



YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

34703

KIRMIZI ÇAMURDAN

YAPI MALZEMESİ ÜRETİM İMKANLARININ

ARAŞTIRILMASI

Maden Müh. Mustafa KARA

**F.B.E. Metalurji Anabilim Dalı
Üretim Metalurjisi Bilim Dalında
hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Y. Doç. Dr. Ahmet EKERİM

İSTANBUL, 1994

İÇİNDEKİLER

Sayfa No.

TEŞEKKÜR	vi
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. ALÜMİNYUM VE KIRMIZI ÇAMURA GENEL BİR BAKIŞ	3
2.1. Seydişehir Alüminyum İşletmesi	3
2.2. Alüminyum Mineralleri	3
2.3. Boksit Rezervleri	7
2.4. Alümina Üretimi ve Kırmızı Çamur	11
2.4.1. Bayer Prosesi	12
2.5. Kırmızı Çamurla İlgili Yapılan Çalışmalar	15
2.6. Kırmızı Çamurun Potansiyel Kullanım Alanları	20
3. TUĞLA TEKNOLOJİSİ	22
3.1. Tuğla Hammaddesinin Oluşumu ve Aranması	22
3.2. Tuğla Hammaddesinin Özellikleri	23
3.3. Tuğla Üretim Yöntemi	25

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	27
4.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Cihazlar	27
4.1.1. Deney Hammaddeleri	27
4.1.2. Kullanılan Cihazlar	28
4.2. Malzemelerin Özelliklerinin Belirlenmesi	29
4.2.1. Kimyasal Özellikler	29
4.2.2. Mineralojik Analiz	29
4.2.3. Ağırlık Kaybı Ölçümleri	32
4.2.4. Yoğunluk Tayini	33
4.2.5. Radyoaktivite Testi	33
4.2.6. Tane Boyut Dağılımı	34
4.3. Deneylerin Yapılışı	35
4.3.1. Kırmızı Çamur - Marn Deneyleri	35
4.3.1.1. Karışım Oranının Tesbiti	35
4.3.1.2. Pişirme Sıcaklığının Tesbiti	39
4.3.1.3. Presleme Basıncının Tesbiti	42
4.3.2. Kırmızı Çamur - Serpantin Deneyleri	45
4.3.2.1. Karışım Oranının Tesbiti	45
4.3.2.2. Pişirme Sıcaklığının Tesbiti	48
4.3.3. Kırmızı Çamur - Tuğla Hammaddesi Deneyleri	52
4.3.3.1. Karışım Oranının Tesbiti	52

4.3.3.2. Pişirme Sıcaklığının Tesbiti	55
4.3.4. Ticari Tuğlaların Özellikleri	59
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR	63
EKLER	67
ÖZEÇMİŞ	



TEŞEKKÜR

TÜBİTAK - MAM Malzeme Araştırma Bölümü'nde yürütülen "Atık Uçucu Kül ve Cüruflardan Cam Seramik Üretimi" projesinin bir parçası olarak gerçekleştirdiğim Yüksek Lisans tezim için bütün kapıları açan TÜBİTAK - MAM Malzeme Araştırma Bölümü Başkanı Sayın Dr. Tarık BAYKARA'ya ve yardımlarını eksik etmeyen Malzeme Bölümü elemanlarına teşekkür ederim.

Tezimin son aşamasına gelinceye kadar her türlü yardımı esirgemeyen tez hocam Sayın Y.Doç.Dr. Ahmet EKERİM'e ve gerek derslerimde gerekse tezimin hazırlanması sırasında desteklerini gördüğüm tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Tezimin her safhasında görüşlerine başvurduğum ve daima bana yol gösteren Sayın Doç.Dr.Ö.Faruk EMRULLAHOĞLU'na, Seydişehir Alüminyum Tesisleri'nde numune alınması sırasında tüm samimiyetleriyle benimle ilgilenen ve yardımcı olan Boksit ve Alümina Müdürlüğü elemanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca her konuda desteğini esirgemeyen sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 1994

Maden Müh. Mustafa KARA

ÖZET

Bayer Prosesi ile alümina üretimi esnasında oluşan kırmızı çamur, bir atık maddedir. Üretime giren boksit cevherinin yaklaşık % 35-40'ı kırmızı çamur olarak dışarı atılmaktadır. Bu atık daha sonra sulandırılarak atık barajına pompalanmaktadır. Türkiye'nin cevherden alüminyum üreten tek işletmesi olan Seydişehir Alüminyum Tesisleri'nde, 20 yılda yaklaşık 3 milyon ton kırmızı çamuru atık malzeme olarak depolamıştır.

Dünyada ve ülkemizde kırmızı çamurun değerlendirilmesi konusunda birçok araştırma yapılmaktadır. Ne varki, yapılan çalışmalar teknolojik ve ekonomik olarak halen uygulanabilir bir sonuca ulaşmamıştır. Bu çalışmada, kırmızı çamura değişik kil malzemeleri (marn, serpantin, tuğla hammaddesi) katılarak yüksek dayanımlı ve kaliteli yapı malzemesinin üretimi araştırılmıştır. Bu amaçla;

Kırmızı çamur ile marn kili kullanılan birinci grup deneyde önce, presleme basıncı ile sıcaklık sabit, karışım oranı değişken; ikinci grup deneyde tesbit edilen karışım oranı ile presleme basıncı sabit, pişirme sıcaklığı değişken; üçüncü grup deneyde ise presleme basıncı değişken, diğer şartlar sabit tutulmuştur. Her üç grup deney sonucunda elde edilen optimum değerlere göre, yarı yarıya karışımın 12.8 MPa (128 kg/cm^2)'lık basıçta preslenip 1150°C sıcaklıkta pişirilmesinden sonra, 148 MPa'lık basma dayanımı ile % 0.33 civarında su emme oranı bulunmuştur.

Kırmızı çamur ile serpantin karışımli numunelerle yapılan deneylerin sonucunda, yukarıda belirtildiği gibi, optimum karışım oranı ve pişirme sıcaklığı belirlenmiştir. Presleme basıncı artırıldığında daha yüksek dayanımlı tuğla elde edileceğinden, presleme basıncı deneylerinin yapılmasına gerek görülmemiştir. Her iki deney sonucunda elde edilen optimum değerlere göre, yarı yarıya karışımın 3.2 MPa (32 kg/cm^2)'lık presleme basıncında preslenip 1150°C sıcaklığında pişirilmesinden sonra, 99 MPa'lık basma dayanımı ile % 0.35 civarında su emme oranı elde edilmiştir.

Kırmızı çamur ile tuğla hammaddesi karışımli numunelerle yapılan deneylerde ise, sadece karışım oranı ve pişirme sıcaklığı belirlenmiştir. Her iki deney sonucunda elde edilen optimum değerlere göre, yarı yarıya karışımın 3.2 MPa (32 kg/cm^2)'lık presleme basıncında preslenip 1150°C sıcaklığında pişirilmesinden sonra, 41 MPa'lık basma dayanımı ile % 0.72 civarında su emme oranı elde edilmiştir.

Elde edilen bu değerler ilgili standartlarla ve halen ülkemizde üretilen tuğlalarla kıyaslandığı zaman, kırmızı çamur ve diğer katkılarla yapılan tuğlaların daha kaliteli ve daha dayanıklı, ayrıca daha düşük su emme oranına sahip olduğu görülmektedir. Bu deneylerde hazırlanan tuğlalar değişik renklere sahip olduklarından dekoratif amaçla da kullanmak mümkündür. Bu alışma ile kırmızı çamurun çeşitli katkılarla tuğla ve kiremit yapımında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Böylece, kırmızı çamurun evreyi kirletici etkilerinin azaltılması da mümkün olabilecektir.



ABSTRACT

Red mud is a waste material which is produced during alumina production by Bayer Process. Approximately 35-40% of the bauxite ore processed goes into waste as red mud and later diluted with water to be pumped into a waste storage. Over the past twenty years nearly 3 million tonnes red mud has been stored as waste material in Seydişehir Aluminium Plant which is the only plant in Turkey producing aluminium from ore.

Many research projects on the utilization of red mud are currently underway in Turkey as well as in the world. Investigations, however, have not yet given results applicable technologically and economically. This investigation was aimed at production of high quality and high strength structural material by adding various clay materials (marn, serpentine, and brick raw material) into red mud. The following has been done:

In the experiments in which marn clay and red mud mixture is used molding pressure and temperature are held constant and the ratios in the mixtures are varied. In a second set of experiments, the optimum mixture ratio and the moulding pressure established from the previous stage were held constant and the firing temperature was taken as a variable. In the third set of experiments all the conditions were held constant except for the moulding pressure. According to the optimum values obtained from the three sets of experiments it is found that the mixture having 50/50 ratio gives 148 MPa compressive strength and 0.33% water absorption ratio after pressing under 12.8 MPa (128 kg/cm^2) and firing at 1150°C .

Optimum mixture ratios and the firing temperature for samples made of serpentine and red mud mixtures were determined experimentally as described above. The effect of molding pressure was not studied in this case as increased pressure would, obviously, yield brick products with higher strengths. According to the optimum values obtained from both of the experiments it is found that a 50/50 mixture gives 99 MPa compressive strength and a water absorption ratio around 0.35% after pressing under 3.2 MPa (32 kg/cm^2) and firing at 1150°C .

On the samples made of brick raw material and red mud mixtures only the optimum mixture ratio and firing temperature were determined. According to the optimum values obtained from both of the experiments it is found that a 50/50 mixture gives 41 MPa compressive strength and a water absorption ratio around 0.72% after pressing under 3.2 MPa (32 kg/cm^2) and firing at 1150°C .

When the obtained values compared with those in the related standarts and those of the commercial bricks produced in Turkey both types of bricks, i.e. made from red mud with and without additives, proved to have higher quality and higher strength, and lower water absorption values. It is also possible to use the bricks produced in these experiments for decorative purposes as they have various colours. In this study, it has been shown that red mud can be used, with appropriate additives, to produce bricks and roof tiles. Thus, the environmental pollution by red mud can also be reduced.



BÖLÜM 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Kırmızı çamur, Bayer prosesi ile boksitten alümina üretimi sırasında ortaya çıkan bir atık maddedir. Alüminyum üretimi için kullanılan boksit cevherinin yaklaşık % 40'ı kırmızı çamur olarak atığa çıkar. Bir başka deyişle, üretilen 1 ton alümina veya 0.5 ton alüminyum metaline karşılık yaklaşık olarak 1 ton kırmızı çamur (kuru bazda) meydana gelir. Giderek artan alüminyum metali üretiminde kırmızı çamur, bu endüstrinin en önemli atık problemidir. Önemli miktarda kostik soda ve alüminyum kaybına neden olduğu gibi, kuruyan kırmızı çamurun rüzgarla uçarak havayı kirletmesi ve depolaması da ayrı bir sorundur.

Kırmızı çamurun değerlendirilmesi üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar, kırmızı çamurun içerdiği bileşiklerin birini veya tamamını kazanma, kırmızı çamurun metalurji, inşaat ve kimya sektöründe kullanılabilirliği, kırmızı çamurun susuzlandırılması ve çevre etkilerinin azaltılması üzerine olmuştur. Geliştirilmiş pek çok proses günümüz şartlarında ekonomik olmadığı için henüz uygulama imkanı bulunmamasına rağmen bu konudaki çalışmalar halen devam etmektedir.

Bu çalışmada ise, Seydişehir Alüminyum Tesisleri'nin atık ürünü olan kırmızı çamur ile aynı yöre formasyonundan alınan marn, serpantin ve tuğla hammaddesi katılarak yüksek mukavemetli ve kaliteli inşaat malzemesinin üretimi araştırılmıştır. Tüm araştırma ve deneyler, TÜBİTAK - MAM Malzeme Araştırma Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu araştırmanın amacını şu şekilde özetlemek mümkündür.

1. Seydişehir Alüminyum İşletmesi'nde atık olarak çıkan ve miktarı 3 milyon tona ulaşan kırmızı çamurun, ekonomik ve tesis ölçeğinde uygulanabilir bir kullanım alanı bulmak,

2. Çevre kirliliğini önlemek (kırmızı çamurun % 92'si 10 mikrondan küçüktür ve bol miktarda soda içerir),

3. Mevcut inşaat malzemelerine kıyasla daha mukavim ve daha ekonomik yapı elemanlarını üretmek,

4. Özellikle küçük yerleşim birimlerinde kagir bina yapımında bu yapı malzemelerini kullanmak ve buna bağlı olarak depreme dayanıklı bina yapmak, ekonomiye katkıda bulunmak.



BÖLÜM 2. ALÜMİNYUM VE KIRMIZI ÇAMURA GENEL BİR BAKIŞ

2.1. Seydişehir Alüminyum İşletmesi

1962 yılında Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü tarafından Seydişehir'in Mortaş ve Doğankuzu mevkiilerinde yoğun bir araştırma sonucu, alüminyum üretimi için uygun boksit rezervleri tesbit edilmiştir. Maden sahaları 1965 yılında ETİBANK'a devredilmiş, 1967 yılında ETİBANK ile SSCB firması (Tiajpromexport) arasında boksit cevherini işleyecek tesislerin kurulması üzere bir anlaşma yapılmıştır. Ekim 1969 yılında temeli atılan tesislerde üretim birimleri sıra ile devreye girmiş ve 1973 yılında Türkiye'de ilk alümina üretimi, 1974 tarihinde ise, ilk birincil alüminyum üretimi gerçekleştirilmiştir. 1979 yılında, tesis bünyesinde, Alüminyum Tesislerinin kendi olanakları ile gerçekleştirdiği 45.000 ton/yıl kapasiteli Alüminyum Sülfat Fabrikası işletmeye alınmıştır.

Seydişehir Alüminyum İşletmesi, alüminyum endüstrisinin bütün kademelerini içeren, yani cevherden hareketle alüminyum yarı mamülleri üreten entegre bir tesistir. Boksit işleme, Alümina, Alüminyum, Dökümhane, Haddehane ve Yardımcı Ünitelerden oluşan tesislerde, tam kapasitede, yılda 460.000 ton boksit cevheri işlenerek, 200.000 ton alümina, 60.000 ton birincil alüminyum üretimi sağlanabilmektedir (1).

2.2. Alüminyum Mineralleri

Boksit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)

Alüminyum üretimi için en uygun cevher boksittir. Boksit bir mineral ismi olmayıp, diaspore ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), böhmite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), hidrarjirit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ve alümojel minerallerinin bir karışımıdır. Boksitler ayrıca silis, demir oksitler,

alüminyum oksitler ve titanyum oksitler içerirler. Bu yan bileşenler boksit cevherinin kalitesini belirlemektedir. Ayrıca mineral olarak bakıldığında klorit, hallosit, allofan gibi mineraller boksitin bileşimine girmektedirler. Boksitler genel olarak % 40 civarında Al_2O_3 , % 30'dan az Fe_2O_3 ve bir miktar silis içerir.

Alüminyum metali üretiminde kullanılan başlıca cevher, alüminyumoksihidroksitlerin karışımı olan boksitlerdir. Bunlar mineralojik bileşenlerine göre üç grupta toplanırlar.

a) Jipsitik Boksitler: Püskürük kayalardaki feldspat ve korundun düşük sıcaklıklarda dekompozisyonu ile oluşurlar.

b) Böhmitik Boksitler: Jipsitin dehidratasyonu sırasında bir ara ürün olarak ortaya çıkmışlardır.

c) Diasporitik Boksitler: Yüksek sıcaklıklarda teşekkül ettikleri ileri sürülmektedir.

Boksitler, oluşum tarzlarına göre ise Lateritik ve Karstik Boksitleri olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır.

Boksitin kalitesi birçok kritere göre tarif edilmiştir. Fakat en çok kullanılan kriter silis modülü (Al_2O_3/SiO_2) ile Fe_2O_3 tenörüne göre sınıflandırmadır.

Al_2O_3/SiO_2	=	20	Yüksek alüminalı cevher
		10-20	Alüminalı cevher
		4-10	Silisli cevher (endüstriyel cevher)
		4	Yüksek silisli cevher
% Fe_2O_3	=	25	Çok Demirli Cevher
		10-15	Demirli Cevher
		10	Az demirli Cevher

Dünya boksit tüketiminin % 90'ı alüminyum tüketimine yöneliktir. Boksit ayrıca kimya ve refrakter sanayiinde, çimento ve aşındırıcı yapımında da kullanılmaktadır. Jipsitik boksitler düşük silikat içermeleri nedeniyle alüminyum üretimi için en uygun olanıdır (2,3,4).

Böhmit (Bayerit)($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

Alkalın kayaçların içerisinde hidrarjilit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ve natrolit ($\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ile birlikte düşük sıcaklıkta oluşmuş bir formasyon olarak rastlanmaktadır. Nefelinin ayrışması sonucunda oluştuğu kabul edilmektedir. Boksit içerisinde genellikle amorf kümeler halinde bulunur. Böhmit, birçok boksit yatağının başlıca minerallerinden biri olup, değişik miktarlarda olmak üzere her tip boksit yatağında bulunmaktadır.

Jipsit (hidrarjirit) ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)

Korund, nefelin veya feldspatlar gibi alüminyumca zengin minerallerin bozulmasıyla meydana gelmiş sekonder bir mineraldir. Mağmatik kayaçların hidrotermal alterasyonu ile oluşur. Genellikle böhmit ile birlikte bulunur.

Diaspor ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

Boksitin metamorfizmaya uğraması sonucu oluşurlar. Optik olarak böhmitten ayrılır. Diaspor, genellikle kireçtaşları ne nadiren metamorfik formasyonlarda yaygındır. Aşındırıcı malzemeler imalinde (kalsine edilerek) ve ısıya dayanıklı tuğla yapımında kullanılır. Teknik sorunların varlığından dolayı alüminyum üretimi mümkün değildir.

Korund (Al_2O_3)

Diyasporların metamorfizmasıyla oluşur. Manyetit, hematit ve kuvarsla bulunduğu zaman zımpara adını alır. Günümüz koşullarında bu mineralden alüminyum üretimi sözkonusu değildir.

Kriyolit (Na_3AlF_6)

Dünyada alüminyumun ilk üretimi kriyolitten olmuştur. Ancak boksiten alüminyum üretimi daha kolay olması ve boksitin bol miktarda bulunmasıyla bu özelliğini yitirmiştir.

Killer

Kil mineralleri çoğunlukla silika (SiO_2), alümina (Al_2O_3) ve sudan (H_2O) oluşan sulu silikatlardır. Kil mineralleri % 16-38 arasında Al_2O_3 içermektedirler. Refrakter ve seramik killeri hariç genel anlamda kil rezervleri belirlenmesine gerek olmayacak kadar çoktur. Bu özellikleri nedeniyle ABD’de alüminyum üretiminde kullanılabilmeleri için araştırmalar yürütülmektedir.

Nefelinli Siyenit $[(\text{Na},\text{K})(\text{Al},\text{Si})_2\text{O}_4]$

Silis içeriği az olan ve albit, mikroklin feldspat ve nefelinden oluşan kristalin bir kayaç olup, % 21-23 arasında Al_2O_3 içerir. Dünyada yaygın olarak, cam, seramik, boya, plastik kauçuk, portland çimentosu, sodyum karbonat ve potasyum karbonat üretiminde kullanılır. SSCB’de 1951’den bu yana ticari ölçüde alümina üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde nefelin, konsantre edilerek öğütülür, döner fırında kavrulduktan sonra tekrar öğütülerek kostik soda içinde liç yapılır.

Daha sonraki aşamada karbonlaşma kulelerinde alkaliler çözeltide kalmakta, alümina ise alüminyum hidroksit olarak çökmektedir (4).

2.3. Boksit Rezervleri

Dünya boksit rezervi 33 milyar tonu görünür olmak üzere toplam 42 milyar tondur (The Economics of Aluminium 1988 Roskill). Boksit üretiminin % 90'ı açık işletme ile yapılmaktadır. Bu rezervlerin yaklaşık % 50'si Afrika'da, % 22'si Amerika'da, % 15'i Avustralya'da, % 8'i Asya'da ve % 5'i diğer ülkelerde yer almaktadır. Söz konusu rezervlerden en önemlilerinin ülkelere göre global dağılımı ve özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Bilinen dünya rezervlerinin % 32'si görünür, % 68'i ise muhtemel rezerv grubuna girmektedir. Bu rezervlerin % 95'i gibsitik, % 2'i böhmitik ve % 3'ü diasporitik boksitlerden ibarettir (5).

Tablodan ve diğer kaynaklardan edinilen bilgiye göre, dünya metal alüminyum tüketimi arttıkça buna paralel olarak dünya boksit üretimi de artmaktadır. Avustralya, Gine Cumhuriyeti, Yugoslavya, Macaristan ve Brezilya boksit işletmeciliğinde önemli gelişmeler gösteren ülkelerdir. A.B.D., Japonya, Almanya, Kanada ve İtalya önemli boksit tüketici ülkelerdir (6).

Türkiye'de yaklaşık olarak 200 civarında boksit ve diasporit zuhuru saptanmıştır. Bu zuhurlarda potansiyel rezerv yaklaşık 400 milyon tonun üzerinde olduğu ileri sürülmekte ise de mevcut şartlarda ekonomik anlam taşıyabilecek rezervler Tablo 2.2'de verildiği gibi sınıflandırılabilir (5,6). Şekil 2.1'de ise Türkiye'deki potansiyel boksit sahalarının dağılımı gösterilmiştir (7).

Tablo 2.1. Ülkelere göre boksit rezervleri ve özellikleri (milyon ton).

ÜLKE	REZERV TİPİ	GÖRÜNÜR REZERV	TOPLAM REZERV	İŞLETİLEBİLİR REZERV
Fransa	Karst	160	240	204
Yunanistan	"	200	420	357
İtalya	"	5	15	12.75
Filipinler	"	20	70	59.5
Hindistan	Karst, Laterit	680	1430	1215.5
Endonezya	Laterit	20	120	102
Çin	Karst	100	400	340
Avustralya	Laterit	2000	4200	3570
Brezilya	"	330	3330	2830.5
Dominik	Karst	50	110	93.5
ABD	Laterit, Karst	40	140	119
Guyana	Laterit	80	330	280.5
Jamaika	Karst	700	1200	1020
Surinam	Laterit	200	500	425
Gana	"	290	590	501.5
Gine	"	2900	10700	9095
Kamerun	"	100	1500	1275
Malpasy	"	180	200	170
Mali	"	360	460	391
Doğu Bloku	Karst	510	870	739.5
TOPLAM		8925	26825	22801.25

Ülkemizdeki boksit yataklarının yaklaşık % 95'ini Toros kuşağı içinde yeralan karst lateritik demirli boksitler oluşturmaktadır. Toros kuşağı dışında bilinen en önemli boksit yatakları Zonguldak civarındaki Kokaksu yöresinde yeralan karst tipi böhmitik boksitlerdir.

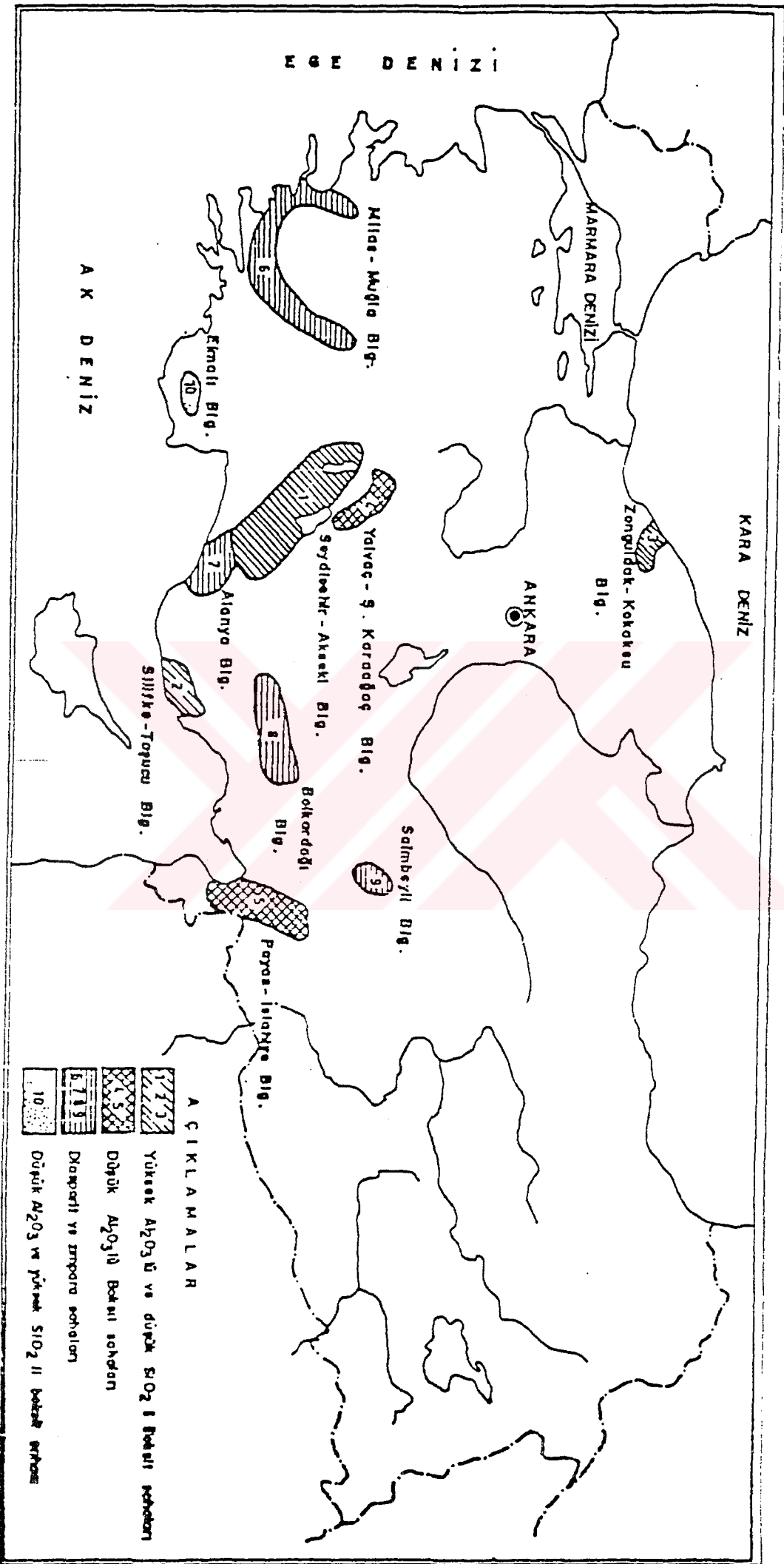
Tablo 2.2. Türkiye'nin I., II. ve III. öncelikli boksit rezervleri.

ÖNEM SIRASI	BÖLGE	REZERV (Milyon Ton)	CEVHER CİNSİ
I	Seydişehir	39.874	Böhmitik
	Milas	22.909	"
	TOPLAM	62.783	
II	Muğla Bölgesi (Milas Hariç)	50	Diyasporitik
	Alanya Havzası	10	"
	Bolkardağı Havzası	10	"
	Tufanbeyli Havzası	10	"
	TOPLAM	80	
III	Islahiye-Pazar Bölgesi	100-200	Demirli Boksit
	Beyşehir-Yalvaç Havzası	60	"
	TOPLAM	160-260	

Sonuç olarak, Türkiye'deki 400 milyon ton boksit rezervinin demirli boksitli olanları hariç tutulursa alüminyum üretimine uygun 130 milyon ton böhmitik + diyasporitik rezerv vardır. Seydişehir Akseki Bölgesinde varolan rezerv, fabrikanın tam kapasite ile çalışması halinde bile 77 yıl yetecek miktardadır (8).

Üretilen tüm boksitin yaklaşık % 90'ı Bayer prosesi ile alüminaya çevrilir. Geri kalan miktar (yaklaşık 4.6 milyon ton/yıl) ise başta refrakter, kimyasallar, aşındırıcılar ve çimento üretimi olmak üzere çeşitli amaçlar için kullanılır.

Boksit tüketim miktarları genel olarak alüminyum metali tüketimi bazında belirlenebilmektedir. Halen dünyada kullanılan boksitlerde, yaklaşık 4 ton boksitten 1 ton alüminyum üretilmektedir (2).



Şekil 2.1. Türkiye'deki boksit rezervleri (7).

2.4. Alümina Üretimi ve Kırmızı Çamur

Alümina üretimi için en çok kullanılan yöntemleri üç ana grupta toplamak mümkündür:

a) Asidik Yöntemler: Bu yöntemle elde edilen alümina saf değildir. Ayrıca çok pahalı cihazlar gerektirdiğinden ve kullanılan asidin geri kazanılması çok zor olduğundan ekonomik değildir.

b) Elektrotermik Yöntemler: Bu yöntemde çok fazla elektrik enerjisi tüketimi söz konusudur. Ayrıca alüminanın yeterli saflıkta olmadığından henüz uygulama alanı yoktur.

c) Bazik Yöntemler: Günümüzde yaygın olarak kullanılan bu yöntemde boksit ısı ve basınç altında NaOH veya Na_2CO_3 ile reaksiyona tabi tutulur ve sodyum alüminat çözeltisi elde edilir. Cevherdeki demir, titanyum ve kalsiyum oksitler bazik çözelti ile reaksiyona girmezler ve kalıntı olarak kalırlar. Silika ise kısmen reaksiyona girer ve sodyum alüminosilikat bileşiği oluşturur. Dolayısıyla cevherin silika içeriğine bağlı olarak bir miktar alkali ve alümina kaybı söz konusudur. Bu nedenle bazik yöntemlerde cevherin silis modülü ($\alpha_{\text{Si}} = \% \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$) çok önemlidir. Düşük silikalı cevherler için "Bayer Prosesi", yüksek silikalı cevherler için "Deville-Pechiney Prosesi" olmak üzere iki tip bazik yöntem dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak bir de Bayer prosesi ile Spekani (sinter) prosesinin birlikte tatbik edildiği "kombine proses" vardır (9).

Seydişehir Alüminyum İşletmesinde alümina üretimi için kullanılan Bayer Prosesinin akım şeması (Şekil 2.2) aşağıda kısaca açıklanmıştır.

2.4.1. Bayer Prosesi

Bu proses 5 ana bölümden oluşmaktadır.

1. Hammaddde Hazırlama Bölümü: Bayer Prosesinin ekonomik olabilmesi için boksitin silis modülü 7 veya 7'den büyük olmalıdır. Bu modüle göre ayarlanmış boksit cevheri kırıldıktan sonra yaş öğütme bunkerlerine gönderilir. Bilyalı değirmenlerde, hazırlanmış taze sudkostik (NaOH) çözeltisiyle birlikte öğütmeye tabi tutulur ve "ham pülp" hazırlanır.

2. Otoklav ve Kırmızı Çamur Bölümü: Ham pülp karıştırıcıları, ısıtıcılar ve seyreltme karıştırıcılarından oluşan bu bölümün ana amacı, boksitteki Al_2O_3 'ü sodyum alüminat olarak sıvı faza geçirmek, istenilen saflıktaki sodyum alüminat çözeltisini dekompozisyon bölümüne, katı fazı ise (kırmızı çamur) yıkamaya tabi tutarak atık barajına nakletmektir.

Ham pülp, ön ısıtıcılarda ısıtıldıktan sonra otoklavda basınç altında (36 atm) ve indirekt buharla ($235^{\circ}C$) ısıtılarak reaksiyona sokulur. Burada boksitteki Al_2O_3 , sodyum alüminat olarak sıvı faza geçer ve diğer bileşikler özellikle demir, titanyum ve kalsiyum oksitler katı halde kalır. Daha sonra ayrıştırıcılarda çözeltinin sıcaklığı, basıncı düşürülür. Seyreltme karıştırıcılarında ise çözeltinin konsantrasyonu, çökmeyi kolaylaştıracak değere ayarlanır ve çözelti kırmızı çamur çöktürme tiknerlerine gönderilir. Al_2O_3 'den alümina çözeltiye alındıktan sonra geri kalan katı faza kırmızı çamur denir ve karmaşık bir sodyum alüminyum silikat ile demir oksitten oluşur. Çöktürme işleminden sonra alt akımdan alınan kırmızı çamur, ters akımlı yıkama sistemiyle yıkandıktan sonra atık barajına pompalanır.

3. Dekompozisyon ve Hidrat Filtrasyonu Bölümü: Bu bölümde, işleme hazır hale getirilen alüminat çözeltisi aşılama hidratıyla $[Al(OH)_3]$ karıştırılıp

dekompozerlere gönderilir. Burada oluşan hidroliz olayı sonucu alüminyum hidroksit kristalleri elde edilir. Bu ürün, çöktürülüp filtre edildikten sonra kalsinasyon bölümüne sevk edilir. Tablo 2.3'de tipik alüminyum hidroksit verilmiştir.

4. Buharlaştırma Bölümü: Bu bölümde devreye zorunlu olarak giren suların çözeltiden ayrılması veya kostik çözeltisinin rejenerasyonu ve soda ayırımı (devrede varsa) işlemi yapılır. Ayrıca buharlaştırma işlemi sırasında ortaya çıkan sıcak sular kazan dairesinde ve çeşitli kademelerinde kullanılmak üzere bölümlere beslenir.

5. Kalsinasyon Bölümü: Bu bölümde yıkanmış hidratın döner fırında 1250° C'de fiziksel ve kimyasal suyu uçurulur. 1000° C'de fırını terk eden alümina, yine döner soğutucularda soğutulduktan sonra elektroliz ya da alümina depolarına sevk edilir (9,10). Tablo 2.4'de alüminanın tipik bileşimi verilmiştir.

Tablo 2.3. Tipik alüminyum hidroksit $\text{Al}(\text{OH})_3$ (Alüminyum Hidrat) (1).

SiO_2	% 0.030 max.	Tane İriliği	
Fe_2O_3	% 0.040 max.	0-10 μm	% 1
Na_2O	% 0.5 max.	10-20 μm	% 5
A.Z.(1100° C)	% 34.4 max.	20-40 μm	% 15
Nem	% 10-12 max.	40-80 μm	% 79
Yığın yoğ.	1.15 gr/cm^3		
pH(%4'lük süsp.halinde)	11-11.5		

Tablo 2.4. Tipik Alüminyum Oksit (Al_2O_3) - Alümina (1).

Al_2O_3	% 98.3 min.	Tane İriliği	
SiO_2	% 0.03	0-10 μm	% 2
Fe_2O_3	% 0.04	10-20 μm	% 8
Na_2O	% 0.5	20-40 μm	% 28
A.Z.(1100° C)	% 1 max.	40-80 μm	% 65
$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	% 25 min.		

2.5. Kırmızı Çamurla İlgili Yapılan Çalışmalar

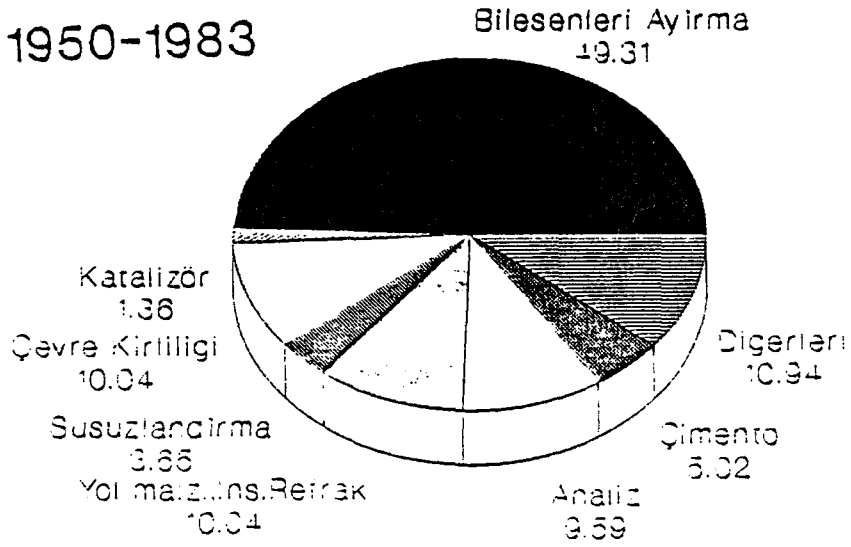
Dünyada kırmızı çamurun değerlendirilmesi konusundaki çalışmalar 1950'li yıllarda başlamıştır. Bu tarihten itibaren 1983 yılına kadar yapılan çalışmaların % 50 'sini " kırmızı çamurun içerdiği bileşenlerin ayrı ayrı kazanılması" konusu oluşturmuştur. Bu araştırmalar sonucunda, teknik olarak mümkün fakat bugünkü şartlarda ekonomik olmayan ve bu nedenle de tesis ölçeğinde uygulanamayan çok sayıda yöntem geliştirilmiştir. Bu konunun yanında kırmızı çamurun başka kullanım alanları da araştırılmaya başlanmış ve halen de araştırmalar devam etmektedir.

1950 yılından bugüne kadar yapılan çalışmaların konulara göre dağılımı Tablo 2.5 ve Şekil 2.3'de verilmiştir (11).

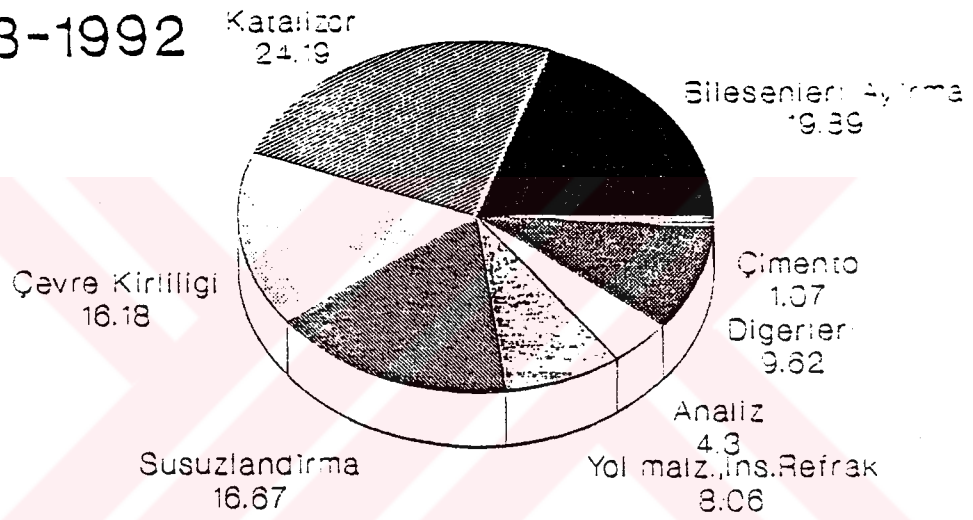
Tablo 2.5. 1950 - 1992 yılları arasında kırmızı çamurla ilgili olarak dünyada yapılan çalışmalar.

	1950-1983		1983-1992		1950-1992	
KONU ADI	Adet	%	Adet	%	Adet	%
1. Bileşenleri ayırma	108	49.31	37	19.89	145	35.8
2. Çevre kirliliği	22	10.04	30	16.13	52	12.82
3. Katalizör olarak	3	1.36	45	24.19	48	11.85
4. Susuzlandırma	8	3.65	31	16.67	39	9.63
5. Yol malz., dolgu, kil, inşaat, gübre, ref.	22	10.04	15	8.06	37	9.14
6. Analiz	21	9.59	8	4.30	29	7.16
7. Çimento	11	5.02	2	1.07	13	3.21
8. Boya ve diğer	6	2.74	6	3.22	12	2.96
9. NaOH azaltma	7	3.20	2	1.07	9	2.22
10. Kompozitler	3	1.37	6	3.22	9	2.22
11. Birikitleme	5	2.28	-	-	5	1.20
12. Taşıma	-	-	3	1.61	3	0.70
13. Liçing	1	0.45	1	0.50	2	0.50
14. Zeta pot. ölç.	2	0.90	-	-	2	0.50
TOPLAM	219	100.00	186	100.00	405	100.00

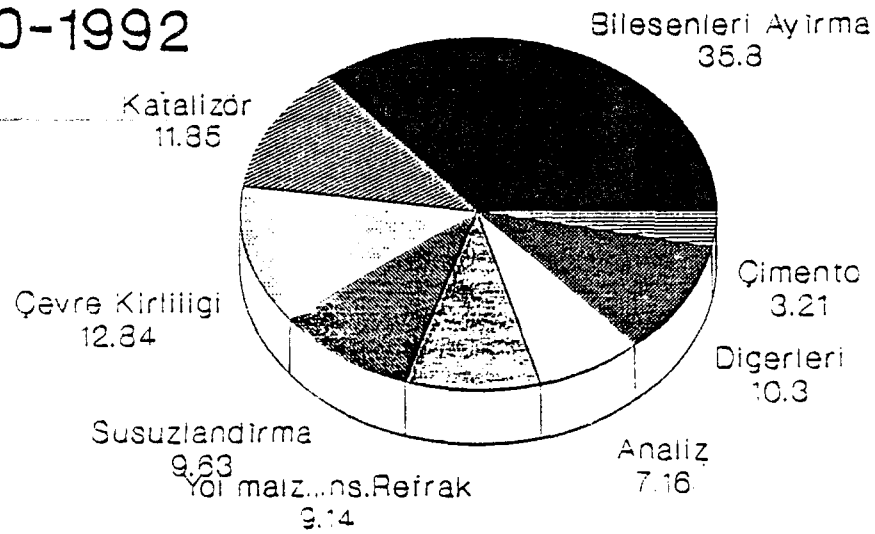
1950-1983



1983-1992



1950-1992



Şekil 2.3. Kırmızı çamur üzerine yapılan araştırmaların dağılımı (%).

Kırmızı çamurun tek başına veya katkı malzemeleriyle tuğla yapımında kullanımı ile ilgili yapılan araştırmaların bir kısmı aşağıda özetlenmiştir.

Knight, J.C. ve grubunun yapmış olduğu çalışmada, tane boyutu 75 μm 'dan az olan Jamaica kırmızı çamuru (% 51.5 Fe_2O_3 , % 15.0 Al_2O_3 , % 1.7 SiO_2 , % 6.7 TiO_2 , % 7.0 CaO , % 0.97 Na_2O , % 0.83 P_2O_5 ve A.Z. % 9.3) uygun su ilavesi ile hamur haline getirildikten sonra, 3.22 MPa'lık (32.2 kg/cm^2) basınçta ve oda sıcaklığında hidrolik bir presle 3.8 mm x 10.5 mm x 60.4 mm boyutunda çubuk halinde preslenmiştir. Preslenmiş çubuk halindeki numuneler, bünye suyunu terketmesi için etüvde kurutulmuştur. Sonra 300°C/h hız ile ısınan bir elektrikli fırında 3 saat süre ile 25°C'lik aralıklarla 1000-1100°C sıcaklıklarda pişirilmiştir. Daha sonra bu numunelerin mekanik ve fiziksel özellikleri tesbit edilmiştir.

Üç nokta eğme testi (MOR) 3.8 mm x 10.2 mm x 57.6 mm boyutlu numunelerde yapılmış ve 17.23 - 27.09 MPa arasında değişen değerler elde edilmiştir. Basma dayanımı ise, 3.8 mm x 10.2 mm x 28.9 mm boyutlu numunelerde yapılmış ve 42 - 83.9 MPa değeri elde edilmiştir. Tokluk $0.39 - 0.68 \text{ MPa.m}^{1/2}$, 26-60 BSD, bulk yoğunluk $2.1 - 2.35 \text{ gr/cm}^3$, hacimce azalma % 5-20 ve porozite % 40-48 olarak elde edilmiştir (12).

Arjundass, S.K. Malhotra'nın yapmış olduğu çalışmada, Hindistan Alüminyum Şirketi'nden elde edilen kırmızı çamur (% 26.4 Fe_2O_3 , % 26.24 Al_2O_3 , % 6.55 SiO_2 , % 22.1 TiO_2 , % 3.5 CaO , % 4.2 Na_2O ve K_2O ve A.Z. % 10.81) değişik oranlarda (% 0 - % 25 - % 50) kum ilavesi ile % 25 uçucu kül ilave edilmiştir. Ayrıca her bir gruba % 5 ve % 8 oranlarında kireç ilave edilmiştir. Optimum su ilavesi ile yarı kuru hale gelen karışım, el ile yaklaşık 4 MPa'lık basınçta preslenmiştir. Bu tuğlalar kalıptan çıktıktan sonra açık havada ve 28 gün süreyle nemli bir ortamda prizlendirilmeye bırakılmıştır. Bunun sonucunda

maksimum basma dayanımı % 100 kırmızı çamur + % 5 kireç olan karışımda 3.15 MPa, % 8 kireç ilaveli olan karışımda 4.22 MPa basma dayanımı elde edilmiştir. Bulk yoğunluk $1.66 - 1.68 \text{ gr/cm}^3$, su emme oranı ise % 22 tesbit edilmiştir (13).

Paolo Amat di San Filippo ve Giorgio Usai'nin gerçekleştirmiş olduğu çalışmada ise, İtalya'da bulunan Portovesme Euroallumina İşletmesi'nden alınan kırmızı çamur (% 32.8 Fe_2O_3 , % 25.9 Al_2O_3 , % 10.8 SiO_2 , % 8.7 TiO_2 , % 2.1 CaO , % 6.0 Na_2O ve A.Z. % 7.7) 105°C 'de 24 saat kurutulup 0.25 mm'lik elekten elendikten sonra değişik oranlarda Waels fırın cürufu, florit artığı, volkanik tüf, refrakter kili, tuğla kili, amorf silisik asit, Imperial ergitme prosesi cürufu ve borik asit (H_3BO_4) ile karıştırılarak 1 cm yüksekliğinde, 1.6 cm çapında silindirik numuneler hazırlanmıştır. Presleme basıncı karışımın özelliğine bağlı olarak 95,0-475,2 MPa arasında değişmektedir. Silindir numuneler 105°C 'de 12 saat kurutulmuş ve 950°C , 1080°C , 1200°C ve 1400°C sıcaklıklarda pişirilmiştir. Basma dayanımı açısından numuneler incelendiğinde, kırmızı çamurdan tek başına bir seramik malzemenin yapılabileceği, katkılı olarak yapılan deneylerde ise, tuğla kili ile oluşan karışımın diğer katkılı örneklerle nazaran daha iyi sonuç verdiği tesbit edilmiştir. Fakat en iyi basma dayanımı, kırmızı çamura borik asit ilavesiyle yapılan deneylerde elde edilmiştir. Burada basma dayanımı % 5 H_2BO_3 ilavesiyle 50,5 MPa'dır (14).

Gerhard Bayer tarafından alınan patentte ise, kırmızı çamura (% 25.0 Fe_2O_3 , % 25.0 Al_2O_3 , % 17.0 SiO_2 , % 6.8 TiO_2 , % 2.9 CaO , % 11.0 Na_2O) % 50-92 oranında kil (kaolin) malzemesi karıştırılmış ve % 18-25 arasında su ilave edildikten sonra 600-700 mmHg'lık vakumlu basınçta preslenmiştir. Preslenmiş numuneler 70°C 'nin altındaki bir sıcaklıkta ısıtılmış gaz ile kurutulmuş ve 900-1000 $^\circ\text{C}$ aralığında pişirilmiştir. Sonuç olarak, 950°C pişirme sıcaklığında 40 MPa (400 kp/cm^2) gibi en yüksek basma dayanımına ulaşmıştır (15).

Yine aynı kişinin başka patentine göre, 50 ton kırmızı çamur ile 7.5 ton kil karıştırılmış ve 0.824 MPa (8 atm) basınç altında preslenmiştir. Preslenmiş ham tuğlalar tünel bir kurutucuda % 4 su içeriğine kadar 24 saat 45° C'de kurutulmuş, daha sonra 980-1000° C arasındaki bir sıcaklıkta 20 saat fırında pişirilmiş ve tuğlalarda çatlak olup olmadığı gözlenmemiştir. Pişmiş tuğlaların bulk yoğunluğu 0.95 gr/cm³ ve basma dayanımı 25.8 MPa (258 kg/cm²) olarak tesbit edilmiştir (16).

İkinci çalışmada ise, 25 ton kırmızı çamur ile 5.4 ton atık kil 0.927 MPa (9 atm) basınçta preslenmiş, 52° C'lik sıcaklıkta tünel fırında 22 saat kurutulmuş ve 1000-1020° C sıcaklık aralığında 20 saat süre ile pişirilmiştir. Pişirilmiş tuğlanın bulk yoğunluğu 1.25 gr/cm³, basma dayanımı ise 51 MPa (510 kg/cm²)'dır (16).

Gregory Onyemauwa Iwu tarafından alınan patentte, sadece sodyum içeriğini azaltmak için kırmızı çamur hidroklorik asit ile muamele edilmiştir. Bu kırmızı çamur % 10 kaolinitik kil ile karıştırılıp 3.7 x 3.7 x 3.7 cm boyutlu küp şeklinde preslenmiş ve 1140° C'de pişirilmiştir. Pişirilmiş numunenin basma dayanımı 80 MPa (1200 psi) ve su içeriği % 0.88 olarak tesbit edilmiştir.

İkinci çalışmada ise, % 80 kırmızı çamur ile % 20 kaolinitik kil aynı şekilde hazırlanarak pişirilmiştir. Bu numunenin basma dayanımı ise 70 MPa (10000 psi) ve su içeriği % 1.35'dir (17).

Ferenc Puskas tarafından alınan patentte, % 51-90 oranında kırmızı çamur ile % 10-49 oranında silikat içeren malzeme (serpantin-Mg₆(OH)₈Si₄O₁₀, volastonit-CaSiO₃, silimanit-Al₂SiO₃, zirkon-ZrSiO₄, forsterit-Mg₂SiO₄, ortoklas-KAlSi₃O₈, anortit-CaAl₂Si₂O₈) karıştırılarak şekillendirilmiştir. Bu şekilde hazırlanmış numunelerden yapılacak olan tuğla, normal tuğla ise 950-1050° C, yüzey tuğlası ise 1050-1150° C, duvar kaplama malzemesi ise 1000-1100° C, porözlü duvar karoları

ise 1050-1150° C, porözsüz duvar karoları ise 1100-1200° C, hafif mikroporlu karolar ise 1000-1080° C, ısı yalıtımlı tuğla ise 1000-1200° C, ateş tuğlası ise 1150-1250° C sıcaklık aralığında pişirilmesi gereklidir. Buna göre normal tuğlalarda 10-20 MPa (100-200 kp/cm²) basma dayanımı, 1.0 - 1.5 gr/cm³ bulk yoğunluk ve % 10-15 su emme içeriği elde edilmiştir. Bu değerler sırasıyla yüzey tuğlasında 20-37.3 MPa, 1.5-2.5 gr/cm³ ve % 5-10; duvar kaplama malzemesinde 15-20 MPa, 1.25-1.75 gr/cm³ ve % 10-20; porözlü duvar karolarında 25-50 MPa, 1.5-2.25 gr/cm³ ve % 4-8; porözsüz duvar karolarında 50-150 MPa, 2.3-2.7 gr/cm³ ve %0-3; hafif mikroporlu duvar kaplamalarında 1.1-1.5 gr/cm³ ve % 0-1'dir. Isı dirençli tuğlalarda 5-15 MPa basma dayanımı, 0.8-1.3 gr/cm³ bulk yoğunluk, % 45-70 porozite ve 1150-1200° C ısı direnci elde edilmiştir. Ateş tuğlasında ise 20-50 MPa basma dayanımı, 2.0-2.8 gr/cm³ bulk yoğunluk ve 1300° C ısı direnci elde edilmiştir (18).

2.6. Kırmızı Çamurun Potansiyel Kullanım Alanları

Kırmızı çamurun değerlendirilmesi üzerine yapılan çalışmalar sonucunda, bu atığın kullanılabileceği bir çok alan tesbit edilmiştir. Sözkonusu kullanım alanlarını şu şekilde özetlemek mümkündür (11).

1. Kırmızı çamurun inşaat sektöründe kullanılması

- Çimento üretimi,
- Tuğla, kiremit ve seramik malzemesi yapımı,
- Hafif yapı malzemesi yapımı,
- Toprakların geliştirilmesi ve yol inşaatı.

2. Kırmızı çamurun kimya sektöründe kullanılması

- Gazlardan ve sıvılardan S, SO₂, H₂S, vs. giderilmesinde absorbant olarak kullanımı,
- Kauçuk ve plastik endüstrisinde dolgu malzemesi olarak kullanılması,
- Renkli camlarda kullanımı,
- Pigment olarak kullanımı,
- Evsel atık suların temizlenmesinde flokülant olarak kullanımı,
- Katalizör olarak kullanımı.

3. Kırmızı çamurun içindeki sadece bir bileşenin geri kazanılması

- Demirin geri kazanılması,
- Alkali kazanılması,
- TiO₂ ve düşük miktarlardaki diğer bileşenlerin geri kazanılması,

4. Kırmızı çamurun içindeki birden fazla bileşenin geri kazanılması

- Kırmızı çamurun ergitilmesi,
- Direkt indirgeyici ergitme,
- Kireç ile indirgeyici ergitme,
- Karbon, soda, kireç ile sinterleşme,
- Direkt karbon, soda ve kireç ile sinterleme,
- İndirgeyici ergitme proseslerinden demirin ayrılmasından sonra cürufun kireç ve soda ile sinterleştirilmesi,
- Krupp-Renn yöntemi ve seri halinde kombine Macar yöntemi,
- Kırmızı çamurun SO₂ ve SO₃ içeren gazlarla işlendiği prosesler,
- Kırmızı çamurun doğrudan doğruya asit veya alkali ile özütlendiği prosesler.

BÖLÜM 3. TUĞLA TEKNOLOJİSİ

3.1. Tuğla Hammaddesinin Oluşumu ve Aranması

Tuğla - kiremit imaline elverişli topraklar ya alterasyon örtülerinde, ya Plio-Kuaterner yaşlı alüvyonlarda veya Neojen havzalarının üst seviyelerinde aranır. Alterasyon örtüleri, ya yerinde oluşmuşlardır veya çok az yer değiştirmeye maruz kalmışlardır. Bunların kalınlığı genellikle birkaç metredir, bazı hallerde 20 m'ye kadar çıkan kalınlıklar görülür. Bu örtülerde malzemenin ağırlığa ve tane iriliğine göre ayrılması mümkün olmadığından bu ayırım öğütme, eleme, yıkama ve dinlendirme ile sonradan sağlanmalıdır.

Tuğla - kiremit topraklarının aranmasında göz önünde tutulacak önemli bir husus, nakliyat konusunda bir problem oluşmaması için, bulunacak yatakların tüketim merkezlerine uzaklığı 30-40 km'den fazla olmamalıdır. Çünkü bu topraklar genellikle çok ucuzdur ve fabrikanın günlük tüketimi oldukça yüksektir. Ayrıca bu topraklar düz ovalarda arandığı takdirde 3-4 metreden daha fazla derinde olmamalı, dekapaj kalınlığı ise 0.5 metreden az olmalıdır.

Bulunacak hammaddenin herhangi bir cevher hazırlama ve zenginleştirme işlemine tabi tutulmadan kullanılabilmesi arzu edilir. Eğer yıkama ve dinlendirme havuzlarına ihtiyaç varsa, bu tesislerin işletme civarında kurulması gerekmektedir.

Arama yapılacak sahada alüvyoner ovalar ve Neojen havzaları yoksa, alterasyon örtüsünün kalın olduğu bölgeler etüt edilmelidir. Kalkerli ve dolomitli Mesozoik formasyonlarının alterasyon örtüsü kuvarssız, çok plastik terra rossa halindedir ve bol karbonatlıdır. Tuğla-kiremit imaline elverişli topraklar daha çok Paleozoik ve metamormik masiflerin üzerinde aranmalıdır. Yatakların detay

etüdünde, bunların jips, kalsit, kükürt, montmorillonit, tuz, pirit, güherçile ve organik madde gibi unsurlar içermemesine dikkat edilmelidir.

Tuğla-kiremit toprakları ince taneli kumlu kil bileşimindedirler, bunlar sedimentasyon havzasının kenarlarına doğru bol miktarda iri taneli kum ve çakıl ihtiva etmeye başlarlar. Bunlar pişme esnasında tuğla ve kiremidin çatlamasına sebep olmaktadırlar. Şekillendirme kabiliyeti olan ve 1000° C civarında pişirildiğinde her türlü hava şartlarına dayanabilecek sağlamlıkta sinterleşebilen bütün killi topraklar tuğla-kiremit imaline elverişlidir. Başlangıçta elverişsiz görülen topraklar birbirleriyle karıştırılarak üstün kaliteli imalat yapmak mümkündür. İri taş ve kalker parçaları içeren killer öğütülerek, işlenmesi zor olan plastik killer çamur haline getirildikten sonra bir müddet dinlendirilerek tuğla-kiremit imaline elverişli hale getirilebilirler (19).

3.2. Tuğla Hammaddesinin Özellikleri

Tuğla-kiremit topraklarının teknolojik özellikleri, mamül maddelerde aranılan ve bu konudaki standartlarda tesbit edilen özelliklere göre tayin edilir. 900-1050° C sıcaklıkta pişirildiği zaman pişme rengi kiremidi olan, sertliği en az 3-5 (Mohs) arasında bulunan, su emme oranı % 10-15'in üzerine çıkmayan ve pişme sırasında çatlamayan tuğla ve kiremitlerin üretimi için hammaddede şu özellikler aranır:

Toprağın Rengi: Sağlamlığı uygun olduğu halde rengi açık olan tuğla veya kiremitlerin ticari değeri de azdır. Topraklar fazla kalker içeriyorsa pişme rengi 900° C'nin üzerinde sarıya döner. Toprağa kırmızı rengini veren hematit ve limonit gibi demir bileşikleridir. Fakat demirin iki dereceli bileşikler halinde bulunduğu topraklar gri, sarı ve yeşilimsi görünüştedirler. Oksitleyici bir fırın atmosferinde pişirildiği zaman, mamüllerin pişme rengi yine kiremidi olur.

Toprakların sarı, yeşilimsi ve mavi renkleri TiO_2 , BiO_2 , Cr_2O_3 gibi bileşiklerden gelebilir. Kahverengi olması ise Mn bileşiklerine veya toprakta bulunması faydalı olan organik maddelere bağlıdır. Fakat bunlar kömür parçaları halinde olmamalıdır. Toprağın rengi ile pişme rengi arasında her ne kadar kesin bir bağ yok ise de, hammaddenin % 5'in üzerinede Fe bileşikleri ihtiva etmesi kiremidi rengin elde edilmesi için şarttır.

CaCO_3 İçeriği: Toprakta bulunan CaCO_3 miktarı % 25-35' ten fazla olmamalıdır. Kalkerin iri parçalar halinde bulunması da mahzurludur. Çünkü bunlar fırında yanmış kireç, daha sonra da rutubetin etkisiyle de sönmüş kireç haline gelirler. Bu olay hacim büyümesine sebep olur, fakat 2 mm'ye kadar öğütme yapılıncaya bu mahzur ortadan kalkar. CaCO_3 toprağın erime ve sinterleşme derecelerini birbirine yaklaştırdığından bol kireç bulunması fırınlarda pişme tekniğini güçleştirir. Ayrıca sağlamlığı ve sinterleşmeyi artırmak için pişme ısısı artırıldığında CaCO_3 'ın etkisiyle kiremidi renk kaybolur. Fazla kireçli topraklardan yapılan ürünlerin porozitesi ve su emme özelliği artar, dona mukavemeti ise azalır.

Tane Boyutu: Teknolojik etütlerde 3 mm'den ve 0.2 mm'den iri tanelerin yüzdesi tesbit edilir. Bu tesbit kabaca arazide de yapılabilir. Eğer 3 mm'den büyük tanelerin toplamı % 1'den fazla ise pişme sırasında çatlamalar görüleceğinden bunların önceden elenip ayrılması veya öğütülmesi gerekmektedir.

Diğer Safsızlıklar: Killerde, suda eriyen tuzlar, mikalar, kükürt, jips, pirit gibi unsurlar bol miktarda bulunmamalı veya kullanılacak sulardan ve yakacak maddelerinden gelmemelidir. Aksi halde mamüller pişerken çatlarlar, çiçeklenirler, dona ve basınca dayanımları azalır, su emme oranları da büyük olur.

Plastisite Özelliği: Tuğla-kiremit imalinde kullanılacak toprakların plastisite suyu % 25-35 arasında bulunmalıdır. Fazla yağlı killer kururken ve pişerken çatlamalara sebep olurlar, çok kumlu killerin ise kalıplanması zordur. Kumlu ve yağlı killer % 25 su ile normal plastik hale gelecek şekilde karıştırılarak iyi bir hammadde elde edilebilir (19).

3.3. Tuğla Üretim Yöntemi

Türkiye’de mevcut tuğla fabrikalarının önemli bir bölümü halen, modern anlamda üretim yapmamaktadır. Tesislerin büyük çoğunluğu geleneksel ve yarı modern anlamda çalışmaktadır. Modern ve yarı modern tesislerde, stok sahasına getirilen tuğla toprağı, sulanıp karıştırılarak homojen hale getirilir veya başka bir deyişle toprak ekşitilir. Ekşitilmiş toprak tezek kırıcılarda 2 cm’nin altına, ezicilerde ise 3 mm’nin altına kırılır. Helozon şeklindeki yoğurucularda su ilavesiyle hamur haline getirildikten sonra, ezici denilen silindirlerden geçirilerek tane boyutu 2 mm’ nin altına indirilir. Bu duruma gelmiş toprak artık preslenmeye hazırdır. İçinde bir pervaneli itici bulunan ve vakumla hamur içindeki havayı emen presleme cihazında hamur preslenir. Bu cihazın çıkış kısmında üretilcek tuğla tipinin kalıbı bulunur. Bu kalıptan pervaneli itici vasıtasıyla çıkarılan tuğla hamuru, tel kesicilerle belirli uzunlukta kesilir. Kesilen tuğlalar arabalara yerleştirilerek, nem ve sıcaklık oranı ayarlanmış havanın gönderildiği odalarda ya da tünellerde kurutulur. (Geleneksel tesislerde kurutma işlemi açık havada yapılmaktadır.) Bu hava, ürünlerin biçimini bozmadan ya da hiçbir çatlama olmadan, işlemin süresini önemli ölçüde azaltır. Pişirme işlemi için sürekli fırınlar kullanılır. Bu fırınlarda ya ateş hareketli, ürünler sabittir (Hoffmann fırını) ya da ürünler hareketli, ateş sabittir (tünel fırın). Pişirme sıcaklığı 950-1100° C arasındadır. Yakıt olarak linyit ve fuel-oil kullanılmaktadır. Burada kullanılan fırınları biraz daha açıklamakta fayda vardır.

Tuğla üretiminde belli başlı üç pişirme sistemi vardır:

1. Kamara odalar sistemi
2. Hoffmann sistemi
3. Tünel fırın sistemi

Ülkemizde bu sistemlerin her üçünün de mevcut olmasına rağmen birincisi ve ikincisi kavram olarak birbirinden farklı değildir. Zira Hoffmann tipi üretim sistemi, kamaralı sistem kavramı üzerine oturtulmuş ancak daha geliştirilmiş bir sistemdir. Birinci sistemde tuğlalar kamara şeklinde odacıklarda pişirilmektedir. Kamaralar doldurulup ateşlenmektedir. Pişme ve soğuma uzun sürmektedir. Bu sistemle çalışan tesislerin kapasiteleri düşüktür ve sun'i kurutma üniteleri yoktur.

Hoffmann sistemi de kamara odalar sistemine benzemektedir. Birinciyle farkı yakma sisteminin özel bir eksen üzerinde toplanmış olmasıdır. Oval bir eksen etrafında teşkil edilen kamaralar içinde gezdirilen yakma klapeleri pişirme işlemini sağlamaktadır. Bir tarafta pişirme tamamlanırken diğer tarafta soğuyan bölümlerden boşalma işlemi yapılmaktadır. Yaklaşık 1000° C düzeyine çıkarılan pişirme sıcaklığı, boşaltma işlemini gerçekleştirmek için insanların odacıklara girebileceği düzeye ($\sim 50^\circ \text{C}$) düşürülmektedir. Görüldüğü gibi hem bu sistemde hem de kamara odalar sisteminde önemli ölçüde bir ısı kaybı meydana gelmektedir.

Modern nitelikli tesisler, tuğla üretiminde en gelişmiş teknolojiyi oluşturan tünel fırın sistemiyle çalışmaktadırlar. Tünel fırın sisteminde kanal şeklindeki fırın iki bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm pişirme, ikinci bölüm soğuma kısmıdır. Çiğ tuğla doldurulmuş arabalar fırın içinde yavaşça hareket ederken, tuğla pişme ve soğuma işlemlerini sırasıyla geçirmektedir. Pişme ve soğuma işlemleri aynı yerde ve sürekli bir prosesle tamamlandığı için ısı kaybı olmamaktadır (20).

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

4.1.1. Deney Hammaddeleri

Kırmızı çamur, Seydişehir Alüminyum Fabrikasında atık barajına pompalandığı yerdeki tikiner çıkışından alınmıştır. Sıvı/katı oranı 2.5 olan çamur plastik bidonlara doldurularak TUBİTAK'a getirilmiştir. Burada etüvde tamamen kurutulmuş ve oluşan kesek kırılarak 1 mm'lik elekten elenmiştir. Bu şekilde hazırlanan kırmızı çamur konileme-dörtleme yöntemiyle azaltılmış ve deneylerde kullanılacak miktarda poşetlenmiştir.

Deneylerde kırmızı çamura ilave edilecek olan marn ve serpantin numuneleri ise Mortaş ve Doğankuzu boksit yatağının bulunduğu çevre formasyonlardan, örtü tabakası kaldırıldıktan sonra, sabit aralıklarla alınmıştır. Torbalara doldurularak TUBİTAK'a ulaştırılan numuneler, çeneli ve merdaneli kırıcıda kırılmış ve konileme-dörtleme yöntemiyle azaltılarak deneylerde kullanılacak miktara indirilmiştir. Deneylerde kullanılacak olan numuneler ise Fritsch Pulverisette 14.702 tipi değirmende 200 μm 'un altına öğütülmüştür.

Marn, karbonat ile kilin doğal karışımıdır. Kapsadığı kirece göre (% 20-70 arası) değer kazanır ve kireç oranı azaldıkça kile ve kilsli kireçtaşına dönüşür. Ortalama olarak % 50-70 kalker ve % 30-50 oranında kil içerir. Oluşumu bakımından tamamen sedimanter olup, genellikle muntazam tabakalı olarak bulunur. Marn kuru iken yapışkandır, dokununca yağlı olduğu anlaşılır, çok yumuşaktır ve açık havada parçalanır. Marn, çimento üretiminde doğal olarak farinin bileşimine (% 70 kalker, % 30 kil) çok yakın bulunduğu için ideal çimento hammaddesidir. Tuğla üretiminde kireç katkısı olarak da kullanılabilir.

Serpantin, genellikle magnezyum silikatların (olivin ve amfibol gibi) ayrışma ürünü olarak meydana gelir. Yeşilin tonlarına hakim olan serpantin, yarı saydam, mum yağlılığındaki parlaklığı ve lifsel görünümüyle tanınır. Genel olarak bileşimi $Mg_6(Si_4O_{10})(OH)_8$ 'dır. % 43.0 MgO, % 44.1 SiO_2 ve % 12.9 H_2O içerir. Masif serpantin güzel rengi ile süs taşı, bazen de inşaat malzemesi olarak kullanılır(21,22).

Deneylerde kırmızı çamura ilave olacak tuğla hammaddesi ise, yörede bulunan bir tuğla fabrikasından temin edilmiş olup, yatağı Seydişehir'deki Küpe Dağı'nın etekleridir. Sözkonusu numune hem fabrikanın stok sahasından hem de vakumlu prese girecek olan hamurdan alınmış, poşetlere doldurularak orjinal nemi muhafaza edilmiştir. Bu şekilde TÜBİTAK'a nakledilen tuğla hammaddesi Fritsch Pulverisette 14.702 tipi değirmende $200 \mu m$ 'un altına öğütülerek deneylere hazır hale getirilmiştir.

4.1.2. Kullanılan Cihazlar

Deneylerde kullanılan cihazlar aşağıda belirtilmiştir.

- Fritsch Pulverisette 14.702 tipi Değirmen
- AAS (atomik absorpsiyon cihazı)
- Philips 1050/25 SW model XRD (X-ray diffraction) Cihazı
- Netzsch Marka DTA-TG (diferansiyel termal analiz-termal gravimetri)
- Micromeritics Model Autopycnometer 1320 Yoğunluk Cihazı
- Micromeritics Model Sedigraph 5000 D Tane Boyut Dağılım Cihazı

4.2. Malzemelerin Özelliklerinin Belirlenmesi

4.2.1. Kimyasal Özellikler

Deneylerde kullanılan numunelerin kimyasal analizi Perkin Elmer 2380 model AAS'de (atomik absorpsiyon cihazı) ve diğer kimyasal yöntemlerle yapılmış ve sonuçlar Tablo 4.1'de verilmiştir. Bu tablodan da görüldüğü gibi, deney numuneleri sinterleme sonrası camsı faz oluşturan SiO_2 , CaO , Na_2O gibi oksitleri içermektedir. Bu özellik kırmızı çamurdan dayanıklı yapı malzemesinin üretilebileceğini göstermektedir (23,24).

4.2.2. Mineralojik Analiz

Deneylerde kullanılan numunelerin mineralojik analizi, Philips 1050/25 SW model XRD (X-ray diffraction) cihazında yapılmış ve sonuçlar Tablo 4.2 ve Şekil 4.1'de verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi, deneylerde kullanılan kırmızı çamur hematit ve sodyum alüminyum silikat hidrat bileşiklerinden; marn, serpantin ve tuğla hammaddesinin ise çeşitli kil minerallerinden meydana gelmiştir.

Tablo 4.1. Deney numunelerinin kimyasal analizleri.

Bileşik %	Kırmızı Çamur	Marn	Serpantin	Tuğla Ham.	İdeal Tuğ.Ham.
Al_2O_3	20.20	8.51	8.50	12.59	min 15.0
Fe_2O_3	35.04	5.66	5.65	6.10	min 5-6
CaO	5.30	13.65	13.54	0.85	max 15.0
SiO_2	13.50	41.55	41.37	65.59	min 40.0
Na_2O	9.40	0.72	0.55	0.49	
K_2O	0.39	1.68	1.48	1.67	
TiO_2	4.00	0.62	0.77	0.73	
MgO	0.33	8.50	5.98	0.53	
A.Z.	8.44	16.05	17.88	6.77	

Tablo 4.2. Deney numunelerinin mineralojik analizi.

Mineral Adı	Formülü	Kırmızı Çamur	Marn	Serpan-tin	Tuğla Ham.
Hematit	Fe_2O_3	X			
Sod.alüminyum silikat hidrat	1.08 Na_2O Al_2O_3 1.68 SiO_2 1.81 H_2O	X			
Kuars	SiO_2		X	X	X
Kaolinit	$Al_2Si_2O_5(OH)_2$		X	X	X
Montmorillonit	$Ca(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2xH_2O$		X	X	X
Feldspat(Albit)	$NaAlSi_3O_8$		X	X	X
Kalsit	$CaCO_3$		X	X	
Muskovit	$KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$		X	X	
İllit					X

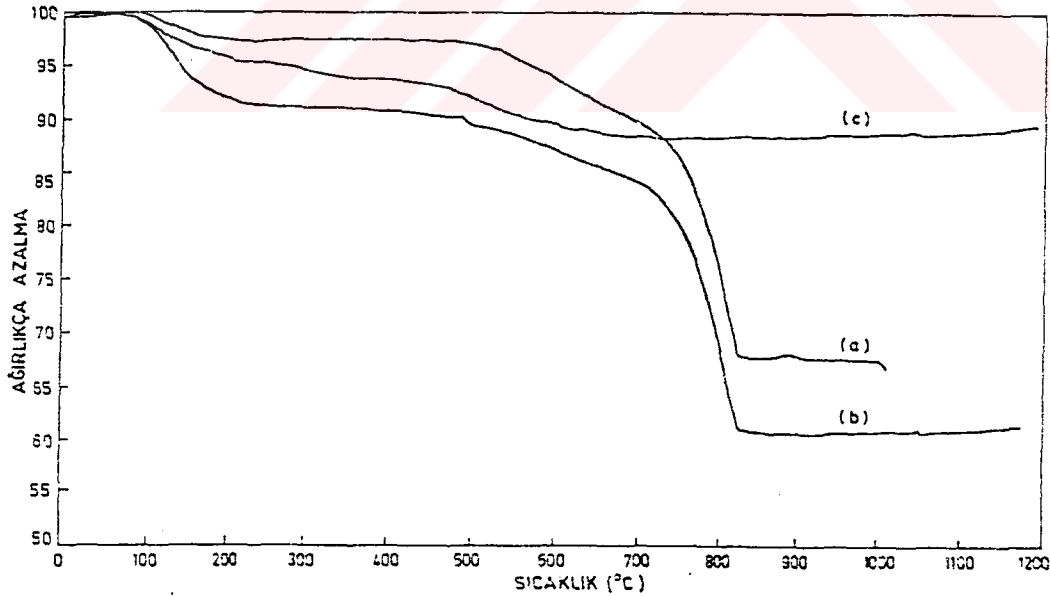
4.2.3. Ağırlık Kaybı Ölçümleri

Deneylerde kullanılan numunelerin ağırlık kaybı Netzsch Marka DTA-TG (diferansiyel termal analiz-termal gravimetri) cihazında yapılmış ve Şekil 4.2'de görüldüğü gibi şu şekilde özetlenmiştir:

1. Marn numunesinde 800°C 'de karbonatların parçalanması nedeniyle önemli ölçüde ağırlık kaybı vardır.

2. Serpantin numunesinde $200-400^{\circ}\text{C}$ arasında killerin su kaybetmesi, 800°C 'de ise karbonatların parçalanması nedeniyle ağırlık kaybı vardır.

3. Tuğla hammaddesinde sadece killerin su kaybetmesiyle ağırlık kaybı vardır.



Şekil 4.2. Deney numunelerinin sıcaklığa bağlı olarak ağırlıkça azalma grafiği.

a) Marn, b) Serpantin, c) Tuğla hammaddesi

4.2.4. Yoğunluk Tayini

Deney numunelerinin yoğunlukları Micromeritics Model Autopycnometer 1320 cihazında ölçülmüş ve 5 okumanın ortalaması alınmıştır. Sonuçlar Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3. Deney numunelerinin yoğunlukları.

NUMUNE ADI	ORTALAMA YOĞUNLUK (gr/cm ³)
Kırmızı Çamur	3.201
Marn	2.737
Serpantin	2.698
Tuğla Hammaddesi	2.733

4.2.5. Radyoaktivite Testi

Kırmızı çamur tozu ile piyasadan temin edilen delikli tuğla tozunda radyoaktivite içeriği, Çekmece Nükleer Araştırma Merkezi’nde yapılmış ve sonuçlar Tablo 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.4. Kırmızı çamurun radyoaktivite içeriği.

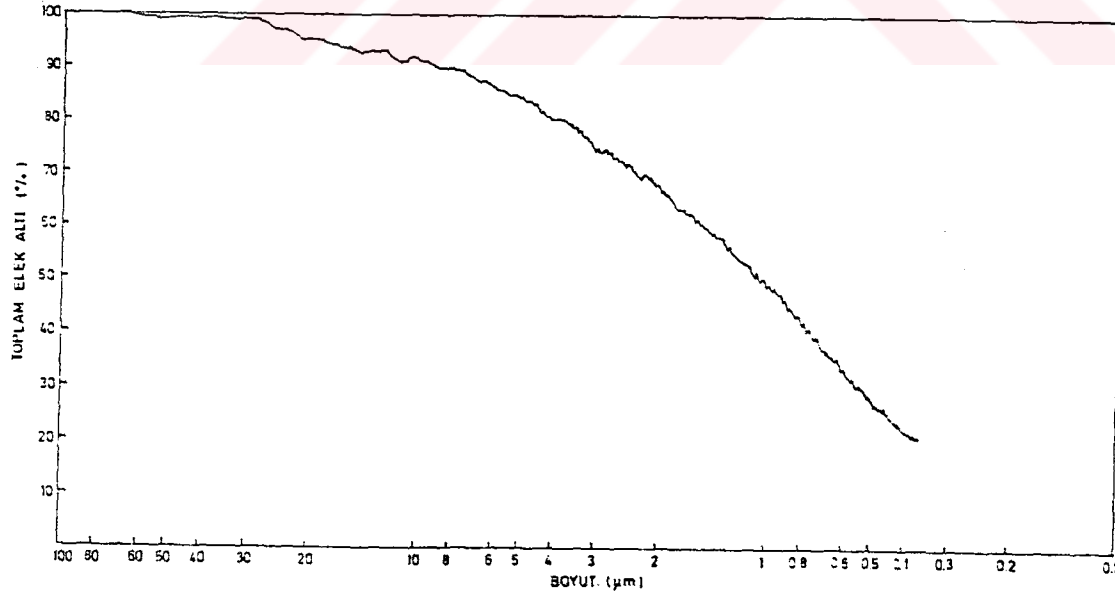
TUĞLA ÇEŞİDİ	RADYOAKTİVİTE İÇERİĞİ
Delikli Tuğla Tozu	343 bekerel/kg
Kırmızı Çamur Tozu	690 bekerel/kg

4.2.6. Tane Boyut Dağılımı

Kurutularak toz haline getirilmiş numunelerin tane boyut dağılımı Micromeritics Model Sedigraph 5000 D cihazı ile belirlenmiştir. Test sonucunda kırmızı çamurun % 92'sinin 10 mikrondan daha küçük olduğu görülmüştür. Marn, serpantin ve tuğla hammaddesi numuneleri öğütülerek tamamı 200 mikronun altına indirilmiştir. Sonuçlar Tablo 4.5 ve Şekil 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.5. Kırmızı çamurun tane boyut dağılımı.

BOYUT	MİKTAR
- 50 + 10 μm	% 8
- 10 + 1 μm	% 42
- 1 μm	% 50



Şekil 4.3. Kırmızı çamur numunesinin tane boyut dağılım grafiği.

4.3. Deneylerin Yapılışı

4.3.1. Kırmızı Çamur - Marn Deneyleri

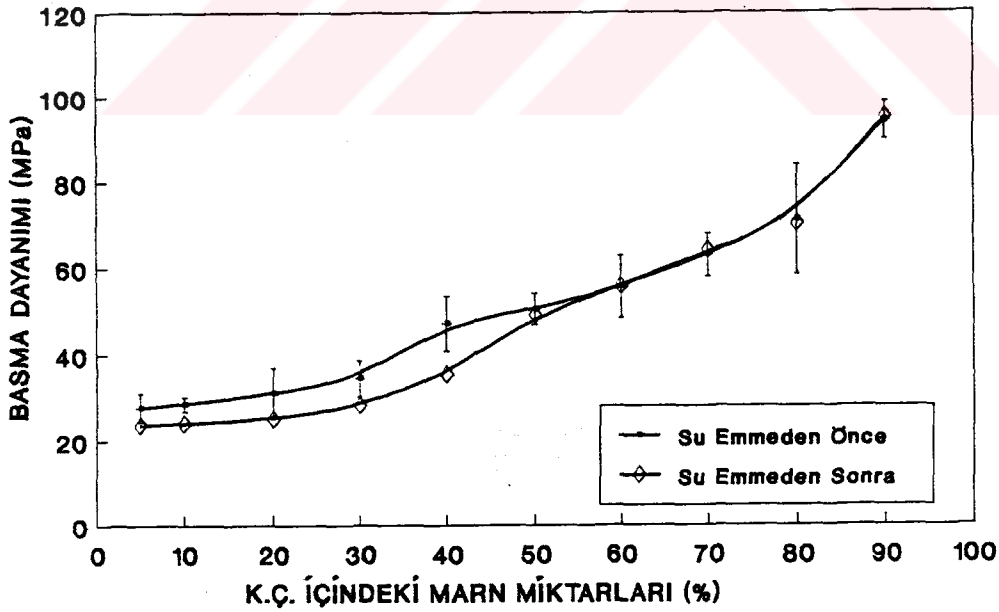
4.3.1.1. Karışım Oranının Tesbiti

Deneyler için hazırlanmış kuru haldeki kırmızı çamur, değişik oranlardaki (% 0-5-10-20-30-40-50-60-70-80-90) serpantin numunesiyle Wab T2C cihazında 2 saat süre ile karıştırılarak karışımın homojenliği sağlanmıştır. Bu şekilde hazırlanmış karışımdan 3.2 MPa (32 kg/cm^2)'lık sabit basınçta 15 adet çubuk numune preslenmiştir. Bu numuneler 1150°C 'lik sabit sıcaklıkta 4 saat süre ile pişirilmiştir. Daha sonra 5 adet numunede, Instron 1150 cihazında, basma dayanımı deneyi ile 5 adet numunede üç nokta eğme deneyi yapılmıştır. Hesap yolu (EK-1) ile numunenin tokluğu tesbit edilmiştir. Kırılmış numunelerde sertlik ve porozite, 5 adet numunede ise TS-704'e göre su emme testi* yapılmıştır. Ayrıca su emme testi yapılan numunelerde, basma dayanımında azalma olup olmadığını tesbit etmek için, tekrar basma dayanımı deneyi yapılmış ve bir önceki basma dayanımı değerleri ile kıyaslanmıştır. Bu testlere ilave olarak numunelerin pişirilmeden ve pişirildikten sonra boyutları ve ağırlıkları ölçülerek hacimce ve ağırlıkça azalma tesbit edilmiş, ortalama bulk yoğunlukları hesaplanmıştır. Elde edilen tüm deneylerin ortalaması alınarak standart sapmaları tesbit edilmiş ve sonuçlar grafik halinde düzenlenmiştir. Bu çalışmaya ait deney sonuçları Şekil 4.4-4.6'da verilmiştir.

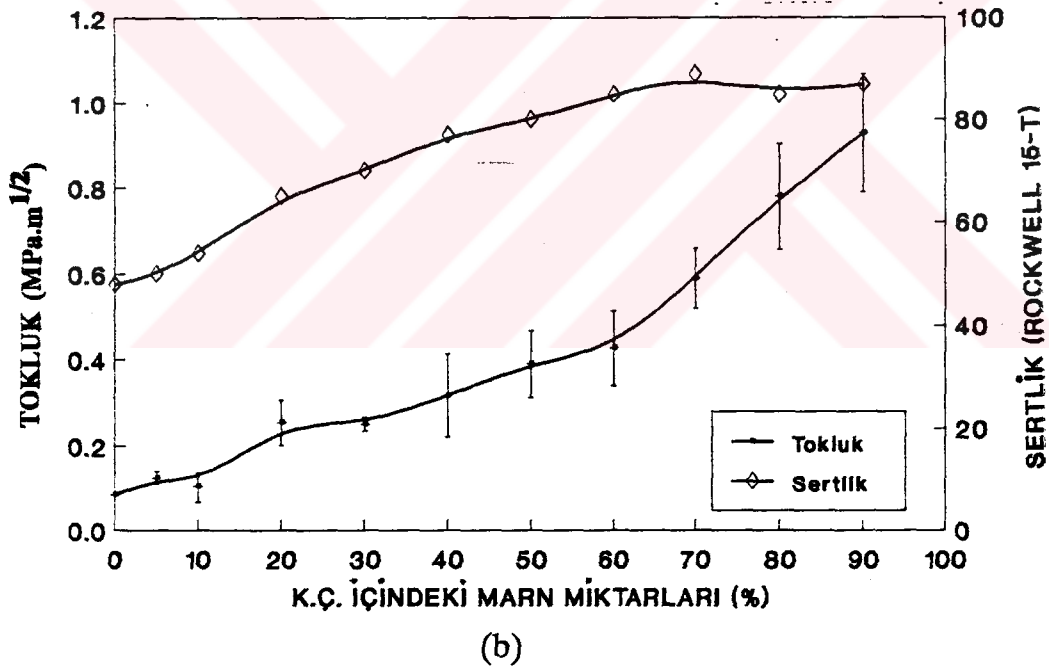
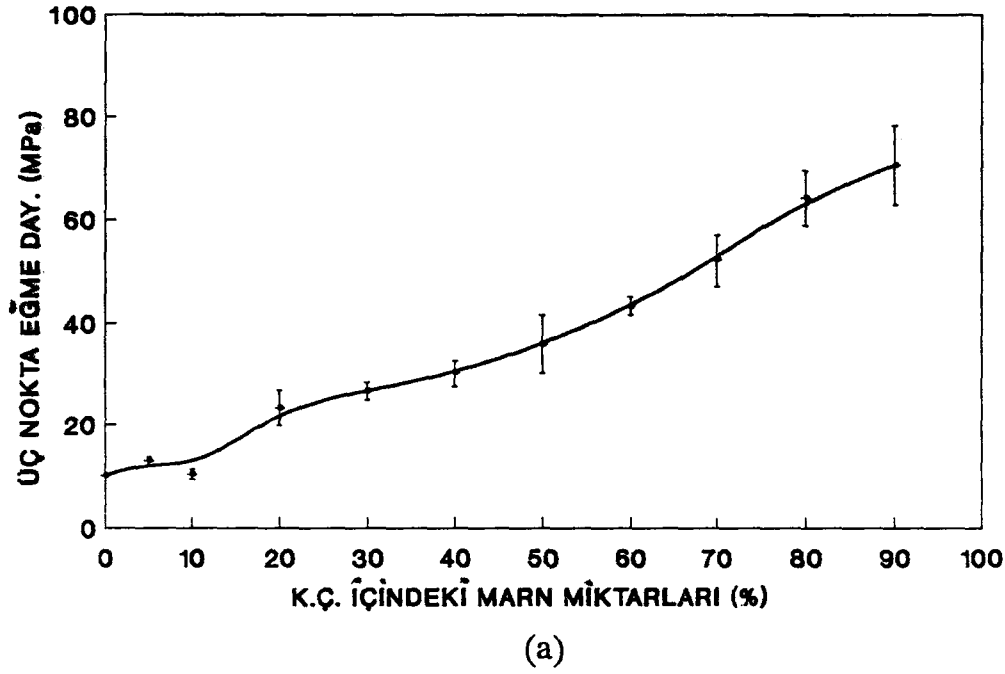
* TS-704 (Harman Tuğlası) ve TS-705 (Fabrika Tuğlası) standartlarına göre tuğlanın su emme oranı, ağırlıkça herbirinde % 20'den ve bunların aritmetik ortalamaları % 18'den çok olmamalıdır.

Bu grafikler incelendiğinde, kırmızı çamur içindeki marn miktarı arttıkça basma mukavemeti, üç nokta eğme mukavemeti ile tokluk değerleri artmaktadır. Su emme oranı ile porozite, karışım oranının artışıyla birlikte azalmakta, yarı yarıya karışımdan itibaren sıfıra kadar inmektedir. Su emme testinden sonra basma dayanımı yapılmış numuneler, testten önceki basma dayanımı ile kıyaslandığında, yarı yarıya karışıma kadar basma dayanımında % 15-20 arasında azalma olmuş fakat, bu karışımdan itibaren basma dayanımı değerlerinde fazla bir değişiklik gözlenmemiştir. Ayrıca karışım oranı arttıkça bulk yoğunluk stabil kalmış, sertlik ile ağırlıkça kayıp artmış, hacimce azalma ise düşmüştür.

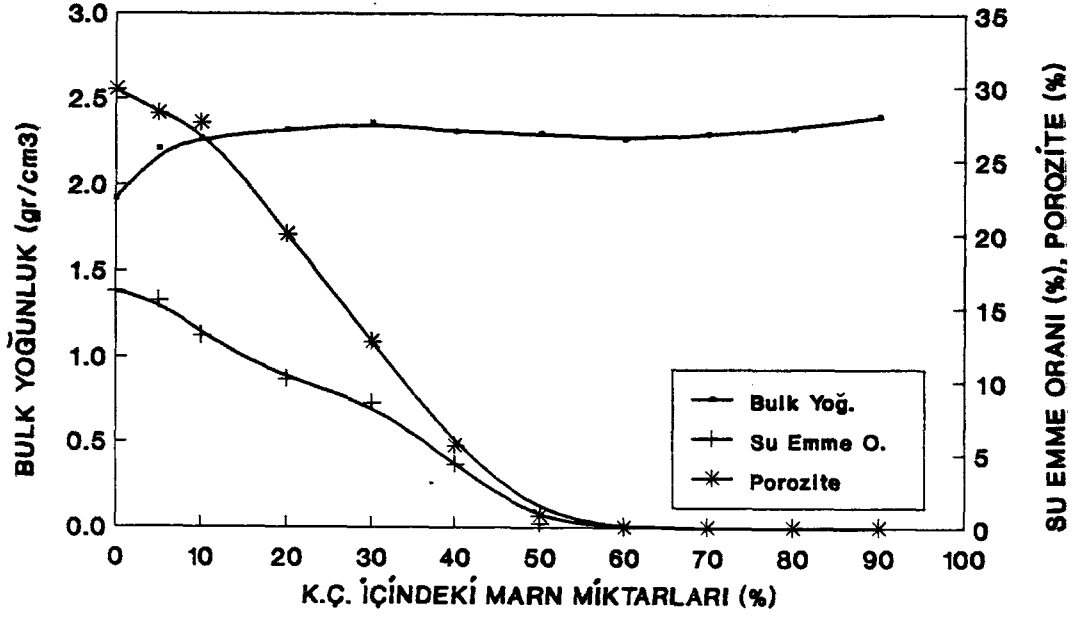
Bu çalışmada amaç maksimum kırmızı çamur kullanmak ve en iyi değerleri elde etmek olduğuna göre, elde edilen bu sonuçlardan hareket ederek, optimum karışım oranının % 50 kırmızı çamur + % 50 marn olduğu kabul edilmiştir.



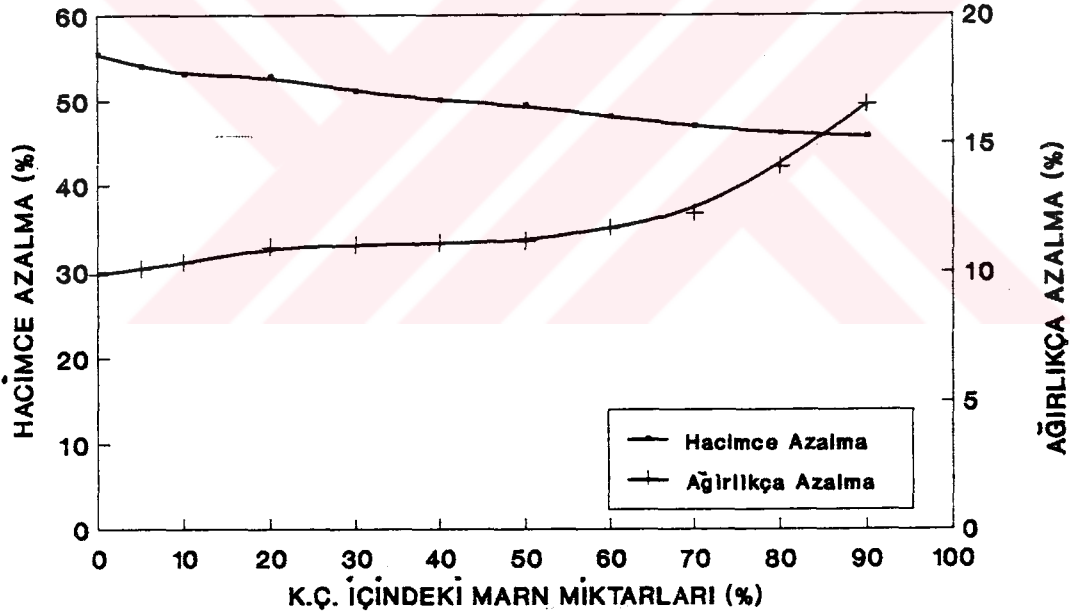
Şekil 4.4. Farklı oranlarda hazırlanmış kırmızı çamur-marn numunelerinde marn miktarına bağlı olarak basma dayanımının değişimi.



Şekil 4.5. Farklı oranlarda hazırlanmış kırmızı çamur-marn numunelerinde marn miktarına bağlı olarak,
a) Üç nokta eğme dayanımının değişimi,
b) Tokluk ve sertliğin değişimi.



(a)



(b)

Şekil 4.6. Farklı oranlarda hazırlanmış kırmızı çamur-marn numunelerinde marn miktarına bağlı olarak,

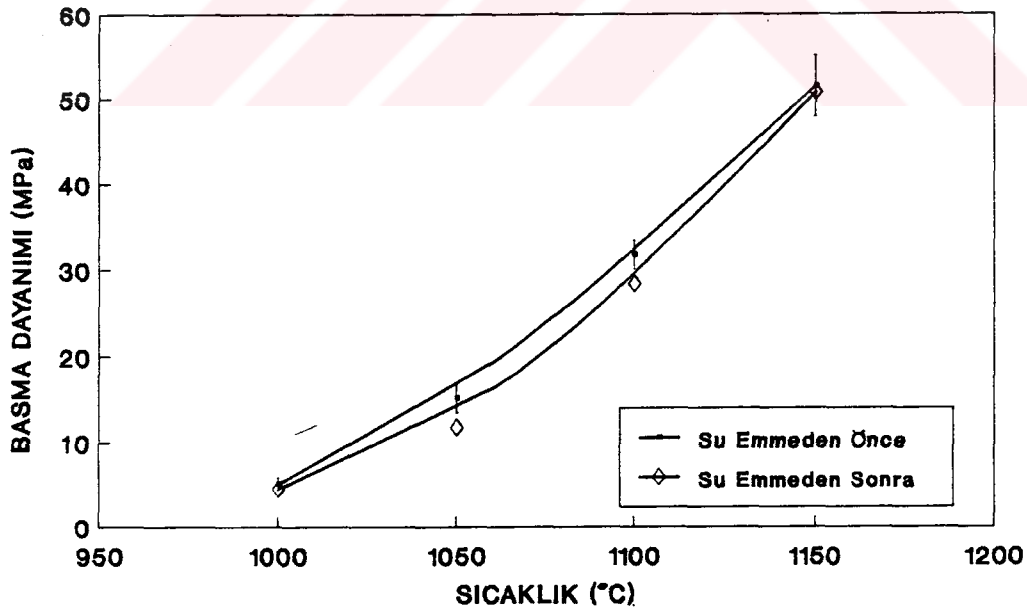
a) Bulk yoğunluk, su emme oranı ve porozitenin değişimleri,

b) Hacimce ve ağırlıkça azalmanın değişimleri.

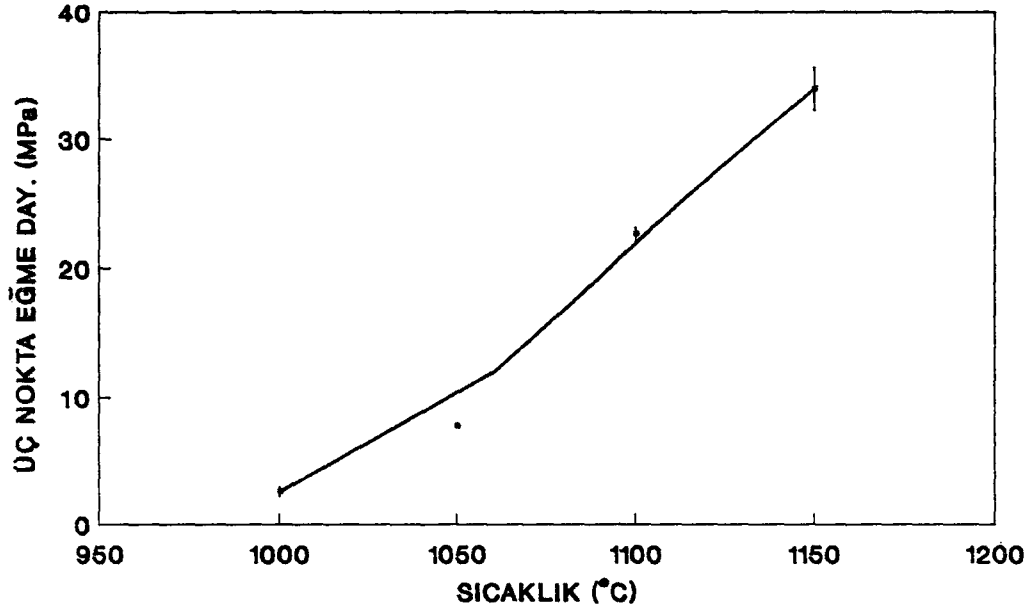
4.3.1.2. Pişirme Sıcaklığının Tesbiti

% 50 kırmızı çamur + % 50 marn karışımı hazırlanarak 3.2 MPa (32 kg/cm²)'lık basıçta 15 adet çubuk numune preslenmiştir. Her 15 adet numune değişik sıcaklıklarda (1000-1050-1100-1150°C) pişirilmiştir. Her sıcaklıkta pişirilen numunelere 4.3.1.1.'de belirtilen tüm testler ayrı ayrı uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.7-4.9'da verilmiştir.

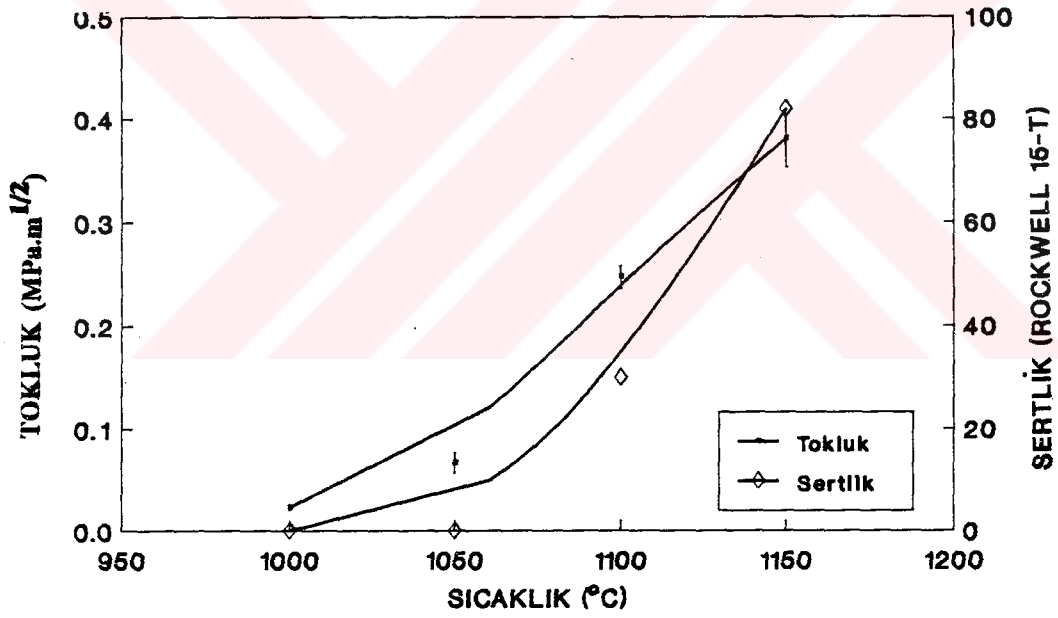
Sonuçlar incelendiğinde, pişirme sıcaklığı arttıkça basma dayanımı, üç nokta eğme dayanımı, tokluk, bulk yoğunluk, sertlik, hacimce azalma ve ağırlıkça azalma değerlerinde artış gözlenmektedir. Su emme oranı ve porozitede ani bir düşüş gözlenmekte ve 1150°C pişirme sıcaklığında sıfıra yaklaşmaktadır. Su emmiş numunelerin basma dayanımında % 2-10 arasında bir azalma görülmektedir. Bu verilere dayanarak, en yüksek değerler 1150°C pişirme sıcaklığında elde edilmiş olup, optimum pişirme sıcaklığı 1150°C olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.7. Farklı sıcaklıklarda pişirilmiş kırmızı çamur-marn numunelerinde sıcaklığa bağlı olarak basma dayanımının değişimi.



(a)

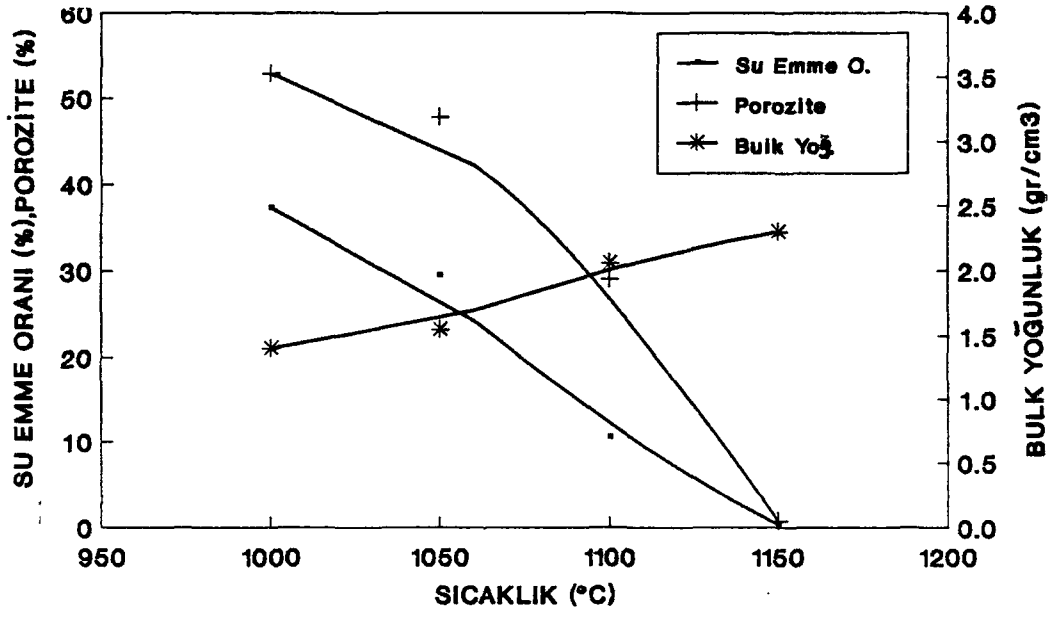


(b)

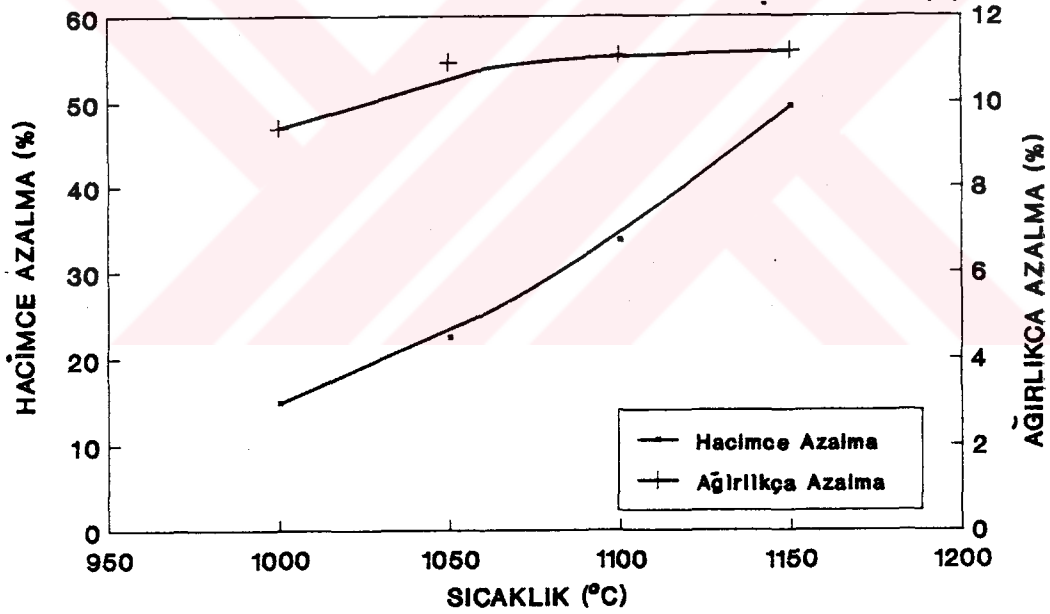
Şekil 4.8. Farklı sıcaklıklarda pişirilmiş kırmızı çamur-marn numunelerinde sıcaklığa bağlı olarak,

a) Üç nokta eğme dayanımının değişimi,

b) Tokluk ve sertliğin değişimi.



(a)



(b)

Şekil 4.9. Farklı sıcaklıklarda pişirilmiş kırmızı çamur-marn numunelerinde

sıcaklığa bağlı olarak,

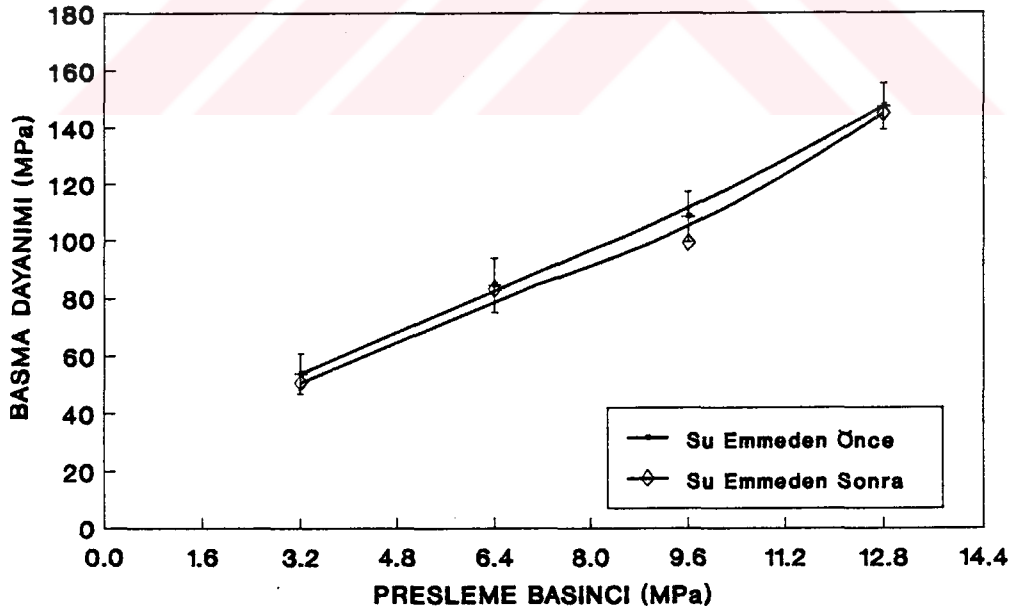
a) Bulk yoğunluk, su emme oranı ve porozitenin değişimleri,

b) Hacimce ve ağırlıkça azalmanın değişimleri.

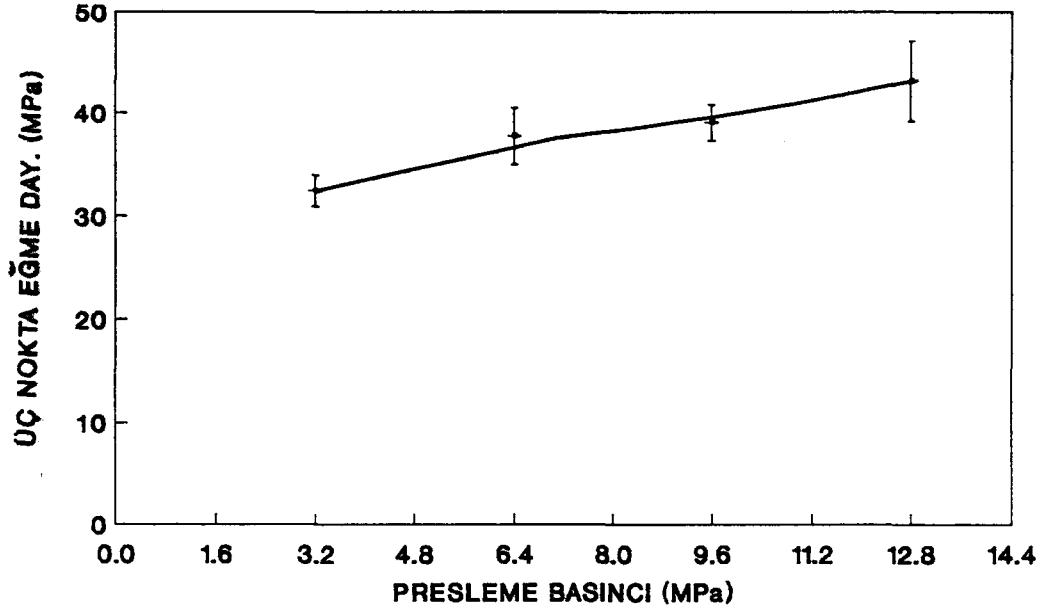
4.3.1.3. Presleme Basıncının Tesbiti

% 50 kırmızı çamur + % 50 marn oranında hazırlanmış numuneler değişik basınlarda (32-64-96-128 kg/cm²) preslendikten sonra 1150° C'lik sabit sıcaklıkta pişirilmiştir. Her bir grup numune üzerinde 4.3.2.1.'de belirtilen tüm testler ayrı ayrı uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.10-4.12'de verilmiştir.

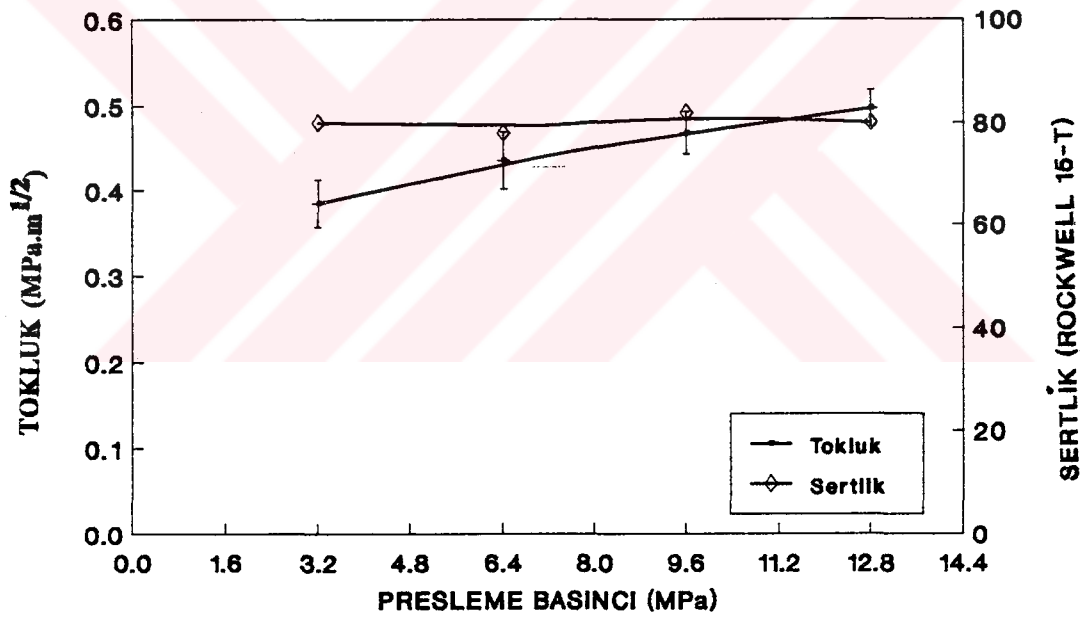
Sonuçlar incelendiğinde, presleme basıncının artışına paralel olarak basma dayanımı, üç nokta eğme dayanımı ve tokluk değerleri artmıştır. Bulk yoğunluk, sertlik, ağırlıkça azalma değerlerinde bir sabitlik gözlenmektedir. Presleme basıncına bağlı olarak hacimce azalma düşmüş ve porozite 12.8 MPa (128 kg/cm²)'lık basınçtan sonra sıfıra kadar inmiştir. Su emme oranında ise, presleme basıncı arttıkça sabit bir değer elde edilmiş, buna bağlı olarak su emmiş numunelerin basma dayanımında bir öncekine göre % 2-5 arasında bir azalma olduğu tesbit edilmiştir. Burada presleme basıncının daha da yükseltilmesi, sonuçların olumlu yönde ilerleyeceğini göstermektedir.



Şekil 4.10. Farklı basınçlarda preslenmiş kırmızı çamur-marn numunelerinde presleme basıncına bağlı olarak basma dayanımının değişimi.

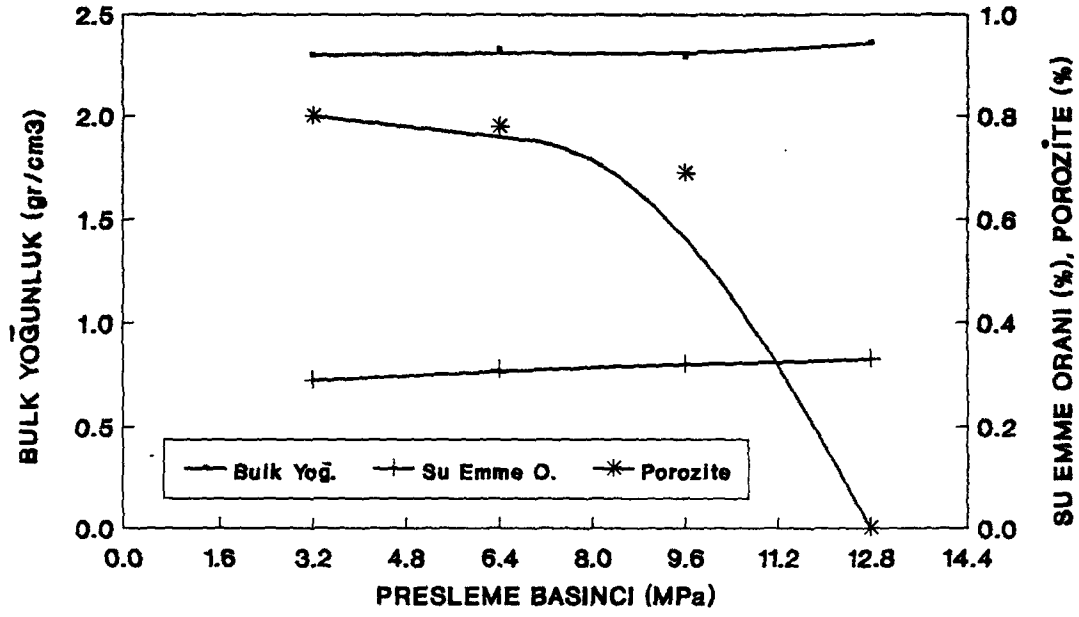


(a)

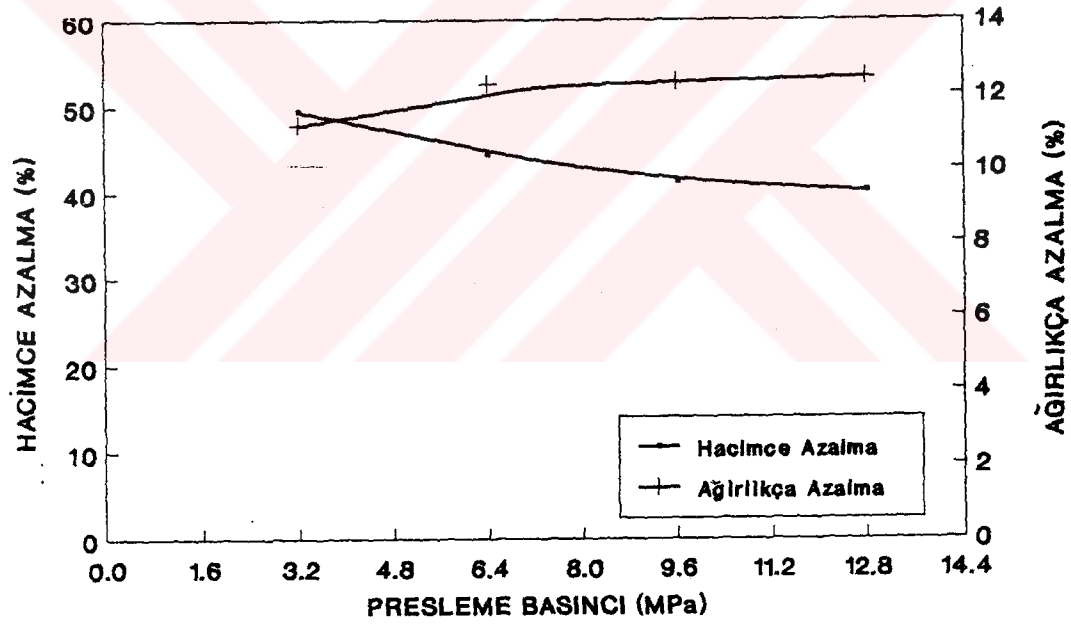


(b)

Şekil 4.11. Farklı basınçlarda preslenmiş kırmızı çamur-marn numunelerinde presleme basıncına bağlı olarak,
a) Üç nokta eğme dayanımının değişimi,
b) Tokluk ve sertliğin değişimi.



(a)



(b)

Şekil 4.12. Farklı basınçlarda preslenmiş kırmızı çamur-marn numunelerinde

presleme basıncına bağlı olarak,

a) Bulk yoğunluk, su emme oranı ve porozitenin değişimleri,

b) Hacimce ve ağırlıkça azalmanın değişimleri.

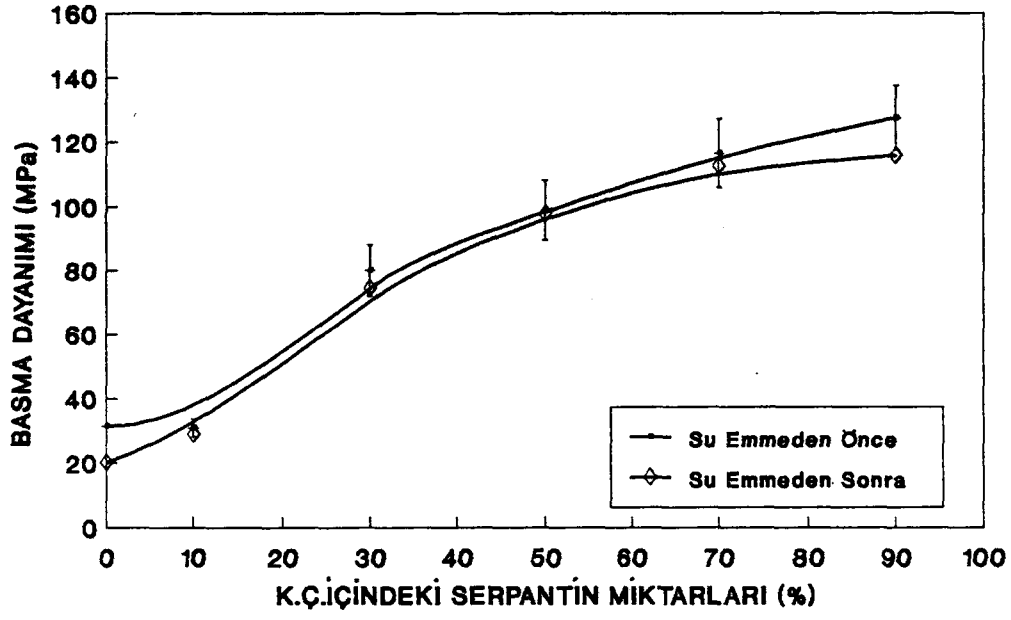
4.3.2. Kırmızı Çamur - Serpantin Deneyleri

4.3.2.1. Karışım Oranının Tesbiti

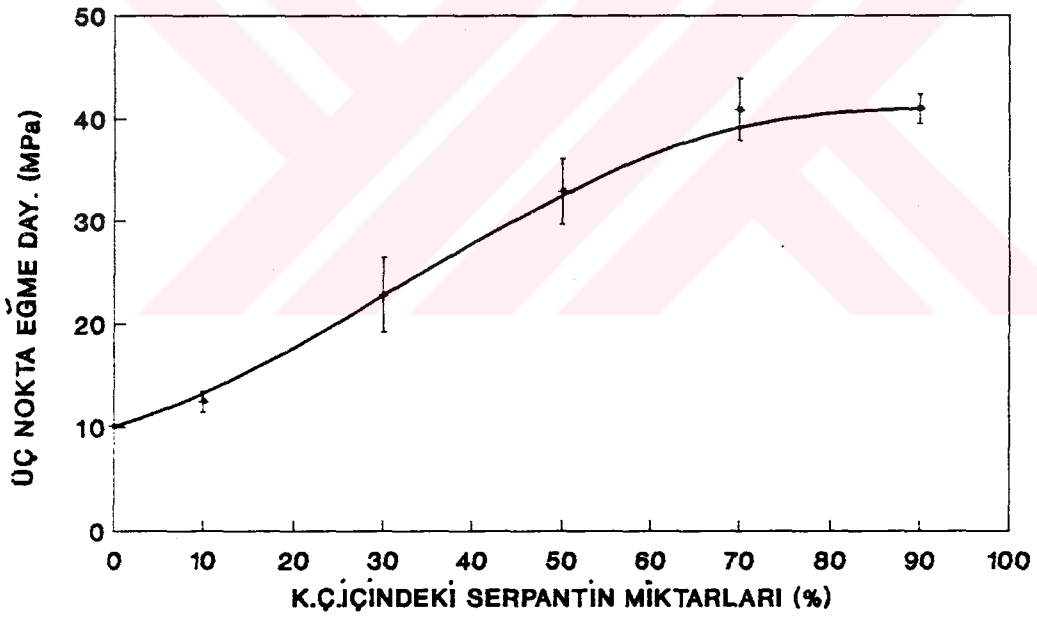
Deneyler için hazırlanmış kuru haldeki kırmızı çamur, değişik oranlardaki (% 0-10-30-50-70-90) serpantin numunesiyle Turbula Wab marka Type T2C cihazında 2 saat süre ile karıştırılarak karışımın homojenliği sağlanmıştır. Bu şekilde hazırlanmış karışımdan 3.2 MPa (32 kg/cm²)'lık sabit basınçta 15 adet çubuk numune preslenmiş, 1150° C'lik sabit sıcaklıkta 4 saat süre ile pişirilmiştir. Her bir gruptaki numunelere 4.3.1.1.'de belirtilen tüm testler ayrı ayrı uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.13-4.15'de verilmiştir.

Bu grafikler incelendiğinde, kırmızı çamur içindeki serpantin miktarı arttıkça basma dayanımı, üç nokta eğme dayanımı, tokluk, sertlik ve ağırlıkça azalma değerleri de artmaktadır. Su emme oranı ise, karışım oranının artışına bağlı olarak azalmakta, yarı yarıya karışımdan itibaren sifıra kadar inmektedir. Porozite değeri de karışım oranının artışına bağlı olarak azalmaktadır. Su emmiş numunelerin basma dayanımı ise bir önceki basma dayanıma göre % 1 ile % 8 oranında azalma olmuştur. Ayrıca karışım oranı arttıkça bulk yoğunluk stabil kalmış, sertlik ile ağırlıkça kayıp artmış, hacimce azalma ise azalmıştır.

Maksimum miktarda kırmızı çamur kullanmak ve bunun yanında en iyi değerleri elde etmek amaç olduğuna göre, elde edilen bu sonuçlardan hareket ederek, optimum karışım oranının % 50 kırmızı çamur + % 50 serpantin karışımı olarak kabul edilmiştir.

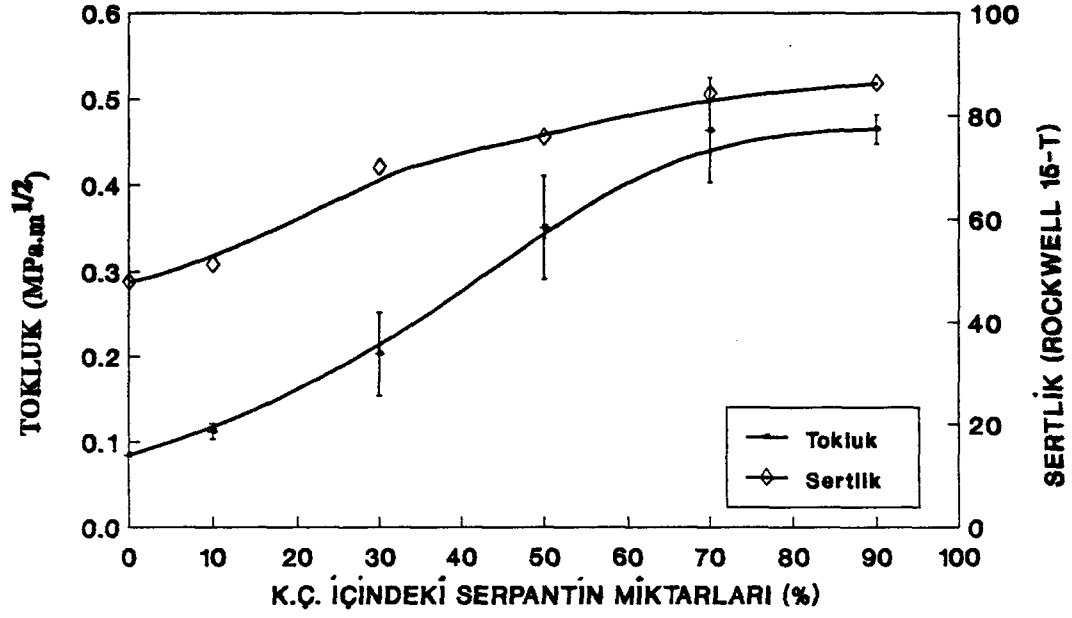


(a)

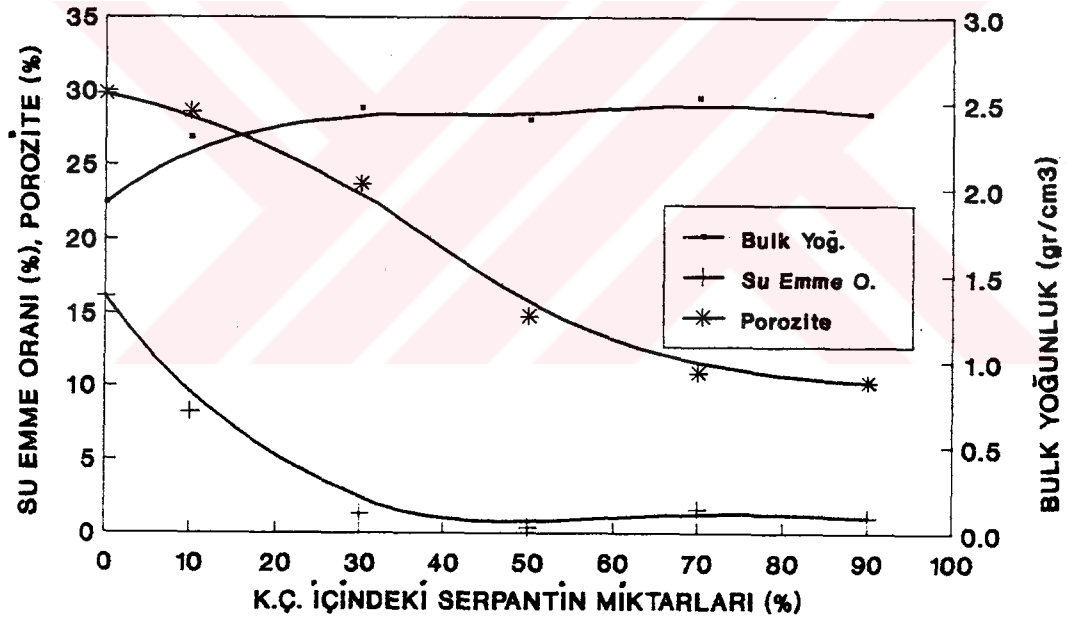


(b)

Şekil 4.13. Farklı oranlarda hazırlanmış kırmızı çamur-serpantin numunelerinde serpantin miktarına bağlı olarak,
 a) Basma dayanımının değişimi,
 a) Üç nokta eğme dayanımının değişimi.



(a)



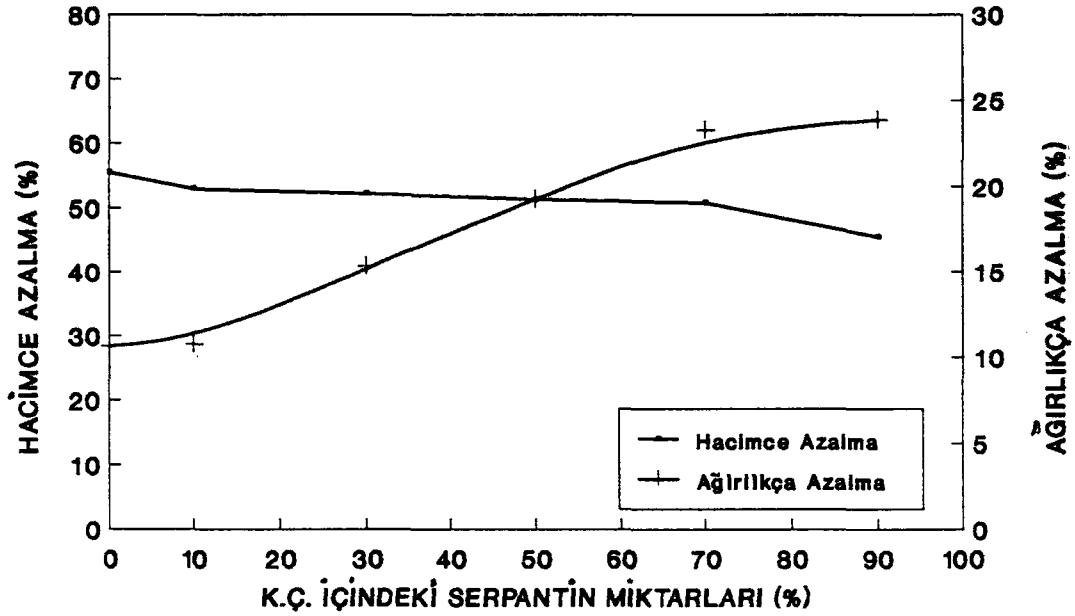
(b)

Şekil 4.14. Farklı oranlarda hazırlanmış kırmızı çamur-serpantin

numunelerinde serpantin miktarına bağlı olarak,

a) Tokluk ve sertliğin değişimi,

a) Su emme oranı, porozite ve bulk yoğunluğun değişimi.



Şekil 4.15. Farklı oranlarda hazırlanmış kırmızı çamur-serpantin numunelerinde hacimce ve ağırlıkça azalmanın değişimi.

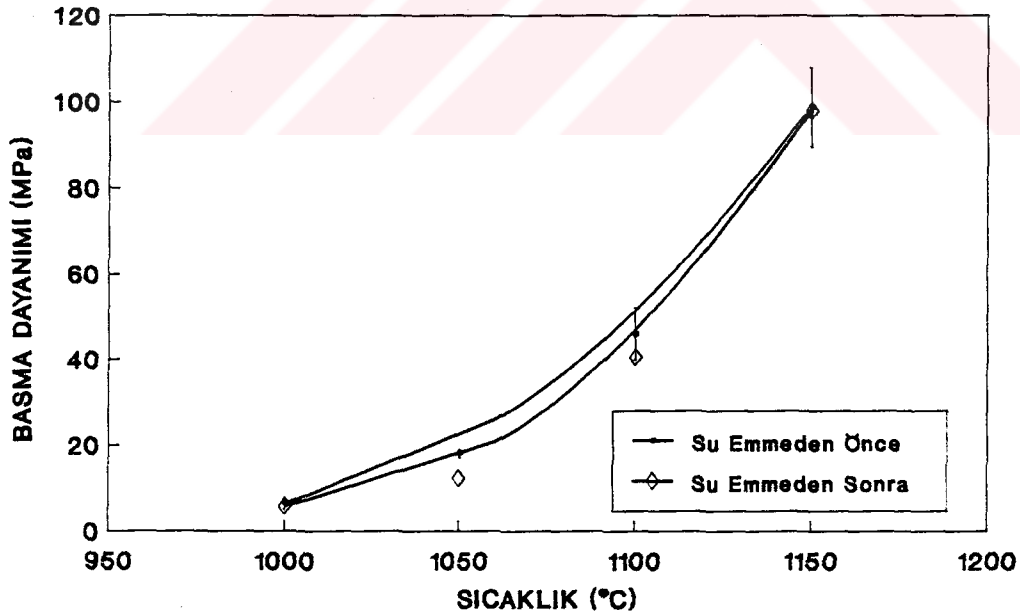
4.3.2.2. Pişirme Sıcaklığının Tesbiti

% 50 kırmızı çamur + % 50 serpantin karışımı hazırlanarak 3.2 MPa (32 kg/cm²)'lık basıçta 15 adet çubuk numune preslenmiştir. Her 15 adet numune değişik sıcaklıklarda (1000-1050-1100-1150° C) pişirilmiştir. Her sıcaklıkta pişirilen numunelere 4.3.1.1.'de belirtilen tüm testler ayrı ayrı uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.16-4.18'de verilmiştir.

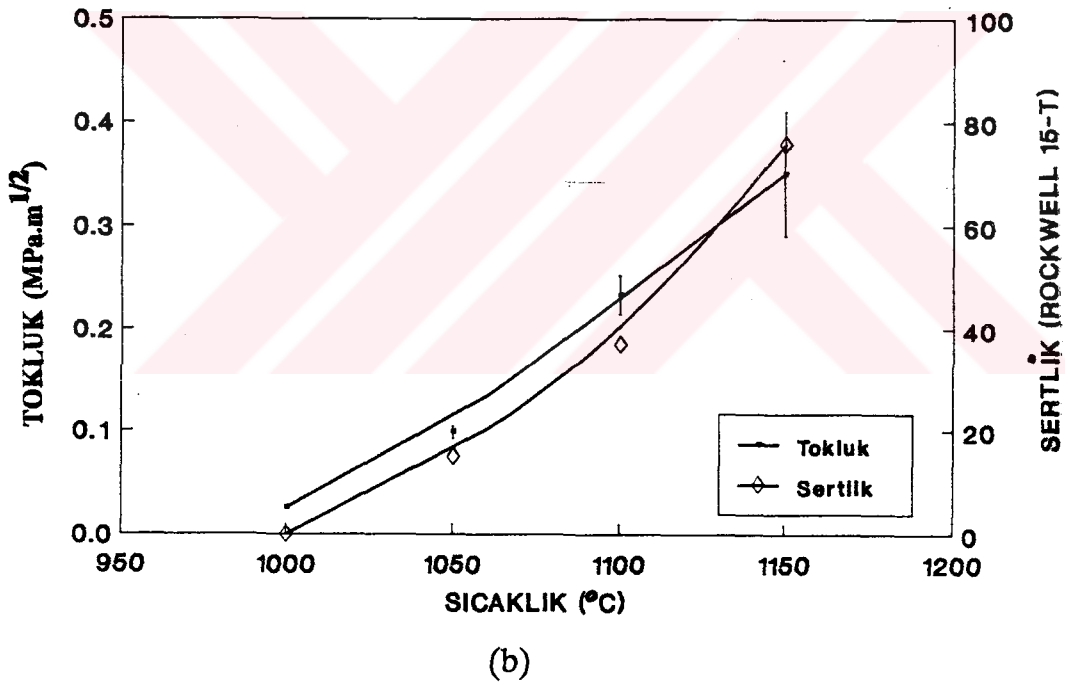
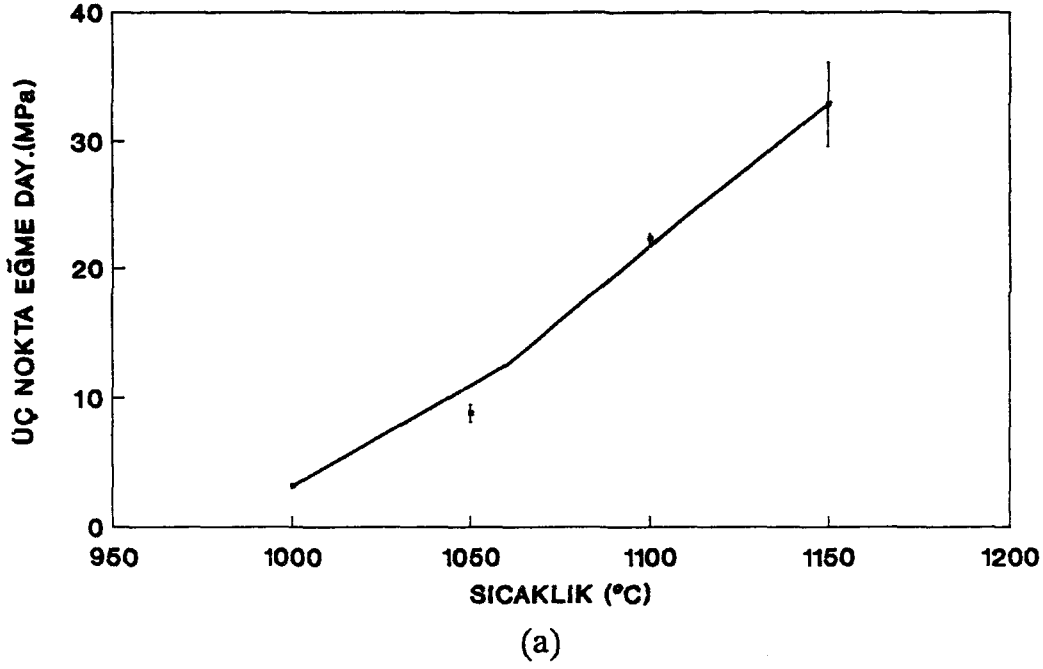
Bu grafikler incelendiğinde, karışımın pişirme sıcaklığı arttıkça basma dayanımı, üç nokta eğme dayanımı, tokluk, bulk yoğunluk, sertlik, ağırlıkça azalma, hacimce azalma değerleri de artmaktadır. Su emme oranı, pişirme sıcaklığının artmasına bağlı olarak ani bir azalma gözlenmekte, 1150° C sıcaklıkta ise sifıra kadar

inmektedir. Porozite ise, su emme oranına paralel bir şekilde pişirme sıcaklığına bağlı olarak azalmaktadır. Su emmiş numunelerin basma dayanım ise bir önceki basma dayanımına göre % 1 ile % 11 oranında azalma olmuştur. Presleme basıncı artırılarak daha mukavim tuğla yapmanın mümkün olduğu görüldüğünden bu deney grubunda, presleme basıncının sonuçlara etkisi incelenmemiştir.

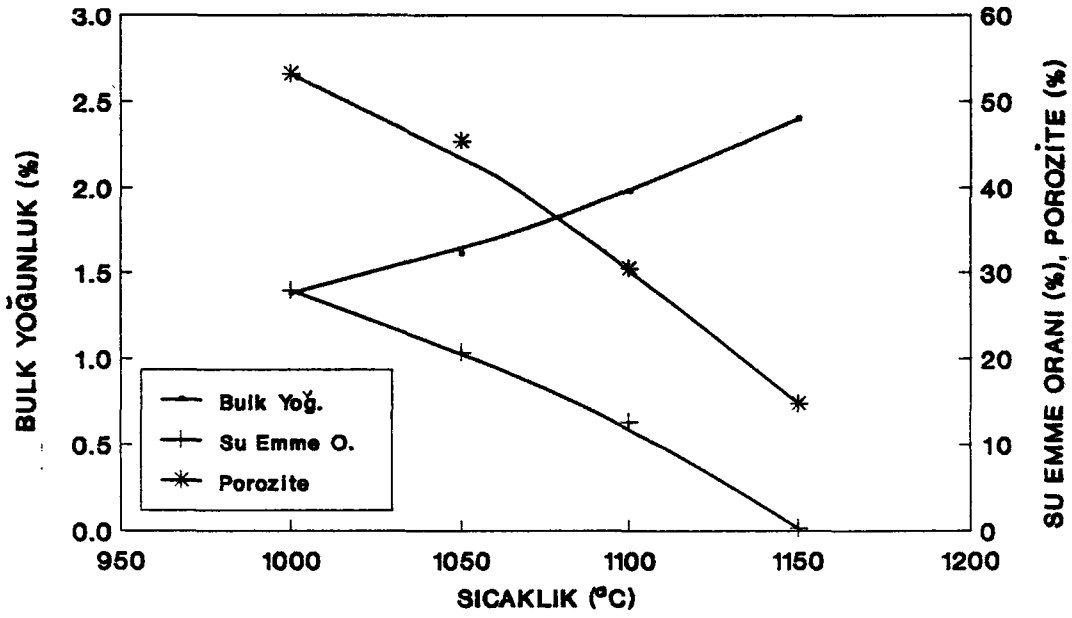
Bu verilere dayanarak, en yüksek değerler 1150° C pişirme sıcaklığında elde edilmiş olup, optimum pişirme sıcaklığı olarak 1150° C kabul edilmiştir.



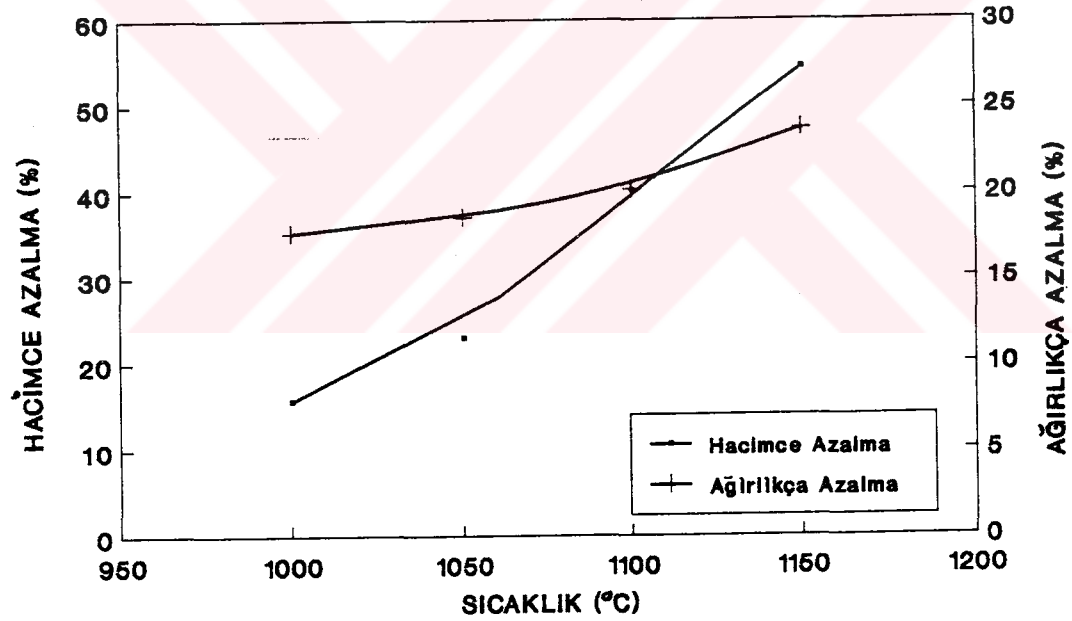
Şekil 4.16. Farklı sıcaklıklarda pişirilmiş kırmızı çamur-serpantin numunelerinde sıcaklığa bağlı olarak basma dayanımının değişimi.



Şekil 4.17. Farklı sıcaklıklarda pişirilmiş kırmızı çamur-serpantin numunelerinde pişirme sıcaklığına bağlı olarak,
a) Üç nokta eğme dayanımının değişimi,
b) Tokluk ve sertliğin değişimi.



(a)



(b)

Şekil 4.18. Farklı sıcaklıklarda pişirilmiş kırmızı çamur-serpantin

numunelerinde pişirme sıcaklığına bağlı olarak,

a) Bulk yoğunluk, su emme oranı ve porozitenin değişimleri,

b) Hacimce ve ağırlıkça azalmanın değişimleri.

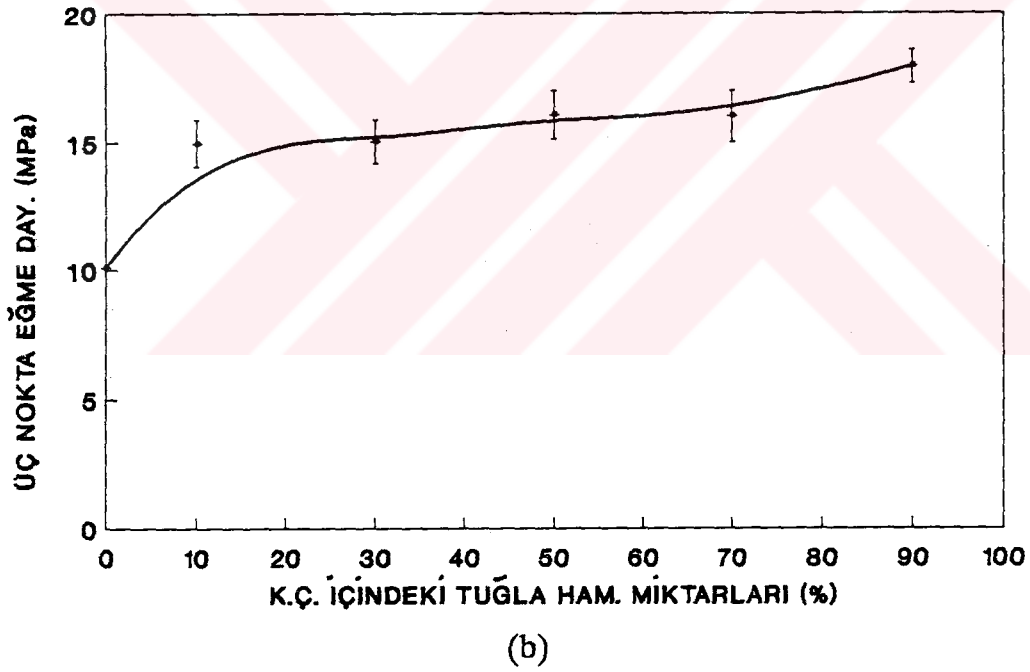
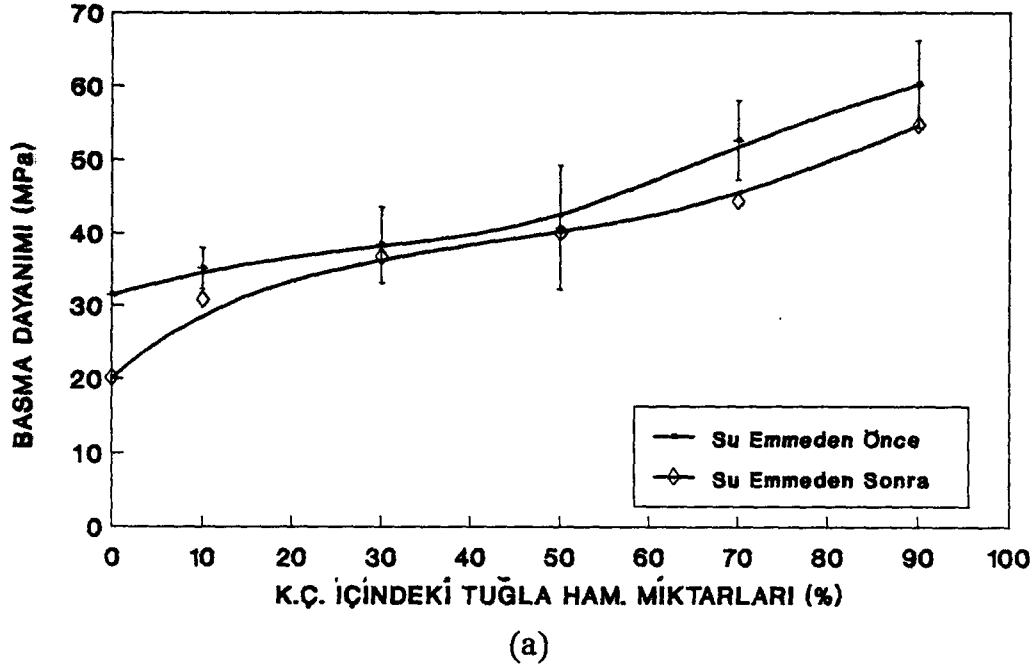
4.3.3. Kırmızı Çamur - Tuğla Hammaddesi Deneyleri

4.3.3.1. Karışım Oranlarının Tesbiti

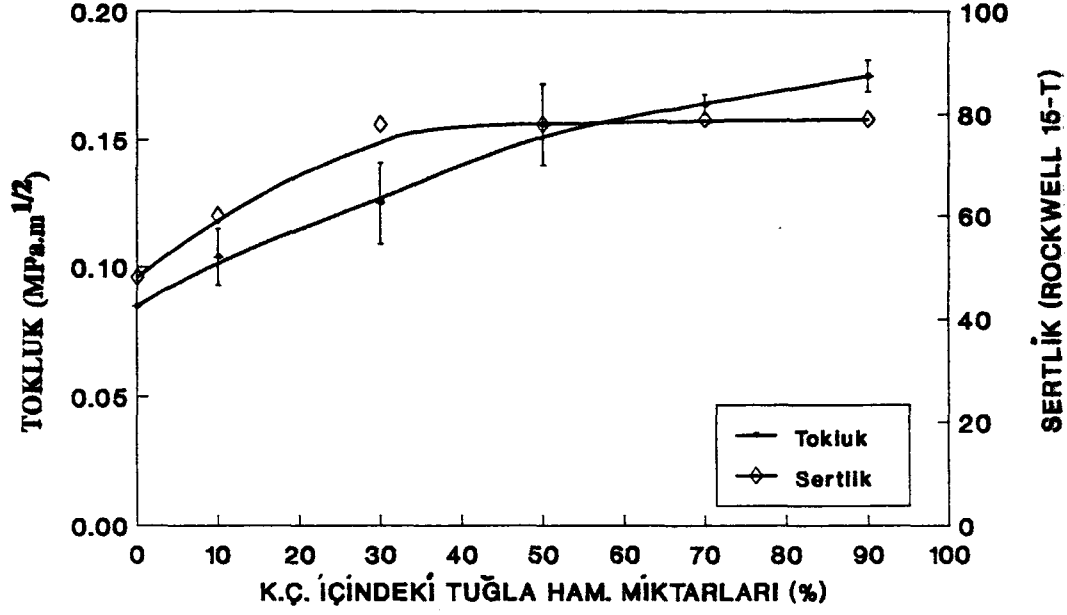
Deneyler için hazırlanmış kuru haldeki kırmızı çamur, değişik oranlardaki (% 0-10-30-50-70-90) tuğla hammaddesiyle Turbula Wab marka Type T2C cihazında 2 saat süre ile karıştırılarak karışımın homojenliği sağlanmıştır. Bu şekilde hazırlanmış karışımdan 3.2 MPa (32 kg/cm^2)'lık sabit basınçta 15 adet çubuk numune preslenmiş, 1150°C 'lik sabit sıcaklıkta 4 saat süre ile pişirilmiştir. Her bir gruptaki numunelere 4.3.1.1.'de belirtilen tüm testler ayrı ayrı uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.19-4.21'de verilmiştir.

Bu grafikler incelendiği takdirde, kırmızı çamur içindeki tuğla hammaddesi miktarı arttıkça basma dayanımı, üç nokta eğme dayanımı ve tokluk değerleri de artmaktadır. Su emme oranı ile porozite, karışım oranının artışıyla bağlı olarak azalmakta, su emme oranı % 40 tuğla hammaddesi içeren noktada sıfıra yaklaşmaktadır. Su emmiş numunelerin basma dayanımı ise bir önceki basma dayanıma göre % 2 ile % 15 oranında azalma olmuştur. Ayrıca karışım oranı arttıkça bulk yoğunluk ile sertlik stabil kalmış, hacimce azalma ile ağırlıkça kayıp değerlerinde düşüş gözlenmiştir.

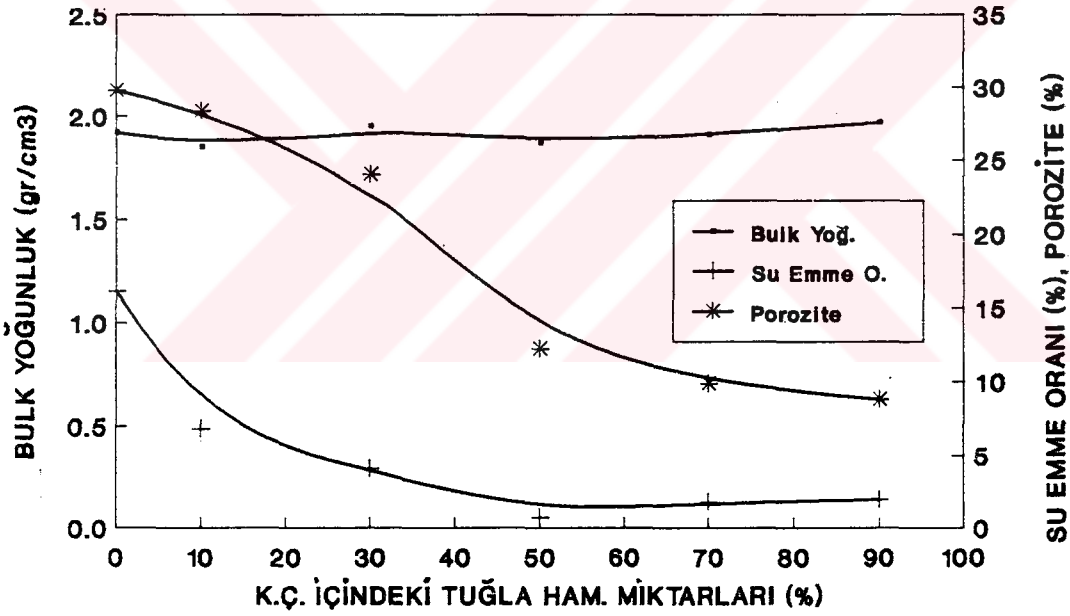
Maksimum miktarda kırmızı çamur kullanmak ve bunun yanında en iyi değerleri elde etmek amaç olduğuna göre, elde edilen bu sonuçlardan hareket ederek, optimum karışım oranının % 50 kırmızı çamur + % 50 tuğla hammaddesi karışımı olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.19. Farklı oranlarda hazırlanmış kırmızı çamur-tuğla hammaddesi numunelerinde tuğla hammaddesi miktarına bağlı olarak,
a) Basma dayanımının değişimi,
a) Üç nokta eğme dayanımının değişimi.

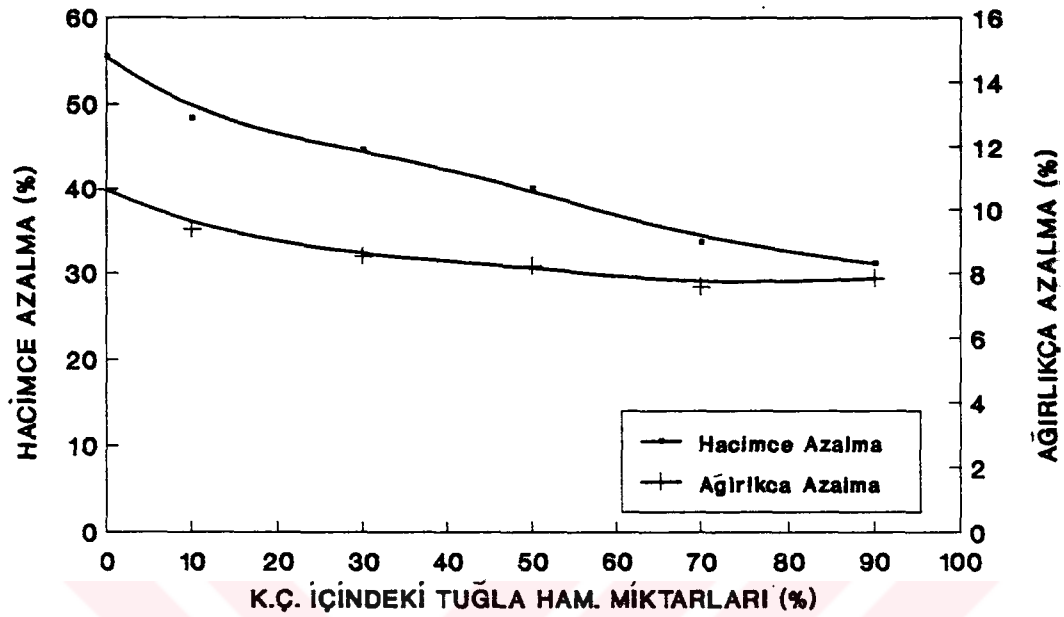


(a)



(b)

Şekil 4.20. Farklı oranlarda hazırlanmış kırmızı çamur-tuğla hammaddesi numunelerinde tuğla hammaddesi miktarına bağlı olarak,
 a) Tokluk ve sertliğin değişimi,
 a) Su emme oranı, porozite ve bulk yoğunluğun değişimi.



Şekil 4.21. Farklı oranlarda hazırlanmış kırmızı çamur-tuğla hammaddesi numunelerinde tuğla hammaddesi miktarına bağlı olarak hacimce ve ağırlıkça azalmanın değişimi.

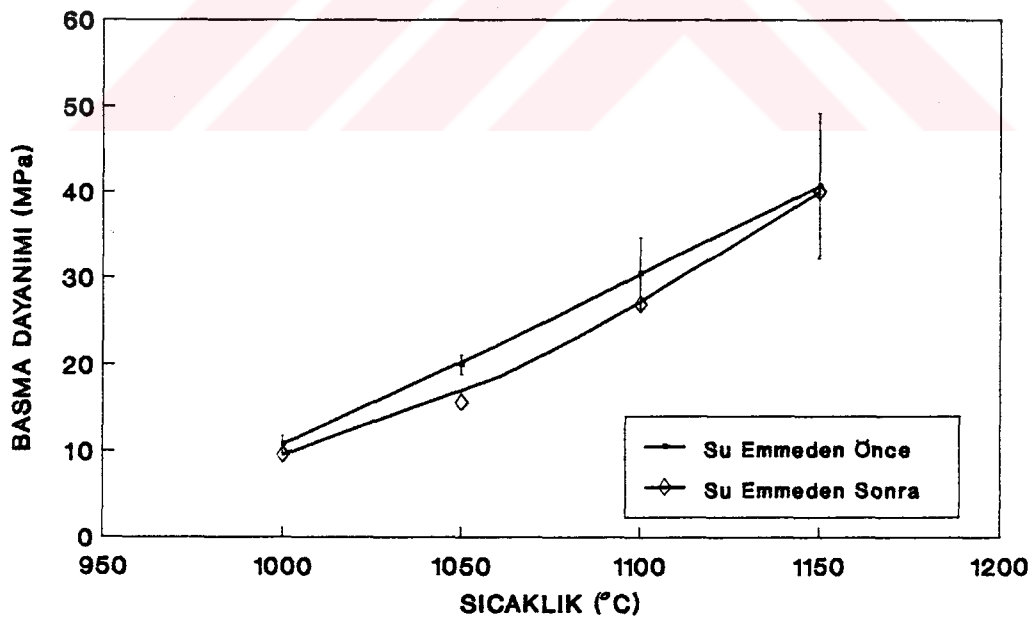
4.3.3.2. Pişirme Sıcaklığının Tesbiti

% 50 kırmızı çamur+ % 50 tuğla hammaddesi karışımı hazırlanarak 3.2 MPa (32 kg/cm^2)'lık basıçta 15 adet çubuk numune preslenmiştir. Her 15 adet numune değişik sıcaklıklarda ($1000-1050-1100-1150^\circ\text{C}$) pişirilmiştir. Her sıcaklıkta pişirilen numunelere 4.3.1.1.'de belirtilen tüm testler ayrı ayrı uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.22-4.24'de verilmiştir.

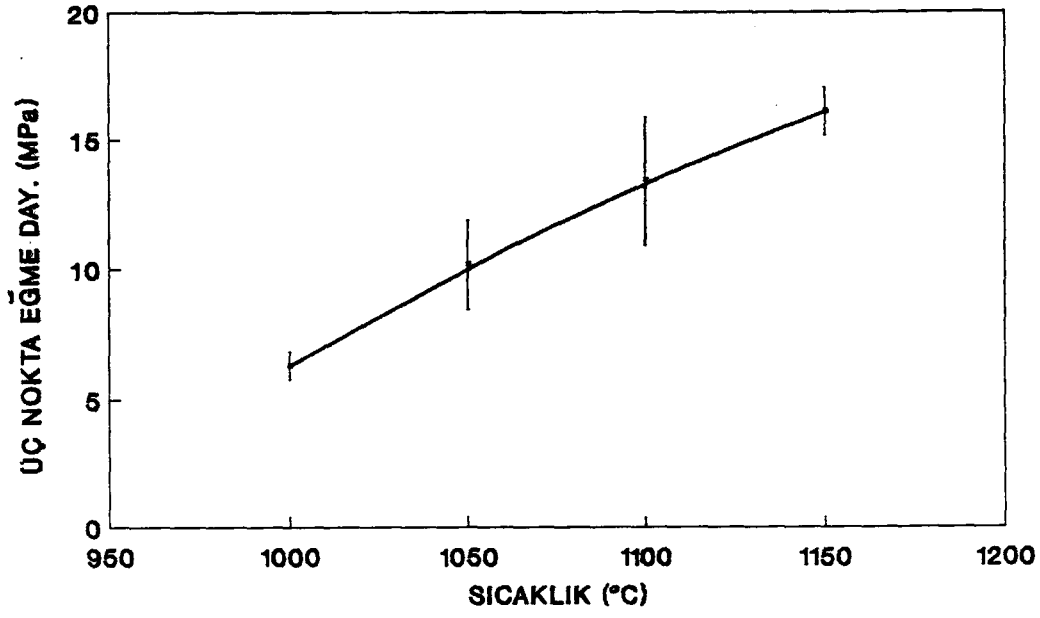
Bu grafikler incelendiğinde, karışımın pişirme sıcaklığı arttıkça basma dayanımı, üç nokta eğme dayanımı, tokluk, bulk yoğunluk, sertlik, ağırlıkça azalma, hacimce azalma değerleri de artmaktadır. Su emme oranında ise, pişirme

sıcaklığının artışına bağlı olarak ani bir azalma gözlenmekte, 1150° C sıcaklıkta sıfıra kadar inmektedir. Porozite değeri de pişirme sıcaklığının artışına bağlı olarak azalmaktadır. Su emmiş numunelerin basma dayanımı ise bir önceki basma dayanımına göre % 2 ile % 13 oranında azalma olmuştur. Presleme basıncı artırılarak daha dayanıklı tuğla yapmanın mümkün oluşu görüldüğünden bu deney grubunda, presleme basıncının sonuçlara etkisi incelenmemiştir.

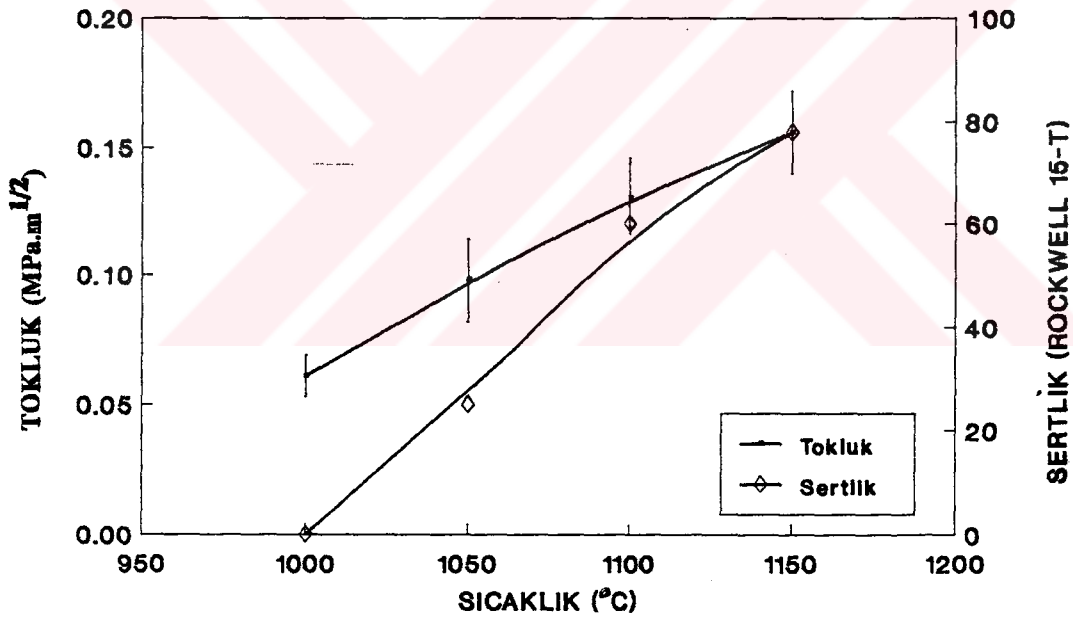
Bu verilere dayanarak, en yüksek değerler 1150° C pişirme sıcaklığında elde edilmiş olup, optimum pişirme sıcaklığı olarak 1150° C kabul edilmiştir.



Şekil 4.22. Farklı sıcaklıklarda pişirilmiş kırmızı çamur-tuğla hammaddesi numunelerinde sıcaklığa bağlı olarak basma dayanımının değişimi.



(a)

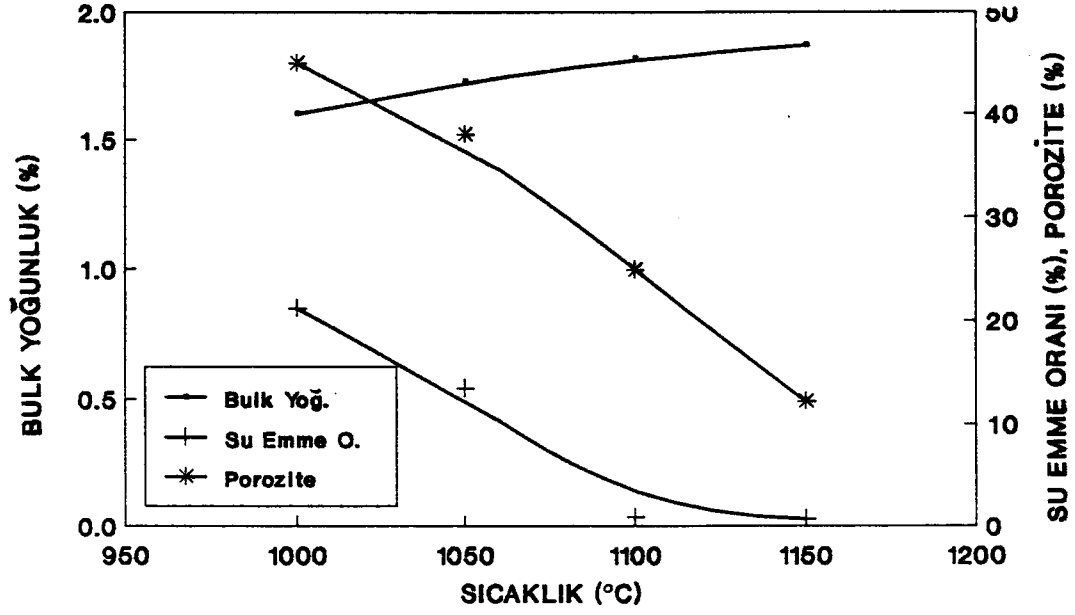


(b)

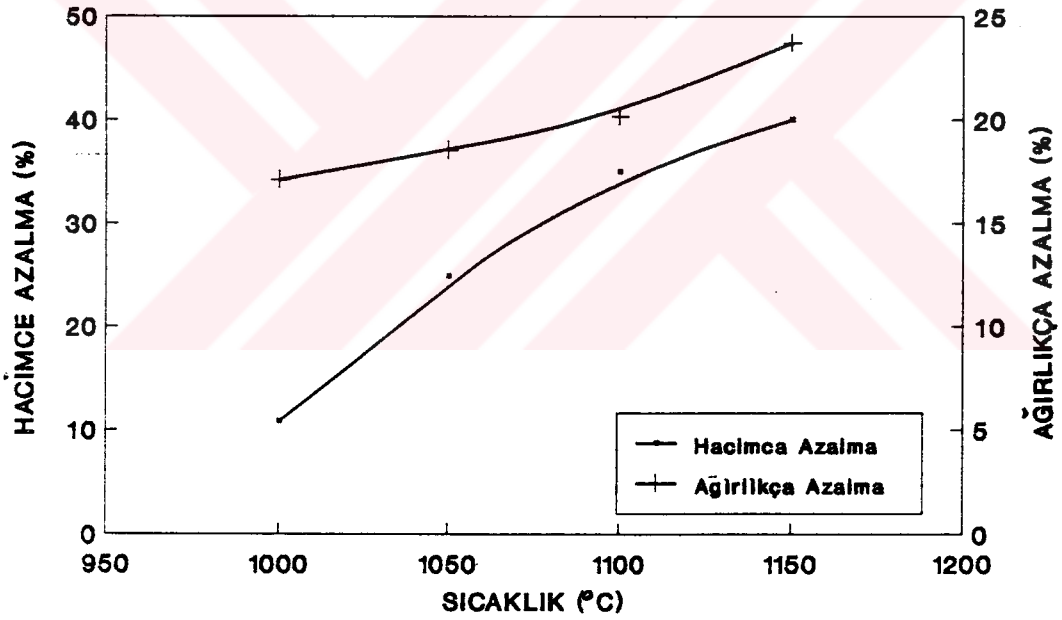
Şekil 4.23. Farklı sıcaklıklarda pişirilmiş kırmızı çamur-tuğla hammaddesi numunelerinde sıcaklığa bağlı olarak basma dayanımının değişimi.

a) Üç nokta eğme dayanımının değişimi,

b) Tokluk ve sertliğin değişimi.



(a)



(b)

Şekil 4.24. Farklı sıcaklıklarda pişirilmiş kırmızı çamur-tuğla hammaddesi numunelerinde sıcaklığa bağlı olarak basma dayanımının değişimi.

- a) Bulk yoğunluk, su emme oranı ve porozitenin değişimleri,
 b) Hacimce ve ağırlıkça azalmanın değişimleri.

4.3.4. Ticari Tuğlaların Özellikleri

Ülkemizde üretilen dolu ve delikli tuğlalar mukayese amacıyla yukarıda yapılan deney boyutlarında kesildikten sonra mekanik ve fiziksel özellikleri tesbit edilmiştir. Ayrıca gazbetonu ve pres tuğlanın mekanik özellikleri de üretici firma kataloglarından alınmıştır. Bu sonuçlar aşağıdaki Tablo 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.25'de ise çeşitli tuğlaların mekanik özellikleri açısından mukayese verilmiştir.

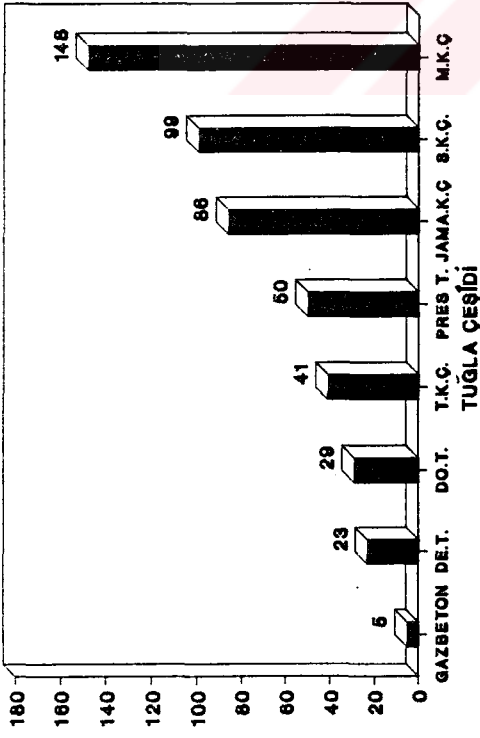
Tablo 4.6. Çeşitli tuğlaların özellikleri (25,26).

	Dolu Tuğla	Sık Delikli Tuğla	Gaz Beton Tuğla	Pres Tuğla
BASMA DAYANIMI (MPa)	28.66	23.22	5.0	50.0-85.0
ÜÇ NOKTA EĞME DAY. (MPa)	8.74	17.63		
TOKLUK (MPam ^{1/2})	0.088	0.166		
SU EMME ORANI (%)	4.59	15.0 ¹	67.12 ²	7.0
YOĞUNLUK (gr/cm ³)	2.03	1.79	0.60	
SERTLİK Rockwell 15-T	43	44.4		

¹ : Su emme oranı orjinal boyutlu delikli tuğla üzerinde yapılmıştır.

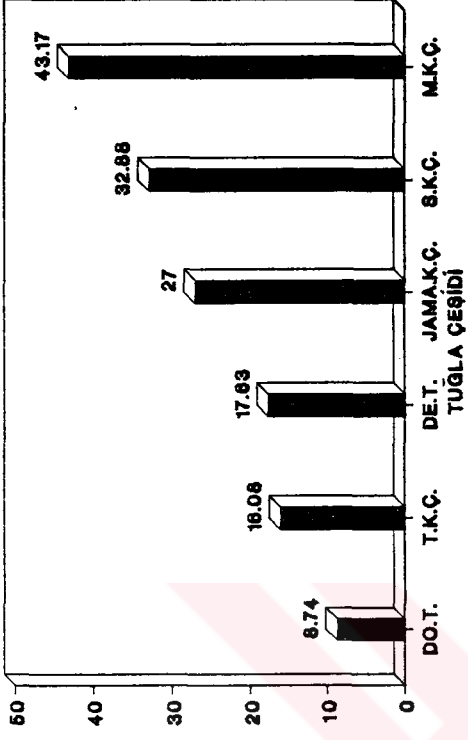
² : Bu değer katalog değeri olmayıp, laboratuvarında test edilmiştir.

BASMA DAYANIMI (MPa)



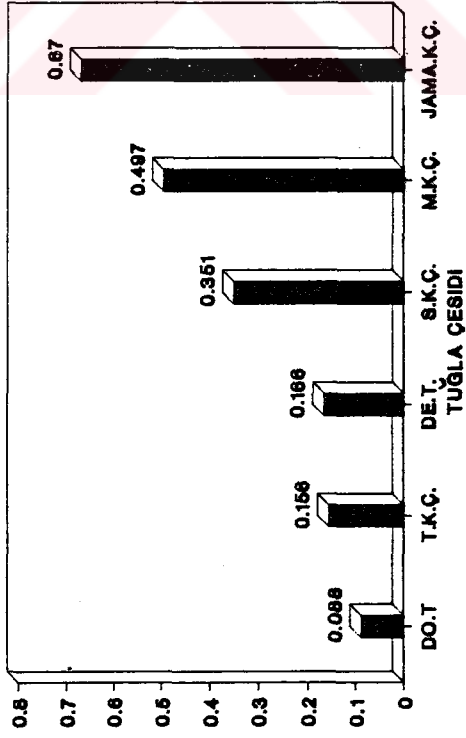
Pres Tuğlanın değeri
50 ile 86 arasındadır.

UÇ NOKTA EĞME DAY. (MPa)



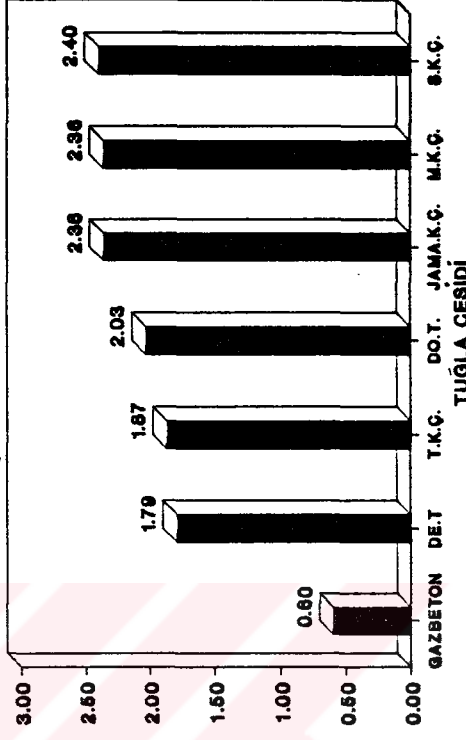
M.K.Ç: Mara-Kırmızı Çamur
S.K.Ç: Serpantin-Kırmızı Çamur
T.K.Ç: Tuğla Hem-Kırmızı Çamur

TOKLUK (MPa/cm)



DO.T: Dolu Tuğla (Ort. değeri)
DE.T: Delikli Tuğla (Ort. değeri)
Grup Plywooddan Alınmıştır.

BULK YÖĞÜNLÜK (gr/cm3)



Gazbeton ve Pres Tuğlanın
Katalog Değerleridir.

Şekil 4.25. Çeşitli tuğlaların karşılaştırılması.

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Seydişehir Alüminyum İşletmesi'nin atık ürünü olan kırmızı çamura aynı yöre formasyonundan alınan marn, serpantin ve tuğla hammaddesi katılarak kaliteli inşaat malzemesi üretim imkanları araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarla aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Kırmızı çamura + marn deney grubunda yapılan çalışmalarda, optimum mekanik özelliklerin sağlandığı koşullar, karışım oranının % 50-% 50; pişirme sıcaklığının 1150°C, presleme basıncının 12.8 MPa (128 kg/cm²) olduğu belirlenmiştir. Bu koşullarda optimum basma dayanımı 148 ± 8 MPa, üç nokta eğme dayanımı 43 ± 4 MPa ve tokluk değeri 0.5 ± 0.02 MPa.m^{1/2} olarak elde edilmiştir. Su emme oranı ise standart dahilinde olup % 0.33'dür. Karışım oranı optimize edilirken kullanılan kırmızı çamur miktarının yüksek olmasına dikkat edilmiştir.

2. Kırmızı çamura + serpantin deney grubunda yapılan çalışmalarda, optimum mekanik özelliklerin sağlandığı koşullar, karışım oranının % 50 - % 50 ve pişirme sıcaklığının 1150°C olduğu belirlenmiştir. Presleme basıncının artırılmasıyla numunenin mekanik özelliğinin de artacağı dikkate alınarak bu deney grubunda presleme basıncının etkisi incelenmemiştir. Bu koşullarda optimum basma dayanımı 99 ± 9 MPa, üç nokta eğme dayanımı 33 ± 3 MPa ve tokluk değeri 0.35 ± 0.06 MPa.m^{1/2} olarak belirlenmiştir. Su emme oranı ise, bu konuyla ilgili standartlar dahilinde olup % 0.35'dir.

3. Kırmızı çamur + tuğla hammaddesi deney grubunda yapılan çalışmalarda, yine optimum karışım oranının % 50 - % 50, pişirme sıcaklığının 1150°C ve presleme basıncının 3.2 MPa (32 kg/cm²) olduğu belirlenmiştir. Bu koşullarda

optimum basma dayanımı 41 ± 8.5 MPa, üç nokta eğme dayanımı 16 ± 0.9 MPa ve tokluk değeri 0.16 ± 0.02 MPa.m^{1/2} olarak tesbit edilmiştir. Su emme oranı ise bu konuyla ilgili standartlar dahilinde olup % 0.72'dir.

4. Her üç deneyde elde edilen sonuçlar, piyasada bu amaçla kullanılan tuğlalara nazaran eşit özellikte olup, hatta bazı tuğlalara göre oldukça yüksek dayanıma sahiptir.

5. Kırmızı çamura marn, serpantin ve tuğla hammaddesi katılarak değişik renklerde tuğla elde edilmektedir. Yüksek dayanıma sahip bu tuğlalar, daha çok dekoratif amaçla da kullanılabilir.

6. Bu araştırmayı bir adım daha ilerleterek aynı malzemelerle seramik karo, fayans üretiminin de araştırılması gerekmektedir.

7. Yapılan bu çalışmaların Türkiye'de ilk olduğu dikkate alınarak, patent hakkı için başvuru yapılmıştır. Ayrıca, bu deneyleri pilot çapta ve tesis boyutunda denemek için bir proje hazırlanmaktadır.

KAYNAKLAR

1. ETİBANK Seydişehir Alüminyum Tesisleri Tanıtım Katoloğu.
2. Alüminyum Hammaddeleri (boksit), DPT VI. Beş Yıllık Kalkınma Planı ÖİK Raporu, Yayın No: DPT: 2269 - ÖİK: 389, Eylül 1991, Ankara.
3. Dünyada ve Türkiye’de Metal ve Mineral Kaynaklarının Potansiyeli, Ticareti, Beklenen Gelişmeler, Alüminyum, MTA Yayın No: 182, 1981, Ankara.
4. Türkiye Alüminyum Envanteri, MTA Yayın No: 181, 1980, Ankara.
5. Demir Dışı Metal Madenleri, DPT Yayın No: 2121 - ÖİK: 326, Mart 1988, Ankara.
6. Türkiye’nin Başlıca Alüminyum Cevherleri, MTA Yayın No: 130, 1966, Ankara.
7. Metal Madenler, IV. Beş Yıllık Kalkınma Planı ÖİK Raporu, Yayın No: DPT: 1637 - ÖİK: 286, Mart 1978, Ankara.
8. BAHÇECİ, A., " Türkiye Alüminyum Yataklarının Özellikleri, Ülke Olanakları, MTA’nın Alüminyum Aramacılığındaki Yeri, Bir Örnek Olarak Seydişehir Yatağı", MTA 50.Yıl Sempozyumu, 1985, Ankara.
9. PEKKAN, A., KARAYAZICI, F.İ., MÜFTÜOĞLU, T., "Alüminyum", Türkiye Sınai Kalkınma Bankası A.Ş., Kimya Sektör Araştırması, Yayın No: 10, Kasım 1979, İstanbul.

10. ÖZDEMİR, S. ve diğerleri, Etibank Alüminyum Tesisleri Alümina Fabrikası Teknolojik Tanımı, Etibank Alüminyum Tesisleri Grup Başkanlığı, 1974, Seydişehir.
11. GÖZMEN, T., YÜZER, H., KALAFATOĞLU, E., BALKAÇ, T., "Kırmızı Çamurun Değerlendirilmesi", TÜBİTAK Kimya Araştırma Bölümü, Yayın No: 114, Aralık 1983, Gebze.
12. KNIGHT, J.C., WAGH, A.S., REID, W.A., "The Mechanical Properties of Ceramics from Bauxite Waste", Journal of Materials Science, 21 (1986), pp. 2179-2184.
13. DASS, A., MALHOTRA, S.K., "Lime-stabilized Red Mud Bricks", Materials and Structures, 23 (1990), pp. 252-255.
14. FILIPPO, P.A.S., USAI, G., "The Recycling of Red Mud from the Bayer Process, Part 1 - Production of Masonry Bricks at a Firing Temperature of 950° C", Journal for the Brick and Tile, Structural Ceramics Refractory and Clay Pipe Industries, Feb.-March 1988, pp. 67-74.
15. BAYER, G., CHERDRON, E., HAERTER, M., HECHT, E., "Method for Producing Bricks from Red Mud", US Patent No: 3886245, May 27, 1975.
16. BAYER, G., CHERDRON, E., HAERTER, M., HECHT, E., "Method for Producing Bricks from Red Mud", US Patent No: 3886244, May 27, 1975.

17. IWU, G.O., "Method of Treating Bauxite Waste Red Mud with Acid and Making Construction Bricks from the Treated Material", US Patent No: 3985567, Oct.12, 1976.
18. PUSKAS, F., Process for the Utilization in the Ceramics Industry of Red Mud from Alumina Plants", US Patent No: 4368273, Jan.11, 1983.
19. SEYHAN, İ., "Kaolin, Bentonit, Kil ve Tuğla-Kiremit Toprakları Jeolojisi", MTA Eğitim Serisi, No: 13, 1972, Ankara.
20. OCAK, S., "Tuğla ve Kiremit Sanayii Araştırması", Türkiye Sınai Kalkınma Bankası A.Ş., Yayın No: 19, Nisan 1978, İstanbul.
21. CORNELIUS S., HURLBUT JR., Çeviren K. İNAN, E. TANYOLU, Mineraloji Cilt 2, 1982, İstanbul.
22. Bor Dışı Endüstriyel Madenler, II.Bölüm, DPT Yayın No: 2147 - ÖİK: 336, Eylül 1988, Ankara.
23. EMRULLAHOĞLU, Ö.F., ATEŞOK, G., KARA, M., DEMİRALP, S., "Seydişehir Kırmızı Çamurunun Değerlendirilmesi Olanaklarının Araştırılması", 7. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, Cilt I., TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, 4-8 Mayıs 1993, Ankara.
24. KARA, M., EMRULLAHOĞLU, Ö.F., TUNCEL, A., KELEŞ, E., "Kırmızı Çamurdan Yüksek Mukavemetli Yapı Malzemesi Üretimi", Sanayi Ve Ticaret Bakanlığı, Sınai Mülkiyet Dairesi Başkanlığı, İhtira Beratı (patent) Başvurusu, 18 Mart 1994.

25. TS-704, TS-705, TS-1260 Numaralı Standartlar.
26. Çeşitli Tuğla Firmalarının Katologları.
27. MIL-STD-1942A Numaralı Amerikan Ordu Standartı, (Department of The Army, Army Material and Mechanics, Research Center), 21 Kasım 1983.



EK 1

Deneylerde kullanılan tüm pişirilmiş numunelerin üç nokta eğme dayanımı ve tokluk değerlerinin hesaplanması, seramik malzemelerin testinde kullanılan MIL-STD-1942A numaralı Amerikan Ordu Standardına (27) göre yapılmıştır. Buna göre;

1. Üç Nokta Eğme Dayanımı (σ_e)

$$\sigma_e = \frac{3}{2} \times \left(\frac{P \times L}{a_0^2 \times b_0} \right) \quad (\text{kgf/mm}^2)$$

P : Uygulanan Yük (kgf)

L : Mesnetler Arası Mesafe (mm)

a_0 : Numunenin Eni (mm)

b_0 : Numunenin Kalınlığı (mm)

2. Tokluk (K_{Ic})

$$K_{Ic} = y \sigma_e (\Delta L)^{1/2} \quad (\text{kgf/mm}^{3/2})$$

y : Geometrik Faktör (düzgün geometrik örneklerde 1 alınır)

σ_e : Üç Nokta Eğme Dayanımı (kgf/mm^2)

ΔL : Maksimum Kusur Ölçüsü (mm)

ÖZGEÇMİŞ

1963 yılında Tirebolu-Giresun'da doğan Mustafa KARA, ilk orta ve lise tahsilini İstanbul'da tamamladı. 1988 yılı Şubat döneminde İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü'nden "Maden Mühendisi" olarak birincilikle mezun oldu. Bir yıl ETAŞ Madencilik ve San. Ltd. Şti.'ne ait Tirebolu Kurşun-Çinko İşletmesi'nin yeraltı ocağı ile flotasyon tesisinde vardiya mühendisi olarak çalıştı. Kısa dönem askerlikten sonra Ocak 1990'da TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Malzeme Araştırma Bölümü'nde "araştırmacı" olarak göreve başladı ve halen bu görevini sürdürmektedir. 1992 yılında ise Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya-Metalurji Anabilim Dalı Üretim Metalurjisi Programında Yüksek Lisans öğrenimine başladı. KARA'nın bugüne kadar yurtiçi ve yurtdışında çeşitli konularda yayınlanmış makale ve raporların sayısı 8'dir. Ayrıca Sanayi ve Ticaret Bakanlığı'na sunulmuş bir patent başvurusu da değerlendirilme aşamasındadır.