması, daha önce Rehbinder etkisinde olduğu gibi eleştirilere maruz kalmıştır. Öncelikle Westwood vd. [15]'nin öne sürdüğü mekanizma plastik akışın önemli olduğu durumlar için tanımlanmıştır ki; kesinlikle bu durum tüp değirmenlerdeki öğütme için geçerli değildir. Bunun yanı sıra, darbe ile kırılma sırasında, dislokasyonların hareketi, çatlak ilerleme hızından çok daha yavaştır. Tek bir tanenin darbe altında kırılmasında öğütme yardımcılarının önemli bir etkisinin olmadığı da deneysel olarak kanıtlanmıştır [20]. Locher ve Seebach [16] Westwood'un mekanizmasının etkin olmadığına ilişkin deneysel kanıtlar sunmuşlardır. Ayrıca aşındırma deneyleri yaparak, aşınan malzemeyi elektron mikroskopunda incelemişlerdir. Sonuçlar, aşınmanın ve topaklanmanın eş zamanlı olarak gerçekleştiğini göstermiştir. Organik buhar içinde aşınma oranlarının daha fazla olmasını, organik buharın aşınan malzemeye soğurulmasıyla topaklanmanın engellenmesinden kaynaklandığını ileri

sürmüşlerdir. Bu sonuçlar, tüp değirmenlerde ufalanma kısmen aşınma ile gerçekleştiği için önem taşımaktadır.

Öğütme yardımcılarının, daha önceden mevcut olan çatlakların uç noktalarının diplerine nüfuz edebileceği ve bu noktalara basınç uygulayarak kırılma işlemine yardımcı olabileceği de ileri sürülmüştür [21]. Bu mekanizmanın darbe ile kırılma işleminde bir rol oynaması kuşkuludur. Ayrıca, Somasundaran ve Lin [17], uzun zincirli organik yüzey aktif malzemelerin, büyük boyutlarından dolayı difüzyonlarının sınırlı olacağını ve bu nedenle öğütme yardımcılarının etkilerinin bu mekanizma ile açıklanamayacağını belirtmişlerdir.

Öğütme yardımcılarının yüzeye soğrularak malzemenin kırılmasını olumlu yönde etkilediğini savunan teorilerin yetersizliği nedeniyle, birçok araştırmacı öğütme yardımcılarının etkilerinin değirmen içinde malzemenin topaklanma ve akış özelliklerini değiştirmesinden kaynaklandığını savunmuşlardır. Öğütme yardımcılarının kuru malzemelerde dağıtıcı bir etki yapabileceği fikri ilk defa, öğütme yardımcılarının çimento endüstrisinde ticari olarak kullanılmaya başlandığı yıllarda, öğütme yardımcılarının kullanılması ile malzemenin önemli ölçüde tozduğunun gözlemlenmesi sonucunda ortaya atılmıştır [22]. Buna benzer gözlemlerin yapılması sonucunda, öğütme yardımcılarının çimento tanelerinin yüzeylerine soğrularak topaklanmaya sebebiyet veren kuvvetlere karşı kalkan oluşturduğu ve tanelerin tekrar bir araya gelerek birleşmelerini engellediği fikri ortaya atılmıştır.

Malzemenin kırılmasıyla oluşan elektriksel kuvvetlerin öğütme yardımcısı tarafından nötrlenmesi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir [19,23]. Öğütme yardımcılarını çoğunlukla kutupsal maddeler olduğu için, daha çok elektrovalent veya kovalent bağların kırılması neticesinde ortaya çıkan, elektriksel kuvvetlerin olduğu bölgelere soğurulmaktadırlar (Şekil 2.1). Bazı durumlarda, öğütme yardımcılarının taneciklere soğurulmaları, taneciklerin yüzeylerinin aynı yükü yüklenmesine neden olmakta ve tanecikler arasında meydana gelen elektrostatik itme kuvveti nedeniyle taneciklerin bir araya gelerek topaklanmaları engellenebilmektedir [23]. Deneyimler, kutupsal öğütme yardımcılarının, kutupsal olmayanlardan daha etkili olduğunu göstermiştir. Kutupsal olmayan öğütme yardımcılarını, çimento tanelerinin yüzeyine çok zayıf kuvvetlerle soğurulurlar ve taneler arasında sabit bir ayırıcı katman oluşturamazlar. Benzer şekilde, yaş öğütmenin kuru öğütmeye göre daha verimli olmasında, suyun kutupsal yapıda olması da önemli bir etkidir. Öğütme yardımcılarının malzeme üzerine soğurulmaları ve öğütme üzerine etkileri ilerleyen bölümlerde daha ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.



Şekil 2.1 Çimento ve çimentoyu oluşturan bileşenlerin elektriksel yükleri [24]

2.1. Çimento Üretimi

İnşaat sektörü birçok ülkede, ekonominin lokomotifi durumundadır. Bu nedenle, bu sektörde kullanılan yapı malzemeleri, dünya genelinde çok büyük bir pazar payına sahiptir. Örneğin, çimentonun dünyadaki yıllık tüketimi milyar tonları aşmakta ve özellikle Çin ve Hindistan gibi uzak doğu ülkelerinde bu talep giderek artmaktadır.

Yapı sektörünün temel maddelerinden biri olan çimento, katı parçaları bağlayarak bir arada tutma özelliğine sahiptir. Çimento çok ince öğütülmüş, organik ve metalik olmayan, su ile karıştırıldığında prizlenerek sertleşme özelliğine sahip olan bir malzemedir.

Çimento sanayinde, hammadde seçimi yüksek kalitede ürün üretebilmek açısından önem arz etmektedir. Kalker, kireçtaşı, şist, kil ve demir cevheri çimento üretiminde temel olarak kullanılan hammaddelerdir. Hammaddeler, genellikle çimento tesisinin yakınındaki açık ocaklardan elde edilmekte ve çimento tesisine ulaşmadan önce kırma işlemine tabi

tutulmaktadır. Uçucu kül, demir ve izabe tesisi cürufları, silika tozu ve pirit külü bazı doğal hammaddelerin yerine kullanılabilecek olan diğer sanayilerin yan ürünleridir. Bu hammaddeler, belirli oranlarda karıştırılarak farin öğütme ekipmanlarında öğütülerek, ısıtma işlem aşamasına taşınmaktadırlar [25].

Çimento; kalsiyum ve kil ihtiva eden kireçtaşı, kum, şist, kil ve demir cevherinin kalsinasyonu sonucu oluşan klinkerden üretilmektedir. Kalsinasyondan önce ham maddeler 10 cm'den daha küçük boyutlara kırılmaktadır. Gerekli olan kimyasal terkihi elde edebilmek için, her hammadde belirli oranlarda karıştırılarak değirmene beslenmektedir. Öğütülen hammaddenin tane boyu 75 µm'den daha küçüktür. Değirmende öğütülen malzeme “fırın beslemesi” olarak adlandırılır. Suyun buharlaşmasından sonra, kireçtaşı kalsinasyonu sonucunda kalsiyum oksit oluşmakta ve kalsiyum oksit kum, şist, kil ve demir cevheri ile tepkimeye girmektedir. Petrokok veya kömürün yakılmasıyla oluşan yoğun alev ile gerçekleştirilen kalsinasyon sonucunda klinker meydana gelmektedir. Çizelge 2.2’de klinkeri meydana getiren temel bileşenler ve oranları verilmektedir. Daha sonra klinker, alçıtaşı ve diğer katkılarla beraber değirmenlerde öğütülerek çimento üretimi tamamlanmaktadır. Çimentonun nihai inceliği, alçıtaşı ve diğer katkıların kalitesi istenilen ürün kalitesine göre çeşitlilikler göstermektedir.

Çizelge 2.2. Klinkeri meydana getiren ana bileşenler [26]

Klinker			%
Trikalsiyum silikat	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$,	C_3S	45-75
Dikalsiyum silikat	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$,	C_2S	7-32
Trikalsiyum alüminat	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$,	C_3A	0-13
Tetrakalsiyum alüminoferrit	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$,	C_4AF	0-18
Alçıtaşı	CaSO_4		2-10

Çimento tipleri arasında Portland çimento en önemli yere sahiptir. Portland tipi çimento, klinkerin belirli bir oranda alçıtaşı ile karıştırılarak genellikle bilyalı değirmenlerde öğütülmesiyle üretilmektedir. Bu öğütme işlemi çimentonun üretilmesi için gerekli olan toplam enerji maliyetinin %40’nı oluşturmaktadır. Kalsinasyon için gerekli olan enerji genellikle petrol koku ile sağlanmaktadır. Soğutucu için gerekli olan mekanik ve termal enerji elektrik ile sağlanmakta ve bu da toplam enerji tüketiminin %20’sini oluşturmaktadır (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.3 Çimento üretiminde farklı işlemler için harcanan enerji tüketimleri [27]

	kWh/ton
Kırma	1-3
Hammaddenin öğütülmesi	8-30
Hammaddenin homojenleştirilmesi	1-2
Pişirme	16-18
Çimentonun öğütülmesi	30-80

Çizelge 2.3'ten de izlenebileceği gibi, öğütme, en çok enerjinin harcandığı birim işlem olarak göze çarpmaktadır. Bu nedenle, bu alanda yapılabilecek en ufak bir iyileştirme tüm üretimin maliyetini doğrudan etkilemektedir. Özellikle ülkemizde, pazarda artan yüksek dayanımlı çimento talebini karşılamak amacıyla, daha ince boyutlarda çimento üretimi yapılması, öğütmenin önemini giderek arttırmaktadır. İnce öğütme işleminde en büyük sorun, tanelerin birbiriyle olan topaklanma eğilimleri ve buna bağlı olarak öğütme veriminin düşmesidir. Tanelerin topaklanma eğilimini azaltmak için öğütme yardımcılarının kullanılması sıklıkla başvurulmuş bir yöntemdir.

2.1.1. Çimento Öğütme Devreleri

Boyut küçültme işleminin temeli tanelerin kırılmasına dayanmaktadır. Çeneli kırıcılar, darbeli kırıcılar ve bilyalı değirmenler gibi değişik ekipmanlarda malzemeye farklı şekilde yükleme yapıldığı için, taneciklere farklı sayılarda ve farklı yönlerde kuvvetler etki etmektedir; dolayısıyla deformasyon hızları da farklı olmaktadır [28].

Pratikte, tüketilen enerjinin ancak çok küçük bir kısmı tanelerin kırılması için harcanmaktadır [29]. Enerjinin bir kısmı elastik ve plastik deformasyona, kristal yapının yeniden düzenlenmesine, fiziko-kimyasal reaksiyonlara ve yeni yüzey oluşumuna harcanmaktadır. Bunların dışında, enerji fiziksel olarak, sürtünmelere, ses, ısı ve kinetik enerjiye, öğütme ortamında meydana gelen aşınmalara ve deformasyonlara dönüşmektedir [30]. Çizelge 2.4 incelendiğinde kullanılan enerjinin çok küçük bir kısmının yeni yüzeylerin oluşumuna harcandığı görülmektedir.

Çizelge 2.4. Deneysel olarak elde edilmiş yüzey ve kırılma enerjileri [31]

Malzeme	Yüzey enerjisi (erg/cm ²)	Kırılma enerjisi (erg/cm ²)
Kuvars	920	117000
Cam	1210	8200
Halit	276	26100
Belit	1250	71600
Kalsit	1100	32400

Harcanan enerjinin büyük bir kısmı (%75'ten daha fazlası) ısı oluşumunda, sürtünmelerde, üretken olmayan çarpışmalarda ve elastik ile plastik deformasyon oluşumunda harcanmaktadır [30]. Piret vd. [31] kırılma işleminin gerçekleşebilmesi için öncelikle elastik ve plastik deformasyonların olması gerektiğini savunarak, öğütme verimini %20-50 olarak değerlendirmiştir. Öğütme verimliliğini arttırmaya yönelik yöntemler geliştirebilmek için öğütmenin alt süreçlerinin ve değirmen içindeki ortam ile olan etkileşimlerinin iyi anlaşılması gerekmektedir.

Öğütme işlemi malzemenin akışı ve kırılma hızı olmak üzere iki ana alt süreci içerir. Bu süreçler; malzemenin kırılma bölgesine taşınması ve malzeme yüzeyinde çatlak oluşmasıdır.

Tanelerin kırılması belli bir olasılık dâhilinde gerçekleşmektedir. Tanelerin kırılması, tanelerin kırılma bölgesine taşınmaları ile mümkündür. Tanelerin kırılma bölgesine taşınma olasılıkları, tane büyüklüğüne, öğütücü ortamın büyüklüğüne, iç sürtünmelere, değirmen içindeki akışkanlığa, tanelerin taşınma hızına ve topaklanmasına bağlıdır. Tanelerin kırılma bölgesine taşınmaları durumunda, kırılma olasılıkları ise malzemenin mekanik özelliklerine bağlıdır.

Çimento endüstrisinde klinker öğütmek için yaygın olarak havalı sınıflandırıcı ile kapalı devre çalıştırılan iki kamaralı bilyalı değirmenler kullanılmaktadır. Son yıllarda, öğütme verimliliğini arttıran yüksek basınçlı merdaneli değirmenler, dik değirmenler ve horromilller çimento endüstrisinde öğütme işleminde yer almaya başlamıştır.

2.1.1.1. Bilyalı Değirmenler

Bilyalı değirmenler 100 yılı aşkın bir süredir öğütme işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [32]. Bilyalı değirmenlerin çimento endüstrisinde açık ve kapalı devre uygulamaları mevcuttur. Bu tip değirmenler uzunluk/çap (L/D) oranlarına göre karakterize edilmişlerdir ve enerjinin en verimli kullanılabileceği uzunluk çap oranı üç (L/D=3) olarak belirlenmiştir [33]. Besleme ve ürün boyut dağılımına bağlı olarak, bilyalı tüp değirmenler tek, iki veya üç kamaralı olarak tasarlanmaktadır.

Kamaralı değirmenlerde, kamaraları birbirinden ayıran diyaframlar, bir taraftan öğütülen malzemenin diğer kamaraya geçişine izin verirken, diğer taraftan bilyaların bir kamaradan diğerine geçip, kamaralardaki bilya boyu dağılımını değiştirmesini engeller. Diyaframın tasarımı öğütülen malzemenin inceliğini etkilemektedir [26]. Çimento değirmenleri için farklı şekillerde değirmen plakaları geliştirilmiştir. Kaldırma plakaları; bilyaları belirli bir

yüksekliğe kaldırarak, bilyaların serbest düşme hareketiyle tanelere çarparak tanelerin kırmasını sağlamaktadır. Sınıflandırıcı plakalar ise, bilyaları değirmen girişinden çıkışına doğru, iriden inceye doğru sınıflamaktadır.

2.1.1.2. Valsli Dik Değirmenler

Valsli dik değirmenler, kurutma kapasiteleri, düşük enerji tüketimleri ve işletim kolaylıkları nedeniyle uzun yıllardır çimento endüstrisinde, kalker ve kömür öğütülmesinde kullanılmaktadır. Bu tip değirmenler, klinker öğütülmesinde ön öğütme veya son öğütme ekipmanı olarak da kullanılmaktadırlar [34].

Valsli dik değirmenlerde, malzeme tablanın ortasına beslenir ve merkezci kuvvetin ve sürtünmenin etkisinde, tablanın ucuna doğru sürüklenmektedir. Tablanın ucunda, öğütme için gerekli kuvveti sağlayacak hidrolik silindirlere bağlı konik valsler mevcuttur. Boyut küçültme işlemi, malzemenin tabla ile valsler arasındaki boşluğa yerleşerek, basınç altında ezilmesiyle gerçekleşir. Tabla üzerindeki malzeme hava emişi ile sınıflandırıcıya taşınmaktadır. İnce taneler değirmen dışına alınırken, iri taneler, tabladan kanallara dökülen iri malzeme ile beraber tekrar değirmen tablasına beslenmektedir.

Valsli dik değirmenler, çimento endüstrisinde, çimento öğütme ekipmanı olarak ilk defa 1984 yılında kullanılmıştır [34]. Fakat bu ekipmanın uygulamaları çeşitli dezavantajları nedeniyle sınırlı kalmıştır. Bu tip değirmenlerin öğütme enerjisinden sağladığı tasarruf, fanlar tarafından harcanan enerji ile dengelenmiştir. Diğer bir sorun ise, valslerin aşınma hızıdır. Öğütülen malzeme tipine ve miktarına bağlı olarak valsler çok çabuk aşınabilmektedir. Bu sorun, farklı vals tasarımlarıyla giderilmeye çalışılmaktadır [35]. Öğütmenin verimliliği büyük oranda, tabla ile valsler arasında oluşan yatağın dengesine bağlıdır.

Valsli dik değirmenlerin en büyük işletme sıkıntısı yüksek oranlardaki devreden yüklerle çalışmasıdır. Bu durum, değirmen içinde malzemenin birikerek, değirmen içindeki öğütme verimliliğinin düşmesine neden olmaktadır. Bu sorunu gidermek için devreden yükün değirmenin dışına taşınması fikri ortaya atılmıştır. Bu uygulama sonucunda çalışan sistemin, geleneksel bilyalı değirmenlere göre % 30 daha az özgül enerji harcadığı belirlenmiştir [36]. Bu sistemle çalışan değirmenlerden biri CKP tipi değirmenlerdir [37]. Bu tip değirmenlerde malzeme ortadaki bir kanaldan değirmene beslenmektedir. Tablanın dönmesinden kaynaklanan merkezci kuvvetin etkisiyle malzeme tabla yüzeyine dağılmaktadır. Malzeme öğütüldükten sonra, yatak raspasının da yardımıyla, yer çekimi

kuvveti ile değirmen dışına taşınmaktadır [38]. CKP tipi değirmenler ön ezici olarak da kullanılmıştır ve bu sayede mevcut sistemde % 17 enerji tasarrufu sağlanmıştır [39].

2.1.1.3. Horomill

Horomilller, mil yatağına yerleştirilmiş ve dişli çark sistemiyle dönen bir silindirinden meydana gelmiştir. Bu silindirin içinde bulunan merdane, hidrolik pistonlardan aldığı kuvveti malzemeye aktarmaktadır. Değirmen içinde yatak oluşturan malzeme, yüksek basınç altında sıkışarak öğütülmektedir [40].

Değirmenin kritik hızdan daha hızlı dönmesi nedeniyle oluşan merkezci kuvvetin etkisiyle, değirmenin iç yüzeyinde düzgün dağılmış bir tabaka oluşmaktadır. Bu tabakayı oluşturan malzeme, değirmen içindeki basınçlı merdane vasıtasıyla ezilerek boyut küçültme işlemine maruz kalmakta ve değirmenin diğer ucundan öğütülerek çıkmaktadır. Değirmenden çıkan ince malzeme toz tutucu filtrelerde toplanırken, iri malzeme tekrar değirmene döndürülmektedir. Devreden yük oranına bağlı olarak, değirmen içinde kalın bir yatak oluşmasının, bu ekipmanın daha dengeli çalışmasını sağladığı belirtilmiştir [41]. Horomillerin, çimento öğütmek için ortalama basınç değerlerinde ve yüksek yatak kalınlıklarında çalıştırıldıklarında, bilyalı tüp değirmenlere kıyasla % 35 ile % 40 arasında enerji tasarrufu sağladıkları görülmüştür. Ancak Horomillerin astar ve aşınma maliyetlerinin bilyalı değirmenlere oranla daha fazla olduğu ve operatörlüğünün daha zor olduğu bilinmektedir [42].

2.1.1.4. Yüksek Basınçlı Merdaneli Değirmenler

Yüksek basınçlı merdaneli değirmenler, Schöenert [43] tarafından geliştirilmiş olup, düşük özgül enerji tüketimleri ile ön plana çıkmaktadırlar. Yüksek basınçlı merdaneli değirmenlerde, malzeme, birbirine ters yönde dönen iki merdane arasında sıkıştırılarak öğütülmektedir. Değirmenden ince ve iri tanelerden oluşan kek halinde bir ürün elde edilmektedir. Bu keki oluşturan taneler üzerinde çatlaklar ve zayıflıklar bulunması nedeniyle, bir sonraki boyut küçültme işlemi için avantaj sağlamaktadır [44].

Yüksek basınçlı ekipmanlar çimento endüstrinde, ön kırma, hibrit öğütme, yarı ürün ve son ürün elde etmek için kullanılmaktadır. Bu tip değirmenlerin ön ezici olarak kullanılmalarıyla toplam öğütme enerjisinde % 20'lik bir azalma sağladığı belirtilmiştir [45]. Hibrit öğütme sisteminde, havalı sınıflandırıcı irisinin bir kısmı yüksek basınçlı merdaneli değirmene, diğer kısmı ise bilyalı değirmene beslenmektedir. Yüksek basınçlı merdaneli değirmenlerin yarı ürün öğütmede kullanıldıkları sistemlerde ise, yüksek

basınçlı merdaneli değirmen bir sınıflandırıcıyla kapalı devre çalışır ve sınıflandırıcının incesi öğütülmek üzere bilyalı değirmene beslenir. Yüksek basınçlı merdaneli değirmenler havalı sınıflandırıcı ile kapalı devre çalıştırılarak nihai ürün elde edilmesi % 50'ye varan enerji tasarrufları sağlamaktadır [45]. Fakat yüksek basınçlı merdaneli değirmenlerle nihai çimento üretildiğinde, elde edilen ürünün dar tane boyu dağılımına sahip olması nedeniyle, nedeniyle harç yaparken su ihtiyacının arttığı gözlemlenmiştir [46].

2.1.1.5. Havalı Sınıflandırıcılar

Klinker öğütme devrelerinde sınıflandırma işlemi havalı sınıflandırıcılarla sağlanmaktadır. Dinamik ve statik olmak üzere iki tip havalı sınıflandırıcı vardır. Statik havalı sınıflandırıcılar, hareketli parçaların olmadığı daha eski teknolojilerdir. Sınıflandırma hava hızına ve yönüne bağlı olarak yapılmaktadır. Taneleri taşıyan hava akışı, dış konide bulunan yönlendirme kanatlarıyla düz akıştan, döner akışa çevrilmektedirler. Santrifüj kuvvetinin etkisiyle, iri taneler, iç koninin dış duvarına doğru hareket ederek bir haznede toplanırlarken; ince taneler havalı sınıflandırıcı dışına taşınarak, toz tutucularda toplanmaktadırlar. Statik sınıflandırıcıların verimlilikleri, dinamik sınıflandırıcılara göre daha düşüktür [47].

Dinamik sınıflandırıcıların ise hem hareketli hem de hareketsiz parçaları mevcuttur. Sınıflandırma bölgesinden beslenen taneler temel olarak, dağıtma tablasının hareketinden kaynaklanan merkezci kuvvetin, yukarı yönlü hava akışının ve yer çekimi kuvvetinin etkisinde kalmaktadırlar.

Dinamik sınıflandırıcılar, gelişme süreçlerine göre birinci, ikinci ve üçüncü nesil olmak üzere üçe ayrılmaktadırlar. Birinci nesil dinamik sınıflandırıcıların dağıtma tablaları vardır ve hava dolaşımı dik olarak yerleştirilmiş bir rotor ile sağlanmaktadır. Birinci nesil sınıflandırıcılarda devir daim yapan hava çok ısınır, ince taneler hava ile sınıflandırıcıdan taşınmaz ve ürünün kontrolü çok zordur.

İkinci nesil havalı sınıflandırıcıların çalışma ilkeleri de birinci nesil dinamik sınıflandırıcılarla aynıdır; fakat sınıflandırıcı içinde hava akışını sağlamak için harici bir fan ve ince taneleri çıkarmak için ayrıca bir siklon kullanılmaktadır. Hava ve rotor hızları ayrı ayrı ayarlanabildiği için ürün inceliğini kontrol etmek daha kolaydır.

Üçüncü sınıf dinamik sınıflandırıcılar yüksek verimli ekipmanlardır. Taneler, sınıflandırıcıya dağıtılmış bir hava perdesi ile beslenmekte ve sınıflandırıcıda yatay bir

hava akışı oluşmaktadır. İnce tanelerin ürüne gitmeden döner bir kafesten geçmeleri daha iyi bir sınıflandırma yapılmasını sağlamaktadır [47].

2.2. Çimento Endüstrisinde Öğütme Yardımcıları

Çimento öğütme devrelerinde, öğütme yardımcılarının kullanımına 1930'ların ortalarında başlanmıştır. İlk aşamada, değirmene, öğütme yardımcısı olarak kömür eklenmiş; fakat kömürün eklenmesiyle, betonda oluşması istenen hava kabarcıklarının azalması sonucu, betonun donmaya ve çözülme karşı gösterdiği direncin düştüğü fark edilmiştir. Daha sonra değirmene, çimentonun kızdırma kaybını arttırmayacak kadar düşük miktarlarda su eklenmiştir. Daha sonraki tecrübeler su gibi polar yapıya sahip öğütme yardımcılarının daha etkili olduğunu göstermiştir. Suyun bu etkilerine rağmen, diğer kimyasallara nazaran düşük polariteye ve moleküler ağırlığa sahip olması, öğütme yardımcısı olarak kullanımını kısıtlamıştır [11]. 1960'lara kadar, aminler, amino asetatlar, fosfat, lignosülfonat, asetik asit, glikoller ve glukonatlar kullanılmıştır. 1970'lerde amin, glikol ve glikol bazlı öğütme yardımcılarının daha verimli olduğu görülmüştür. Fakat yüksek maliyetler, sınırlı ulaşabilirdik ve kalitedeki belirsizlik öğütme yardımcılarının gelişimlerini kısıtlamıştır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, öğütülebilirliği ve hidratasyonu iyileştirmek için yeni ve daha verimli aminlerin kullanımı üzerine odaklanılmıştır [48].

Klinkerin öğütülmesi sırasında oluşan topaklanmayı önlemek için eklenen öğütme yardımcısı miktarı, ürün miktarının kütlece %0.01-0.02 arasındadır. Öğütme yardımcılarının temel kimyasal bileşeni trietanolamin, monoetanolamin ve triisopropanolamin gibi aminler olabileceği gibi etilen glikol ve propilen glikol gibi glikoller de olabilmektedirler. Polioller dışında, suda çözünebilir alifatik alkali karboksilatlar, nitrojen içeren trietanolamin gibi hidroksil bileşikler ve sülfatlı ligninler de öğütme yardımcısı olarak kullanılabilirler. Birden farklı bileşiğin de bir arada kullanımına sık sık rastlanmaktadır [27]. Jolicoeur vd. [49] farklı poliollerin öğütme yardımcısı olarak kullanılabilirliğini laboratuvar ölçekli testlerle belirlemişlerdir (Çizelge 2.5).

Öğütme performansını arttıran bütün kimyasallar güçlü kutupsal yapıya sahip olup topaklanmayı azaltmaktadırlar. Öğütme yardımcıları, yeni oluşan yüzeylere soğrularak tanelerin aynı yükte yüklenmesini sağlayarak tanelerin yeniden topaklanmasını engellemektedirler [27]. Yüksek polariteye sahip fonksiyonel gruplar (-OH, -NH₂, -COOR, -SO₃⁻ vb.), Ca-O, Al-O ve Si-O arasındaki kovalent bağların kırılmasıyla oluşan yüzeylere soğrulma eğilimleri sayesinde öğütme sırasında yeni çatlaklar oluşmasına

yardımcı olmaktadır [13]. Sonuç olarak, öğütölmüş çimento tanelerinin daha iyi dağıtılması, öğütme verimini arttırmakta ve aynı enerji tüketiminde daha ince ürün elde edilebilmektedir. Malzemenin akışkanlığının artmasıyla çimentonun taşınması ve silolara yüklenip boşaltılması kolaylaşmaktadır. Ayrıca, ürün kalitesinden ödün vermeden, çimentodaki puzzolan ve katkı malzemelerinin oranını arttırarak çimento maliyetini düşürmek de mümkün olabilmektedir [48].

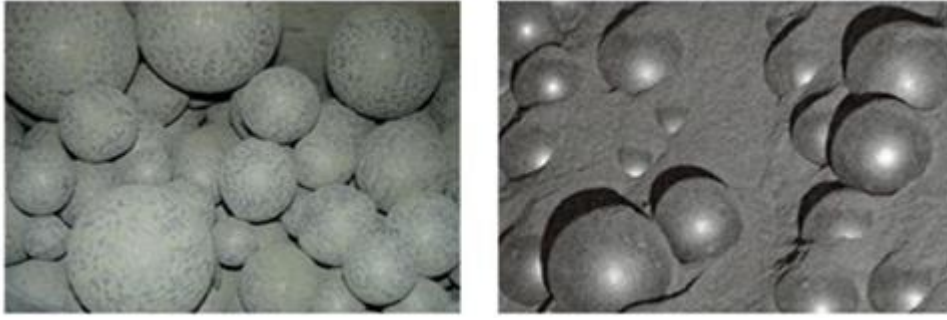
Çizelge 2.5 Çimento endüstrisinde öğütme yardımcısı olarak kullanımları denenmiş polioller [49]

Kısaltma	İsim	Kısaltma	İsim
TEA	Trietanolamin	PG	Propilen glikol
EG	Etilen glikol	DPG	Dipropilen glikol
DEG	Dietilen glikol	TPG	Tripipilen glikol
TEG	Trietilen glikol	PPG	Poli(propilen glikol)
PEG	Poli(etilen glikol)	12OD	1,2-Oktandiol
12HD	1,2-Heksanediol	23BD	2,3-Bütandiol
12BD	1,2-Butanediol	PPT	Polipropanol glikol triol
GLY	Gliserol	DMPD	2,2-dimetil-1,3-propanediol
MPdiol	2-metil-1,3-propandiol	LG650	Polipropilen glikol triol
LF2	EG-PG kopolimerlerinin karışımı		

2.3. Öğütme Yardımcılarının Klinker Yüzeyi ile Etkileşimleri

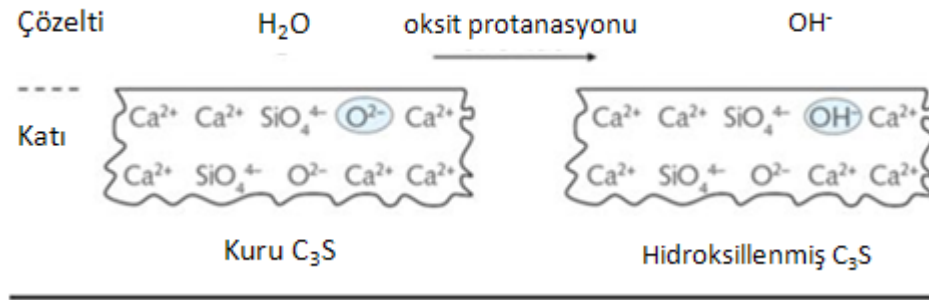
Termodinamiğin yasaları her şeyin en düşük enerji seviyesinde ve mümkün olan en düzensiz hallerinde bulunma eğiliminde olduğunu ileri sürmektedir. Örneğin, serbest duran bir toz yığını, belirli koşullar altında mümkün olan en düşük enerji ve ulaşılabilir düzen derecesini elde etmek için kararlı ve dağınık olma eğilimindedir. Enerji indirgemesi veya daha yüksek rastgelelik tek başına fiziksel ve kimyasal süreç için itici bir güç olabilir; fakat her ikisinin kombinasyonu daha sık görülür: serbest entalpi veya Gibbs enerjisi mümkün olan en düşük değere ulaşma eğilimindedir [50].

Öğütme yardımcısı kullanılmadığında bir sistemin en düşük enerji durumunu yüzeyi öğütölen malzeme ile kaplanmış olan bilyalar temsil eder. Benzer şekilde, öğütme yardımcısı kullanıldığında sistem en düşük enerji durumundayken bilyaların yüzeyi temizdir (Şekil 2.2). Sistemde öğütme yardımcıının var olması, farklı bir minimum enerji durumuna yol açar [51].



Şekil 2.2 Öğütme yardımcısı kullanılmadığında, bilyalar çimento taneleri ile kaplanmaktadır (solda). Öğütme yardımcılarının bilya yüzeylerinin temiz kalmasını sağlayarak öğütme verimini artırmaktadır (sağda).

Termodinamiğin bir kuralı olarak, eğer bir kimyasal tepkime dışarıya enerji (genellikle ısı) veriyorsa kendiliğinden gerçekleşir. Su ile çimento arasında gerçekleşen tepkimeler bu duruma bir örnektir. Çimentonun öğütülmesi sırasında, öğütme yardımcılarının kullanılması bile, değirmene verilen soğutma suyundan ve nemli hammaddelerden dolayı ortamda su bulunmaktadır. Bu yüzden, ticari olarak üretilen klinkerlerin yüzeyinin bir kısmı veya tamamı hidroksillenmiştir. Bu durum öğütmeyi kolaylaştırdığı için önemlidir; diğer bir deyişle su zayıf bir öğütme yardımcısıdır. Oksijen iyonlarının (O^{2-}) su (H_2O) ile tepkimeye girerek hidroksil iyonları (OH^-) oluşturması tek yönlü bir kimyasal tepkimedir (Şekil 2.3) [50].



Şekil 2.3 Klinker yüzeyinde (tri-kalsiyum silikat, C_3S): su molekülleri (H_2O) üst yüzey tabakasındaki oksit iyonları (O^{2-}) ile hidroksit iyonları (OH^-) oluşturmak üzere tepkimeye girer [52]

Organik kimyasalların da bozulması tersinir olmayan tepkimelerdir. Kaynama noktaları öğütme sıcaklığının çok üstünde ve çok altında olan bazı bileşikler öğütme yardımcısı olarak test edilmiştir (Çizelge 2.6). Çok az organik bileşik $200^\circ C$ 'nin üstünde bozulmadan kalabilmiştir. Bu bileşikler genellikle uçucu ikincil bileşiklere ayrılmışlardır. Fakat bu bileşikler, havanın olduğu bir ortamda, ince moleküler katmanlar arasında ve inorganik maddelerin üzerinde, saatler veya günler içerisinde çok daha düşük bir sıcaklıkta (ör.

100°C) ayrışabilirler. Çeşitli araştırmalar, sıradan öğütme yardımcılarının ve beton katkılarının normal öğütme koşullarına karşı dayanıklı olduklarını göstermiştir. Ancak, eğer çimento haftalarca 50°C'nin üstünde bekletilirse, kayda değer bir bozulma görülebilir. Bu durum siloların sıcak çimento ile doldurulduğu koşullar için geçerlidir.

Çizelge 2.6 Klinker için öğütme yardımcısı olarak kullanılan kimyasalların kaynama noktaları [50]

Kaynama noktası aralığı (°C)	Örnek	Kaynama noktası (°C)	Moleküler formülü	Moleküler ağırlığı (g/mol)
<100 Çok düşük	Etanol*	78	C ₂ H ₆ O	46
80-120 Öğütme sıcaklığı				
100-200 Düşük	Propilen glikol PG	188	C ₃ H ₈ O ₂	76
200-300 Orta	Dietilen glikol DEG	245	C ₄ H ₁₀ O ₃	106
300< Yüksek	Trietanolamin TEA	355**	C ₆ H ₁₅ NO ₃	149
150< Ayrışma***	Polikarboksilat eterler PCE		C _{2x} H _{4x} O _x	25000-50000

* Etanol ve diğer kaynama noktası çok düşük olan çözücüler ticari olarak kullanılmamaktadır.

** Tahmini bir değer, diğer referanslara göre 360°C, ayrışma>190°C

*** Ayrışma hızı bileşiğe ve diğer koşullara (sıcaklık, oksijen mevcudiyeti, tabaka kalınlığı, alt tabaka vb.) bağlıdır. Ayrışma birçok organik bileşik için 100 ile 200°C arasında başlar.

Öğütme yardımcılarının soğurulması genellikle tersinirdir. Olağan öğütme sıcaklıklarında (80-120°C), bağlayıcı kuvvetler zayıf olduğu için, klinker yüzeyine soğurulan moleküller ayrışabilmektedir. Sıvıların kaynama noktası ile moleküller arası etkileşimi (bir molekülün diğerine soğrulma gücü) ilişkilidir. Eğer sıvılar birbiri ile kimyasal olarak benzerse, klinker yüzeyine soğrulma güçleri kaynama noktaları ile ilişkilidir.

2.4. Öğütme Yardımcılarının Öğütme Sırasında Yayılma Mekanizmaları

Öğütme yardımcılarının öğütme sırasında, gaz fazında veya yüzey teması ile olmak üzere yayılmaları iki temel mekanizma ile gerçekleşmektedir. Bu durum basit bir kesikli öğütme testi ile ispatlanabilmektedir. Örneğin, kaynama noktaları öğütme sıcaklığından daha düşük olan çeşitli alkollerin öğütme verimliliğini belirgin bir şekilde arttırdığı görülmektedir (Çizelge 2.7) [50].

Alkollerin, soğuk çimento üzerinde bile kokuları olabilmektedir. Alkoller uçucu özelliklerinden dolayı zayıf kuvvetlerle soğurulmaktadırlar. Bu nedenle, alkollerin tamamının veya bir kısmının gaz fazında yayıldığı kabul edilmektedir.

Diğer bir yandan polikarboksilat eterler (PCE) de öğütme verimliliğini arttırmaktadır. Polikarboksilatlar sadece tersinir olmayan ayrışma ile buharlaşabilmektedirler. Ancak, bu moleküller öğütme sırasında büyük ölçüde bozulmadan kalmaktadır [53,54]. Bu

moleküller ayrışmadan kalarak, beton akışkanlaştırıcı olarak görev yapmaktadırlar. Bu nedenle buharlaşma ihtimalleri düşük olduğu için bu moleküllerin yayılması yüzey teması ile gerçekleşmelidir.

Çizelge 2.7 Klinker ve çözücülerle laboratuvarda yapılmış olan öğütme testi sonuçları [50]

	Kaynama Noktası (°C)	32 µm bakiyesi (%)	Blaine (cm ² /g)
Referans (saf klinker)		35.3	2325
Su	100	31.3	2710
Heksan	69	31.8	2645
Gaz yağı	170	30.7	2740
Aromatiklerin karışımı	180	29.9	2740
Kolza tohumu yağı	360*	29.5	2785
Dioksan	101	29.8	2810
Aseton	56	29.5	2790
Etil asetat	77	28.3	2870
Isopropanol	82	27.0	2983
Dietilen glikol	245	27.3	2973

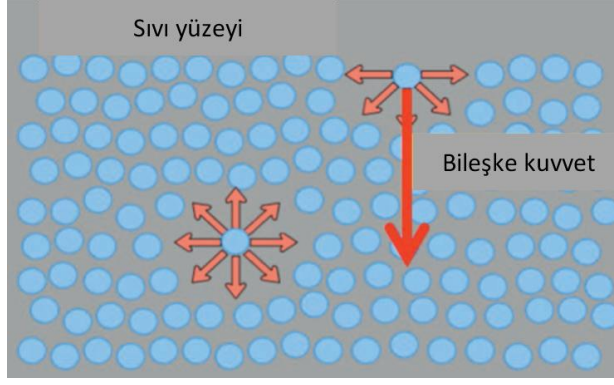
* Kolza tohumu yağı 200 °C'nin üstünde ayrışmaktadır.

Ticari olarak kullanılan öğütme yardımcılarının kaynama noktaları ve ayrışma sıcaklıkları öğütme sıcaklığından oldukça yüksektir ör. PG, DEG, TEA, (Çizelge 2.6). Bunların buhar basınçları düşük olmasına rağmen; muhtemelen, yüzey teması ile taşınmalarının yanında, gaz fazında da yayılmalarına imkân verecek kadar buhar basıncı oluşmaktadır [50].

Klinker yüzeyine soğrulan sıvılar gaz fazları ile denge halindedirler. Buhar basıncı moleküllerin kaynama noktalarına, sıcaklıklarına ve üzerine soğruldukları katı maddeye bağlıdır. Örneğin, gaz fazında en fazla propilen glikol (k.n. 188°C), sonra dietilen glikol (k.n. 254°C) ve en düşük trietanolamin (k.n. 335°C) yayılır. Gaz fazında yayılan moleküllerle, yüzey teması ile yayılan moleküllerin oranını hesaplamak çok zordur ve tam olarak bilinmemektedir. Bu oran sadece öğütme yardımcısına değil aynı zamanda değirmene ve öğütme parametrelerine de bağlıdır. Moleküllerin yüzeylere temas ederek yayılma ihtimalleri, gaz fazında yayılma ihtimalinden daha fazladır.

2.5. Öğütme Yardımcılarının Klinker Yüzeyine Soğurulması

Atomlar, moleküller ve iyonlar daima birbirleri ile etkileşim halindedirler. Homojen katı ve sıvı içinde, eşit büyüklükte ve zıt yönlü olan kuvvetler birbirini dengeler. Yığın içindeki net kuvvet sıfırdır. Fakat kohezyondan dolayı yüzeylerdeki bileşke kuvvetin yönü içe doğrudur. Hava-sıvı yüzeyi Şekil 4'te görülmektedir [55].



Şekil 2.4 Moleküllere uygulanan farklı yöndeki kuvvetlerin şematik gösterimi [55]

Yeni bir yüzey alanı oluşturmak için yüzey gerilimine karşı ilaveten bir iş yapılmalıdır. Daha ince su püskürtmek için hortumun ucunda daha yüksek basınç uygulanması gerekmektedir. Çünkü fazla miktardaki küçük su damlacıkları, az miktardaki geniş su damlacıklarından daha fazla enerjiye sahiptir. Benzer şekilde toz halindeki malzeme de iri tanelerden daha fazla enerjiye sahiptir. Çimentonun öğütmesi sırasında harcanan enerjinin çok büyük bir kısmı ısıya dönüşürken, ancak bu enerjinin çok küçük bir kısmı ($\leq \% 0.5$) yüzey enerjisi olarak çimentoda kalmaktadır (Çizelge 2.8).

Çizelge 2.8 Öğütme yardımcılı ve öğütme yardımcısız yüzey ve aglomerasyon enerjileri [56]

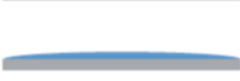
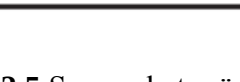
	1 g çimento başına düşen enerji (mj/g)*	1 m ² çimento başına düşen enerji (mj/m ²)*	Öğütme enerjisi (%)
Çimento öğütme enerjisi (tipik değeri**): 40 kW/s/t	144000	240000	100.00
Kuru C ₃ S'in yüzey enerjisi	800	1340	0.56
Kuru C ₃ S'in aglomerasyon enerjisi	270	450	0.19
Hidratlı C ₃ S'in aglomerasyon enerjisi	140	230	0.10
Hidratlı ve gliserinli C ₃ S'in aglomerasyon enerjisi	70	120	0.05
Hidratlı ve MDIPA'lı C ₃ S'in aglomerasyon enerjisi	30	50	0.02

* Tipik çimento yüzeyi (BET değeri): 0.6 m²/g. (yaklaşık Blaine değeri 3000 cm²/g)

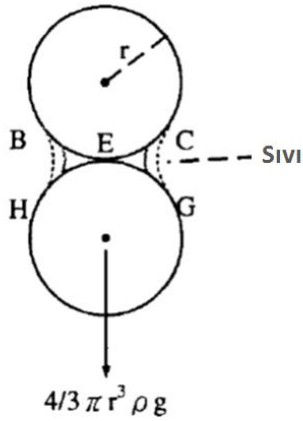
** Öğütme yardımcısı daha iyi kullanıldıkça enerji tüketimi de azalacaktır. Burada belirtilen kaba değerler yüzey ve aglomerasyon enerjilerinin ne kadar küçük olduğunu göstermektedir.

Sıvıların katı yüzeyler üzerindeki davranışları çeşitlilik göstermektedir. Damlacık şekli her zaman sistemin ulaşabileceği en düşük enerji seviyesinde oluşmaktadır (Şekil 2.5). Bu durum, sıvının yüzey enerjisine (yüzey gerilimine), katının yüzey enerjisine ve iki bileşiğin ara yüzey enerjisine (karşılıklı etkileşimlerine) bağlıdır.

Yüksek yüzey gerilimine sahip sıvılar, düşük yüzey enerjili katıları ıslatmazlar; örneğin cıva metal olmayan yüzeyler üzerinde damlacık halinde kalmaktadır. Diğer bir yandan, düşük yüzey gerilimine sahip sıvılar, yüksek yüzey enerjili maddeler üzerine yayılmaktadırlar. Yüzeye işleyici yağ, en ince çatlaklara kadar nüfuz etmekte ve en sonunda parçanın tamamını kaplamaktadırlar. Benzer şekilde öğütme yardımcıları da klinkerin dış yüzeyine yayılmaktadırlar.

Damla şekli	Islanma	Temas Açısı	Arayüzey Erki	Örnek
	Islatmayan	$\sim 180^\circ$	$>>>> 0$	Ametaller üzerinde cıva
	Kısmen ıslatmayan	$< 180^\circ$	$>>> 0$	Teflon üzerinde su
		90°	$>> 0$	
	Kısmen ıslatan	$> 0^\circ$	> 0	Plastik üzerinde öğütme yardımcısı
	Tamamen ıslatan	$\sim 0^\circ$	$= 0$	Klinker üzerinde öğütme yardımcısı
	Yayılan	0°	< 0	Klinker üzerinde öğütme yardımcısı

Şekil 2.5 Sıvı ve katı yüzeylerinin etkileşimine bağlı olarak damla şekli



Şekil 2.6 Neme bağlı olarak tanelerin yapışması

$$l\sigma \geq \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g \quad (2.1)$$

- σ : birim sıvı uzunluğundaki yüzey gerilimi
- l : BEC dairesel yayın uzunluğu
- g : yer çekimi ivmesi
- ρ : tanenin yoğunluğu

Nemin taneler arasındaki kuvvetler üzerine etkileri de incelenmiştir [57]. Şekil 2.6’da taneler arasında nem olduğu durum görülmektedir. Sıvının oluşturduğu BEC uzunluğunun değişmesine bağlı olarak, taneler arasındaki ara yüzey gerilimi de değişmektedir. Eşitlik 2.1’de eşitliğin sol tarafı, sağ tarafından büyük olduğunda yapışma olayı gerçekleşmektedir. Nem içeriğine bağlı olarak ince tanelerin birbirine yapışması Çizelge 2.9’da verilmiştir.

Çizelge 2.9 İnce toz içinde tanelerin birlikte kalması için gerekli olan nem miktarı

Tanenin çapı (µm)	127	63	46
Nem (katının kütlece yüzdesi)	1	0.5	0.2

Kuru klinkerin yüksek yüzey enerjisi su ile belirli bir düzeye kadar azaltılabilmektedir. Daha fazla azalma ise organik öğütme yardımcıları ile mümkün olmaktadır. Organik katkıları aynı zamanda saf halleriyle de iş yapabilmektedirler; ancak, teknik ve ekonomik olarak en uygun hale getirilebilmeleri için çoğunlukla su ile karıştırılmaktadırlar. Her iki durumda da öğütme yardımcıları yüzey enerjisini azaltmaktadırlar.

Bu işlem Eşitlik 2.2’de görüldüğü gibi üç bölümden oluşmaktadır. Suyun ve öğütme yardımcısının varlığında klinkerin yüzey enerjisi azalma eğilimindedir. Klinkerin (E_{SC} : klinkerin yüzey enerjisi) kaybettiği yüzey enerjisini öğütme yardımcısının kazanmasına bağlı olarak, öğütme yardımcılarının yüzeyi artmalıdır. Örneğin, öğütme yardımcısının yüzey enerjisinden (E_{SG}) klinkerin yüzey enerjisinin (E_{SC}) daha büyük olması gerekmektedir ve klinkerle öğütme yardımcılarının ara yüzey enerjilerinin oranı ($E_{I\ C/G}$) negatif veya çok küçük bir pozitif değer olmalıdır.

$$-E_{SC} + E_{SG} + E_{I\ C/G} = E_{S\ CG} \quad (2.2)$$

Eğer öğütme yardımcısı ile kaplanan klinkerin yüzey enerjisi ($E_{S\ CG}$) negatif ise, (ör. kaplanma sırasında enerji açığa çıkıyorsa), öğütme yardımcısı herhangi bir mekanik yardıma bile ihtiyaç duymadan yayılabilmektedir ve klinker yüzeyindeki öğütme yardımcısının temas açısı 0° ’dir (Şekil 2.5). Bu durum, öğütme yardımcılarının klinkerin yüzey enerjisini (E_{SC}) düşürürken aynı zamanda klinkerin üzerine yeterince güçlü bir şekilde soğrulduğu anlamına gelmektedir (ara yüzey enerjisi $E_{I\ C/G}$ düşüktür). Bu iki özellik ancak kısmi olarak birbiri ile ilişkilendirilebilmektedir. Bu durum, en düşük yüzey enerjisine sahip öğütme yardımcısının en verimli olacağı anlamına gelmez. Yapılan kapsamlı deneyler (Çizelge 2.10), orta değerlerin ($30 - 50\text{ mJ/m}^2$) daha uygun olduğunu göstermektedir [50].

Kutupsal olmayan çözücüler, yakıtlar ve yağlar düşük yüzey gerilimine ve yüzey enerjisine sahiptirler. Bunların moleküllerinde, kutupsal işlevsel gruplar ya hiç bulunmazlar; ya da, bulunsalar bile çok zayıftırlar ve bu nedenle, kutupsal bileşiklerle çok zayıf bir etkileşim halindedirler. Bunlar su ile karışmazlar; fakat, kutupsal klinker yüzeyi üzerinde hızlı bir şekilde yayılırlar. Klinkerle olan zayıf etkileşimlerinden dolayı, klinkere çok zayıf düzeyde soğrulurlar ve taneler arasında yeterince sağlam bir ayırıcı tabaka oluşturamazlar. Topaklanmayı oluşturan klinker taneleri, kuvvetli kutupsal etkileşimlerle bir arada tutulmaktadır. Bu nedenle, düşük yüzey gerilimlerine sahip olmalarına rağmen, kutupsal olmayan sıvıların, öğütme yardımcısı olarak kullanılmaları uygun değildir (Çizelge 2.8 ve Çizelge 2.10) [50].

Diğer bir yandan, ticari olarak kullanılan öğütme yardımcıları, kutupsal işlevsel gruplarla beraber kutupsal olmayan hidrokarbon zincirlerinden oluşmaktadır. Kutupsal işlevsel gruplar klinkerle kolayca etkileşime girmektedirler.

Çizelge 2.10 Öğütme yardımcılarının kaynama noktaları, yüzey enerjileri (yüzey gerilimi) ve polaritesi [50]

Sıvı	Kaynama noktası (°C)	Yüzey enerjisi/Yüzey gerilimi (mJ/m veya mN/m)	Polarite (etkileşim)
Civa	357	476	(Metalik)
Su	100	71	Yüksek
Su ile yüzey etkin malzeme	100	30	(Polar)
Gliserin	290	63	Orta
Etilen glikol	196	48	
Dietilen glikol (DEG)	245	45	
Propilen glikolo (PG)	188	36	
Etanol	78	22	Düşük (polar olmayan)
Kolza tohumu yağı	360	32	
Dizel yakıt*	200-300	28	
Heksan	69	18	
Sıvı nitrojen	-196	9	Çok düşük

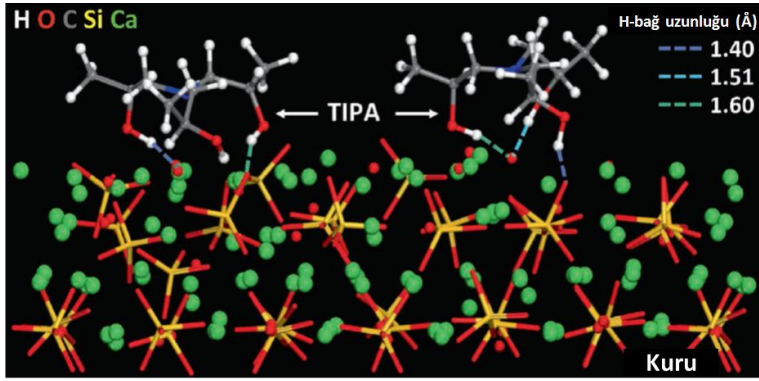
*Dizel yakıt gaz yağı ve aromatikleri içermektedir.

*Kolza tohumu 200 °C'nin üstünde ayrışmaktadır.

Aktif bileşenlerin çoğu kutupsal organik hidroksil gruplara (R –OH) sahip alkollerden oluşan. trietanolamin, trialkol ve dietilen glikol dialkoldür. Ayrıca, izopropanol gibi mono alkoller kullanıldığında da öğütme verimliliği artmaktadır. Fakat bunlar, düşük kaynama noktalarından dolayı (< 100°C) ticari olarak kullanılmamaktadırlar (Çizelge 2.7).

Mishra [56], bilgisayar benzetimleri yardımı ile moleküllerin kutupsal işlevsel gruplarının yönünün her zaman klinker yüzeyine doğru dönük olduğunu göstermiştir. Şekil 2.7'de kuru trikalsiyum silikat (C₃S, Alit) üzerindeki iki tri-izopropanol amin molekülü

görülmektedir. Kutupsal alkol grupları (-OH) klinkerin kutupsallığını dengelerken, kutupsal olmayan hidrokarbon grupları (R = alkali ör. CH₃ veya alkaline ör. -CH₂-CH₂) bunları çevrelemektedir. Çimento taneleri arasındaki çekim kuvvetleri, yüzey kutuplaşmasının azalmasına bağlı olarak zayıflamaktadır. Bu durum topaklanma eğilimini azaltmakta ve öğütme verimini arttırmaktadır. Kapsamlı laboratuvar denemeleri sadece iyi bilinen glikollerin ve alkanolaminlerin öğütme yardımcısı olarak kullanımına uygunluğunu teyit etmekle kalmamış, aynı zamanda molekül yapısı ile verimlilik arasındaki ilişkiyi de ortaya çıkarmıştır. [56]



Şekil 2.7 İki TIPA (triziopropanolamin) molekülünün kuru C₃S (trikalsiyum silikat, alit) üzerindeki etkileşimi [56]

Şekil 2.8’de öğütme sırasında yeni yüzeylerin hangi yollarla oluştuğu ve sonrasında gerçekleşen kimyasal ve fiziksel işlemler görülmektedir. Şekillerde, klinker fazının yerine basitleştirilerek kalsiyum oksit (CaO) kullanılmıştır. Açıkta kalan yüzey iyonları tam yükleri ile gösterilmişlerdir (Ca⁺², O⁻²); fakat bütün bir kristal yüksüzdür, bu nedenle kristal yapı içerisindeki yükler yazılmamıştır. Şekilde düşük kutuplu iyonlar açık renkli kareler ile gösterilmiştir. Şekilde, birbirinden ayrılan yüzeyler arasındaki zayıf çekim kuvvetleri, daha ince oklarla gösterilmiştir. Kırılan tanelerin yüzeyinde, yüklü iyonların kalması, ancak ortamda hiç su bulunmazsa mümkündür ve ihtimali düşüktür (Şekil 2.8). Yeni ayrılan yüzeylerdeki atomlar en düşük enerji seviyesinde ve en uygun yük dengesine ulaşacak şekilde hızlıca kendilerini yeniden konumlandırmaktadırlar. Ortamda su (hidroksil iyonları) olması durumunda ise hidrojen iyonlarının (protonların) aktarımı piko saniyelik bir zamanda, bilinen en hızlı kimyasal işlemlerden biri olarak gerçekleşmektedir [52].

Kırılma sırasında, klinkerdeki çatlaklar oldukça hızlı ilerlemektedir. Benzetim sonuçları alit mineralinin yarıлма yüzünde bu hızın 11.500 km/sa’te kadar ulaştığını göstermektedir ki; bu da sesin havadaki hızının yaklaşık on katı kadardır. Sıvıların yayılma hızları ise

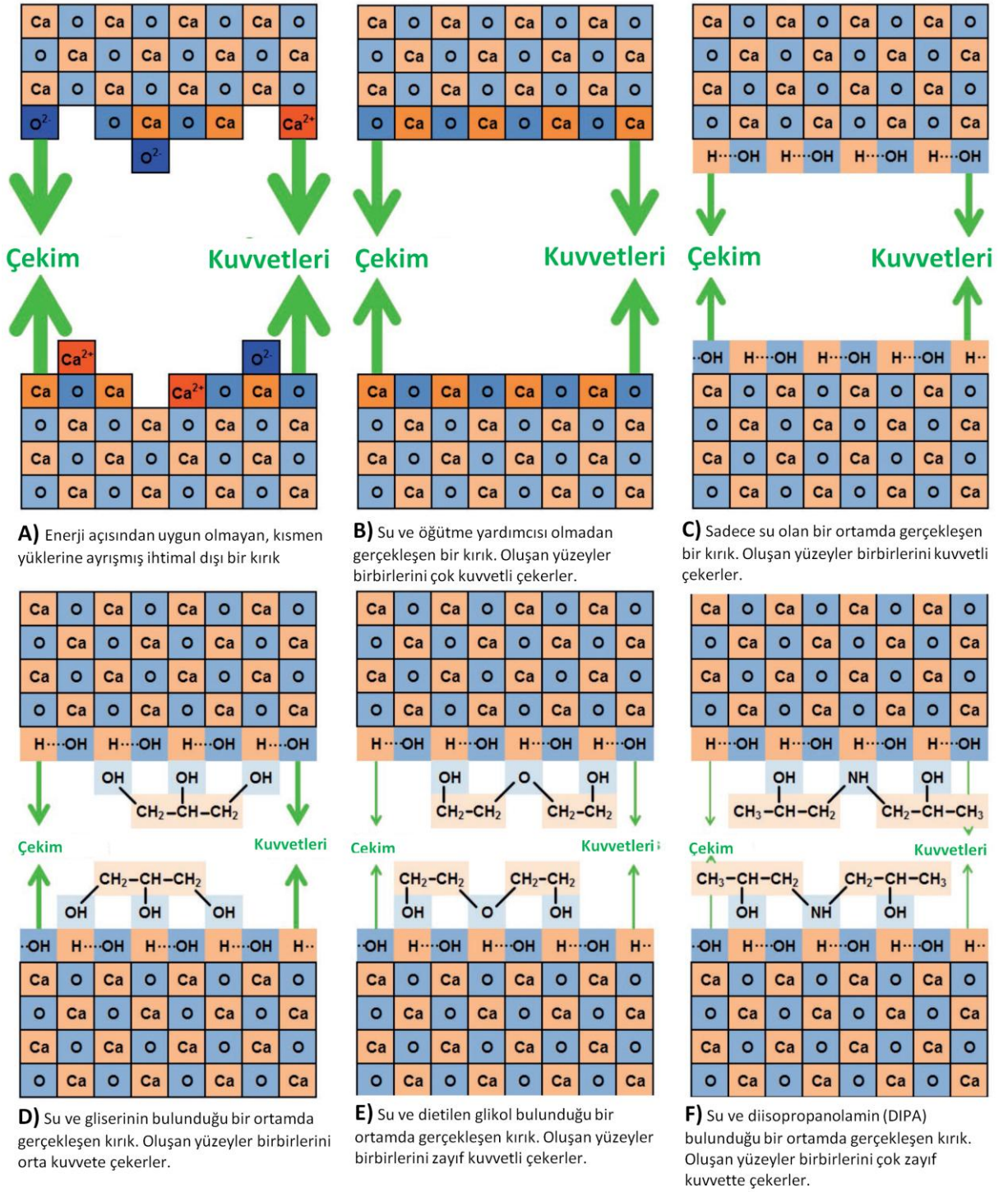
önemli ölçüde daha düşüktür [50]. Islatma hızları ise şartlara bağlı olarak 1 µm/s ile 10 m/s (36 km/sa) arasında değişmektedir (Şekil 2.5) [58]. Sıvıların yayılma hızları, çatlakların ilerleme hızlarından çok daha yavaş olduğu için ve yük dengesi de çok hızlı gerçekleştiği için, öğütme yardımcılarının çok büyük bir kısmının yüksüz yüzeylere soğrulduğu farz edilebilir (Şekil 2.8, B-C). Bu durum, klinker için doğrudan ispat edilmemiştir; fakat, incelenen tüm iyonik bileşikler için geçerlidir. Karşılıklı olarak yükleri dengeleyen organik asitler ve tuzları ve dördüncül amonyum bileşikler, alkollere göre daha kötü sonuçlar vermektedir. Bu, öğütme yardımcılarının etki mekanizmasını çoğunlukla yük dengeliği ile açıklayan fikir ile çelişmektedir [50].

Artan sıra ile su, gliserin, dietilen glikol ve diisopropanolamin öğütmeyi kolaylaştırmaktadır (Şekil 2.8, C-F). Su, kendilerini konumlandırabilen pozitif hidrojen iyonlarına ve negatif hidroksit iyonlarına ayrılmakta ($H_2O \rightarrow H^+ \cdots OH^-$) ve böylece klinkerin kutupsallığı azalmaktadır. Öğütme yardımcılarının alkol grupları (R-OH), yüzeydeki kutupsallığı daha da azaltmaktadır. Hidrokarbon kısımları (CH, CH₂ ve CH₃) polar gruplara kalkan oluşturmaktadır. Hidrokarbon kısmı en küçük olan gliserindir (Şekil 2.8, D). Gliserini sırasıyla dietilenglikol (Şekil 2.8, E) ve diisopropanolamin (Şekil 2.8, F) takip eder. Moleküllerin hidrokarbon kısımları büyüdükçe kapladıkları çimento tanesinin yüzey enerjisi azalmakta ve öğütme kolaylaştırıcı etkileri artmaktadır [50].

Şekil 2.8’de gösterilen modeller, hem pratik deneylerle güzel bir ilişki sağlamakta, hem de moleküler benzetim ile bulunan moleküler düzenleme biçimine uyum sağlamaktadır. Değirmende öğütme yardımcılarının kullanılmadığı durumlarda (Şekil 2.7, A-B) görülen topaklanma ve sıvanma (Şekil 2.2), öğütülen çimento tanelerinin birbirleri ve değirmen ortamı ile aralarındaki çekim kuvvetlerinden ve dolayısıyla yüzey enerjisinden kaynaklanmaktadır [50].

2.6. Moleküler Modelleme (Bilgisayar Benzetimi)

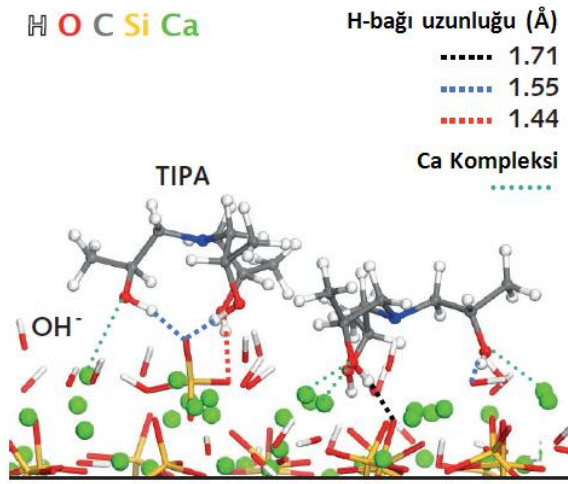
Sıcaklık veya tane boyu inceliği gibi makroskopik özellikler genellikle çeşitli mekanik, fiziksel ve kimyasal işlemlerin sonucudur ve ölçümleri nispeten kolaydır. Diğer bir yandan, çoğu zaman, yüzeyde gerçekleşen soğrulma enerjisinin, aglomerasyon enerjisinin ve moleküler etkileşim mekanizmasının belirli değerleri ve eğilimleri hakkında yalnızca moleküler modelleme fikir verebilmektedir. Tanıdık metotlardan biri rastlantı prensibine dayanan Monte Carlo benzetimidir. Fakat, Mishra [56] yapmış olduğu doktora tez çalışmalarında bu amaç için daha uygun olan “moleküler dinamik benzetim” kullanılmıştır [56].



Şekil 2.8 Öğütme sırasında yeni yüzeylerin oluşması ve sonrasında gerçekleşen fiziksel ve kimyasal işlemler [50]

NVT moleküler dinamiğinde, tanelerin sayısı (N), hacim (V) ve sıcaklık (T) benzetim sırasında sabit kalmaktadır. Herhangi bir atomistik modelleme çalışmasının en önemli kısmı, her bir bileşik için, deneysel ölçümlerle karşılaştırıldığında fiziksel ve kimyasal özellikleri tutarlı olan, doğrulanmış güç alanı parametreleridir [56].

Şekil 2.7’da diisopropanolaminin (DIPA) adsorpsiyonu şematik olarak verilmektedir. Triisopropanolaminin (TIPA) hidroksitlenmiş trikalsiyum silikat (C_3S , alit) üzerindeki uzaysal olarak düzenlenmiş dizilimi ise Şekil 2.9’de verilmektedir. Triisopropanolaminin (TIPA) alkol gruplarındaki hidrojen atomları (H), silikadaki ve hidroksit iyonlarındaki oksijen atomları (O) ile hidrojen bağları oluşturmaktadır. Hesaplanmış ortalama bağ uzunlukları Şekil 2.9’de görülmektedir. Triisopropanolaminin (TIPA) alkol gruplarındaki oksijen atomları alitteki (C_3S) kalsiyum iyonları ile etkileşim halindedir. Benzer etkileşim ve dizilimler diğer klinker fazları (C_2S , C_3A) ve öğütme yardımcıları için de geçerlidir [59].



Şekil 2.9 Hidroksillenmiş (OH^-) trikalsiyum silikat (C_3S) yüzeyi üzerindeki iki triisopropanolamin (TIPA) molekülünün basitleştirilmiş görüntüsü

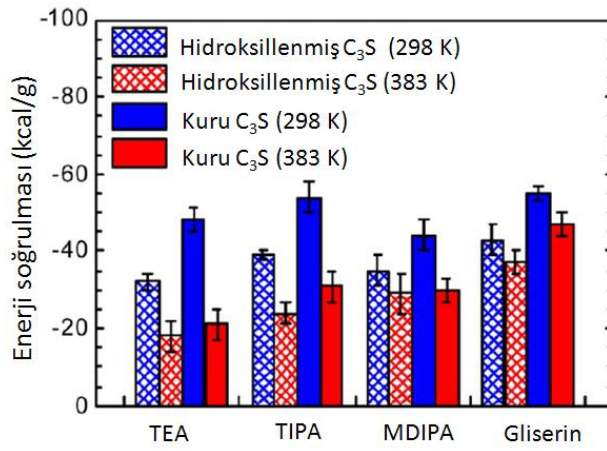
Öğütme etkisinin, soğrulma gücüne bağlı olup olmadığını açıklığa kavuşturmak için klinker yüzeyindeki çeşitli organik bileşiklerin soğrulma enerjileri belirlenmiştir. Bunun için öğütme yardımcısı ve C_3S ’in yüzey ve ara yüzey enerjilerinin hesaplanması (Eşitlik 2.2) yerine, gaz fazdaki moleküllerin C_3S üzerine soğrulurken gerçekleşen enerji salınımları doğrudan benzetim yöntemiyle belirlenmiştir.

Organik bileşiklerin C_3S ’e soğrulma enerjilerine göre sıralamaları, koşullara bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Şekil 2.10). 110 °C’de (383 K; tipik öğütme sıcaklığı) ve hidroksillenmiş yüzeye en kuvvetli olarak gliserin bağlanırken en zayıf olarak da TEA bağlanmaktadır.

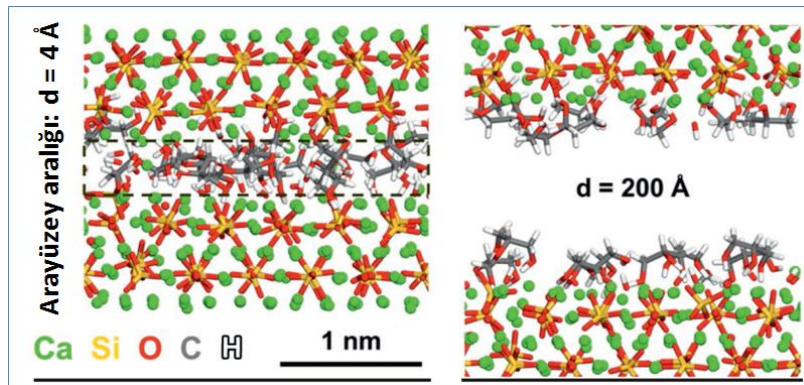
C_3S yüzeyine soğrulma enerjilerinin sıralaması $TEA < TIPA < MDIPA < gliserin$ şeklindeyken, klinkerin öğütme verimliliklerinin sırası $gliserin < TEA < TIPA < MDIPA$ şeklindedir. Klinker ile yapılan öğütme testlerinde farklı Blain ve bakiye (32 μm) değerleri

elde edilmiştir. Öğütme üzerinde en zayıf etkiyi gliserin gösterirken, en etkili metil diaisopropanolamin (MDIPA) olmuştur. Soğrulma enerjileri ile öğütme verimlilikleri arasında bir ilişki yoktur. Öğütme verimliliği diğer parametrelere bağlıdır [59].

Aglomerasyon enerjisi, kırılarak serbest hale gelen iki paralel yüzeyi bir araya getirmek için salınan enerji veya bu iki yüzeyi ayırmak için gerekli olan enerji olarak tanımlanabilir. Şekil 2.8’de kuru ve hidroksillenmiş trikalsiyum silikat yüzeyleri (“C₃S”, “HC”), öğütme yardımcıları olmadan ve çeşitli öğütme yardımcıları ile benzetim yöntemi ile kıyaslanmıştır. Şekil 2.11’de C₃S’in yarılan yüzeyleri arasında ayrı ve hapsolmuş durumda bulunan tek katmanlı gliserin tabakaları görülmektedir [52].



Şekil 2.10 Trietanolamin, triisopropanolamin, metil-diisopropanol-amin ve gliserinin hidroksillenmiş ve kuru C₃S (trikalsiyum silikat) yüzeyine 25 °C ve 110 °C sıcaklıklardaki hesaplanmış enerji soğurulmaları. Yüksek sıcaklıklara göre düşük sıcaklıklarda ve hidroksillenmiş yüzeylere göre kuru yüzeylerde soğurulma daha kuvvetli. [59]

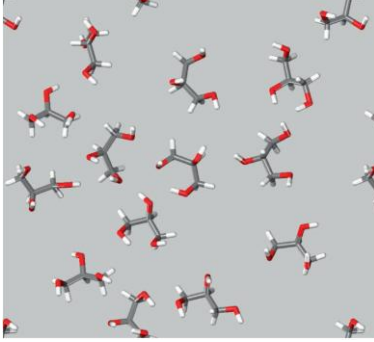


Şekil 2.11 Ortalarında gliserin bulunan C₃S yüzeyleri [52]

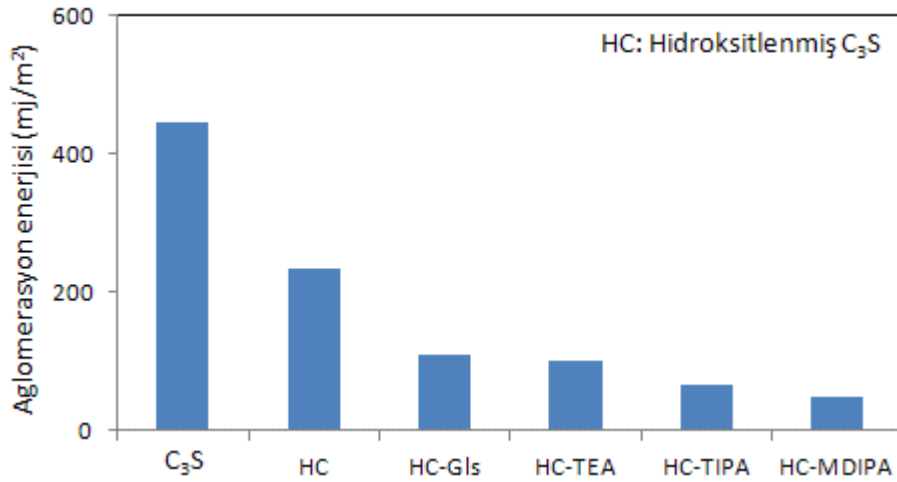
Hesaplanan bu iki enerji seviyesi arasındaki değer aglomerasyon enerjisidir. Yüzeyler ayrı durumdayken (Şekil 2.11) gliserin moleküllerinin dağılımı önemli bir rol oynamaz [52]. Eşit dağılımlı bir örnek Şekil 2.12’de gösterilmektedir.

Laboratuvar testlerinde, 90 °C’de, aglomerasyon enerjisinin öğütme performansı ile ters orantılı olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 2.13). Aglomerasyon enerjileri $C_3S > HC > HC$ -gliserin $> HC$ -TEA $> HC$ -TIPA $> HC$ -MDIPA şeklinde sıralanırken, öğütme verimliliği klinker $< HC < HC$ -gliserin $< HC$ -TEA $< HC$ -TIPA $< HC$ -MDIPA şeklindedir [52].

Bütün klinker fazları aynı davranımı göstermemektedir. Şekil 2.14’ten görüldüğü üzere, trikalsiyum alimünat (C_3A) için aglomerasyon enerjileri ve sıralanışı oldukça farklıdır. Aglomerasyon enerjileri $C_3A > HC > HC$ -TIPA $> HC$ -gliserin $> HC$ -TEA $> HC$ -MDIPA şeklinde sıralanmıştır [59].



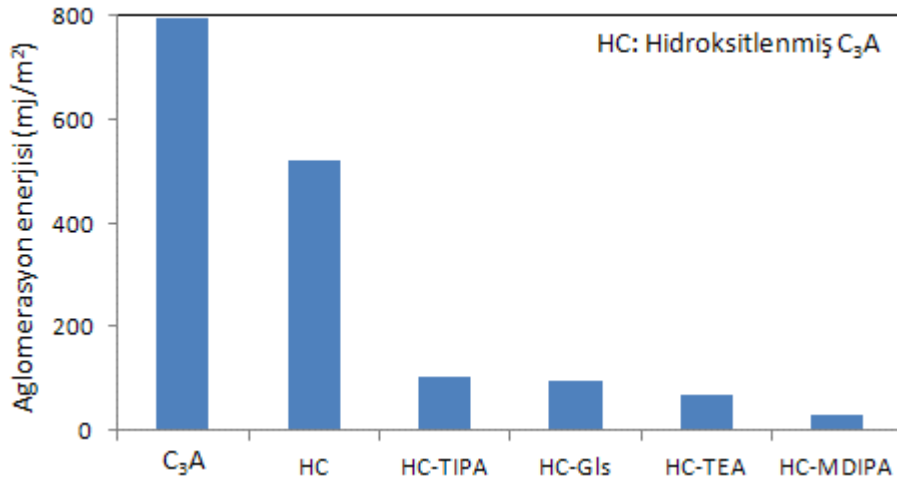
Şekil 2.12 Klinker yüzeyinin yaklaşık yarısını kaplayan gliserin moleküllerinin dağılımı



Şekil 2.13 90 °C’de kuru ve hidroksitlenmiş C_3S ’in bazı kimyasallarla aglomerasyon enerjileri [52]

TIPA ile kaplanmış C_3A yüzeyleri, TIPA ile kaplanmış C_3S yüzeylerinden daha yüksek aglomerasyon enerjisine sahip iken, diğer organik moleküller için bu durumun tam tersi geçerlidir. Daha da önemlisi, kuru ve hidroksitlenmiş C_3A ’nın aglomerasyon enerjisi, C_3S ’in kuru ve hidroksitlenmiş aglomerasyon enerjilerinin neredeyse iki katı kadardır. Bu nedenle, öğütme yardımcılarının C_3A üzerindeki olumlu etkisi C_3S ’inkinden önemli ölçüde

daha belirgindir. Bu demektir ki, öğütme yardımcıları, farklı öğütülebilirliğe sahip klinker fazlarını ve bu nedenle de farklı bileşimlere sahip klinkerleri bir dereceye kadar dengeleyebilirler [50]. Klinker fazlarından en kolay C_3S , sonra C_3A ve C_2S öğütülürken en zor öğütülen C_4AF 'dir [4]. Kimyasal bileşim ve mikro yapı (ör. gözeneklilik) de öğütülebilirlik üzerinde etkilidir [60]. Bilgisayar benzetimleri, öğütme yardımcılarının veriminin mineralojiye bağlı olduğunu göstermiştir (ör. farklı fazların yüzdeleri). Öğütme yardımcılarının, çimentonun yapısına bağlı olarak, her zaman aynı etkiyi göstermemelerinin nedenlerinden biri de budur [50].



Şekil 2.14 90 °C'de kuru ve hidroksitlenmiş C_3A 'nın bazı kimyasallarla aglomerasyon enerjileri [59]

Mishra [56], yapmış olduğu araştırmalar sonucunda, öğütme yardımcılarının her zaman aglomerasyon enerjisini düşürdüğünü ispatlamış ve yıllar önce ortaya atılmış olan çimento inceliğindeki öğütme verimliliğinin doğrudan aglomerasyon (ör. taneler arasındaki çekim kuvvetleri veya aglomerasyon enerjisi) oluşumuna bağlı olduğu hipotezinin doğruluğunu kanıtlamıştır.

2.7. Öğütme Yardımcılarının Dozaj Etkisi

Öğütme yardımcılarının etkisi dozaj seviyesine bağlıdır. Mishra [56], öğütme yardımcılarının üst verimlilik sınırını moleküler modelleme ile belirlemiştir. Bu sınıra, organik bileşikler klinkerin yüzeyleri arasında tek katmanlı bir tabaka oluşturduğu zaman ulaşılmaktadır. Daha fazla tabaka oluşması önemli bir gelişme sağlamazken, her hangi bir yan etkisi de olmamaktadır [56]. Örneğin, oldukça kutupsal olan C_3S yüzeyleri arasında gliserinin tek tabakalı katman oluşturmasıyla, C_3S arasındaki mesafe 4 Å'dur (Şekil 2.11). C_3S yüzeyleri hidroksitlendiği zaman aglomerasyon enerjileri yarı yarıya azalır. MDIPA

gibi daha verimli bir öğütme yardımcısı kullanıldığında ise, bu değer beşte birine kadar düşürülebilir (Şekil 2.13).

Etkili bir yüzey alanı için, örneğin $0.6 \text{ m}^2/\text{g}$ ($6000 \text{ cm}^3/\text{g}$ BET $\approx 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ Blaine), taneler arasında tek katmanlı bir gliserin tabakası oluşturmak için gerekli olan gliserin miktarı % 0.015'tir. Bu durumda, serbest bir tane yüzeyinin sadece % 50'si gliserin ile kaplanmıştır. Serbest bir tanenin tüm yüzeyini kaplamak (birbirine temas eden taneler için çift tabaka oluşturmak) için miktarın iki katına (% 0.03) çıkması gerekmektedir. Gerekli olan organik bileşik dozajı çimento inceliği ile orantılıdır [50] (Çizelge 2.11).

Çizelge 2.11 Çimento yüzeyini kaplamak için gerekli olan gliserin dozajı [50]

Çimento inceliği (Blaine)	Kütlece gliserin dozajı (%)	
	Tek katman	Çift katman
$3000 \text{ cm}^2/\text{g}$	0.015	0.03
$4000 \text{ cm}^2/\text{g}$	0.020	0.04
$5000 \text{ cm}^2/\text{g}$	0.025	0.05

Laboratuvarda yapılan denemelerde, öğütme yardımcılarının düşük doz aralıklarında miktarları artırıldıkça, öğütme verimliliğinin de arttığı gözlemlenmiştir. Dozaj üst aralığında, en verimli öğütme yapıldıktan sonra, daha da yüksek dozajlarda öğütme yardımcısının beslenmesi ile öğütme verimliliği kimyasalsız koşuldan bile daha düşük olabilmektedir [61]. Literatüre göre, kimyasallara bağlı olarak eklenmesi gereken en uygun organik bileşik seviyesi kütlece % 0.01 ile % 0.1 arasındadır. Bu dozajlar da, bir tanenin yüzeyinin tek katman olarak kaplanması için gereken miktarlara tekabül etmektedir [12]. Öğütme yardımcılarının, aşırı dozlarda etkisinin azalması katı yüzeyinde oluşan çok katmanlı tabakaya bağlanmaktadır. Bu durum topaklanmayı tetikleyen kılcal güçlerin oluşmasına neden olabilmektedir. Ayrıca, malzeme akışkanlığının aşırı artması, aşınma ile ufalanmayı azaltmakta ve iri tanelerin de değirmende kalma süresini kısaltmaktadır.

Yapılan endüstriyel çalışmalar, öğütme yardımcısının aşırı dozlarda kullanılmasının çimentonun değirmende kalma süresinin azalttığını ve bu nedenle, öğütmenin yetersiz kaldığını göstermiştir. Dolayısıyla, en uygun dozaj seviyesi, öğütme yardımcısının kimyasal yapısına, klinkere ve hammaddelere bağlı olduğu kadar, ürün inceliğine, öğütme sisteminin tipine ve çalışma koşullarına da bağlıdır.

Moleküler modelleme sonucunda, organik bileşiklerin en etkili oldukları dozajların çok düşük (% 0.015) olmasının bazı nedenleri vardır (Çizelge 2.11). Benzetimler, pürüzsüz C₃S yüzeyleri üzerinde yapılmıştır; fakat kırılmış klinkerde organik bileşiklerin birikebileceği pürüzler, girintiler ve küçük çatlaklar vardır. Buna bağlı olarak, özellikle iki tanenin birbiri ile temas edeceği açıktaki noktalara bu bileşikler soğurulamamaktadır. Bu nedenle, uygulamalarda, klinker yüzeyinin yarısını kaplayacağı miktardan daha fazla organik bileşik ilave edilmelidir. Bu birbiri ile temas eden yüzeyler arasında tek katmanlı bir tabaka oluştuğundan emin olmanın tek yoludur (Şekil 2.11) [50].

Öğütme yardımcısının etkili olmasında, kimyasalların yayılma hızlarının da bir rol oynaması muhtemeldir. Yüksek dozajlarda, öğütme yardımcısı daha hızlı yayılarak ve yeni oluşmuş klinker yüzeylerini kaplayarak daha az ve zayıf aglomerasyon oluşmasına neden olması sonucunda, öğütme verimliliğinin artacağı düşünülmektedir [50].

Benzetimler, denemeler ve daha önce yapılan çalışmalar, teknik olarak en etkili dozaja, klinker yüzeylerinin birbirinden en az tek katmanlı bir organik bileşik ile ayrıldığı zaman ulaşılabileceği konusunda hem fıkirdir. Gerekli olan miktar ise çimento inceliğine, daha doğrusu kaplanacak olan yüzey alanına bağlıdır. Diğer bir yandan, maliyet verimliliği açısından en uygun dozaj miktarı, üretimdeki artışa ve enerji, üretim, taşıma gibi maliyetlere bağlıdır [49].

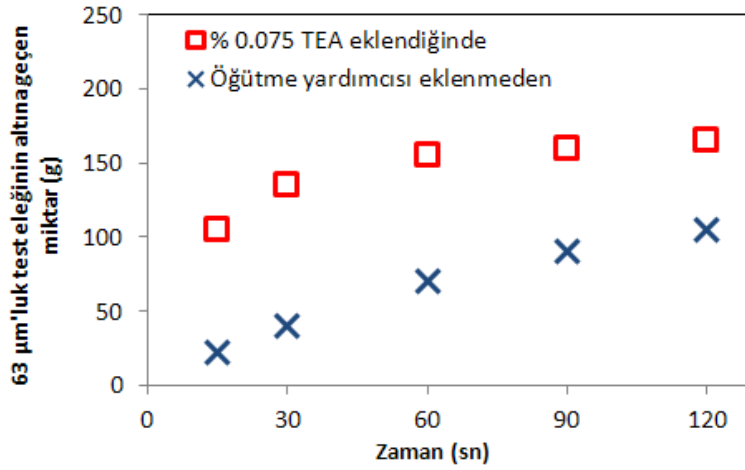
2.8. Öğütme Yardımcıların Malzeme Akışkanlığı Üzerine Etkileri

Jolicoeur vd. [49] poliol bileşiklerin çimento öğütme yardımcısı olarak kullanılabilirliklerini test etmişlerdir. Bu bileşiklerin çimento akışkanlığı üzerine etkileri incelenmiş ve en iyi akışkanlık, büyük ölçüde diol moleküllerinin alifatik gruplarına bağlı olarak, düşük moleküler ağırlıklı 1,2-dioller ile elde edilmiştir.

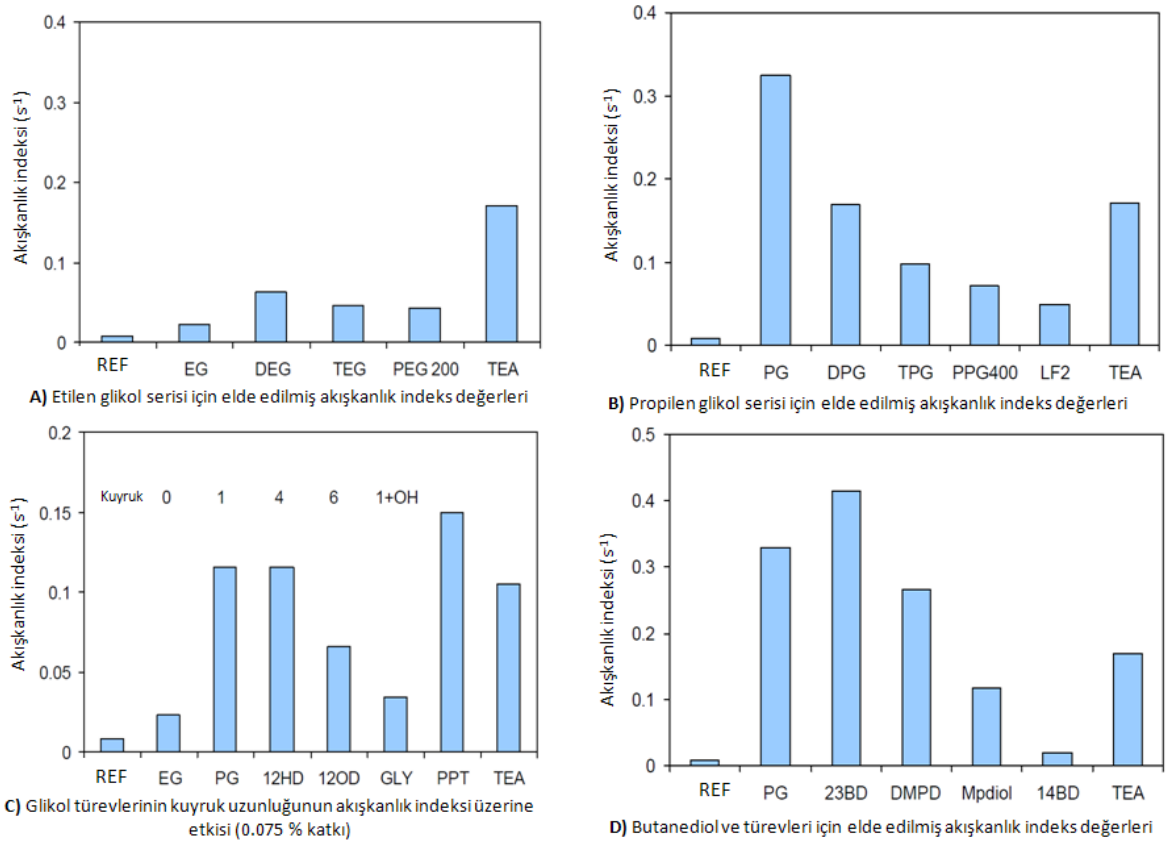
Akışkanlığının belirlenmesi için 200 g çimento ve katkı karışımı, 63 µm'lik titreşimli elekten belirli süreler boyunca elenmiştir ve aşağıdaki gibi formüle edilmiştir.

$$\frac{P}{P_{max}} = \frac{bt}{1 + bt} \quad \text{veya} \quad \frac{t}{P} = \frac{1}{bP_{max}} + \frac{t}{P_{max}} \quad (2.3)$$

Bu formülde P , t zamanında elek altına geçen çimento miktarını, P_{max} elek altına geçen azami malzeme miktarını ve b akışkanlık indeksini simgelemektedir. Şekil 2.15'te öğütme yardımcısız ve TEA içeren çimento karışımının zamana bağlı olarak elek altına geçen yüzdeleri verilmiştir [49].



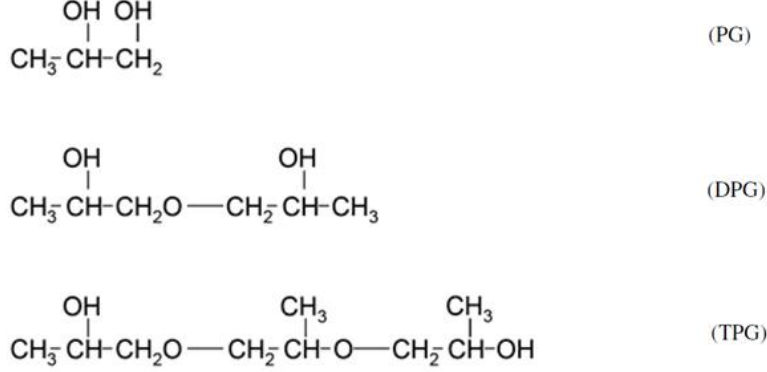
Şekil 2.15 Trietanol aminin çimento akışkanlığı üzerine etkisinin elek ile belirlenmesi [49]



Şekil 2.16 Farklı kimyasalların çimento akışkanlığı üzerine etkileri [49]

Etilen glikol serisinin yapısal formülü $\text{HO-CH}_2\text{-CH}_2\text{[-O-CH}_2\text{-CH}_2\text{]}_n\text{-OH}$ ($n=1,2,3$, EG, DEG, TEG) şeklindedir. Kütlece %1 etilen glikol ve oligomerler kullanılarak yapılan ilk incelemede, oligomerler arasında akışkanlığı en fazla arttıran bileşik olan dietilen glikolün bile TEA kadar etkili olmadığı gözlemlenmiştir (Şekil 2.16-A).

İkinci çalışmada propilen glikolden türetilen bileşiklerin akışkanlık üzerine etkileri incelenmiştir. Propilen glikol serisinin yapısal formülü $\text{HO-CH(CH}_3\text{)-CH}_2\text{-[O-CH}_2\text{-CH(CH}_3\text{)]}_n\text{-OH}$ ($n=1,2,3$ PG,DPG,TPG) şeklindedir (Şekil 2.17).



Şekil 2.17 Propilen glikol serisinin yapısal formülü [4]

Etilen glikol türevlerine göre propilen glikol serisinin daha etkili oldukları görülmüştür (Şekil 2.16-B). Ayrıca, akışkanlık indeksinin moleküler ağırlık ile ters orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Propilen glikol (PG) serisi içinde sadece monomer (PG), TEA'ne göre akışkanlığı daha fazla arttırmıştır. Ayrıca, moleküler ağırlığa bağlı olarak akışkanlık monomer (PG), dimer (DPG), trimer (TPG) sırasıyla azalmaktadır.

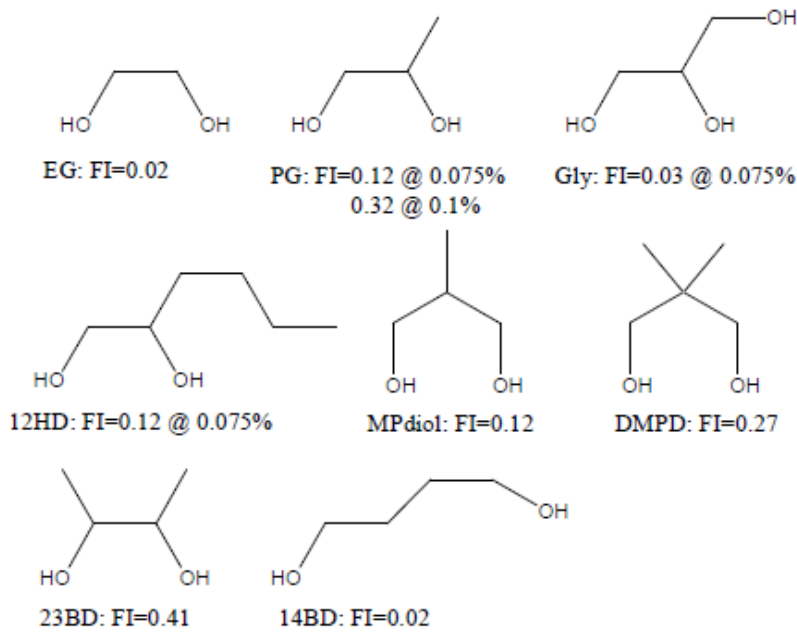
Şekil 2.16-C'de diollerin % 0.075 dozajda kullanıldığında alifatik kuyruklarının etkileri görülmektedir. En çok akışkanlık PG (1,2-propanediol) ve 12HD (1,2 hexanediol) ile sağlanmıştır. Bu etki büyük ihtimalle tanelerin birbirini itmesinden kaynaklanmaktadır ve en uygun koşul bazı kuyruk uzunluklarında oluşmaktadır. Şekil 2.16-B'de akışkanlığın polimerizasyona bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Şekil 2.16-C'de ise beklenmedik bir şekilde PPT (polipropilen glikol triol)'nin yüksek bir akışkanlık göstermiştir.

Şekil 2.17-D'de moleküler yapının etkisi görülmektedir. Butanedioldeki hidroksil gruplar çimentonun akışkanlık indeksi için belirleyici gözükmemektedir. Çimento akışkanlık indeksi 2,3-butanediol (23BD) kullanıldığında, 1,4-butanediol (14BD) kullanıldığında 16 kat daha fazla olmaktadır. Çimento akışkanlığı üzerinde bir birim 2,2-dimetil-1,3-propanediol (DMPD), bir birim 2-metil-1,3-propanediolden (MPdiol) daha etkilidir [49].

Moleküler yapı ile katkıların akışkanlık üzerine olan etkilerini inceleyen Joliceour vd. [49] şu kanılara varmışlardır (Şekil 2.18) :

- Etilen glikol ve gliserol gibi bileşiklerin hidrofobik kuyrukları yoktur ve çimento tanelerini itme güçleri zayıftır.

- Dietilen glikolün ve trietilen glikolün, etilen glikole göre hidrofilik özelliği daha zayıftır ve dolayısıyla akışkanlığı daha fazla arttırmaktadır.
- Propilen glikol, 2-metil-1,3-propanediol ve 2,3-butanediol gibi hidrofobik bileşiklerin eklenmesiyle taneler arasındaki itme kuvvetinin artmasına bağlı olarak akışkanlığın da arttığı gözlemlenmiştir.
- Hidrofobik kuyruğun boyutu çok büyüdüğünde, akışkanlığın azaldığı gözlemlenmiştir. Bu duruma, aşırı hidrofobiklik veya yüksek moleküler ağırlığa sahip moleküllerin buhar basınçlarının düşük olması sebebiyle, çimento taneleri üzerine yayılmalarının zorlaşmasının neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 2.18 Bazı öğütme yardımcılarının moleküler yapıları ve akışkanlık indeksleri (eğer belirtilmediyse öğütme yardımcısı dozajı % 0.1'dir.) [49]

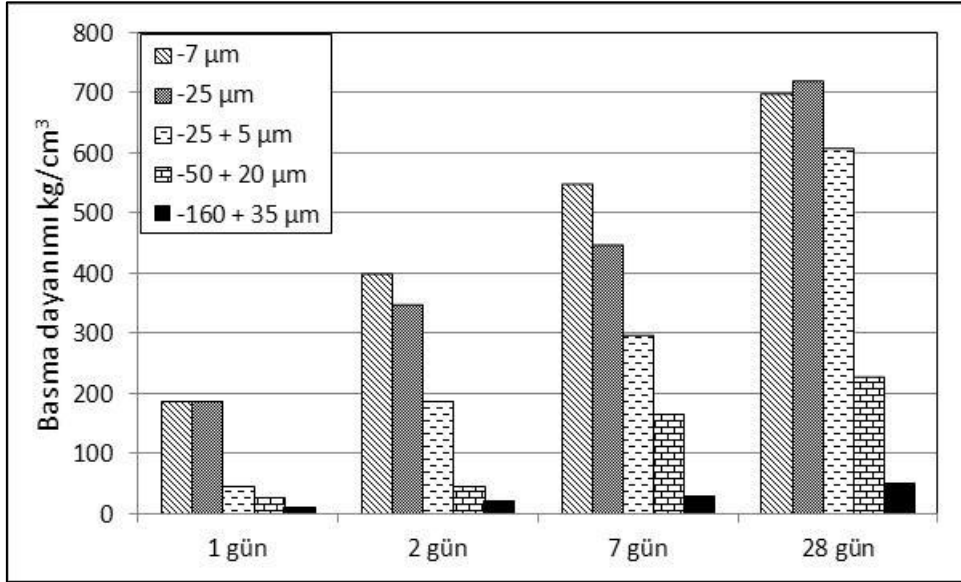
1,2-diol fonksiyonlarının katkıların çimento tanelerinin yüzeylerine tutunmaları için uygun olduğunu gözlemlenmiştir. Diol yapısına tutunan alfatik zincirlerin çimentonun akışkanlık özelliklerini arttırdığı ve iki ayrı hidrofobik grubun (2,3-Butanedioldeki iki metil grup gibi) bulunmasının akışkanlığı daha da fazla arttırdığı gözlemlenmiştir [49].

Benzer bir çalışmayı Rajendran Nair ve Paramasivam [62] kalsiyum stearatın kalsitin öğütülmesi ve akışkanlığı üzerine etkilerini inceleyerek gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları test sonucunda kalsiyum stearatın kullanılması ile ilk yığın yoğunluğunun arttığını, sıkıştırılabilirliğin düştüğünü, ana konsolidasyon basıncının yükseldiğini, iç sürtünme açısının azaldığını, serbest sürtünme geriliminin azaldığını, kohezyon katsayısının düştüğünü ve tahmini çekme dayanımının azaldığını gözlemlemişlerdir.

2.9. Öğütme Yardımcılarının Hidratasyon Üzerine Etkileri

Hidrolik olarak aktif bileşenlerin yüzey alanlarının artması nedeniyle Blaine inceliği arttıkça çimentonun hidratasyonu hızlanmaktadır. Blaine değeri, öğütme işleminde önemli bir etken olan ince malzemelerin miktarını ve çimentonun kimyasal yapısını tam olarak yansıtmadığı için çimento dayanımı hakkında sadece fikir vermektedir. Yüksek erken dayanım 7 μm 'den daha ince olan fraksiyona, bütün dönemlerdeki dayanım ise 25 μm 'den daha ince olan fraksiyona bağlıdır (Şekil 2.19) [11] .

Hidrolik olarak aktif olan en önemli çimento fraksiyonunun 40 μm 'nin altındaki fraksiyon olduğu düşünülmektedir. İri çimento taneleri su ile çok yavaş reaksiyona girdikleri için çimentonun hidratasyonunda çok önemli bir rol oynamamaktadırlar. Fakat aynı hammadde yapılmış ve dolayısıyla aynı mineralojik yapıya sahip çimentolar, aynı Blaine inceliğinde olmalarına rağmen farklı dayanımlar sergileyebilmektedirler [11].



Şekil 2.19 Çimento basma dayanımının zamana ve çimento inceliğine bağlı değişimi [11]

Bazı öğütme yardımcıları, topaklanmayı önleme ve öğütme için enerjiyi düşürmelerinin yanı sıra, çimento hidratasyonuna ve çimento ve beton hamurunun reolojisine etki etmektedir. Farklı formüllere sahip öğütme yardımcılarından bazıları, dağıtıcı etki yaparak betonun su ihtiyacını azaltmaktadır. Hava sürükleyen ve plastisiteyi etkileyen kimyasallar da mevcuttur. Bazı öğütme yardımcıları ise hidratasyonu hızlandırıcı veya geciktirici etkisi olabilmektedir. Bütün bu etkilere neden olan ve çimento değirmenine eklenen kimyasallara “kalite arttırıcılar” adı verilmektedir. Kuşkusuz bu özellikler de öğütme yardımcıları formülize edilmesinde önemlidir. Örneğin, kalsiyum klorür, karbonat, nitrat ve amin gibi kimyasallar öğütme yardımcıları formülüne eklenebilmektedir.

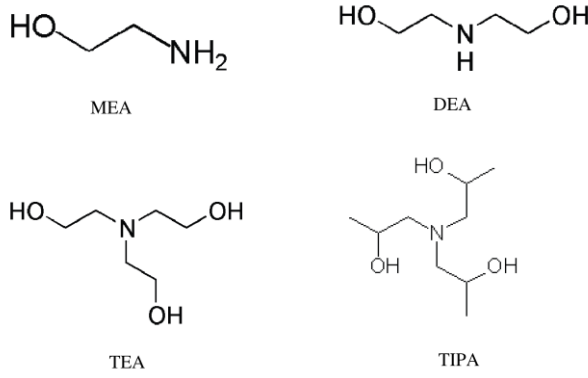
Kimyasal katkıları, çimento üreticilerinin farklı fiziksel özelliğe sahip ürünleri daha ekonomik maliyetle üretmelerine olanak sağlamaktadırlar. Bu kimyasallar, çimentoya elde edilmesi zor bazı özel performans özellikleri de sağlamaktadırlar [63].

Kalite artırıcıların çimento değirmenin verimliliğini artırmasının yanı sıra, kuru çimentonun işlenebilirliğini de arttırması beklenmektedir (depolama, paketleme ve taşınma sırasında tıkanmaları önlemek gibi). Ayrıca, katkıları taze betonun reolojisini iyileştirmekte ve sertleşmiş betonun dayanımını arttırmaktadırlar. Gerçek kalite artırıcıları, çimentonun erken dayanımını çimento inceliği ile değil, hidrasyon üzerindeki kimyasal etkileri ile arttırmaktadırlar [4].

Birçok öğütme yardımcısının, çimentonun hidrasyonu sırasında yararlı etkileri olduğu gözlemlenmiştir. Genellikle bu etki mekanizmaları beton katkılarıinkine benzer şekildedir. Çimentonun yüzeyinde artık pozitif yükleri varken, kum ve agregada negatif yükler vardır ve su molekülleri de çift kutupludurlar. Yüklü yüzey aktif maddeler sistemin serbest enerjisini (elektrik potansiyelini) düşürerek, zıt yükleri dengelemektedirler [64]. Öğütme sırasında kullanılan katkıları çimento tanelerinin yüzeyine soğurulmaktadırlar. Bu da, molekül yapılarına bağlı olarak, beton karışımının reolojisinde ve hidrasyon sırasında bazı etkilerinin olacağı anlamına gelmektedir.

Bazı katkıları hem olumlu hem de olumsuz etkileri olabilmektedir. Örneğin CaCl_2 iyi bilinen ekonomik ve etkili bir priz hızlandırıcıdır; fakat belirli dozlarda demir içeren metallerin korozyonuna neden olmaktadır [65]. Bu nedenle, çoğunlukla yapısal betonlarda kullanılmazlar. Alternatif olarak, aktif bileşenleri klorür yerine kalsiyum format $\text{Ca}(\text{HCOO})_2$ içeren priz hızlandırıcı ve su azaltıcıları kullanılabilir [66]. Kalsiyum format CaCl_2 'den daha pahalı olmasına rağmen, korozyon sorunu ile karşılaşılan durumlarda tercih edilmektedir. Fakat aynı şartlarda ve aynı dozajlarda kalsiyum formatın hızlandırıcı etkisi CaCl_2 'ye göre daha düşüktür. Kalsiyum format bazlı katkıları da işlevi CaCl_2 'ninkine az çok benzerdir. Priz süresini kısaltmakta, erken dayanımı arttırmakta ve bu avantajları daha düşük hidrasyon sıcaklıklarında sağlanmaktadır [67].

Katkı maddesi olarak çimento sektöründe başarı ile kullanılmakta olan alkanolaminler, CaCl_2 'den ve kalsiyum formattan biraz farklıdır [68]. Alkanolaminlerin öğütme yardımcısı etkilerinin yanında, hidrasyon sırasındaki mekanizmalarını incelemek de önemlidir. Monoetanolamin (MEA), dietanolamin, trietanolamin (TEA) ve triisopropanolamin'in (TIPA) yapıları Şekil 2.20'da verilmektedir.



Şekil 2.20 Bazı aminlerin kimyasal yapısı [4]

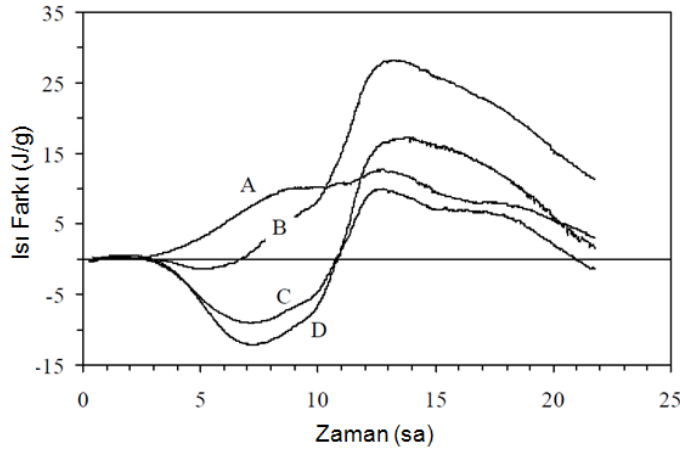
Kuvvetli bir alkalın ve karbon aktif olan TEA yaygın olarak kullanılan öğütme katkısıdır ve çimentonun akışkanlığını ve hidrasyonunu etkilemektedir. TEA kullanıldığı dozaja bağlı olarak, hidrasyon sırasında hızlandırıcı veya geciktirici olarak görev yapabilmektedir [49]. Şekil 2.21’de farklı TEA dozajlarında öğütülmüş saf çimentonun hidrasyon ısısı ile aralarındaki farklar görülmektedir. TEA’nın tepkimelerin başlama süresini etkilemediğini, ancak hem C_3S hem de alüminat fazlarının hidrasyonunu etkilediği görülmektedir. Düşük dozajlarda (%0,015) TEA kullanıldığında hidrasyon hızı artmaktayken, yüksek dozajlarda kullanıldığında hidrasyon yavaşlamaktadır [49].

TEA’nın polar ve asimetric yapısından dolayı, pozitif ve negatif yüklerin ayrı merkezleri vardır. Bazı araştırmacılar, TEA’nın seçimli olarak C-S-H’nin çekirdeklenme alanı gibi yüzey merkezlere soğrulduğu ve bu nedenle C_3S hidrasyonunu geciktirdiği ileri sürmüşlerdir. C_3S ’in hidrasyonunun yavaşlaması sulu fazda $Ca(OH)_2$ konsantrasyonunun artmasına neden olmakta ve bu koşullar etringit oluşumunu iyileştirmektedir [69].

Çimentonun hidrasyonu ile ilgili çalışmalarda, çimentonun su ile temasında, tanenin yüzeyinde su açısından zengin, sülfö-alüminat hidrat temelli bir jel oluştuğu ve bu jelin, tanenin iç kısmı ile gözenek suyunun arasındaki kütle akışını sınırlayan bir bariyer oluşturarak, silikat fazların hidrasyonunu kontrol etmekte olduğu gözlemlenmiştir. Bu jel zamanla gelişerek, çimento tanelerini birbirine bağlayan bir kristal yapı haline gelmektedir. Çimento hamurunun plastik faz evresini etkileyerek, nitelik ve nicelik açısından çimentonun yapısını değiştiren tüm katkılar, bu jel ile etkileşerek bu yapının bir parçası haline gelmektedirler. Çimentonun geç prizlenmesi de bu jel ile sağlanmaktadır [8].

TEA temelli öğütme yardımcılarının çimento performansını iyileştirdiği ve özellikle de 1 günlük çimento dayanımını arttırdığı iyi bilindiği için, Anna vd. [8] TEA’nın klinker ve

alçıtaşı karışımının hidratasyonuna etkisini kalorimetre deneyleri ile incelemişlerdir. Birinci karışım, klinker ile % 0.5 TEA ve % 5 alçıtaşından oluşmaktadır. İkinci karışım ise TEA kullanılmamış; sadece klinker ve % 5 alçıtaşından oluşmuştur. Her iki karışım da su/çimento oranı 0.5'tir. Analitik veriler, TEA'nın C_3S 'in hidratasyonunu hızlandırdığını ve bu nedenle çimentonun erken dayanımının arttığını göstermektedir. Alkanolaminlerin, hidratasyonun ilk aşamalarında, klinker tanesini kaplayan jeldeki morfolojik değişimleri de içeren kalsiyum alüminat hidratları ile etkileşime girdikleri gözlemlenmiştir. Anna vd. [8] tarafından sunulan mikrografiklerde, hidratasyon ürünleri arasındaki farklar gösterilmiş ve % 0.5 TEA ilavesi ile biraz daha iyi bir morfoloji elde edilebildiği belirtilmiştir.

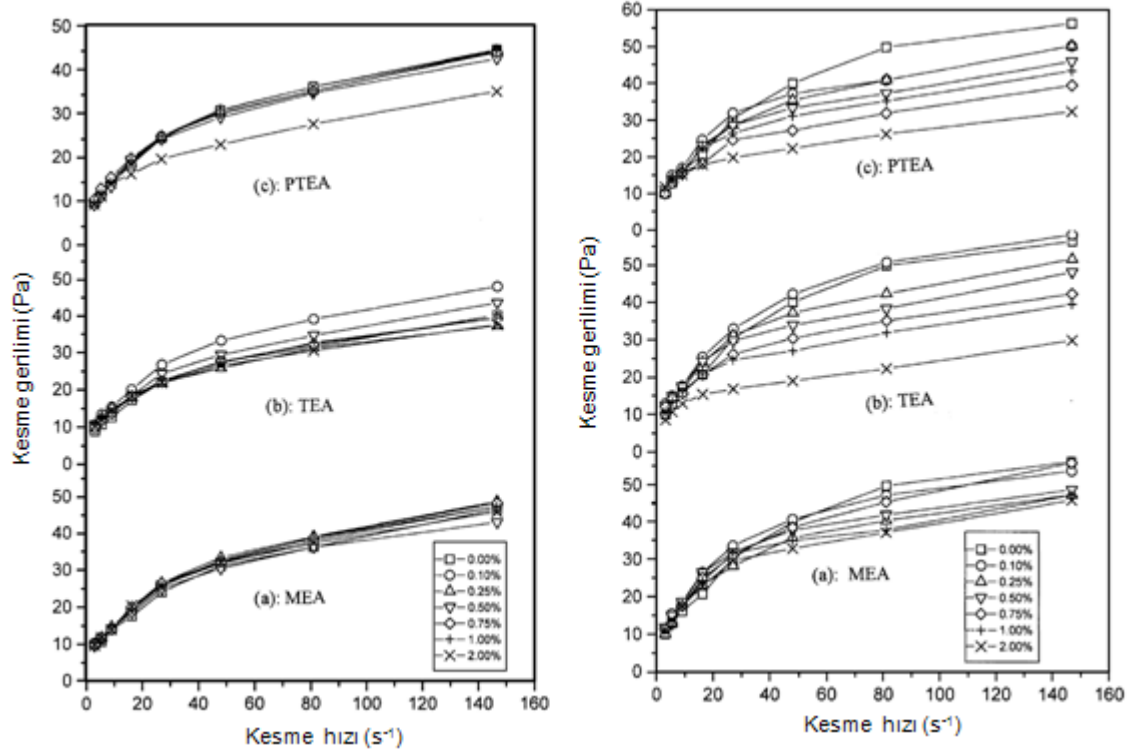


Şekil 2.21 Trietanolaminin farklı dozajlarının çimento hidratasyon ısısına etkileri (A: %0,015, B: %0,075, C: %0,1, D: %0,15) [49]

Adad vd. [70], portland çimento ve sülfata dayanıklı çimento hamurlarının reolojik özelliklerini % 0-2 konsantrasyon aralığında, MEA, TEA ve PTEA (polimer) ayrı ayrı test etmişlerdir. Çalışma, kesme gerilimi ve viskozitedeki değişiklikler incelenerek etanolaminlerin hızlandırıcı ve geciktirici etkilerini az çok doğrulamıştır. Şekil 2.22'de, katkı dozajlarının arttığı hemen her koşulda, kesme geriliminin azalmakta olduğu görülmektedir. Bu durum, katkıların geciktirici etkilerini göstermektedir. Kesme gerilimindeki azalma, sülfata dayanıklı çimento hamuru için daha da belirgindir. Etanolaminlerin sülfata dayanıklı çimentonun reolojik özelliklerine etki sırası TEA > PTEA > MEA şeklindedir [70].

TIPA ve TEA'nın, CaO veya $Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$ sulu karışımına ilave edilmesi ile faz bileşiminde bir değişiklik gözlemlenmemiştir; etringit ana üründür. İki farklı etringit morfolojisi, taramalı elektron mikroskopisi ile incelenmiştir. TEA ilavesinde, etringit daha

geniş kümeler halinde, iri ve kartopu görünümünde olsa da, benzer etringit yapısında ürünler oluşturduğu görülmüştür. TIPA ve TEA eklenmesiyle, oluşan etringit miktarı değişmemekte, sadece morfoloji etkilenmektedir [67].



Şekil 2.22 MEA, TEA ve PTEA'nın normal portland çimentosunun ve sülfata dayanıklı çimentonun kesme gerilimi üzerine etkileri [70]

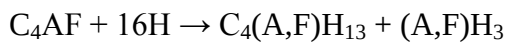
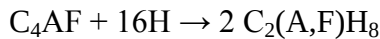
Norimoto [71]'ya göre, TEA içeren bir portland çimentonun hidratasyonu C_4AF ile doğrudan ilişkili TEA mevcut ise C_4AF hidratasyon tepkimelerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. TEA'nın varlığı ile hidratasyon miktarı arasındaki ilişki elektron mikroskopunda gözlemlenemese de mikrokaleorimetrede açıkça görülmektedir. TEA sülfat iyonlarının yükseltgeme etkisi vardır ve bu nedenle Fe'nin yerini alarak etrinjit oluşmaktadır. $C_3A_{1-x}F_x \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ hidratını oluşumu TEA ile hızlanmaktadır. Portland çimentonun ortalama bir bileşiminde, sülfat yükseltgenmekte ve bazen C_3A hidratasyonu hızlanmaktadır. C_4AF içeriği düşük olduğunda, TEA'nın öğütme üzerine etkisi daha belirgin olmaktadır. Eğer ortamda TEA mevcutsa, C_4AF çimentonun hidratasyonunda daha önemli bir rol oynamaktadır [71].

Jolicoeur vd. [49] trietanolamini % 0,02-0,015 arasında dozajlar kullanmıştır. Dodson [72], yaptığı testlerde % 1 TEA kullanıldığında C_3A 'nın hızlı hidratasyonuna bağlı olarak kuvvetli bir hızlandırıcı etkisi olduğunu gözlemlemiştir.

Heren ve Olmez [73], etanolamin oligomerlerinin % 0,1 ile % 1 dozajları arasında karışım suyuna eklenmesi ile hidratasyona ve betonun mekanik özelliklerine etkilerini incelemiştir. Bütün dozajlarda (% 0,1-1) etanolaminlerin geciktirici etkilerinin TEA > DEA > MEA sırasıyla azaldıklarını görmüşlerdir. Beyaz çimento (düşük C₄AF içerikli) test ettikleri için, % 1 dozajda kullanıldıklarında hızlı priz alma gözlemlenmemiştir. TEA ile yapılan testlerde erken ve son dayanımın düştüğü gözlemlenirken, MEA kullanıldığında sadece 3 günlük dayanımlarda hafif azalma görülmüştür. DEA ile yapılan testlerde ise referans örneği ile aynı erken dayanıma sahip olduğu gözlemlenmiştir. Heren ve Olmez [74], bir sonraki yıl yayınlanan çalışmalarında ise, DEA ve TEA kullanarak, gözenek tane boyu dağılımının şekli değişmeden daha fazla sayıda gözeneğe sahip ve daha büyük gözenekleri olan bir çimento hamuru üretildiğini görmüşlerdir. MEA içeren çimento hamurunun gözenek yapısının referans örneği ile birbirine çok benzer olduğu gözlemlenmiştir.

Gartner ve Myers [75], TEA'nın ve TIPA'nın çimento harcının hidratasyonu üzerine etkilerini araştırmışlardır. Bazı durumlarda, C₄AF'nin hidratasyonunun hızlanmasına bağlı olarak, TIPA ilave edilen çimento harçlarının 1 günlük dayanımlarının arttığını gözlemlemişlerdir. TIPA bütün sülfatlar reaksiyona girdikten sonra bile çözeltide kalmakta (TEA gibi yüzeylere soğrulmazlar) ve demir iyonlarının taşınmasını arttıracak demir kompleksleri oluşturmaktadırlar. Ichikawa vd. [76], C₄AF'nin hidratasyonunun TIPA ile hızlandığını doğrulamışlardır. Ayrıca C₃S miktarının önemine de vurgu yapmışlardır. C₃S'in öğütülebilirliği C₂S'e göre daha yüksektir ve bu nedenle kırık C₃S tanelerinin kristal içine nüfuz etmesi beklenmektedir. Bu arayer fazların (C₄AF), C₃S taneleri ile bir arada bulunmasına neden olmaktadır. TIPA mevcudiyetinde, polimineralik C₃S hem C₄AF hem de C₃S'in hidratasyonunu kolaylaştırmaktadır. Ayrıca, aynı çalışmada TIPA'nın karboalüminat oluşumunda kireçtaşının tepkimesini hızlandırdığı belirtilmiştir.

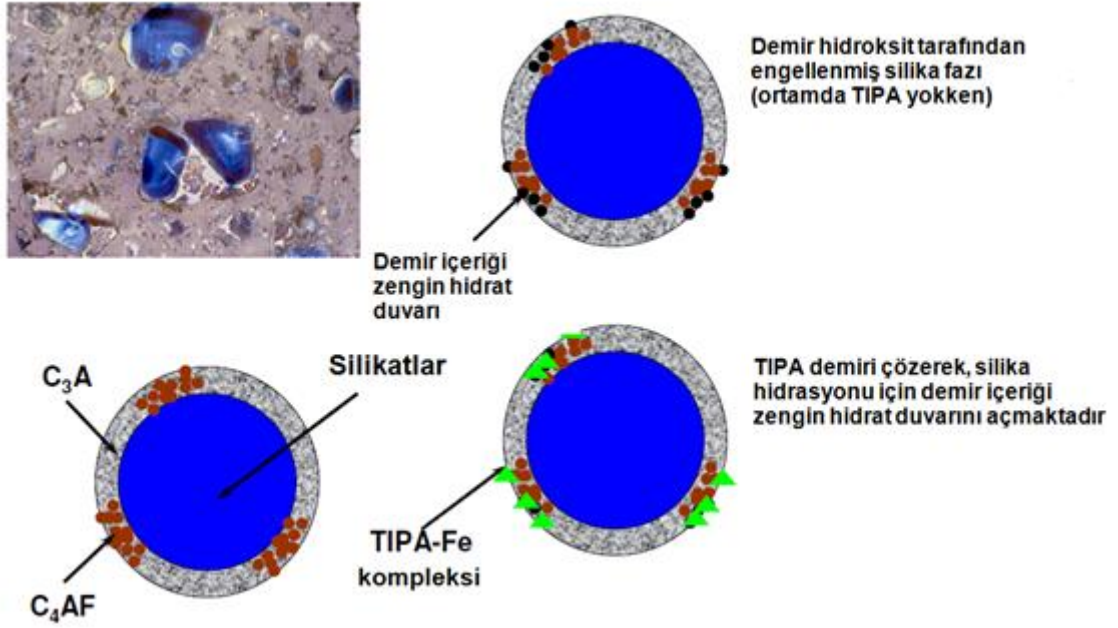
Yapılan çalışmalar, ferrit fazının hidratasyonunun C₃A hidratasyonuna çok benzer olduğunu, sülfat olsun veya olmasın, reaktivite ferrit fazının A/F oranı arttıkça yükseldiğini göstermektedir [63]. Sulu ortamda C₄AF tepkimesi şöyle gerçekleşmektedir:



Genel bir kural olarak, çimento bileşiklerinin ilk günlerdeki hidratasyon hızları C₃A>C₃S>C₄AF>C₂S şeklinde sıralanmaktadır [63]. Bileşiklerin hidratasyon hızlarını,

kristal boyutu, yapısal bozukluklar, tane boyun, tane boyu dağılımı, soğutma hızı, yüzey alanı ve klinker tanelerinin mikro yapıları gibi birçok etmene bağlıdır.

Katkı maddeleri hidratasyon hızına, Portland çimento ve C_3S hamurunun polimerizasyonu ilerlerken etki etmektedirler. Ferrit (C_4AF) hidratasyonu, çeşitli araştırmalara konu olmuştur ve TIPA'nın ferrit hidratasyonunu etkilediği düşünülmektedir [75].



Şekil 2.23 Kolaylaştırılmış demir taşınmasının şematik modeli [77]

Gartner ve Myers [75], üçüncül alkanolaminlerin çimento hamurunun yüksek pH'larda demir iyonları için "difüzyon kolaylaştırıcı" olarak etki ettiğini savunmuşlardır. TIPA gibi üçüncül alkanolaminlerin avantajı, çimento hidratları tarafından önemli miktarda soğrulmamaları ve dolayısıyla demir hidratasyonuna neden olan çözünme ve taşınma tepkimelerinin devam edebilmesidir.

Gartner ve Myers [75] mekanizmayı şöyle tarif etmektedir: " Alkanolaminler olmadığında sulu demir konsantrasyonu her zaman düşük kalmaktadır. Bu durum, demir iyonunun çözelti içinden difüzyonunun muhtemelen hız sınırlayıcı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle demirin AFm ($Al_2O_3-Fe_2O_3$ -mono) veya AFt ($Al_2O_3-Fe_2O_3$ -tri) fazlarının, büyüyen bölgelerine ulaşması zordur ve amorf bir jel halinde kendi orijinal konumunda kalma eğilimindedir. Ancak, TIPA ilavesi, alüminyum ile aynı aralık içinde bir büyüklük sırasına göre demir çözünürlüğünü artırabilen demir kompleksleri oluşturmaktadır. Böylece, demir taşınmak için fırsat bulur ve AFt ve AFm fazlarının büyüyen kısımlarında alüminat iyonları ile beraber çökelmektedir." (Şekil 2.23).

Bu kolaylaştırılmış taşıma işlemi, yalnızca Fe^{+3} alkanolamin kompleksinin (tüm diğer iyonların varlığında) bağlanma sabiti ne çok yüksek ne de çok düşük olduğunda verimli çalışabilmektedir. Düşük olması durumunda, çözünmüş demir miktarında önemli bir artış gözlemlenmemektedir. Eğer yüksek olursa, kompleks oluşacaktır; fakat demirin büyüme bölgelerinde çökmesi sona ermeyecektir (Eklenen TIPA demirin (III) çözünme, taşınma ve çökme döngüsünü devam ettirmek için serbest olmayacaktır.). Önemli miktarda C_4AF içeren çimentonun, TIPA ile dayanımının arttırılmasını sülfatın tükenmesinden (Portland çimentosu için 24 saatten daha kısa bir zamanda gerçekleşmektedir) sonra da hidrasyon derecesinin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [75].

Saf gliserolun, çimentonun basınç dayanımında iyileşme sağladığı bilinmesine rağmen; saf gliserolun yüksek maliyeti endüstride yaygın olarak kullanılmasına mani olmaktadır. Gliserol, ayrıca film oluşturan polimerik maddelerle beraber kullanılarak, beton yüzeyinde oluşabilecek çatlakları engellemektedir. Gliserol veya poligliserol ya da bu ikisinin karışımının bir sulu alkollü çözeltisi, stiren bütadien kopolimeri gibi bir film oluşturuca polimerik değiştirici ile henüz sertleşmemiş beton yüzeyini sarmaktadır. Gliserol, betonun su yalıtımı arttırmak için de kullanılabilir [27].

2.10. Öğütme Yardımcılarının Çimento Öğütme Devreleri Üzerindeki Etkileri

Teknolojideki gelişmelere rağmen, çoğu çimento tesisinde öğütme, bilyalı tüp değirmenler kullanılmaktadır. Bilyalı değirmenlerin enerji verimliliği çok düşüktür ve enerjinin büyük bir kısmı ısıya dönüşmektedir. Bu nedenle değirmen içindeki sıcaklık 80-100 °C kadar yükselebilirken, taneciklerin bilyalarla çarpıştığı bölgesel noktalarda sıcaklıklar daha da yüksek olabilmektedir. Değirmen içerisinde daima farklı öğütülebilirlikte ve farklı özellikteki malzemeler (klinker ve katkıları) mevcuttur. Üzerinde en çok çalışılan malzeme ise hiç kuşkusuz klinkerdir. 2-3 hafta bekletilmiş klinkere göre fırından yeni çıkmış olan taze klinkeri öğütmek çok daha zordur (Towarow öğütülebilirlik sabiti 0,9 ve 1,15) [11].

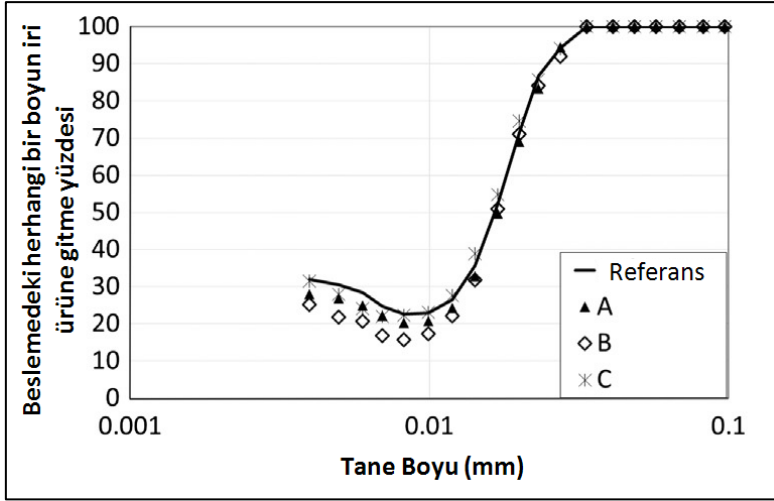
Öğütme yardımcısının, çimento öğütme devresine verilmesiyle birlikte, bilyalı değirmenin 1. kamaradan gelen ses önemli ölçüde artarken, 2. kamaradan gelen ses azalmaktadır. Bu durum malzemenin değirmen 2. kamarası içinde kalma süresinin azaldığını göstermektedir. Anlık olarak değirmen çıkışındaki elevatörün güç tüketiminin artması ve devreden yükün azalması da değirmenin aniden boşalmasının bir göstergesidir. Bu sayede, ürün inceliğine ulaşmış malzeme değirmen içerisinde oyalanmadan, biran önce değirmenden çıkartılarak, gereksiz öğütmenin önüne geçilebilmektedir. Öğütme yardımcıları, sıvanmayı ve topaklanmayı engelleyerek değirmen içerisinden özellikle ürün boyutundaki malzemenin

taşınmasını kolaylaştırdığı gibi, sıvanmadan ve topaklanmadan kaynaklı yastıklama etkisini de ortadan kaldırarak, öğütme performansını arttırdığı düşünülmektedir. Normal koşulların tekrar sağlanabilmesi ve öğütme yardımcılarının en iyi şekilde yararlanabilmek için, aynı incelikte çimento elde edecek şekilde havalı sınıflandırıcı tekrar ayarlandığında, devreden yük ani olarak yükselmekte ve birkaç dakika içinde daha düşük bir değerde sabitlenmektedir [10].

Ürün boyutundaki küçük çimento taneciklerinin birbiri ile bağlar oluşturarak havalı sınıflandırıcı içinde tek bir tane gibi hareket ederek iri akışa gitmeleri, hem havalı sınıflandırıcının verimsiz çalışmasına neden olmakta, hem de değirmen geri dönüş tonajını ve değirmen malzeme doluluk oranını arttırarak öğütme devresinin kapasitesini düşürmektedir [10].

Toprak vd. [78] havalı sınıflandırıcı ile kapalı devre çalışan bir çimento öğütme devresinde farklı öğütme yardımcılarını test etmişlerdir. Öğütme yardımcılarının kullanılmasıyla, öğütme devresinin üretim miktarının % 24'e kadar arttırılabileceği gözlemlenmiştir. Referans koşuluna göre havalı sınıflandırıcının besleme tonajları artmış olmasına rağmen, kaçak yüzdesinin ve iri akışa giden malzeme miktarının azaldığı, ayırım keskinliğinin ise değişmediği gözlemlenmiştir.

Öğütme yardımcılarını kullanarak üretilen çimentonun performansının, öğütme yardımcısı kullanılmadan üretilen çimentoya kıyasla daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Öğütme yardımcılarının, çimento performansı (donma süresi, su ihtiyacı vb.) üzerine birincil etkisinin olmamasına rağmen; aynı incelik değerlerinde, özellikle erken dayanımının daha iyi olduğu görülmüştür [10].



Şekil 2.24 Öğütme yardımcılarının havali sınıflandırıcı performansı üzerine etkileri A: amin, inorganik ve sulu çözeltileri; B: alkanolaminler ve tuzları; C:Amin asetat tuzlarının sulu çözeltileri [78]

Yüksek üretim (ton/sa) değerleri ve düşük özgül enerji tüketimleri (kWs/t) nedeniyle dik değirmenler geleneksel bilyalı değirmenlerin yerini almaya başlamışlardır ve geleneksel bilyalı değirmenlerde olduğu gibi, dik değirmenlerde de, arzu edilen performans hedeflerine (incelik, dayanım, üretim miktarı vb.) ulaşmak için, çimento hammadelerinin öğütülmesi ile açığa çıkan yüzey yüklerini azaltmak için polar bileşiklerden oluşan öğütme yardımcıları kullanılmaktadır [79]. Endüstriyel ölçekli testlerde, bilyalı değirmenler için üretilmiş olan öğütme yardımcılarının, dik değirmenlerin performansını arttırmadığı gözlemlenmiştir. Yapılan gözlem ve araştırmalar sonucunda, bu farklılığın dik değirmenin havalandırma sistemindeki farklılıktan kaynaklanma ihtimalinin çok yüksek olduğu kanısına varılmıştır. Geleneksel öğütme yardımcıları taze besleme bandından veya doğrudan değirmen içine beslendiğinde, dik değirmenin içindeki yüksek havalandırmanın da etkisi ile öğütme yardımcısı daha etkisini göstermeden, fiziksel olarak saf dışı kalmaktadır [79].

Dik değirmenlerin çimento endüstrisindeki kullanımının yaygınlaşması ve geleneksel öğütme yardımcılarının dik değirmenlerde kullanılmasından kaynaklanan teknik sorunlar göz önünde bulundurularak, bu değirmenler için özel kimyasallar üretilmiştir. Bu ürünler etanolamin, glikol ve inorganik tuzların yanı sıra, bir miktar (%3 ile %10 arasında değişen) yüksek kaynama noktalı ve koyulaştırıcı özel bir karışım içermektedir. Bu karışımların düşük uçuculukları, dik değirmen içindeki yoğun havalandırma koşullarından zarar görmeden öğütme işlemi üzerine etkilerini gösterebilmelerine olanak sağlamaktadır. Ayrıca, öğütme yardımcısının içine eklenen bu karışımlar, etanolaminlerin, glikollerin,

inorganik tuzların kendilerine özgü kimyasal etkinliklerini ve bunların çimento inceliği ve dayanımı üzerindeki etkilerini değiştirmemektedir. Yapılan endüstriyel denemelerde, öğütme yardımcılarının besleme bandından beslenmesiyle, üretim tonajında ve çimento kalitesinde ya hiçbir değişiklik olmadığı ya da, çok küçük değişimler olduğu gözlemlenmiştir. Aynı, dozajdaki kimyasalın doğrudan rölelerin altına verilmesi ile ise üretim miktarında % 15'e kadar artış gerçekleştiği gözlemlenmiştir [79].

Altun [80], doktora tezinde, kuru yatay karıştırma değirmen teknolojisinin çimento endüstrisindeki kullanım olanaklarını araştırırken, trietanolamin, triizopropanolamin ve glikol bazlı üç farklı öğütme yardımcısının kuru yatay karıştırma değirmen üzerine etkilerini de incelemiştir. Öğütme yardımcısı sisteme beslendiğinde değirmen içindeki malzemenin akışkanlığının arttığını ve malzemenin değirmen dışına taşınmasının hızlandığını gözlemlemiştir. Değirmen içindeki malzemenin miktarının azalmasına bağlı olarak disklerdeki ve şafttaki direnç de azalmış; güç ve özgül enerji tüketimi düşmüştür. Yapılan testlerde, öğütme yardımcılarının kullanılmasıyla, değirmen içindeki malzeme miktarının % 34.5 azaldığı ve % 7.5'e kadar enerji tasarrufu sağladığı görülmüştür.

Bu tez kapsamında, öğütme yardımcılarının çimento öğütme devresinde yer alan bilyalı değirmen ve havalı sınıflandırıcının farklı parametreleri üzerindeki etkileri gerçekleştirilen endüstriyel testlerle incelenmiş ve çimento öğütme devrelerinde kullanılan öğütme yardımcılarını modellenerek benzetimler yapılmıştır. Bu amaçla, endüstriyel ve laboratuvar ölçekli testler gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ölçekli testlerde, farklı öğütme yardımcılarının öğütülebilirlik, akışkanlık ve havalı sınıflandırıcı üzerine etkileri incelenmiştir. Endüstriyel ölçekli testlerde ise, havalı sınıflandırıcı ile kapalı devre çalışan bir çimento öğütme devresinde beş farklı kimyasalın farklı dozajlarının devre performansı üzerine etkileri incelenmiş; çimento öğütme devrelerinde kullanılan öğütme yardımcılarının bilyalı değirmen ve havalı sınıflandırıcı üzerine etkileri modellenerek simülasyonlar yapılmıştır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve SONUÇLARI

3.1.Laboratuvar Ölçekli Testler

Çimento öğütme devrelerinin her hangibir işletim koşulunun değişmesi, dolaylı olarak diğer işlem parametrelerini de etkilemektedir. Bu durum öğütme yardımcılarının, bilyalı değirmen ve havalı sınıflandırıcı üzerindeki etkilerinin araştırılmasını güçleştirmektedir. Laboratuvar testleri, farklı koşulların birbirinden bağımsız olarak incelenmesine olanak sağlamaktadır. Öğütme yardımcılarının, çimento tanelerinin akışkanlığı, öğütülebilirliği ve sınıflandırılması üzerine etkileri laboratuvarda birbirinden bağımsız olarak yapılan akışkanlık, öğütme ve sınıflandırma testleri ile incelenmiştir.

3.1.1. Akışkanlık Testleri

İnce öğütülmüş malzemelerin akışkanlığı, tane boyu dağılımına, tanelerin şekline, nem miktarına, kapiler kuvvetlere, Van der Waals ve elektrostatik kuvvetler gibi taneler arasındaki çekim kuvvetlerine bağlıdır. İnce öğütülmüş kuru malzemelerin akışkanlığı, yığın açısı, sıkıştırılmış/gevşek yığın yoğunluğu (Hauser oranı ve Carr indeks), doğrudan makaslama deneyi, akış ölçümü, geçirgenlik ve sıkıştırılabilirlik testleri ile ölçülebilmektedir [81]. Bu bölümde, endüstriyel olarak da test edilen Chryso firmasına ait Labcim 841-001,841-002 ve 841-003 kodlu öğütme yardımcılarının altı farklı dozajının (1000, 2000, 3000, 5000, 7000 ve 10000 g/t) öğütülmüş klinkerin akışkanlığı üzerine etkileri titreşimli elek yöntemi ile incelenmiş [49]; testler sonucunda her bir koşul için akışkanlık indeksi değerleri belirlenmiştir.

Traçim Çimento Fabrikası'ndan temin edilen klinker numuneler, ilk önce çeneli ve merdaneli kırıcılarda 3,35 mm'den daha ince boylara kırılmış ve daha sonra Bond değirmeninde öğütülmüştür. Bond değirmeninde öğütülen malzeme 150 µm'lik elekten elenmiş ve 150 µm'den daha ince olan fraksiyondan temsili olarak 100 g'lık numuneler akışkanlık testleri için ayrılmıştır.

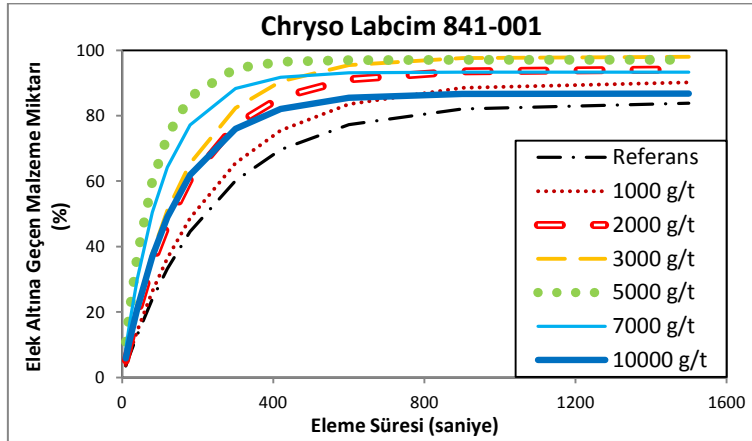
Testler Retsch AS 200 marka titreşimli elek sarsıcı (Şekil 3.1) ile sabit genlikte ve 150 µm'luk eleğe 100 g'lık numuneler beslenerek gerçekleştirilmiş ve eleme süresine bağlı olarak, elek altına geçen malzeme miktarı belirlenmiştir.

İlk olarak, hazırlanan 100 g'lık klinker numunesine herhangi bir öğütme yardımcısı ilavesi olmadan, referans koşulu test edilmiştir. Daha sonra, 100 g'lık klinker numunelerine Chryso Labcim 841-001,002 ve 003 öğütme yardımcıları 1000, 2000, 3000, 5000, 7000 ve 10000 g/t ilave edilerek aynı testler tekrarlanmıştır.

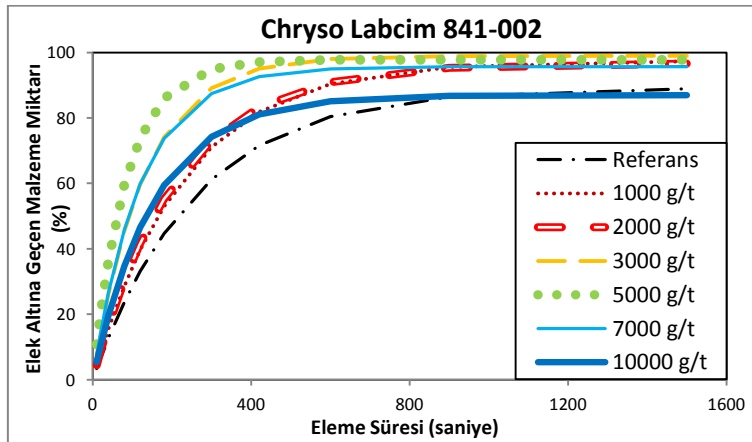


Şekil 3.1 Retsch AS 200 marka titreşimli elek sallayıcı

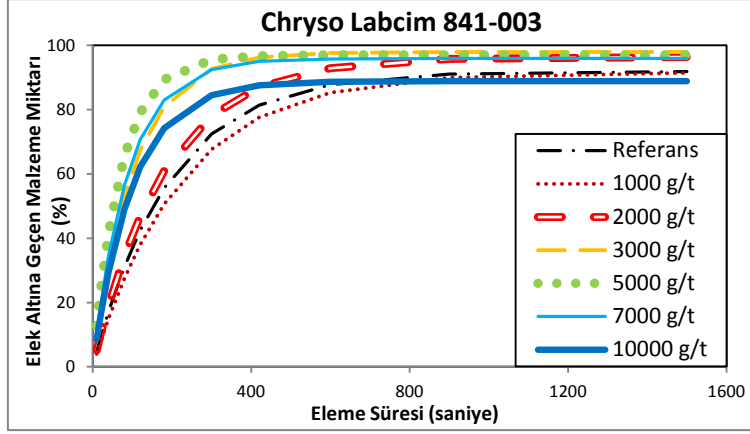
Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te verilen eleme süresine bağlı olarak elek altına geçen malzeme miktarlarının değişim grafikleri incelendiğinde, elenme hızının klinkere öğütme yardımcısı eklenmesi ile arttığı ve her üç öğütme yardımcısı için de en hızlı eleme hızının 5000 g/t ilave edilmeleri durumunda gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 3.2 Chryso Labcim 841-001 ile gerçekleştirilen akışkanlık testleri



Şekil 3.3 Chryso Labcim 841-002 ile gerçekleştirilen akışkanlık testleri



Şekil 3.4 Chryso Labcim 841-003 ile gerçekleştirilen akışkanlık testleri

Akışkanlık indeksini belirlemek için çizilen eleme süresine bağlı olarak elek altına geçen malzeme miktarı grafiklerinin matematiksel ifadesi Eşitlik 3.1’de verilmektedir. Bu eşitlikte, malzemenin daha akışkan hale gelmesiyle, birim zamanda elek altına geçen malzeme miktarının artacağı ve dolayısıyla daha büyük bir akışkanlık indeksi değerine sahip olacağı görülmektedir.

$$m = U \left[1 - \frac{1}{e^{ft}} \right] \quad (3.1)$$

m : t süresi sonunda elek altına geçen malzeme miktarı (%)

U : En uzun eleme süresi sonunda elek altına geçen malzeme miktarı (%)

f : Akışkanlık indeksi

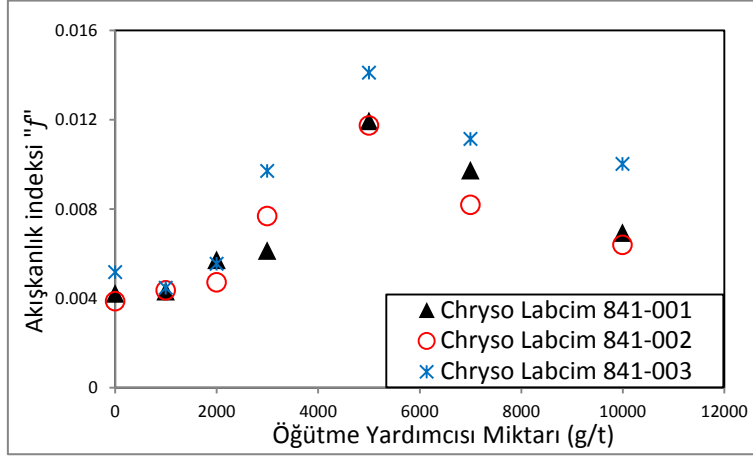
t : Eleme süresi

Çizelge 3.1 Akışkanlık testleri sonunda belirlenen U ve f parametreleri

	Chryso Labcim 841-001		Chryso Labcim 841-002		Chryso Labcim 841-003	
	U	f	U	F	U	f
Referans	83.96	0.0042	89.17	0.0039	91.91	0.0052
1000 g/t	90.35	0.0043	97.51	0.0044	91.60	0.0045
2000 g/t	94.13	0.0057	96.70	0.0047	96.38	0.0055
3000 g/t	97.99	0.0061	99.01	0.0077	97.92	0.0097
5000 g/t	97.10	0.0119	97.80	0.0117	96.96	0.0141
7000 g/t	93.35	0.0097	95.68	0.0082	95.89	0.0111
10000 g/t	86.80	0.0069	86.99	0.0064	88.87	0.0100

Eşitlik 3.1 kullanılarak hesaplanan akışkanlık indeksi değerleri Çizelge 3.1’de verilmektedir. Akışkanlık indeksinin öğütme yardımcısı miktarına bağlı olarak değişim

grafiği incelendiğinde ise en yüksek akışkanlık indeksi (f) değerine Chryso Labcim 841-003 öğütme yardımcısının 5000 g/t ilave edilmesiyle ulaşıldığı görülmektedir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Akışkanlık indeksinin öğütme yardımcısı miktarına bağlı olarak değişim grafiği

Öğütme yardımcılarının 5000 g/t'dan daha fazla ilave edilmeleri durumunda ise öğütülmüş klinkerin elenme hızının azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durumun, öğütme yardımcılarının çok yüksek dozlarda kullanılmasıyla katı yüzeyinde oluşan çok katmanlı tabakaların kılcal güçler oluşturarak, topaklanmaya neden olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [12].

3.1.2. Öğütme Testleri

Öğütme yardımcılarının öğütülebilirliğe etkisinin incelenebilmesi için Chryso Labcim 841-001, 002 ve 003 öğütme yardımcıları kullanılarak, çapı ve boyu 308.4 mm olan ve dakikada 70 devir dönen, standart bilya dağılımına sahip Bond değirmeninde (Şekil 3.6 ve Çizelge 3.2), 1 kg 3.35 mm'den daha ince tane boyu dağılımına sahip klinker, alçı ve kütlece %30 alçı ve %70 klinker karışımı beslenerek öğütme testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6 Standart Bond değirmeni

Çizelge 3.2 Standart Bond değirmeni bilya dağılımı

Nominal bilya çapı (mm)	Ortalama bilya çapı (mm)	Bilya Sayısı	Ağırlık (g)
38.10	36.83	43	8730
31.75	29.72	67	7197
25.40	25.91	10	705
19.05	19.30	71	2058
12.70	15.49	94	1441
Toplam		285	20131

Öğütme testlerine ilk önce klinker ile başlanmıştır. Klinker, öğütme yardımcısı ilavesi olmadan, 1 saat boyunca öğütülerek, klinker öğütme testleri için referans koşulu oluşturulmuştur. Daha sonra 1000 g/t ve 5000 g/t oranlarında Chryso Labcim 841-001, 002 ve 003 ilave edilerek 1 saatlik öğütme testleri yapılmıştır (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.3 Klinker ve alçı ile gerçekleştirilen öğütme testleri

	Referans	Chryso Labcim 841-001		Chryso Labcim 841-002		Chryso Labcim 841-003	
		1000 g/t	5000 g/t	1000 g/t	5000 g/t	1000 g/t	5000 g/t
Klinker	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Alçı	✓	✓	-	✓	-	✓	-

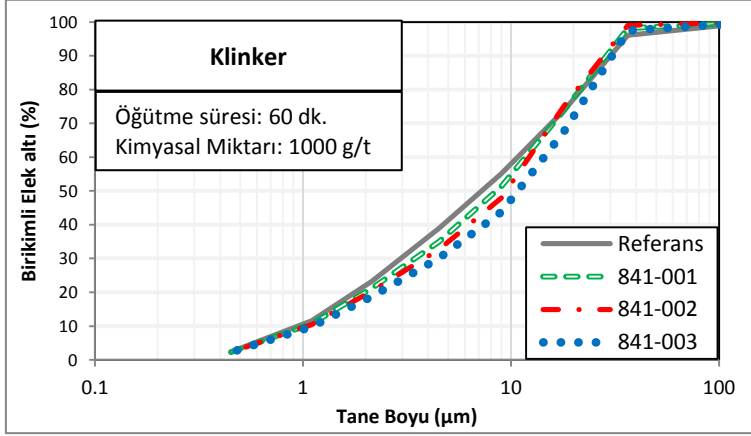
Klinker öğütme testleri sırasında, klinkerin değirmen astarlarına ve bilyalara sıvanmadığı gözlemlenmiştir. Klinker öğütme testleri sonucunda elde edilen tane boyu dağılımları incelendiğinde, öğütme yardımcılarının klinkere eklenmesi ile ürün boyutunun irileştiği görülmektedir (Şekil 3.7 ve Şekil 3.8). Bu durumun, akışkanlığı artan klinkerin aşınma ile ufalanmasının azalmasında kaynaklandığı düşünülmektedir.

Klinker öğütme testlerinde uygulanan benzer yöntem alçı için de uygulanmıştır. İlk önce, alçı, öğütme yardımcısı ilavesi olmadan 1 saat boyunca öğütülmüştü ve bu koşul alçı öğütme testleri için referans koşulu olarak kabul edilmiştir. Daha sonra 1000 g/t oranında Chryso Labcim 841-001, 002 ve 003 ilave edilerek 1 saatlik öğütme testleri gerçekleştirilmiştir.

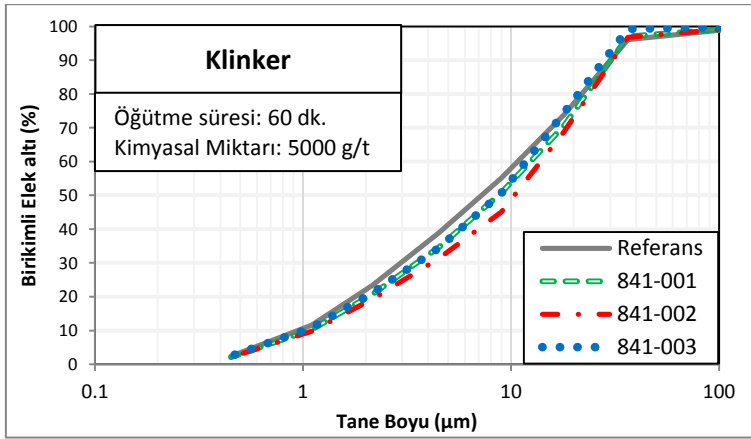
Öğütme testleri sonucunda elde edilen tane boyu grafikleri incelendiğinde, alçıya öğütme yardımcılarının ilave edilmesiyle daha ince ürün elde edilebildiği görülmekte ve en etkili öğütme yardımcısının Chryso Labcim 841 – 003 olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 3.9).

Öğütme testleri sırasında, özellikle öğütme yardımcısının kullanılmadığı referans koşulunda, değirmen astarının ve bilyaların üzerini kaplayan kalın bir alçı tabakası

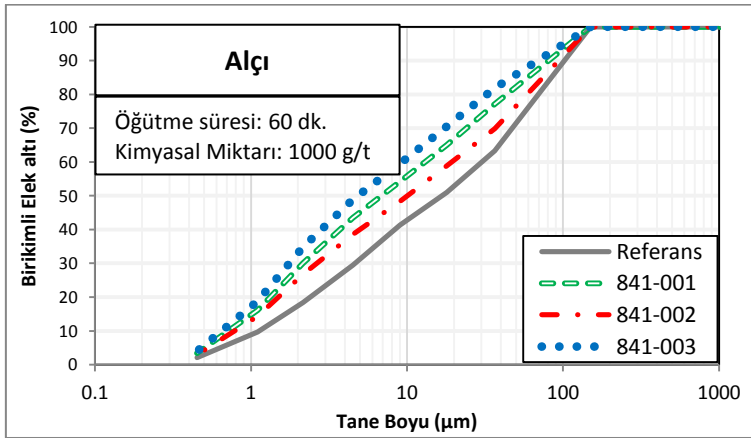
oluştugu gözlemlenmiştir (Şekil 3.10). Öğütme yardımcıları kullanılması, değirmen astarının ve bilyaların üzerini kaplayan alçı tabakasının oluşumunu azaltmış ve daha verimli bir öğütme işleminin gerçekleştirilmesine olanak sağlamıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.7 Klinker ile gerçekleştirilen öğütme testleri (1000 g/t Chryso Labcim)



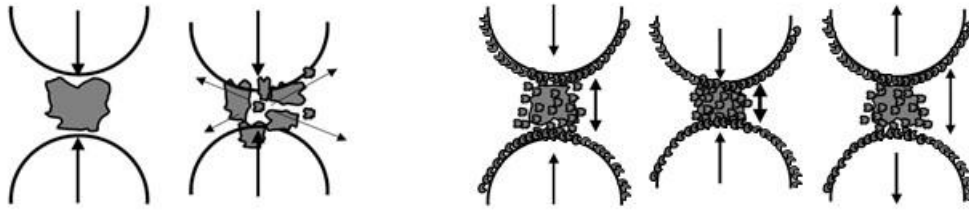
Şekil 3.8 Klinker ile gerçekleştirilen öğütme testleri (5000 g/t Chryso Labcim)



Şekil 3.9 Alçı ile gerçekleştirilen öğütme testleri (1000 g/t Chryso Labcim)



Şekil 3.10 Alçı ile referans koşulunda yapılan test sonrasında Bond değirmenin içinin görünümü



Şekil 3.11 Yastıklama etkisinin şematik görünümü

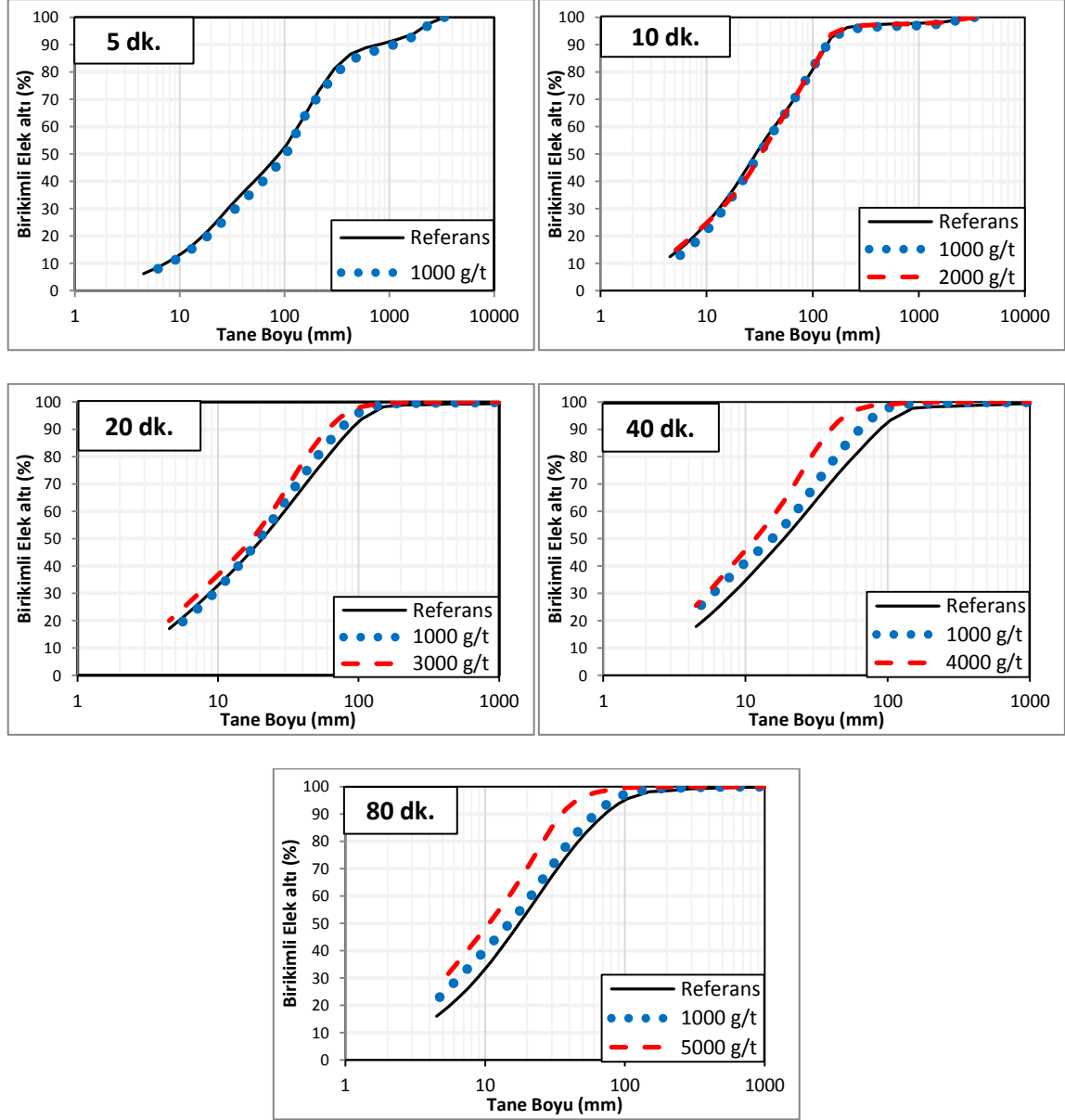
Kütlece % 30 alçı ve % 70 klinker karışımı ile 5, 10, 20, 40 ve 80 dk. sürelerle öğütme testleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak öğütme yardımcısı ilave edilmeden alçı ve klinker karışımı öğütülmüştür. İkinci aşamada ise karışıma 1000 g/t Chryso Labcim 841-003 ilave edilerek farklı sürelerde öğütme yapılmıştır. Üçüncü aşamada ise, her öğütme işlemi sonunda 1000 g/t Chryso Labcim 841-003 eklenerek, kademeli olarak öğütme yardımcısı miktarı artırılmıştır. Öğütme testleri sonunda elde edilen tane boyu dağılım grafikleri Şekil 3.12’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. %30 alçı ve % 70 klinker karışımı ile gerçekleştirilen öğütme testleri

Öğütme Süresi (dk.)	Referans	Chryso Labcim 841-003 Miktarı (g/t)				
		1000	2000	3000	4000	5000
5	✓	✓	-	-	-	-
10	✓	✓	✓	-	-	-
20	✓	✓	-	✓	-	-
40	✓	✓	-	-	✓	-
80	✓	✓	-	-	-	✓

Öğütme yardımcısı kullanılmadan gerçekleştirilen testlerde, malzemenin değirmen astarına ve bilyalara ilk 10 dakikadan sonra sıvanmaya başladığı gözlemlenmiştir. 1000 g/t Chryso

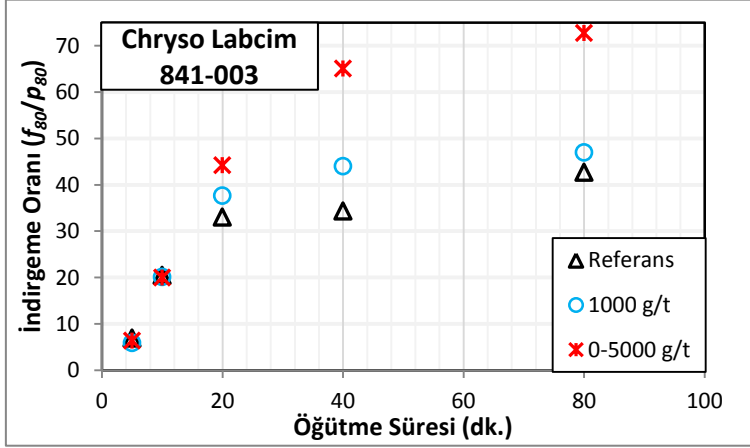
Labcim 841-003 kullanılarak yapılan testlerden ise öğütme başladıktan sonra ilk 20 dakikaya kadar malzemenin değirmen astarına ve bilyalara sıvanmadığı ancak 40. dakikada çok belirgin bir malzeme tabakasının değirmen ortamını kapladığı görülmüştür. Kademeli olarak öğütme yardımcısının miktarının artırıldığı koşulda ise değirmen ortamını 80 dakikanın sonunda toz inceliğinde bir tabakanın kapladığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.12 %30 alçı ve %70 klinker karışımı ile gerçekleştirilen öğütme testleri (Chryso Labcim 841-003)

Daha önceden farklı araştırmacılar tarafından yapılan araştırmalar da öğütme yardımcılarının öğütme sırasında malzemelerin öğütülebilirlik karakterizasyonunu etkilemediği savını desteklemektedir. Graichen ve Muhler [20] öğütme yardımcılarının tek bir tanenin darbe altında kırılmasında önemli bir etkisinin olmadığını deneysel olarak

kanıtlamışlardır. Locher ve Seebach [16] ise yaptıkları araştırmalarda öğütme yardımcılarının iri malzemelerin öğütülmesi sırasında bir etkisinin olmadığını; ancak değirmende ince çimento tanecikleri (3200 Blaine, cm^2/g) oluşmaya başladıktan sonra öğütmeyi etkileyen bir faktör olarak ortaya çıktığını gözlemlemişlerdir. Toprak [10] da çimento endüstrisinde kullanılan beş farklı öğütme yardımcısını kullanarak Bond öğütülebilirlik testleri yaparak iş indeksi değerlerini hesaplamış ve öğütme yardımcılarının klinkerin öğütülebilirliği üzerinde etkili olmadığını görmüştür.



Şekil 3.13 %30 alçı ve %70 klinker karışımı ile gerçekleştirilen öğütme testleri sonunda elde edilen indirgeme oranları

Laboratuvarda klinker ve alçı ile gerçekleştirilen öğütme testleri, öğütme yardımcısının malzemelerin öğütülebilirliği üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığını, ancak değirmen içindeki ortam koşullarını iyileştirerek, daha verimli bir öğütme işleminin gerçekleşmesine imkân sağladığını göstermektedir.

3.1.3. Havalı Sınıflandırıcı Testleri

Öğütme yardımcılarının, kapalı devre çimento öğütme devrelerinde yer alan havalı sınıflandırıcının çalışma koşullarını olumlu yönde etkilediği bilinmektedir [78]. Bu nedenle, Alpine marka laboratuvar ölçekli havalı sınıflandırıcı ile (Şekil 3.14 ve Çizelge 3.5), öğütme yardımcılarının, klinker ve alçının sınıflandırılması üzerine etkilerini inceleyebilmek için testler gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.5 Alpine 100 MZR havalı sınıflandırıcıya ait teknik bilgiler

Rotor hızı	2200 – 20,000 (devir/dk.)
Sınıflandırıcı tahrik gücü	0.38 kW
Fan tahrik gücü	1.5 kW
Ayarlanabilir ayırım inceliği	$d_{97} = 2 - 80$
Besleme kapasitesi	2 – 6 kg/sa



Şekil 3.14 Alpine 100 MZR havalı sınıflandırıcı

Havalı sınıflandırıcı testlerinde besleme olarak kullanılacak klinker ve alçı numuneleri Bond değirmeninde 150 μm 'den daha ince boyuta öğütülerek hazırlanmıştır. Testler sırasında, endüstriyel olarak kullanılan Cega 125 E ve test amaçlı üretilmiş Chryso Labcim 841-003 kimyasalı kullanılmıştır. Cega 125 E ile sadece 1000 g/t dozajda ve 3000 devir/dakika rotor hızında 10 m^3/sa ve 30 m^3/sa hava miktarında klinker test edilmiştir. Chryso Labcim 841-003'ün üç farklı dozajı ile ise 5000 devir/dakika rotor hızında 20 m^3/sa ve 40 m^3/sa hava miktarlarında klinker ve alçı ayrı ayrı test edilmiştir (Çizelge 3.6 ve Çizelge 3.7). Öğütme yardımcısı kullanılmadan gerçekleştirilen test koşulları referans olarak kabul edilmiştir.

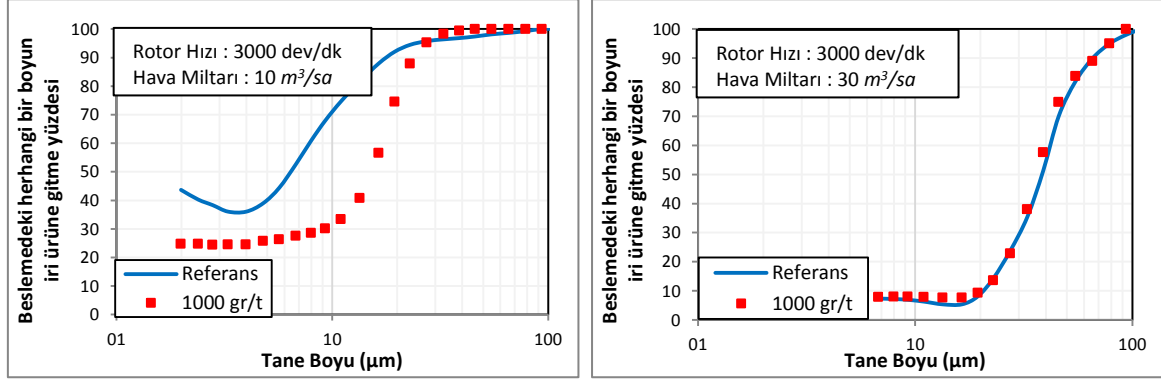
Çizelge 3.6 Klinker ile gerçekleştirilen havalı sınıflandırıcı testleri

		3000 devir/dk.		5000 devir/dk.	
		10 m^3/sa	30 m^3/sa	20 m^3/sa	40 m^3/sa
Referans		✓	✓	✓	✓
Cega 125 E	1000 g/t	✓	✓	-	-
Chryso Labcim	1000 g/t	-	-	✓	✓
841-003	3000 g/t	-	-	✓	✓
	5000 g/t	-	-	✓	✓

Çizelge 3.7 Alçı ile gerçekleştirilen havalı sınıflandırıcı testleri

		5000 devir/dk.	
		20 m^3/sa	40 m^3/sa
Referans		✓	✓
Chryso Labcim	1000 g/t	✓	✓
841-003	3000 g/t	✓	✓
	5000 g/t	✓	✓

Bütün testler 100 gr malzeme ile aynı besleme hızında gerçekleştirilmiştir. Testler sırasında beslemenin, iri ve ince akış ürünlerinin tane boyu dağılımı Sympatec marka lazerli tane boyu ölçüm cihazı ile belirlenmiştir. İri ve ince akışa giden malzeme miktarları tartılmıştır. Daha sonra iri akışa göre havalı sınıflandırıcının verimlilik eğrileri çizilerek öğütme yardımcılarının etkileri değerlendirilmiştir.

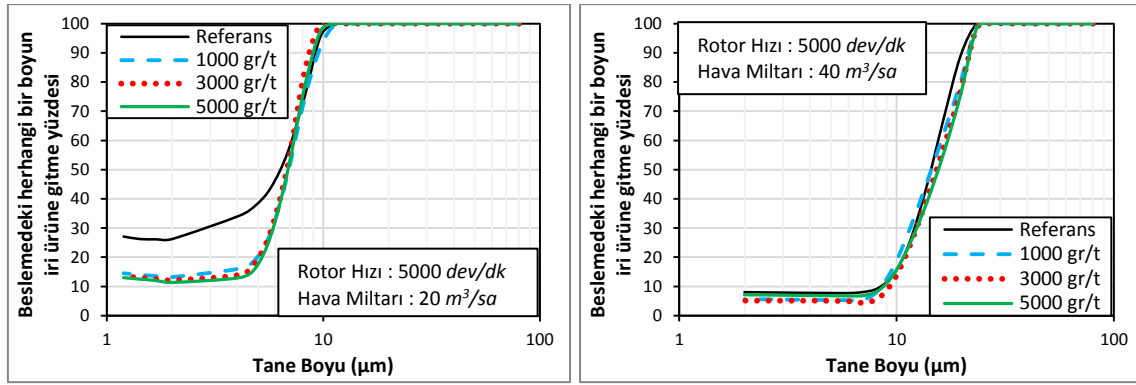


Şekil 3.15 Klinkere Cega 125 E kimyasalı ilave edilmesi sonucunda havalı sınıflandırıcıya ait verimlilik eğrileri

Klinker test edilirken, 3000 devir/dk. rotor hızında ve 10 m³/sa hava miktarında 1000 g/t Cega 125 E kullanılmasıyla sınıflandırıcının kesme boyu 6 µm'den 15 µm'ye yükselmiş ve kaçak miktarı %36'dan %24'e düşmüştür (Şekil 3.15). Fakat, hava miktarının 30 m³/sa olduğu koşulda kaçak miktarı %6 kadar düşmüş ve öğütme yardımcısının belirgin bir etkisi gözlemlenmemiştir (Şekil 3.15).

Chryso Labcim 841-003 klinkere 1000, 3000 ve 5000 g/t miktarlarında ilave edilerek testler yapılmıştır. Chryso Labcim 841-003 kullanılmasıyla, 5000 devir/dk. rotor hızında ve 20 m³/sa hava miktarında sınıflandırıcıdaki kaçak miktarını %15 kadar düşürürken, hava miktarı 40 m³/sa yükseltilerek yapılan testlerde kaçak miktarı ancak %3 kadar azalmıştır (Şekil 3.16 ve Çizelge 3.8).

Sınıflandırıcıdaki hava miktarı arttıkça, tanelerin kendi aralarında oluşan topakların dağılarak azaldığı düşünülmektedir. İri bir tane gibi davranarak kaçak miktarının artmasına neden olan topakların, yüksek hava miktarlarında (30 ve 40 m³/sa) dağılması, klinker ile yapılan testlerde, öğütme yardımcısı kullanılmadığı koşullarda bile sınıflandırıcıdaki kaçak miktarının bir hayli düşmesine neden olmuştur.



Şekil 3.16 Klinkere Chryso Labcim 841-003 kimyasalının ilave edilmesi sonucunda havalı sınıflandırıcıya ait verimlilik eğrileri

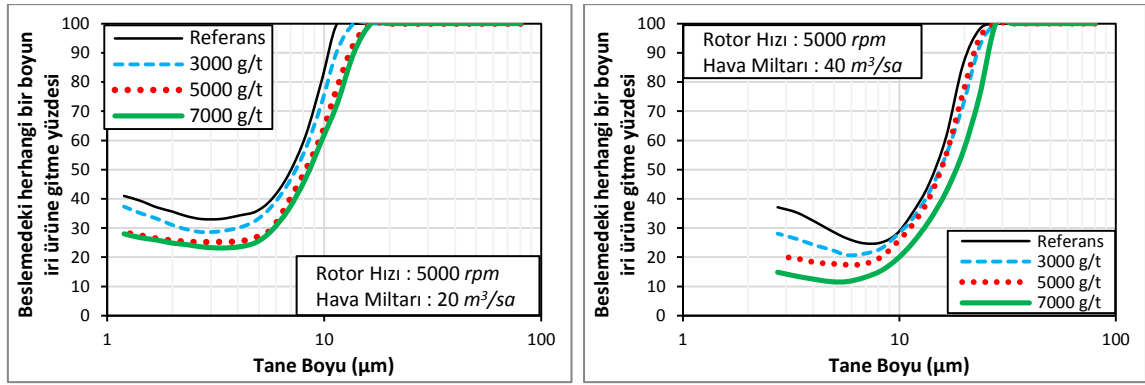
Çizelge 3.8 Klinkere Chryso Labcim 841-003 kimyasalının ilave edilmesi sonucunda havalı sınıflandırıcının kesme boyu ve iri akışa giden kaçak miktarı

	20 m ³ /sa - 5000 dev/dk.		40 m ³ /sa - 5000 dev/dk.	
	Kaçak (%)	d50 (µm)	Kaçak (%)	d50 (µm)
Referans	26.19	6.3	7.70	14.4
1000 g/t	13.19	6.9	5.16	14.5
3000 g/t	12.13	6.8	4.40	15.3
5000 g/t	11.36	6.9	6.76	15.6

Çizelge 3.9 Alçıya Chryso Labcim 841-003 kimyasalının ilave edilmesi sonucunda havalı sınıflandırıcının kesme boyu ve iri akışa giden kaçak miktarı

	20 m ³ /sa - 5000 dev/dk.		40 m ³ /sa - 5000 dev/dk.	
	Kaçak (%)	d50 (µm)	Kaçak (%)	d50 (µm)
Referans	33.05	7.0	24.77	16.4
3000 g/t	28.60	7.4	20.71	16.4
5000 g/t	25.19	8.2	17.43	16.4
7000 g/t	23.16	8.6	11.60	19.7

Alçı ile yapılan testlerde, Chryso Labcim 841-003 kullanılmasıyla alçının 5000 devir/dk. rotor hızında ve 20 ve 40 m³/sa hava miktarında sınıflandırıcıdaki kaçak miktarı sırasıyla yaklaşık %10 ve %13 azalmıştır (Şekil 3.17 ve Çizelge 3.9). Ayrıca kullanılan öğütme yardımcısının miktarı arttıkça, sınıflandırıcıdaki kaçak miktarının da azaldığı görülmektedir. Bu durum, alçı tanelerinin klinkere oranla daha fazla topaklanma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Sınıflandırıcı yüksek hava hızında çalışırken bile ancak öğütme yardımcılarının kullanılmasıyla topakların dağıtılabildiği ve bu sayede daha verimli bir sınıflandırma işleminin gerçekleştirildiği görülmektedir.



Şekil 3.17 Alçıya Chryso Labcim 841-003 kimyasalının ilave edilmesi sonucunda havalı sınıflandırıcıya ait verimlilik eğrileri

3.2. Öğütme Yardımcıları ile Gerçekleştirilen Endüstriyel Testler

Öğütme yardımcılarının, öğütme devresinin performansı üzerindeki etkilerini inceleyebilmek için öğütme yardımcılarının kullanıldığı ve kullanılmadığı farklı koşullar test edilmiş ve örnekleme çalışmaları yürütülmüştür. Endüstriyel testler sırasında, beş farklı kimyasalın değişik dozajlarının, öğütme devresinin performansına olan etkileri incelenmiştir. Chryso firması tarafından, altı ham maddenin, değişik oranlarda karışımlarından oluşan, Chryso Labcim 841-001, Chryso Labcim 841-002 ve Chryso Labcim 841-003 olarak adlandırılan, üç farklı öğütme yardımcısı endüstriyel testlerde denenmek üzere özel olarak hazırlanmıştır (Çizelge 3.10). Chryso firması tarafından üretilen bu üç öğütme yardımcısının öğütme devresi üzerindeki etkileri, çimento endüstrisinde ticari olarak hâlihazırda kullanılmakta olan Idea firmasına ait iki farklı öğütme yardımcısı ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.10 Chryso firması tarafından hazırlanan reçeteler

Öğütme Yardımcısı	Etken Madde (EM) İçeriği (%)					
	EM-1	EM-2	EM-3	EM-4	EM-5	EM-6
Chryso Labcim 841-001	8.80	21.87	19.33	-	-	50.00
Chryso Labcim 841-002	7.53	18.81	16.69	6.96	-	50.01
Chryso Labcim 841-003	5.14	12.85	-	5.00	27.00	50.01

Testler sırasında, çimento fabrikasının ürün kalitesinin bozulmaması ve kimyasal dozajlarının üretim miktarı üzerine etkilerinin daha rahat karşılaştırılması amacıyla, her örnekleme döneminin kendi içinde gerçekleştirilen testlerde, aynı ürün inceliğinde ulaşılması hedeflenmiştir. Kullanılan kimyasalların isimleri ve dozajları Çizelge 3.11’de verilmektedir.

Çizelge 3.11 Testler sırasında kullanılan kimyasal miktarları

Kimyasal Adı	Test Edilen Dozajları (g/ton)
Chryso Labcim 841-001	250
	400
	500
Chryso Labcim 841-002	100
	250
	400
Chryso Labcim 841-003	500
	250
	400
İdea DNM 164	100
	200
	400
İdea PSI 9604	500
	800
	1000

Testlerin gerçekleştiği öğütme ve sınıflandırma devresinde yer alan ekipmanların verimliliği tane boyu dağılımları izlenerek değerlendirilmiştir. Alınan numunelerin tane boyu dağılımları 4.5 μm 'ye kadar belirlenmiştir. Bu işlem iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, numuneler, en büyük tane boyundan 150 μm 'ye kadar $\sqrt{2}$ elek serisi ile kuru olarak elenmişlerdir. İkinci aşamada ise 150 μm 'den daha ince olan malzemelerin tane boyu dağılımı Sympatec marka lazerli tane boyu ölçüm cihazı ile analiz edilerek numunelerin boyut dağılımı 4.5 μm 'ye kadar hesaplanmıştır. Çizelge 3.12'de deneysel çalışmalar sırasında 150 μm 'ye kadar kullanılan $\sqrt{2}$ serisi elek boyları ve lazerli tane boyu ölçüm yöntemine ait tane boyları verilmektedir.

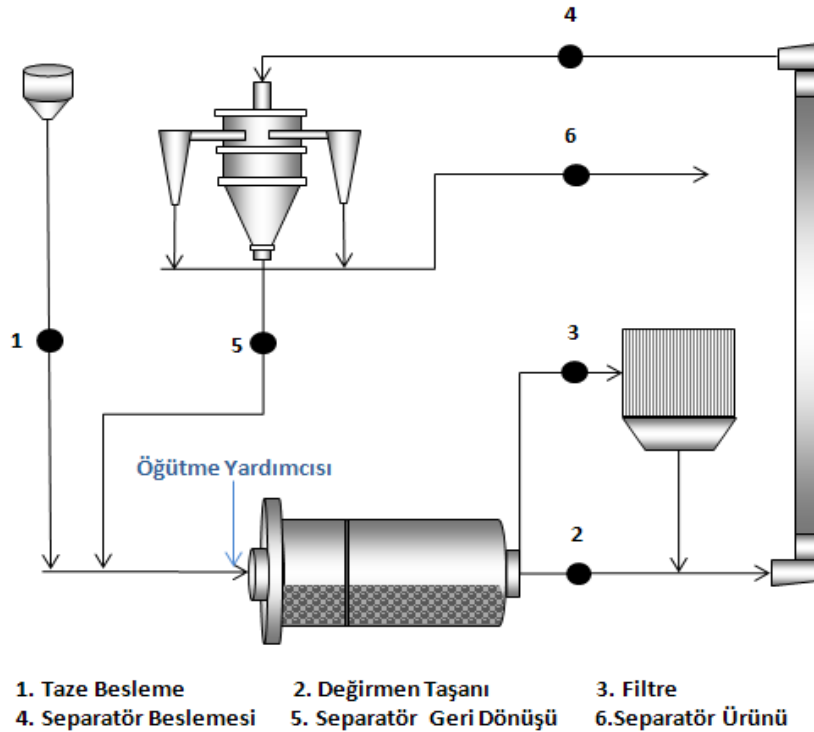
Çizelge 3.12 Deneysel çalışmalarda kullanılan elek ve lazer ölçümü tane boyları

Tane Boyları (mm)				
75	4.75	0.3	0.0525	0.013
50	3.35	0.212	0.045	0.011
38	2.36	0.15	0.0375	0.009
25	1.7	0.125	0.03	0.0075
19	1.18	0.105	0.025	0.0065
13.2	0.85	0.09	0.0215	0.0055
9.5	0.6	0.075	0.0185	0.0045
6.7	0.425	0.0625	0.0155	

Herhangi bir örnekleme çalışması sırasında, sistemin dinamik yapısından, fiziksel koşullardan, ölçüm hatalarından ve insan faktöründen kaynaklanan bazı hatalar ortaya çıkmaktadır. Kütle denklığı, ham verilerin istatistiksel olarak hatalardan arındırılarak devre etrafındaki akışların en iyi şekilde tahmin edilmesini kapsamaktadır. Bu çalışmalar sırasında her bir numune alma noktasında belirlenen tane boyu dağılımları ve kontrol odasından okunan tonaj değerleri kullanılmıştır. Bu veriler kullanılarak ölçülen tane boyu dağılımları düzeltilmektedir. Düzeltilen bu tane boyu değerlerine göre de akışlardaki tonaj değerleri hesaplanmaktadır. Madde denklığı çalışmaları sonrasında, örnekleme çalışmalarında hata olup olmadığı, ölçülen ve hesaplanan tane boyları dağılımı çizilerek anlaşılmaktadır. Çizilen bu grafiklerde aynı tane boyuna karşılık gelen birikimli elek altı değerleri karşılaştırılmaktadır.

3.2.1. Örnekleme ve Kütle Denklığı Çalışmaları

Testlerin gerçekleştirildiği öğütme devresinin basitleştirilmiş akım şeması ve örnekleme noktaları Şekil 3.18’de verilmekteyken, bilyalı değirmene ait bazı teknik bilgiler ise Çizelge 3.13’te verilmiştir.



Şekil 3.18 Çimento öğütme devresinin akım şeması ve örnekleme noktaları

Çizelge 3.13 Bilyalı değirmene ait bazı teknik özellikler

Çimento Değirmeni	
Üretici Firma	Cemteck
Çap (m)	4.4
Uzunluk (m)	15
Değirmen Dönüş Hızı (dev/dk)	15.3
Değirmen Gücü (kW)	3800

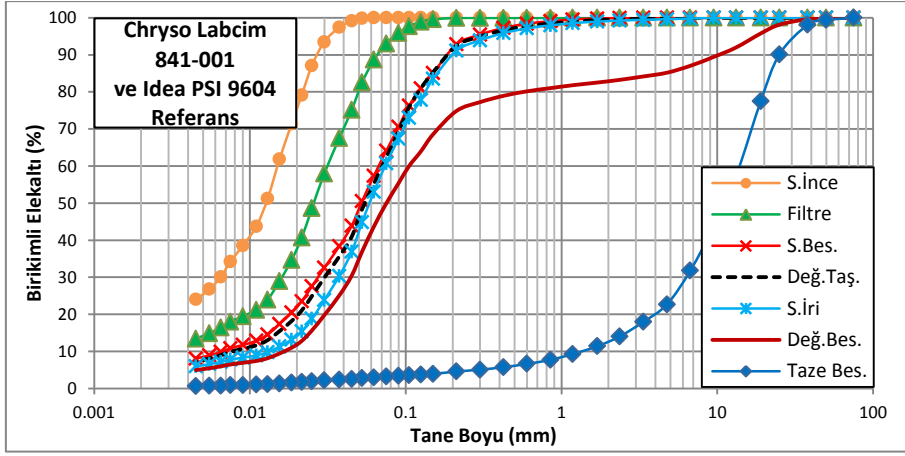
3.2.1.1. Chryso Labcim 841-001 ve İdea PSI 9604 ile gerçekleştirilen testler

Bu örnekleme döneminde 5 farklı koşul test edilmiştir. İlk aşamada, devre, öğütme yardımcısı kullanılmadan örneklenmiştir. İkinci aşamada, Chryso Labcim 841-001 kimyasalı 250, 400 ve 500 g/t oranlarında kullanılırken ve üçüncü aşamada ise İdea PSI 9604 kimyasalı 1000 g/t oranında kullanılırken devre etrafı örneklemeleri yapılmıştır. Örnekleme çalışmalarına ait kontrol odası değerleri Çizelge 3.14’te verilmiştir.

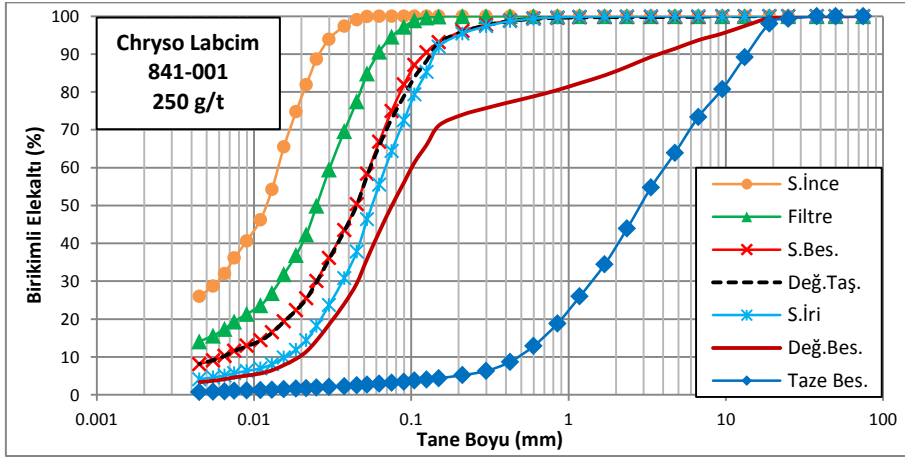
Çizelge 3.14 Chryso Labcim 841-001 ve İdea PSI 9604 ile gerçekleştirilen örneklemelere ait kontrol odası değerleri

		Chryso Labcim 841-001			Idea Psi 9604
		250	400	500	1000
Dozaj (g/t)	-	250	400	500	1000
Taze Besleme (t/sa)	70.30	70.95	71.88	77.61	79.64
Klinker (%)	92	92	92	92	92
Alçı (%)	6	6	6	6	6
Kül (%)	2	2	2	2	2
Separator Geri Dönüş (t/sa)	325.7	255.56	222.67	225.84	206.79
Separator Havası (%)	70	72	91	100	91
Separator Rotor Hızı (rpm)	1057.3	1296.98	1326.37	1297.08	1295.87
Değirmen Motor Amperi (A)	316.15	319.13	317.9	324.06	322.16
Değirmen Çıkış Elavator Amperi (A)	162.5	111.58	108.02	112.18	109.68

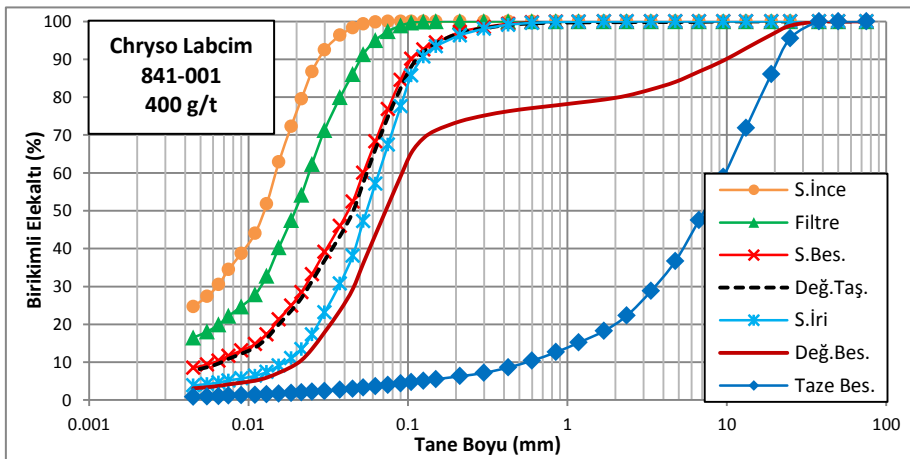
Şekil 3.19 - 3.23’te gerçekleştirilen testlere ait devre etrafı tane boyu dağılım grafikleri; Şekil 3.24 - 3.28’de ise kütle denklığı sonuçları görülmektedir. Çizelge 3.15’te devre etrafında gerçekleştirilen kütle denklığı sonuçları özet olarak sunulmuştur.



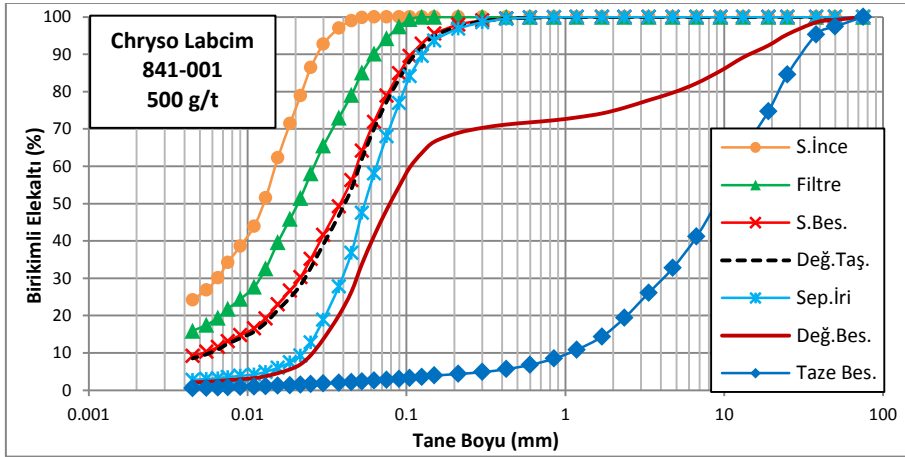
Şekil 3.19 Chryso Labcim 841-001 ve Idea Psi 9604 kimyasalları için yapılan referans testine ilişkin devre etrafı tane boyu dağılımı



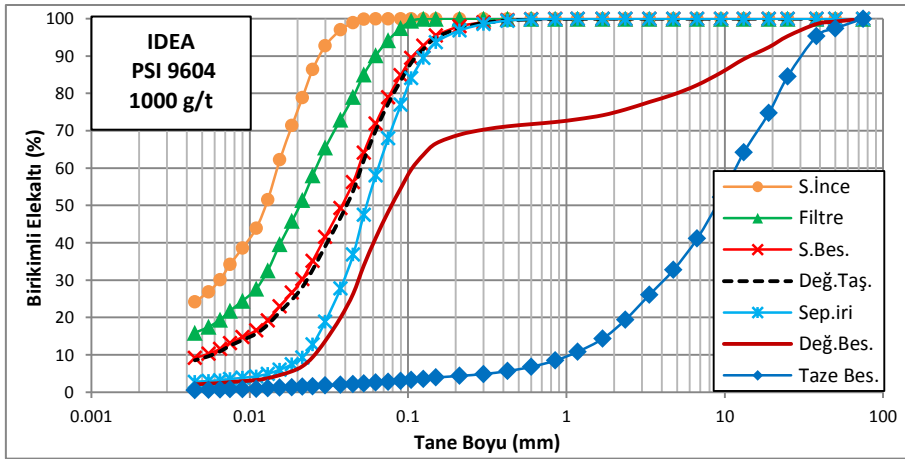
Şekil 3.20 250 g/t Chryso Labcim 841-001 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin devre etrafı tane boyu dağılımı



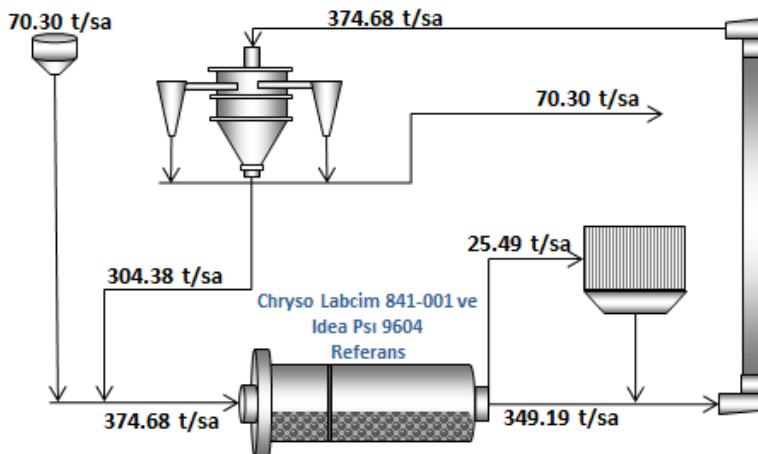
Şekil 3.21 400 g/t Chryso Labcim 841-001 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin devre etrafı tane boyu dağılımı



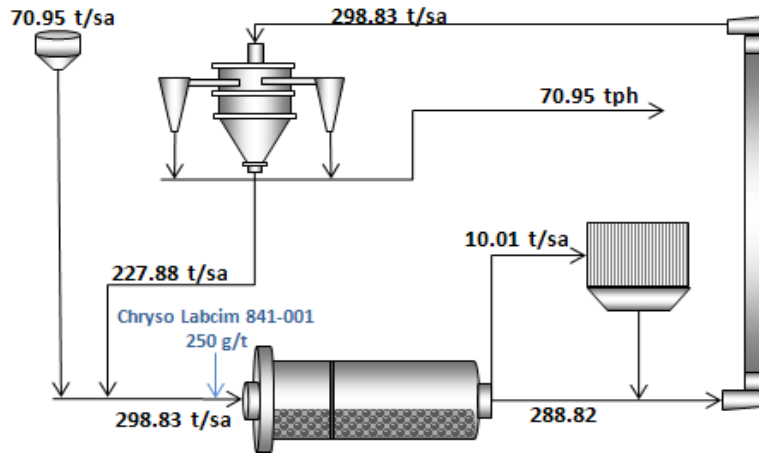
Şekil 3.22 500 g/t Chryso Labcim 841-001 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin devre etrafı tane boyu dağılımı



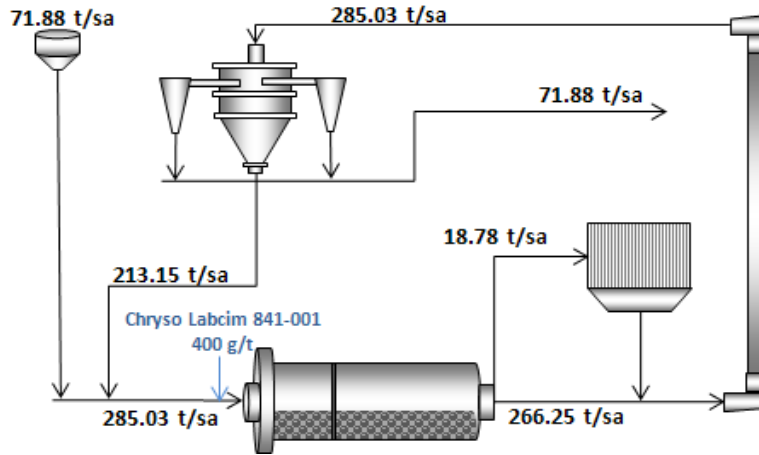
Şekil 3.23 1000 g/t Idea Psı 9604 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin devre etrafı tane boyu dağılımı



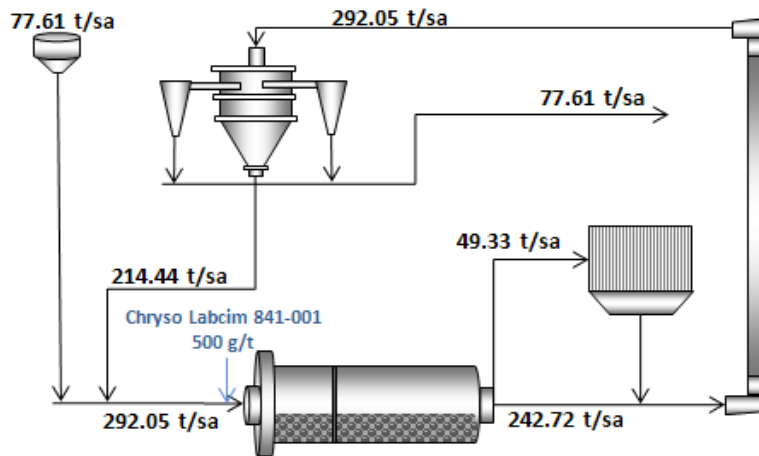
Şekil 3.24 Chryso Labcim 841-001 ve Idea Psı 9604 kimyasalları için yapılan referans testine ilişkin kütle denklığı sonuçları



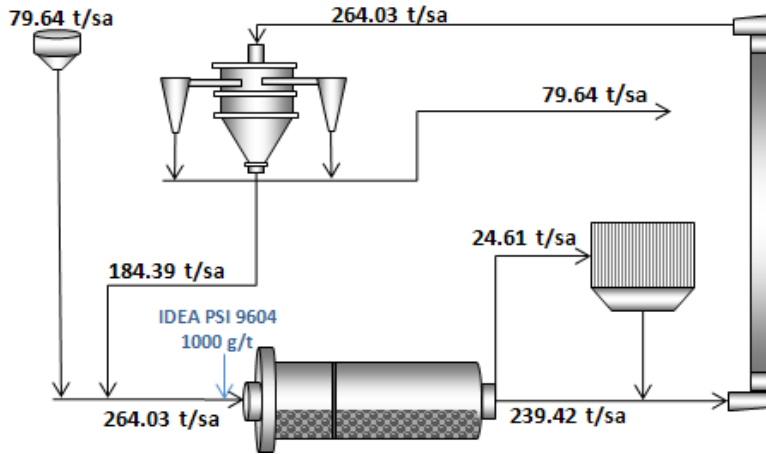
Şekil 3.25 250 g/t Chryso Labcim 841-001 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin kütle dengliği sonuçları



Şekil 3.26 400 g/t Chryso Labcim 841-001 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin kütle dengliği sonuçları



Şekil 3.27 500 g/t Chryso Labcim 841-001 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin kütle dengliği sonuçları

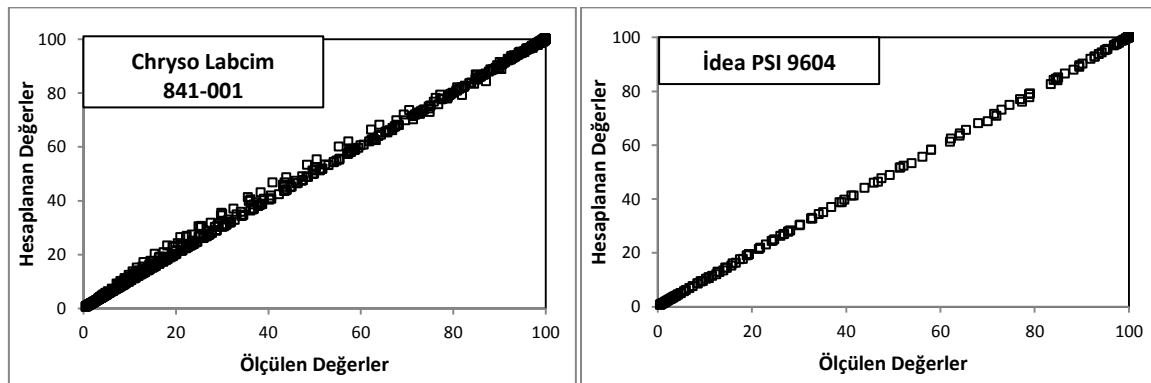


Şekil 3.28 1000 g/t Idea Psı 9604 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin kütle dengliği sonuçları

Çizelge 3.15 Chryso Labcim 841-001 ve İdea PSI 9604 ile yapılan testlere ilişkin kütle dengliği sonuçları

		Chryso Labcim 841-001			Idea Psı 9604
Dozaj (g/t)	-	250	400	500	1000
Taze Besleme (t/sa)	70.30	70.95	71.88	77.61	79.64
Değirmen Taşanı (t/sa)	349.19	288.82	266.25	242.72	239.42
Filtre /t/sa)	25.49	10.01	18.78	49.33	24.61
Sep. Besleme (t/sa)	374.68	298.83	285.03	292.05	264.03
Sep. Geri Dönüş (t/sa)	304.38	227.88	213.15	214.44	184.39
Sep. Ürün (t/sa)	70.30	70.95	71.88	77.61	79.64
Değirmen Besleme (t/sa)	374.68	298.83	285.03	292.05	264.03

Şekil 3.29’da gösterilen grafikten kütle dengliği çalışmalarının sorunsuz bir şekilde gerçekleştiği anlaşılmaktadır.



Şekil 3.29 Ölçülen tane boyu değerlerine karşılık hesaplanan tane boyu değerleri

3.2.1.2. Chryso Labcim 841-002 ve Idea DNM 164 ile gerçekleştirilen testler

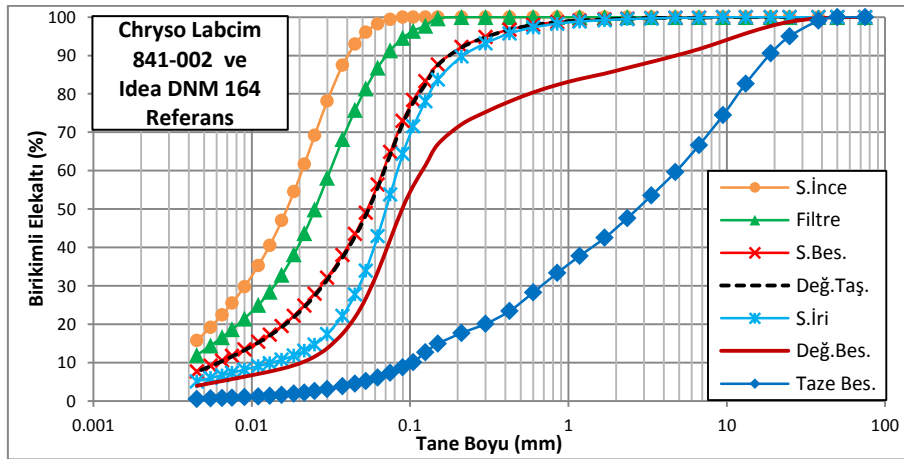
Bu örnekleme döneminde 8 farklı koşul test edilmiştir. İlk aşamada, devre, öğütme yardımcısı kullanılmadan örneklenmiştir. İkinci aşamada, Chryso Labcim 841-002

kimyasalı 100, 250, 400 ve 500 g/t oranlarında kullanılırken ve üçüncü aşamada ise İdea DNM 164 kimyasalı 100, 200 ve 400 g/t oranında kullanılırken devre etrafı örneklemeleri gerçekleştirilmiştir. Örneklemeye çalışmalarına ait kontrol odası değerleri Çizelge 3.16'da verilmiştir.

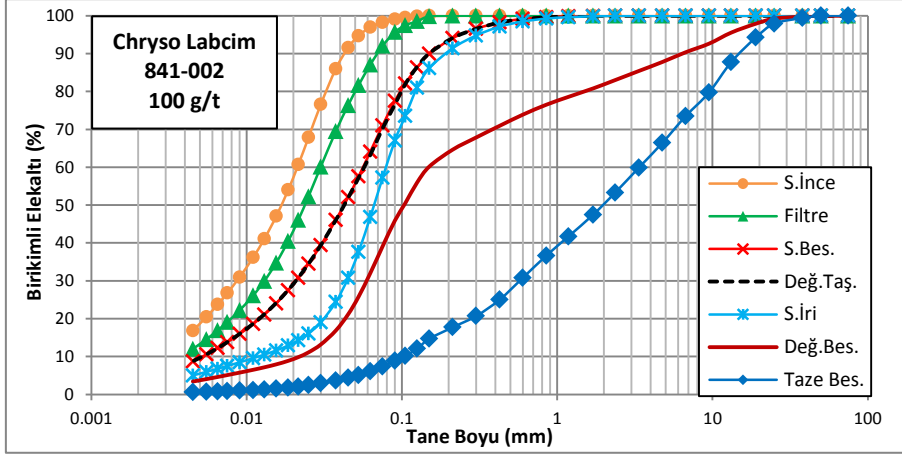
Çizelge 3.16 Chryso Labcim 841-002 ve İdea DNM 164 ile gerçekleştirilen örneklemelere ait kontrol odası değerleri

		Chryso Labcim 841-002				İdea DNM 164		
		100	250	400	500	100	200	400
Dozaj (g/t)	-	100	250	400	500	100	200	400
Taze Besleme (t/sa)	102.42	116.22	119.23	126.86	127.02	112.68	118.08	125.3
Klinker (%)	84	84	84	84	84	84	84	84
Kalker	11	11	11	11	11	11	11	11
Alçı (%)	5	5	5	5	5	5	5	5
Separator Geri Dönüş (t/sa)	321.72	178.99	160.8	198.37	236.91	224.25	160.95	165.63
Separator Havası (%)	60.05	60.07	59.22	29.24	29.24	46.2	49.67	49.77
Separator Rotor Hızı (rpm)	922.34	921.15	930.62	938.62	938.62	945.13	919.08	895.99
Değ. Motor Amperi (A)	343.88	350	351.97	349.19	344.54	349.22	349.17	348.18
Değ. Çıkış Elavator Amperi (A)	147.76	115.68	107.49	117.2	128.05	122.15	165.12	109.51

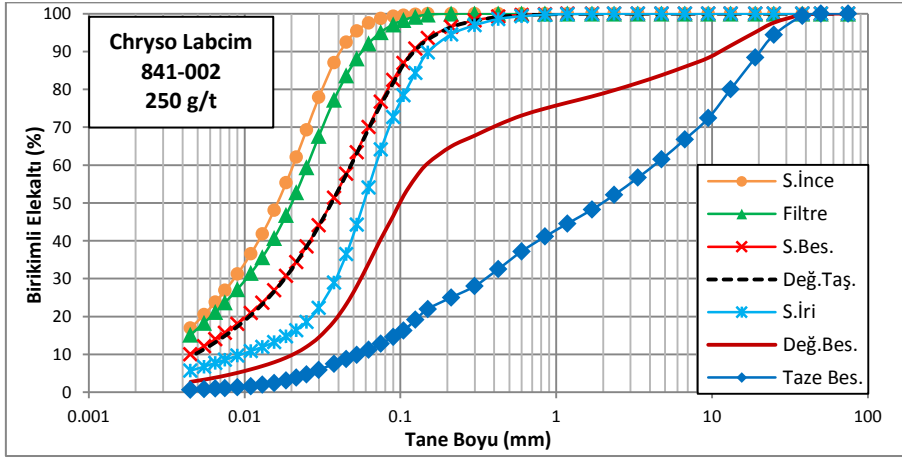
Şekil 3.30 - 3.37'de gerçekleştirilen testlere ait devre etrafı tane boyu dağılım grafikleri; Şekil 3.38 - 3.45'te ise kütle dengliği sonuçları görülmektedir. Çizelge 3.17'de devre etrafında gerçekleştirilen kütle dengliği sonuçları özet olarak sunulmuştur.



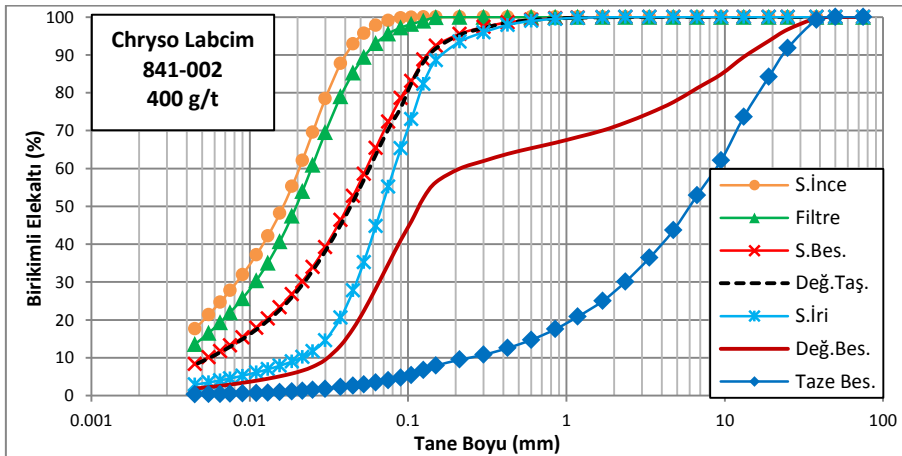
Şekil 3.30 Chryso Labcim 841-002 ve İdea DNM 164 kimyasalları için yapılan referans testine ilişkin devre etrafı tane boyu dağılımı



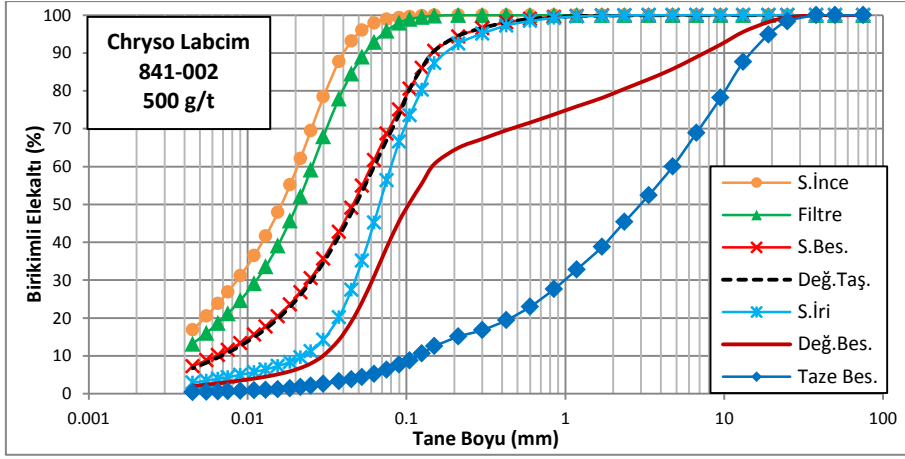
Şekil 3.31 100 g/t Chryso Labcim 841-002 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin devre etrafı tane boyu dağılımı



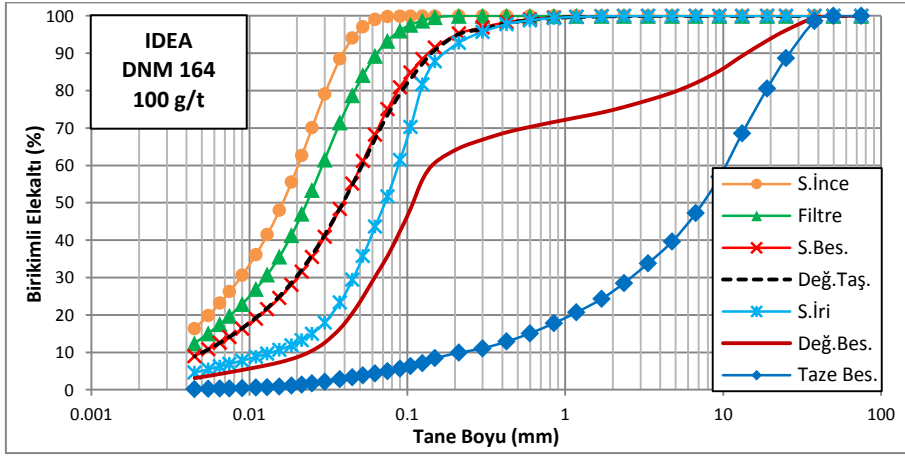
Şekil 3.32 250 g/t Chryso Labcim 841-002 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin devre etrafı tane boyu dağılımı



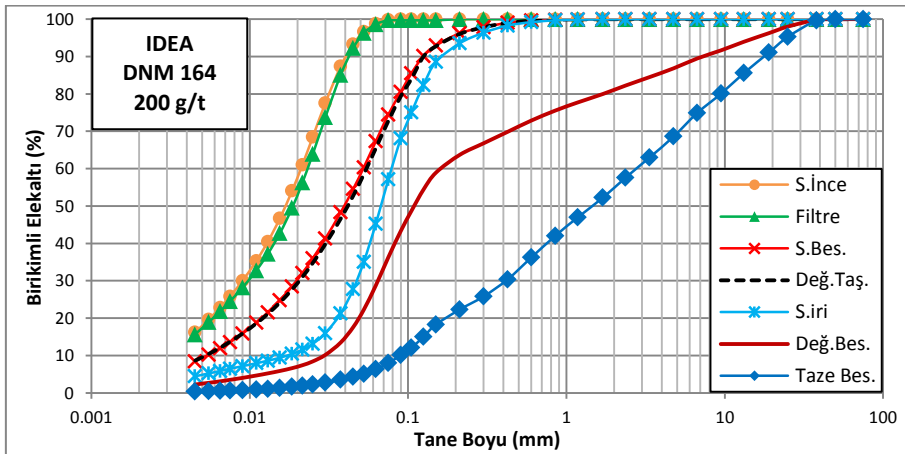
Şekil 3.33 400 g/t Chryso Labcim 841-002 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin devre etrafı tane boyu dağılımı



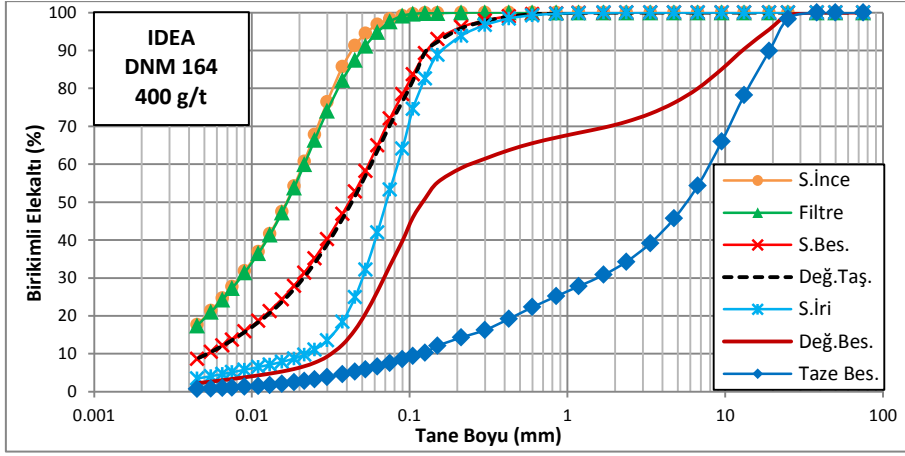
Şekil 3.34 500 g/t Chryso Labcim 841-002 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin devre etrafı tane boyu dağılımı



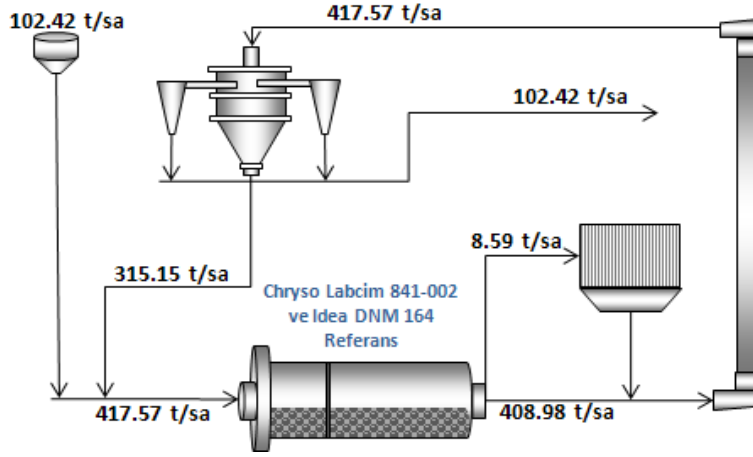
Şekil 3.35 100 g/t Idea DNM 164 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin devre etrafı tane boyu dağılımı



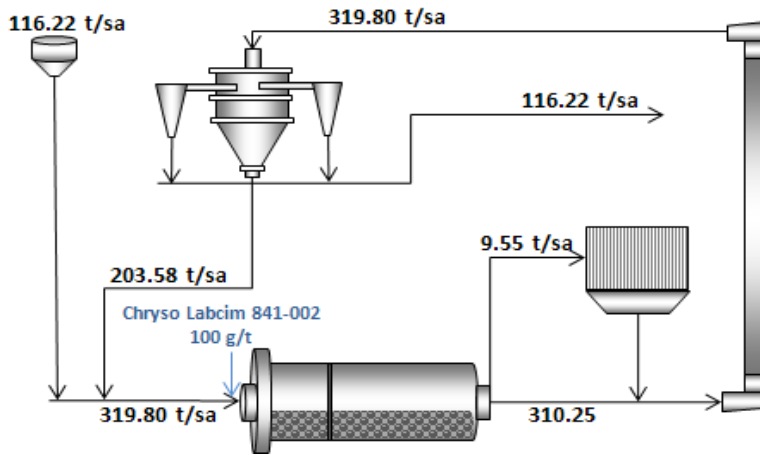
Şekil 3.36 200 g/t Idea DNM 164 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin devre etrafı tane boyu dağılımı



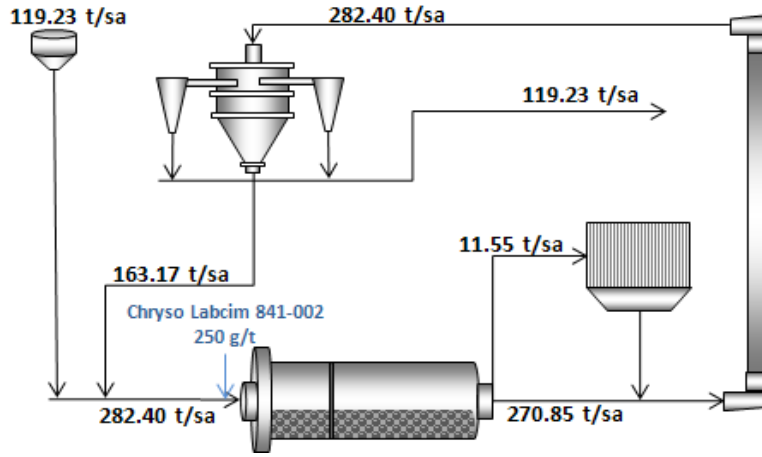
Şekil 3.37 400 g/t Idea DNM 164 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin devre etrafı tane boyu dağılımı



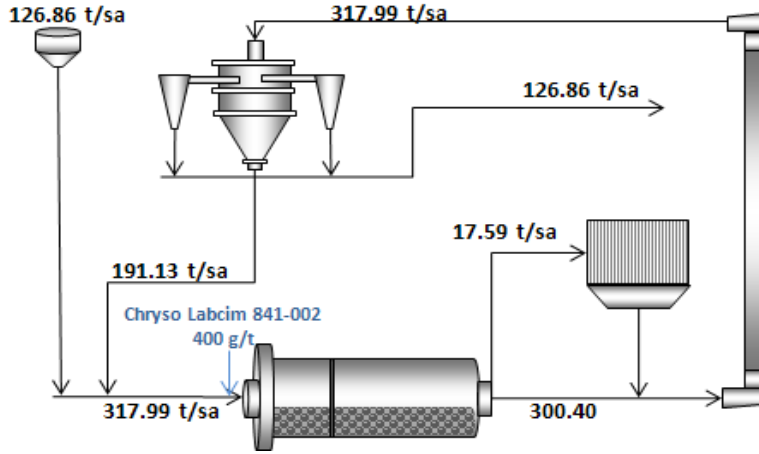
Şekil 3.38 Chryso Labcim 841-002 ve Idea DNM 164 kimyasalları için yapılan referans testine ilişkin kütle denklığı sonuçları



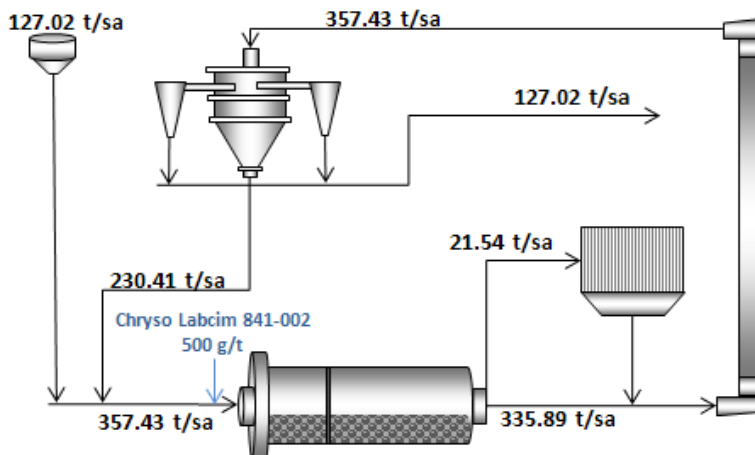
Şekil 3.39 100 g/t Chryso Labcim 841-002 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin kütle denklığı sonuçları



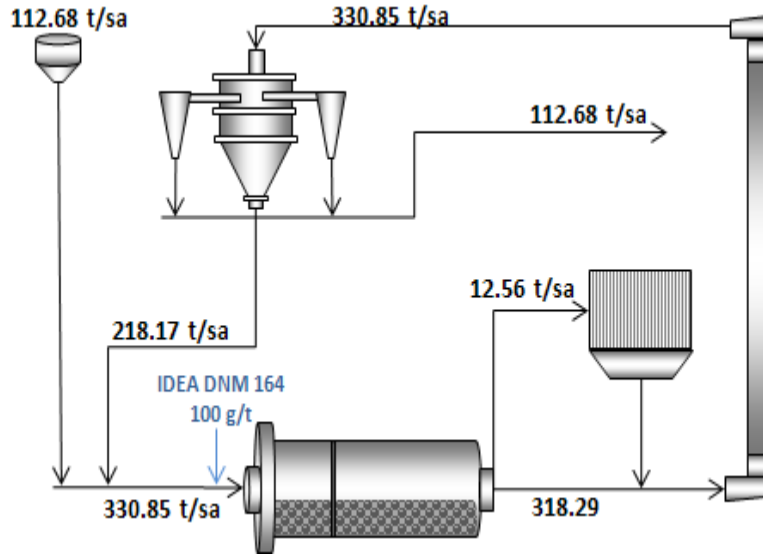
Şekil 3.40 250 g/t Chryso Labcim 841-002 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin kütle dengliği sonuçları



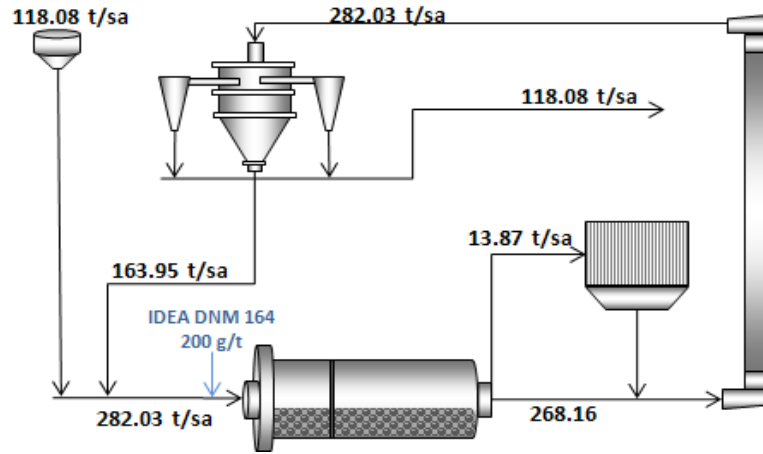
Şekil 3.41 400 g/t Chryso Labcim 841-002 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin kütle dengliği sonuçları



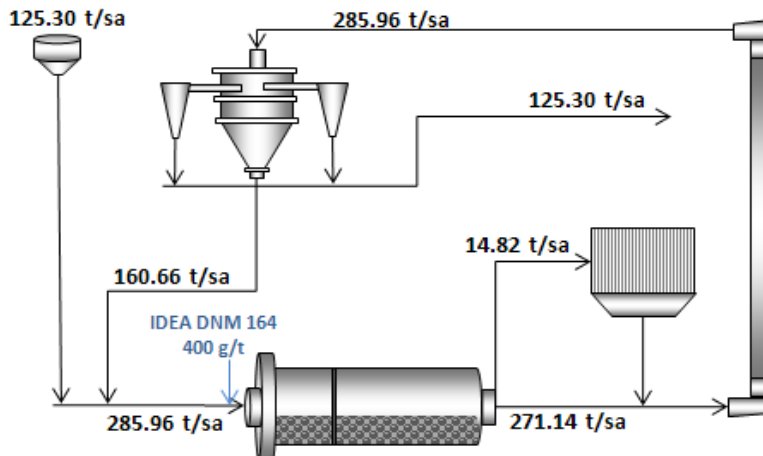
Şekil 3.42 500 g/t Chryso Labcim 841-002 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin kütle dengliği sonuçları



Şekil 3.43 100 g/t Ideia DNM 164 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin kütle dengliği sonuçları



Şekil 3.44 200 g/t Ideia DNM 164 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin kütle dengliği sonuçları

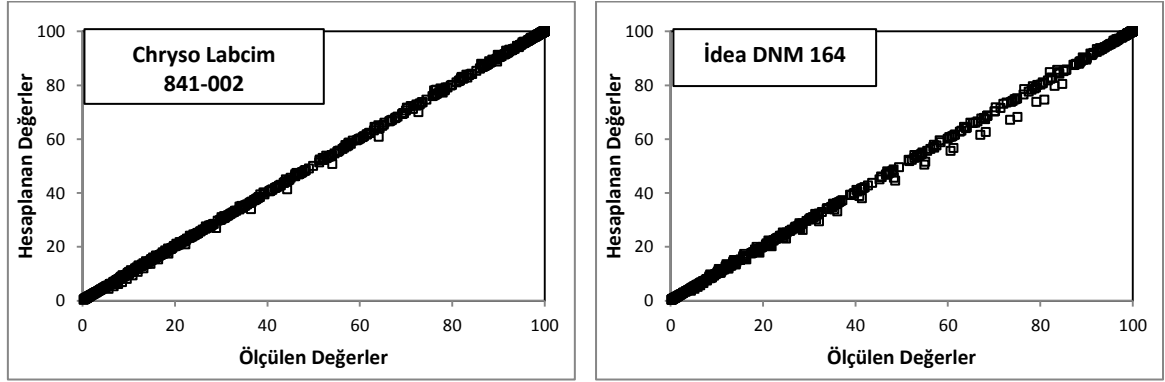


Şekil 3.45 400 g/t Ideia DNM 164 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin kütle dengliği sonuçları

Çizelge 3.17 Chryso Labcim 841-002 ve İdea DNM 164 ile yapılan testlere ilişkin kütle denkliği sonuçları

		Chryso Labcim 841-002				İdea DNM 164		
		100	250	400	500	100	200	400
Dozaj (g/t)	-	100	250	400	500	100	200	400
Taze Besleme (t/sa)	102.42	116.22	119.23	126.86	127.02	112.68	118.08	125.30
Değirmen Taşanı (t/sa)	408.98	310.25	270.85	300.40	335.89	318.29	268.16	271.14
Filtre (t/sa)	8.59	9.55	11.55	17.58	21.54	12.56	13.87	14.82
Sep. Besleme (t/sa)	417.57	319.80	282.40	317.99	357.43	330.85	282.03	285.96
Sep. Geri Dönüş (t/sa)	315.15	203.58	163.17	191.13	230.41	218.17	163.95	160.66
Sep. Ürün (t/sa)	102.42	116.22	119.23	126.86	127.02	112.68	118.08	125.30
Değirmen Besleme (t/sa)	417.57	319.80	282.40	317.99	357.43	330.85	282.03	285.96

Şekil 3.46’da gösterilen grafikten kütle denkliği çalışmalarının sorunsuz bir şekilde gerçekleştiği anlaşılmaktadır.



Şekil 3.46 Ölçülen tane boyu değerlerine karşılık hesaplanan tane boyu değerleri

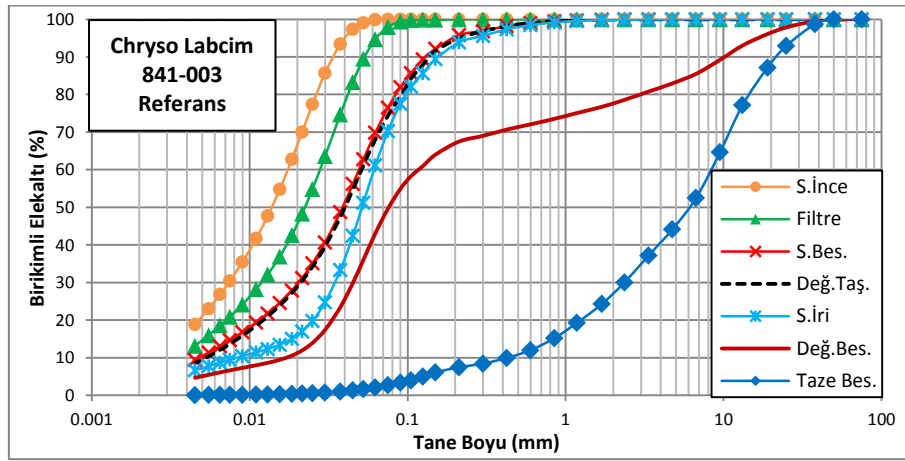
3.2.1.3. Chryso Labcim 841-003 ile gerçekleştirilen testler

Bu örnekleme döneminde 3 farklı koşul test edilmiştir. İlk aşamada, devre, öğütme yardımcısı kullanılmadan örneklenmiştir. İkinci aşamada ise Chryso Labcim 841-003 kimyasalı 250 ve 400 g/t oranlarında kullanılırken devre etrafı örneklemeleri gerçekleştirilmiştir. Örnekleme çalışmalarına ait kontrol odası değerleri Çizelge 3.18’de verilmiştir.

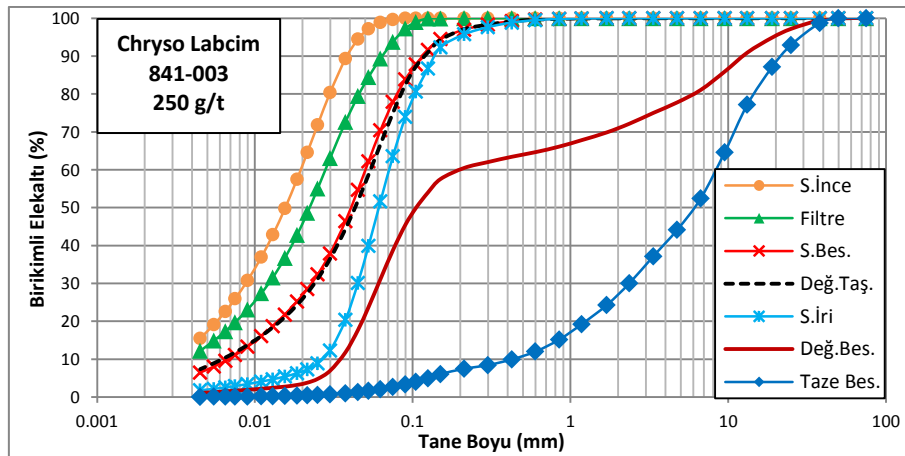
Şekil 3.47 - 3.39’da gerçekleştirilen testlere ait devre etrafı tane boyu dağılım grafikleri; Şekil 3.50 - 3.52’de ise kütle denkliği sonuçları görülmektedir. Çizelge 3.19’da devre etrafında gerçekleştirilen kütle denkliği sonuçları özet olarak sunulmuştur.

Çizelge 3.18 Chryso Labcim 841-003 ile gerçekleştirilen örneklemelere ait kontrol odası değerleri

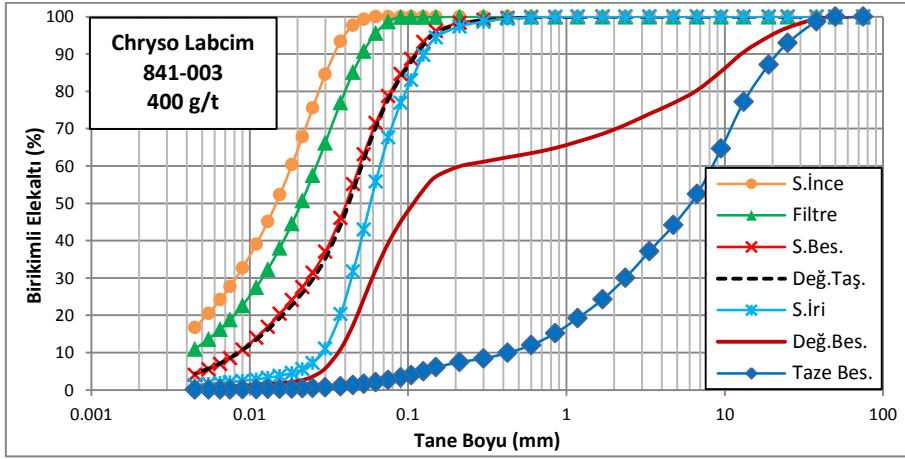
		Chryso Labcim 841-003	
		250	400
Dozaj (g/t)	-	250	400
Taze Besleme (t/sa)	103.02	118.36	120.10
Klinker (%)	92	92	92
Kalker	2	2	2
Alçı (%)	6	6	6
Separator Geri Dönüş (t/sa)	342.31	343.94	344.84
Separator Havası (%)	49.19	59.75	59.75
Separator Rotor Hızı (rpm)	1061.11	1061.49	1071.97
Değirmen Motor Amperi (A)	342.31	343.94	344.84
Değirmen Çıkış Elavator Amperi (A)	118.57	109.73	110.2



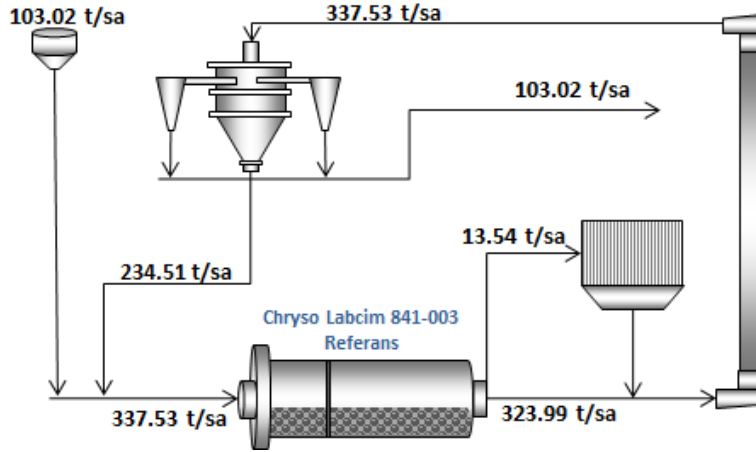
Şekil 3.47 Chryso Labcim 841-003 için yapılan referans testine ilişkin devre etrafı tane boyu dağılımı



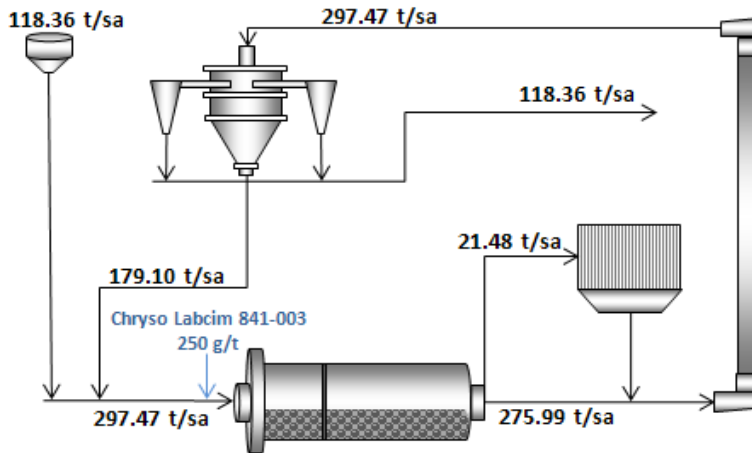
Şekil 3.48 250 g/t Chryso Labcim 841-003 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin devre etrafı tane boyu dağılımı



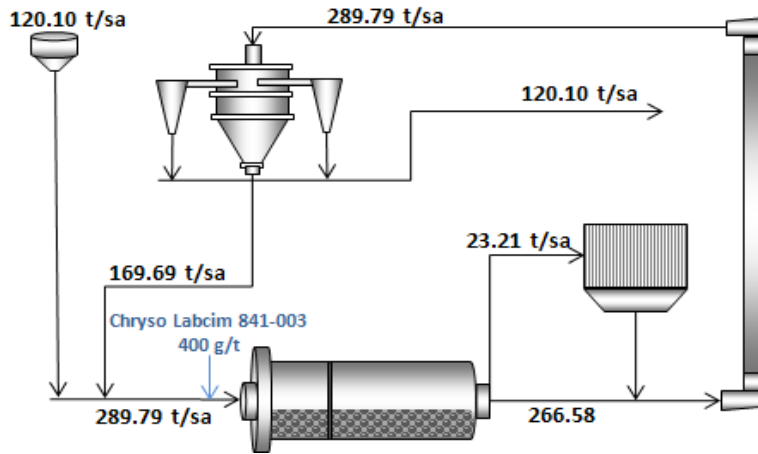
Şekil 3.49 400 g/t Chryso Labcim 841-003 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin devre etrafı tane boyu dağılımı



Şekil 3.50 Chryso Labcim 841-003 kimyasalı için yapılan referans testine ilişkin kütle denklığı sonuçları



Şekil 3.51 250 g/t Chryso Labcim 841-003 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin kütle denklığı sonuçları

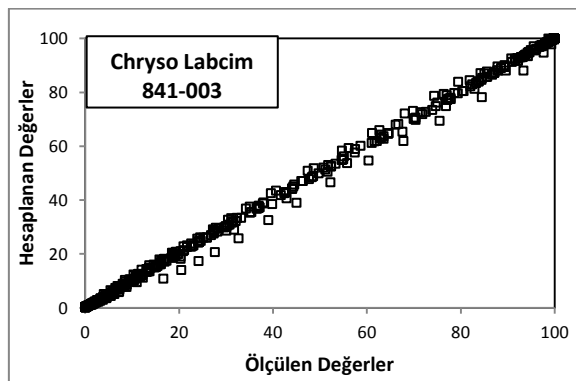


Şekil 3.52 400 g/t Chryso Labcim 841-003 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin kütle dengliği sonuçları

Çizelge 3.19 Chryso Labcim 841-003 ile yapılan testlere ilişkin kütle dengliği sonuçları

		Chryso Labcim 841-003	
Dozaj (g/t)	-	250	400
Taze Besleme (t/sa)	103.02	118.36	120.10
Değirmen Taşanı (t/sa)	323.99	275.99	266.58
Filtre (t/sa)	13.54	21.47	23.21
Sep. Besleme (t/sa)	337.53	297.46	289.79
Sep. Geri Dönüş (t/sa)	234.51	179.10	169.69
Sep. Ürün (t/sa)	103.02	118.36	120.10
Değirmen Besleme (t/sa)	337.53	297.47	289.99

Şekil 3.53'te gösterilen grafikten kütle dengliği çalışmalarının sorunsuz bir şekilde gerçekleştiği anlaşılmaktadır.



Şekil 3.53 Ölçülen tane boyu değerlerine karşılık hesaplanan tane boyu değerleri

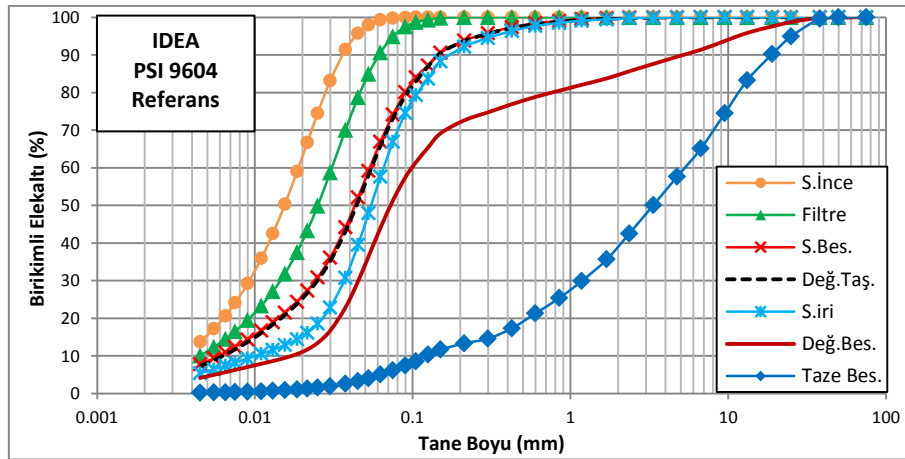
3.2.1.4. İdea PSI 9604 kimyasalı gerçekleştirilen testler

Bu örnekleme döneminde 3 farklı koşul test edilmiştir. İlk aşamada, devre, öğütme yardımcısı kullanılmadan örneklenmiştir. İkinci aşamada ise İdea PSI 9604 kimyasalı 500 ve 800 g/t oranlarında kullanılırken devre etrafı örneklemeleri gerçekleştirilmiştir. Örnekleme çalışmalarına ait kontrol odası değerleri Çizelge 3.20’de verilmektedir.

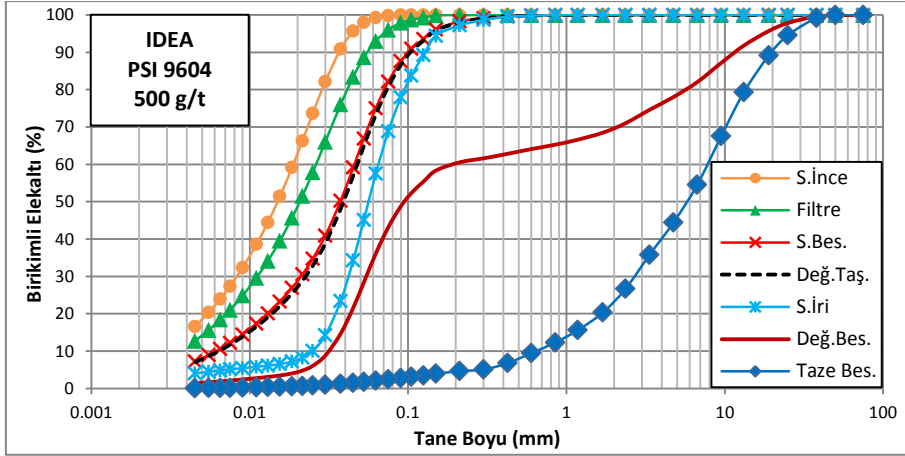
Çizelge 3.20 İdea PSI 9604 ile gerçekleştirilen örneklemelere ait kontrol odası değerleri

		IDEA PSI 9604	
		500	800
Dozaj (g/t)	-	500	800
Taze Besleme (t/sa)	100.88	106.87	121.82
Klinker (%)	92	92	92
Kalker	2	2	2
Alçı (%)	6	6	6
Separator Geri Dönüş (t/sa)	304.97	346.96	350.33
Separator Havası (%)	57.46	78.87	69.3
Separator Rotor Hızı (rpm)	1027.77	1084.64	1040.2
Değirmen Motor Amperi (A)	341.67	346.96	350.33
Değirmen Çıkış Elavator Amperi (A)	137.9	106.99	102.54

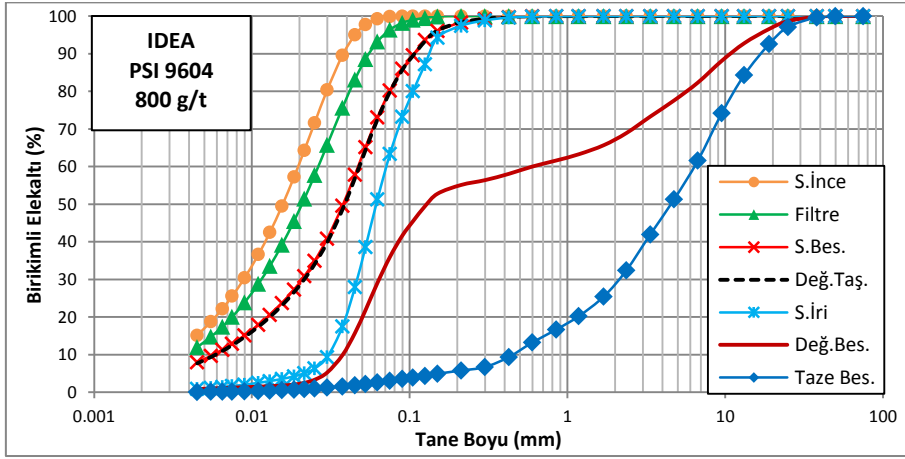
Şekil 3.54 - 3.56’da gerçekleştirilen testlere ait devre etrafı tane boyu dağılım grafikleri; Şekil 3.57 - 3.59’da ise kütle denklığı sonuçları görülmektedir. Çizelge 3.21’de devre etrafında gerçekleştirilen kütle denklığı sonuçları özet olarak sunulmuştur.



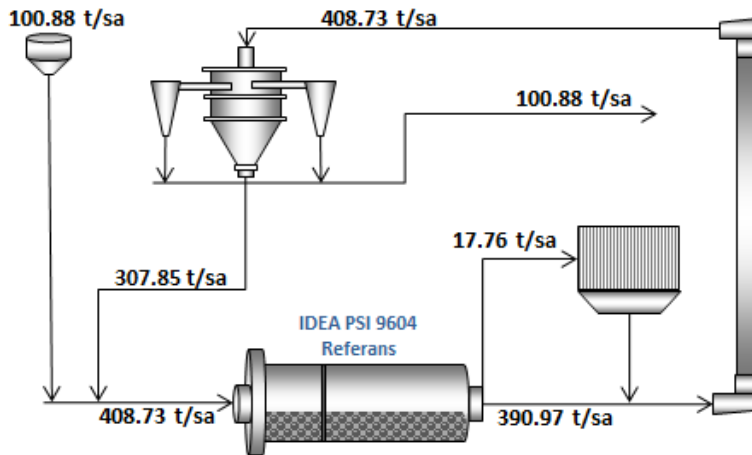
Şekil 3.54 İdea DNM 9604 için yapılan referans testine ilişkin devre etrafı tane boyu dağılımı



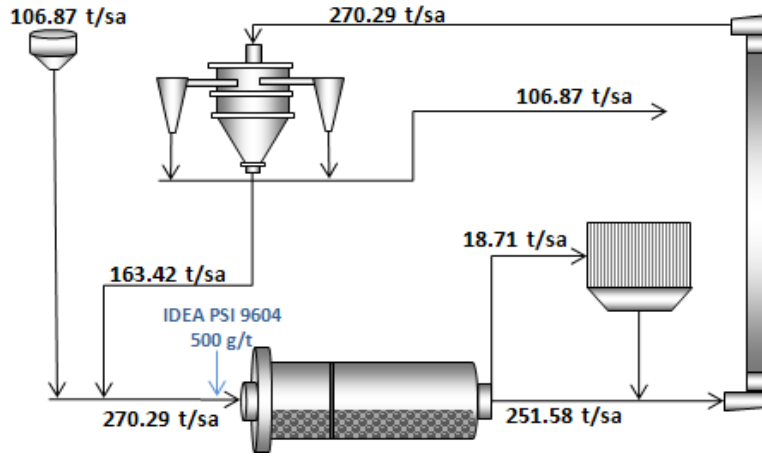
Şekil 3.55 500 g/t Idea DNM 9604 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin devre etrafı tane boyu dağılımı



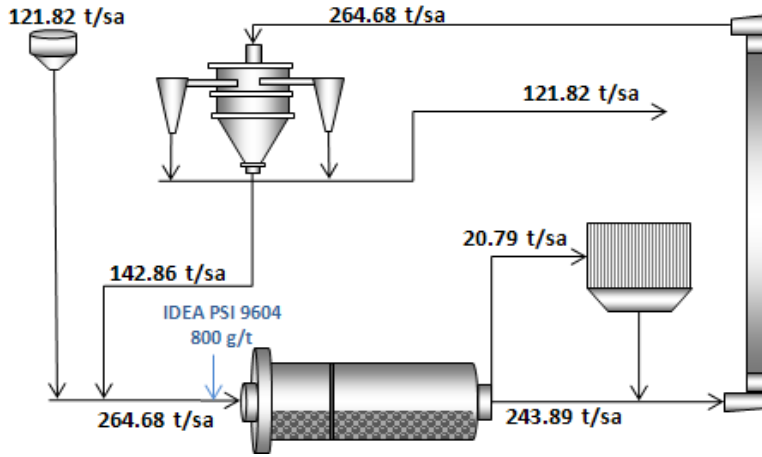
Şekil 3.56 800 g/t Idea DNM 9604 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin devre etrafı tane boyu dağılımı



Şekil 3.57 Idea PSI 9604 kimyasalı için yapılan referans testine ilişkin kütle denklığı sonuçları



Şekil 3.58 500 g/t Idea PSI 9604 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin kütle dengliği sonuçları

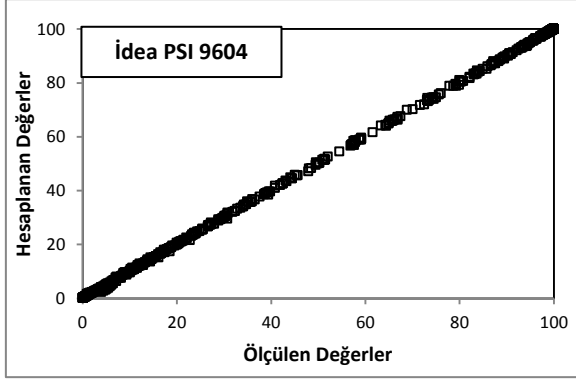


Şekil 3.59 800 g/t Idea PSI 9604 kullanılarak gerçekleştirilen teste ilişkin kütle dengliği sonuçları

Çizelge 3.21 İdea PSI 9604 ile yapılan testlere ilişkin kütle dengliği sonuçları

		IDEA PSI 9604		
Dozaj (g/t)	0	500	800	
Taze Besleme (t/sa)	100.88	106.87	121.82	
Değirmen Taşanı (t/sa)	390.97	251.58	243.89	
Filtre (t/sa)	17.76	18.71	20.79	
Sep. Besleme (t/sa)	408.72	270.29	264.68	
Sep. Geri Dönüş (t/sa)	307.85	163.42	142.86	
Sep. Ürün (t/sa)	100.87	106.87	121.82	
Değirmen Besleme (t/sa)	408.73	270.29	264.68	

Şekil 3.60'da gösterilen grafikten kütle dengliği çalışmalarının sorunsuz bir şekilde gerçekleştiği anlaşılmaktadır.

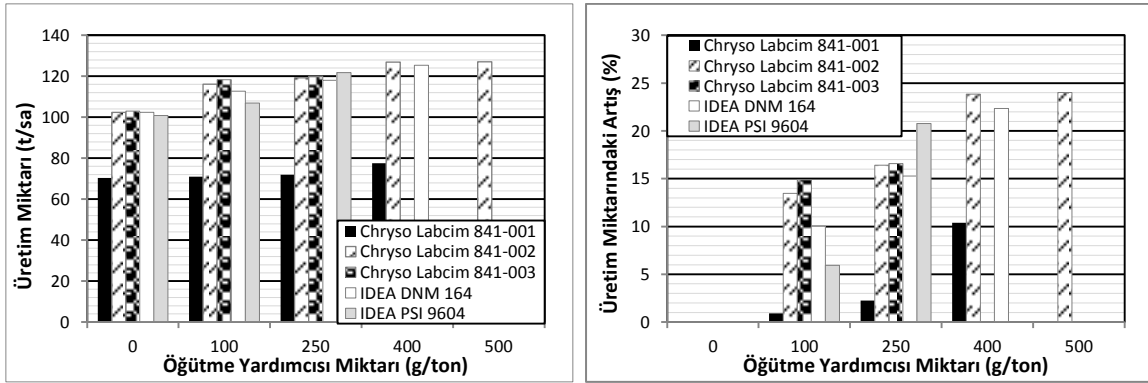


Şekil 3.60 Ölçülen tane boyu değerlerine karşılık hesaplanan tane boyu değerleri

3.2.2. Endüstriyel Testlerin Sonuçları

Endüstriyel testler sonucunda, öğütme yardımcılarının öğütme devresinde yer alan değirmen ve sınıflandırıcı üzerindeki etkileri ayrı ayrı incelenmiştir.

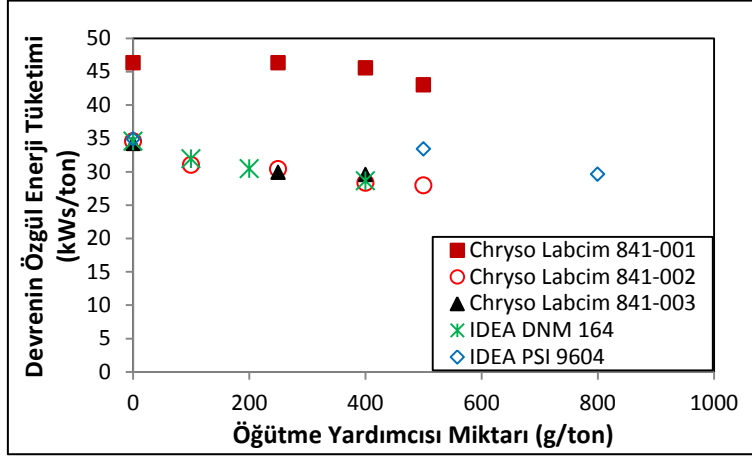
Test edilen bütün öğütme yardımcılarının çimento öğütme devresinin üretim miktarını arttırdığı görülmüştür (Şekil 3.61). En yüksek kapasite artışı (%24) ise 500 g/t Chyrso 841-002 kullanıldığı koşulda elde edilmiştir. Öğütme yardımcılarının kullanılmasıyla, aynı enerji tüketimi ile daha fazla ürün elde edilebilmesi, öğütme devresinde daha düşük özgül enerji tüketimi ile üretim yapılabilmesine olanak sağlamıştır (Şekil 3.62).



Şekil 3.61 Öğütme yardımcılarının üretim miktarı üzerine etkileri

Mishra [56] kuru trikalsiyum silikatın (C_3S) öğütülmesi için harcanan enerjinin % 0.56'nı yüzey enerjisi, % 0.19 ise aglomerasyon enerjisi için harcadığını tespit etmiştir (Çizelge 2.8). Bu durumda, endüstriyel testlerde kullanılan öğütme yardımcılarının çimento tanelerinin yüzey ve aglomerasyon enerjilerinin tüketimini tamamen engellemiş bile olsa, öğütme devresinin özgül enerji tüketimini ancak % 0.75 düşürecektir. Fakat endüstriyel testler sonucunda, öğütme yardımcılarının kullanılması ile öğütme devresinin özgül enerji tüketiminin % 10 ile %19 arasında düştüğü görülmüştür. Bu durum, öğütme yardımcılarının sadece çimento taneleri üzerindeki aglomerasyon ve yüzey enerjilerini

düşürmekle kalmadığını, aynı zamanda öğütme ekipmanlarının daha verimli çalışmasına olanak sağlayacak reolojik ortamı da sağladığını göstermektedir.

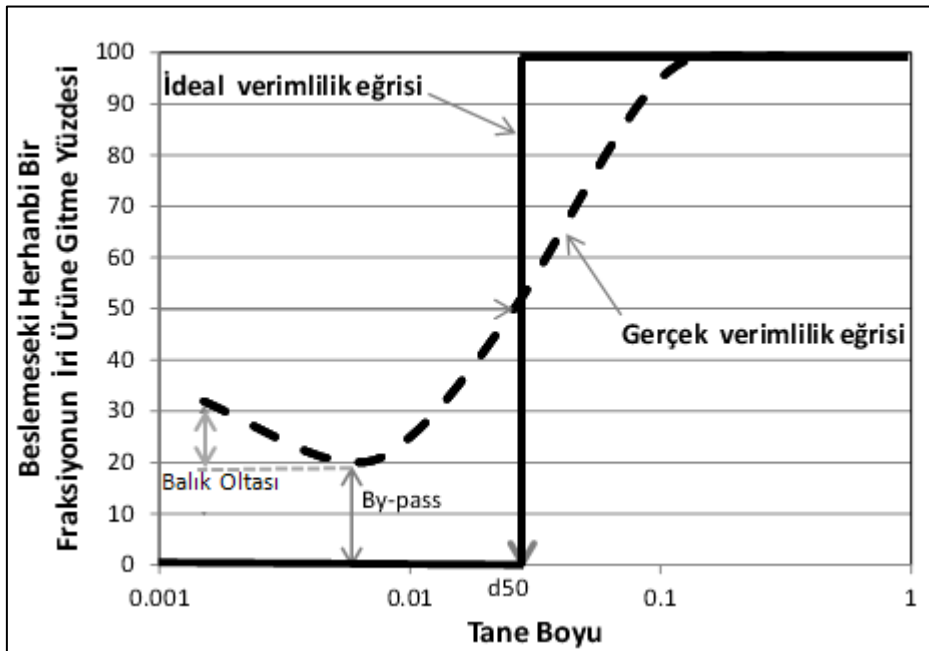


Şekil 3.62 Öğütme yardımcılarının devrenin birim enerji tüketimi üzerine etkisi

3.2.2.1. Öğütme Yardımcılarının Havalı Sınıflandırıcı Üzerindeki Etkileri

Sınıflandırıcıların, performansları değerlendirilirken verimlilik eğrileri kullanılmaktadır. Sınıflandırıcı verimlilik eğrilerinde yapılan değerlendirme çalışmalarında kullanılan parametrelerin açıklamasının bulunduğu tipik bir grafik Şekil 3.63'te verilmektedir.

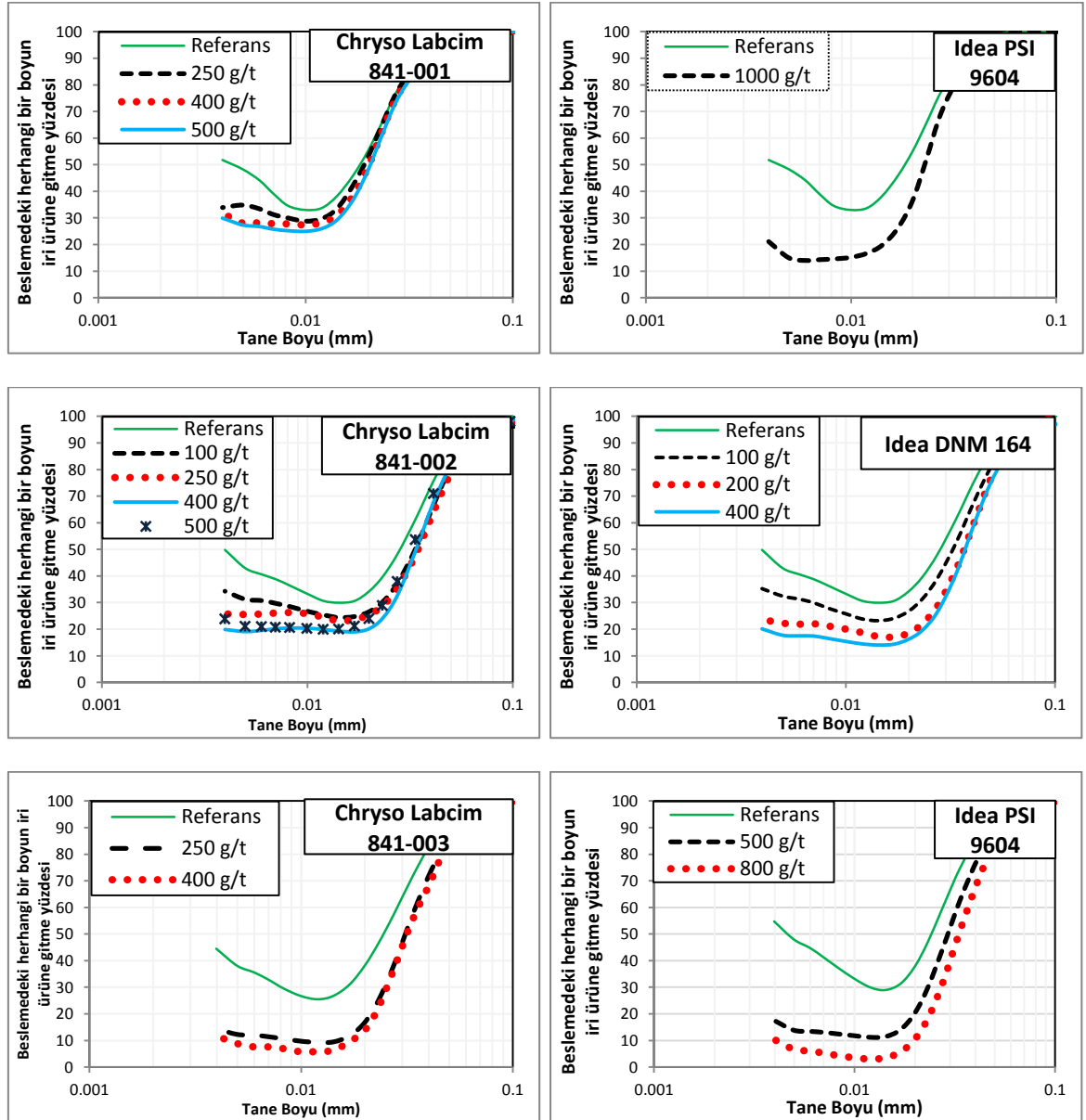
Bypass, sınıflandırıcı beslemesinden sınıflandırmaya uğramadan iri ürüne kaçan malzeme miktarını; balık oltası ince tanelerin irilere yapışması sonucu iri ürüne kaçan ince malzeme miktarını; d_{50} ise ayırım boyunu ifade etmektedir.



Şekil 3.63 Tipik bir verimlilik eğrisi ve parametreleri

İdeal bir eğride ekipmanın ayırım boyundan ince tanelerin %100'ü sistemi ince ürün akışından terk ederken, ayırım boyundan iri tanelerin %100'ü sistemi iri ürün akışından terk etmektedir. Alınan endüstriyel verilerde ideal eğri elde edilememekte ve %10 ile %40 arası kaçak yüzdeleri gözlemlenmektedir.

Gerçekleştirilen endüstriyel testlerin kütle denkliklerinin sonucunda, her bir koşul için havalı sınıflandırıcının verimlilik eğrileri çizilerek işletme parametreleri hesaplanmıştır (Şekil 3.64 ve Çizelge 3.22).



Şekil 3.64 Endüstriyel testler sonucunda havalı sınıflandırıcıya ait hesaplanan verimlilik eğrileri

Şekil 3.65'te öğütme yardımcıları ile farklı koşullarda gerçekleştirilen endüstriyel testlerde havalı sınıflandırıcıya ait indirgenmiş verimlilik eğrileri verilmektedir. İndirgenmiş

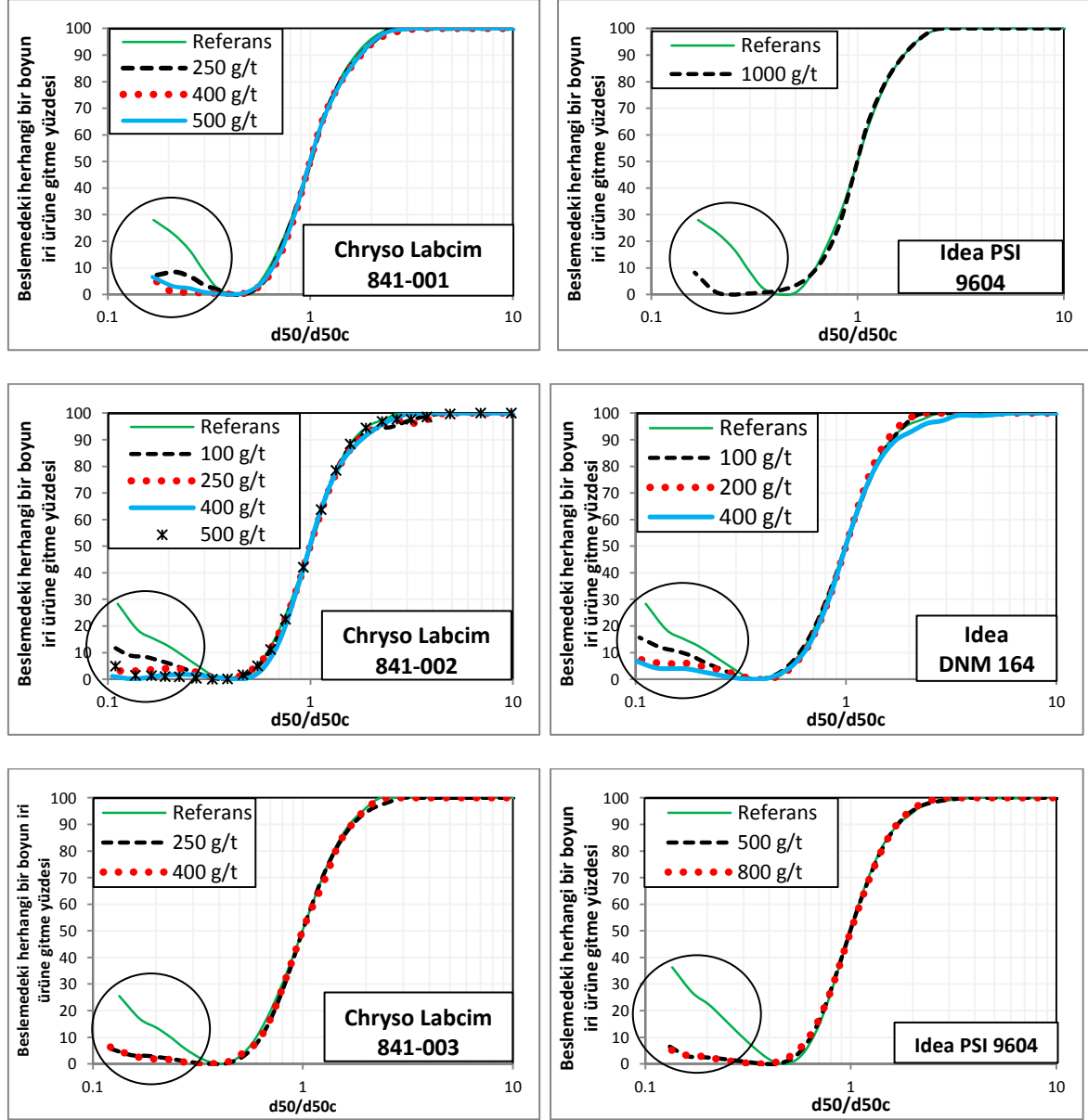
verimlilik eğrileri malzeme yoğunluğu ve şekline bağlı iken, sınıflandırıcı boyutları ve işletim koşulları indirgenmiş verimlilik eğrileri üzerinde etkili değildir [82]. Şekil 3.64’de görüldüğü gibi, öğütme yardımcılarının sınıflandırıcının ayırım keskinliğini ifade eden indirgenmiş verimlilik eğrilerinin eğim açısı üzerinde etkileri olmamıştır. Ancak kullanılan öğütme yardımcılarının miktarı ile orantılı olarak, ince tanelerin irilere yapışması sonucu iri ürüne kaçan ince malzeme miktarı (balık oltası) azaltmıştır. Bu durum, öğütme yardımcılarının ince çimento tanelerin topaklanma eğilimlerini azalttığının bir kanıtıdır.

Çizelge 3.22 Öğütme yardımcılarının havalı sınıflandırıcı parametreleri üzerine etkileri

	Dozaj (g/t)	Besleme (t/sa)	İri Akış (t/sa)	İnce Akış (t/sa)	Rotor Hızı (rpm)	Hava (%)	Kaçak (%)	d ₅₀ (mm)	d _{50C} (mm)
Referans	-	374.68	304.38	70.30	1267	70	33.00	0.018	0.024
Chryso	250	298.83	227.88	70.95	1297	72	28.78	0.019	0.023
Labcim	400	285.03	213.15	71.88	1326	91	27.38	0.020	0.024
841-001	500	292.05	214.44	77.61	1297	100	24.96	0.021	0.024
Idea PSI 9604	1000	264.03	184.39	79.64	1296	91	14.01	0.023	0.024
Referans	-	417.57	315.15	102.42	922	60	29.95	0.028	0.035
Chryso	100	319.80	203.58	116.22	921	60	24.40	0.033	0.039
Labcim	250	282.40	163.17	119.23	931	59	23.17	0.035	0.040
841-002	400	317.99	191.13	126.86	939	29	19.00	0.034	0.038
	500	357.43	230.41	127.02	939	29	19.95	0.032	0.036
Idea	100	330.85	218.17	112.68	945	46	23.21	0.032	0.038
DNM 164	200	282.03	163.95	118.08	919	50	17.07	0.037	0.040
	400	285.96	160.66	125.30	896	50	14.06	0.037	0.040
Referans	-	408.72	307.85	100.87	1028	57	28.96	0.024	0.029
IDEA	500	270.29	163.42	106.87	1085	79	11.20	0.029	0.031
PSI 9604	800	264.68	142.86	121.82	1040	69	3.05	0.033	0.034
Referans	-	337.53	234.51	103.02	1061	49	25.50	0.025	0.030
Chryso	250	297.46	179.11	118.36	1061	60	9.28	0.031	0.033
Labcim	400	289.79	169.89	119.90	1072	60	5.77	0.032	0.033
841-003									

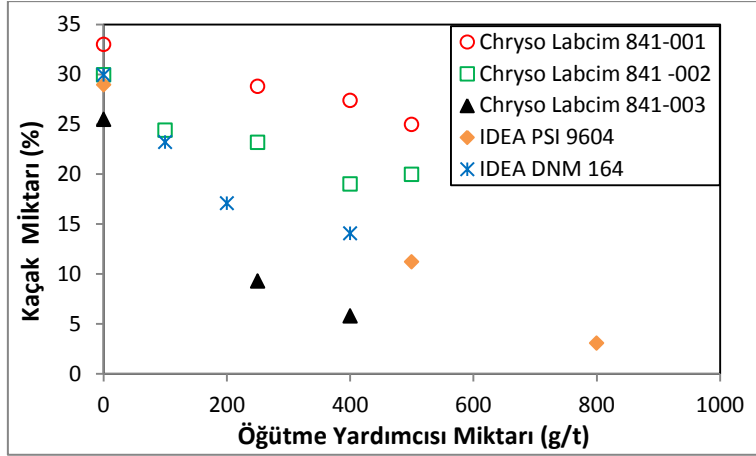
Şekil 3.66 incelendiğinde test edilen bütün öğütme yardımcılarının havalı sınıflandırıcıdaki kaçak miktarını azalttığı görülmektedir. Öğütme yardımcılarının kullanılmadığı

durumlarda, havalı sınıflandırıcının ince akışından sistemi terk etmesi gereken ürün inceliğindeki taneler birbirleri ile bağlar oluşturarak iri bir tane gibi davranmakta ve havalı sınıflandırıcının iri akışına gitmektedirler. Bu durum havalı sınıflandırıcıdaki kaçak miktarının yükselmesine ve dolayısıyla sistemdeki devreden yük oranının artmasına neden olmaktadır (Şekil 3.67).

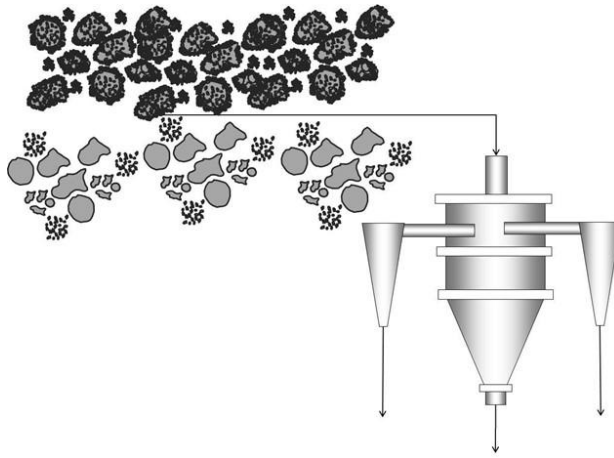


Şekil 3.65. Öğütme yardımcıları ile gerçekleştirilen testlere ait havalı sınıflandırıcı indirgenmiş verimlilik eğrileri

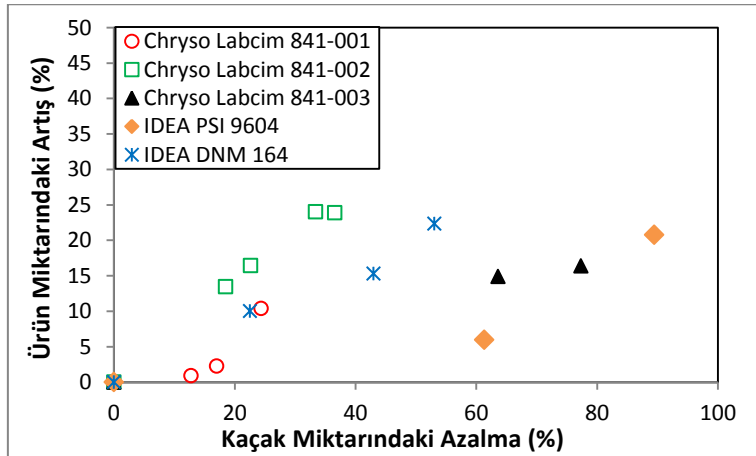
Öğütme yardımcıları, ince tanelerin topaklanma eğilimlerini azaltarak sınıflandırılmalarını kolaylaştırmakta ve böylece havalı sınıflandırıcıdaki kaçak miktarının azalmasına ve devreden yük miktarının düşmesine ve ürün miktarının artmasına yardımcı olmaktadır (Şekil 3.68 ve Şekil 3.69).



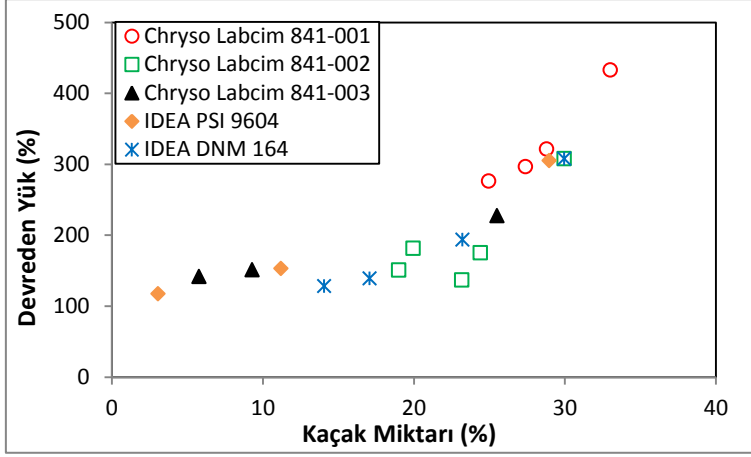
Şekil 3.66 Kullanılan öğütme yardımcısına bağlı olarak kaçak miktarındaki azalma



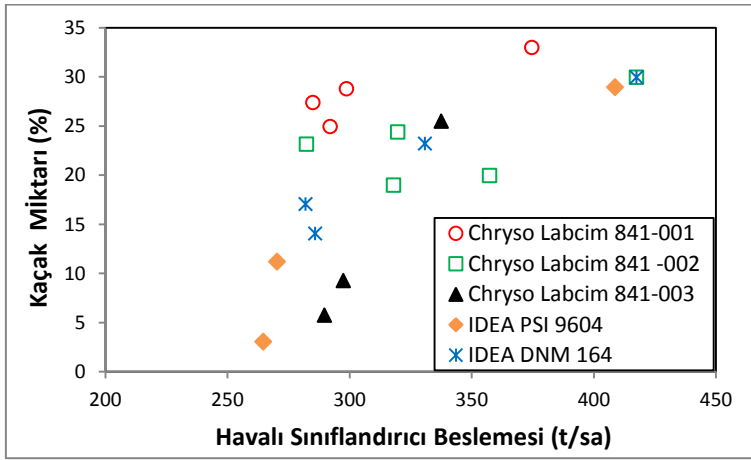
Şekil 3.67 Havalı sınıflandırıcıya beslenen tanelerin topaklanmasının şematik görünümü



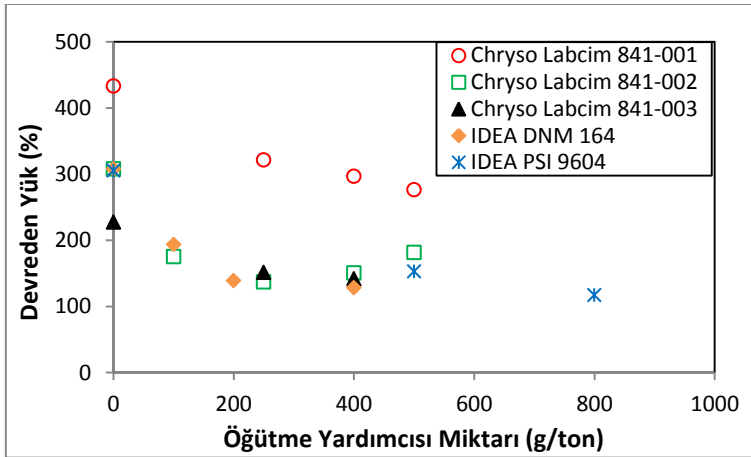
Şekil 3.68 Kaçak miktarı ile ürün miktarı arasındaki ilişki



Şekil 3.69 Kaçak miktarı ile devreden yük arasındaki ilişki



Şekil 3.70 Sınıflandırıcı besleme miktarının kaçak miktarı ile ilişkisi



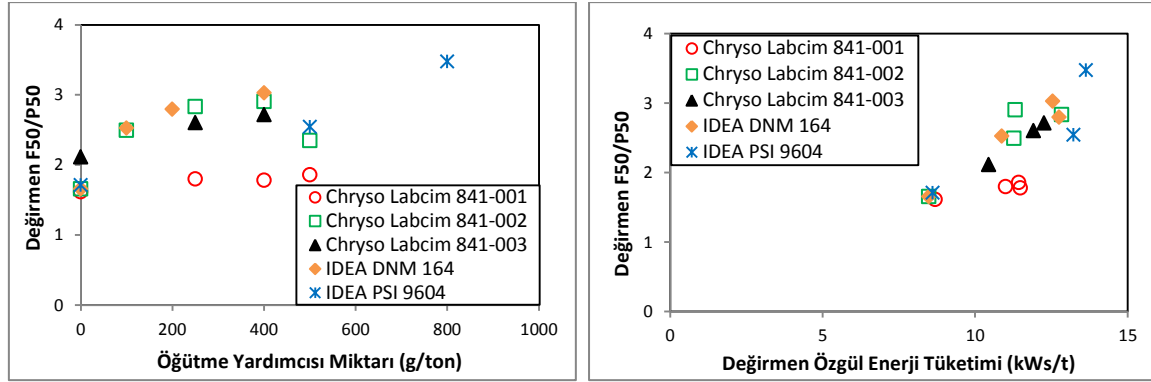
Şekil 3.71 Öğütme yardımcılarının devreden yük üzerine etkisi

Havalı sınıflandırıcıdaki kaçak miktarının, sınıflandırıcıya beslenen malzeme miktarıyla artan toz yükünün artmasıyla doğru orantılı olduğu bilinmektedir [83]. Öğütme

yardımcılarının sistemdeki devreden yük miktarı ile doğru orantılı olarak havalı sınıflandırıcıya beslenen malzeme miktarını düşürmesi, sınıflandırıcıdaki kaçak miktarının azalmasına dolaylı olarak katkı sağlamıştır (Şekil 3.70).

3.2.2.2. Öğütme Yardımcılarının Bilyalı Değirmen Üzerindeki etkileri

Öğütme yardımcıların değirmen içine verilmeye başlanmasıyla beraber, kontrol odasından değirmen çıkış elavator motor akımının anlık olarak yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu duruma, toplanan ince çimento tanelerinin dağılarak, değirmeni hızlı bir şekilde terk etmeleri sonucunda, değirmen çıkış elavatorünün taşıdığı malzeme miktarının anlık olarak artması neden olmuştur. Ayrıca değirmen 2. kamarasından gelen sesin artması da değirmen astarına ve bilyalarına sıvayan malzeme miktarının azalarak değirmenin boşaldığının bir göstergesidir.



Şekil 3.72 Değirmen indirgeme oranının öğütme yardımcısı miktarına ve değirmen özgül enerji tüketimine bağlı olarak değişimi

Şekil 3.71 incelendiğinde öğütme yardımcıların kullanılması sistemdeki devreden yük miktarının azaldığı görülmektedir. Sistemdeki devreden yükün azalmasına bağlı olarak, bilyalı değirmenden birim zamanda geçen malzeme miktarı azalmış ve bilyalı değirmenin özgül enerji tüketimi artmıştır. Değirmendeki özgül enerji tüketiminin artması ile de değirmenin indirgeme oranı artmıştır (Şekil 3.72).

4. MODELLEME ve SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Öğütme yardımcıları ile gerçekleştirilen endüstriyel testler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak havalı sınıflandırıcı ve değirmen ürünlerinin akış miktarlarını ve tane boyu dağılımlarını en iyi tanımlayan model parametreleri belirlenmiş ve öğütme yardımcılarının bu parametreler üzerindeki etkileri incelenmiştir.

4.1. Havalı sınıflandırıcının modellenmesi

Günümüze kadar verimlilik eğrisini tanımlayan birçok eşitlik geliştirilmiştir. Lippek & Espig, Finch, Lynch & Rao, Molerus ve Plitt yaklaşımının balık oltası etkisini tanımlamada yetersiz kaldığı anlaşılmıştır. Zhan yaklaşımının ise pek çok veri setinde uyumsuz sonuçlar verdiği görülmüştür. Whiten yaklaşımının ise bütün veri setlerinde verimlilik eğrisini tanımlamada başarılı olduğu anlaşılmış ve modelleme çalışmaları için en uygun matematiksel fonksiyon olduğu sonucuna varılmıştır [84].

Tesiste yapılan örnekleme çalışmaları sonucunda, öğütme devresindeki havalı sınıflandırıcının verimliliğinde meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. Doğrusal olmayan regresyon tekniği kullanılarak Whiten [85] eşitliğine (Eşitlik (4.1) göre havalı sınıflandırıcının model parametreleri belirlenmiştir.

$$E_{OA} = C \left[\frac{(1 + \beta \beta^* X)(e^\alpha - 1)}{(e^{\alpha \beta^* X} + e^\alpha - 2)} \right] \quad (4.1)$$

β : Olta etkisini ifade eden değişken

α : Ayırım keskinliğini ifade eden değişken

β^* : d_{50c} nin tanımından gelen bir değişken; $E=(1/2)C$ iken $d = d_{50c}$

X : d/d_{50c}

C : Gerçek sınıflandırma işlemine maruz kalan fraksiyon; $(1 - kaçak)$

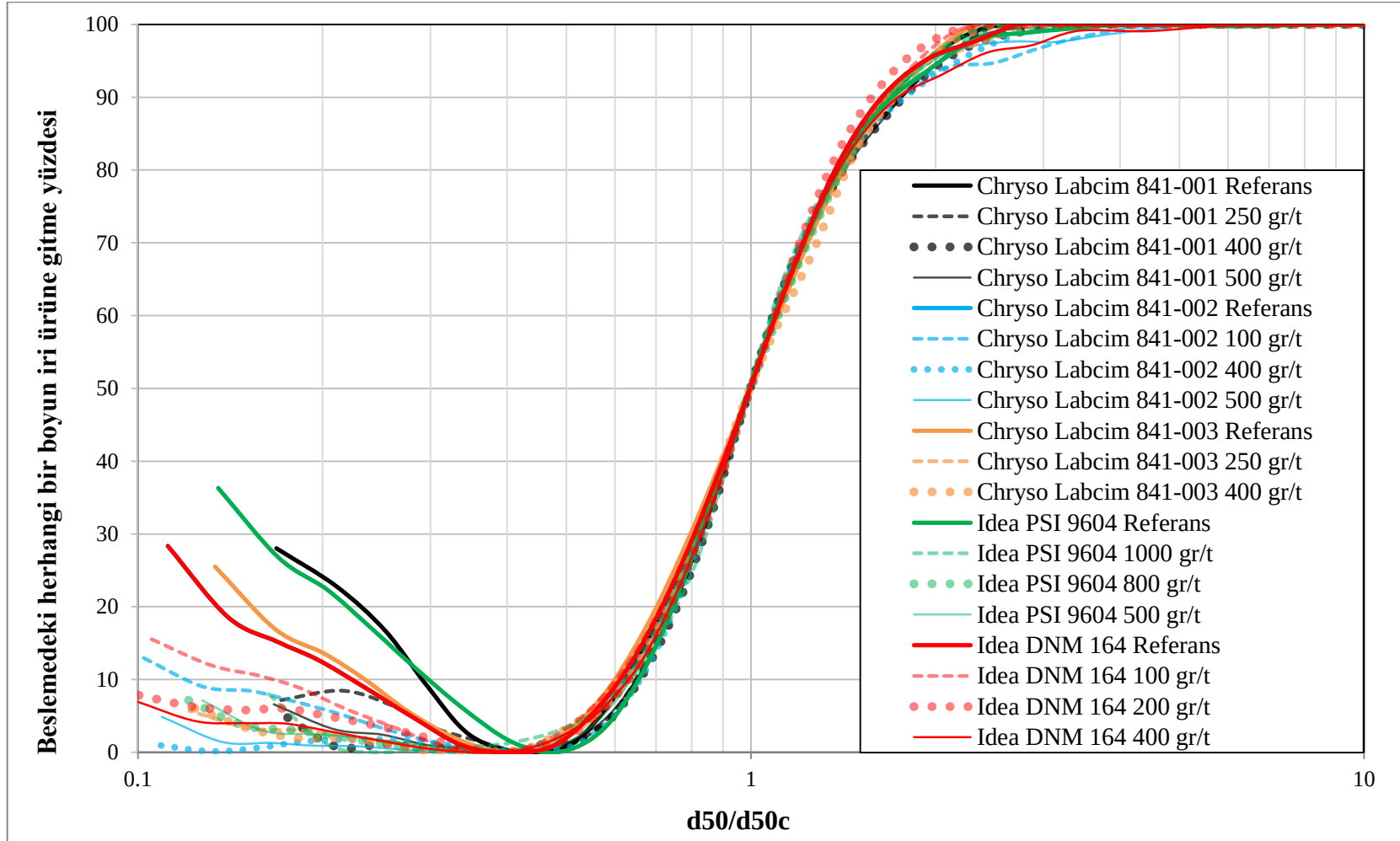
d_{50c} : Düzeltilmiş kesme boyu

E_{OA} : Üst akıma göre hesaplanmış gerçek verimlilik eğrisi

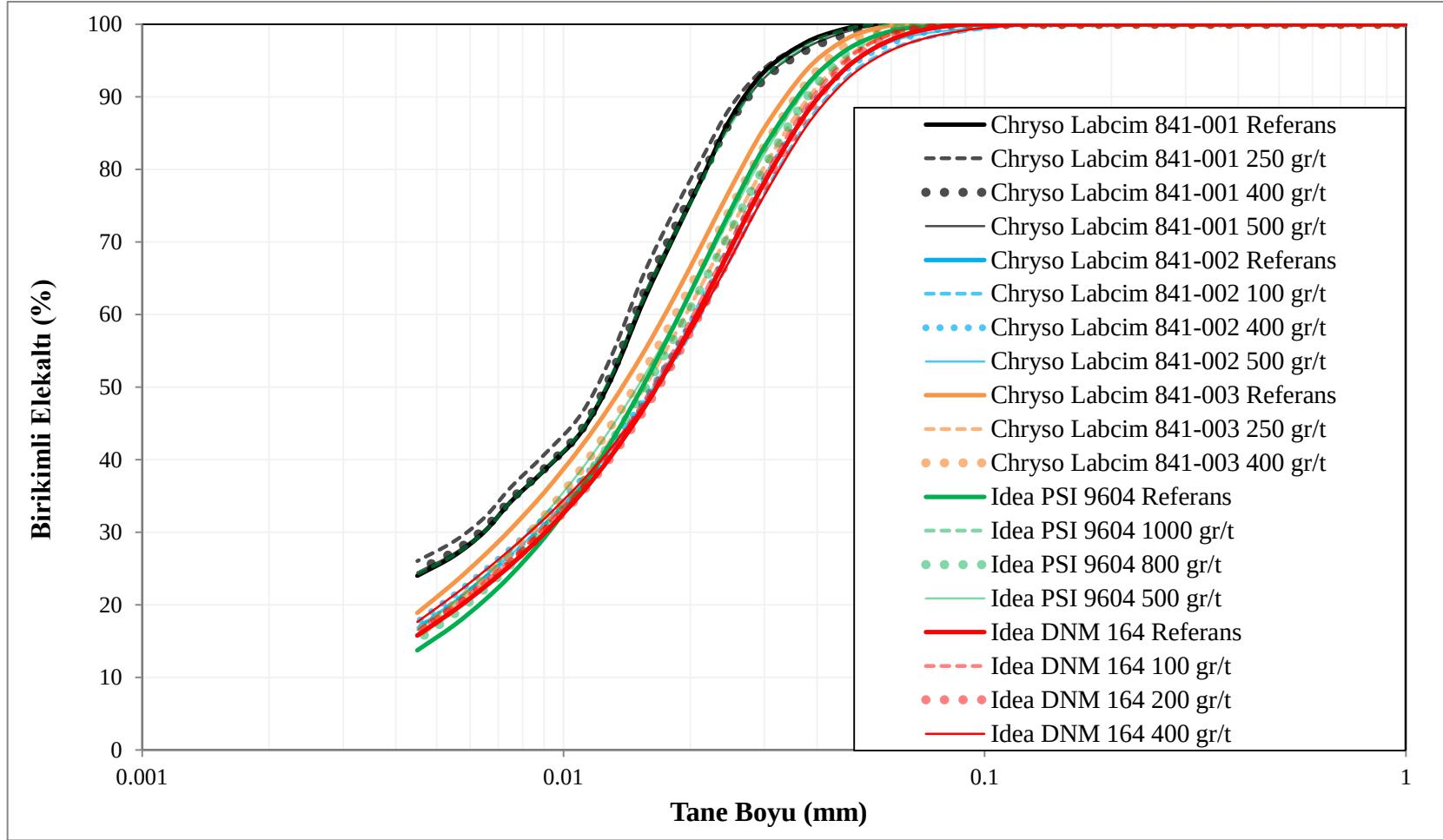
Çizelge 4.1. Havalı sınıflandırıcıya ait model parametreleri

	Dozaj (g/t)	β	β^*	C	d50c	α
Referans	-	3,42	1,62	0,28	0,024	2,26
Chryso Labcim 841-001	250	1,29	1,54	0,54	0,024	2,26
	400	1,25	1,49	0,57	0,024	2,26
	500	1,23	1,49	0,59	0,024	2,26
Idea PSI 9604	1000	1,36	1,49	0,64	0,024	2,26
Referans	-	2,32	1,71	0,38	0,038	2,26
Chryso Labcim 841-002	100	1,25	1,47	0,58	0,038	2,26
	400	0,82	1,47	0,74	0,038	2,26
	500	0,94	1,56	0,70	0,038	2,26
İdea DNM 164	100	1,35	1,54	0,56	0,038	2,26
	200	1,11	1,44	0,67	0,038	2,26
	400	0,97	1,39	0,74	0,038	2,26
Referans	-	4,19	1,75	0,26	0,032	2,26
IDEA	500	1,07	1,50	0,73	0,032	2,26
PSI 9604	800	1,03	1,38	0,80	0,032	2,26
Referans	-	2,21	1,66	0,41	0,032	2,26
Chryso Labcim 841-003	250	0,94	1,39	0,78	0,032	2,26
	400	0,88	1,37	0,82	0,032	2,26

Test edilen koşullar için hesaplanan model parametreleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Havalı sınıflandırıcının indirgenmiş verimlilik eğrileri incelendiğinde (Şekil 4.1) sınıflandırıcının ayırım keskinliğinin öğütme yardımcılarının ve işletme değişkenlerinin devre üzerinde yarattığı etkilerden bağımsız olduğu ve bütün koşullar için aynı olduğu görülmüş ve bu nedenle modelde ayırım keskinliğini ifade eden değişken (α) bütün koşullar için sabit kabul edilmiştir. Düzeltilmiş kesme boyu parametresi (d_{50c}) ise aynı üretim inceliği hedeflenerek gerçekleştirilen testler için sabit kabul edilmiştir (Şekil 4.2).

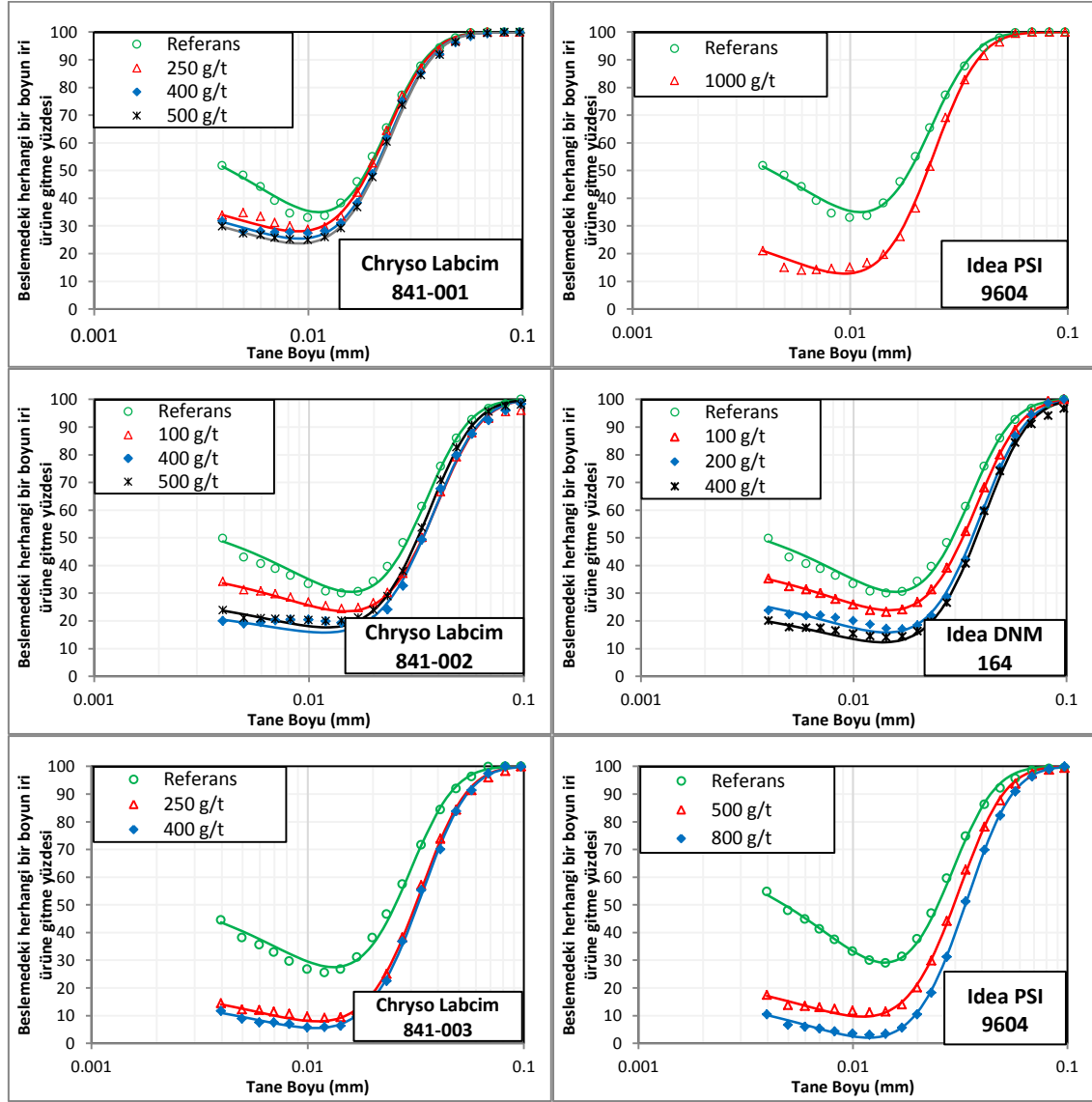


Şekil 4.1 Öğütme yardımcıları ile gerçekleştirilen testlere ait havalı sınıflandırıcı indirgenmiş verimlilik eğrileri



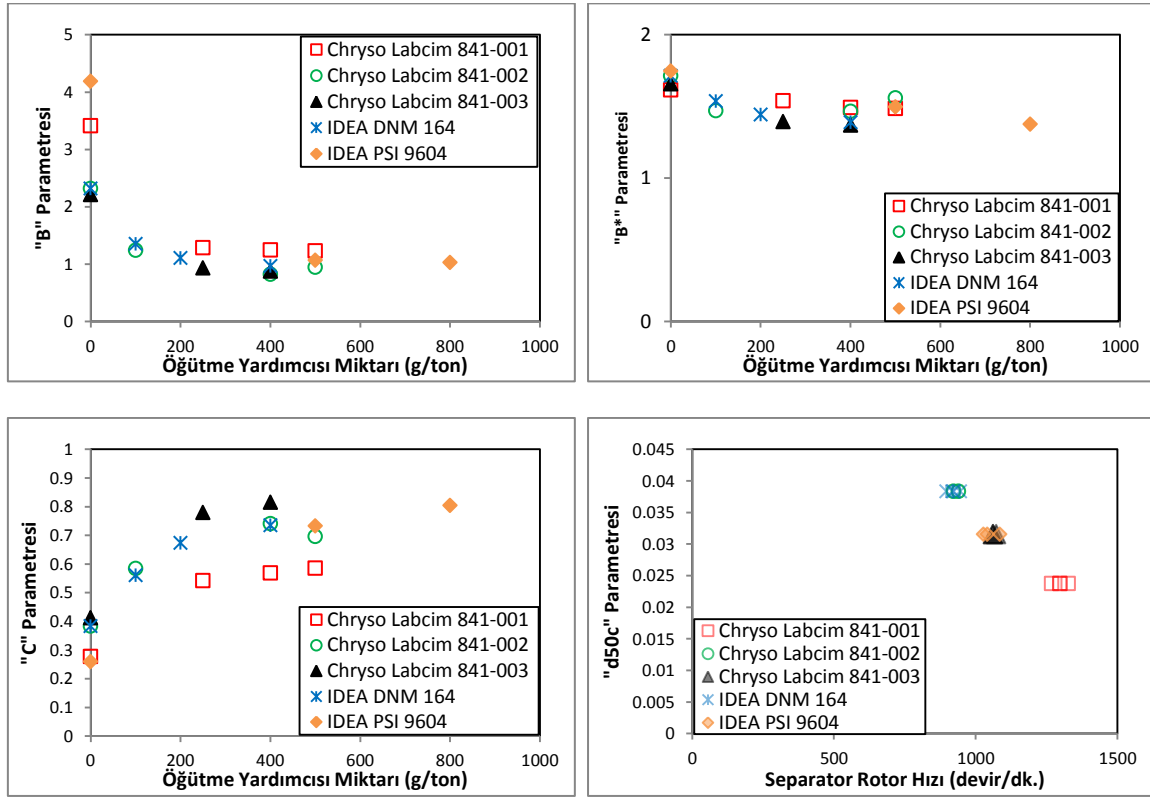
Şekil 4.2 Öğütme yardımcıları ile gerçekleştirilen testler sonucunda elde edilen ürünlerin tane boyu dağılımları

Kütle denklığı sonuçları ile kıyaslandığında, bulunan model parametreleri kullanılarak sınıflandırıcı iri ve ince akışına ait tane boyu dağılımının gayet başarılı bir şekilde tahmin edilebildiği görülmektedir (Şekil 4.3 ve EK 2).



Şekil 4.3 Kütle denklığı ve modelleme sonucunda hesaplanan sınıflandırıcıya ait verimlilik eğrileri

Kullanılan öğütme yardımcılarının miktarının artması ise C parametresinin değerinin yükseldiği ile β ve β^* parametrelerinin değerlerinin ise azaldığı gözlemlenmiştir. Düzeltilmiş kesme boyu parametresinin (d_{50c}) ise öğütme yardımcılarının etkisinden bağımsız olup, havalı sınıflandırıcının rotor hızı ile ters orantılı olduğu görülmüştür (Şekil 4.4). Bütün öğütme yardımcıları, model parametreleri üzerinde benzer etkiler yaratmış olmasına rağmen, her birinin etkisinin kendine özgü olduğu gözlemlenmiştir.



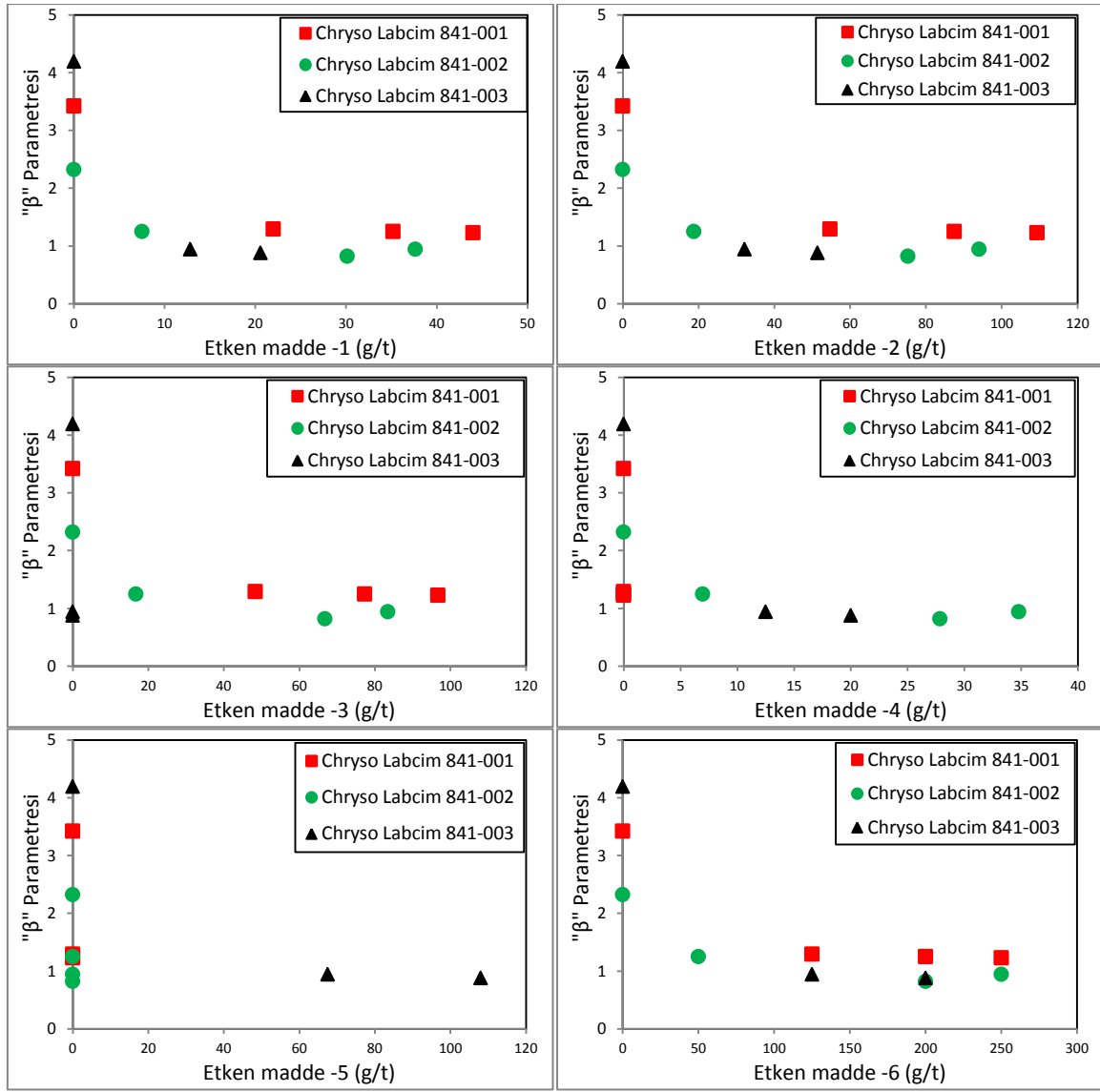
Şekil 4.4 Öğütme yardımcılarının hava sınıflandırıcının model parametreleri üzerindeki etkileri

Chryso firması tarafında üretilen öğütme yardımcılarının kullanılan dozajlarına bağlı olarak etken madde içeriklerinin miktarları Çizelge 4.2’de verilmektedir.

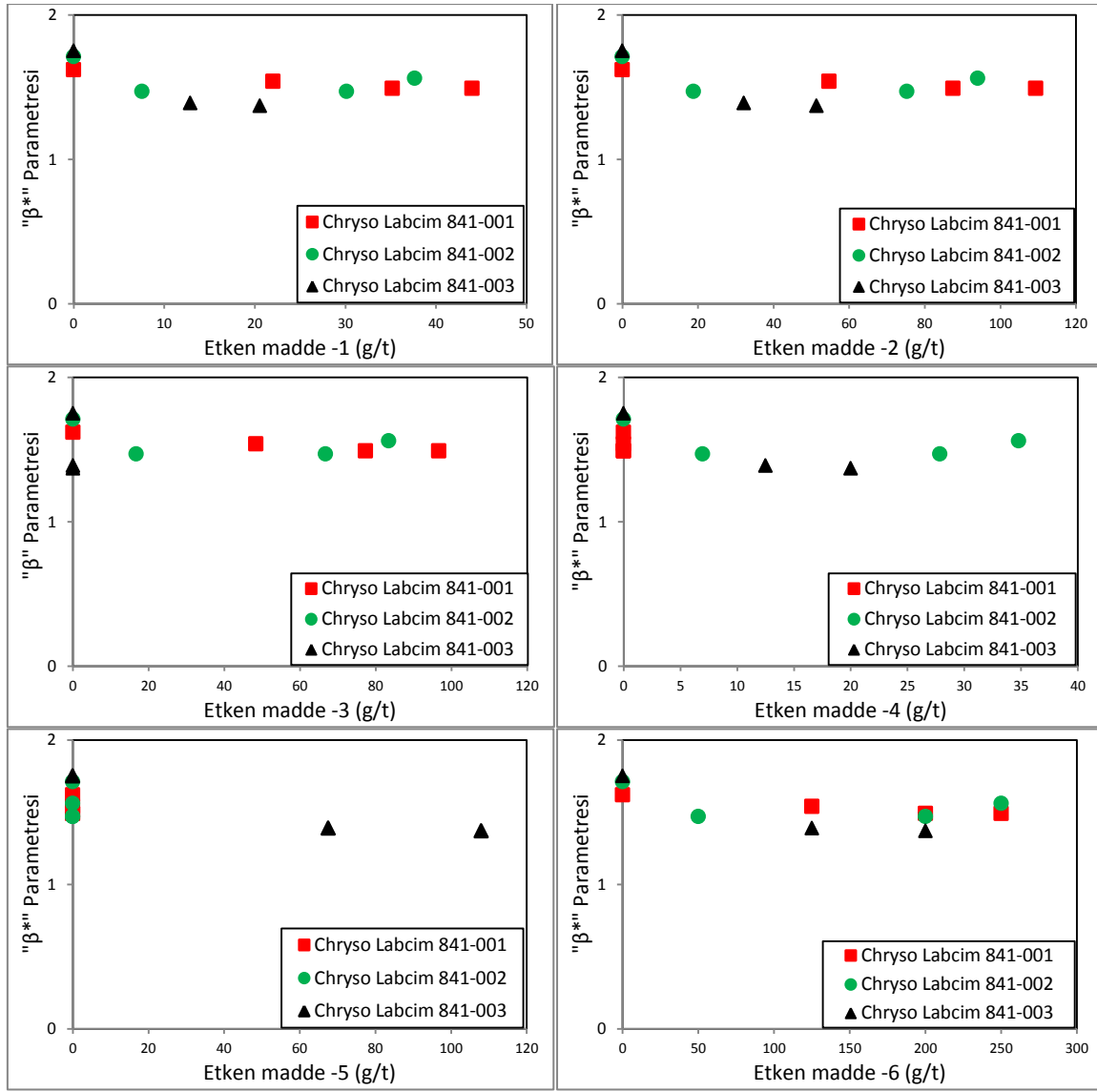
Çizelge 4.2 Dozaja bağlı olarak kullanılan etken madde miktarları

		Etken Madde						
		<i>EM-1</i>	<i>EM-2</i>	<i>EM-3</i>	<i>EM-4</i>	<i>EM-5</i>	<i>EM-6</i>	<i>Toplam</i>
Chryso Labcim 841-001	(%)	8.80	21.87	19.33	-	-	50.00	100
		22	55	48	-	-	125	250
	(g/t)	35	87	77	-	-	200	400
		44	109	97	-	-	250	500
Chryso Labcim 841-002	(%)	7.53	18.81	16.69	6.96	-	50.01	100
		8	19	17	7	-	50	100
	(g/t)	30	75	67	28	-	200	400
		38	94	83	35	-	250	500
Chryso Labcim 841-002	(%)	5.14	12.85	-	5.00	27.00	50.01	100
		13	32	-	13	68	125	250
	(g/t)	21	51	-	20	108	200	400

Etken madde miktarlarına bağlı olarak sınıflandırıcı model parametrelerinin değişimleri ise Şekil 4.5 - 4.7’de görülmektedir.

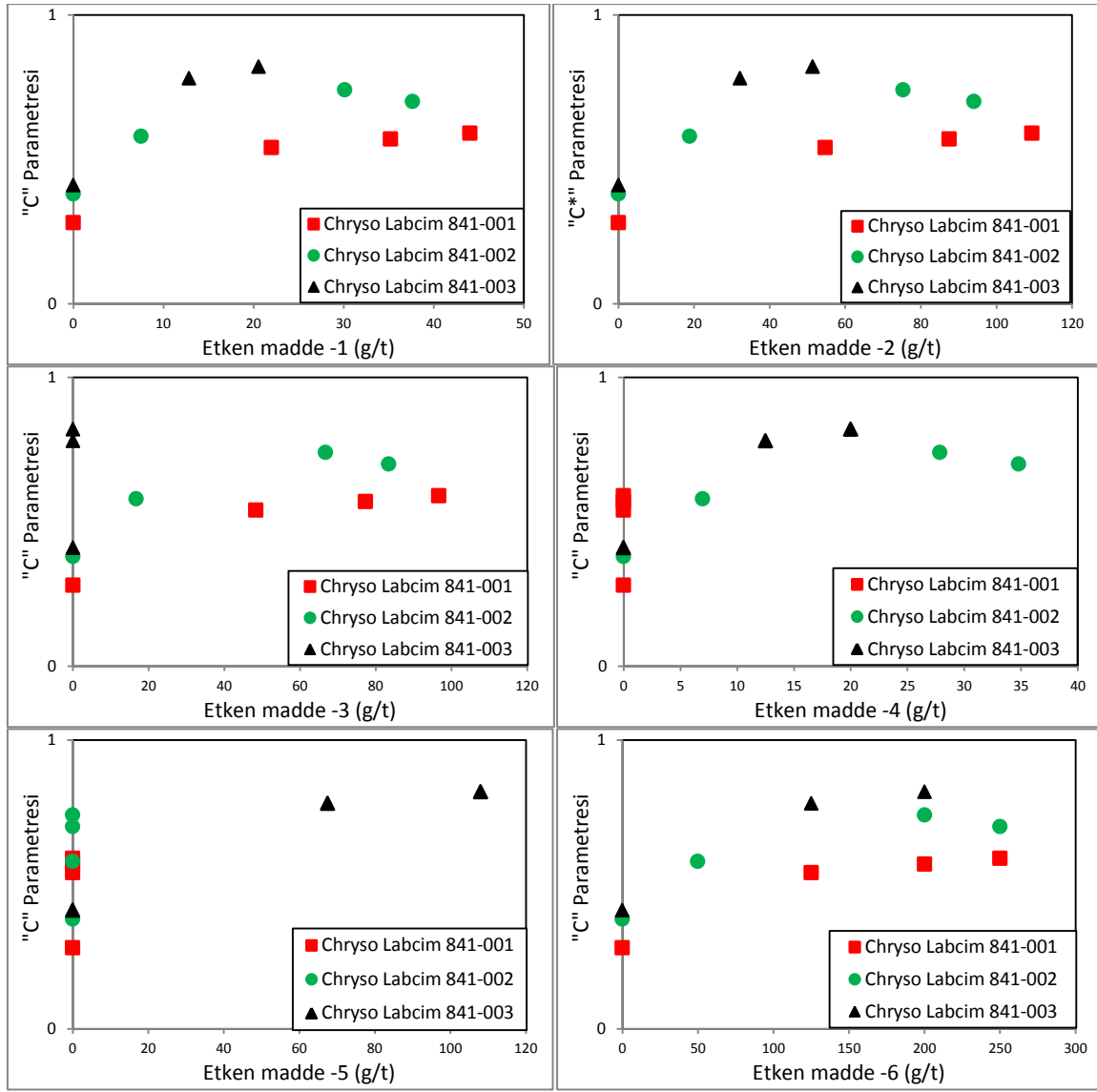


Şekil 4.5 Etken madde miktarlarına bağlı olarak β parametresinin değişimi



Şekil 4.6 Etken madde miktarlarına bağlı olarak β^* parametresinin değişimi

Kullanılan her bir öğütme yardımcısının dozajlarının sınıflandırıcının model parametreleri üzerine etkisi kolaylıkla modellenebilirken; Chryso firması tarafından üretilen öğütme yardımcılarını oluşturan etken maddelerin model parametreleri üzerine etkilerinin birbirinden bağımsız olarak incelenmesi elde edilen veriler ile mümkün olmamıştır.



Şekil 4.7 Etken madde miktarlarına bağlı olarak C parametresinin değişimi

4.2. Bilyalı değirmenin modellenmesi

Öğütme yardımcılarının, bilyalı değirmen üzerinde etkileri tesisten elde edilen veriler ve mükemmel bilyalı değirmen karışım modeli kullanılarak matematiksel olarak ifade edilmiştir. Öğütme devresi dinamik olarak dengede iken, değirmende bulunan herhangi bir boydaki taneler hem doğrudan beslemeden gelmekte hem de değirmen içindeki daha iri boyların kırılması ile oluşmaktadır. Bu boyda oluşan tanelerin bir kısmı değirmen dışına ürün olarak taşınırken, diğer kısmı daha ince boylara kırılmaktadır (Şekil 4.8). Sistem dinamik olarak dengede olduğunda bu döngü Eşitlik 4.2'deki gibi ifade edilebilir.

$$B_j + \dot{I}_j = T_j = A_j + \ddot{U}_j \quad (4.2)$$

B_j : Değirmen beslemesinden gelen j boyundaki malzeme miktarı

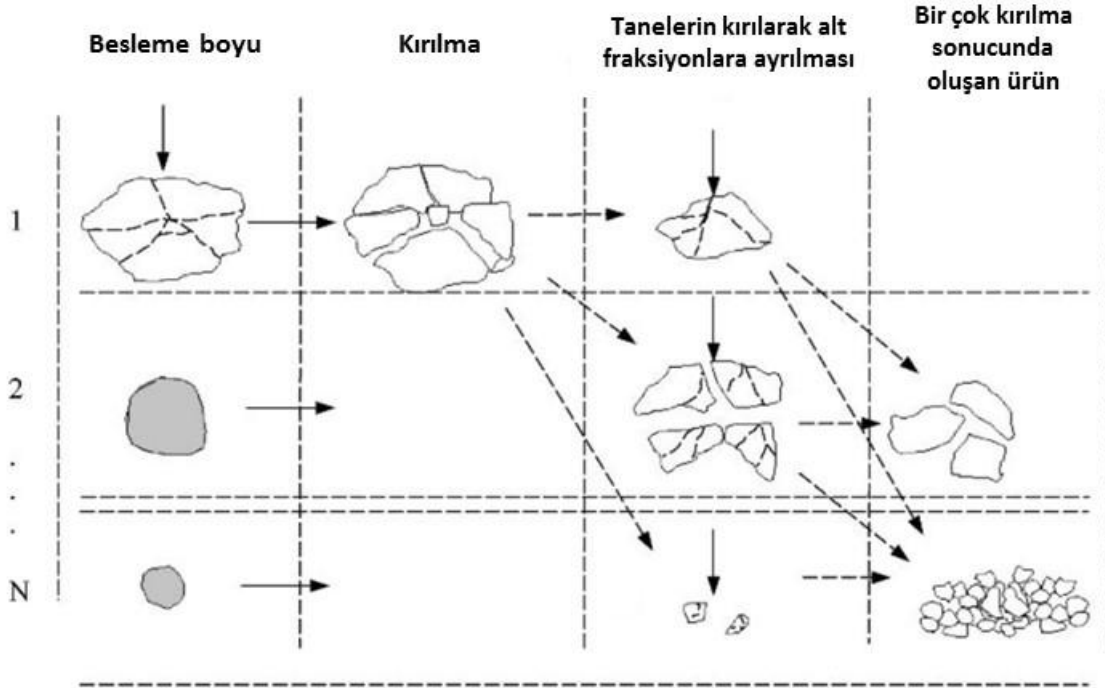
$\dot{I}_j$: iri boylardan j boyuna kırılan malzeme miktarı

T_j : Anlık olarak değirmen içinde bulunan j boyundaki malzeme miktarı

A_j : j boyundan daha ince boylara kırılan malzeme miktarı

$\ddot{U}_j$: Ürün olarak değirmeni terk eden j boyundaki malzeme miktarı

Her hangi bir tane boyunun değirmen besleme (B_j) ve ürünündeki miktarı ($\ddot{U}_j$) daha önce gerçekleştirilmiş olan kütle denkliği sonuçlarından bilinmektedir. Anlık olarak değirmen içinde bulunan her hangi bir boydaki malzeme miktarı (T_j) ise Ekşi [86] tarafından tek tane ve yatak kırma test sonuçlarına göre klinker için oluşturulan kırılma dağılım fonksiyonu ve yinelemeli hesaplama yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.8 Bilyalı değirmende gerçekleşen kırılma olayının şematik görünümü

Daha sonra değirmen içinde anlık olarak bulunan her bir tane boyunun kırılma ihtimali (A_j / T_j), ve kırılmadan değirmen dışına ürün olarak taşınma ihtimali ($\ddot{U}_j / T_j$) hesaplanmıştır. Tanelerin kırılma ihtimallerinin boyuta bağlı olarak değişimi matematiksel olarak Eşitlik 4.2’de ifade edilmiştir.

k : işletim koşullarına bağlı bir değişken

x : tane boyu

d : değirmen tasarımına bağlı bir değişken (çap, boy, bilya doluluğu, astar tipi vb.)

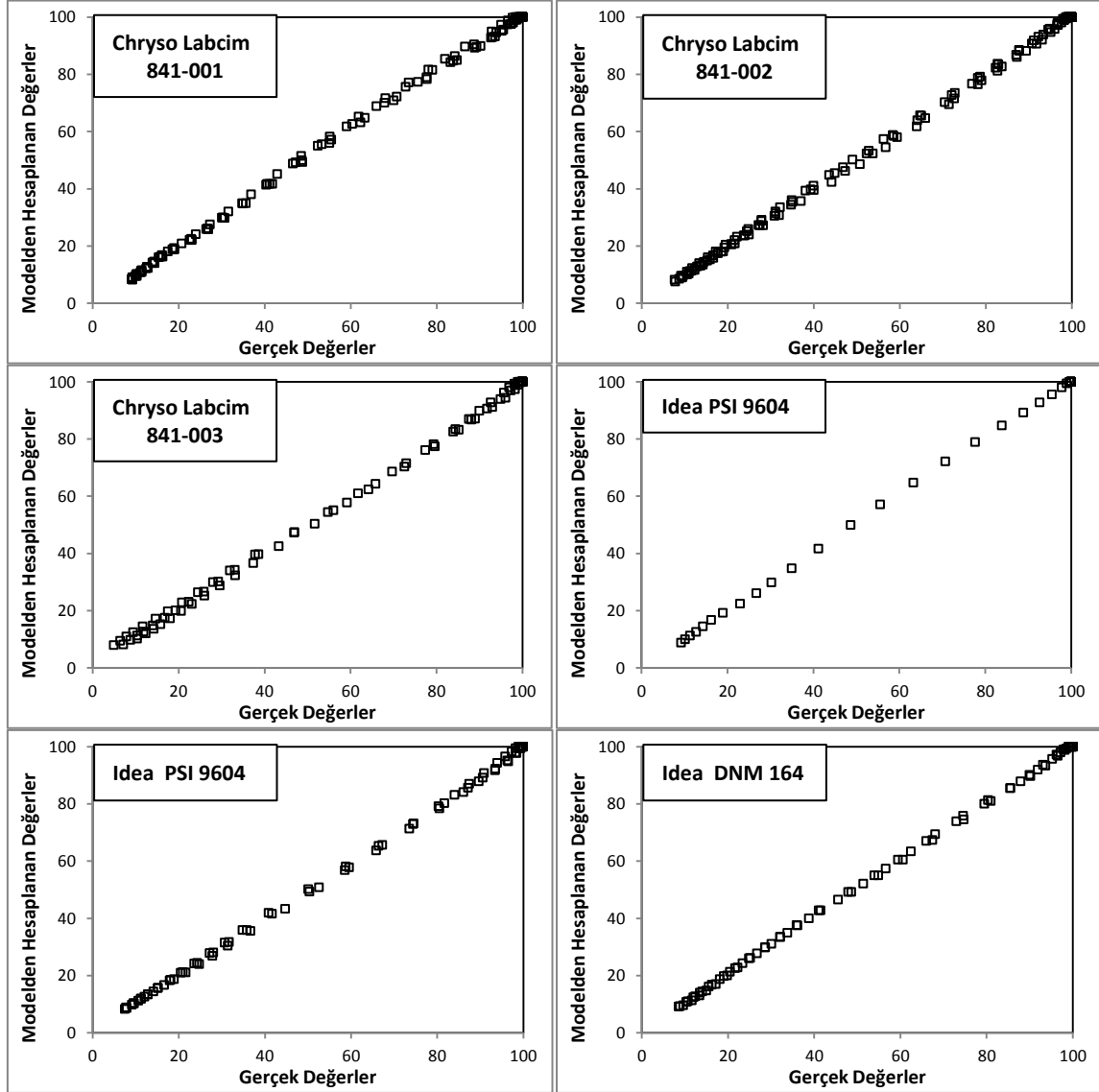
k ve d parametreleri doğrusal olmayan regresyon tekniği kullanılarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.3. Öğütme yardımcılarının değirmen model parametreleri üzerine etkileri

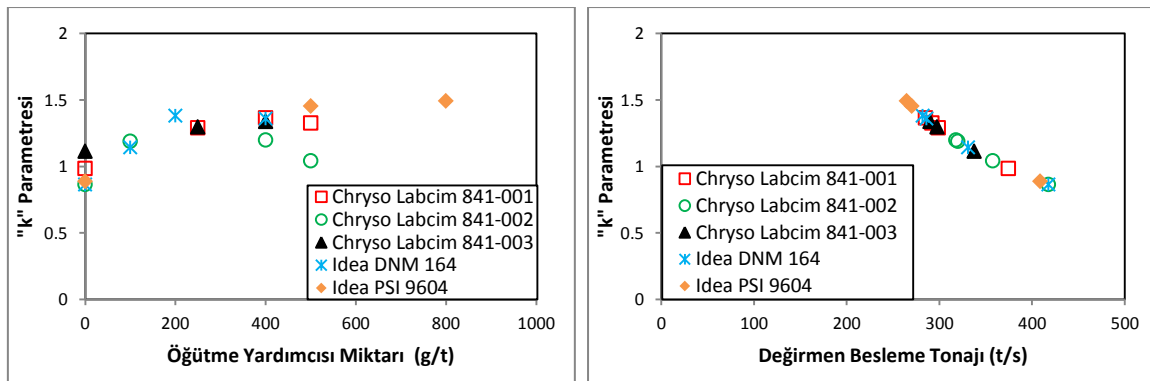
	Dozaj (g/t)	Değirmen Beslemesi (t/sa)	Parametre k	Parametre d
Referans	-	374.68	0.98	0.72
Chryso Labcim 841-001	250	298.83	1.29	0.72
	400	285.03	1.36	0.72
	500	292.05	1.32	0.72
Idea PSI 9604	1000	264.03	1.49	0.72
Referans	-	417.57	0.86	0.65
Chryso Labcim 841-002	100	319.80	1.19	0.65
	400	317.99	1.20	0.65
	500	357.43	1.04	0.65
İdea DNM 164	100	330.85	1.14	0.65
	200	282.03	1.38	0.65
	400	285.96	1.36	0.65
Referans	-	408.72	0.89	0.66
IDEA	500	270.29	1.45	0.66
PSI 9604	800	264.68	1.49	0.66
Referans	-	337.53	1.11	0.63
Chryso Labcim 841-003	250	297.46	1.30	0.63
	400	289.79	1.34	0.63

Testler dört farklı dönemde gerçekleştirilmiştir. Bu dönemler arasında geçen zaman zarfında, değirmen bilya dağılımı ve doluluğu, değirmen astarlarının aşınma durumu vb. koşullarda küçük farklılıklar oluşmuştur. Bu nedenle her test dönemi kendi içinde değerlendirilmiş ve her dönem için farklı bir b parametresi hesaplanmıştır. Endüstriyel olarak gerçekleştirilen her bir test koşulu için kırılma ihtimalleri hesaplanarak k ve d parametreleri belirlenmiştir (Çizelge 4.3). Şekil 4.9'dan modelleme çalışmaları sonucunda

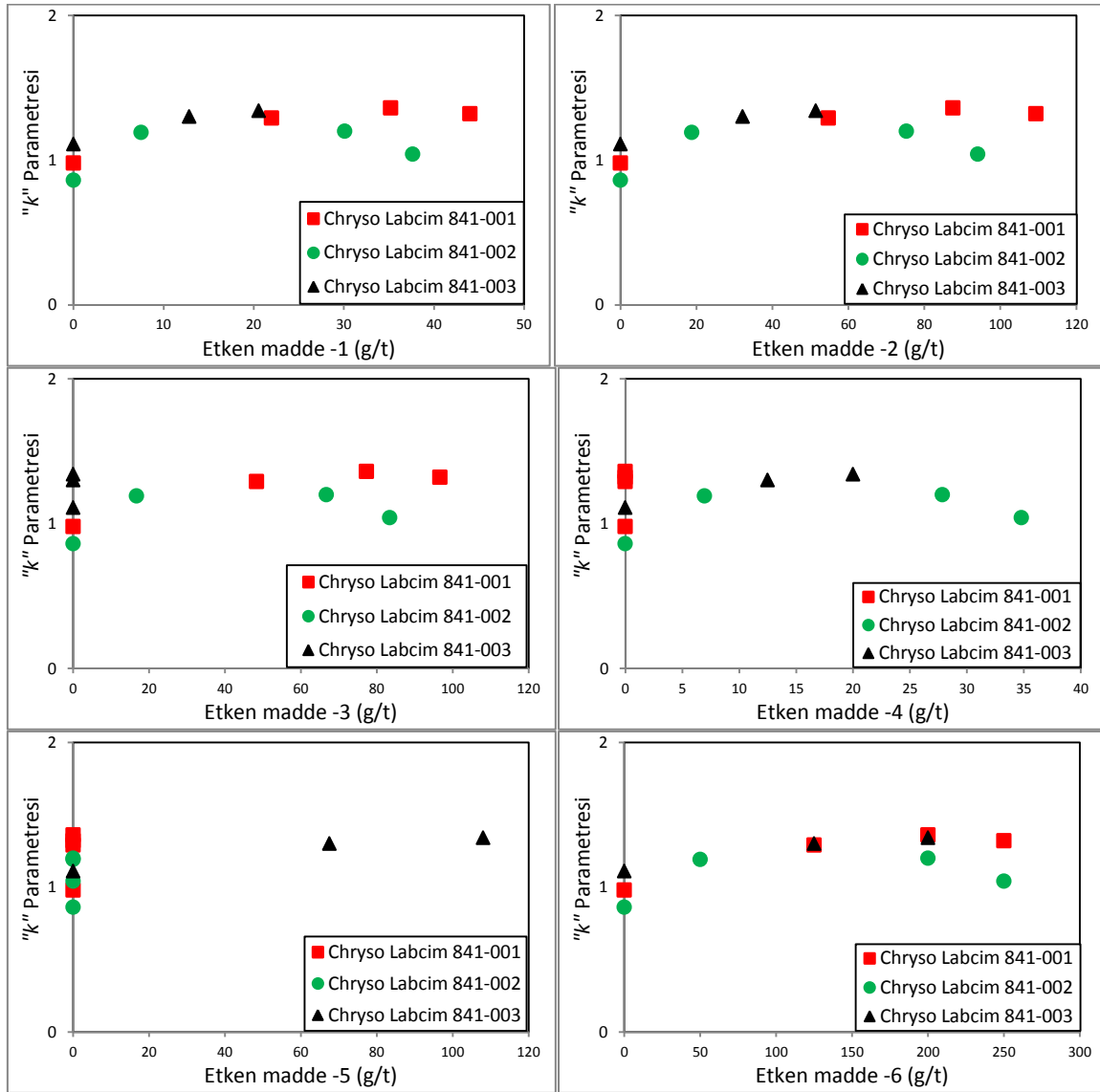
değirmen ürün tane boyu dağılımının başarılı bir şekilde tahmin edilebildiği görülmektedir (EK 1).



Şekil 4.9. Kütle denkliği ve modelleme sonucunda hesaplanan değirmen ürünlerine ait birikimli yüzde elek altı değerlerinin karşılaştırılması

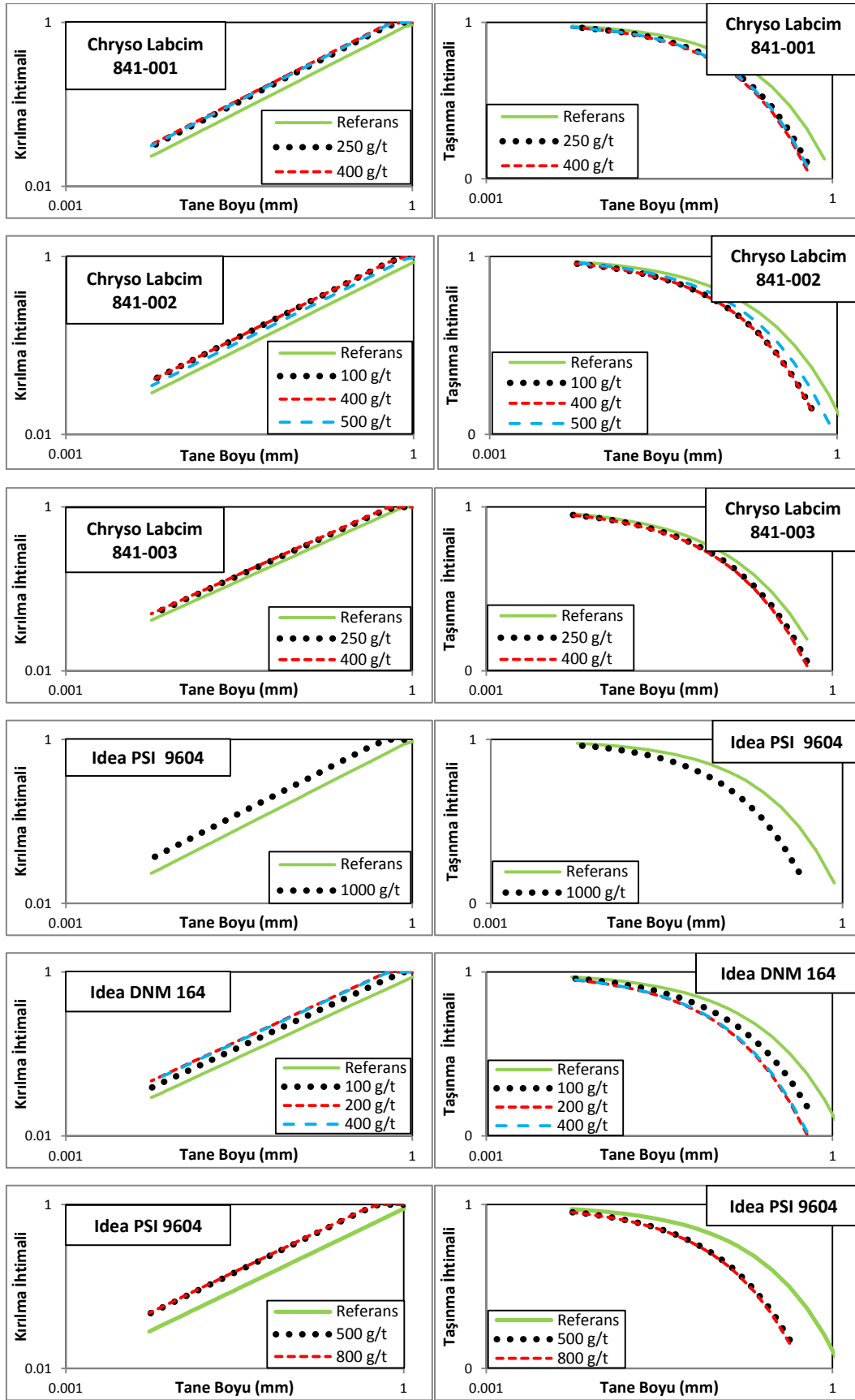


Şekil 4.10 “k” parametresinin öğütme yardımcısı miktarı ve değirmen besleme tonajı



Şekil 4.11 Etken madde miktarlarına bağlı olarak “k” parametresinin değişimi

Öğütme yardımcısı miktarına ve değirmen besleme tonajına bağlı olarak k parametresinin değişimi Şekil 4.10’da verilmiştir. Şekil 4.11’de ise Chryso firması tarafından üretilen öğütme yardımcılarının etken madde içeriklerine bağlı olarak “k” parametresinin değişimi görülmektedir. Chryso firması tarafından üretilen öğütme yardımcılarını oluşturan etken maddelerin k parametresi üzerine etkilerinin birbirinden bağımsız olarak incelenmesi elde edilen veriler ile mümkün olmamıştır.



Şekil 4.12 Mükemmel bilyalı değirmen karışım modeli kullanılarak hesaplanan kırılma ve taşınma ihtimalleri

Öğütme yardımcıları değirmen içindeki malzemeyi daha akışkan hale getirmiş ve ince çimento tanelerin değirmen astarına ve bilyalara yapışmasını engellemiştir. Ayrıca, öğütme yardımcılarının kullanılmasıyla havalı sınıflandırıcının verimi arttırmış ve ürün boyutundaki tanelerin sınıflandırıcının iri akışına gitmesini engelleyerek değirmene tekrar beslenmesini engellemiştir. Böylece, birim zamanda değirmene beslenen malzeme miktarı azalmış ve çimento tanelerinin değirmen içinde kalma süreleri uzayarak değirmen içindeki birim malzemeye etkiyen kuvvet artmıştır. Şekil 4.12 incelendiğinde, öğütme yardımcılarının kullanılması ile değirmen içindeki çimento tanelerinin kırılma ihtimalinin arttığı görülmektedir.

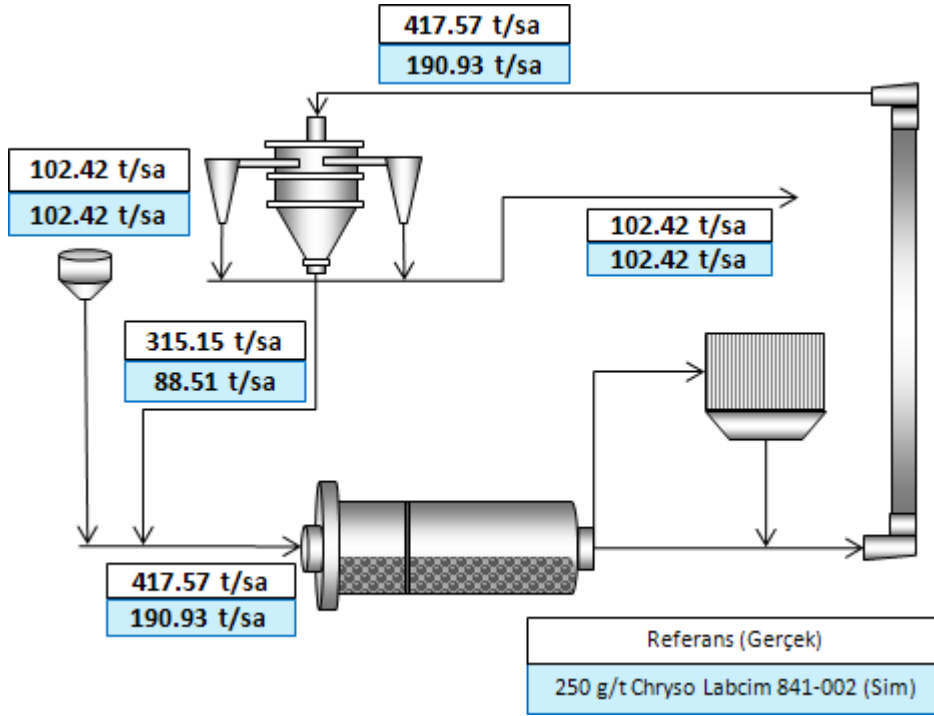
4.3. Simülasyon Çalışmaları

Modelleme çalışmaları sonucunda, çimento öğütme devresinde yer alan bilyalı değirmenin ve havalı sınıflandırıcının model parametrelerinin değişimi, kullanılan öğütme yardımcısı dozajı ile ilişkilendirilmiştir. Elde edilen bu ilişkiler, çimento öğütme devresinin, öğütme yardımcısının dozajına bağlı olarak simülasyonun yapılmasına imkân sağlamaktadır. Çalışmanın bu bölümünde, öğütme devresinin Chryso Labcim 841-002 kimyasalının 250 g/t dozajında kullanıldığı durum simülasyon yoluyla tahmin edilmiştir. Daha sonra bu koşul endüstriyel olarak test edilerek simülasyonun tahmin doğruluğu değerlendirilmiştir.

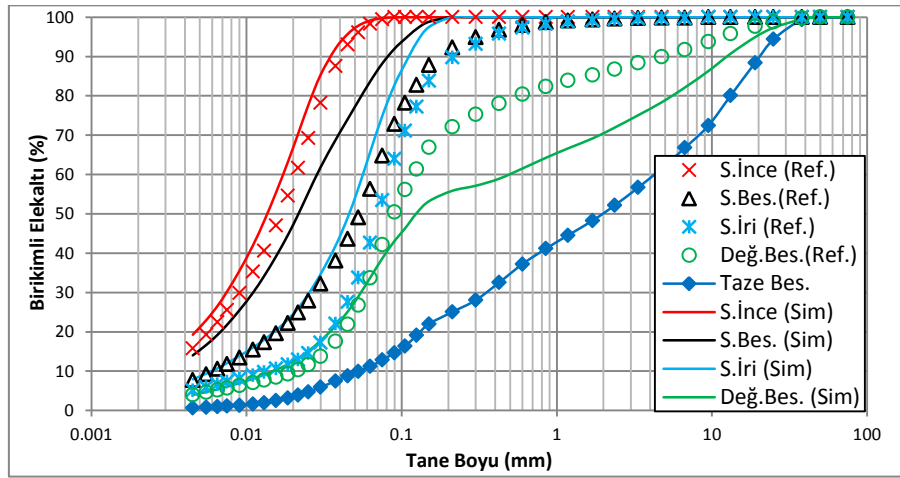
Simülasyon çalışmaları sırasında, Chryso Labcim 841-002 kimyasalı için gerçekleştirilen referans örneklemesine ait veriler temel alınarak iki farklı simülasyon yapılmıştır. İlk simülasyonda, devre referans koşulu ile aynı miktarda üretim yaparken, devreye 250 g/t Chryso Labcim 841-002 eklenmesi ile devrede meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. İkinci simülasyonda ise, devreye 250 g/t Chryso Labcim 841-002 eklenerek referans koşulu ile aynı tane boyu dağılımına sahip ürün üretildiği koşul tahmin edilmiştir. Simülasyon çalışmaları sırasında, öğütülecek olan klinker ve katkıların oranlarının, kimyasal yapısının ve öğütülebilirliklerinin değişmediği kabul edilmiştir.

4.3.1. Aynı miktarda üretim yapılırken devreye 250 g/t Chryso Labcim 841-002 eklenmesi

Bu simülasyonda, devre referans koşulu ile aynı miktarda üretim yaparken, devreye 250 g/t Chryso Labcim 841-002 eklenmesi ile ürünün ve devrede etrafındaki akışların tane boyu dağılımlarında meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te simülasyon sonucunda tahmin edilen devre etrafı tane boyu dağılımları ve akış değerleri görülmektedir.



Şekil 4.13 Simülasyon sonucunda devre etrafındaki malzeme akış miktarları

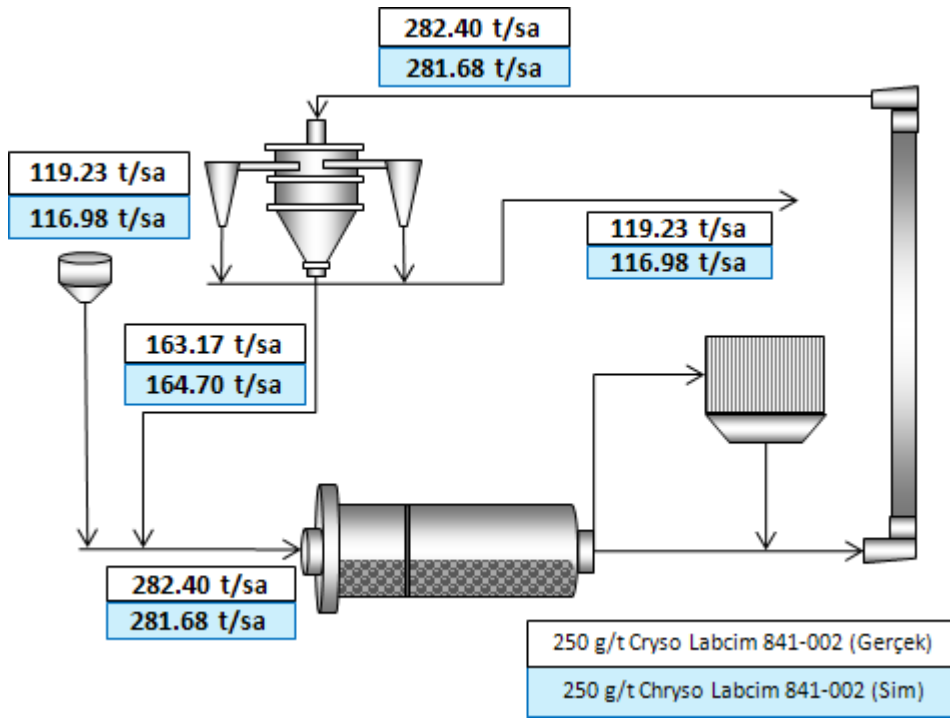


Şekil 4.14 Simülasyon sonucunda elde edilen devre etrafındaki tane boyu dağılımları

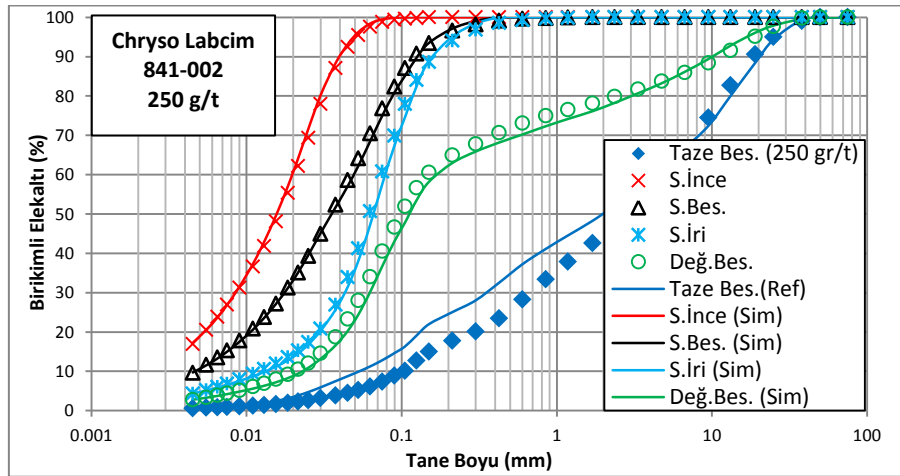
Simülasyon sonuçları, aynı üretim miktarında devreye 250 g/t Chryso Labcim 841-002 eklenmesi ile sistemdeki devreden yükün % 307.70'den % 86.42'ye düşeceğini ve daha ince ürün üretileceğini göstermektedir. Bu durum, devrenin referans testinin ürünü ile aynı incelikte ürün elde edecek şekilde çalıştırılması ile devrenin üretim kapasitesinin artacağını göstermiştir.

4.3.2. Devreye 250 g/t Chryso Labcim 841-002 eklenerek aynı ürün inceliğinin elde edilmesi

Bu çalışmada, devreye 250 g/t Chryso Labcim 841-002 eklenerek referans koşulu ile aynı tane boyu dağılımına sahip ürün üretildiği durumda devrenin çalışma koşullarının nasıl olabileceği simülasyon yöntemi ile tahmin edilmiştir. Daha sonra, sisteme 250 g/t Chryso Labcim 841-002 eklenerek, referans ürünü ile aynı incelikte ürün elde edecek koşullarda bir endüstriyel test yapılarak gerçek veriler elde edilmiş ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

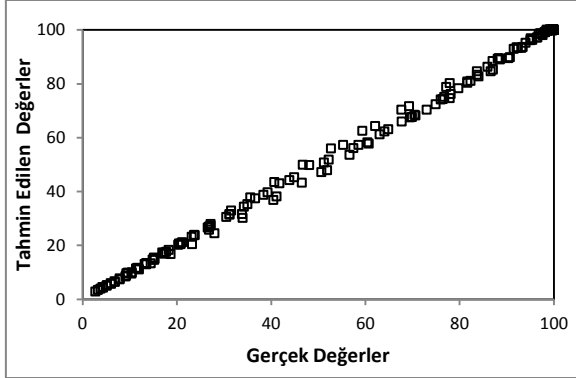


Şekil 4.15 Simülasyon sonucunda hesaplanan devre etrafındaki malzeme akış miktarları



Şekil 4.16 Simülasyon sonucunda elde edilen devre etrafındaki tane boyu dağılımları

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 'da simülasyon sonucunda tahmin edilen devre etrafı tane boyu dağılımları ve akış değerleri, görülmektedir. Simülasyon tahminlerini sınamak için gerçekleştirilen endüstriyel test ve referans testi sırasında devreye verilen taze beslemedeki boyut dağılımı farkının kabul edilebilir bir aralıkta olduğu görülmektedir (Şekil 4.16).



Şekil 4.17 Kütle denklığı ve simülasyon sonucunda tahmin edilen devre etrafındaki akışlara ait birikimli yüzde elek altı değerlerinin karşılaştırılması

Simülasyon çalışmaları sonucunda, devreye 250 g/t Chryso Labcim 841-002 eklenmesi ile saatte 116.98 ton referans ürünü ile aynı incelikte ürün üretebileceği tahmin edilmiştir. Gerçekleştirilen endüstriyel testte ise referans ürünü ile aynı incelikte 119.23 t/sa'lık üretim yapılabildiği görülmüştür. Kütle denklığı ve simülasyon sonucunda tahmin edilen devre etrafındaki akışlara ait birikimli yüzde elek altı değerlerinin karşılaştırıldığı Şekil 4.17'den ise başarılı bir simülasyon çalışmasının gerçekleştirildiği anlaşılmaktadır.

5. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında, endüstriyel olarak kullanılan altı farklı öğütme yardımcısının, kapalı devre çimento öğütme devresinin performansı üzerine etkileri incelenmiştir. Devrede yer alan bilyalı değirmen ve havalı sınıflandırıcının modeli oluşturularak öğütme yardımcılarının model parametreleri ile ilişkileri incelenmiştir. Ayrıca laboratuvarda gerçekleştirilen akışkanlık, öğütme ve havalı sınıflandırıcı testleri ile öğütme yardımcılarının etki mekanizmaları açıklanmaya çalışılmıştır.

Laboratuvarda yapılan akışkanlık testleri, ince malzemelerin akışkanlığının öğütme yardımcılarının eklenmesi ile arttığını göstermiştir. Öğütme testlerinin sonucunda, öğütme yardımcılarının malzemelerin öğütülebilme karakteristiklerini değiştirmedeği; ancak, ince tanelerin değirmenin astarına ve bilyalarına sıvanmasını engellediği ve böylece yastıklama etkisini azaltarak daha verimli bir öğütme işleminin gerçekleşmesine olanak sağladıkları belirlenmiştir. Düşük hava hızlarında gerçekleşen sınıflandırıcı testlerinde, öğütme yardımcısının kaçak miktarının düşmesinde belirgin bir etkisi görülürken; yüksek hava hızlarında yapılan testlerde öğütme yardımcısının etkisinin azaldığı görülmüştür. Sınıflandırıcı düşük hava hızlarında çalışırken, ince taneler bir birine yapışarak toplanmış ve sınıflandırıcının iri akışına gitmiştir. Öğütme yardımcılarının kullanılması ise bu topakların oluşumunu azaltarak daha verimli bir sınıflandırmanın gerçekleşmesine imkân sağlamıştır. Sınıflandırıcı yüksek hava hızlarda çalışırken, havanın etkisi ile toplanan ince taneler dağılmış ve böylece öğütme yardımcısının sınıflandırma üzerindeki etkisi azalmıştır. Öğütülen malzemenin toplanması ve öğütme yardımcılarının öğütülen malzeme yüzeyine soğrulması için gerekli olan sıcaklık, nem gibi endüstriyel testler sırasında mevcut olan fiziksel koşulların laboratuvar ortamında oluşmaması, laboratuvar testleri ile endüstriyel testler sırasında etki eden öğütme yardımcısı dozajlarının farklı olmasına neden olmuştur.

Öğütme yardımcılarının kullanılması ile çimento öğütme devresinde aynı incelikte daha fazla ürün üretilmiş ve devrenin özgül enerji tüketimi düşmüştür. Öğütme yardımcıları, ince tanelerin toplanmasını azaltarak, ince tanelerin sınıflandırıcının iri akışına gitmesini engellemiştir. Böylelikle, sınıflandırıcıdaki kaçak miktarını ve balık oltası etkisini azaltarak sınıflandırma verimini arttırarak sistemdeki devreden yük oranının düşmesine olanak sağlamıştır. Öğütme yardımcıları sınıflandırıcının ayırım keskinliğini değiştirmemiştir.

Whiten eşitliğine göre oluşturulan modelde ayırım keskinliğini ifade eden parametre (α) hem öğütme yardımcılarında hem de işletme koşullarından bağımsızdır. Kesme boyunu ifade eden parametre (d_{50c}), sınıflandırıcı rotor hızı ile ters orantılı olarak artmaktadır ve öğütme yardımcılarının etkilerinden bağımsızdır. Balık oltasını ifade eden β ve β' parametresi kullanılan öğütme yardımcısı miktarı ile ters orantılı olarak değişirken C parametresi doğru orantılı olarak değişmektedir. Öğütme yardımcılarının model parametreleri ilişkileri benzer olsa da, kimyasal yapısına bağlı olarak, her öğütme yardımcısının etkisinin kendine özgü olduğu anlaşılmıştır.

Endüstriyel testlerde kullanılan öğütme yardımcıları, ince tanelerin, değirmen içinde taşınmasını kolaylaştırmış ve değirmen astarları ve bilya yüzeylerine yapışmasını engellenmiştir. Devreden yük miktarının azalması ile değirmene beslenen malzeme miktarı azalmış ve bir taneye uygulanan birim enerji artarak öğütme verimi iyileşmiştir. Mükemmel bilyalı değirmen karışım modeli kullanılarak değirmen içindeki her bir boydaki tanenin kırılma ihtimali hesaplanmıştır. Öğütme yardımcılarının kullanılması ile değirmen içindeki malzemenin kırılma ihtimalinin arttığı görülmüştür.

Modelleme çalışmalarının sonucunda, kullanılan öğütme yardımcısı miktarına bağlı olarak çimento öğütme devresinde meydana gelebilecek değişikliklerin simülasyonunun yapılabileceği anlaşılmıştır. Gerçekleştirilen simülasyonlar, sisteme öğütme yardımcılarının beslenmesi, öğütme devresinin üretim tonajını değiştirmeden daha ince ürün üretilabileceğini ya da aynı ürün inceliğinde üretim yapılırken öğütme devresinin kapasitesinin arttırılabileceğini göstermiştir.

6. ÖNERİLER

Hammaddenin kimyasal ve fiziksel özellikleri ile öğütme devresinin akım şemasına bağlı olarak, farklı tipte öğütme yardımcıları kullanılmaktadır. Kullanılacak olan öğütme yardımcılarının kimyasal formülüne ve miktarına, oldukça maliyetli ve meşakkatli endüstriyel denemeler ile karar verilmektedir. Bu nedenle, endüstrideki fiziksel koşullara daha yakın bir ortamın oluşturulduğu laboratuvar ölçekli bir test sisteminin geliştirilmesi faydalı olacaktır.

Kapalı devre öğütme sistemlerde, birçok değişken birbirini dolaylı olarak etkilemektedir. Açık devre çalışan bir sistemde öğütme yardımcısı ile yapılacak olan testler, öğütme yardımcılarının bilyalı değirmenler üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olacaktır.

Bu tez kapsamında, kapalı devre çimento devresinde kullanılan öğütme yardımcılarının miktarlarının etkisini de içeren bir model geliştirilmiştir. Öğütme yardımcılarının içeriğini oluşturan etken maddelere ve hazırlanan reçetelerine bağlı olarak, öğütme devresi üzerine etkileri ayrıca incelenerek, bu model yapısının geliştirilmesi için daha detaylı çalışmalar yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Rao, R. B., *Advancement in comminution circuits: Theory and practice*, Mineral Characterisation and Processing, Indian Institute of Mineral Engineers, 93-103, **2004**.
- [2] Pilevneli, C. C., Kızgut S., Toroğlu İ, Cuhadaroğlu D., Yiğit E., *Open and closed circuit dry grinding of cement mill rejects in a pilot scale vertical mill*, Powder Technology, 139, 165-174, **2004**.
- [3] Jankovic, A.; Valery, W.; Davis, E., *Cement grinding optimization*, Minerals Engineering, 17, 1075-1081, **2004**.
- [4] Engelsen, C. J., *Quality improvers in cement making-State of the art*, COIN Project report 2, Oslo. **2008**.
- [5] Difen, L., Shiliu W., Oinghuan, M., Weiping, Z., *Effect of grinding aids on the comminution of cement clinker and minerals*, The 3rd International Symposium on cement and concrete, Beijing, **1993**.
- [6] Rehbinder, P. A., Shchukin, E.D., Progress in surface science, (eds: Davison, S.G.), Pergamon Press, Oxford, 1972.
- [7] Austin, L. G., Klimpel, R. R., Luckie, P. T. *Grinding Aids*, Process Engineering of Size Reduction Ball Milling. New York, Society of Mining Engineers, AIME, Cap. 15, 385-406, **1984**.
- [8] Anna, B., Tiziano C., Mariagrazia G., Matteo M., *Grinding aids: A study on their mechanism of action*, 11th ICCG, Durban, 1100-1109, **2003**.
- [9] Norimoto, I., *Grinding aid for cement clinker*. Gypsum and Lime, 138, 191-197, **1975**.
- [10] Toprak, N.A., *Öğütme yardımcılarının ve dayanım arttırıcılarının devre performansı ve çimento kalitesi üzerine etkilerinin araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2010**.
- [11] Sottili, L.; Padovani, D., *Effect of grinding aids in the cement industry*. ZKG International, 54, 3, 146-151, **2001**.
- [12] Teorane, I., Guslicov, G., *Mechanism and effects of additives from the dihydroxy-compound class on portland cement grinding*, Cement and Concrete Research, IX, 29, 9-15, **1999**.
- [13] Jeknavorian, A. A., Bary., E. F., Serafin, F., *Determination of grinding aids in portland cement by pyrolysis gas chromatography-mass spectrometry*, Cement and Concrete Research, IX, 28, 1335-1345, **1998**.

- [14] Rose, H., Sullivan, R. M., *Ball, Tube, and Rod Mill*. New York: Chemical Publishing, 236-251, **1958**.
- [15] Westwood, A. R. C., *The Reh binder Effect and the Adsorption Locking of Dislocations in Lithium Fluoride*, Philosophical Magazine, 7, 633, **1962**.
- [16] Locher, F. W., Seebach, H. M. V., *Influence of adsorption on Industrial grinding*, Ind.Eng.Chem. Process Des.Dev., 11, 190-197 , **1972**.
- [17] Somasundaran, P.; LIN, I. J., *Effect of the Nature of Environment on Comminution Process*, Industrial and Engineering Chemistry, Process Des. Dev., 11, 321-331, **1972**.
- [18] Grachyan, A. N., Tavlinova, T. I., *Improvement in the grinding of a portland cement clinker using aliphatic alcohols*, Khim. Teknol., 16, 1876-1878, **1973**.
- [19] Ocepek, D., Eberl, E., *Agglomeration oder Reh binder Effect*, European Comminution Symposium, 183-195, **1976**
- [20] Graichen, V. K., Muhler H., *Beitrag zur Aufklarung der Wirkungsweise von Mahlhilfsmitteln*, Freiberg, Fsrchungsh, 550, 5-34, **1975**.
- [21] Lichtman, V. I., Reh binder, P., Effects of a surface active media on strains and rupture in solids, Second International Congress of Surface Activity, 563-582, London. 1957.
- [22] Kennedy H.L., Mark.J.G. *Grinding of Cement Clinker*, United States Patent 2,141,571, **1938**.
- [23] Marduler, F. J., *The mechanism of grinding aids*. ASTM, 1078-1093, 1961
- [24] Tanaka, I.; Koishi, M.; Shinohara, K., *A study on the process for formation of spherical cement through an examination of the chabges of powder properties and electrical charges of the cement and its constituent materials during surface modification*, Cement and Concrete Research, 32, 57-64, **2002**.
- [25] Mishra S., Siddiqui N.A., A review on environmental and health impacts of cement manufacturing emissions, International Journal of Geology, Agriculture and Environmental Sciences, 2, **2014**.
- [26] Duda, W. H., *International Process Engineering in the Cement in the Cement Industry*, Macdonald; Evans Cement Data Book. 2nd Edition. ed., **1977**.
- [27] Pagliaro, M., Rossi, M., *Additives for Cement*, Future of Glycerol: New Usages for a Versatile Raw Material., **2008**.
- [28] Schönert; Klauss., *Advances in the Physical Fundamentals of Comminution*, In Advances in Mineral Processing, Society of Mining, **1986**.

- [29] Austin, L. G., Klimpel, R. R., Luckie, P. T. , *Process Engineering of Size Reduction Ball Milling*. New York: Society of Mining Engineers, AIME, **1984**.
- [30] Shall, H. L., *Effect of Chemical Additives on Grinding*, Doktora Tezi, Columbia University, New York. **1980**.
- [31] Piret E.L., *Fundamental Aspects of Grinding*, Chemical Engineering Progress, 49, 56-63, **1953**.
- [32] Lynch, A. J., Rowland, C. A., *The History of Grinding*. Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, **2005**.
- [33] Schnatz, R., Knobloch, O., *Influence of the Ball Filling Factor on the Power Consumption and Throughput of Ball Mills in Combined Grinding Plants*. ZKG, 8, **2000**.
- [34] Shimoide, K., *Cement grinding by vertical roller mill*, World Cement, Eylül, **1996**.
- [35] Nobis, E., *Experience with grinding slag and clinker in a Loesche mill*. , ZKG 42,6, 142-144, **2001**.
- [36] Feige, F., *Cement grinding in a roller mill with external material circulation*. ZKG, 11,81, 560-562, **1981**.
- [37] Sutoh, K., Murata, M., Hashimoto, S., Hashimoto, I, Sawamura, S. Ueda, H., *Current report on preliminary grinding of clinker and raw material using the CKP system*, ZKG, **1992**.
- [38] Miranda, R. F., Minas, I, Yamana, W.T., Pirapora, S., Cimentos, V., Tete, P., *Brazilian progress in grinding*. World Cement, 40-42, Mayıs **1998**.
- [39] Dupis, J.; Rhin, C., *Increased grinding capacity at R.A.K*, World Cement, 79-83, Şubat **2003**.
- [40] Cornille, J. P., *Horromill: Lates Developments and Results*, European Cement Conference, Pro Publications International, **1999**.
- [41] Cordonnier, A., *The Horomill - a new finish grinding mill*. ZKG, 11, 643-647, **1994**.
- [42] Brunelli, G., *A proven partnership*, International Cement Review, 37-40, Şubat **2001**.
- [43] Schönert, K., *Advances in the Physical Fundamentals of Comminution*, In advances in Mineral Processing (eds:Somasundaran, P.), Society of Mining, **1986**.
- [44] Ellerbrock, H. G., *High pressure grinding rolls*. ZKG, 4, 1047-1100, **1994**.
- [45] Kellerwessel, H. A. M., *High pressure particle bed comminution*, Engineering and Mining Journal, 45-52, Şubat **1996**.

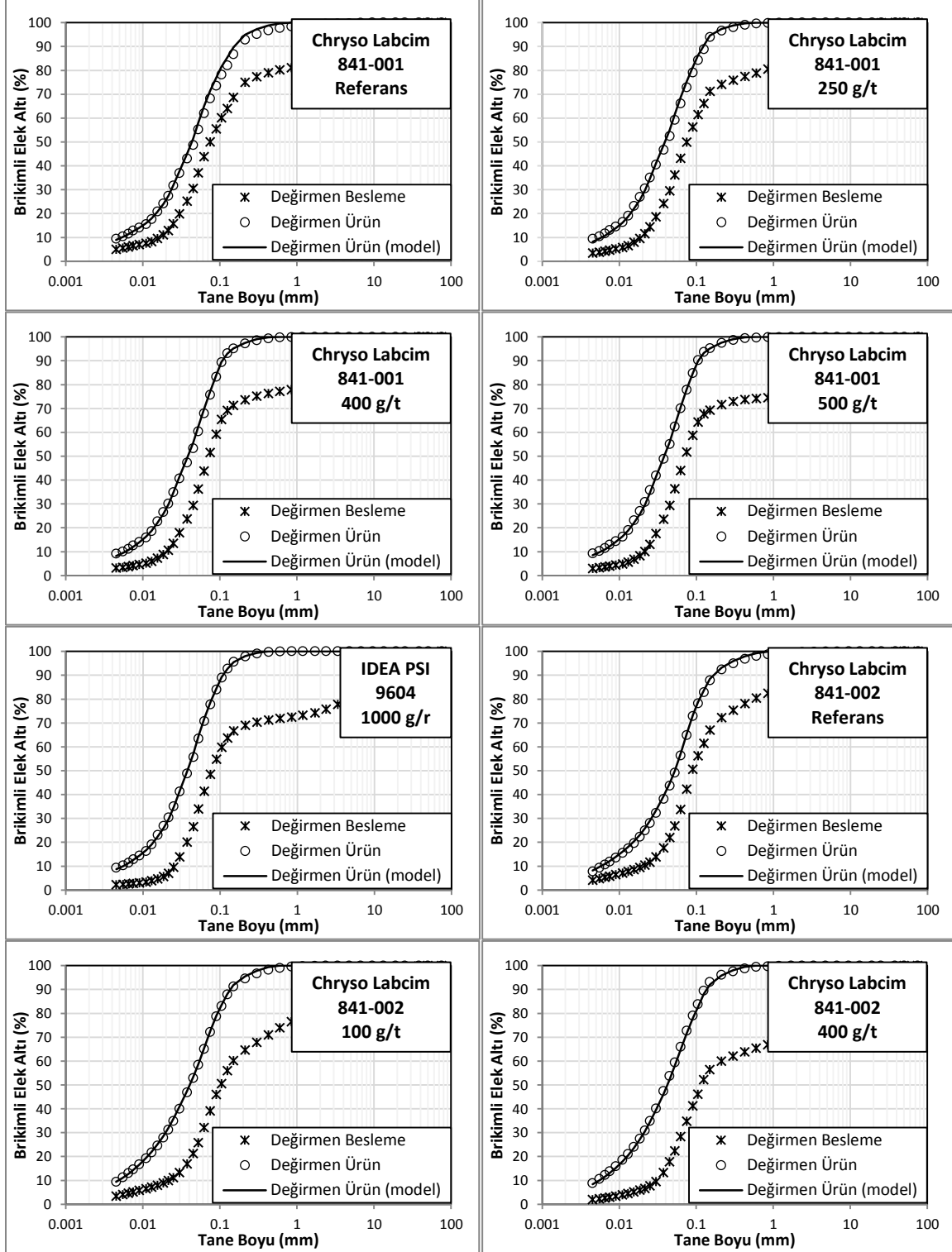
- [46] Odler, I., Chen, Y., *Influence of the method of comminution on the properties of the cement*. ZKG, 6, 42, 142-144, **1995**.
- [47] Benzer, H., Jankovic, A., Ergün, L., *Cement Practice Practice and Technology*, Kawatra, S. K. Advances in Comminution, 169-181, **2006**.
- [48] Lai, F. C., Karim M.R., Jamil M., Zain M.F.M, *Production yield, fineness and strength of cement as influenced by strength enhancing additives*. Australian Journal of Basic and Applied Science, IV, 7, 253-259, **2013**.
- [49] Jolicoeur, J., Morasse, S., Sharman, J., Tangit-Hamau, A., Slim, F., Page, M., *Polyol-type compounds as clinker grinding aids: Influence of powder fluidity and on cement hydration*. 12th International Congress on the Chemistry of Cement, **2007**.
- [50] Weibel, M., Mishra, R. K., *Comprehensive understanding of grinding aids*. ZKG International, Zürich, 28-39, June **2014**.
- [51] Choi, H.; Lee, W.; Kim, S., *Effect of grinding aids on the kinetics of fine grinding energy consumed of calsite powders by a stirred ball mill*. Advanced Powder Technology, 20,350-354, **2009**.
- [52] Mishra, R. K., Flatt, R. J., Heinz, H., *Force field for tricalcium silicate and insight into nanoscale properties: cleavage, initial hydration, and adsorption of organic molecules*. J. Phys. Chem., 117, 10417-10432, **2013**.
- [53] Heller, T., Müller, T., Honert, D., *Cement Additives based on PCE*. ZKG International, 40-48, **2011**.
- [54] Assaad, J. J., Asseily, S. E., *Use of water reducers to improve grindability and performance of Portland cement Clinker*. ACI Materials Journal, VI, 108, 619-627, **2011**.
- [55] Lower, S., *A gentle introduction to water and its struxture*. <http://www.chem1.com/acad/sci/aboutwater.html>, **2015**.
- [56] Mishra, R. K., *Simulation of interfaces in construction materials: tricalcium silicate, gypsum and organic modifiers*. University Akron. USA. **2012**.
- [57] Kuo, C. M., *The study of organic solvents as the grinding aids of cement clinker*, NCKU College of Engineering, **2003**.
- [58] Blake, T. D., *The physics of moving wetting lines*. Journal of Colloid and Interface Science, I, 299, 1-13, **2006**.
- [59] Mishra, R. K., Fernandez-Carrasco, L., Flatt, R.J., Heinz, H., *A force field for tricalcium aluminate to characterize surface properties,ntia hydration, and oganalyoed interfaces in atomic resolutions*, Dalton Transactions, 43, 10602-10616, **2014**.

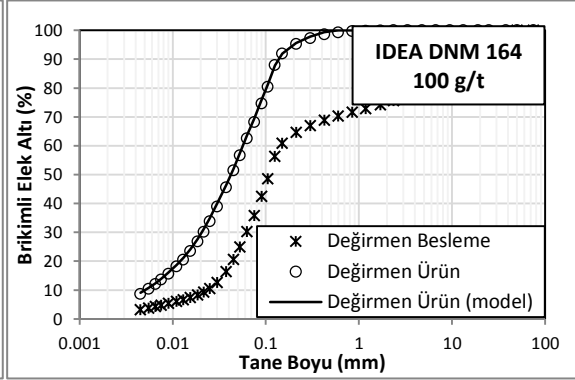
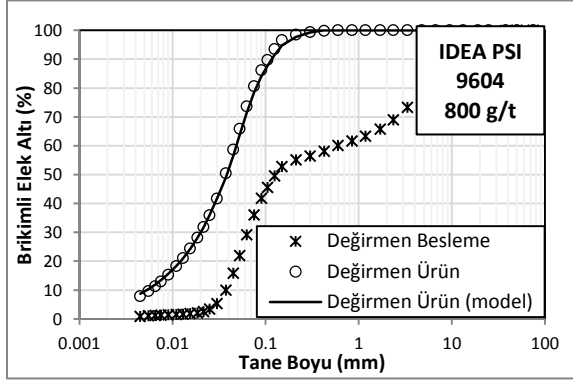
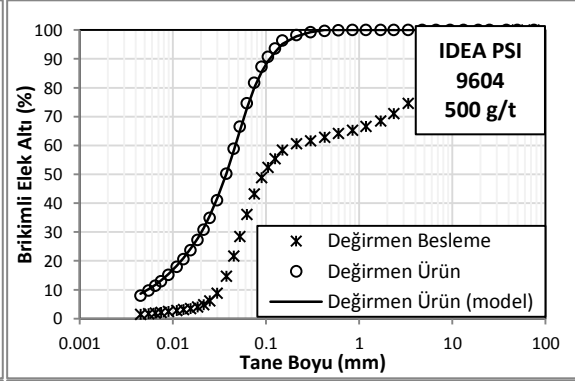
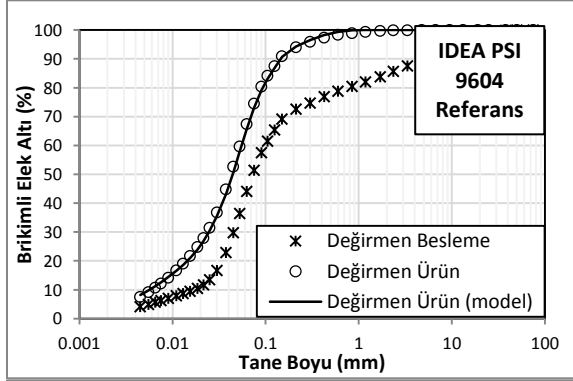
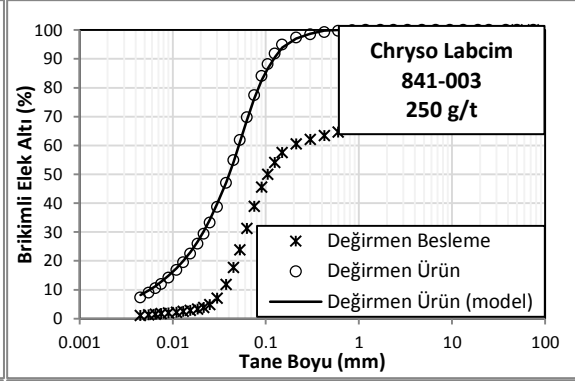
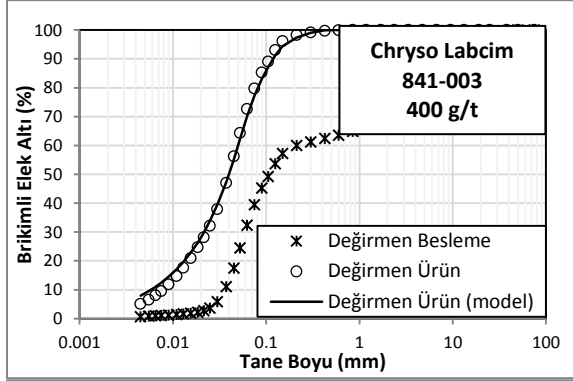
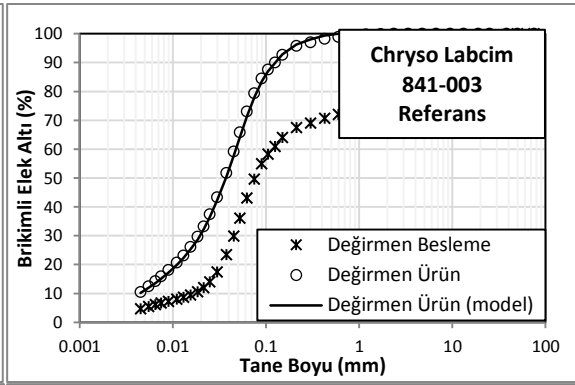
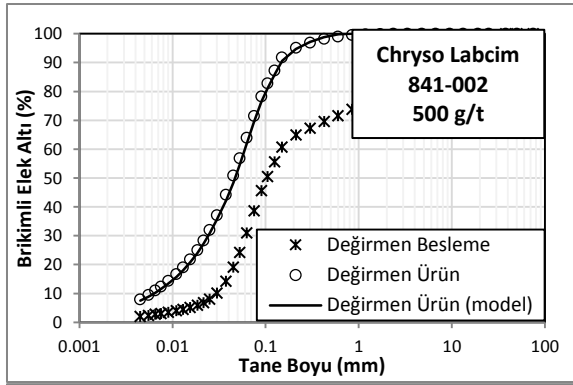
- [60] Tavares, L. M., Cromwell Cerqueira, M., Iess, J. J., *Analysis of the grinding behaviour of various Portland cement clinkers*. ZKG International, 16, 95-104, **2009**.
- [61] Scheibe, W., Hoffmann, B., Dombrowe, H., *Some problems of the use of grinding aids in the cement industry*. Cement and Concrete Research, 4, 289-298, **1974**.
- [62] Rajendran Nair, P. B., Paramasivam, R., *Effect of grinding aids on the time-flow characteristics of the ground product from a batch ball mill*. Powder Technology, 101, 31-42, **1999**.
- [63] Ramachandran, V. S., Beaudoin., *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology: Principles, Techniques, and Applications*. Noyes Publications/William Andrew Publishing, 1-63, 2001
- [64] Hewlett, P. C., *LEA's chemistry of cement and concrete*. 4th. ed., Elsevier Science & Technology Books, **2004**.
- [65] Gerber, A. H., *Admixtures for hydraulic cement*. United States Patent, 4,473,405, **1984**.
- [66] Diamond, S., *Accelerating Admixtures*., Proc. Intern. Congr. Admixtures, p.192, London, **1984**.
- [67] Fraser, K. J., *Influence of grinding aids on cement hydration*, Yüksek Lisans Tezi, University of Aberdeen, In the school of Engineering and Physical Sciences, **2003**.
- [68] Massazza, F., *Admixtures on Concrete*, Advances in Cement Technology. New York: Perganom Press,. 569-648, **1983**
- [69] Roskopf, P. A., Linton, F. J.; Peppler, R. B. Effect of various accelerating chemicals admixtures on setting and strength development of concrete, 3, 4, 322-330, **1975**.
- [70] Aiad, I.; Mohammed, A. A., Abo-El-Enein, S. A., *Rheological properties of cement admixes with some alkanolamines*, Cement and Concrete Research, 1, 33, 9-13, **2003**.
- [71] Norimoto, I., *Grinding aid for cement clinker*, Gypsum and Lime, 138, 191-197, **1975**.
- [72] Dodson, V., *Concrete Admixtures*. New York: Springer, **1990**.
- [73] Heren, Z., Olmez, H., *The influence of ethanolamines on the hydration and mechanical properties of Portlan cement*. Cement and Concrete Research, 5, 26, 701-705, **1996**.
- [74] Heren, Z., Ölmez, H. *The influence of ethanolamines on the surface properties of cement pastes*, Cement and Concrete Research, 6, 27, 805-809, **1997**.
- [75] Gartner, E., Myers, D., *Influence of Tertiary Alkanolamines on Portland-Cement Hydration*, Journal of the American Ceramic Society, 6, 76, 1521-1530, **1993**.

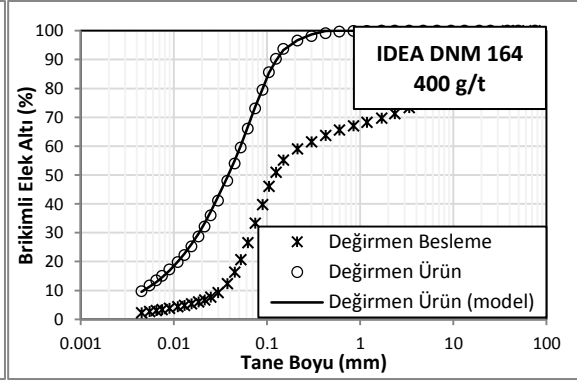
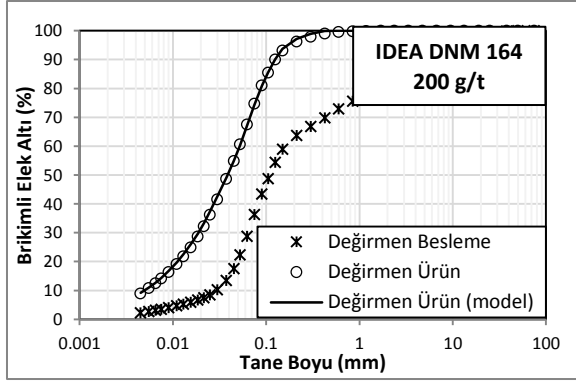
- [76] Ichikawa, M., Kanaya, M., Sano, S., *Effect of triisopropanolamine on hydration and strength development of cement with different character*, Proceedings of the 10th International congress on the chemistry of cement, Gothenburg, **1997**.
- [77] Cheung, J., *Influence of tertiary alkanolamines on the hydration of portland cement*. International Summit on Cement Hydration Kinetics, Quebec, **2009**.
- [78] Toprak, N. A., Altun, O., Aydoğan N.A., Benzer A.H., *The influences and selection of grinding chemicals in cement grinding circuits*. Construction and Building Materials, 68, 199-205, **2014**.
- [79] Recchi, P., Magistri, M., D'arcangelo, P., *A novel technology for cement grinding in vertical mills*, Mapei SpA, Milan. **2011**.
- [80] Altun, O., *Investigation of dry horizontal stirred milling applications for cement grinding circuits*, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. **2013**.
- [81] Bodhimage, A., *Correlation between physical properties and flowability indicators for powders*, University of Saskatchewan, Saskatchewan, **2006**.
- [82] Nageswararao, K., *Reduced efficiency curves of industrial hydrocyclones-An analysis for plant practice*, Minerals Engineering, 12, 5, 517-544, **1999**.
- [83] Altun, O., Benzer, H., *Selection and mathematical modelling of high efficiency air classifiers*. Powder Technology, 264, 1-8, September **2014**.
- [84] Altun, O., *Havalı Sınıflandırıcıların Modellenmesinde Performans Eğrisine Dayalı Farklı Model Yaklaşımlarının Karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2007**.
- [85] Napier-Munn, T., Morrison, R.D., Kojovic, T., *Mineral Comminution Circuits Their Operation and Optimisation*, Indooroopilly, Qld. : Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, **1996**.
- [86] Ekşi, D., *İnce Tanelerin Kırılma Davranışlarının Belirlenebileceği Bir Test Yöntemi Geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2011**.
- [87] Schrabback, J., *Polycarboxylate polymer-powered grinding efficiency*, Global Cement Magazine , July-August **2009**.

EK

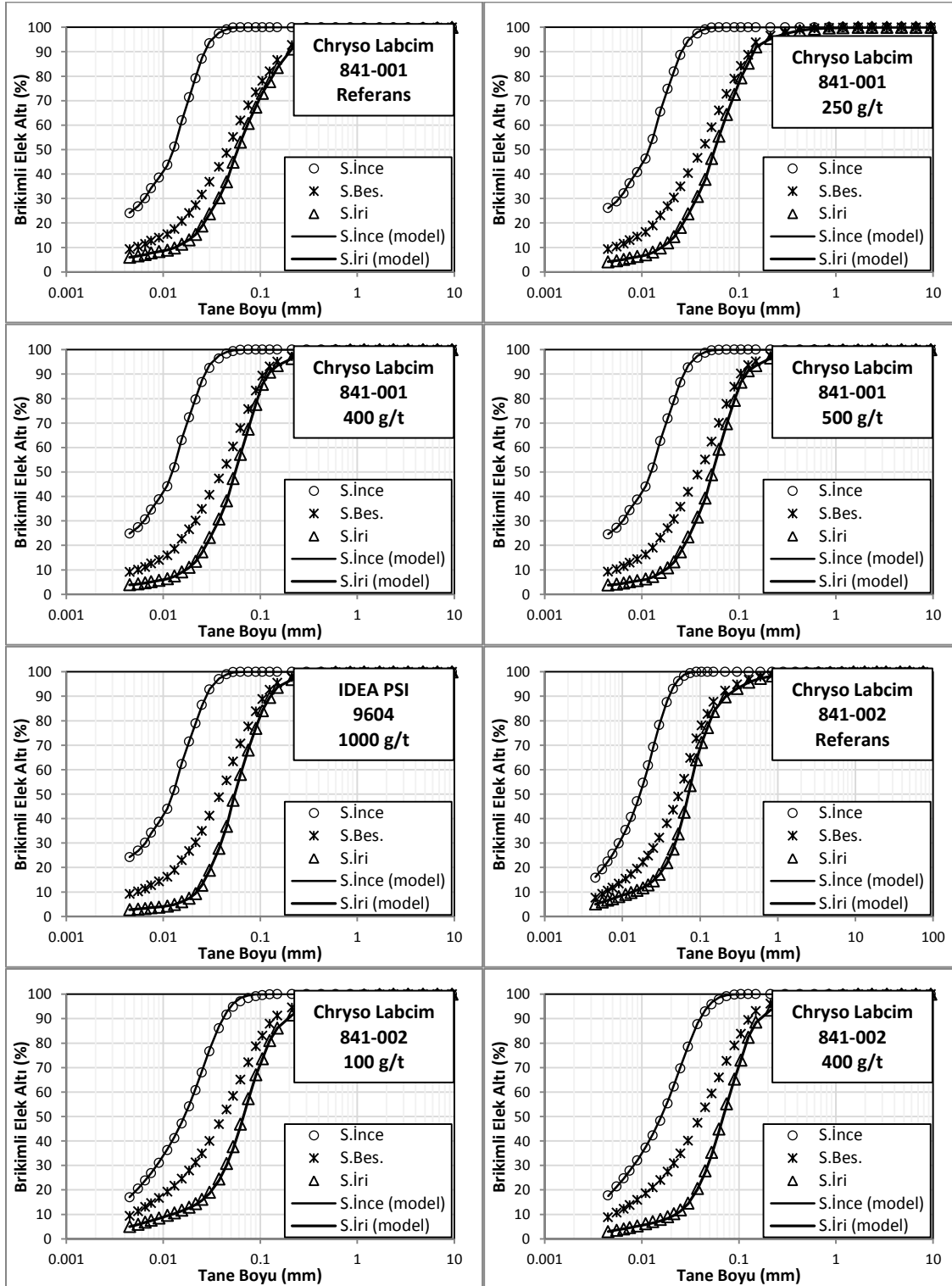
EK 1: Kütfe denklęi ve modelleme çalışmaları sonucunda hesaplanan değirmen ürününe ait tane boyu dağılımları

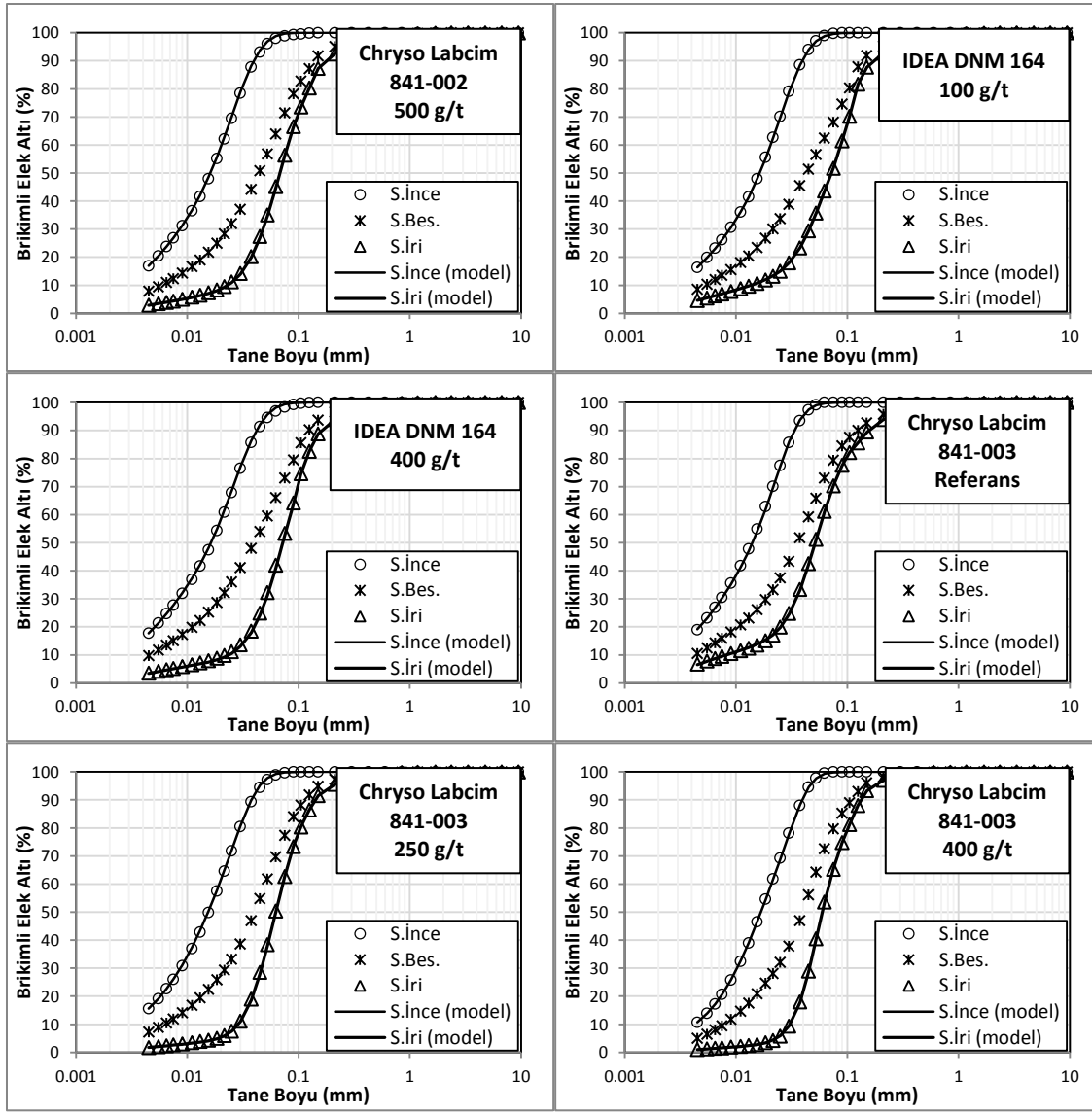


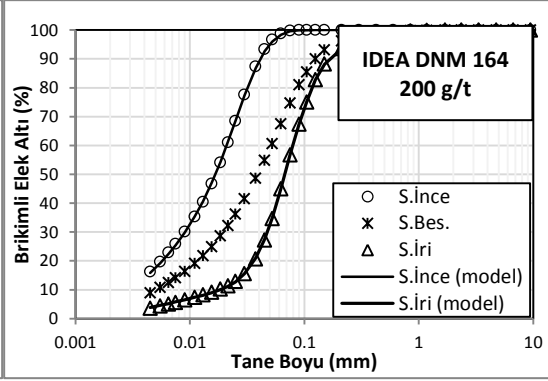
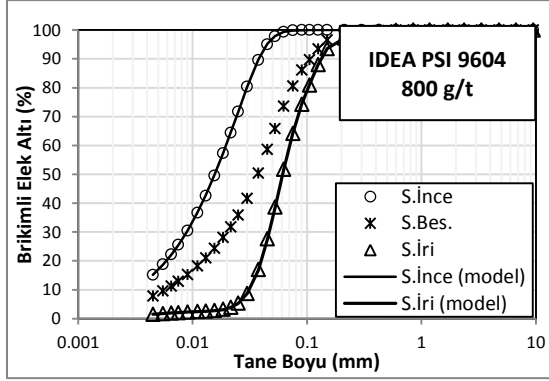
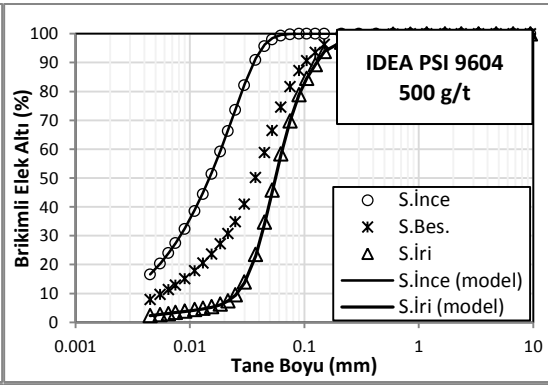
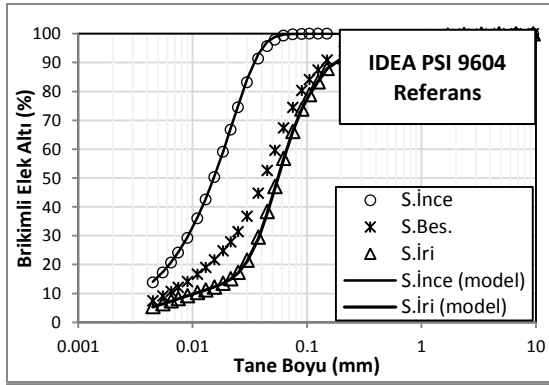




EK 2: Kütle denkliği ve modelleme çalışmaları sonucunda hesaplanan sınıflandırıcı ince ve iri akışlarına ait tane boyu dağılımları







ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Nurettin Alper TOPRAK
Doğum Yeri : Ankara
Medeni Hali : Evli
E-posta : natoprak@hacettepe.edu.tr
Adresi : Harbiye Mahallesi, Zerrin Sokak,
3/6 Gökpınar Apt. Dikmen
Çankaya / ANKARA

Eğitim

Lise : 1998 – 2001 Ankara Atatürk Lisesi
Lisans : 2001 – 2006 Hacettepe Üniversitesi (Maden Mühendisliği Bölümü)
Yüksek Lisans : 2007 – 2010 Hacettepe Üniversitesi (Maden Mühendisliği Bölümü)

Yabancı Dil Düzeyi

İngilizce (İleri Seviye)

İş Deneyimi

2007 - ... : Araştırma Görevlisi (Hacettepe Üniversitesi)

Deneyim Alanları

Cevher Hazırlama

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinasyon Birimi

Proje Numarası : FDK-2015-6847. Bütçe: 609,00 TL

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

-