



TÜRKCİMENTO

ÇİMENTO

“geçmişten geleceğe inovatif yapı malzemesi”

TÜRKCİMENTO
2021

Hazırlayanlar:

Serkan Türk
Yasin Engin

Bu kitabın yayın ve dağıtım hakkı TÜRKÇİMENTO'ya aittir. Tamamı veya herhangi bir bölümü TÜRKÇİMENTO'nun yazılı izni olmadan fotokopi dahil mekanik ve elektronik ortamda transfer edilemez, çoğaltılamaz ve dağıtılamaz.



İÇİNDEKİLER

ÇİMENTO TARİHİ	1
TÜRK ÇİMENTO TARİHİ	7
PORTLAND ÇİMENTOSU	9
HAM MADDELER	9
KLİNKER ÜRETİMİ	10
KLİNKERİN KİMYASAL YAPISI	12
KLİNKERDEN ÇİMENTOYA	14
ÇİMENTO FABRİKALARI	16
HİDRATASYON REAKSİYONU VE PRİZ	17
ÇİMENTO PİYASADA	19
ÇİMENTO ÇEŞİTLERİ	19
ÇİMENTONUN KODLAMASI	22
KATKILI ÇİMENTOLAR	23
YENİLİKÇİ (NOVEL) ÇİMENTOLAR	24
ÇİMENTO HAMURU, HARCİ VE BETONU	25
PORTLAND ÇİMENTOSUNUN KULLANIM ALANLARI	25
ÇİMENTO VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK	26
DÖNGÜSEL EKONOMİYE KATKI	27

ÇİMENTO TARİHİ

Çimento, farklı özellikler ve isimlerle insanlık tarihinin çok eski dönemlerinden beri var olan ve günümüze kadar gelişimini devam ettiren bir yapı malzemesidir. Çimento, Latince “caementum” kelimesinden türemiştir ve yontulmuş taş kırıntısı anlamına gelmektedir. Ancak, zamanla “bağlayıcı-birleştirici” anlamında kullanılmıştır. Bu anlamda “cement” kelimesi 1300'lü yıllarda önce Fransa'da, 1400'lü yıllarda ise “cement” kelimesi İngiltere'de kullanılmaya başlanmıştır.

Çimento sözcüğünün kökeni olan “caementum”u ilk defa Romalı mimar ve mühendis Marcus Vitruvius Pollio (M.Ö. 1. yüzyıl) “De Architectura” adlı eserinde kullanmıştır. Bu eserinde Vitruvius, toz halinde bulunan ve yapıların inşasında kullanılan bir malzemeden bahsetmiştir. 10 ciltlik bu kitapta puzolan ve kireç karışımlarının hidrolik özelliklerinden bahsedilmiş, nehir ve deniz kıyısında yapılacak olan yapılarda kullanılabilecek harç için karışım oranı (2 birim puzolan, 1 birim kireç) bile verilmiştir.



Resim 1. Vitruvius' De Architectura

Çimento tarihini bağlayıcı malzemelerin ilk kullanımından itibaren başlatmak gerekir, çünkü yüzlerce yıllık deneyim ve birikim günümüzde kullandığımız Portland çimentosunun keşfedilmesine yol açmıştır.

Kirecin bağlayıcı özelliğinin insanlık tarihinin erken dönemlerinde keşfedildiği söylenebilir. Eski Mısır, Kıbrıs, Girit ve Mezopotamya'nın değişik yörelerinde kirecin bir yapı malzemesi olarak kullanılmasına ait örneklerle rastlanılmıştır. Eski Yunanlılar ve Romalılar kireci hidrolik bağlayıcı olarak kullanmışlardır.

Çimento sadece yapılar için harç görevi yapmamış, ayrıca tarihsel süreçte medeniyetlerin de harcı olmuştur. Göbeklitepe'deki bilinen en eski tapınak, Mısır'daki devasa piramitler, 10 bin km'yi bulan Çin Seddi, 43 metrelik kubbesi ile zamanının şartlarını zorlayan Pantheon Tapınağı (Roma) ve Mimar Sinan'ın baş döndürücü eserleri ait oldukları medeniyetlerin gelişmişliğini gösteren en önemli izlerdir. İşte tüm bu yapılarda bağlayıcı malzemelere rastlanmaktadır.



Resim 2. Göbeklitepe, Şanlıurfa, M.Ö. -10.000



Resim 3. Pantheon Tapınağı, Roma, M.S. 2. yüzyıl

İnsanoğlunun tarih boyunca değişmeyen ihtiyaçlarından birisi kendisini dış etkilerden koruyacak bir ev olmuştur. İlk zamanlarda bu ihtiyaç doğadan kolayca temin edilen taş, toprak, ahşap ve bitkiler ile karşılanmıştır. Bu amaçla kullanılan ilk malzeme taş olmuştur. İnsanlık tarihinin ilk dönemlerinde mağaralarda yaşandığı bilinmektedir. Mağara girişini kapamak için kullanılan bir kaya parçası belki de ilk yapı elemanı olmuştur. Çeşitli alet ve silahların yapımı için de taş kullanılmıştır.

Buzulların eriyip kutuplara çekilmesi ile mağaralardan çıkan insanlar yeni oluşan alanlara yerleşmiş veya göçebe olarak yaşamıştır. Ev yapımı için kullanılan malzemeler iklim, bitki örtüsü ve coğrafyaya bağlı olarak değişkenlik göstermiştir.

Ormanların bol olduğu Orta ve Kuzey Avrupa'da önce çamurla birleştirilmiş dal parçaları sonra da odunlardan yapılmış kulübeler kullanılmıştır. Duvarlarda ve çatıda toprak ve çamurdan oluşan tabakalar hem bağlayıcı hem de yalıtım malzemesi olarak hizmet vermiştir.

Avrupa'nın güneyinde, Akdeniz civarında ise ormanlar seyrekler. Ayrıca, insanlar o kadar fazla ahşap kullanmışlardır ki M.Ö. 8000'li yıllara gelindiğinde bölgede ormanların çoğu tükenmiştir. Diğer taraftan bölgede son derece elverişli taşlar bulunuyordu. Dolayısıyla yapılar da tekrar taş kullanılmasına dönmüştür. Halk basit, kuru veya çamur harçlı taş duvarlardan oluşan kulübelerde yaşarken en güzel ve dayanıklı kayalar yontularak görkemli yapıların inşasında kullanılmıştır. Eski Mısır'ın piramitleri, Mezopotamya'daki yüksek kuleler ve daha sonraları eski Roma ve Yunan tapınakları örnek olarak verilebilir.

Yüksek bölgelerde ve kurak yörelerde ağaç olmadığı gibi işe yarayacak taş da bulunmayabiliyordu. Bu gibi yerlerde yapı malzemesi olarak su ile karıştırıldığında plastik kıvamlı, kurduğunda şeklini koruyan ve sertleşen killi topraklar kum ile de karıştırılarak kullanılmıştır. M.Ö. 6700 yılında inşa edilen Çatalhöyük'teki evlerin duvarları kurutulmuş kil bloklarla yapılmıştır. Blokların aynı boyutlarda oluşu düzenli bir üretim sistemi bulunduğunu, içlerindeki saman parçaları da kilde çatlamaları azaltma yönteminin daha o zamanlardan bilindiğini göstermektedir. Zamanının en büyük şehri Babil de benzer duvar elemanları ile inşa edilmiştir.



Resim 4. Çatalhöyük Antik Kenti

Fırat nehri kıyılarındaki yaşayanlar M.Ö. 3000 tarihlerinde, belki de tesadüfen veya düşen bir yıldırımın çıkardığı yangın sonucu, pişmiş kilin çok daha fazla sertlik ve dayanım kazandığını keşfetmiştir. Bu sağlam ve dayanıklı malzeme basit fırınlarda pişirilerek yörede kullanılmıştır. Kral Nabukadnezar M.Ö. 600 yılında yazdırdığı bir kitabede pişmiş kil bloklarından İstar şehriden Fırat kıyılarına kadar uzanan surlar yaptırdığını kaydetmiştir.

ÇİMENTO



Resim 5. Babil surlarının yapılışını anlatan çivi yazılı silindir

Duvar bloklarını birleştirmekte kullanılan ilk bağlayıcı malzemeler olarak alçı ve kireçten söz edilir. Eski Mısır piramitlerinde hangisinin daha fazla kullanıldığı zaman zaman tartışma konusu olmuştur. Alçı taşının 190-200°C'de pişirilmesi ile alçı elde edilirken hava kirecinin kalkerden daha yüksek (900°C) sıcaklıklarda elde edilişi belki de alçının daha önce kullanılmaya başlandığını kanıtlar. Her iki bağlayıcının da suya karşı dirençsiz oluşu ve hava kirecinin su içinde sertleşmemesi, kullanımlarını ve dayanıklılıklarını kısıtlayan faktörlerdi.

Eski Romalılar hava kirecini Vezüv Yanardağı eteklerindeki Pozzuoli kasabası civarındaki volkanik tüflerle birlikte ince öğüterek daha yüksek dayanımlı ve suya karşı dirençli bir bağlayıcı elde etmiştir. Eski Yunanlılar ise Santorini Adası'ndaki volkanik tüfleri kireçle karıştırarak veya killi kireç taşından elde ettikleri bir tür hidrolik kireçle harç yapmışlardır.



Resim 6. Vezüv Yanardağı

Kendi başlarına bağlayıcı olmasalar da kireçle birleştiklerinde suda sertleşebilen ve suya dirençli yani "hidrolik" bir bağlayıcı oluşturan bu tür malzemeler de "puzolan" (Pozzuoli'den gelen) olarak anılmaya başlamıştır. O çağlarda kireç ve puzolan karışımı bağlayıcılarla yapılan birçok yapı günümüze kadar ayakta kalmıştır.

Anadolu'da ise Hitit kentlerinde; özellikle Çorum, Tokat ve Malatya illerindeki antik kentlerde magneziyen kireç ile karıştırılmış puzolanik aktif doğal malzemelerin harç yapımında kullanıldığı görülmüştür.

Horasan'daki Türkler, volkanik tüflerin oluşturduğu kalkerli ve killi toprağı kireçle karıştırarak harç yapmışlardır. Bu tip benzer harçlar; Romalılarda occiopesto, Mısırlılarda homra, Hintlilerde ise surki adıyla bilinmektedir. Sönmüş kirece Horasan harcı katılarak, su kirecinden de daha sağlam bir karışım elde edilmiştir.

Orta Çağlarda bağlayıcı malzeme teknolojisi fazla gelişme göstermemiştir. Volkanik tüfler her yerde bulunmuyordu ve pişirme sıcaklıklarına özen gösterilmediğinden yüksek dayanımlara ulaşılamıyordu.

1750 yılında Cornwall, İngiltere'de Eddystone Deniz Feneri binasının yapımını üstlenen John Smeaton çeşitli kalker, kil ve alçı bileşimleri kullanarak elde ettiği su kireçlerinin deniz suyuna karşı dirençlerini puzolan da katarak inceledikten sonra en uygun ham maddeleri belirleyip, su kirecinin özelliklerini geliştirmiştir. Daha sonraki gelişme ise 1780'lerde Joseph Parker tarafından "Roma Çimentosu" (Roman Cement) adı verilen bağlayıcının elde edilmesiyle olmuştur. Bu tür çalışmalar Fransa'da Louis Vicat tarafından devam etmiştir. Killi kalkerlerin 1200°C sıcaklığa kadar pişirilmesi ile daha yüksek dayanımlı bir su kirecinin elde edilmesi ve mineral katkılarla priz sürelerinin ayarlanması mümkün olmuştur. Tabii (doğal) çimento olarak da anılan bu bağlayıcı malzeme çeşitli ülkelerde Portland çimentosu üretimi başladıktan sonra da uzun süre kullanılmıştır.

1824 yılında İngiltere'nin Leeds kentinde, Joseph Aspdin isimli bir duvarcı ustası hazırladığı ince taneli kil ve kalker karışımını pişirerek ve daha sonra öğütürerek bağlayıcı bir ürün elde etmiştir. Bu ürüne su ve kum katıldığında ve zamanla sertleşme olduğunda, ortaya çıkan malzemenin İngiltere'nin Portland adasından elde edilen yapı taşlarını andırdığını gören Joseph Aspdin, elde ettiği bu bağlayıcı için 21.10.1824 tarihinde "Portland Çimentosu" adı altında 5022 nolu patenti almıştır. Bu bağlayıcı daha sonraki yıllarda büyük gelişmeler gösterse de "Portland" ismi aynen korunmuştur.



A.D. 1824 N° 5022.

Artificial Stone.

ASPDIN'S SPECIFICATION.

TO ALL TO WHOM THESE PRESENTS SHALL COME, I, JOSEPH ASPDIN, of Leeds, in the County of York, Bricklayer, send greeting.

WHEREAS His present most Excellent Majesty King George the Fourth, by His Letters Patent under the Great Seal of Great Britain, bearing date at Westminster, the Twenty-first day of October, in the fifth year of His reign, did, for Himself, His heirs and successors, give and grant unto me, the said Joseph Aspdin, His especial licence, that I, the said Joseph Aspdin, my exors, adfiors, and assigns, should at any time agree with, and no others, from time to time and at all times during the term of years therein expressed, should and lawfully might make, use, exercise, and vend, within England, Wales, and the Town of Berwick-upon-Tweed, my Invention of "AN IMPROVEMENT IN THE MANNER OF PRODUCING AN ARTIFICIAL STONE," in which said Letters Patent there is contained a proviso obliging me, the said Joseph Aspdin, by an instrument in writing under my hand and seal, particularly to describe and ascertain the nature of my said Invention, and in what manner the same is to be performed, and to cause the same to be enrolled in His Majesty's High Court of Chancery within two calendar months next and immediately after the date of the said in part recited Letters Patent (as in and by the same), reference being thereunto had, will more fully and at large appear.

NOW KNOW YE, that in compliance with the said proviso, I, the said Joseph Aspdin, do hereby declare the nature of my said Invention, and the manner in which the same is to be performed, are particularly described and ascertained in the following description thereof (that is to say) :-

2

A.D. 1824.—N° 5022.

Aspdin's Improvements in the Manner of Producing an Artificial Stone.

My method of making a cement or artificial stone for stuccoing buildings, waterworks, cisterns, or any other purpose to which it may be applicable (and which I call Portland cement) is as follows:—I take a specific quantity of limestone, such as that generally used for making or repairing roads, and I take it from the roads after it is reduced to a puddle or powder; but if I cannot procure a sufficient quantity of the above from the roads, I obtain the limestone itself, and I cause the puddle or powder, or the limestone, as the case may be, to be calcined. I then take a specific quantity of argillaceous earth or clay, and mix them with water to a state approaching impalpability, either by manual labour or machinery. After this proceeding I put the above mixture into a slip pan for evaporation, either by the heat of the sun or by submitting it to the action of fire or steam conveyed in flues or pipes under or near the pan till the water is entirely evaporated. Then I break the said mixture into suitable lumps, and calcine them in a furnace similar to a lime kiln till the carbonic acid is entirely expelled. The mixture so calcined is to be ground, beat, or rolled to a fine powder, and is then in a fit state for making cement or artificial stone. This powder is to be mixed with a sufficient quantity of water to bring it into the consistency of mortar, and thus applied to the purposes wanted.

In witness whereof, I, the said Joseph Aspdin, have hereunto set my hand and seal, this Fifteenth day of December, in the year of our Lord One thousand eight hundred and twenty-four.

JOSEPH (s.s.) ASPDIN.

AND BE IT REMEMBERED, that on the Fifteenth day of December, in the year of our Lord 1824, the aforesaid Joseph Aspdin came before our Lord the King in His Chancery, and acknowledged the Specification aforesaid, and all and every thing therein contained and specified, in form above written. And also the Specification aforesaid was stamped according to the tenor of the Statute made for that purpose.

Enrolled the Eighteenth day of December, in the year of our Lord One thousand eight hundred and twenty-four.

LONDON:
Printed by GEORGE EDWARD EYRE and WILLIAM SPOTTISWOODE,
Printers to the Queen's most Excellent Majesty. 1827.

Resim 7. Joseph Aspdin'e ait Portland çimentosu patenti

ÇİMENTO

Aslında Joseph Aspdin tarafından üretilen çimento, üretim sırasında yeterince yüksek sıcaklıklarda pişirilmediği için bugünkü Portland çimentosunun özelliklerine tamamen sahip olamamıştır. Yine de İngiltere Kirkgate İstasyonu'nun yanındaki halen ayakta olan "Wakefield Arms" binasının Joseph Aspdin'in tasarladığı çimento ile yapıldığı belirlenmiştir.



Resim 8. Wakefield Arms binası

Ham maddelerin yüksek sıcaklıklara kadar pişirilip öğütülmesi 1845 yılında Isaac Johnson isimli bir İngiliz tarafından gerçekleştirilmiştir.

Dünyada ilk çimento fabrikası İngiltere'de 1848 yılında kurulmuştur. İlk çimento standardı 1860 yılında Almanya'da yayımlanmıştır.

Benzer ve daha gelişmiş çimentolar 19.yüzyıl içerisinde diğer ülkelerde de üretilmiştir. Temelde ham madde ve üretim prensipleri aynı olan bütün bu çimentolar da Portland türü çimentolar olarak anılmışlardır. Bugün dünyada kullanılan hidrolik çimentoların büyük çoğunluğu Portland türündendir.

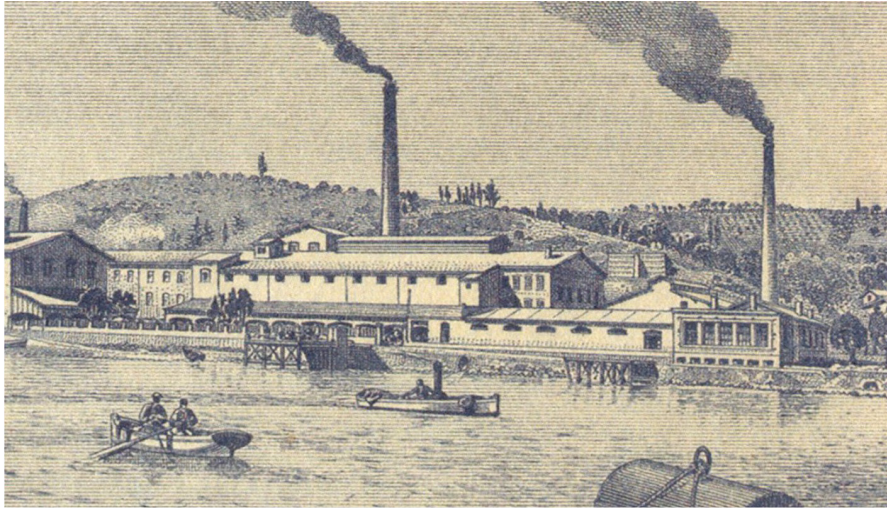
Klasik ham maddelere ve doğal puzolanlara ilaveten 19. yüzyılın sonlarına doğru yüksek fırın cürufu kullanılmaya başlanmıştır. Uçucu kül ve silis dumanı gibi diğer endüstriyel yan ürünlere ilaveten çeşitli minerallerin ve sonraları bazı kimyasal katkıların kullanımı 20. yüzyılda artış göstermiştir. Üretimde başlangıçta kullanılan düşey fırınların yerini 1886'dan itibaren döner fırınlar almaya başlamıştır. Konu ile ilgilenen Thomas Edison da döner fırınların gelişmesine katkıda bulunmuştur. Bugünün çimento fabrikaları yüksek düzeyde elektronik otomasyonla çalışmakta olup, enerji tasarrufu sağlayan ve çevreye duyarlı ileri teknolojilere sahiptir. Üretilen çimentoların kaliteleri de ilk zamanlarla kıyaslanamayacak kadar yükselmiştir.

Günümüze kadar geçen süre içinde Portland çimentosu, özellik ve üretim prosesleri yönünden sürekli gelişim göstermiştir.

TÜRK ÇİMENTO TARİHİ

Dünyada çimento üretim ve satışına 1878 yılında başlanmasına rağmen, Türkiye'nin çimento sektörü ile tanışması ise esas olarak 1912 yılında özel sektör girişimi ile olmuştur. 34 yıl geç başlanması su kireci üretiminin yeterli olmamasından ve bu yılların Osmanlı İmparatorluğu'nun çöküş dönemlerine rastlamasından kaynaklanmaktadır.

Türkiye'de 1912 yılında Aslan Osmanlı Anonim Şirketi'ne ait Darıca Fabrikası ile Eskişehir Portland Çimento ve Su Kireci Osmanlı Anonim Şirketi'ne ait Eskişehir Fabrikası işletmeye alınmıştır.



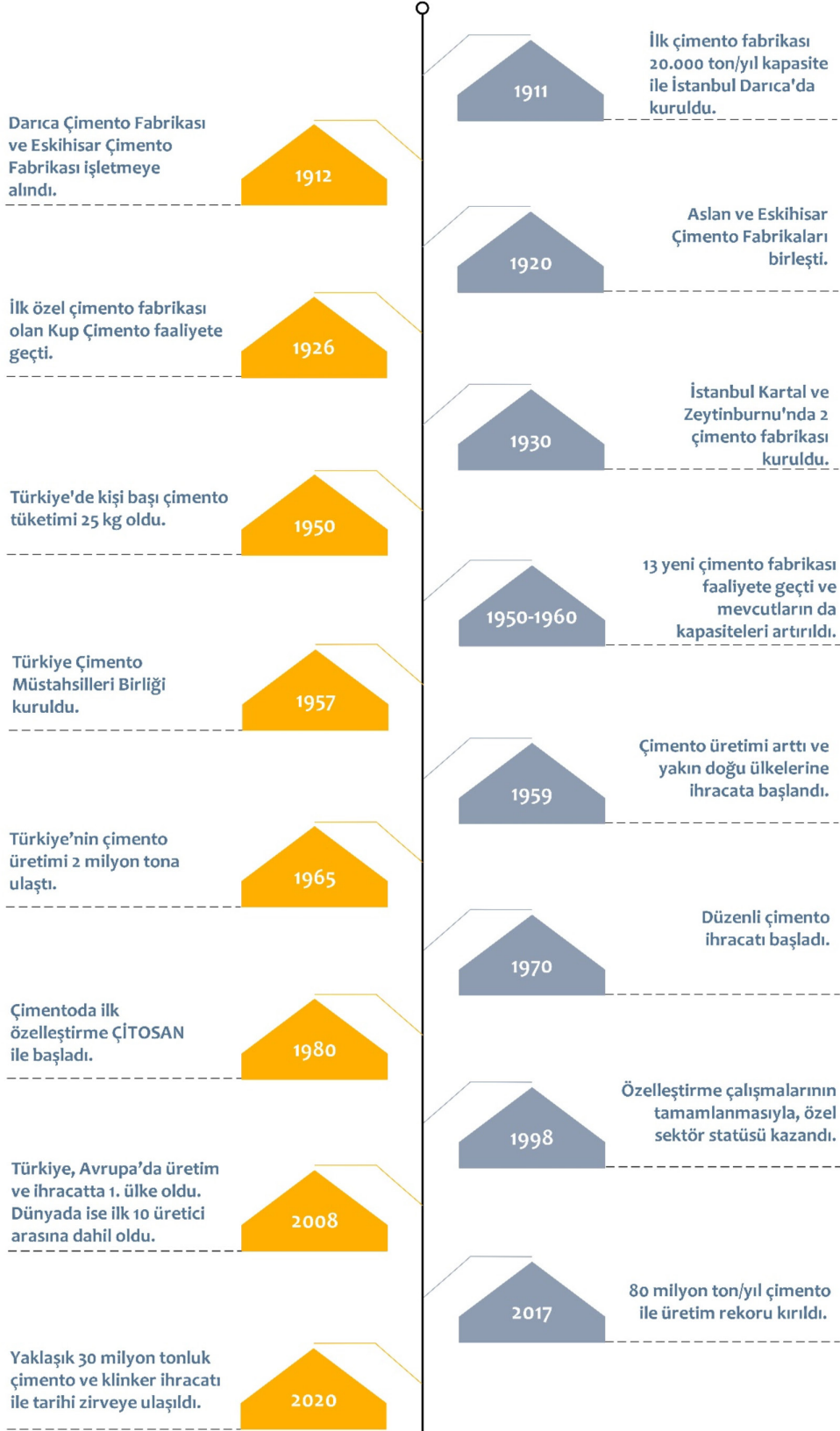
Resim 9. Eskişehir Çimento Fabrikası'nın 1920'lerdeki görünümü

Biri yaş diğeri kuru sistem olarak kurulan bu fabrikalarda 100- 150 ton/ gün ve 60-70 ton/ gün kapasiteli iki fırın bulunmaktaydı. Darıca Fabrikası FLSmidt firması tarafından, Eskişehir Fabrikası ise bir Alman firması tarafından tesis edilmiştir. Su kireci pazarının yanı sıra çimento da büyük talep oluşmuş ve her iki fabrika işletmeye alınmalarından sonra kapasite arttırmıştır.

Aynı yıllar içerisinde ülkemizde 60 bin ton su kireci üretilmekte olup, 1930- 1931 yılına kadar su kireci üretimi çimento üretiminin üstünde olmuştur.

Ülkenin çimento ihtiyacını karşılayan bu fabrikalar büyük miktarlarda ithalat yapıldığı 1920 yılına kadar kötü ve yıpratıcı bir iç piyasa rekabetine girmişlerdir. Bu devrede çimento sektörüne devlet müdahalesi söz konusu olmadığından çimento fiyatları oldukça düşmüştür. Yıpratıcı rekabete dayanamayan bu iki fabrika 1920 yılında "Aslan ve Eskişehir Müttehit Çimento Fabrikaları A.Ş." adı altında birleşerek ithal çimento karşısında birlikte harekete geçmişlerdir.

TÜRKİYE ÇİMENTO SEKTÖRÜNÜN GELİŞİMİ



PORTLAND ÇİMENTOSU

Portland çimentosu standardın tarifiyle; su ile karıştırıldığında hidrasyon reaksiyonları sonucunda priz alarak sertleşen bir hamur oluşturan ve sertleşme sonrası suyun altında bile dayanımını ve kararlılığını koruyan, inorganik ve ince öğütülmüş hidrolik bir bağlayıcıdır.

Hidrasyon, çimento ile su arasında gerçekleşen karmaşık bir kimyasal reaksiyondur. Hidrasyon sonucu sertleşmiş rijit yapıda bir malzeme meydana gelir. Bir başka deyimle "insan yapımı taş" oluşur.

Çimento üretiminde ham madde olarak kalker, kil veya marn kullanılmaktadır. Bunların yanında demir oksit miktarını düzenlemek amacı ile demir cevheri veya pirit külü; silisyum dioksit miktarını düzenlemek amacıyla yüksek silisli kum, alüminyum oksit miktarını düzenlemek amacıyla ise boksit ham madde karışımının bir bileşeni olarak kullanılabilir. Ham maddeler belirli oranlarda harmanlanıp öğütülürler. Farin olarak adlandırılan ham madde karışımı döner fırında yaklaşık 1450°C sıcaklığa kadar pişirilir. Fırının çıkış ucuna doğru farin taneleri önce ergiyerek ve sonra çeşitli reaksiyonlar sonucu granüle halde klinker adı verilen toprakları meydana getirirler. Portland çimentosu elde etmek için klinkerin az bir miktar kalsiyum sülfat (alçı taşı) ile birlikte öğütülmesi gerekir.



Şekil 1. Klinker (soldaki) ve çimento (sağdaki)

HAM MADDELER

Ocaklardan elde edilen ham maddeler kırıcılardan genellikle iki aşamada geçirilerek tane boyları küçültülür. Ham madde karışımı farin, etkin bir şekilde ısıtılıp kalsine edilebilmesi için önce öğütülür. Öğütme işlemi dikey değirmenlerde veya yatay bilyalı değirmenlerde gerçekleştirilir.

Belirli oranlarda farklı ham maddelerin karışımından oluşan farinin ana bileşenleri kireç ve silistir. Bunları alümin ve demir oksit takip eder. Daha az miktarlarda magnezyum ve alkali oksitler gibi diğer maddeler de bulunur.

Kireç (CaO), kalker veya marn gibi kalsiyum karbonat içeren kayalardan ortama girer. Silis (SiO₂) için ise başlıca kaynak kildir. Alümin (Al₂O₃) ve demir oksit (Fe₂O₃) de genellikle kilden elde edilirler veya ilaveten farklı kaynaklardan temin edilirler.

Portland çimentosunun oluşumu ve su ile hidrasyonu karmaşık kimyasal reaksiyonlar içerdiğinden ifadeleri kısaltmak için Tablo 1'de belirtilen çimento kimyasına özgü kısaltmalar kullanılır.

ÇİMENTO

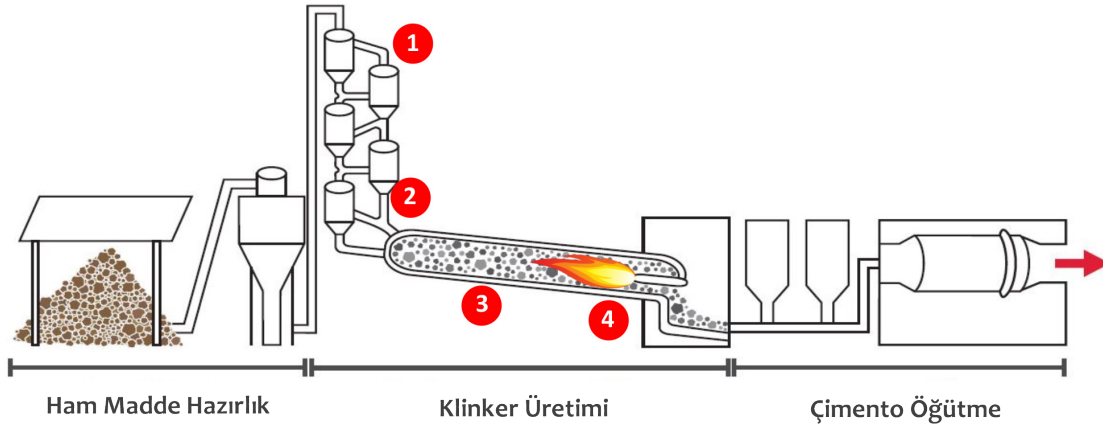
Tablo 1. Çimento kimyasında kullanılan kısaltmalara

Bileşen	Kısaltma
CaO	C
SiO ₂	S
Al ₂ O ₃	A
Fe ₂ O ₃	F
H ₂ O	H

Farin fırında pişerken bu oksitler önce serbest hale gelirler ve sonra sıcaklık yükseldikçe aralarında yeni bileşikler oluştururlar. Burada kireç miktarının yeterli olması ve ham maddelerin gereken oranlarda birleştirilmesi önem kazanır. Bu amaçla farin bileşimi bazı formüllerle kontrol edilir, ayrıca laboratuvar ölçeğinde sürekli kalite ve kontrol testlerine tabi tutulur.

KLİNKER ÜRETİMİ

Çimento üretiminin en önemli aşaması farinin pişirilmesidir. Çimento fabrikalarına karakteristik görünümü veren kuleler ve döner fırın bu aşamada kullanılırlar. Şekil 2'deki numara sırası takip edilerek proses aşağıdaki gibi özetlenebilir:



Şekil 2. Çimento üretim süreci

1. Çimento fabrikalarında farin, enerji tasarrufu amacı ile fırına girmeden önce bir ön ısıtmaya tabi tutulur. Yükseklikleri 60 metreyi geçen ön ısıtma kulelerinde seri halindeki siklonlarda farin taneleri fırından gelen sıcak egzoz gazları içinde savrulurarak ısınırlar ve kısmen kalsine olurlar.

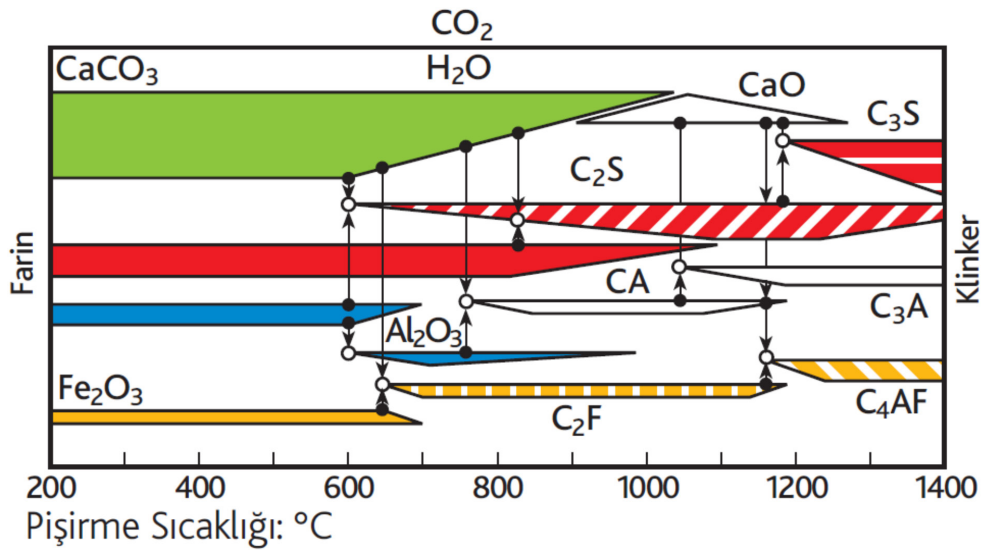
2. Bazı ön ısıtıcılarda kulenin altında ve döner fırından hemen önce bir ön kalsinasyon ünitesi bulunur. Son siklon aşamasında, buraya sıcak hava ve yakıtla birlikte giren farin tanelerinde kalsinasyon %95'e varan ölçüde tamamlanabilir. Kalsinasyon, oksit bileşenleri elde etmek amacıyla sıcaklığın etkisiyle karbonat ve hidratların parçalanmasıdır.

3. Döner fırın dünyada endüstri tesislerinde bulunan en büyük proses elemanı olarak kabul edilir. Çapı 3-7 m, uzunluğu 50-75 m kadar olup 50 mm kalınlığında çelik saçtan yapılmış, refrakter tuğla astarlı dev bir borudur. Yaklaşık %3-4 eğimli olarak monte edilen fırın, dakikada 1,5-4 devir yaparak döner. Ön ısıtıcıdan gelen malzeme fırına yukarı uçtan girer ve fırınla beraber dönerek, yuvarlanarak ve kayarak daha sıcak bölgelere, alt uçtaki aleve doğru ilerler. Bu arada geri kalan CO_2 de malzemeden ayrılır ve ileride özetlenecek bir dizi kimyasal reaksiyon meydana gelmeye başlar.

4. Döner fırının alt ucunda petrokok, linyit, taş kömürü, doğal gaz, fuel oil gibi yakıtların yakılması ile oluşturulan alevin çıktığı boru bulunur. Alev borusundan çıkan beyaz kor halindeki alevin sıcaklığı $1870^{\circ}C$ değerine yani güneş yüzeyindeki sıcaklığın üçte birine ulaşır. Bu en sıcak bölgede, sıcaklığı $1480^{\circ}C$ 'ye varan kalsine malzeme kısmen ergiyip sıvılaşmaya başlar ve ince taneler birbirlerine yapışıp daha büyük boydaki klinker tanelerini oluştururlar. Fırının alt ucundan çıkan klinker soğutma işlemine tabi tutulur.

Döner fırında çimento ham maddeleri içindeki kireç, silis ve alümin sıcaklık arttıkça önce serbest hale gelirler, sonra da kendi aralarında birleşip yeni bileşikler meydana getirirler. Ön ısıtmada ve fırının en üst bölgesinde malzemedeki serbest ve kristal sular buharlaşır, kil ayrışır ve CO_2 kalkerden ayrılmaya başlar. Aşağıya doğru, daha sıcak bölgelerde kalsinasyon tamamlanır, serbest kalan CaO kilden ayrılan SiO_2 ve Al_2O_3 ile birleşerek kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminatları meydana getirir.

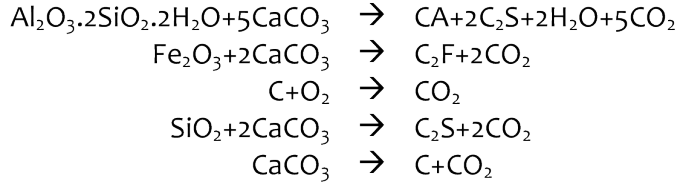
Farinden klinkere geçişte çimento ham maddelerindeki mineral faz değişimleri Şekil 3'te gösterilmiş olup başlıca reaksiyonlar özetlenmiştir.



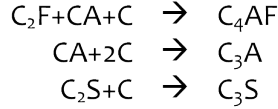
Şekil 3. Sıcaklığa göre klinker fazlarının oluşumu

ÇİMENTO

650 – 1050 °C



1250 – 1450 °C



KLİNKERİN KİMYASAL YAPISI

Tipik bir Portland çimentosu klinkerinde bileşimin %90'ından fazlasını karma oksit formundaki dört ana bileşen oluşturur. Bu bileşenlerin kimyasal formülleri ve kısaltmaları Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Klinker yapısından bulunan karma oksitler

Silikatlar		Alüminatlar	
$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$
Trikalsiyum silikat (C_3S)	Dikalsiyum silikat (C_2S)	Trikalsiyum alüminat (C_3A)	Tetrakalsiyum alüminoferrit (C_4AF)

Tablo 3'te belirtildiği gibi bu dört ana bileşen gerek su ile reaksiyon hızları ve çıkardıkları ısı miktarları, gerekse çimentonun bağlayıcılık değerine katkıları yönlerinden birbirlerinden farklı karakter gösterirler.

C₃S: Priz süresini, erken ve nihai dayanımı etkiler. Yüksek bağlayıcılık özelliği ilk yaşlardan itibaren etkilidir. C₃S yüzdesi arttıkça çimentonun ilk yaşlardaki dayanımı daha yüksek olur. Su ile reaksiyon hızı orta, açığa çıkardığı ısı yüksek seviyededir.

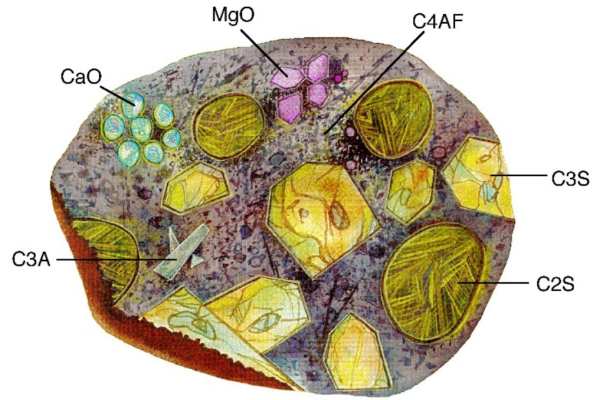
C₂S: Su ile reaksiyonu yavaştır, az miktarda ısı açığa çıkarır. Yüksek olan bağlayıcılık özelliği kendini ileri yaşlarda gösterir.

C₃A: Reaksiyonda ilk çözünen bileşendir. Su ile çok hızlı reaksiyona girip çok fazla ısı açığa çıkarır, çimento hamurunun çok çabuk katılaşmasına neden olur. Klinkerin öğütülmesi sırasında katılan alçı taşı C₃A'nın hidratasyon hızını yavaşlatır. Bağlayıcılık değeri azdır. Sülfatların yıpratıcı etkilerine karşı çimentonun direncini zayıflatır. C₃A yüzdesi düşük çimentolar özellikle sülfat tuzları içeren ortamlara karşı dayanıklıdır.

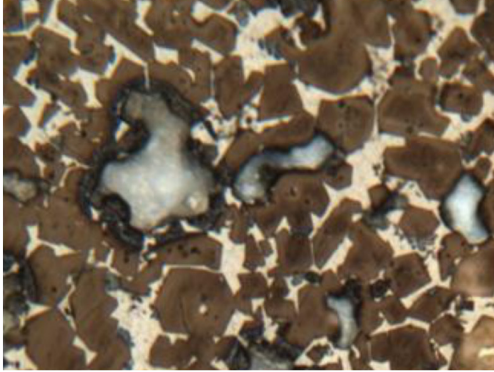
C₄AF: Su ile reaksiyon hızı düşük olup bağlayıcılık değeri azdır. Çimentoya rengini veren bileşendir.

Tablo 3. Klinker fazlarının özellikleri

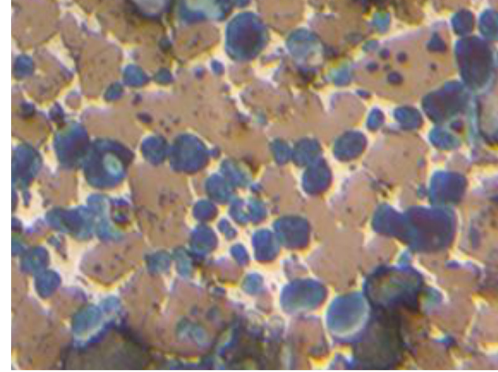
Özellik	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Reaksiyon hızı	Orta	Yavaş	Hızlı	Yavaş
Hidratasyon ısı	Yüksek	Düşük	Çok Yüksek	Orta
Erken Dayanım	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük
Geç Dayanım	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük



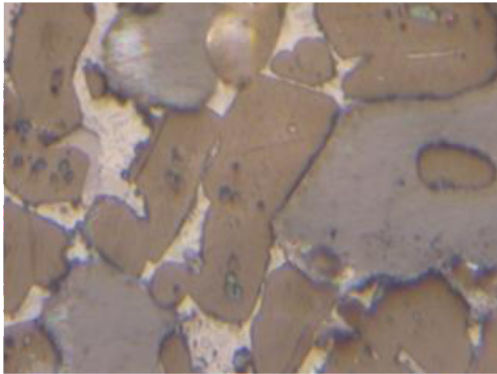
Şekil 4. Klinker fazları illüstrasyonu



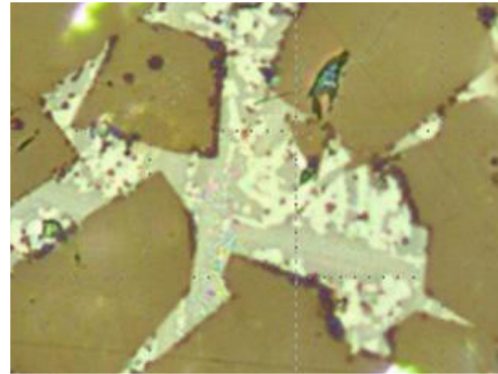
Kahverengi altıgen şekilli alit (C₃S) kristalleri



Mavi renkli dairesel belit (C₂S) kristalleri



Kübik yapıli alüminat (C₃A) kristalleri



Ortorombik yapıli alüminat (C₃A) kristalleri

Şekil 5. Klinker fazlarının mikroskop görüntüleri

ÇİMENTO

Belirli oranlarda kalker ve kil ile farin oluşturulurken bu dört ana bileşenin göreceli miktarlarını değiştirmek ve yeni bir ham madde veya katkı kullanmadan elde edilecek çimentoya bazı özellikler kazandırmak mümkün olmaktadır. Örneğin; C_3S miktarını yükselterek erken dayanımı yüksek çimento, C_3A miktarını azaltarak sülfatlara dayanıklı çimento, C_2S miktarını arttırıp C_3S ve C_3A 'yı azaltarak düşük hidratasyon ısıli çimento üretmek mümkün olur.

Klinker bileşiminin geri kalan küçük (%10 civarındaki) bölümünde serbest CaO, MgO ile alkali oksitler ve SO_3 bulunur. Çimentolu ürünlerde hacimsel genişleme ve çatlamalara yol açma riskinden dolayı bu oksitlerin miktarları sınırlandırılır.

Portland çimentosunun kimyasal bileşenlerinin yaklaşık oranları Tablo 4'te belirtilmiştir.

Tablo 4. Portland çimentosunun kimyasal bileşenlerinin yaklaşık oranları

Oksitler	Yaklaşık Oran (%)
CaO	60 - 67
SiO ₂	17 - 25
Al ₂ O ₃	3 - 8
Fe ₂ O ₃	0,5 - 6
SO ₃	1 - 3
MgO	0,1 - 4
Alkaliler	0,2 - 1,3

KLİNKERDEN ÇİMENTOYA

Klinker döner fırından yaklaşık 1300°C'de çıkar. Bu aşamada klinkerin soğutulması ve ortamdaki ısının kazanılması işlemleri ele alınır.

Üretimin diğer aşamalarına geçmeden önce klinkerin soğutulması gerekir. Burada en sık kullanılan yöntem ızgara plakalar üzerinde yavaşça ilerleyen klinker tanelerine basınçlı dış hava verilmesidir. Klinker iç yapısını etkileyeceği için soğutma hızının kontrollü olması gerekir.

Ortamdaki kazanılan ısı enerjisi klinker üretimi için gerekli olan miktarın üçte birine yakındır. Klinker soğutucusundan gelen sıcak hava tekrar fırının ısıtılmasında ve ön kalsinasyonda kullanılır. Artan sıcak havadan ham maddelerin kurutulması, sıcak su temini ve binaların ısıtılması gibi amaçlar için de yararlanır.

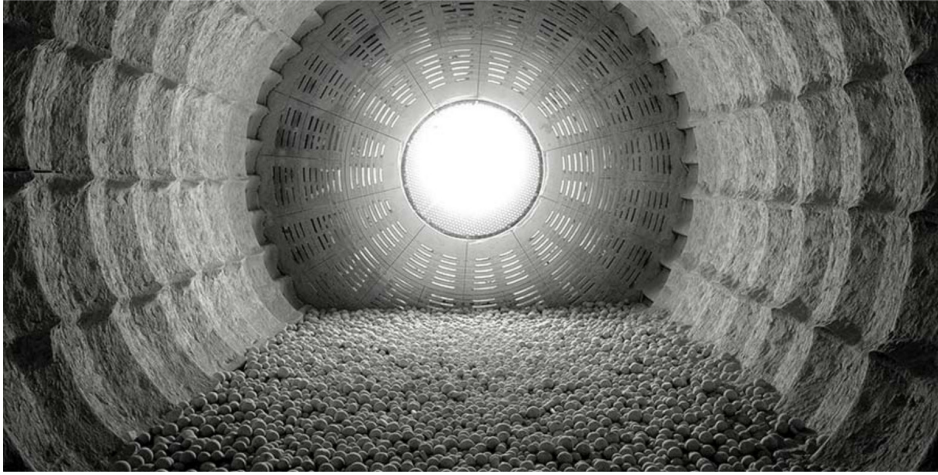
Çimento üretiminde kullanılan yeni nesil döner fırın sistemleri fırın girişi öncesinde kademeli ön ısıtıcılardan ve prekalsinatörden, fırın çıkışında da soğutucudan oluşmaktadır. Fırın ön ısıtmadan ve klinker soğutmadan baca yoluyla dışarıya atılan ısı gerçekte çok yararlı bir termal enerjidir ve elektriğe dönüştürülebilir özelliğine sahiptir. Söz konusu bu dönüşümü sağlayan ve atılan sıcak gazların elektrik üretiminde kullanılmasına imkân tanıyan sistemler atık ısı geri kazanımı tesisleri olarak tanımlanmaktadır. Her ne kadar Türkçeye "Atık Isı Geri Kazanımı" olarak çevrilse de ülkemizde ve dünyada yaygın olarak kullanıldığı şekliyle İngilizce "Waste Heat Recovery" kelimelerinin baş harflerinden oluşan kısaltılmış adıyla (WHR) anılmaktadır. Başta çimento sektörü olmak üzere demir-çelik,

cam sanayi ve jeotermal tesisler gibi yüksek sıcaklığın söz konusu olduğu proseslerde WHR kullanılarak, enerji maliyetleri düşürülmektedir. Bir çimento fabrikasının toplam elektrik ihtiyacının yaklaşık %25'ine kadarını karşılayabilen WHR tesisleri sayesinde enerji üretiminde fosil yakıt kullanılmadığı için sera gazı emisyonları da azaltılabilmektedir. Böylece, hem atık ısıdan elektrik üretilip ekonomik fayda temin edilebilmekte hem de çevre yönünden olumlu bir uygulama hayata geçirilebilmektedir.

Soğutucudan çıkan klinker ara-ürün olarak tanımlanır. Çimento, klinkerin bir miktar kalsiyum sülfat ile öğütülmesi sonucu elde edilir. Öğütme esnasında ya da ayrı bir şekilde ilave edilen mineral katkıları ile de katkılı çimento cinsleri üretilebilmektedir. Klinker kalsiyum sülfat ile doğrudan fabrikada öğütülebilir veya bu amaçla başka yerlerdeki öğütme tesislerine gönderilir, hatta yurt dışına ihraç edilebilir.

Yaklaşık 2 cm çapındaki klinker tanelerinin çimento tanesi inceliğine kadar öğütülmesi gerekir. Çimento tane boyutları genellikle 40 mikronun altında, ortalama 15-20 mikron (0,0015-0,0020 cm) olduğundan dolayı öğütme sonunda klinker tanesinin neredeyse binde bir oranında küçültülmüş olması gerekmektedir. Öğütme için dik valsli ya da bilyalı değirmenler kullanılmaktadır.

Yaklaşık 3 metre çapında çelik silindir şeklindeki bilyalı değirmenlerde hacimlerinin üçte birine kadar çelik bilyalarla doldurulmuş bölmeler bulunur. Silindir dönerken bilyalar klinker tanelerine çarparak onları ufalarlar. Son bölmede istenilen incelik elde edilmiş olur. Klinker doğrudan soğutucudan gelmişse hala 50-100°C arası sıcaklıktadır ve öğütme sırasında değirmen içine basınçlı su verilerek sıcaklığın artması önlenmiş olur.



Şekil 6. Bilyalı değirmen

Özellikle son yıllarda yapılan değirmen yatırımlarında; enerji verimliliği daha iyi olan “Dik Değirmen”, “Roller Pres” ve “Horomill” teknolojileri kullanılmaya başlanmıştır. Mevcut değirmenler ise yüksek verimli seperatörler kullanılarak kapalı öğütme sistemlerine dönüştürülerek enerji verimliliği arttırılmıştır.

ÇİMENTO

Klinkere öğütme sırasında ağırlıkça %3-5 arası kalsiyum sülfat (alçı) katılır. Bu işlem çimentonun su ile karıştırıldığında kimyasal reaksiyonların ve katılma sürecinin kontrolü bakımından zorunludur. Öğütmeyi kolaylaştırıcı ve performans arttırıcı bazı kimyasallar da bu aşamada klinkere katılmaktadır.

Bu şekilde elde edilen Portland çimentosuna klinker ile kalsiyum sülfatın öğütülmesi sırasında veya ayrıca öğütülmüş olarak bazı mineral katkıları katılarak farklı tiplerde çimentoların üretilmesi de giderek yaygınlaşan bir uygulamadır.



Çimento üretim videosunu izlemek için QR kodu okutunuz.

ÇİMENTO FABRİKALARI

Modern çimento fabrikaları ham madde girişinden çimento çıkışına kadarki tüm işlemlerde teknolojideki en son gelişmelerden yararlanırlar. Gerekli elektromekanik, elektronik ve uzaktan kumanda sistemlerini kullanarak üretimin randımanlı ve çevreye dost bir şekilde gerçekleşmesini sağlarlar. Özellikle enerji tasarrufu ve çevre kirlenmesini önlemek son yıllarda daha da önem kazanmıştır.

Malzeme bir işlem merkezinden diğerine tane boyu, sıcaklık ve rutubet durumuna göre mekanik veya pnömatik sistemlerle taşınır. Bu aşamalarda baca gazlarında ve stok silolarında oluşan tozlar çevre ve fabrika ekipmanı için zararlıdır. Çeşitli tiplerde filtrelerle bu tozların dağılmadan önce toplanmaları sağlanır. Torba filtreler ve elektrostatik toplayıcılar en sık kullanılan tiplerdir.

Fabrikaya enerji yüksek gerilim (30-140 kV) hatlarından alınır. Transformatörden geçerek (3-6 kV) değerine indirgenir ve fabrika içindeki dağıtım sistemi ile solenoid valfler, irili ufaklı motorlar ve büyük makinalardan oluşan cihazları çalıştırmak için 1000'den fazla çıkış noktasına ulaştırılır. Orta boy fabrikalarda toplam güç kullanımı 30.000 kW değerine yaklaşır.

Fabrikalarda bulunan merkezi kontrol odalarında üretim prosesi yaklaşık 2000 ayrı algılama ve kontrol noktasından elde edilen sıcaklık, basınç, gazlar ve hareketli parçalarla ilgili bilgiler vasıtası ile bilgisayar ekranlarından sürekli denetlenir. Bilgisayarlarda veya panolarda ham madde girişinden çimento çıkışına kadar silolar, kırıcılar, değirmenler ve döner fırın gibi fabrika bölümlerini gösteren ışıklı bir akış şeması bulunur. Döner fırının içi, soğutucu ve diğer kritik bölümler kapalı devre ekran ile izlenir. Prosesle ilgili bütün işlemlerin bilgisayar ile çok ayrıntılı kayıtları tutulur. Malzemenin birimler arasında akışı ve siloların doldurulması gibi işlemler otomatik olarak kontrol edilir. Sistemin herhangi bir noktasında oluşacak arıza anında belirlenerek gerekli önlemler alınır.

Üretim sürecinde kalite kontrol amacıyla temsili numuneler otomatik olarak alınıp fabrika laboratuvarına gönderilir. Çimento, endüstride en sıkı kalite kontrolü uygulanan ürünlerden birisidir.

Son yıllarda özellikle sanayi kuruluşları için birçok fırsat sunan Endüstri 4.0, çimento sektörü için de büyük önem taşımaktadır. Endüstri 4.0 ile üreticiler; nesnelerin interneti (IoT), bulut bilişim ve analitik, yapay zekâ (AI) ve makine öğrenmesi gibi teknolojileri üretim tesislerine ve tüm operasyonel süreçlerine entegre edebilmektedir. Bu akıllı fabrikalar, verileri toplayan, analiz eden ve daha iyi karar verme olanağı sağlayan sensörler,

gömülü yazılımlar ve robotiklerle donatılmaktadır. Bu teknoloji; otomasyonun artmasına, tahmine dayalı bakıma, süreç iyileştirmelerinin otomatik optimizasyonuna ve müşteriler açısından daha önce mümkün olmayan yeni bir verimlilik ve yanıt verme düzeyine olanak sağlamaktadır.

HİDRATASYON REAKSİYONU VE PRİZ

Çimento, su ile karıştığında “hidratasyon reaksiyonu” başlar ve kimyasal reaksiyonlar devam ederken hamurda “priz” denilen katılaşma süreci meydana gelir. Bir süre sonra da hamur tamamen sertleşir. Priz başlangıcına kadar hamur, harç veya beton taze haldedir yani plastiktir, kolayca şekillendirilmeleri ve kalıplanmaları mümkündür. Betonun karıştırılıp, taşınıp, kalıplara yerleştirilmesi ve sıkıştırılması da bu süre içinde tamamlanmaktadır.

Termodinamik yönden çimentodaki karma bileşikler fırında aldıkları ısı nedeniyle yüksek entropiye sahip olmaktadır. Su ile karşılaştıkları zaman bu gizli enerjiyi açığa çıkarırlar ve ekzotermik (ısı veren) reaksiyonlar ile hidrate olurlar. Çimentonun karma bileşiklerinin su ile ayrı ayrı kimyasal reaksiyona girdikleri varsayılmaktadır ve hidratasyon sonunda her ana bileşen tarafından değişik hidratasyon ürünleri oluşmaktadır.

Çimentonun su ile oluşturduğu kimyasal değişim süreci plastik çimento hamuru oluşumu ve bu hamurun zamanla sertleşip son biçimini alması, yani bağlayıcı maddelerin dayanım kazanması, aşağıda belirtilen üç olayın birbirini izlemesi sonucunda meydana gelmektedir. Bu evrede hidratasyon hidroliz tepkimelerinin ardından çözünme, kristalleşme ve oluşan yeni bileşenlerin yüzey etkin kuvvetlerle birbirine bağlanması ile son bulmaktadır.

- 1. Hidratasyon:** Çimentoyu oluşturan maddelerin su ile kimyasal reaksiyonu ile başlayan ve kimyasal tepkimelerin başladığı evredir.
- 2. Katılaşma (Priz):** Çimentonun su ile karışması sonucunda oluşan plastik formun katılaşmasıdır. Bu aşamada karışıma şekil verilebilmektedir.
- 3. Sertleşme:** Çimento ve su karışımı sertleşir, mekanik olarak dayanım kazanma meydana gelmektedir.

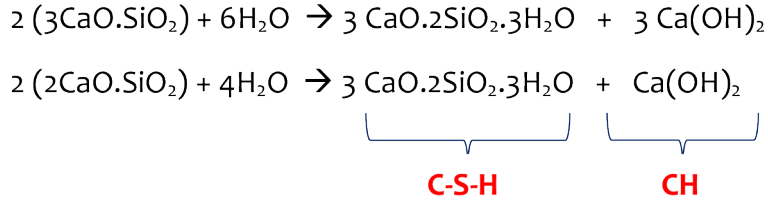
Hidratasyon sürecinin sonunda yüksek dayanıma sahip katılaşmış ürünler elde edilmektedir. Çimento hidratasyonunu etkileyen faktörler aşağıda sıralanmıştır:

- Çimentonun kimyasal kompozisyonu
- Çimentonun tipi
- Sülfat miktarı
- Çimentonun inceliği
- Çimentonun sıcaklığı
- Su/çimento oranı
- Kür sıcaklığı
- Katkı maddelerinin etkisi

C_3S ve C_2S bileşenlerinin suyla reaksiyonu sonucu 2 adet ürün oluşur:

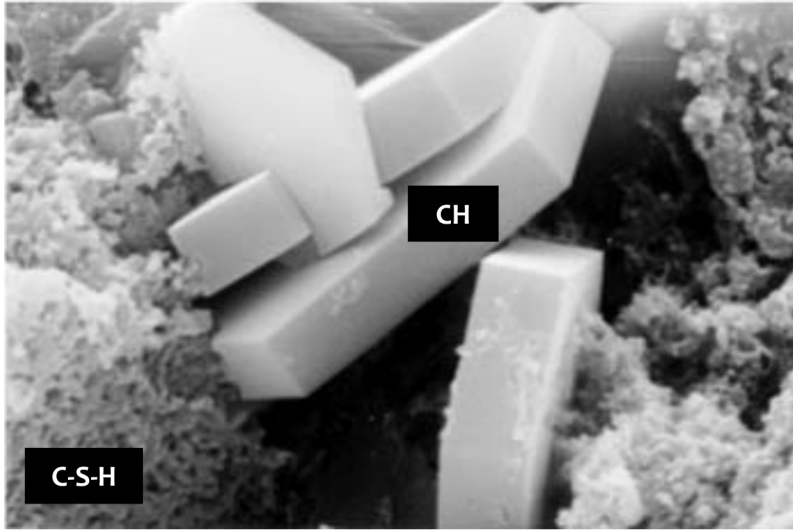
1. Kalsiyum silikat hidrat (C-S-H)
2. Kalsiyum hidroksit (CH)

ÇİMENTO



C-S-H jeli (kalsiyum silikat hidrat) çimentoya bağlayıcılık özeliğini kazandıran ve dayanım kazanmasını sağlayan üründür. Ürünün moleküler büyüklüğü yaklaşık çimento tanesinden 1000 kat daha küçüktür. Hidrate olan ürünlerin yaklaşık %60'ını oluşturur.

CH (kalsiyum hidroksit) dayanıma etkisi olmayan, ancak beton içindeki bazik yapıyı sağlayan üründür. Zayıf yapısı ve aderansı zayıflatıcı etkisi nedeniyle gerekenden fazlası istenmeyen bir üründür. Hidrate olan ürünlerin yaklaşık %20'sini oluşturur. Katkılı çimentolarla yapılan betonlarda CH oranı çok daha düşüktür. Şekil 7'de görüldüğü gibi CH düzgün altıgen şeklinde tabakalı bir yapıdadır. C-S-H'e oranla oldukça büyük boyutta olan CH genelde boşluklarda ve aderans (ara yüzey) bölgelerinde birikir.

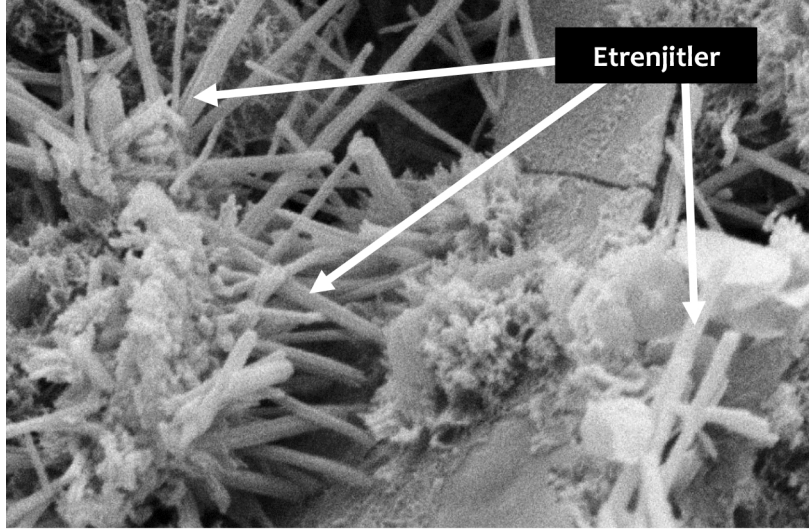


Şekil 7. Taramalı elektron mikroskobunda 10 bin kat büyütülmüş çimento hamuru içindeki CH kristalleri ve C-S-H jelleri

Diğer Ürünler

C_3A 'nın alçı ve suyla girdiği reaksiyon sonucu "etrenjit" adı verilen Şekil 8'de görüldüğü gibi iri kristallerden oluşan bir yapı meydana gelir. Etrenjitin çimento hamurunun dayanımı üzerine etkisi yoktur, ancak çimentonun prizinde etkilidir.

Alçı miktarı düşükse ya da C_3A oranı yüksekse, etrenjit kararsız bir hal alarak C_3A (trikalsiyum alüminat) ile tepkimeye girer ve monosülfat adı verilen benzer yapıda bir ürün oluşur. Monosülfat, sülfatlı ortama maruz kaldığında ters yönde bir tepkime ile etrenjit oluşumuna neden olur. Monosülfatın etrenjite dönüşmesi sonucu ürün hacmi yaklaşık 2,5 kat artarak betonun çatlamasına ve hasar görmesine neden olur. Bu nedenle, sülfatlı ortama maruz kalacak betonda klinkerdeki C_3A oranı sınırlandırılmıştır.



Şekil 8. Taramalı elektron mikroskobundan bakıldığında çimento hamurunda oluşan etrenjitler (AFT)

ÇİMENTO PİYASADA

Fabrikada veya öğütme tesisinde üretilen çimento silolarda depolanır ve iki şekilde piyasaya arz edilir:

Torbali çimento: Çimento, üç katlı özel kraft kâğıttan torbalara konular. Ülkemizde (ve diğer birçok ülkede) torbalar 25 kg veya 50 kg'dır.

Dökme çimento: Çimento silolardan doğrudan özel tankerlere (silobas) yüklenecek şekilde piyasaya sevk edilir.

Çimento torbalarının üzerinde ve dökme çimento sevk belgelerinde çimento ile ilgili olarak üreticinin ismi, çimento tipi ve sembolleri, standart numarası ve üretim tarihi gibi gerekli bilgiler yer alır.

Kullanım aşamasına kadar çimentonun havaya ve rutubete maruz kalmaması gerekir. Bu amaçla torbaların kapalı alanlarda ve bir platform üzerinde aralarında hava sirkülasyonu olacak şekilde istiflenmesi önerilir. Dökme çimento da bu amaçla yapılmış silolarda depolanır.

Usulüne uygun olarak depolanmış olsa bile yaklaşık üç aylık bir süreden sonra çimentonun bazı performans özellikleri değişmeye başlar. Bu tür çimentoların, gerekli standart testler yapıp ilgili teknik uzman görüşü alınmadan önce kullanılmaması gerekir.

TS EN 197-1 kapsamındaki herhangi bir çimento ürününün piyasaya sevk edilebilmesi için ürünün yetkilendirilmiş bağımsız bir kurumdan CE belgesi alması zorunludur. Çimento, piyasa gözetimi ve denetimi kapsamında denetlenen bir yapı malzemesidir.

ÇİMENTO ÇEŞİTLERİ

TS EN 197-1 Standardı, Avrupa'da ve ülkemizde genel çimentoları sınıflandıran ve özelliklerini belirleyen standarttır. Standart 27 farklı çimentonun ve bileşenlerinin tanımını ve özelliklerini kapsamaktadır. Ayrıca, 7 çeşit sülfata dayanıklı çimentoyu da içermektedir. Çimento cinsleri için 9 farklı dayanım sınıfı bulunmaktadır.

ÇİMENTO

Klinkerin sadece kalsiyum sülfat (alçı) ve ağırlıkça en fazla %0-5 arası mineral katkı (minör bileşen) ile öğütülmesiyle elde edilen çimentolara Portland çimentosu denir. Portland çimentosunda ham madde karışım oranları ayarlanarak, dört ana bileşenin göreceli miktarları ve dolayısıyla çimentonun bazı özellikleri istenilen yönde değiştirilebilmektedir. Örneğin, C_3A içeriğinin en fazla %5 olacak şekilde azaltılması ile “sülfatlara dayanıklı çimento” elde edilmiş olur. Çimentoda erken dayanım arttırılmak isteniyorsa, C_3S miktarının ve inceliğinin arttırılması yoluna gidilebilir.

Ham maddelerin özel olarak seçimi, beyaz kil ve bazı katkıları kullanılması ile çimentonun diğer özellikleri değiştirilmeden “beyaz çimento” elde edilmektedir.

Çimentolara %5'in üzerinde mineral katkı katılması sonucu elde edilen katkılı Portland çimentoları katkı türleri ve miktarlarına bağlı olarak çok çeşitlidir. Mineral katkıları klinker ve alçı ile birlikte öğütülürler veya ayrıca öğütüldükten sonra çimentoya katılabilirler. Bu amaçla kullanılan katkıları arasında doğal puzolan olan tras, kalker, endüstriyel yan ürün olan yüksek fırın cürufu ve uçucu kül sayılabilir. Son yıllarda çimentoya aynı zamanda birden fazla mineral katkı da katılabilmektedir.

TS EN 197-1 Standardında çimentonun içerisinde bulunan ve çimentonun ağırlıkça %5'ini aşan oranlarda kullanılan mineral katkıları ana bileşen olarak tanımlanmaktadır. Aynı şekilde çimentonun toplam kütlelerinin %5'ini geçmeyecek oranlarda kullanılan mineral katkıları ise minör bileşen olarak tanımlanmaktadır.

Mineral katkılı çimentolar daha ekonomik ve çevre dostudurlar. Çimento üretiminde kullanılan doğal ham maddelerden, yakıt ve elektrik enerjisinden tasarruf sağlarlar ve atık malzeme kullanımına imkân tanırırlar. İlaveten sülfatlara dayanıklılık gibi teknik avantajlara da sahip olmaları mümkündür.

TS EN 197-1 Standardına göre genel çimentolar beş ana tip olmak üzere aşağıdaki şekilde gruplandırılmıştır:

- CEM I - Portland çimentosu
- CEM II - Portland kompoze çimento
- CEM III - Yüksek fırın cürufu çimento
- CEM IV - Puzolanik çimento
- CEM V - Kompoze çimento

2021 yılında yayımlanan EN 197-5 Standardı ile “CEM VI - Kompoze çimento” ismiyle yeni bir ana tip çimento daha ilave olmuştur. Ayrıca, CEM II tipi çimentolarda daha az miktarda klinker kullanımının da önü açılmıştır.

TS EN 197-1 Standardı kapsamında olmayan çimentolar ise aşağıda belirtilmiştir:

- TS EN 14216 - Çok düşük ısılı çimento
- TS EN 15743 - Süper sülfat çimentoları
- TS EN 14647 - Kalsiyum alüminat çimentosu
- TS EN 413-1 - Harç çimentosu
- TS 13353 - Borlu aktif belit çimentosu
- TS 21 - Beyaz Portland çimentosu
- TS 1769 - Sorel çimentosu
- API SPEC 10A - Petrol kuyusu çimentosu

Ülkemiz çimento ihracatında dünyada ilk sıralarda yer almakta ve başta ABD olmak üzere ASTM standartlarının geçerli olduğu ülkelere de çimento ihracatı yapmaktadır. Bu nedenle çimento ile ilgili ASTM standartları da sektör açısından önemlidir.

ASTM C150 Portland çimento için gereklilikleri tanımlamakta olup, Tablo 5'te belirtilen 10 farklı çimento tipi tanımlanmıştır. Katkılı çimentolar ise ASTM C595 Standardı kapsamında olup Tablo 6'da görülmektedir. Tablo 7'de ise EN 197-1 ve ASTM Standartlarındaki çimentoların öne çıkan ortak özellikleri göz önüne alınarak iki standart kapsamında karşılaştırmaları belirtilmiştir.

Tablo 5. ASTM C150 Standardında yer alan çimentolar

Çimento Tipi	Açıklama
Tip I	Genel kullanım, ürüne has özelliklerin belirtilmediği durumlarda kullanım için
Tip IA	Hava sürükleyici çimento (Tip I için)
Tip II	Genel kullanım, özellikle orta sülfata dayanıklı çimentolar
Tip IIA	Hava sürükleyici çimento (Tip II için)
Tip II (MH)	Genel kullanım, özellikle orta hidratasyon ısı ve orta sülfata dayanıklılık için
Tip II (MH)A	Hava sürükleyici çimento (Tip II (MH) için)
Tip III	Yüksek erken dayanımlı çimento
Tip IIIA	Hava sürükleyici çimento (Tip III için)
Tip IV	Düşük hidratasyon ısı çimento
Tip V	Yüksek sülfat dirençli çimento

Tablo 6. ASTM C595 Standardında yer alan katkı çimentolar

Çimento Tipi	Açıklama
Tip IS	Yüksek fırın cüruflu Portland çimento
Tip IP	Portland-puzolan çimento
Tip IL	Portland-kalkerli çimento
Tip IT	Üç katkı çimento

Tablo 7. EN 197-1 ve ASTM Standartlarında yer alan çimentoların karşılaştırılması

EN 197-1	ASTM C150 & ASTM C595
CEM I	Tip I, Tip II, Tip III, Tip IV
CEM I - SR	Tip V
CEM II, CEM III, CEM IV	Tip IL, Tip IS, Tip IP
CEM V	Tip IT

ÇİMENTO

ÇİMENTONUN KODLAMASI

TS EN 197-1 Standardına göre çimento cinsinin kodlaması Şekil 9'daki örnekteki gibi yapılmaktadır.



Şekil 9. Çimento cinsinin kodlaması

Tablo 8'de TS EN 197-1'e göre çimento tipi, klinker oranı, ana bileşen tipi, dayanım sınıfı ve diğer özellikler belirtilmiştir.

Tablo 8. Çimento cinsinin kodlamasında kullanılan kısaltmalar

Çimento Tipi	Klinker Oranı	Ana Bileşenler	Dayanım Sınıfı	Diğer Özellikler
CEM I	A: Yüksek miktarda klinker	S: Granüle yüksek fırın cürufu	32,5 MPa	SR: Sülfata dirençli
CEM II	B: Orta miktarda klinker	P: Doğal puzolan	42,5 MPa	LH: Düşük hidratasyon ısılı
CEM III	C: Düşük miktarda klinker	Q: Doğal kalsine edilmiş puzolan	52,5 MPa	
CEM IV		V: Silissi uçucu kül		
CEM V		W: Kalkersi uçucu kül		
		T: Pişmiş şist	R: Hızlı erken dayanım (rapid)	
		L - LL: Kalker	N: Normal erken dayanım (normal)	
		D: Silis dumanı	L: Düşük erken dayanım (low)	
		M: Üsttekilerden ikisi ya da daha fazlası		

KATKILI ÇİMENTOLAR

Ana bileşen olarak klinker dışında uçucu kül, yüksek fırın cürufu, puzolan ve kireç taşı gibi mineral bileşenler içeren ve CEM I çimentosuna oranla düşük karbonlu olmalarıyla öne çıkan çimentolardır. Katkılı çimentolar, CEM I Portland çimentosuna oranla daha az klinker içermeleri ve beton performansını olumlu etkileyen özellikleriyle öne çıkmaktadır. Düşük karbonlu katkı çimentolar özellikle yoğun çevresel etkilere maruz kalınan ortamlarda betonarme yapının hizmet ömrü boyunca dayanıklı kalmasını sağlamaktadır.

Ülkemizde CEM I Portland çimentosu ile eşdeğer performansa sahip düşük karbonlu katkı çimentolar üretilmektedir. Şekil 10'da katkı çimento üretiminde kullanılan mineral katkıları belirtilmiştir.



Şekil 10. Katkılı çimentolarda kullanılan malzemeler

Katkılı çimentolar düşük karbonlu üretim için son derece faydalıdır. Yüksek karbon ayak izine sahip klinker oranının %1 oranında azaltılması karbon emisyonunun da %1 oranında azaltılması anlamına gelmektedir. Ayrıca; uçucu kül ve cüruf gibi bir nevi atık olan malzemelerin ekonomiye kazandırılmasına ve doğal kaynak tüketiminin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Tablo 9'da çimento cinslerinin içerdikleri klinker oranı aralığı görülmektedir.

Tablo 9. Çimento cinslerinin TS EN 197-1 Standardına göre klinker içerikleri

Çimento Cinsi	CEM III/C	CEM III/B	CEM V/B	CEM III/A	CEM V/A	CEM IV/B	CEM IV/B	CEM II/B	CEM IV/A	CEM II/A-M	CEM II/A*	CEM II/A-D	CEM I
Klinker Oranı	%5- %19	%20 -%34	%20 -%38	%35- %64	%40- %64	%45- %64	%40- %64	%65- %79	%65- %89	%80- %88	%80- %94	%90- %94	%95- %100

*Silis dumanlı çimento (D) hariç.

YENİLİKÇİ (NOVEL) ÇİMENTOLAR

Kalsiyum Sülfoalüminat Çimentosu (CSA): Esas olarak ye'elimate mineral maddesine ($4\text{CaO}_3\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SO}_3$) dayalı kalsiyum sülfoalüminat çimentosu, Portland çimentosuna oranla yüksek erken ve nihai dayanıma, daha az hacim büzülmesine ve daha düşük çevresel etkiye sahiptir. Ye'elimate suyla hızla reaksiyona girer, ardından ilk etrenjit ve alüminyum hidroksit oluşur. CSA; hızlı dayanım gelişiminin gerekli olduğu köprüler, havaalanı pistleri, yol yamaları, tüneller, kaldırımlar vb. birçok uygulamada kullanılabilir. Ayrıca, CSA çimentoları Portland çimentosu ile karıştırılarak rötreyi (büzülme) azaltmak için de kullanılmaktadır. Portland çimentosuna oranla üretiminde daha az enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır.

Kalkerli Kalsine Kil Çimentosu, Limestone Calcined Clay Cement (LC³): Kalkerli kalsine kil çimentosu; kalsine edilmiş kaolinit içeren kil, kireçtaşı ve klinkerden oluşmaktadır. %30 kalsine kil ve %15 kalker içeren bu çimentonun Portland çimentosuna bir alternatif olduğu ve hatta dürabilite performansının daha yüksek olduğu mevcut çalışmalara ait raporlarda belirtilmektedir. Son yıllarda ticarileşme aşamasına gelen bu çimento özellikle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül arzının gelecekte azalması senaryosuna karşın iddialı bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Solidia Çimentosu: Hidrolik olmayan fazlar içeren Solidia çimentosu, Portland çimentosu (PC) ile aynı ham maddeler kullanılarak mevcut çimento fırınlarında üretilmektedir. Temel fark, bu tip çimentonun daha az kireçtaşı kullanılarak ve daha düşük fırın sıcaklıklarında üretilmesidir. Bu, çimento üretimi sırasında CO₂ emisyonlarının azalması anlamına gelmektedir. Solidia çimentosu hidrolik olmadığı için beton üretiminde su ile değil CO₂ ile tepkimeye girerek Portland çimentosu betonuna oranla çok daha kısa sürede dayanım kazanmaktadır.

Alkali Aktif Çimento: Alkali aktif çimentolar, bir alkali kaynağı ve alüminatça zengin malzemeler arasındaki kimyasal reaksiyon yoluyla dayanımını ve diğer özelliklerini kazanır. Aktivatör olarak kullanılan alkali, sodyum silikat veya sodyum hidroksit çözeltisi veya ikisinin bir kombinasyonu veya başka bir alkali kaynağı (kireç gibi) olabilir. Alüminat içeren malzemeler ise uçucu kül, belediye katı atık yakma külü (MSWIA), metakaolin, yüksek fırın cürufu, çelik cürufu veya diğer cüruflar veya diğer alümina açısından zengin malzemeler olabilir. Alkali aktif çimentoların içeriğinde bir miktar klinker bulunabilmektedir.

Bu çimentolar dışında bir kısmı ticarileşmiş bir kısmı ise halen araştırma aşamasında olan farklı ham maddelerden oluşan ve Portland çimentosuna göre farklı özelliklere sahip çimentolar da bulunmaktadır. Bu çimentolara örnekler aşağıda belirtilmektedir:

- Anti-bakteriyel çimento
- Anti-korozif çimento
- Aside dirençli çimento
- Boşluklarından arındırılmış çimento
- Enerjiyle modifiye edilmiş çimento
- Genleşen çimento

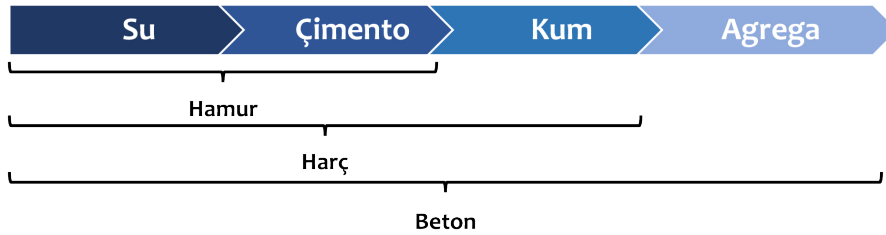
- Geopolimer çimentosu
- Hidrofobik çimento
- Kendini iyileştiren/onaran çimento
- Kendini temizleyen çimento
- Magnezyum fosfat çimentosu
- Renkli çimento
- Sülfür çimentosu
- Ultra ince çimento
- Yüksek ısı iletken çimento

ÇİMENTO HAMURU, HARCİ VE BETONU

Bağlayıcı bir malzemenin su ile karıştırılmasına hamur (veya pasta) denir. Bu karışıma kum katıldığında harç, ilaveten agrega (çakıl) katıldığında ise beton elde edilir.

Bu kelimelerin önüne bağlayıcının ismi geldiğinde ise malzeme net olarak tanımlanır. Örneğin; kireç hamuru, çimento harcı, asfalt betonu gibi...

En çok kullanılan bağlayıcı malzeme çimento olduğu için çimento hamuru, çimento harcı ve çimento betonu yerine kısaca hamur, harç ve beton kelimeleri kullanılabilir.



Şekil 11. Çimento hamuru, harcı ve betonu

PORTLAND ÇİMENTOSUNUN KULLANIM ALANLARI

Çimentodan beklenen performansı belirlemek için öncelikle çimentonun nerede, nasıl ve hangi koşullarda kullanılacağına doğru bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir.

Örneğin; sülfat atağına maruz kalacak bir ortamda sülfata dayanıklı çimento, kütle beton olan bir projede hidratasyon ısı düşük çimento ya da hızlı kalıp alınması gereken bir durumda erken dayanımı yüksek çimento kullanmak gerekebilir.

Çimentonun dayanım dışında birçok performans özelliği vardır. Ülkemizde farklı ihtiyaçlara yönelik çeşitli performanslara sahip çimento cinsleri yaygın olarak üretilmektedir. Tablo 10'da çimento cinslerine göre çimentonun kullanım alanlarına örnekler verilmektedir.

ÇİMENTO

Tablo 10. Çimentonun kullanım alanları

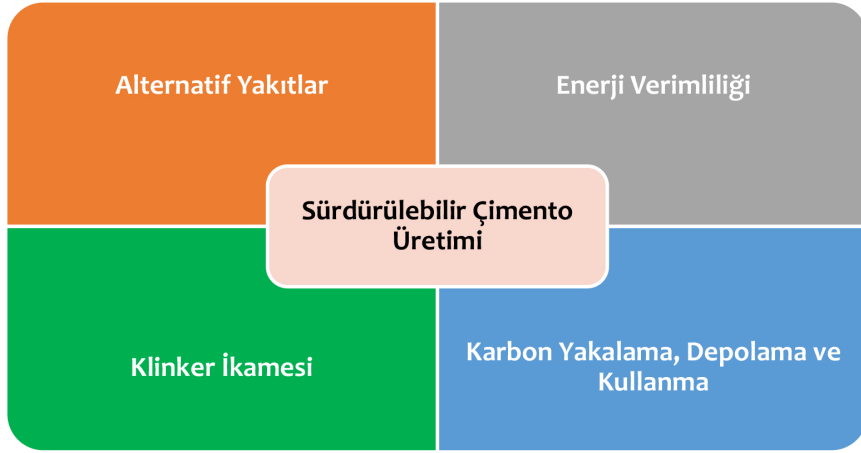
CEM I ve CEM II tipi çimentolar	CEM III tipi çimentolar
Genel kullanım Beton yollar Betonarme yapılar ve borular Zemin ve yol kaplamaları Yüksek yapılar Demiryolu traversleri Köprü, tünel ve viyadükler Tünel kalıp uygulamaları Su depoları Ön-germeli betonlar Beton briket Yapı kimyasalları	Kıyı ve liman inşaatları Su kanaletleri Baraj inşaatları Açık deniz yapıları Tüneller ve tünel kaplamaları Beton ya da betonarme yeraltı su boruları Sülfat etkisinde endüstriyel zeminler Arıtma tesisleri Beton ya da betonarme yeraltı su boruları
CEM IV tipi çimentolar	CEM V tipi çimentolar
Baraj inşaatları Sıva ve duvar harcı Su kanaletleri Zemin ve yol kaplamaları Yapı kimyasalları Arıtma tesisleri Kütle betonları Geoteknik uygulamalar Kıyı ve liman inşaatları Açık deniz yapıları Atık su tesisleri Beton ya da betonarme yeraltı su boruları Köprü, tünel ve viyadükler	Beton ya da betonarme yeraltı su boruları Su kanaletleri Baraj inşaatları Yol kaplama betonları Sıva ve duvar harcı Arıtma tesisleri Kütle betonları Geoteknik uygulamalar

ÇİMENTO VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

Çimento üretim prosesinde ham madde kullanımı ve enerji tüketimi oldukça yüksek seviyelerdedir. Bu nedenle çimento üretimine “enerji yoğun (energy intensive)” proses denilmektedir. Sürdürülebilir çimento üretimi için başlıca uygulama alanları Şekil 12’de belirtilmiştir.

Sürdürülebilir çimento üretimi hem kaynakların verimli kullanılmasına hem daha az fosil yakıt kullanılmasına ve dolayısıyla çevresel ve ekonomik açıdan olumlu sonuçların oluşmasına katkıda bulunmaktadır. Bu konuda son yıllarda Türkiye’de çimento sektöründe çok ciddi çalışmalar yapılmakta ve çevreci projeler hayat geçirilmektedir.

Çimento sektörü, endüstriyel simbiyoz modeline çok uygundur. Endüstriyel simbiyoz, şirketlerin bir arada endüstriyel iş birliği içinde olduğu, birinin atığının diğeri için ham madde olduğu bir aracılık yapısıdır. Çimento üretiminde birçok farklı endüstrinin atığı, yakıt ve ham madde olarak değerlendirilmektedir. Bu sayede döngüsel ekonomiye katkı sağlanmaktadır.

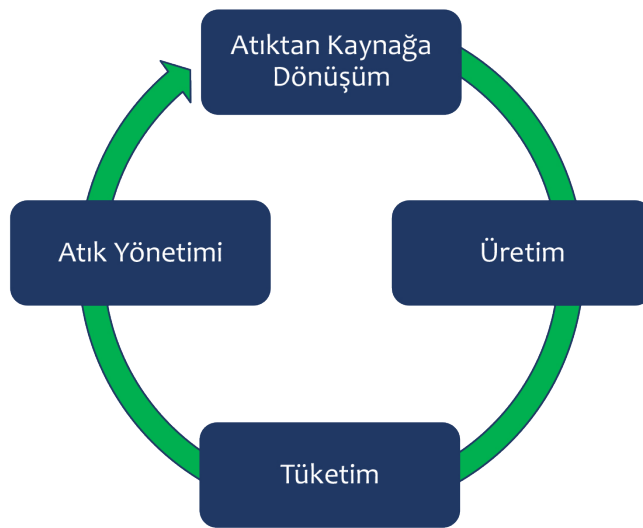


Şekil 12. Sürdürülebilir çimento üretimine yönelik uygulamalar

DÖNGÜSEL EKONOMİYE KATKI

Kaynakların bol, ulaşılabilir ve atık bertarafının ucuz olduğu varsayımına dayan, "Al, Yap ve At" esasına dayalı "Doğrusal Ekonomi" modelinde çok miktarda atık açığa çıkmaktadır. Bunun yanı sıra; çevresel bozulma ve iklim değişikliği oluşur, doğal kaynaklar hızla tüketilir, ithal ham madde ve yakıt ihtiyacı artar. Doğal kaynakların sınırlı olması, çevrenin korunması ve atık üretimin azaltılması ihtiyacı, çevresel ve ekonomik açıdan daha sürdürülebilir olan "Döngüsel Ekonomi" modelini öne çıkarır.

Çimento sektörü, geri dönüşüm ve geri kazanım işlemlerinin gerçekleştiği özgün bir prosestir. Bu özelliği ile çimento üretimi döngüsel ekonomi prensiplerini uygular. Üretim aşamasında enerji geri kazanımı ve malzeme geri dönüşümü yapılır.



Şekil 13. Döngüsel ekonomi

ÇİMENTO

Ham madde ve klinker üretimi kapsamında;

- Kömür ve petrokok gibi yakıtların yerine alternatif yakıtlar kullanılmakta ve “enerji geri kazanımı” yapılmaktadır.
- Enerji içeriği olan endüstriyel atıklar, belediye çöplerinden üretilen ek yakıtlar ve kurutulmuş kentsel atık su arıtma çamurları alternatif yakıt olarak değerlendirilmektedir.
- Atıkların mineral bileşenleri alternatif ham madde olarak kullanılır ve “malzeme geri dönüşümü” yapılır.
- Hem kalori değeri hem de mineral değeri olan atıklar kullanılmaktadır (ör. ömrünü tamamlamış lastikler).

Çimento üretimi kapsamında;

- Diğer sektörlerin yan ürünleri ile klinker belirli oranda ikame edilir ve “malzeme geri dönüşümü” yapılır.
- Termik santrallerde açığa çıkan uçucu küller ve yüksek fırınlarda demir üretimi esnasında açığa çıkan cüruf buna örnek olarak verilebilir.
- Kullanılan alternatif ham maddeler başka bir sektörün yan ürünü olabilir. Bu bağlamda, çimento sektörü “endüstriyel simbiyozun” özel bir örneğini oluşturur.

Resim ve Şekillerin Kaynakları

Resim 1: <https://wobblingsolutions.files.wordpress.com/2010/02/vitruvius.jpg>

Resim 2: https://miro.medium.com/max/2000/1*3T_djbBf-ga1PHiP4Du_-Q.jpeg

Resim 3: <https://seuso.mnm.hu/sites/default/files/image/2019-11/profimedia-0171478062.jpg>

Resim 4: <https://www.tarihcantasi.com/wp-content/uploads/2020/08/catalhoyuk-noelitik-kent-tarihcantasi.jpg>

Resim 5: <https://collectionapi.metmuseum.org/api/collection/v1/iiif/321676/1575267/main-image>

Resim 6: <https://arkeofili.com/wp-content/uploads/2020/01/hercu4.jpg>

Resim 7: https://www.wikiwand.com/en/Joseph_Aspdin

Resim 8: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1a/The_Wakefield_Arms_-_geograph.org.uk_-_1120756.jpg

Resim 9: <http://www.kocaelitarihisempozyumu.com/bildiriler4/67.pdf>

Şekil 1: <https://www.baticim.com.tr/urunler/klinker> / <https://www.baticim.com.tr/urunler/cimento>

Şekil 2: Australian Cement Report 2020. <http://cement.org.au/wp-content/uploads/2020/08/CIF-Industry-Report-2020.pdf>

Şekil 3: TÜRKÇİMENTO

Şekil 4: Introductory Chapter: Properties and Applications of Cement- Based Materials - Scientific Figure on ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/A-pictorial-representation-of-a-cross-section-of-a-cement-grain-Adapted-from-Cement_fig1_328213251

Şekil 5: TÜRKÇİMENTO

Şekil 6: https://gcpat.com.au/sites/au.gcpat.com/files/styles/blog_teaser/public/2019-05/Cement-Blog-%232.jpg?itok=C3ZOeSKY

Şekil 7: Handbook of Clay Science Edited by F. Bergaya, B.K.G. Theng and G. Lagaly Developments in Clay Science, Vol. 1, p.1114 https://www.researchgate.net/publication/286313205_Cement_Hydrates

Şekil 8: Nanostructure and Engineering Properties of Basic and Modified Calcium-Silicate-Hydrate Systems - Scientific Figure on ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/1-An-electron-microscope-image-of-Portland-cement-hydration-products-Courtesy-of-Mr_fig2_282611085

Şekil 9-13: TÜRKÇİMENTO



TÜRKCİMENTO

Tepe Prime A Blok Kat: 18-19
Eskişehir Devlet Yolu
(Dumlupınar Bulvarı) 9. km
No: 266 06800 Ankara
T : 444 50 57 - F : 0 (312) 265 09 06-05
www.turkcimento.org.tr - info@turkcimento.org.tr