

Klinker Fazlarının Farklı Öğütme Sürelerinde Çimento Performans Özelliklerine Etkisinin Araştırılması

Abdul Vahap KORKMAZ^{1*}

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi, İncehisar MYO, İnşaat Bölümü, av.korkmaz06@gmail.com,
ORCID: 0000-0001-8691-1937

* Sorumlu Yazar

ARAŞTIRMA MAKALESİ – TÜRKÇE / RESEARCH ARTICLE – TURKISH

Özet

Klinker mikro yapı ve öğütülebilirlik ilişkilerinden yola çıkılarak klinker mikro yapısının farklı öğütme sürelerinde çimento performansına etkisi araştırılmıştır. Çalışma süresince mümkün olduğu kadar klinker üretim sıcaklığı, soğutma hızı ve diğer proses şartları eşit tutulmaya çalışılmıştır. Çalışmada klinkerin öğütülebilirliğini daha iyi kavramak ve mineral fazlarını optimize etmek için Bogue formülü, optik mikroskop vb. endüstriyel ve deneysel yöntemler kullanılmıştır. Klinkerin öğütme işlemleri için önemli miktarda enerji gerektiğinden, klinker mikro yapısının tanınması ve optimum öğütme süresi ve çimento performansı için gerekli sürenin belirlenmesi ile öğütme verimliliğinin ve çimento dayanımlarını artırılması ve böylece enerji tüketiminin azaltılması amaçlanmıştır. Klinker fazlarının çimento dayanımlarında doğrudan etkili olduğu görülmüştür. Özellikle Yüksek C3S'lerin çimento inceliklerini arttırdığı ve çimento inceliklerinin de çimento performanslarını arttırarak dayanımı yükselttiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Klinker, C₃S, C₂S, Öğütme, Dayanım.

Investigation of The Effect of Clinker Phases on Cement Performance Properties at Different Grinding Times

Abstract

Based on the clinker microstructure and grindability relationships, the effect of clinker microstructure on cement performance at different grinding times was investigated. Clinker production temperature, cooling rate and other process conditions were tried to be kept equal as much as possible during the operation. In the study, Bogue formula, optical microscope, etc. were used to better understand the grindability of clinker and to optimize mineral phases. industrial and experimental methods are used. Since a significant amount of energy is required for the grinding processes of clinker, it is aimed to increase the grinding efficiency and cement strengths and thus reduce energy consumption by recognizing the clinker microstructure and determining the required time for optimum grinding time and cement performance. It has been observed that clinker phases are directly effective in cement strengths. It was concluded that especially High C3S increased the cement fineness and cement fineness increased the strength by increasing the cement performances.

Keywords: Clinker, C₃S, C₂S, Grinding, Strength.

1. Giriş

Çimento fabrikalarında kullanılan ham maddelerin özelliklerine ve çimento üretim proses şartlarına bağlı olarak farklı mineralojik karakterizasyona sahip Portland Çimentosu klinkerleri üretilmektedir. Klinkerin öğütülebilirliğinde ve çimento performansında kimyasal ve mineralojik özellikler önemli rol oynamaktadır. Çimento proseslerinde öğütülebilirliğin en önemli bağlayıcı etkilerinden birincisi; çimentonun performansı mineralojik ve kimyasal bileşiminin yanı sıra çimentonun inceliğine ve tane boyutu dağılımına bağlı olması; İkincisi ise çimento üretimi enerji maliyetlerinin %65'inin öğütmede harcanmasıdır [Young & Yang, 2019].

Tipik bir Portland çimentosu klinkeri bileşiminin %90'ından fazlası, karma oksit formundaki dört ana bileşen tarafından oluşturulmaktadır. Endüstriyel döner fırınlarda yüksek sıcaklıklarda (1350-1450 °C) gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda aşağıdaki klinker mineral fazları oluşmaktadır [Tsakiridis vd., 2014].

$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = (\text{C}_3\text{S})$ (alit), $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = (\text{C}_2\text{S})$ (belit), $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = (\text{C}_3\text{A})$, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = (\text{C}_4\text{AF})$ bileşenleridir [Tsakiridis vd., 2014].

Döner fırın klinker üretim prosesinde ilk eriyik fazı 1260-1310 °C arasında meydana gelmektedir. Sıcaklık yükseldikçe klinker eriyiğinin oranı artmakta ve kimyasal içeriğine göre 1450 °C' de ağırlıkça ortalama %20-30'a ulaşmaktadır. Portland çimentosunun asıl içeriği olan C_3S (alit)' de bu sıcaklıklar da meydana gelmektedir. Sinterleşme sürecinin başladığı andan itibaren C_2S 'in yanında yüksek miktarda bağlı olmayan serbest CaO ' ler oluşmaktadır. Eriyik faz ile serbest CaO ve C_2S katı çözeltiye

geçmektedir. Katı eriyik fazları ve silikat fazları klinker fazlarını iki gruba ayırmaktadır. Silikat fazları C_3S (Alit), C_2S (Belit), katı eriyik fazlar C_3A (Tri kalsiyum alüminat), C_4AF (tetra kalsiyum alüminaferrit) [Bullerjahn vd., 2014]

Yapılan akademik çalışmalar sonucunda klinkerin yapısında SM (silikat modülü) ve AM (alüminyum modülü) arttıkça öğütülebilirliğin azaldığı görülmüştür. Klinkerin sertliği öğütme enerjisini yumuşak klinkere göre % 80 daha fazla arttırmaktadır. Silikatların ara fazlara oranı veya $(\text{C}_3\text{S} / \text{C}_2\text{S})$ oranı, $(\text{C}_3\text{S} + \text{C}_2\text{S}) / (\text{C}_3\text{A} + \text{C}_4\text{AF})$, azaldığında öğütme zorlaşmakta ve öğütme enerjisi tüketimi artmaktadır. Klinkerin öğütülebilirliğine mineralojik ve kimyasal bileşenlerin yanı sıra klinkerin mikro yapısının da etkisi yüksektir. Klinker mikro yapısını oluşturan fazlarının meydana gelmesinde fırın pişirme sıcaklıklarının ve klinkerin hızlı soğutulmasının rolü büyüktür [Wilson, W., 2013].

Klinker bünyesinde %40-70 oranında alit (C_3S) fazı olabilmektedir. Alit, hidrolik reaksiyonun hızlı gelişmesini sağlayan ve çimento dayanımı ile hidrasyon ısısını kontrol eden faz olarak nitelendirilmektedir. 1250 °C'nin altında sabit bir soğutma hızında (yavaş olmak kaydıyla), belli sıcaklıklara kadar kararlılığını korumaktadır. Soğutma hızının çok yavaş olduğu taktirde ise alit (C_3S) bir kısmı çözünmekte ve belit (C_2S) oluşmaktadır. Klinker silikat kristallerinin tane boyutları eşdeğer çapları hesaplanarak ortaya konulabilmektedir. Eşdeğer çap bir kristal kesitinde kesit alanının ağırlık merkezinden geçen en uzun ve en kısa iki uzunluğun ortalaması alınarak belir-

lenmektedir. 15-20 µm eşdeğer çaplı alit kristalleri, klinkerin öğütülmesini kolaylaştırmakta ve çimentonun erken dayanımına olumlu katkı sağlamaktadır. İnce kristalli yapı, özellikle küçük kalsiyum silikat (C₃S) kristalleri öğütme verimini arttırmaktadır. İri kristaller yalnız parçalanmayı zorlaştırmamakta, aynı zamanda kırılma alanlarının sayısını da arttırmaktadır. Eşdeğer kristal çapı 25-60 µm olan belit kristalleri, ham farin karışımındaki kuvars parçacıklarının yeterince öğütülmemesinin ya da yeterli ısıtma ve soğutma rejiminin bir sonucu olarak oluşabilmektedir [Felekoğlu & Güllü, 2006].

Çimento fabrikalarında üretilen klinkerlerin öğütülmesi için yüksek miktarlarda enerji harcanmaktadır. Klinker öğütülebilirliğindeki iyileştirmeler öğütme verimliliğini arttıracak ve böylece öğütme enerjisini azaltacaktır. Klinkerin hızlı soğutulması ile hegzagonal kristal yapısında C₃S kristalleri üzerinde hızlı soğutmada termal presleme sonucunda oluşmuş çatlaklar meydana gelmektedir. Bu çatlaklar öğütme kabiliyetini ve hidrolik aktiviteyi arttırmaktadır. Düzgün şekilde soğutulmuş bir klinkerin kristal uçları keskindir. Düşük oranlarda Al₂O₃ ve Fe₂O₃ içeren klinkerin öğütülmesinin daha kolay olduğu bulunmuştur. Daha yüksek yüzdeli sıvı faza sahip klinker, daha yüksek bir iş indeksi göstermekte ve öğütülmesi daha zor olmaktadır. Ekonomik yakma ve öğütme işlemleri elde etmek için fırın beslemesinin kimyasal bileşimini ve klinkerdeki sıvı faz miktarını kontrol etmek gerekmektedir [Korkmaz, 2020].

Çimentonun servis özellikleri üzerinde sadece incelik ve tane boyutu dağılım parametreleri etkili olmakla kalmaz, aynı zamanda kimyasal,

mineralojik ve mikro yapısal parametreler de özellikle mukavemet gelişiminde önemli bir role sahip olmaktadır [Brueggemann & Brentrup, 1990]. Klinkerin bileşimi ve mikro yapısının öğütmeye, pişme sürecine ve çimento dayanımına etkileri temel alınarak bu konuda halihazırda çok sayıda çalışma mevcuttur [Altwair vd., 2014]. Fakat klinker mikro yapısının çimento üretim proseslerine yönelik endüstriyel uygulamalı bir çalışma mevcut olmayıp, çalışmaların büyük çoğunluğu laboratuvar ölçeğinde kalmaktadır. Yapılan bu çalışma bu yönüyle diğerlerinden ayrılmakta olup yine mikro yapının öğütme süreleri üzerine etkisinin araştırılması ile de ayrıca katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. Materyal ve Metot

Kullanılan Klinker mineral fazlarının belirlenmesi pek çok analiz yöntemiyle yapılabilen, bunların bazıları nicel, bazıları ise sadece nitel anlamda veri sağlamaktadır. Kimyasal ve fiziksel analiz yöntemlerinin kullanılabilirlikleri, uygulama hızları ve güvenilirlikleri birbirlerine göre farklılık göstermektedir. Yaş kimyasal analiz, Bogue yöntemi, klasik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu, XRD ve görüntü analiz yöntemleri kimyasal ve fiziksel yöntemlere örnek verilebilir. Bu yöntemler arasında en kolay ve ucuz olanı Bogue yöntemidir; kimyasal bileşenler ile potansiyel fazlar hesaplanır [Wang & Baaj, 2021].

Kullanılmış olan çimento tipinin belirlenmesi veya çimento hammaddelerinin incelenmesi amaçlandığında polarizasyon mikroskopisi sıklıkla kullanılan bir yöntemdir [Kang vd., (2021)]. Mikroskop yardımıyla çimento tipi belirlenmek istendiğinde özellikle alit, belit gibi

klinker mineralleri belirlenmelidir. Özellikle klinkeri oluşturan alit ve belit kristalleri, anizotrop yapılarda olup, çapraz polarizasyon yardımıyla ince kesitte kolaylıkla tayin edilebilmektedir. Genellikle optik özelliklerin ince kesite oranla daha kolay belirlenebildiği parlak kesit örneklerinde dağlama işlemi yapıldıktan sonra faz ayırımı yapılabilmektedir. Endüstride klinker kalite kontrolünde problemlerin çözümüne tam netlik kazandırması amacıyla kullanılmaktadır. Örneğin faz dağılımının heterojenliği, porozite, kristal şekli ve büyüklüğünde meydana gelen herhangi bir olumsuzluğu belirleyebilmek oldukça değerlidir. Çok sık rastlanmasa da nicel faz analizi nokta sayım yöntemiyle yapılabilmektedir [Kulpa vd., 2021]. Optik mikroskopi ayrıca, hammadde içeriğindeki bileşenlerin incelenmesi, döner fırında yanma problemlerinin tanımlanması, betonun kırılma analizi ile betondaki hava boşluklarının belirlenmesinde sıkça kullanılmaktadır [Zhao vd., 2021]

Çimento klinker numunelerinin kimyasal analizleri Spectro marka XRF cihazıyla TS EN 197-1'e göre tespit edilmiştir [Külekçi, 2021]. Çimento dayanım tayinleri TS EN 196-1'e göre yapılmıştır. İncelik tayinleri 45 ve 90 µm lik elekler kullanılarak Alpine cihazı marifetiyle tespit edilmiştir [Astoveza vd., 2021]. Deneysel çalışmalarda öğütme işlemi; 30,5 cm çapında ve 30,5 cm boyutunda (36 mm, 30 mm, 25 mm, 19.05 mm ve 12.70 mm çapında 70 rpm' de dönen bilyeler ile) bir tamburun içerisinde gerçekleştirilmiştir.

2.1. Mikroskopik Analiz Yöntemi

Polarize ışık mikroskopu yardımıyla nokta sayımı yöntemi ile faz miktarı tayini yapılmıştır.

Söz konusu işlem için, pişme işlemi sonucunda elde edilen klinker numunesinin iki farklı granülü polyster içerisine yerleştirilerek dondurulmak sureti ile sabit hale getirilmiş, sonrasında zımpara ve parlatma işlemlerinden geçirilerek hidroflorik asit buharına tutulmuş, fazların renklenmesi sağlanmıştır [Kang vd., (2021)].

Klinker parlak kesit numuneleri hazırlanarak %1 HNO₃ çözeltisi kullanılarak etil alkol içinde disperse edilmiştir. Dağlama işlemi neticesinde alit ve belit fazlarının renk, desen ve geometrilerinin belirginleşmesi sağlanmıştır. Nitrik asit çözeltisinde dağlama işlemi sonucunda alit ve belit fazları belirginleşmekte ve ara fazlar (C₃A+C₄AF) bir bütün olarak ortaya çıkmaktadır. Fakat ara fazların (C₃A+C₄AF) kendi arasındaki dağılımı nitrik asit dağlaması ile net olarak belirlenememektedir. Bu nedenle, ara fazlarının (C₃A ve C₄AF) birbirinden ayırt edilebilmesi için değişik kimyasal maddeler ile dağlama işlemi yapılması gerekmektedir [Cetmeli, 2017; Çimsa, 2021]

Farklı boyut ve görünümdeki parlak kesitleri hazırlanan klinker taneciklerinden bir kesit alınarak yüzeyleri HF asit buharı ile temas ettirilerek dağlanmıştır. Dağlama işlemi neticesinde her bir klinker fazının kendine özgü renkte [(alit (C₃S) kahverenkli, belit (C₂S) mavi, sıvı faz (C₃A + C₄AF) zemindeki koyu gri + beyaz renkli kısım ve yine serbest kireç beyaz renkte ortaya çıkması sağlanmıştır)]. Polarize mikroskop cihazında, nokta sayma yöntemi ile alit (C₃S), belit (C₂S) ve sıvı faz (C₃A+C₄AF) oranları bulunmuştur [Güllü, 2006].

2.2. Bogue Formülü

Farin, klinker ve çimento fazlarının ve modüllerinin hesap edilmesi için numunelerin kimyasal içeriklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu da günümüz teknolojisinde numunelerin XRF cihazında okutulması ile mümkün olmaktadır [Nahi vd., 2020]. XRF metoduyla kimyasal içerikleri tespit edilen klinker ve çimento numunelerinin Bogue formülü kullanılarak C_3S , C_2S , C_3A ve C_4AF % oranları hesaplanmıştır (denklem 1-4).

Tri Kalsiyum Silikat (C_3S);

$$C_3S = 4.07C - 7.6S - 6.72A - 1.43F - 2.85S \quad (1)$$

Di Kalsiyum Silikat (C_2S);

$$C_2S = 2.87S - 0.754C \quad (2)$$

Tri Kalsiyum Silikat (C_3A);

$$C_3A = 2.65A - 1.69F \quad (3)$$

Tetra Kalsiyum Alumino Ferrit;

$$C_4AF = 3.0432F \quad (4)$$

3. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde elde edilen sonuçlara yer verilmesi, sonuçlar gerekirse şekil ve tablolarla döner fırında farinin pişirilmesi sonucu üretilen klinkerin kimyasal içeriğini bilmek ne kadar önemli ise mineralojik özelliklerini bilmek de çimento kalitesi açısından o kadar önemlidir. Çimento üretimine, mineralojik parametrelerin belirlenmesi, proses şartlarının yeniden düzenlenmesi açısından belirleyici olabilmektedir. Klinkerin mineralojisi ve mikro yapısı yani klinker mineral fazlarının ve gözeneklerin oluşumu ve dağılımı; ham madde karışımının homojenizasyonuna, farinin inceliğine ve dağılı-

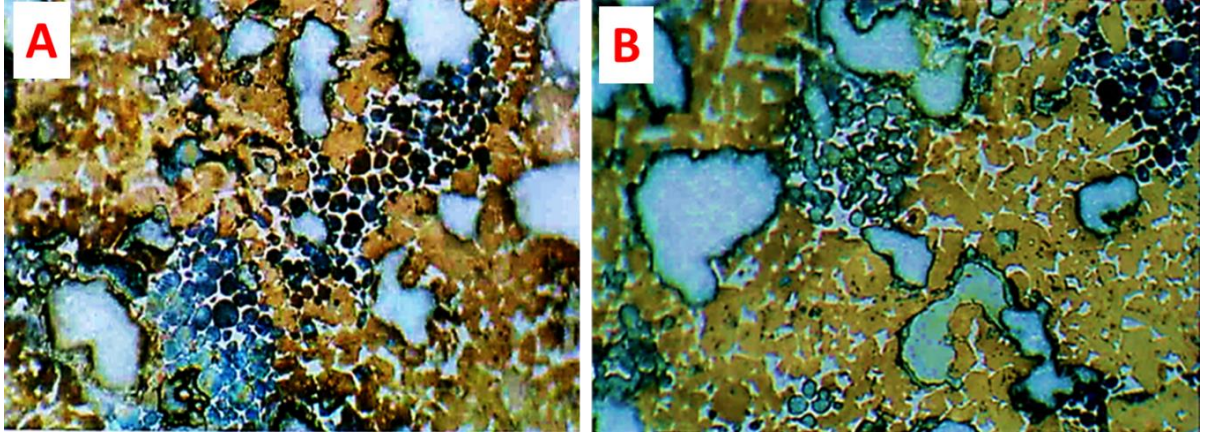
mına, maksimum tane boyutuna, klinker sinterleşme sıcaklığına ve süresine, soğutma hızına, kimyasal içeriğine ve diğer tüm proses koşullarına bağlıdır. Bu nedenle klinkerin kalitesi; farinin özellikleri, döner fırın proses şartları, kalsinasyon ve sinterleşme derecesi, ham madde karışım oranları ve mineralojik özellikleri belirlendikten sonra yorumlanabilir ve mamul hakkında nihai bir değerlendirme yapılabilir. Klinker kalitesinin tespitinde fiziksel ve kimyasal testlerin yanı sıra klinkerin mikro yapısının optik mikroskop yöntemleri ile değerlendirilmesi önemlidir. Çünkü klinkerin kimyasal ve fiziksel testleri çimento üretimi için uygun olsa bile, mineral fazlarının kristal boyutu ve dağılımına bağlı olarak öğütülebilirlik ve dayanımın gelişmesi açısından olumsuz sonuçlar verebileceği görülmüştür [Korkmaz, 2012].

Klinker faz tayinleri iki yolla hesap edilmektedir. Bunlardan birincisi optik mikroskop ile faz tayinidir. İkinci yöntem ise Bogue formülü ile faz oranlarının hesaplanmasıdır. Endüstriyel çapta değerlendirme yapılması ve üretim hattının ivedi olarak yönlendirilebilmesi ve optik mikroskop işleminin çok zaman alması ve maliyeti yüksek olmasından dolayı çimento üreticileri tarafından klinker fazlarının hesaplanmasında Bogue formülü daha çok tercih edilmektedir [Altun & Ölmez, 2001]. Yapılan deneysel çalışmada Bogue formülü ile optik mikroskop faz tayini arasındaki farkın tespiti için ayrıca deneysel çalışmalarda kullanılan klinker örneklerinden kompozit bir numune oluşturularak optik mikroskop altında faz tayini tespit edilmiştir. Üretilen klinkerler örnekleri üzerinde optik mikroskop çalışması yapılmış, klinker fazları hesaplanmış ve buna ilave olarak Bogue formülü ile de bir karşılaştırılması

yapılmış daha sonra klinker fazlarının öğütme süresinin beton performansına etkileri araştırılmıştır (Şekil 1, Tablo 1).

Klinker bileşimi öğütülebilirliği etkilemekte ve farklı kimyasal bileşimlere sahip klinkerlerin öğütülebilirlikleri de farklı sonuçlar vermektedir [Alsop vd., 2005]. Klinkerin öğütülmesi kimyasal bileşimin yanısıra mineralojik özelliklere de bağlıdır. Mikro yapısında yüksek alit içeriği ve düşük belit içeriği bulunan klinkerin

(alüminat ve ferrit) öğütülmesi yüksek miktarlarda belit ve ara evreler içeren klinkere göre daha kolaydır. Ayrıca alit kristal boyutu, alit kristalleri içindeki mikro çatlaklar ve belit kümeleri de öğütülebilirliği etkilemektedir [Altun, 1999]. Klinker de alit faz miktarının artırılması klinkerin kolay öğütülmesine neden olmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde klinker mikro yapısının klinker öğütülebilirliği üzerinde etkileri açıklanmasına karşın



Şekil 1. Klinker optik mikroskop görüntüsü (Kahverengi renk; alit; Mavi renk; belit)

Tablo 1. Klinker kimyasal analiz ve faz tayin sonuçları

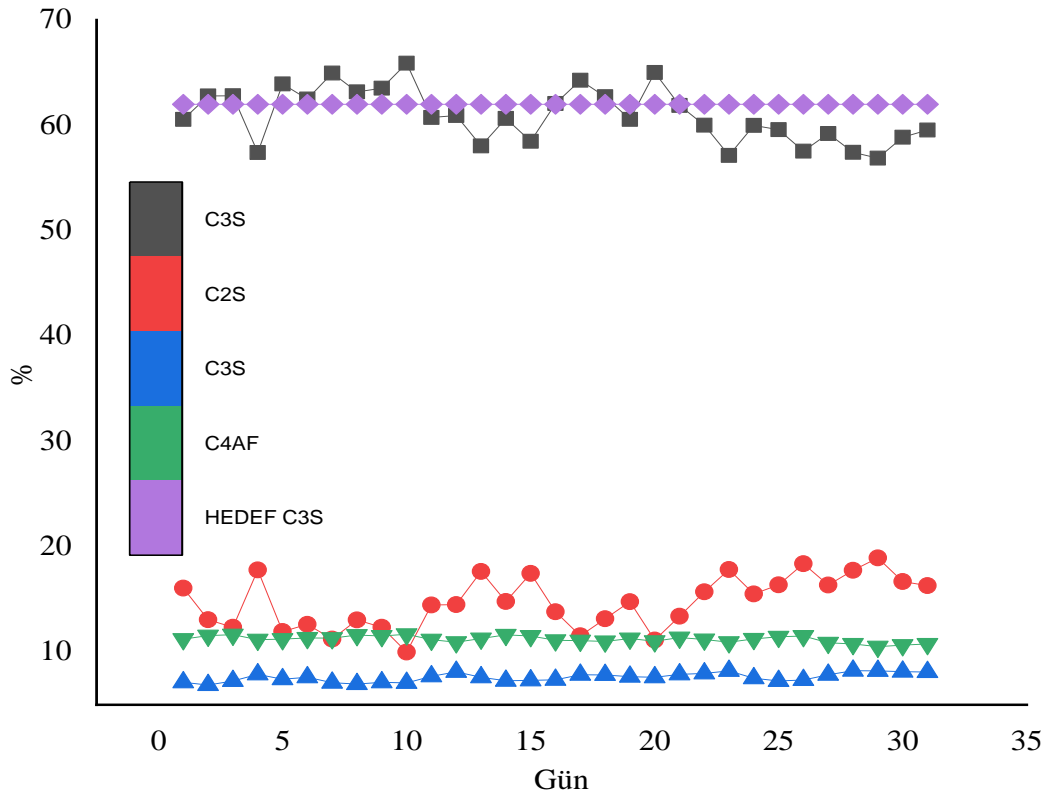
Kod	SiO ₂ , %	Al ₂ O ₃ , %	Fe ₂ O ₃ , %	CaO, %	MgO, %	Na ₂ O, %	K ₂ O, %	SO ₃ , %	Kızdırma Kaybı, %	Toplam
Opmic	20.58	5.34	3.78	66.68	1.44	0.38	0.81	0.71	0.28	100
Bogue	21.05	5.45	3.61	66.30	1.56	0.38	0.88	0.67	0.28	100

	Serbest CaO	C ₃ S, %	C ₂ S, %	C ₃ A, %	C ₄ AF, %	LSF, %	SİM	ALM	Sıvı Faz	90 mikron(+)
Optic	1.68	62.18	12.74	7.72	10.62	98.5	2.42	1.47	26.35	1.40
Bogue	1.90	60.37	14.90	8.35	10.98	97.90	2.32	1.51	27.30	1.50

çimento üreticileri tarafından endüstriyel boyutta üretilen klinker fazları arasında ciddi sapmalar görülmektedir (Şekil 2). Endüstriyel deneme çalışmasının yapıldığı bir çimento fabrikasına ait günlük klinker örneklerinden alınarak Bogue formülüne göre hesaplanan klinker mineral fazları Şekil 2’de gösterilmiştir. Klinker C₃S hedefi %62 olarak belirlenmesine karşın bir aylık klinker üretim sürecinde tutarsızlıklar görülmektedir.

Klinker bileşimi öğütülebilirliği etkilemekte ve farklı kimyasal bileşimlere sahip klinkerlerin öğütülebilirlikleri de farklı sonuçlar vermektedir [Alsop vd., 2005]. Klinkerin öğütülmesi kimyasal bileşimin yanısıra mineralojik özelliklere de bağlıdır. Mikro yapısında yüksek alit

içeriği ve düşük belit içeriği bulunan klinkerin (alüminat ve ferrit) öğütülmesi yüksek miktarlarda belit ve ara evreler içeren klinkere göre daha kolaydır. Ayrıca alit kristal boyutu, alit kristalleri içindeki mikro çatlaklar ve belit kümeleri de öğütülebilirliği etkilemektedir [Altun, 1999]. Klinker de alit faz miktarının artırılması klinkerin kolay öğütülmesine neden olmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde klinker mikro yapısının klinker öğütülebilirliği üzerinde etkileri açıklanmasına karşın çimento üreticileri tarafından endüstriyel boyutta üretilen klinker fazları arasında ciddi sapmalar görülmektedir (Şekil 2).

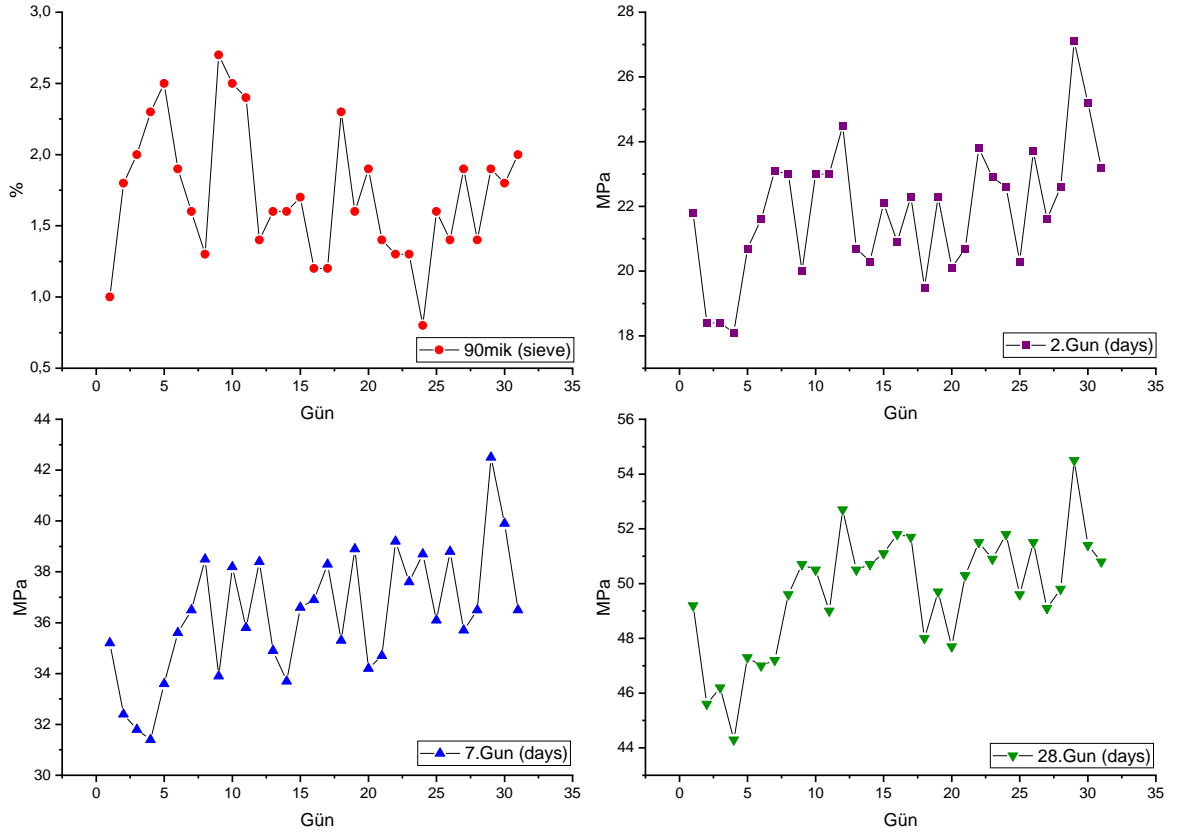


Şekil 2. Bir aylık endüstriyel klinker mikro fazları

Şekil 2’de bir çimento üretim tesisinde üretilen klinker örneklerinden bir ay süresince günlük numuneler alınarak Bogue formülüne göre mikro yapı fazları hesap edilmiştir. Her entegre çimento fabrikasının kullandığı ham maddeye, yakıtı ve çalışma proses şartlarına göre klinker alit (C₃S) hedefleri değişmektedir. Fakat alit (C₃S) değeri= 62±2 olarak belirlenen çimento üretim tesisinde gerçekleşen klinker üretiminin hedeften ne kadar uzak ve sürekli dalgalanmaların olduğu görülmektedir. Bu dalgalanmalar C₂S, C₃A ve C₄AF klinker fazları

bir aylık klinker üretimi süresince düzenli olarak alınan günlük klinker örneklerinin 90 mikron incelik ve 2, 7 ve 28 günlük dayanım sonuçları Şekil 3’te gösterilmiştir.

Şekil 3’e göre gerek incelik ve gerekse dayanım sonuçlarına göre değerlerde bir istikrarsızlık fakat aynı zamanda da incelik ve çimento dayanımlarında bir yükseliş söz konusudur. Şekil 3’e göre bazı ilerleyen günlerde dayanımlar artarken bazı günler de ise dayanımlar azalmaktadır. İki günlük dayanımlar TS 196-1’e



Şekil 3. Bir aylık endüstriyel incelik ve dayanım sonuçları

için de geçerlidir. Yine aynı üretim tesisine ait

göre standartları karşılamış fakat çok dalgalı düzensiz bir üretim gerçekleştirilmiştir. Aynı

durum 7 ve 28 günlük dayanımlar içinde geçerlidir. Şekil 3'te dikkat çeken diğer bir husus klinker mikro yapı fazlarının istikrarsız olmasına karşın 90 mikron elek üstü bakiyesi düşmüş ve incelik arttığı için dayanımlar olumlu yönde etkilenmiş 2, 7 ve 28 günlük dayanımlar düzensiz de olsa artarak ilerlemiştir. Şekil 3'te mikro fazlar her ne kadar düzensiz gelişmiş olsa bile inceliğin çimento dayanımları üzerinde ne kadar etkili olduğu görülmüştür.

Her çimento fabrikasında mevcutta bulunan kendi ham maddelerini kullanarak aynı çimento üretim prosesine göre fakat farklı proses şartlarında klinker üretilmektedir. Çimento üretiminde ham madde olarak kalker, kil, demir cevheri, boksit ve silis kumu kullanılmaktadır. Fakat her bir ham madde bulunduğu bölgeye, jeolojisine, topoğrafyasına ve iklim şartlarına göre farklı kimyasal içeriklere sahip olması nedeniyle hedeflenen klinkeri üretmek için farklı içeriklere sahip ham maddelerin kullanılması ve maksimum homojen bir karışım elde edilmek istenmesi proses şartlarını değiştirmekte bu da klinker üretim koşullarını ve üretim kalitesini ve maliyetlerini fabrikadan fabrikaya değiştirmektedir. Bundan dolayı her bir fabrika kendi ham maddesi ve üretim şartlarına göre bir kalite hedefi koymakta ve minimum sapmayla bu hedefi gerçekleştirmek istemektedirler. Farklı tesislere

ait klinker hedefleri ve gerçekleşme durumları Tablo 2'de verilmiştir.

Çimento fabrikasında bir aylık klinker üretimi sonucunda gün içerisinde 24 saatlik üretim süresinde rastgele alınan örneklerin kimyasal analiz sonuçlarına bakılarak Bogue formülüne göre C₃S, C₂S ve C₃A ve C₄AF klinker fazları hesap edilerek 90 mikron elek bakiyeleri hesaplanıp klinker fazları ile incelik ilişkileri Şekil 4'te gösterilmiştir.

Şekil 4'te bir aylık süre boyunca gün bazında klinker örneklerinin incelik değerlerinin değiştiği ve stabil olmadığı görülmektedir. Özellikle incelik ve C₃S ilişkisi kurulacak C₃S arttıkça inceliğin de arttığı yani daha ince bir çimento üretildiği görülmektedir. İncelik 60-66 C₃S arasında 1.6-1.3'e kadar düşmüş ve son olarak ta 66 C₃S 'te inceliğin maksimum seviyede artarak 1,2'ye kadar düştüğü görülmektedir. Şekil 4'ten görüleceği gibi klinker üretiminde klinker fazlarına yeterince dikkat edilmediği yapılan istikrarsız üretimden açıkça görülmektedir.

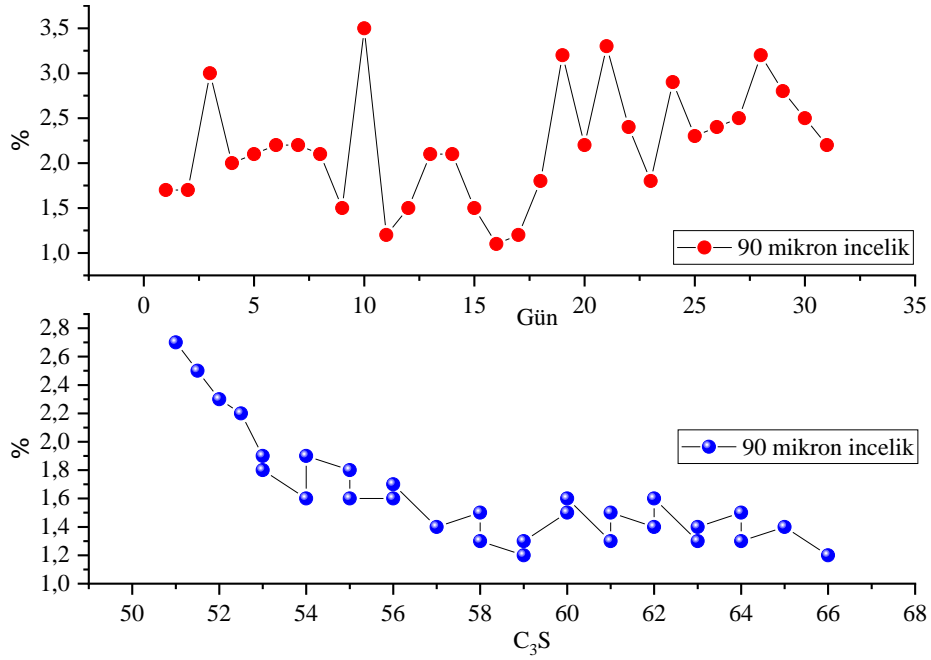
DeneySEL çalışmaların yapıldığı tesiste üretilen klinkerlerden farklı zamanlarda farklı mikro yapılara ait klinkerlerden aynı öğütme süresinde C₃S ile dayanım ilişkileri incelenmiştir. Şekil 5'ten de görüleceği üzere C₃S miktarı arttıkça dayanımların da ciddi oranlar da attığı görülmüştür

Tablo 2. Çimento tesislerinin klinker C₃S hedefleri ve gerçekleşme durumu

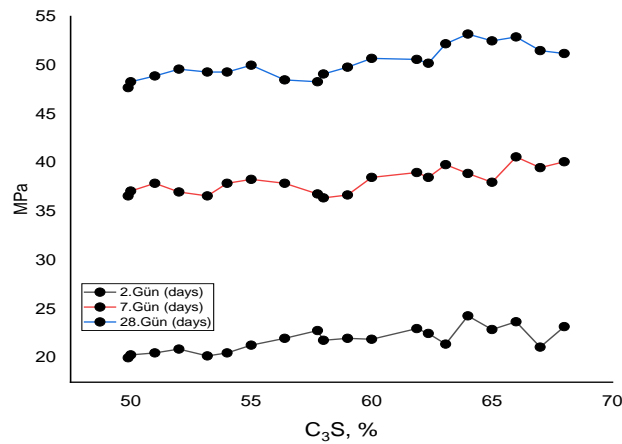
Tesis Kodu	Hedef C ₃ S	Gerçekleşen	C ₂ S
A	60-62	60	13-14
B	62-63	62	13-15
C	62-63	63	13-16
D	63-65	63	13-17

Farklı zamanlarda üretilen ve farklı C₂S fazlarına sahip klinker örneklerinin mikro fazları ile incelik ve basınç dayanımı değerleri karşılaştırılmıştır. Basınç dayanım değerlerinin C₂S in artmasıyla birlikte iki günlük dayanımın azaldığı, yirmi sekiz günlük basınç dayanımının

ise iki günlük erken dayanıma göre daha fazla azalmanın olduğu görülmüştür. Yedi günlük basınç dayanımının ise C₂S artışından daha az etkilendiği, C₂S artması ile incelik değerlerinin



Şekil 4. Klinker fazları ile incelik ilişkisi



Şekil 5. Bir aylık klinker üretimine ait incelik değerleri (90 mikrometre).

de azaldığı bunun neticesinde de daha ince çimentoya ulaşabilmek için öğütme enerjisinin artacağı görülmektedir.

Burada asıl odaklanması gereken husus düzenli bir kalitede çimento üretimini gerçekleştirilmesi ve optimum incelik ve dayanımlarının belirlenmesidir. Çimento incelik hedeflerine ulaşmak için çoğu çimento üreticisi değirmene fazla görev yüklemekte (ekstra bilya şarjı, değirmenin normal tonajın altında ve seperatörün yüksek devirde çalıştırılması vb.) ve bu da öğütme enerjisinin artmasına yol açmaktadır. Klinker mineralojisi çimento servis özelliklerini, özellikle basınç dayanımlarını tahmin etmeye yardımcı olabilmektedir. Ancak bu mikro yapısal parametrelerin mukavemet üzerindeki birleşik etkisi dikkate alınmalıdır, aksi takdirde bu parametreler basınç dayanımına karşı ayrı olarak değerlendirildiği takdirde korelasyon düşük olabilmektedir. Çimento servis özelliklerinde birkaç faktörün birlikte farklı roller oynayabileceği açıktır [Altun, 1999; Felekoglu vd., 2005]

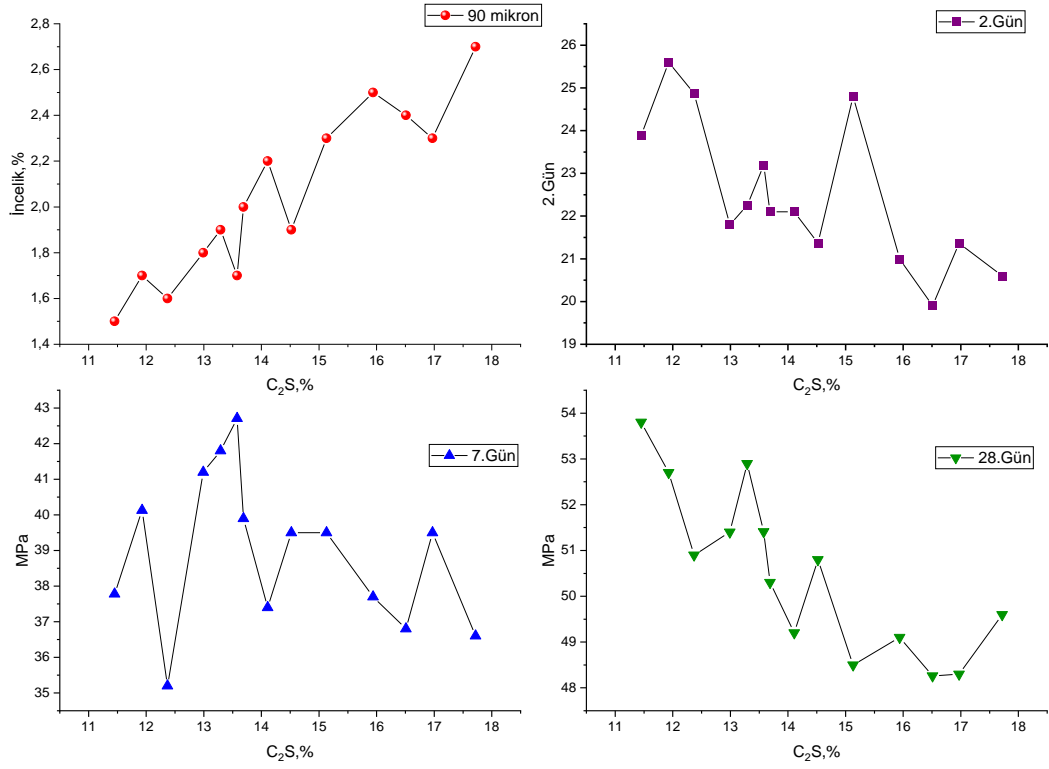
Türkiye’de çimento üretimi yapan fabrikaların üretim hedefleri ve çimento üretimi sonucu oluşan klinker mikro yapılarındaki C₃S oranlarının ağırlıkça %55-65 arasında olduğu görülmüştür [Manias vd., 2001]. Bu nedenle % 55-60 arasında C₃S içeren klinkerlere A; %55-60 C₃S içeren klinkerlere B klinker kodu verilmiştir. Öncelikle A klinkeri bilyalı laboratuvar değirmeninde 35 dk, 36 dk ve 50 dk’ya kadar öğütülmüş ve her bir dakika aralığı için basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir.

A Klinkerinin öğütme süresi arttıkça iki günlük ve 28 günlük dayanımın da arttığı görülmektedir. 50 dakika öğütme sonunda 2 günlük

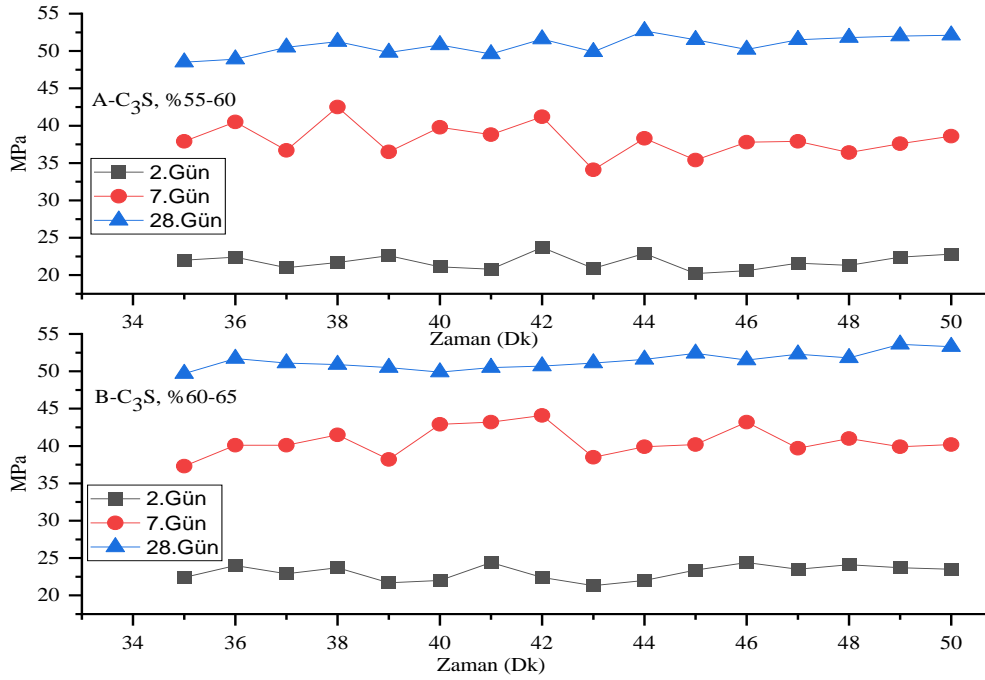
dayanımın %5 arttığı, 28 günlük dayanımın ise %10.3 arttığı görülmektedir. B Klinkerinin öğütme süresi arttıkça 2 günlük ve 28 günlük dayanımın da arttığı görülmektedir. 50 dakika öğütme sonunda 2 günlük dayanımın %4.46 arttığı, 28 günlük dayanımın ise %1.74 arttığı görülmektedir. Buradan hareketle Farklı C₃S’lerin farklı öğütme süreleri sonucunda %55-60 C₃S içeriğinde 28 günlük dayanımlarda maksimum artış görülürken (%10.3), A ve B klinkerlerinde yani %50-55, %60-65 C₃S te 2 günlük dayanımlarda benzer düzeyde artış (%4.46 ve %5) gözlenmiştir.

A ve B klinkerlerinin öğütme süreleri arttıkça iki günlük ve 28 günlük dayanımlarının da azaldığı görülmektedir. A klinkerinin 50 dk öğütme sonunda iki günlük dayanımın %17 azaldığı, 28 günlük dayanımın ise %3.6 azaldığı görülmektedir. 50 dk öğütme sonunda iki günlük dayanımın %14 azaldığı, yirmi sekiz günlük dayanımın ise %3 azaldığı görülmektedir. Buradan hareketle Farklı C₂S’lerin 50 dk öğütme süreleri sonucunda A klinkerinde %5 C₂S artması iki günlük dayanımda %3 azalmaya neden olduğu; 28 günlük dayanımlarda ise %0.6 azalmaya neden olduğu görülmüştür.

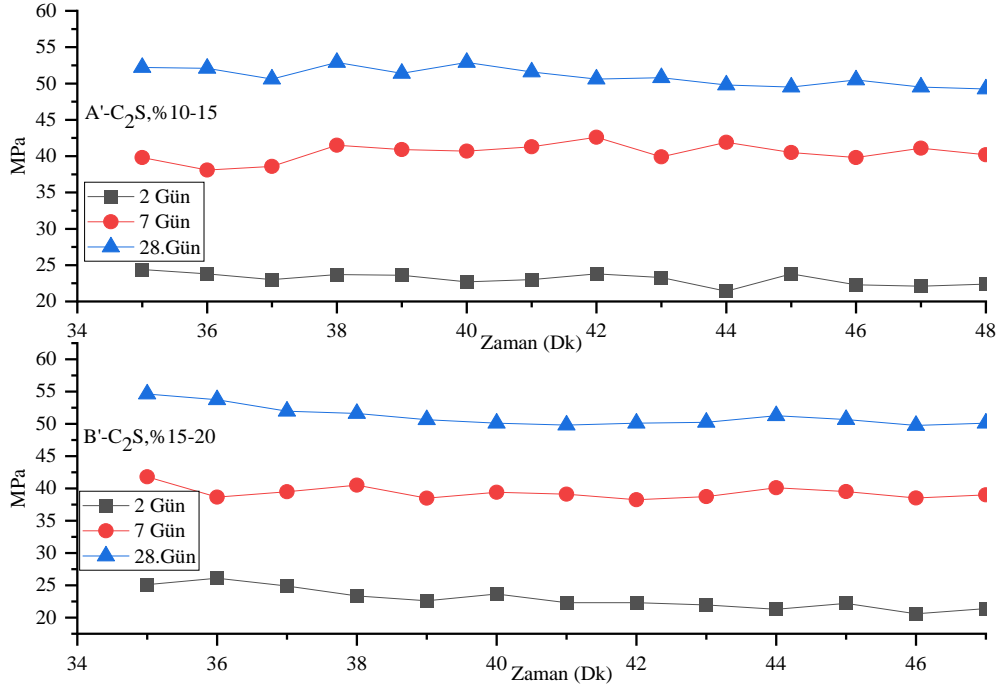
Yine C₃S içeriği 60 ve 65 olarak tespit edilen klinkerler farklı öğütme sürelerinde öğütülmüş ve dayanımları incelenmiştir. C₃S içeriği 60 ve 65 olarak sabit tutulmuş ve her bir numune için belirlenen öğütme sürelerinde öğütme işlemi tamamlanmıştır. 65 C₃S’e sahip olan klinker örnekleri 60 C₃S’e sahip olan klinkerlerden gerek 2 gün ve gerekse 28 günlük dayanımlarda daha yüksek sonuçlar vermiştir. Yukarıda bahsedilen dayanım sonuçları Şekil 6, Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9 ile verilmiştir.



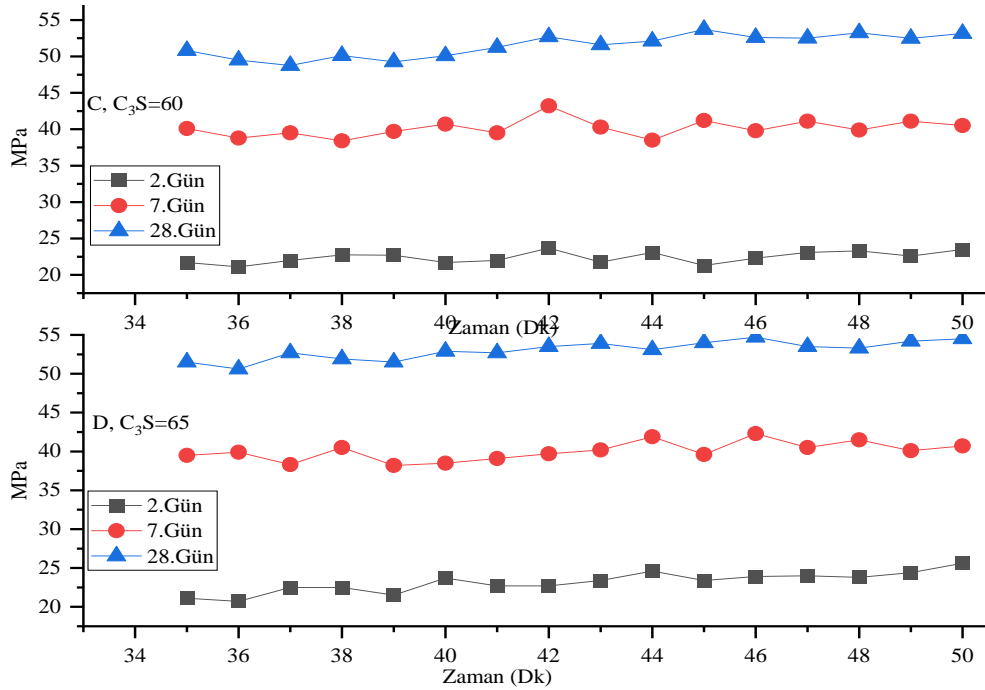
Şekil 6. C_2S , incelik ve basınç dayanım ilişkisi.



Şekil 7. A-B Kodlu Klinkerlerin Farklı Öğütme Sürelerinde dayanımları ilişkisi.



Şekil 8. A ve B Kodlu Klinkerlerin Farklı Öğütme Sürelerinde dayanımları ilişkisi.



Şekil 9. Klinker fazlarının (C₃S=60, C₃S=65) Öğütme ve çimento performansına etkisi.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Klinker bünyesinde alit (C_3S) miktarının fazla olması çimento dayanımlarını arttırdığı ve klinker bünyesinde yüksek belit (C_2S) bulunması çimento dayanımlarını azalttığını gerek önceki çalışmalardan ve gerekse yapılan bu çalışmanın sonuçları ortaya koymaktadır. Yine endüstriyel deneme çalışmasının yapıldığı üretim tesisi ve diğer tesislerin ürettiği klinkerlerin mikro yapı fazları incelendiğinde fabrikaların saatlik ve günlük klinker üretimleri incelendiğinde klinker fazlarının çimento performansına etkilerinin dikkate alınmadığı ve bu nedenle klinker kalitesinde istikrarsızlıkların ve sapmaların minimize edilmediği sonucuna varılmıştır. Yüksek alit içeriğine sahip bir klinkerin alit içeriği düşük bir klinkere göre daha kolay öğütüldüğü sonucuna bu çalışma ile endüstriyel boyutta da tespit edilmiş olup kaldı ki daha önceki laboratuvar ölçekte yapılan çalışmaların sonuçları da bunu desteklemiştir.

Üretim tesisinden alınan klinker örnekleri üzerinde %60 C_3S 'e kadar inceliklerin hızlı artış gösterdiği ve %60 C_3S 'ten sonra yine inceliğin artmaya devam ettiği fakat daha kararlı ve stabil bir şekilde seyrettiği görülmüştür. Endüstriyel boyutta üretilen klinkerlerin ise incelik değerlerinin günlük değiştiği ve standart sapmalarının yüksek olduğu ve bunun çimento dayanımlarına da yansıdığı görülmüştür. En düşük incelik %50-54 C_3S arasında %2.9 en yüksek incelik ise %66 C_3S 'te %1.2 olarak kaydedilmiştir.

Klinker alit içeriğinin %55-60 (A) den %60-65 (B)'e yükselmesi iki günlük çimento dayanımlarını ortalama %5 arttırdığı, Fakat %60-65 C_3S içeriğine sahip klinkerin %55-60 C_3S içeriğine

sahip klinkerin yirmi sekiz günlük dayanımlarını %10 daha fazla arttırdığı görülmüştür. Klinker bünyesinde %5 C_2S artması iki günlük dayanımda %3 azalmaya neden olduğu; 28 günlük dayanımlarda ise %0.6 azalmaya neden olduğu görülmüştür.

Aynı C_3S içeriğine sahip ($C_3S=60$) bir klinkerin 35 dk, 36dk ve 50 dk. sürelerinde öğütülmesi sonucu 2 günlük çimento dayanımlarını %3.84 attırırken, 28 günlük çimento dayanımlarını %9.09 arttırmıştır. Aynı C_3S içeriğine sahip ($C_3S=65$) bir klinkerin 35 dk, 36 dk ve 50 dk. sürelerinde öğütülmesi sonucu iki günlük çimento dayanımlarını % 18.18 attırırken, yirmi sekiz günlük çimento dayanımlarını %7.84 arttırmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı (Research and Publication Ethics Statement)

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKLAR

Alsop, P.A., Chen, H., Chin-Fatt, A.L., Jackura, A.J., McCabe, M.I., and Tseng, H.H., (2005), The cement plant operations handbook, 4th ed.: International Cement Review, *Tradeship Publications Ltd.* UK, P:257

Altun, A., ve Ölmez, N., (2001), Çimento klinkerinin öğütülebilirliği ve iç yapısı üzerine karşılaştırmalı araştırmalar, *Cevher Hazırlama Dergisi*, S: 1-5.

Altun, S., 1999, Çimento üretim teknolojisi, *Bitirme projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi*

Altwair, N. M., Johari, M. M., and Hashim, S. F. S., (2014), Influence of treated palm oil fuel ash on compressive properties and chloride resistance of engineered cementitious composites. *Materials and structures*, V: 47(4), P: 667-682.

Astoveza, J., Trauchessec, R., Soth, R., & Pontikes, Y., (2021), Properties of calcium aluminate blended cement incorporating iron-rich slag: Evolution over a curing period of 1 year. *Construction and Building Materials*, 282, 122569.

Brueggemann, H., & Brentrup, L. (1990). Relationship between cement strength and the chemico-mineralogical parameters of the clinker. Beziehungen zwischen der Zementfestigkeit und chemisch-mineralogischen Parametern des Klinkers. *ZKG (Zement-Kalk-Gips) International; (Germany, FR)*, V:43(1), P:30-33.

Bullerjahn, F., Schmitt, D., and Haha, M. B., (2014), Effect of raw mix design and of clinking process on the formation and mineralogical composition of (ternesite) belite calcium sulphoaluminate ferrite clinker, *Cement and Concrete Research*, V:59, p:87-95.

Cetmeli, M., (2017), Çimento sektöründe X ışınları kırınımı ve Rietveld yöntemi, <https://prezi.com/gf2tcdemsdbg/rietveld-uygulamalar/>, [Erişim tarihi: 31.11.2017].

Çimsa, (2021), Çimento kalite kontrol parametreleri ve beton üzerindeki etkileri, <https://www.cimsa.com.tr/cal/docs/4FE58AA58E3A4B7B85FA9E4EE011A8/F36E64383F844B33BA6595F24D191855.pdf> [Erişim tarihi: 17 Ocak 2017].

Felekoglu, B., & Güllü, D., (2006), Klinker incelemelerinde optik mikroskop ve görüntü işleme tekniklerinin kullanılması, *İMO Teknik Dergi*, V:3761(3770), Yazı: 247.

Felekoglu, B., Tosun, K., ve Altun, A., (2005), Farklı klinkerler için porozite yapısı ve silikat fazlarının optik mikroskop ve görüntü işleme teknikleri kullanarak karşılaştırılması. *Çimento ve Beton Dünyası*, 54-567.

Güllü, D., (2006), Çimento klinker fazlarının mikro yapısı ve öğütme parametreleri arasındaki ilişkilerin araştırılması, *Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Kang, R., Xing, T., Ma, S., Min, H., Zhou, H., Shen, X., and Sun, J., (2021), The effect of gaseous SO₂ secondary sintering on the cement composition and crystal structure, *Construction and Building Materials*, 285, 122872, P:1-11

Korkmaz, A., (2012), Klinker ana komponentlerin öğütme ve çimento dayanımları üzerindeki etkilerinin araştırılması, *Yüksek lisans, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Korkmaz, A., V., (2020), Hammadde ve klinker öğütülebilirliklerinin çimento üretiminde enerji tüketimine etkisinin araştırılması, *Bilimsel Madencilik Dergisi*, V: 59(3), P:169-181.

Külekçi, G., (2021), The Effect of Pozzolans and Mineral Wastes on Alkali-silica Reaction in Recycled Aggregated Mortar. *Periodica Polytechnica Civil Engineering.*, V: 65(3), P: 741-750.

Kulpa, M., Howiacki, T., Wiater, A., Siwowski, T., and Sierko, R., (2021), Strain and displacement measurement based on distributed fibre optic sensing (DFOS) system integrated with FRP composite sandwich panel, *Measurement*, 175, 109099.

Manias C., Madsen I.C., and Retallack D., (2001), Plant optimisation and control using continuous on-line xrd for mineral phase analysis, *ZKG International*, V: 54(3), P: 138-145.

Nahi, S., Leklou, N., Khelidj, A., Oudjit, MN ve Zenati, A., (2020), Geri dönüştürülmüş yeşil cam tozu içeren çimento macunlarının ve harçların özellikleri. *İnşaat ve Yapı Malzemeleri*, 262, 120875.

Tsakiridis, P. E., Oustadakis, P., and Agatzini-Leonardou, S., (2014), Black dross leached residue: an alternative raw material for portland cement clinker, *Waste and Biomass Valorization*, V: 5(6), p:973-983.

Wang, S. L., & Baaj, H., (2021), Impact of supplementary cementitious materials on the hydration and strength properties of hydraulic road binders, *Road Materials and Pavement Design*, P:1-26.

Wilson, W., (2013), Grinding of cement clinkers: linking multi-scale fracture properties to system chemistry, mineralogy and microstructure, *Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology*, P:172.

Young, G., & Yang, M., (2019), Preparation and characterization of portland cement clinker from iron ore tailings, *Construction and Building Materials*, V:197, p:152-156.

Zhao, S., Jensen, OM, Hasholt, MT ve Guan, X., (2021), Çimento hamurlarında süper emici polimerin emme kapasitesi: sağlık testi. *Malzemeler ve Yapılar*, V:54(1), P: 1-15.