

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÖKÜM ENDÜSTRİSİNDE SODYUM SİLİKAT BAĞLAYICILI KALIP /
MAÇA KUM ÖZELLİKLERİNİN MİKRODALGA YÖNTEMİYLE
GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serdar KADIOĞLU

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Üretim Metalurjisi ve Teknolojileri Mühendisliği Programı

MAYIS 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÖKÜM ENDÜSTRİSİNDE SODYUM SİLİKAT BAĞLAYICILI KALIP /
MAÇA KUM ÖZELLİKLERİNİN MİKRODALGA YÖNTEMİYLE
GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Serdar KADIOĞLU
(506111236)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Üretim Metalurjisi ve Teknolojileri Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Necip ÜNLÜ

MAYIS 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506111236 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Serdar KADIOĞLU**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**DÖKÜM ENDÜSTRİSİNDE SODYUM SİLİKAT BAĞLAYICILI KALIP / MAÇA KUM ÖZELLİKLERİNİN MİKRODALGA YÖNTEMİYLE GELİŞTİRİLMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Necip ÜNLÜ**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. M. Ercan AÇMA**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. S. Can KURNAZ

Sakarya Üniversitesi

Teslim Tarihi : **05 Mayıs 2014**

Savunma Tarihi : **27 Mayıs 2014**

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmalarım boyunca, gösterdiği her türlü destek, öneri ve yönlendirmelerinden dolayı değerli danışman hocam Sayın Doç.Dr.Necip ÜNLÜ'ye en içten dileklerle teşekkür ederim.

İTÜ'de gördüğüm eğitim boyunca engin bilgileri, kıymetli önerileri ile bana destek olan ve her zaman güvenen Sayın Prof. Dr. M. Ercan AÇMA'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Karakterizasyon çalışmalarında laboratuvar imkanlarından faydalanmamı sağlayan hocam Sayın Prof. Dr. Gültekin GÖLLER'e, mekanik analizlerim esnasında bana destek olan İTÜ İnşaat Fakültesi hocalarından Sayın Doç. Dr. Hakan Nuri ATAHAN'a, çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen Yük.Met.Müh.Ahmet TURAN'a, hammadde temini konusunda destek olan Karakaya Bentonit San. ve Tic. A.Ş. ve Maden Mühendisi Sayın Bünyamin ERTEK'e de teşekkürü borç bilirim.

Bana her konuda destek olan canımdan çok sevdiğim aileme, özellikle gücüme güç katan kardeşim Uğurcan KADIOĞLU'na, kancam Özcan ÇELİK'e, samimiyeti ve gülümsemesiyle hayatıma renk katan ve bana hayata dair çok şey öğreten güzel yürekli insan Can YEŞİLLETEN'e en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Mayıs 2014

Serdar KADIOĞLU
Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Elektromanyetik Dalga Teorisi	3
2.2 Tarihçe	7
2.3 Mikrodalga İle Isıtmanın (Dielektrik Isıtma) Prensibi	8
2.4 Mikrodalga - Malzeme Etkileşimi.....	12
2.5 Mikrodalğanın Avantajları ve Dezavantajları.....	13
2.5.1 Mikrodalğanın avantajları.....	13
2.5.2 Mikrodalğanın dezavantajları.....	14
2.6 Mikrodalga Uygulamaları.....	14
3. DÖKÜM ENDÜSTRİSİNDE KALIP VE MAÇA SİSTEMLERİ	17
3.1 Kalıp ve Maça Kumlarının Özellikleri	17
3.1.1 Kalıp kumu karışımları	18
3.1.1.1 Doğal kalıp kumları	18
3.1.1.2 Sentetik kalıp kumları	18
3.1.2 Kumun özellikleri.....	19
3.1.2.1 Tane biçimi.....	19
3.1.2.2 Tane büyüklüğü ve tane dağılımı	19
3.1.2.3 Refrakterlik.....	20
3.2 Sodyum Silikat Bağlayıcıları	20
3.2.1 Sodyum silikatın kavurma prosesi ile üretimi.....	20
3.2.2 Sodyum silikatın çözündürme prosesi ile üretimi	21
4. KALIP / MAÇA SERTLEŞTİRME YÖNTEMLERİ	23
4.1 Sıvı Sertleştiricili Sodyum Silikat Yöntemi.....	24
4.2 Toz Sertleştiricili Sodyum Silikat Yöntemi.....	24
4.3 CO ₂ Yöntemi.....	25
4.4 Geleneksel Kurutma Yöntemi.....	27
4.5 Mikrodalga Yöntemi	27
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	29
5.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler.....	29
5.1.1 Kum	29
5.1.2 Sodyum silikat.....	29
5.1.3 Karbondioksit	30

5.2 Deneyleerde Kullanılan Cihazlar.....	30
5.3 Deneyleerin Yapılışı	36
5.3.1 Kum – cam suyu karışımının hazırlanması	36
5.3.2 Deneylee numunelerinin hazırlanması	37
5.3.3 Standart numunelerin CO ₂ yöntemiyle sertleştirilmesi.....	37
5.3.4 Mikrodalga yöntemiyle sertleştirme	38
5.3.5 Geleneksel yöntemle sertleştirme	38
5.3.6 Mikrodalga sonrası ısıll işlem uygulaması	38
6. SONUÇLAR VE İRDELEME	39
6.1 Mekanik Test Sonuçları.....	39
6.1.1 CO ₂ yöntemi	39
6.1.2 Mikrodalga yöntemi	40
6.1.3 Geleneksel yöntem.....	43
6.1.4 MD sertleştirme sonrası ısıll işlem uygulaması.....	44
6.2 Mikroyapı Analiz Sonuçları	46
6.2.1 CO ₂ yöntemi	46
6.2.2 Mikrodalga yöntemi	47
6.2.3 Geleneksel yöntem.....	51
6.2.4 MD sertleştirme sonrası ısıll işlem uygulaması.....	52
7. GENEL SONUÇLAR.....	55
KAYNAKLAR.....	57
ÖZGEÇMİŞ.....	61

KISALTMALAR

MD : Mikrodalga
SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu
Std. Sapma : Standart Sapma

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Elektromanyetik spektrumun genel sınıflaması	5
Çizelge 2.2 : Bazı çözücülere ait dielektrik sabiti değerleri.	10
Çizelge 2.3 : MD ısıtmanın bazı çözücüler üzerindeki etkisi	11
Çizelge 3.1 : Dökümhane derecesinde tipik cam suyu verileri.....	22
Çizelge 5.1 : Kullanılan cam suyuna ait analiz sonuçları.....	30
Çizelge 5.2 : Kullanılan karbondioksit'e ait özellikler.....	30
Çizelge 6.1 : CO ₂ yöntemiyle sertleştirilen numunelerin basma mukavemetleri	41
Çizelge 6.2 : MD'da sertleştirilen %2 sodyum silikat bağlayıcılı numunelerin basma mukavemetleri.....	42
Çizelge 6.3 : MD'da sertleştirilen %3 sodyum silikat bağlayıcılı numunelerin basma mukavemetleri.....	43
Çizelge 6.4 : MD'da sertleştirilen %4 sodyum silikat bağlayıcılı numunelerin basma mukavemetleri.....	43
Çizelge 6.5 : Geleneksel yöntem basma mukavemetleri.....	45
Çizelge 6.6 : MD sertleştirme sonrası ısıtma işlemi uygulanmış numunelere ait basma mukavemetleri.....	47

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Bir mikrodalganın görünümü	3
Şekil 2.2 : Elektromanyetik spektrum.	5
Şekil 2.3 : a) Gelişigüzel hareket eden polar moleküller. b) Elektromanyetik alanla hizaya sokulan moleküller.....	9
Şekil 2.4 : Mikrodalga ile ısıtma sisteminin şematik gösterimi.....	11
Şekil 2.5 : Mikrodalganın çeşitli materyaller ile etkileşimi. a) Elektriksel İletken. b) Yalıtkan. c) Mikrodalgayı soğuran malzemeler. d) Mikrodalgayı soğuran malzeme içeren karma malzemeler.	12
Şekil 4.1 : Kalıp ve maça sertleştirme yöntemleri	23
Şekil 5.1 : Kullanılan silis kumuna ait tane boyut dağılımı.....	29
Şekil 5.2 : Elek analiz cihazı.....	31
Şekil 5.3 : Karışım hazırlama mikseri	31
Şekil 5.4 : Çelik tüp (kalıp).....	32
Şekil 5.5 : Teflon tüp (kalıp).....	33
Şekil 5.6 : Ridsdale tokmak (rammer).....	33
Şekil 5.7 : CO ₂ uygulama aparatı.....	34
Şekil 5.8 : Mikrodalga fırın.....	34
Şekil 5.9 : Etüv.....	35
Şekil 5.10 : Fırın.....	35
Şekil 5.11 : Mukavemet Test Cihazı	36
Şekil 6.1 : CO ₂ sertleştirmesinde sodyum silikat oranına bağlı mukavemet değişimi.....	41
Şekil 6.2 : MD sertleştirme sonrası elde edilen değerler	44
Şekil 6.3 : Geleneksel sertleştirme sonrası elde edilen değerler	46
Şekil 6.4 : Standart dışı kalmış numune	46
Şekil 6.5 : MD sonrası ısıtma işlemine ait basma (kalıcı) mukavemeti değerleri	47
Şekil 6.6 : CO ₂ yöntemi uygulanmış numunede tane yüzeyleri ve çatlaklar (x300) .48	
Şekil 6.7 : CO ₂ yöntemi uygulanmış numunede tane yüzeyleri ve çatlaklar (x1300).....	49
Şekil 6.8 : 510 W (4dk) MD sertleştirilmesi uygulanmış numunede kum taneleri ve bağlar (300x).....	50
Şekil 6.9 : 510 W (4dk) MD sertleştirilmesi uygulanmış numunede kum taneleri ve bağ köprüsü (1300x).....	50
Şekil 6.10 : 510 W (8dk) MD sertleştirilmesi uygulanmış numunede kum taneleri ve bağlar (300x).....	51
Şekil 6.11 : 510 W (8dk) MD sertleştirilmesi uygulanmış numunede kum taneleri ve bağ köprüsü (750x)	51
Şekil 6.12 : 850 W (8dk) MD sertleştirilmesi uygulanmış numunede kum taneleri ve bağlar (300x).....	52
Şekil 6.13 : 850 W (8dk) MD sertleştirilmesi uygulanmış numunede kum taneleri ve bağ köprüsü (750x)	52

Şekil 6.14 : Geleneksel yöntemde ait numunede tane yüzeyleri ve bağlar (x300).....	53
Şekil 6.15 : Geleneksel yöntemde ait numunede tane yüzeyleri ve bağ köprüsü (x1800).....	54
Şekil 6.16 : MD sertleştirme sonrası 100°C’ de ısıl işlem gören numunede bağ yapısı (x300)	54
Şekil 6.17 : MD sertleştirme sonrası 100°C’ de ısıl işlem gören numunede bağ yapısı (x1300)	55
Şekil 6.18 : MD sertleştirme sonrası 600°C’ de ısıl işlem gören numunede bağ yapısı (x300)	56
Şekil 6.19 : MD sertleştirme sonrası 600°C’ de ısıl işlem gören numunede bağ yapısı (x1300)	56

DÖKÜM ENDÜSTRİSİNDE SODYUM SİLİKAT BAĞLAYICILI KALIP / MAÇA KUM ÖZELLİKLERİNİN MİKRODALGA YÖNTEMİYLE GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Döküm endüstrisinde yaygın olarak kullanılan metotlardan biri olan kum kalıba döküm prosesinde, kalıp ve maçalar temel olarak; kum taneleri ve kum tanelerinin birbirine tutunmasını sağlayan bağlayıcının oluşturduğu matriks sisteminden meydana gelmektedir. Sodyum silikat bağlayıcılı kum sistemleri, 60 yılı aşkın bir süredir dökümhanelerde, kalıp ve maça üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sodyum silikat, çevreci bir bağlayıcı malzeme olması ve düşük fiyatlarına rağmen, yüksek kalıcı mukavemet nedeniyle, kalıp kumlarında reklamasyon zorluğu ve zayıf kalıp bozma özellikleri gibi problemlere neden olmaktadır. Etkili bir yöntem olarak sodyum silikat bağlayıcı katkı miktarının azaltılması büyük önem taşımaktadır. Başlangıç aşamasındaki araştırma çalışmaları, sodyum silikatın bağ potansiyelinin mikrodalga ısıtma sertleştirilmesi ile verimli şekilde değerlendirilebileceğini ve böylelikle de sodyum silikat bağlayıcı katkı miktarının önemli miktarda azaltılacağını işaret etmektedir. Mikrodalga enerji uygulaması; uniform ısıtma, enerji tasarrufu, yüksek ısıtma hızları ve temiz üretim gibi avantajlar sunmaktadır. Frekans aralığı, 300 GHz ile 300 MHz; dalga boyları, 0,1-100 cm olan mikrodalgaların ısıtma mekanizmasının esası, dielektrik özelliğe sahip malzemelere uygulanması ile moleküllerinin polarize edilerek hızlı bir şekilde yön değiştirmelerini ve moleküler düzeyde çok yüksek titreşimlerini sağlamakta ve kısa sürelerde, homojen bir ısıtma etkisi elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada, modül değeri 2,04 olan sodyum silikat bağlayıcısının %2, %3 ve %4 oranlarında kullanılıp, her reçetede sabit olan %0,5 oranındaki su ve 41 AFS tane boyutuna sahip silis kumu ile hazırlanan karışımların mikrodalga sertleştirme mekanizması, 240-480 sn ve 510-850 W güç aralığında karakterize edilerek, tanımlanmıştır. Mikrodalga sertleştirme yöntemi ile elde edilen bağ köprülerinin yapıları, CO₂ yöntemi ve geleneksel kurutma yöntemi ile elde edilen bağ köprülerinin yapıları ile karşılaştırılarak, proses - mekanik özellik - mikroyapı ilişkileri açıklanmıştır. Ayrıca, mikrodalga prosesi ile sertleştirilen kalıp kum karışımlarının kalıcı mukavemetine, sıcaklığın etkisi de 100-800°C aralığında 100°C aralıklarla tespit edilmiştir.

CO₂ sertleştirme yöntemi ile hazırlanan numunelerde, sodyum silikat içeriğinin %2' den %4' e artması ile, basma mukavemetlerinde 0,321±0,07 MPa' dan 0,954±0,18 MPa' a artış gözlenmiştir. Mikrodalga yöntemi ile 510W güç ve 480 sn sertleştirilen numunelerde de sodyum silikat miktarının %2' den %4' e çıkması durumunda basma mukavemeti, 3,413±0,67 MPa' dan 11,218±0,15 MPa' a çıkarak, yaklaşık 3,2 kat artış göstermiştir. Mikrodalga uygulama süresinin 240 sn' den 480 sn' e arttırılması ile sabit sodyum silikat oranı (%4) ve sabit mikrodalga gücünde (680 W), basma mukavemeti değerinin yaklaşık 1,5 kat arttığı gözlemlenmiştir.

Mikrodalga yöntemi ile sertleştirme işlemi sonrası ısı işlem uygulanan numunelerde kalıcı mukavemetin, 100°C' den 700°C' ye doğru artan sıcaklıkla azaldığı belirlenmiştir. Bu mukavemet düşüşü, mikrodalga uygulaması ile oluşan silika jel yapısındaki bağ köprülerinin sıcaklığın etkisi ile bozunmasından kaynaklanmaktadır. CO₂ yöntemi ile sertleştirilen numunelerde çatlakların sadece yüzeysel olmayıp, kum taneleri arasındaki bağlara derin bir şekilde nüfuz ettiği görülmektedir. Sertleştirme yöntemleri içerisinde basma mukavemet özellikleri açısından en düşük değerlerin CO₂ prosesinde tespit edildiği dikkate alındığında, düşük mukavemet davranışının mikroyapı gözlemleri ile örtüştüğü görülmüştür. Mikrodalga yöntemi ile sertleştirilen numunelerden alınan taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntülerinde, kum taneleri arasında çatlaksız, kuvvetli bağ oluştuğu gözlemlenmiştir. Mikrodalga yöntemi ile sertleştirilen numunelerde sodyum silikat köprülerine ait yüzey görüntülerinin, geleneksel yöntem ve CO₂ yöntemi ile elde edilen yüzeylerden daha düzgün, pürüzsüz ve hatasız formda olduğu belirlenmiştir.

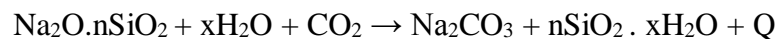
Mikrodalga yönteminde, hızlı sıcaklık artışı sayesinde, bağlayıcının taneleri birbirine çekme etkisi yüzey hatalarına neden olmamakta, bağ köprüleri arasında yumuşak geçişler yapan camsı film oluşumu sağlanmakta ve geleneksel yöntemde olduğu gibi kullanılan bağlayıcının viskozitesinde olumsuz bir davranış (viskozite düşüşü) gözlenmemekle birlikte 100°C üzerinde bu durum silika tane yüzeyinin ıslanabilirliği açısından olumlu bir etki yaratmaktadır. Geleneksel yöntem ile sertleştirilme sonrası elde edilen numunelerde, kum taneleri arasındaki bağ köprülerinin düz, CO₂ prosesindeki oluşan bağlardan daha düzenli ve çatlaksız olduğu görülmektedir. Bu düzenli yapı, basma mukavemetlerinde tespit edilen yüksek değerleri doğrulamaktadır.

Mikrodalga sertleştirme sonrası 100°C'de 30 dk ısı işlem gören numunelerin mikroyapı analizinde, kum taneleri arasındaki bağların herhangi bir çatlak içermediği ancak, yüksek sıcaklık etkisi ile sodyum silikat yapısındaki bozunma başlangıcından kaynaklı olarak bağ köprülerinin yüzeylerinde pürüzler tespit edilmiştir. 600°C' de ise, sodyum silikat yapının tamamen bozunmasıyla bağ köprüleri dağılmıştır. Bu durum, kalıcı mukavemetin sıcaklık artışı ile hızlı bir şekilde düştüğünün göstergesidir.

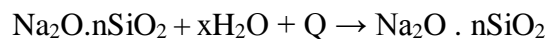
DEVELOPING OF PROPERTIES OF SODIUM SILICATE BONDED MOULDING/CORE SANDS BY MICROWAVE METHOD IN FOUNDRY INDUSTRY

SUMMARY

In the sand casting process that one of the commonly used methods in the foundry industry, the mold and core systems constitutively is composed of grit and matrix system of the binder formed which providing the grains of sand to stick together. Sodium silicate bonded molding sands have been commonly used for production of foundry molds and cores for over sixty years. Though hydrated sodium silicate is an an ecological binder with low cost, it presents well-known problems such as the difficulty of reclamation, high residual strength of moulding sand, consequently, bad collapsibility etc. As an efficient method, lowering the the adding quantity of sodium silicate binder has a significant interest. With respect to the hardening methods are interested, the adding quantity of sodium silicate binder is about 5% - 6% at the CO₂ hardening process, while that quantity is decreased to 2.5% - 3.5% by ester hardening. In the case of CO₂ hardening process, the moulding sands samples are blown through with non-heated CO₂ for 30 s. The hardening reaction occurs according to the following formula:



The another hardening method is consisted in drying the samples in a traditional laboratory drier at 110°C for 120 min. Thus, the dehydration reaction occurs according to the following formula:



where n, and x are the stoichiometric coefficients.

Additionally, primal research studies have pointed out that the bonding potential of sodium silicate binder might be evaluated efficiently under the microwave heating hardening, hence, lowering the quantity of sodium silicate binder significantly. Microwave energy application introduces some advantages such as uniform heating, energy saving, rapid heating rates, and clean fabrication. Since the wavelength of microwaves could be in the range of 1 to 1000 mm, with frequencies between 300 GHz and 300 MHz, the microwave field could alter the direction of the applied electric field with a high frequency. Thus, the dielectric polar molecules would fluctuate rapidly, and in a short time a uniform heating would be obtained.

Microwave drying process presents 10 to 100 times less energy consumption and 10 to 200 times less process time than at traditional drying process. Research investigations on application of electromagnetic waves of 2.54 GHz frequency in foundry processes have been conducted since the 80's of the previous century. Trials of microwave energy on quick fabricating of sodium silicate bonded cores/moulds have great significance for the progressive solutions in foundry industry.

In this study, the hardening mechanism of microwave heated moulding sand containing 2-4% of sodium silicate binder with a module 2.04 was investigated. AFS standard cylindrical specimens were prepared, and subjected to action of microwaves at 510, 680 and 850 W for 240, 360, and 480 s.

Strength behavior, consequently, the bonding bridges linking the matrix grains in the moulding sand mixtures was determined by the compressive strength tests and the scanning electron microscope (SEM) analysis. The obtained results were compared with those of specimens prepared by both the CO₂ process and the traditional drying (in a convection-type oven) process. In addition, influence of temperature on residual strength of microwave hardened molding sand mixtures was evaluated within 100 to 800°C at intervals of 100°C.

Room temperature average compressive strength values of the sand samples hardened by CO₂ process were increased from 0,321±0,07 MPa to 0,954±0,18 MPa with the increase of the quantity of sodium silicate binder from 2% to 4%. Similarly, room temperature compressive strength values of the sand samples heated for 480 s with 510 W by microwave exhibited approximately 3.2 times increment significantly.

When the heating time was increased from 240 s to 480s under the constant conditions of both the microwave power and the quantity of sodium silicate binder, as 680 W, and 4%, respectively, the room temperature average compressive strength values exhibited approximately 1.5 times increment.

Residual strength values of the microwave hardened samples were decreased with the increase in baking temperature from 100 to 700°C. This behavior was observed due to the adhesive destruction of linking bridges occurring on the interface binder-matrix grains. The CO₂ hardened samples presented the both superficial and penetrated cracks running into the bonds between sand grains. Moulding sands with sodium silicate hardened in the CO₂ process were explained by the lowest strength due to the fact that the bonding bridges were cracked.

The SEM analysis of microwave hardened samples showed the formation of durable and strong linking bridges. The microwave hardened samples resulted in more defect-free and smooth linking bridges and binder envelopes than at the samples of both the CO₂ hardened and traditional drying process.

Due to the quick hardening effect of microwaves, the rapid contraction of binder prevented the formation of surface defects, also provided durable glassy films, gentle and fluently passing to the bonding bridges. In addition, there was not any negative behavior at the viscosity of the applied binder, also wettability of silica grains at the temperatures over 100°C.

The linking bridges obtained by the traditional drying process were more regular without cracks. This regular structure verified the observed higher compressive strength values.

The SEM analysis of the samples baked at 100°C for 30 min. after the microwave heating, indicated that the bonding bridges between the silica grains were free from cracks and the irregularities on the bonding bridges were the result of destruction of sodium silicate structure by the effect of high temperature. In the samples baked at 600°C for 30 min after the microwave heating, the structure of sodium silicate was totally destructed, and verified the observed lower residual strength values.

Higher performance of the microwave heating application and thorough evaporation of water during the sodium silicate binder hardening did not show the lower mechanical properties of the prepared molding sand mixtures and did not result in mechanical destruction of the linking bridges, for example due to a rapid volume change.

Besides, in the light of the current study, it can be expressed that the application of microwave energy to the sodium silicate bonded moulding sands can provide significant economic advantages due to an indicative reduction of curing times as well as from reduction of energy consumption, also, the desired properties of molding and core sands can be achieved.

1. GİRİŞ

Çevreci, yenilikçi ve temiz üretim teknolojileri, 21. yüzyıl döküm endüstrisinin gelişim gösteren bir akımı haline gelmiştir. En popüler inorganik bağlayıcılardan biri olan sodyum silikat bağlayıcıları, döküm endüstrisinde kullanılan kalıp ve maça sistemlerinde 60 yılı aşkın bir süredir uygulanmakta, kolay uygulama prosesi, nispeten ucuz olmaları ve dehidratlaşma sertleşmesi gibi birçok avantajlarla karakterize edilmektedirler [1,2]. Sodyum silikat bağlayıcılı kalıp ve maça sistemlerinde kullanılan kumların reklamasyon zorluğu ve zayıf kalıp bozma özellikleri, tartışmasız eksiklikler olarak kendini göstermektedir [2,3]. Söz konusu eksikliklerin ortadan kaldırılması amacıyla yapılan araştırma ve çalışmalar en etkili müdahalenin, sodyum silikat bağlayıcı miktarının azaltılması olduğunu göstermektedir [4,5]. CO₂ prosesi ile sodyum silikat bağlayıcı kum sisteminin sertleştirilmesi durumunda, sodyum silikat bağlayıcı ilave miktarı kum ağırlığının %5-6' sı kadar iken, ester sertleştirme prosesi ile %2,5-3,5 miktarlarına düşürülebileceği görülmüştür [6]. Başlangıç aşamasındaki deneysel çalışmalar; mikrodalga ışınlamaya maruz kalan sodyum silikat bağlayıcısının bağ yapma mekanizmasının uygulanabilirliğini , ayrıca istenen mekanik dayanım değerlerine ulaşmada sodyum silikat bağlayıcı miktarının belirgin şekilde azaltılabileceğini göstermiştir [7]. Mikrodalga ısıtma; yüksek ısıtma hızları, uniform ısıtma, enerji tasarrufu ve temiz üretim gibi avantajlara sahiptir [7-12]. Işınlamanın etkileyebildiği derinlik, dalga boyuna, malzemenin dielektrik sabitine ve kayıp faktörüne bağlıdır [13].

Frekans aralığı, 300 GHz ile 300 MHz; dalga boyları, 0,1-100 cm olan mikrodalgaların ısıtma mekanizmasının esası, dielektrik özelliğe sahip malzemelere uygulanması ile moleküllerinin polarize edilerek hızlı bir şekilde yön değiştirmelerini ve moleküler düzeyde çok yüksek titreşimlerini sağlamakta ve kısa sürelerde, uniform bir ısıtma etkisi elde edilebilmektedir [6].

Mikrodalga ısıtma prosesi esnasında sodyum silikat bağlayıcılı kum numunelerinde su moleküllerinin büyük çoğunluğu hızlı bir şekilde buharlaşabilmektedir. Böylece

dehidratlaşma sertleştirmesi nedeniyle sodyum silikat bağlayıcılı kum sisteminde yüksek mukavemet eldesi mümkün olabilmektedir [14].

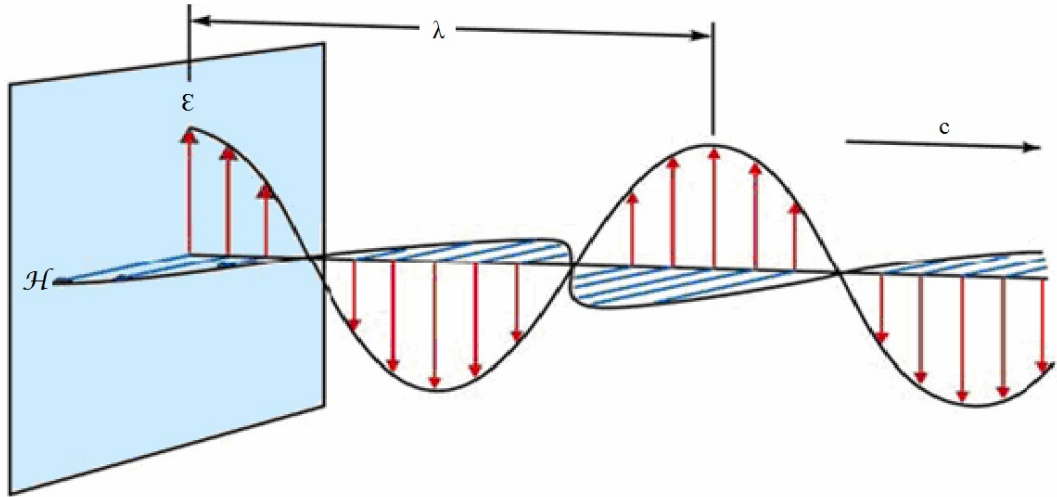
Son yıllarda mikrodalga enerjisi üzerine yapılan araştırma çalışmalarının giderek artışı dikkate aldığımızda, yüksek enerji kullanımı ve uzun proses süreli teknolojilere alternatif olarak, mikrodalga ışınımının kullanıldığı daha ekonomik ve daha kısa proses sürelerinin söz konusu olduğu teknolojilerin geliştirildiği öngörülebilir. Geleneksel ve mikrodalga kurutma prosesleri kıyaslandığında, mikrodalga prosesinde enerji tüketimi 10-100 kat daha düşük ve proses süresi de 10-200 kat daha kısa olduğu bilinmektedir [2]. Ev tipi mikrodalga fırınları olarak bilinen 2,54 GHz frekans ve 12,2 cm dalga boyundaki mikrodalga radyasyonuna olan özel ilgi giderek artış göstermektedir. Döküm endüstrisinde yenilikçi çözümlerin bulunması amacıyla, sodyum silikat içeren kalıp kumlarından kalıp ve maçaların hızlı üretiminde mikrodalga enerjisinin kullanımı denemeleri, büyük önem taşımaktadır.

Mikrodalga uygulamasının artan popülerliğine rağmen, mikrodalgaların değişik malzemeler üzerindeki etki mekanizması tam olarak tanımlı değildir. Bu çalışmada, % 0,5 su ve % 2, 3 ve 4' lük oranlarda 2,04 modül değerine sahip sodyum silikat bağlayıcısı ve ortalama tane boyutu 41 AFS olan silis kumundan hazırlanan kalıp kum karışımlarından elde edilen standart numunelerin mikrodalga sertleştirme mekanizması, ve 240-480 sn ve 510-850 W güç aralığında mikrodalga uygulamaları ile karakterize edilerek, tanımlanmaktadır. Mikrodalga sertleştirme yöntemi ile elde edilen bağ köprülerinin yapısı, CO₂ yöntemi ve geleneksel kurutma yöntemi ile elde edilen bağ köprülerinin yapıları ile kıyaslanarak, proses - mekanik özellik - yapı ilişkisi tanımlanmaktadır. Ayrıca, mikrodalga prosesi ile sertleştirilen kalıp kum karışımlarının basma (kalıcı) mukavemetine sıcaklığın etkisi de 100-800 °C aralığında 100 °C aralıklarla tespit edilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Elektromanyetik Dalga Teorisi

Elektromanyetik radyasyon (ışık), enerjinin elektrik ve manyetik alan bileşenleriyle birlikte dalgalar halinde yapmış olduğu taşıdır. Bu taşıdır hareketi ışık hızı ile olur. Elektromanyetik dalgalar; görünür ışık, X ışınları, radyo dalgaları, gama ışınları, ultraviyole ışınlar, kızılötesi ışınlar gibi birçok biçimde olabilmektedir. Bu noktada; elektromanyetik dalgaların birbirinden farkı, frekansları ya da dalga boylarıdır. Bir elektromanyetik dalganın frekansıyla dalga boyunun çarpımı sabit olup ışık hızına eşittir. Yani elektromanyetik dalgaların frekansları artıkça dalga boyları azalır [15,16].



Şekil 2.1: Bir mikrodalganın görünümü [17].

Burada;

\mathcal{H} : Manyetik Alan

\mathcal{E} : Elektrik Alan

λ : Dalga Boyu

c : Işık Hızı

Durağan bir elektrik yükünün etrafı daima bir elektrik alan ile çevrilidir. Bu elektrik alan, çevresindeki başka bir elektrik yüküne itme veya çekme şeklinde bir kuvvet uygular. Eğer bu durağan elektrik yükü hareket ettirilirse etrafında manyetik alan meydana gelir. Bu sayede alan etrafındaki manyetik bir metal parçası ve mıknatıs gibi malzemelere manyetik olarak itme veya çekme kuvveti uygular. Bu olgudan kaynaklı olarak, elektrik ve manyetik alan, elektromanyetik alan olarak isimlendirilir [18,19].

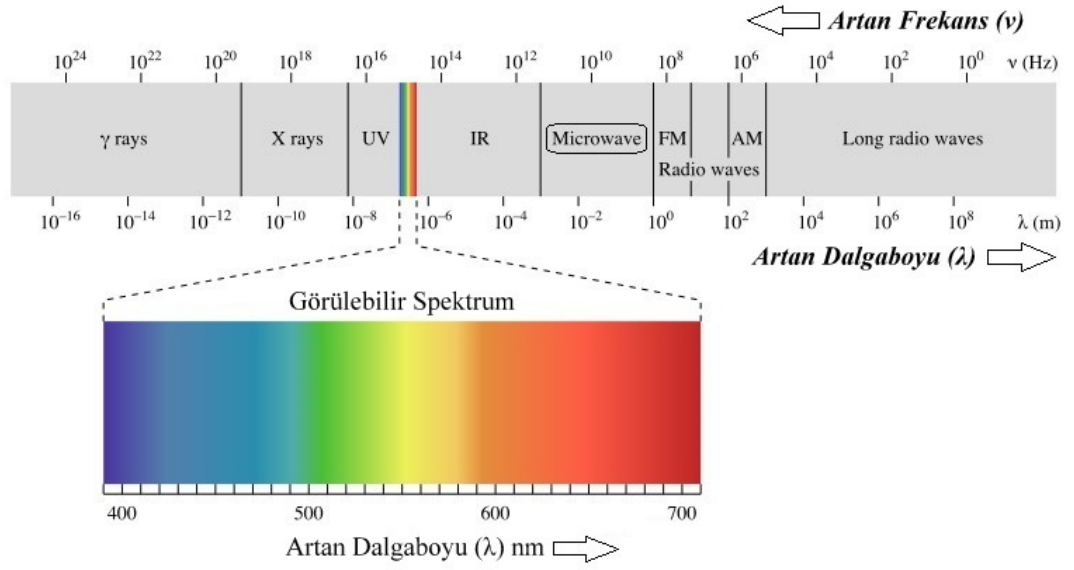
Elektromanyetik alan içerisinde olacak olan herhangi bir değişiklik, sisteme elektromanyetik dalga olarak yayılır. İndüksiyon teorisince, değişken manyetik alanlar elektrik alanlarını, değişken elektrik alanlarda manyetik alanlarını oluştururlar. Elektrik ve manyetik alanların karşılıklı indüklenmeleri neticesinde uzayda kendi kendine oluşan elektromanyetik salınımlar vuku bulurlar. Bu dalgalar boşlukta ışık hızı ile ilerler. Nokta yükün ani bir şekilde hareket ettirilmesiyle bu yükün etrafında oluşturduğu elektrik alanlarda da ani değişimler gerçekleşir ve indüklenmiş bir manyetik alan oluşur. Sonuç olarak; oluşan elektromanyetik puls (vuru), uzayda küresel halde bir dalga olarak yayılır. Yayılan dalgalar, elektromanyetik enerji taşıyıcılarıdır ve taşıdıkları enerjilerini uzayda yayılırken yollarının üzerinde bulunan cisimlere enerji aktarabilirler, böylece dalganın enerji yoğunluğu zamanla değişir. Yani manyetik alanla ilgili anlık enerji yoğunluğu, elektrik alanla ilgili anlık enerji yoğunluğuna eşittir. Böylece belli bir hacimdeki enerji, iki alan tarafından eşit olarak paylaşılır. Toplam anlık enerji yoğunluğu, elektrik ve manyetik alanlara ait enerji yoğunluklarının toplamına eşittir [23].

Elektromanyetik dalgalar çizgisel momentum da taşırlar. Bu nedenle, bir elektromanyetik dalga bir yüzey üzerine çarptığı zaman, yüzey üzerinde basınç (radyasyon basıncı) oluşur.

Elektromanyetik spektrumdan dalgaların çeşitli özellikleri anlaşılabilir. Spektrumun çok dar bir aralığını oluşturan elektromanyetik dalgalar gözle görülebilir. Dalgaların hızları, içinden geçtikleri ortama göre farklılık gösterirken frekansları ise ortama göre değişmez.

Elektromanyetik spektrumun üst kısmında gama ışınları ve yüksek enerjili x-ışınları gibi ışınlar bulunur. Elektromanyetik tayfın alt ucunda ise "aşırı düşük frekanslı" (ELF) dalgalar yer alır. Bu dalgaların frekansı 3000 Hz' den daha düşüktür, yani dalga

boyları binlerce kilometreyi bulabilmektedir. Elektrik enerjisi iletim hatlarının oluşturduğu 50 Hz frekansındaki elektromanyetik alanlar bu sınıfa girmektedir [20].



Şekil 2.2: Elektromanyetik Spektrum

Elektromanyetik dalgalar iyonize olanlar ve iyonize olmayanlar olarak ikiye ayrılırlar. İyonize dalgalar madde ile etkileştiğinde iyonlaşabilen, atomlardan veya moleküllerden elektron koparmak için yeterli enerjiyi taşıyan kuantumlara sahip olan elektromanyetik radyasyon türüdür. Çizelge 2.1’ de elektromanyetik dalgaların iyonizasyon etkileri gösterilmiştir.

Çizelge 2.1: Elektromanyetik spektrumun genel sınıflaması [17].

	Fotonun Bölgesi	Dalga Boyu	Frekans (Hz)	Foton Enerjisi
İyonlaştırıcı Radyasyon	Gama ışını	0.00005 nm	6×10^{21}	25 MeV
	X-Işını	0.05 nm	6×10^{18}	25 keV
	Ultraviyole	100 nm	3×10^{15}	12 eV
İyonlaştırmayan Radyasyon	Görünür	550 nm	5×10^{14}	2 eV
	Kızılötesi	10 μ m	3×10^{13}	120 meV
	Mikrodalga	1 cm	3×10^{10}	120 μ eV
	Radyo Dalgası	1 km	3×10^5	1 neV

Radyo dalgaları, iletken tellerden geçen ivmeli yükler sonucu oluşan dalgalardır. Elektronik cihazlar aracılığıyla oluşturulurlar. Radyo ve TV gibi iletişim sistemlerinde kullanılırlar [23].

Mikrodalgalar, 1 mm ile 1 m arasında değişen, frekansları 300 MHz den 300 GHz'e kadar olan bölümüne denk gelen iyonize olmamış dalgalardır. Dalga boyları kısa olduğundan, hava radar sistemleri ve maddenin atomik ve moleküler parametrelerinin incelenmesi için, çok uygundurlar. Elektromanyetik spektrumda kızıl ötesi ışınlar ile radyo dalgaları arasında yer almaktadır [23].

Mikrodalga frekansları 3 bant içermektedir [24,25].

- Ultra yüksek frekans (UHF: 300 MHz' den 3 GHz'e),
- Süper yüksek frekans (SHF: 3 GHz' den 30 GHz'e),
- Aşırı yüksek frekans (EHF: 30 GHz' den 300 GHz'e kadar olan).

Mikrodalga frekansları radyo ve televizyonlarda kullanılan dalgalara yakın olduğu için, kullanım esnasında ortaya çıkabilecek etkileşimlerin önüne geçmek için yalnızca, ulusal veya uluslararası telekomünikasyon komisyonlarınca onaylanan frekanslardan ısıtma amacıyla yararlanılır. Genel olarak ISM (Industrial, Scientific, Medical) bant adı verilen bu ışınlar 896, 915, 2450, 5800 ve 24125 MHz frekans değerlerine sahip ışınlardır. Ev tipi fırınlarda 2450 MHz, sanayide ise 915 MHz frekanslı ışınlar kullanılır [26-28].

Kızılötesi dalgalar, dalga boyları 1 mm ile görünür ışığın en uzun dalga boyu olan 7×10^{-7} m arasında değişen elektromanyetik dalgalardır. Birçok madde tarafından kolaylıkla soğurulabilen kızıl ötesi dalgalar, sıcak cisimler ve moleküller tarafından oluşturulurlar. Bir madde kızılötesi dalgayı soğurduğunda cismin atomları yerinden oynadığında, onların titreşim ve ötelenme hareketleri artar ve madde ısınır bu nedenle ısı dalgaları adı ile de anılırlar. Fizik tedavi, kızılötesi fotoğrafçılık ve titreşim spektroskopisini içeren birçok pratik ve bilimsel uygulamalarda kullanılırlar [23].

Görünür dalgalar, insan gözünün görebildiği elektromanyetik dalgalardır. Dalga boylarına bağlı olarak mordan kırmızıya kadar değişen renklerle sınıflandırılırlar. Gözün duyarlılığı, dalga boyu $5,6 \times 10^{-7}$ m (sarı-yeşil) civarında olduğunda maksimum olduğu, dalga boyunun bir fonksiyonudur.

Morötesi dalgalar, dalga boyları $3,8 \times 10^{-7}$ m ile $6,0 \times 10^{-8}$ m arasını kapsayan dalgalardır. Morötesi dalgaların en önemli kaynağı güneştir. Ancak, güneşten gelen morötesi ışığın büyük bir kısmı, üst atmosfer veya stratosfer katmanındaki atomlar tarafından absorblanır.

X ışınları, 10^{-8} m ile 10^{-13} m aralığında dalga boyuna sahip elektromanyetik dalgalar. Bir metali bombardımana tabi tutan yüksek enerjili elektronların yavaşlamasıyla elde edilirler. X ışınları, tıpta bazı kanserli hücre türlerinin tedavisinde ya da bir tanı aracı olarak kullanılırlar. X-ışınları canlı dokulara ve organizmalara karşı zararlı hatta öldürücü etki yaptığından, bu ışınlar maruz kalınmamalıdır. X-ışını dalga boyları katı cisimlerdeki atomlar arası uzaklık (0,1 nm) mertebesinde olduğundan X-ışınları kullanılarak kristal yapı incelenebilir [23].

Gama ışınları, dalga boyları 10^{-10} m ve 10^{-14} m civarında olan dalgalar. ^{60}Co ve ^{137}Cs gibi radyoaktif çekirdekler tarafından belirli nükleer tepkimeler süresince yayılırlar. Gama ışınları yüksek derecede girginlik özelliğine sahiptirler ve canlı dokular tarafından soğuruldukları takdirde ciddi zararlar oluştururlar [23].

2.2 Tarihçe

1831 yılında İngiliz Fizikçi Faraday, bugünkü elektromanyetik dalga teorisinin temeli olan değişken manyetik alanın elektriksel alan ve değişken elektriksel alanın da manyetik alan oluşturduğunu keşfetmiştir. 1864 yılında, James Clerk Maxwell elektromanyetik dalga teorisini bilimsel olarak açıklamıştır. 1877 yılında, İngiliz fizikçi J.S. Rayleigh çok yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların borulardan iletilebileceğini iddia etmiş olup aynı yıl içerisinde Hertz kıvılcımlı bir jeneratör kullanarak 60 cm dalga boyunda mikrodalgalar üreterek ve dalgaların optik özelliklere sahip olduğunu kanıtlamıştır. G.Marconi ve E.Brandly 1896 yılında ilk telsiz bağlantısının gerçekleştirerek bilimsel ve teknik gelişmelerin başlamasına katkı sağlamıştır. 1906 yılında, Lee de Forest yükseltici (amplifikatör) olarak kullanılacak olan triyot lambasını (elektron tüpü) bularak telsiz haberleşmesini sağlamak suretiyle, elektromanyetik dalgaları uygulama alanına koymuştur. Ancak, dalga boyu lambanın boyundan daha kısa olan frekanslarda bu lambaların kullanılamayacağı anlaşılmıştır. 1920 yılında Alman fizikçiler Heinrich Georg Barkhausen and Karl Kurz 'Barkhausen - Kurz tube' adı verilen 300 MHz üzerinde, radyo spektrumunun ultra-yüksek frekans (UHF) kısmında radyo güç üretebilen ilk osilatörü icat etmiştir. 1921 yılında A.W. Hull magnetronu bulmuş, ancak Hull'un bulduğu bu yarıklı anotlu magnetron, yüksek frekans veya yüksek güç çıkışı yeteneğine sahip olmadığından az kullanılmıştır. Daha sonra 1939 yılında Russel ve Sigurd Varian kardeşlerin klistronu yapmaları ile mikrodalganın üretilmesi konusunda büyük gelişme kaydedilmiştir. 1940'li yıllara

gelindiğinde çeşitli maddelerin yüksek frekanslı elektromanyetik alandaki davranışları ve dielektrik özellikleri araştırılmaya başlanmıştır. Bu sayede, yüksek ve çok yüksek frekanslı elektromanyetik enerjinin sadece telekomünikasyon alanında kalmayıp birçok endüstriyel işlemlerde uygulanabileceği ortaya çıkmıştır. 1865 yılında, frekans karışıklıklarını önlemek amacıyla, uluslararası frekans dağılımını belirlemek için Birleşmiş Milletlere bağlı ve merkezi Cenevre’de bulunan Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU) kurulmuştur [15,29-33].

Alıcı ve verici cihazlar ile antenler arasındaki bağlantılar için koaksiyel kablolar ve iletim boruları geliştirilmiş, farklı tipte antenlerden yararlanılarak, çok yüksek frekansların üretilmesi ve aynı zamanda bunların iletilmesi ve yayını konusunda da çalışmalar yapılmıştır [15].

Mikrodalga teknolojisinin gelişimi II. Dünya Savaşı sırasında radar cihazlarının sabit frekansta mikrodalga üretmesi için yapılan çalışmalar ile başlamıştır. 1945 yılında Raytheon firmasında çalışan Amerikalı mühendis Percy LeBaron Spencer mikrodalga laboratuvarına giderken yanında götürdüğü çikolatasının laboratuvardaki bir aygıtın yanına bıraktığında kendiliğinden eridiğini fark etti. Böylece mikrodalga enerjisinin yiyecekleri ısıtabildiğini keşfetti ve bu tesadüfi olay onda mikrodalga enerjisinin gıda pişiriminde kullanılması fikrini doğurdu. Araştırmalar neticesinde bir yıl sonra Raytheon, sanayi mutfakları için tasarlanmış ilk mikrodalga fırını tanıttı. Ancak, yaklaşık 2 metre yüksekliğinde ve 340 kiloluk hantal bir fırın olan ürün, kullanışsızlığından dolayı tutmadı. 1972 yılında Amana firması evlere yönelik ilk mikrodalga fırın modelini üretti. 1975 yılında ise mikrodalga fırınlar gazla çalışan fırınları çoktan geride bırakmıştı. Bir yandan bu fırınlar geliştirilirken, 1980’lerde de laboratuvarlarda kullanılmak için tasarlanmış endüstriyel mikrodalga fırınlar üretilmeye başlandı. İlk endüstriyel uygulamalar gıda sanayiinde görülmüş daha sonra kâğıt, inşaat malzemeleri, metalürji sanayi, çevre ile ilgili radyoaktif atık ve hastane atıklarının zararsız hale getirilmesinde kullanım ve uygulama alanı bulmuştur [15,28,34].

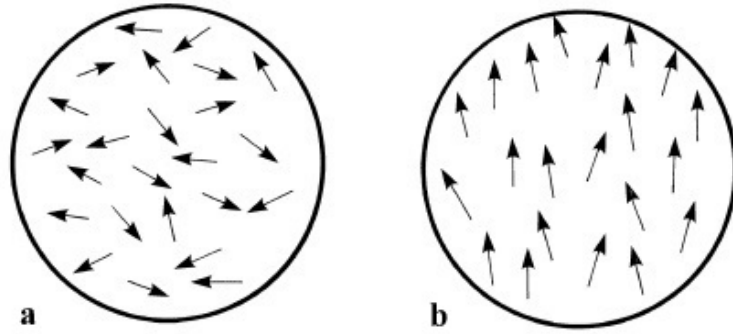
2.3 Mikrodalga İle Isıtmanın (Dielektrik Isıtma) Prensibi

Mikrodalgaları soğuran malzemelerde enerji kaybının (malzeme içi enerji dağılımı) iki önemli mekanizması mevcuttur. Bunlar; dipolar etkileşimler ve iyonik iletimdir. Dipolar parçacıkların rotasyonu ve/veya iyonik parçacıkların göçü ile moleküller

belirli bir harekete sebep olurlar. Ancak bu iki mekanizma birbirinden bazı bakımlardan farklıdır.

Dipol moment ile ifade edilen, elektriksel kutba sahip moleküllerin kutupları arasındaki elektrik yükleridir. Su gibi dipol momentli malzemeler mikrodalgaya maruz kaldıklarında dönme hareketiyle uygulanan alan ile aynı hizaya gelirler. Gerçekleşen dönme hareketi neticesinde ortaya çıkan sürtünme kuvveti sonucunda da moleküller enerji kazanarak ısınır [34-37].

İyonik iletim mekanizmasında ise; bir çözelti içerisinde yüklü parçacıklar olan iyonların dipol momentleri yoktur. Mikrodalgaların elektrik alanına maruz kalan iyonlar, elektrik alandan kaynaklanan polarite değişiminden dolayı çözünen ve titreşen iyonlar ile çarpışırlar. Çarpışma sonucu ortaya çıkan kinetik enerji, ısı enerjisine dönüşür [34-37].



Şekil 2.3: a) Gelişigüzel hareket eden polar moleküller.

b) Elektromanyetik alanla hizaya sokulan moleküller [35].

Bu iki farklı mekanizmanın etkinlikleri; aynı süreyle, aynı güç değerinde mikrodalgalara maruz kalan saf su ve musluk suyunun ulaştığı en yüksek sıcaklık değerleri sayesinde karşılaştırılmıştır. Musluk suyu için, ısınma hızı ve ulaştığı en yüksek sıcaklığın, içerdiği iyonlar (hem iyonik iletim mekanizması hem de dipol etkileşim mekanizması) nedeniyle, sadece dipol etkileşimle ısınan saf suyunkinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir [36,37].

Bir maddenin mikrodalga ile ısıtılması, mikrodalgaların frekansına ve gücüne bağlı olduğu kadar, ısıtılacak maddenin su (dipol momentli yapı) içeriğine, yoğunluğuna, iyon yüküne, kütlesine, tüketme faktörüne de bağlı olarak değişir.

Belli bir frekans ve sıcaklıkta elektromanyetik enerjinin ısı enerjisine dönüşebilme yeteneği olan tüketme faktörü, malzemenin dielektrik kaybının (ϵ'') dielektrik sabitine (ϵ') oranı [$\tan\delta = (\epsilon'' / (\epsilon'))$] olarak ifade edilir [37].

Relatif geçirgenlik olarak da tanımlanan dielektrik sabiti (ϵ), mikrodalgaların malzeme içinden geçerken, enerjinin malzeme tarafından soğurulma (tutulma) yeteneğinin bir ölçüsüdür ve enerjinin ne kadarının malzeme tarafından adsorplanıp ısıya dönüştüğünü, ne kadarının hava-malzeme ara yüzeyine yansıdığını gösterir [37].

Çizelge 2.2: Bazı çözücülere ait dielektrik sabiti değerleri [39].

Madde	Dielektrik Sabiti
Aseton	20,70
Benzen	2,27
Metanol	33,62
Su	78,54
HF	83,60
HCl	4,60

Enerjinin, malzeme tarafından tüketilmesinin ölçüsü olan, Dielektrik (kayıp) faktörü (ϵ'') ise malzeme içerisinden geçen mikrodalga enerjisinin ısı olarak tükenmesi sonucu gerçekleşen kayıp miktarını vermektedir [37,40,41].

Kayıp kelimesiyle anlatılmak istenen, malzemeye nüfuz ettikten sonra ısı olarak dağılan, kayıp mikrodalga enerjisi ifade eder ve malzemenin, gelen enerjinin ne kadarını ısıya çevirebildiğini gösterir. Bu doğrultuda anlaşılması gereken, kayıp faktörü yüksek olan bir malzeme mikrodalga enerji ile kolaylıkla ısıtılabilen malzemedir [37,40,41].

Bir malzemede hacim başına güç soğurma (enerji depolama) yoğunluğu ise aşağıdaki formülle hesaplanabilmektedir:

$$P_d = \Omega |E_0|^2 = 2 \pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \epsilon'' |E_0|^2 \quad (2.1)$$

Burada,

P_d : Güç yoğunluğu (W/m^3)

Ω : Toplam geçirgenlik

f : Mikrodalga enerji frekansı (Hz)

ϵ_0 : Boşluğun geçirgenliği ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m)

ϵ'' : Malzemenin dielektrik kayıp faktörü

E_0 : Mikrodalga enerji elektrik alan magnitudü (V/m) [37].

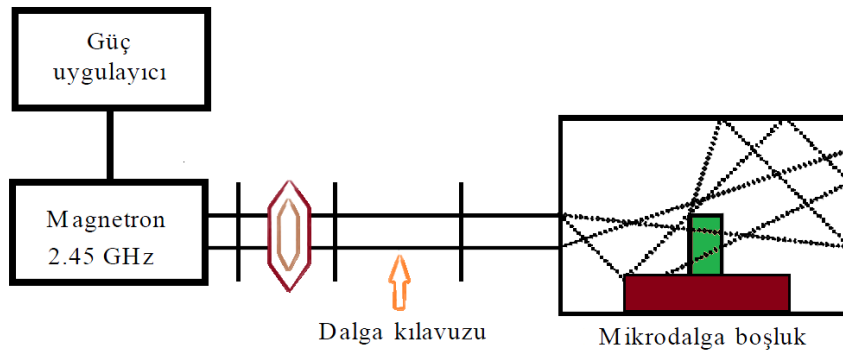
Bazı çözücülerin 50 ml hacmindeki örnekleri 2,45 GHz frekansa sahip mikrodalga enerjisiyle 560 W güç uygulanarak 1 dk süre ile ısıtılmıştır. Sonuçlar Çizelge 2.3’ de gösterilmektedir [39].

Çizelge 2.3: MD ısıtmanın bazı çözücüler üzerindeki etkisi [39].

Çözücü	Ulaşılan Sıcaklık, °C	Kaynama Sıcaklığı, °C
Su	81	100
Metanol	65	65
Etanol	78	78
1-Pentanol	106	137
1-Bütanol	109	117
1-Heksanol	92	158
1-Klorbütan	76	78
1-Brombütan	95	101
Asetik asit	110	119
Etil Asetat	73	77
Kloroform	49	61
Aseton	56	56
DMF	131	153
Dietil Eter	32	35
Heksan	25	68
Heptan	26	98
CCl ₄	28	77

Mikrodalga ısıtma sistemleri dört ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar;

- 1) Güç uygulayıcı,
- 2) Güç kaynağı (vakum tüpü, magnetron),
- 3) Jeneratörden gelen mikrodalgaları aplikatöre ileten dalga kılavuzu,
- 4) Malzemenin ısıtılmasını sağlayan rezonans boşluk (örneğin fırın), olup Şekil 2.4’ te gösterilmektedir [37].



Şekil 2.4: Mikrodalga ile ısıtma sisteminin şematik gösterimi [37].

2.4 Mikrodalga - Malzeme Etkileşimi

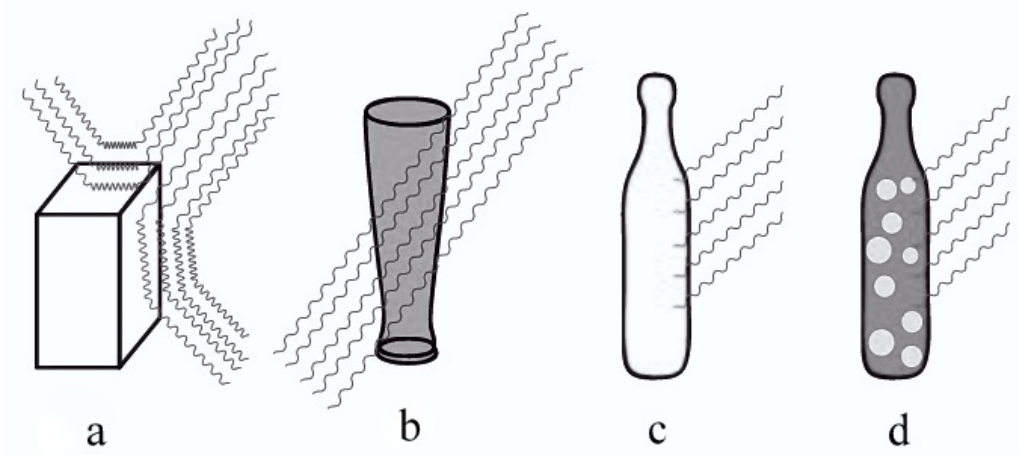
Mikrodalgaların malzemeler ile etkileşimi, maddenin türüne bağlı olarak üç farklı şekilde gerçekleşir. Bu etkileşim mekanizmaları; yansıtma, soğurma ve geçirgenliktir. Ancak, malzemenin farklı dielektrik özellikte iki veya daha çok faz içermesi durumunda, mikrodalga enerjinin geçirimli fazdan geçerken soğurucu fazı seçimli olarak ısıtabildiği dördüncü bir kategori (karma) oluşmaktadır [35,38,42-44].

Yansıtma mekanizması; Malzemenin elektriksel iletken (metal, grafit gibi) olması durumunda mikrodalgalar malzemeye nüfuz edemez, yüzeyden geri yansır ve malzeme ısınmaz.

Geçirgenlik mekanizması; Malzemenin yüksek yalıtkan özellik (düşük kayıp) göstermesi durumunda mikrodalgalar malzeme içerisine nüfuz eder, ancak herhangi bir kayba uğramadan geçtikleri için malzeme ısınmaz.

Soğurma mekanizması; Dielektrik kayıp faktörü değerine bağlı olarak mikrodalgayı absorbe eden su, şeker, yağ gibi elektromanyetik alana maruz kaldıklarında dalgaları soğurma şeklinde etkileşime giren malzemeler ise çok ısınır [35,42-44].

Maddelerin mikrodalgayı soğurma dereceleri, kimyasal veya fiziksel bağlara göre değişir.



Şekil 2.5: Mikrodalganın çeşitli materyaller ile etkileşimi: a) Elektriksel iletken. b) Yalıtkan. c) Mikrodalgayı soğuran malzemeler. d) Mikrodalgayı soğuran malzeme içeren karma malzemeler [34].

2.5 Mikrodalganın Avantajları ve Dezavantajları

2.5.1 Mikrodalganın avantajları

Geleneksel ısıtmada ısı, maddeye kondüksiyon, konveksiyon ve/veya radyasyon ile transfer olur. Mikrodalga ısıtmada ise ısı doğrudan madde içine girer. Isı üretiminin moleküler düzeyde başlaması en büyük avantajlardandır. Bu sayede ısıtılan maddede sıcaklığın malzeme boyunca değişimi minimumdur. Maddenin kendisinden yüksek sıcaklıktaki yüzey ile fiziksel temas halinde olması gerekmez. Mikrodalga ısıtmada ısı artışı, geleneksel ısıtmaya göre daha hızlı olmaktadır [32,34].

Konveksiyonel ısıtmada maddenin yüzeyi ısıtma ortamındaki sıcak hava ile konveksiyon yoluyla ısıtılmakta ve daha sonra ısı, ısınan yüzeyden maddenin iç kısmına kondüksiyon yoluyla aktarılmaktadır. Sıcaklık madde yüzeyinden merkeze doğru gidildikçe azalır, dolayısıyla homojen bir ısıtma gerçekleşmez. Mekanik karıştırma ile ısı homojen olarak dağıtılmaya çalışılsa da dengeye ulaşılması uzun zaman alır [32].

Mikrodalga ile ısıtmada, kabın termal iletkenliğinin ve ortam bileşiminin etkisi olmadığı için “ani süper ısınma bölgeleri” oluşur ve ısı dağılımı geleneksel ısıtmadan çok daha homojen olur. Temassız ısıtma, ısı yerine enerji aktarımı, hızlı başlatma, durdurma ve sonlandırma ve ters ısıl etki (ısınma malzeme merkezinden yüzeye), karışım ısıtmada seçici ısıtma mümkündür. Mikrodalga ekipmanları otomatik sistemler ile birleştirilebilir ve güç seviyesi kontrol edilebilir. Aynı zamanda enerji malzemeye bir araç vasıtasıyla taşınmadığından kullanılan ortamda kirlenme olmaz ve sistem daha sağlıklı ve temiz kullanılabilir [32,46].

Mikrodalga enerjisi ısıya dönüşürken verim oldukça yüksektir. Geleneksel yöntemlerde ısıtma verimi %7 ile %14 arasında iken, mikrodalga ısıtmada %40'a kadar çıkar [32].

Kimyasal açıdan mikrodalga ışıma ile gerçekleşen tepkimelerin verimleri geleneksel yöntemden daha yüksektir. Mikrodalga ışıma etkisi ile gerçekleştirilen saflaştırma işlemlerinde de ciddi boyutlu tasarruflar edilir. Mikrodalga ışıma, daha az yan tepkimeye neden olur, bu da ürün kalitesinde artış anlamına gelir. Mikrodalga fırınlar geleneksel sistemlerden daha az yer kaplar ayrıca kullanım sırasında iş kazası riski daha az, bakımları kolaydır. Mikrodalga sistemleri istenen sonuca ulaşabilmek için diğer ısı aktarım sistemleriyle kombine edilerek de kullanılabilir [32].

2.5.2 Mikrodalganın dezavantajları

Mikrodalgaya maruz kalacak olan ısıtma ya da tepkime amacıyla kullanılacak kabın dalgaları geçiren malzemeden üretilmiş olması gerekir. Ayrıca kabın şekli ve büyüklüğü de tepkime açısından oldukça önemlidir.

Mikrodalga fırınlarda jeneratör (dalga üretici) işlev gören magnetronlar, geleneksel ısıtma elemanlarından daha pahalıdır. Bu nedenle, endüstriyel kullanımları yavaş gelişmektedir.

İnsan vücudunun sürekli olarak ve aşırı miktarda mikrodalgaya maruz kalması sakıncalıdır, bu nedenle mikrodalga fırınlarda, radyasyon sızıntısının önlenmesi insan sağlığı açısından çok önemlidir.

İnsan vücuduna uygulanacak olan 100W gücündeki mikrodalga enerjisi, vücut sıcaklığını 5 dakikada 5°C artırır ve bu son derece tehlikeli sonuçlara yol açar. İnsan vücudunda mikrodalgalara karşı en hassas organlar göz ve beyindir. Özellikle de gözde kan dolaşımı zayıf olduğundan, oluşacak sıcaklık artışı kanla taşınıp yayılamaz ve kısa zamanda tehlikeli hal alır. İnsan gözünün dayanabileceği maksimum mikrodalga ışıması 2,4 GHz' de 0,08 W/cm²' dir. Deri kanseri riski de, mikrodalga etkisi altında artar [32,46].

Kalp atışını düzenleyen cihaz zorunluluğu olan kişiler, mikrodalga riskini daha fazla taşımaktadırlar. Mikrodalgalar cihazı etkileyerek, kalp atışında dengenin bozulmasına neden olabilir. Bu nedenle kişilerin fırınlara uzak durmaları gerekmektedir [34,46].

Sağlık açısından tehlike arz eden bu nedenlerden dolayı mikrodalga fırın kullanımı, geleneksel sistemlerden farklı emniyet tedbirleri gerektirir. İşletmelerde mikrodalga üreten ve kullanan cihazlar daima sızdırmaz tipte, kapalı bir sistem içerisinde olmalıdır [32,34,46,47].

2.6 Mikrodalga Uygulamaları

Gıda endüstrisi mikrodalga teknolojisinin en yaygın kullanıldığı alandır. Gıda endüstrisinde; pişirme, kurutma, kavurma, haşlama-pastörizasyon, sterilizasyon, dondurulmuş ürünlerin çözündürülmesi, dondurarak kurutma ve küf mantarlarının azaltılmasında gibi işlemlerinde kullanılmaktadır [34].

Metalürji endüstrisinde mikrodalga enerjisi; minerallerin öğütülmesi, safsızlıklardan ayırma, hidrat suyu içeren bileşiklerin dehidrasyonunda, ısıtma, kurutma, kavurma ergitme, öğütme, asit ile mineral ekstraksiyonu, liç, oksit minerallerinin karbotermik indirgenmesi, refrakter altın konsantresi veya karbon rejenerasyonu ve atık değerlendirme gibi metal taşınım proseslerindeki uygulamalarda önemli bir endüstriyel potansiyele sahiptir [34,39,16].

Çevre yönetimi ve geri dönüşüm endüstrisinde; kirletilen katıların temizlenmesi, hastane, nükleer ve fabrika atıklarının işlenmesi, aktif karbonun rejenerasyonu gibi işlemlerde kullanılmaktadır [34,39].

Seramik endüstrisinde; sentezleme, kurutma, kalsinasyon ve sinterleme, mineral ve seramiklerdeki asit sentezi ve slip dökümün hızlanması, nem ve kalınlık kontrolü, plazma işlemlerinde sentezleme ve sinterleme tetiklemesinde gibi işlemlerde mikrodalga enerjisi kullanılabilir [42].

Kâğıt sanayinde; kurutma işleminde kullanılmaktadır.

Tekstil endüstrisinde; boyanmış iplik çilelerini kurutma, ağartma ve boyama amaçlı kullanılmaktadır.

Çimento sanayinde ise; çimentonun iyileştirilmesinde, beton ve kayaların kırılmasında kullanılmaktadır

Temel olarak, tıbbi atık sterilizasyonunda kullanılır. Beyindeki kan akışı ve atımlı kan akışının tespiti, termal görüntüleme ve beyindeki sinirsel etkinliğin tespiti bu uygulamaların örnekleridir. Son yıllarda bu tanı işlemleri mikrodalga temelli; tomografi, radyometri ve tanı radarı gibi yeni teknikler üzerine yoğunlaşmıştır. Ayrıca, diş hekimliğinde, alçı modelleri kurutmada ve akrilik protez kalıpların yapımında da mikrodalgalar kullanılır [16].

Kemik yapısında oluşan hasar tedavisinde, kemikteki hasardan kaynaklı boşlukları doldurmak üzere boşlukta ödem oluşmasını ve yumuşak dokunun boşluğa girmesini engelleyen, yeni kemik oluşumuna da yardımcı olabilen kemik dolgu malzemelerinin üretiminde de mikrodalgadan yararlanır.

Diş tedavisinde kullanılan akrilik reçine polimerizasyonunun, su banyosunda ortamında ve mikrodalga koşullarında gerçekleştirilmesi karşılaştırıldığında,

mikrodalga koşullarında polimerin ortalama moleköl ağırlığının daha da yükseldiği, tepkime süresinin ise düştüğü incelenmiştir [34,39,16].

Kimya endüstrisinde mikrodalgalar; polimer, boya, selüloz ve seramik malzeme kurutmada, kaynatmada, buharlaştırmada ve sinterlemede kullanılmaktadır.

1980'lerde başlayan mikrodalga yayınının kimyasal tepkimelerde kullanılması çalışmaları 2000'li yıllara gelindiğinde hızlı artış göstermiştir. Özellikle 1990'larda mikrodalga reaktörlerin geliştirilmesi ile daha güvenilir sonuçlar alınmaya başlandı. Mikrodalga yayını ile gerçekeştirilen polimerizasyon tepkimelerinde polimer zincirini oluşturan birincil bağlar zarar görmez ve uygulanan sıcaklıkta aktifleşen başlatıcıların daha kısa sürede aktifleşmesiyle tepkime daha kısa sürede gerçekeşir ve kimyasal yapıda bozulma olmaz.

Kauçuğun kükürt köprüleri ile çapraz bağlanarak daha dayanıklı hale getirildiği vulkanizasyon işlemlerinde kullanılır.

Mikrodalga ışını ile proteinlerin yapı taşları olan aminoasitlerin bir araya gelmesiyle oluşan peptitlerin sentezi de gerçekeştirilir [34,39,16].

3. DÖKÜM ENDÜSTRİSİNDE KALIP VE MAÇA SİSTEMLERİ

3.1 Kalıp ve Maça Kumlarının Özellikleri

Gerek demir-çelik gerekse demir-dışı metal dökümünde kullanılan yöntemlerden en büyük paya sahip olanı kum kalıba dökümdür. 1 tonluk bir metal ürün dökümü için ortalama 4-5 ton kum gereklidir. Bu oran dökülen metal cinsine, parça büyüklüğüne ve kalıplama tekniğine bağlıdır [49].

Kum kalıba dökümde kaliteli ve hatasız üretim; alaşım bileşimi, uygulanan ergitme yöntemi, döküm şekli ve katılaşma kontrolünün sağlandığı soğuma şeklinin yanı sıra, kalıplama tekniği ve özellikle kalıp malzemesi özelliklerine de büyük ölçüde bağlıdır.

Kalıp ve maça malzemesinin esas görevi döküm boşluğunu ve negatifinin şeklini meydana getirerek, bu şekli sıvı metal dökülüp katılaşana dek koruyabilmektir [48].

Kaya ve cürufların dağılması ve kırılması ile oluşan çapları, 0,05 ile 2 mm arasında değişen küçük taneli parçacıklar, mineraller ve kayalar içeren tanecikler kümesi, kum olarak adlandırılır.

Döküm sektöründe, kalıp kumları içinde en ucuz, en kolay bulunan ve gerekli refrakter özelliği sağlayan, yüksek kullanıma sahip silis kumu (SiO_2) doğada; nehir, göl ve diğer sular ile eskiden yeraltı sularının bulunduğu bölgelerde bulunur.

Bazı bölgelerde silis taneleri ile beraber az miktarda feldspat, mika, ilmenit (FeO-TiO_2), manyetit (Fe_3O_4), zirkon (Zr-SiO_4) veya olivin ($\text{Mg-Fe}_2\text{-SiO}_4$) gibi mineraller de bulunabilir [48,49].

Kum sözcüğü silis ve ya kuvars gibi belirli bir minerali belirtmez. Zirkon, olivin, kromit ve öğütülmüş seramik mineralleri de boyutları bakımından yukarıdaki sınırlar içerisinde ise, kum olarak adlandırılırlar ve döküm sanayiinde kullanım imkânı bulurlar.

Yaygın olarak kullanılan diğer bir kalıp malzemesi olan zirkon kumu, yüksek refrakter özellik, yüksek iletkenlik, yüksek yoğunluk ve düşük genleşme özellikleri gösterir.

Zirkon kumlarının termal iletkenliği ve yoğunluğu silisin iki katıdır, bu da zirkon kumlarının silis kumuna nazaran 2 kat daha fazla ısıyı 2 kat hızlı absorbe edebileceği anlamına gelir. Bu sayede, katılaşma daha iyi kontrol edilebilir [48,49].

3.1.1 Kalıp kumu karışımları

Dökümhanelerde kullanılan kalıp kumları başlıca iki gruba ayrılır:

- 1) Doğal kalıp kumları
- 2) Sentetik kalıp kumları

3.1.1.1 Doğal kalıp kumları

Doğal kalıp kumlarının kil oranı, oluştukları yerde ihtiva ettikleri kadardır. İstenen özelliklerin sağlanması için su ilavesi yapılması haricinde buldukları şekilde kullanılırlar. Uzun süre nem miktarını koruyabilmesi, doğal kalıp kumlarının bir avantajıdır. Bu kumların en büyük dezavantajı ise, değişken özellikte bulunmaları olup istenen özelliklerin sabit tutulamamasıdır. Bu değişkenlik kalıp özelliklerine yansıtacağı gibi döküm kalitesini de etkileyeceği açıktır. Doğal kalıp kumlarına bentonit ilavesi yapılarak hazırlanan kumlara ‘yarı sentetik kum’ adı verilir [48].

3.1.1.2 Sentetik kalıp kumları

Doğadan çıkarıldıklarında çok düşük oranda kil ihtiva eden kuma ya da yıkanmış (doğal kili giderilmiş) kuma bentonit gibi bir bağlayıcı ve su ilave edilerek hazırlanan kumlara sentetik kalıp kumları denir.

Sentetik kalıp kumlarının başlıca üstünlükleri:

- a) Uniform tane boyutu
- b) Yüksek refrakter özellik
- c) Daha az su ve bağlayıcı ilavesi gerekliliği
- d) Kolay kontrol edilebilir özellikler

Bu üstünlüklerin yanı sıra, daha yüksek geçirgenliğe sahip olan sentetik kumlar, kalıba daha sert dövülebilme imkânı verir, böylece yumuşak dövme ile ilgili döküm hataları ortadan kaldırılabilir.

Yüksek refrakter özelliği sayesinde daha temiz döküm vermelerine rağmen, doğal kumlara nazaran kırılğan yapıları olmaları, kalıplarda model çıkarılışını ve gerekli tamirleri zorlaştırır. Doğal kumlar, sentetiklere oranla % 100-%220 daha fazla temper suyu gerektirirler [48].

Doğal kumlardaki yaklaşık %6-8 oranında bulunan neme karşı sentetik kumlar genellikle %3 nem içerirler. Nem oranının düşük oluşu döküm esnasında, kalıp boşluğunda daha az oksitleyici atmosfer anlamına gelir.

Ayrıca, sentetik kumlar daha uzun kullanım süresine sahiptir ve yeniden kullanmak için çok daha az bağlayıcı ilavesi gerektirirler [48].

3.1.2 Kumun özellikleri

3.1.2.1 Tane biçimi

Kum tanelerinin şekilleri jeolojik geçmişlerine bağlı olarak köşeli ya da yuvarlak olarak değişebilir. Kumun tane biçimi, taneler arası temas yüzey alanını etkilediğinden kullanılacak bağlayıcı miktarı açısından önemlidir. Yuvarlak biçimli yapıya sahip kumların taneler arası temas yüzeyi de düşük olacağından akıcılık özelliklerinin iyi olması makineli kalıplamada avantajlar sağlar. Köşeli yapıya sahip kumlar ise temas yüzeyleri daha fazla olduğundan daha yoğun istiflenebilirler ve daha yüksek dayanımlara ulaşabilirler [49].

3.1.2.2 Tane büyüklüğü ve tane dağılımı

Tane büyüklüğü ve dağılımı elek analizi ile belirlenir. Elek analizi yapılırken, bir miktar yıkanmış ve kurutulmuş kum, üst üste dizilmiş standart bir elek serisinde elenir ve her bir elek üzerinde kalan kum miktarı tartılarak hesaplanır [49].

Kum tanelerinin büyüklüğü ve dağılımı kalıplamada başta geçirgenlik olmak üzere; yüzey kalitesi, genleşme, dayanım, akıcılık gibi birçok özelliğin belirlenmesinde etkilidir.

Bağlayıcı içermeyen kumun geçirgenliği ‘temel geçirgenlik’ olarak adlandırılır.

Sıkıştırılmış bir kumda, boşluklar toplamı kumun hacmen yaklaşık %40’ı kadardır. Ortalama tane boyutu küçük olduğunda, taneler arası boşluklar da düşük olacağından, yüzey sürtünmesi ve yön değiştirmeler nedeniyle kalıp malzemesinin geçirgenliği düşük olacaktır.

Kumun çok küçük taneler içermesi halinde, boşluklar küçük taneler tarafından doldurulacağından temel geçirgenlik değerleri negatif yönlü etkilenecektir. Buradan da anlaşılacağı üzere, aynı ortalama tane büyüklüğüne sahip fakat farklı boyut dağılımlarına sahip olan iki kumun özellikleri farklı olabilir.

İyi bir kalıp kumunun uygun boyut ve biçimlerdeki tanelerin bir karışımı olması gerekliliğinden, satın alınırken istenen tane büyüklüğü dağılımının alt ve üst sınırına mutlaka dikkat edilmelidir [49].

3.1.2.3 Refrakterlik

Kumun refrakterliği, temas edeceği sıcaklık etkisiyle çatlamadan ya da tanelerin birbirine kaynamadan dayanabileceği sıcaklık değeri olarak ifade edilir. Refrakterlik her ne kadar doğrudan kumun türüne bağlı olarak görülse de, döküm esnasından metal oksit gibi refrakterliği olumsuz etkileyecek malzemelerin kumun bünyesinde bulunmaması gerekliliğine uyulmalıdır [49].

3.2 Sodyum Silikat Bağlayıcıları

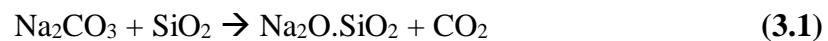
Cam suyu, çözülebilir cam gibi isimlerle piyasada satılan sodyum silikatlar, su içinde çözülebilir olup çok kullanışlı özellikleri ile camsı katı formdaki sodyum oksit (Na_2O) ve silika (SiO_2) içeren bileşimleridir. Cam suyu, pelet halde katı, toz, ya da solüsyon şeklinde olabilir. Sodyum silikatlar, deterjan, yapıştırıcı, su arıtma tesisleri gibi daha birçok endüstriyel proseste kullanılır.

Sodyum silikatlar 19.yy'dan beri üretilmektedir ve yapımındaki temel prensip olan sodanın silikatlaştırılması o zamandan beri değişmemiştir [53-55].

Sodyum silikat üretiminde yaygın olarak kullanılan iki yöntem vardır. Bunlar;

3.2.1 Sodyum silikatın kavurma prosesi ile üretimi

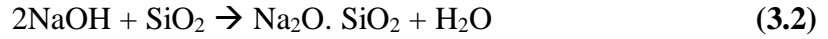
Termal proses olarak da isimlendirilen bu proseste belirli miktarlardaki sodyum karbonat (Na_2CO_3) ve silika kumu (SiO_2) karıştırıldıktan sonra, 1100-1400 °C civarındaki fırınlara beslenerek direk difüzyon yolu ile (3.1) reaksiyonu neticesinde sodyum silikata (Na_2SiO_3) dönüştürülürler.



Bu katı haldeki camsı peletler cam kırığı olarak da isimlendirilir. Daha sonra bu peletler sıcak sulu reaktörlerde çözdürülür ve solüsyon viskoz bir sıvı halde soğutulur [53-56].

3.2.2 Sodyum silikatın çözdürme prosesi ile üretimi

Hidrotermal proses olarak da isimlendirilen bu yöntemde, silika kumu (SiO₂), kostik (NaOH) ve su ile birlikte basınç ve yüksek sıcaklık altındaki reaktörlerde doğrudan çözdürülür ve (3.2) reaksiyonu sonucu sodyum silikat elde edilir.



Cam suyunun özellikleri SiO₂/Na₂O oranına bağlı olarak değişir. Bu oran NaOH ilavesi ile değiştirilebilir. Böylece çözünür sodyum silikat fabrikadan ayrılmadan önce işlenmiş olur [53-56].

Her iki proseste de, SiO₂:Na₂O oranı ve her iki içeriğin de konsantrasyonu arttıkça daha viskoz bir solüsyon elde edilecektir. Yüksek viskoziteye sahip solüsyonlardaki hidrate sodyum silikat sprey kurutucularda camsı taneler olarak elde edilebilir. Bu şekilde paketlenerek satışı pelet halde satışından çok daha fazla olsa da, anhidrit formdaki camsuyunda çözdürülen halinin daha fazla kullanım alanı bulunmaktadır.

Sodyum silikatın farklı oranlardaki alkali, silika ve su içeriğinin gösterdiği kullanışlı özellikler ve düşük maliyetleri birçok uygulamada faydalanılmalarını sağlamaktadır. Soda ve silikat oranına bağlı, ticari olarak ulaşılabilir kırktan fazla türü bulunur.

Döküm endüstrisinde bağlayıcı olarak genellikle silika/soda oranı 2 ile 3 arasında ve su içeriği %56 civarında olan cam suları kullanılır [53-56].

Çizelge 3.1: Dökümhane derecesinde tipik cam suyu verileri.

	Modül	Na ₂ O %	SiO ₂ %	H ₂ O %	Yoğunluk (g/cm ³)	Viskozite cP (20° C de)	Litre/Ton
Düşük oran	2	15,2	30,4	54,4	1,56	850	641
Orta oran	2,4	12,7	30,8	56,5	1,5	310	668
Yüksek oran	2,85	11,2	31,9	56,9	1,48	500	677

Sodyum silikat birkaç farklı yol ile sertleştirilebilir. Bu yöntemler;

- Zayıf asit ilavesi (CO₂ gazı ya da organik ester)
- Çeşitli tozların ilavesi (di kalsiyum silikat, anhidrit vs.)
- Su uçurularak.

Sodyum silikat prosesinin en yaygın kullanılan iki yöntemi, CO₂ ve likit ester ile yapılan sertleştirme işlemleridir [48].

Bu çalışmada, deneysel incelemelerin temelini oluşturan sodyum silikat bağlayıcı sertleştirme mekanizmaları detaylı olarak Bölüm 4'te verilmektedir.

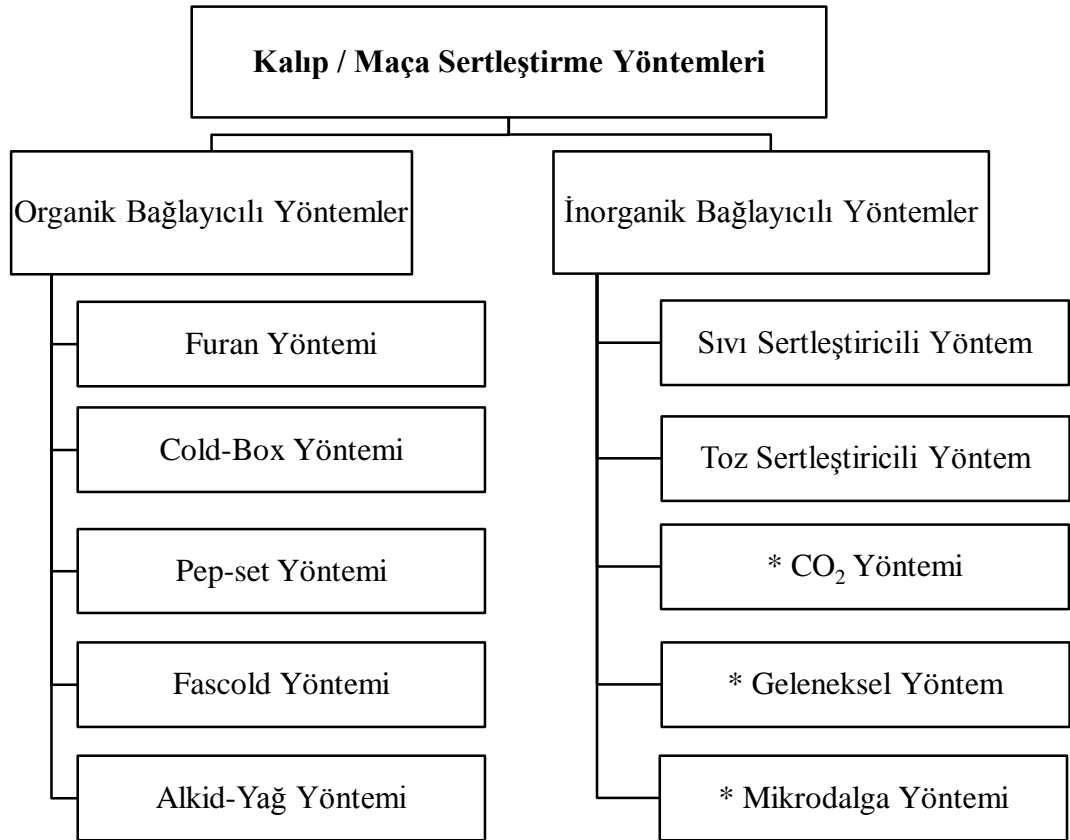
Cam suyunun solüsyon formu, yaygın olarak belediye su arıtma tesislerinde ve atık su tesislerinde kullanılır. Burada metalik iyonları adsorbe etmede ve aynı zamanda flok olarak adlandırılan atık içerisinde biyolojik veya kimyasal etkinlikle katıların oluşturduğu yumakların aglomerasyonu ve arzulanan malzemelerin sudan filtreler yardımıyla ayrılması işleminde kullanılır [53].

Sıvı sodyum silikat asidik koşullar altında sert camsı jel formuna dönüşür. Bu özelliği sodyum silikatları beton ve aşındırıcı gibi çimento ürünlerinde kullanılmaları açısından kullanışlı hale getirir.

Cam suyunun geleneksel bir kullanımı ise yumurta koruyucu olmasıdır. Yumurtalar viskoz silikat çözeltisi içinde soğuk şartlarda aylarca tazeliğini koruyabilir [55].

4. KALIP / MAÇA SERTLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

PiŐirilmeksizin sertleştirilen kalıp ve maça sertleştirme yöntemleri Şekil 4.1' de gürmektedir.



Şekil 4.1: Kalıp ve maça sertleştirme yöntemleri.

Yukarıda gürldüğü gibi piŐirilmeksizin sertleştirme metotları kendi arasında organik ve inorganik bağlayıcı yöntemler olarak ikiye ayrılırlar. Bu çalışmanın esasını oluşturan yöntemler olan inorganik bağlayıcı sertleştirme yöntemlerini 5 sınıfta inceleyebiliriz.

İnorganik bağlayıcı sertleştirme yöntemlerinin esası sıvı sodyum silikat bağlayıcılarına dayanır.

Bağ yapısı çözülebilen ve kolloidal haldeki silika kısmının çökerek jel oluşturmaya bağlı olarak, kum taneleri arasında bağ yapan bir film oluşturmaya sayesinde sertleşme gerçekleşir. Sodyum silikat bağlayıcılı sertleştirme yöntemlerinin arasındaki fark bağlayıcının sertleşme mekanizmasını sağlayacak olan diğer sertleştiricinin türüdür. Bu sertleştirici, katı, sıvı, gaz olabileceği gibi dehidrasyon mekanizması da olabilmektedir [48].

4.1 Sıvı Sertleştiricili Sodyum Silikat Yöntemi

1969 yılında döküm endüstrisinde uygulanmaya başlamıştır.

Sertleştirici olarak, organik esterler kullanılır. Sertleşme, sodyum silikat esaslı bağlayıcı ile sıvı sertleştirici kullanarak sağlanır ve iki kademe oluşur. Sıvı silikat ile hidroksil iyonları reaksiyona girer ve ester hidrolize olur. Hidroliz reaksiyonundan açığa çıkan asit daha sonra, sodyum silikat ile reaksiyona girerek 'silika hidrojel' oluşturur ve sertleşme gerçekleşir.

Bu yöntemde silis kumu kullanılabildiği gibi; zirkon, olivin, kromit kumları da çalışılabilir. Bağlayıcı sodyum silikatın modülü 2,5-2,8 civarında olmalıdır. Kullanılan miktar, kum karışımının %3-4' ü kadardır.

Sertleştirici olarak kullanılan organik esterler polihidrik alkol ve asetil esterlerinin karışımlarıdır. Dökümhanelerde en çok kullanılan esterler:

- Monoasetin, diasetin, triasetin
- Etilglikoldiasetat, dietilglikoldiasetat

Sertleştirici miktarı genellikle silikatın %8' i ile %12' si arasında değişmekle birlikte < %8 için tam sertleşme meydana gelmezken %12 ise maliyeti olumsuz etkiler [48,54].

4.2 Toz Sertleştiricili Sodyum Silikat Yöntemi

Toz sertleştiricili yöntem 1960 yılından itibaren uygulanmaya başlanmıştır.

Başlıca toz sertleştiriciler:

1. Dikalsiyum silikat içeren metalürjik cüruflar
2. Sentetik dikalsiyum silikat
3. Yüksek fırın ve portland çimentoları

4. Silisyum tozu
5. Ferrosilisyum
6. Kalsiyum karbür.

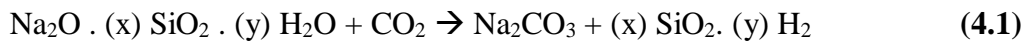
Bağlayıcı olarak, bütün toz sertleştiricili yöntemlerde cam suyu kullanılır. Kum genellikle silis kumudur. Ancak zirkon, olivin veya kromit kumları da kullanılabilir. Kullanılan cam suyunun modülü genellikle 2,0-3,0 civarında iken karışımdaki cam suyu oranı %4-6 kadardır. Daha fazla cam suyu, dağılabilme (collapsibility) özelliğini bozar. Toz sertleştiricilerin oranı ise %1-6 arasındadır [48,54].

4.3 CO₂ Yöntemi

Gaz sertleştiricili silikat yöntemi olan bu yöntem 19. yüzyılın ilk yarısında geliştirilmiştir ve ilk olarak 1950 yıllarında uygulanmaya başlayıp kullanımı giderek yaygınlaşmıştır. Bu yöntem sayesinde kalıplar, kurutulmuş kalıp mukavemetine eşit bir mukavemete, ısıtmaya gerek kalmadan ulaşabilmektedir. Yöntem, bütün döküm alaşımları için uygun olmakla birlikte sektörde özellikle çelik, gri dökme demir ve bakir esaslı alaşım dökümünde kullanılır.

Sodyum silikat (cam suyu) ile bağlanan kum karışımından CO₂ gazı geçirerek ‘gaz-silikat’ reaksiyonu ile ‘silisik asit hidrojeni’ oluşturup, pişirmeye gerek kalmaksızın sertleştirme gerçekleşir.

Prensip olarak, kuma %3 ile %5 arasında karıştırılan sodyum silikat kalıbın sıkıştırılarak şekillendirilmesinden sonra, belirli bir gaz geçirgenliği olan kum kalıp malzemesi içinden kısa sürelerde (15-60 sn.) CO₂ gazı geçirerek, sodyum silikatı silika jele dönüştürme ve kum tanelerini birbirine bağlama esasına dayanır ve (4.1) reaksiyonu neticesinde gerçekleşir. Yöntemde zararlı gaz çıkışı olmaz.



Reaksiyon ürünleri sodyum karbonat ve hidrate olmuş silistir. Gaz basıncı, kalıp veya maçanın boyutuna göre 1,4-2,8 kg/cm² arasında değişir. Kum taneleri arasındaki bağlanma, karışım açık atmosferde bekletilerek, havadaki CO₂ ile de gerçekleşir, ancak bu reaksiyon için çok uzun süre gereklidir.

Gazın kalıp veya maça içinden geçirildiği süre önemlidir. Aşırı gaz vermenin mukavemet üzerinde olumsuz etkileri vardır. Gaz verme işlemi tamamlandıktan sonra

da kalıp sertleşmeye devam edeceği için fazla gaz (CO₂) vermekten her zaman kaçınılmalıdır.

Sertleştirici olarak 50-100 kg kum için 1 kg CO₂ verilir. Maçalarda özellikleri iyileştirmek için kaolen kili, Al₂O₃, tabii veya diğer türde şeker ilave edilebilir. Al₂O₃ ise 800°C' de maça mukavemetini artırıcı etki gösterirken, kaolen kili kararlılığı artırır. Şeker ise döküm sonrası kalıbın kalıcı mukavemeti azaltarak dağılabilme özelliğini artırır [48,49].

Karıştırma süresi 3 ile 5 dakika arasında olmakla birlikte homojenliğin sağlandığı en kısa süreli karıştırma en iyi karıştırma değildir.

Tipik bir karıştırma çevrimi aşağıdaki gibidir:

- Kum 1 dk karıştırılır.
- Kaolen kili ve Al₂O₃ ilavesi 2 dk karıştırılır.
- Sodyum silikat ilavesi 1 dk karıştırılır.

Seri üretim için bu yöntemde özel olarak kalıplama, maça üfleme, gaz verme, karışım hazırlama, sandığa doldurup sıkıştırma işlemlerini otomatik olarak yapan cihazlar geliştirilmiştir. Bu sayede kalıplama ve CO₂ tatbiki art arda uygulanabilmektedir.

Alt ve üst kalıp sertleştirilip kalıp kapatıldıktan sonra döküm 24 saat içinde gerçekleşmelidir.

CO₂ yönteminin üstünlükleri:

- Kalıp ve maça yapım tekniği, geleneksel kum kalıplama ile aynı olduğundan bu yöntem her dökümhanede kolaylıkla uygulanabilir.
- Yöntem hem seri üretim hem de az sayıda üretim için kullanılabilir.
- Karmaşık biçimlerin kalıptan çıkarılması, yaş ve kuru kum kalıp yönteminden daha kolaydır.
- CO₂' li maçaların maliyeti, pişirilerek sertleştirilen maçalardan daha düşüktür.
- Üretilen parçaların, boyut hassasiyeti ve yüzey kalitesi yaş ve kuru kum kalıp yönteminden daha iyidir.
- Fırın yatırımı gerektirmediğinden, yer ve zamandan tasarruf vardır, böylece kuru kum kalıplamadan daha ekonomiktir.
- Maça üretiminde CO₂ tatbikinden önce maça içleri boşaltılarak kabuk kalıplama yöntemindekine benzer şekilde maça üretimi yapılabilmektedir.

CO₂ yönteminin sınırları:

- Kum karışımı hazırlandıktan sonra döküme kadar geçecek sürenin kısa olması.
- Bu yöntemle hazırlanan kalıp ve maçaların döküm sonrası dağılıbilirlik özellikleri diğer yöntemlerden kötüdür.

4.4 Geleneksel Kurutma Yöntemi

Geleneksel kurutma olarak literatürde yer alan yöntemin esası, suyun dehidrasyonu mekanizmasına dayanmaktadır. Belirlenen oranlarda sıvı sodyum silikat, kum ve sudan hazırlanan karışımlardan elde edilen kalıplardan; suyun, sıcaklık etkisi ile dehidrate edilmesi ve oluşacak jelimsi matriks ile sertleşmenin sağlanması bu yöntemin temelini oluşturur. Jelleşme oluşum mekanizmasının hızı, büyük ölçüde sıcaklığa ve sıvı sodyum silikatın modülüne bağlıdır. Modül ve sıcaklık arttıkça suyun karışımdan ayrılma hızı da artacaktır.

Diğer bir deyişle, sertleştirme işlemi, kimyasal ve fiziksel dönüşümlerin her ikisini de içerir. Sodyum silikat, değişen pH ve ardından su kaybı sonucu kazanılan daha kararlı yapı neticesinde çökelir.

4.5 Mikrodalga Yöntemi

Endüstrinin birçok alanında yaygınlaşan mikrodalga teknolojisi, yukarıda da bahsedilen sodyum silikat bağlayıcılı kalıp ve maçaların dehidrasyon reaksiyonu ile sertleştirilmesi konusuna uyarlanarak oluşacak reaksiyonların hızlandırılıp, sertleştirme mekanizmasının kabul edilebilir sürelerle düşürülmesi ve aynı zamanda ihtiyaç duyulan bağlayıcı ve enerji miktarlarında azalmaya gidilerek ekonomik değer sağlanması açısından son 20 yılın araştırma konularında biri haline gelmiştir.

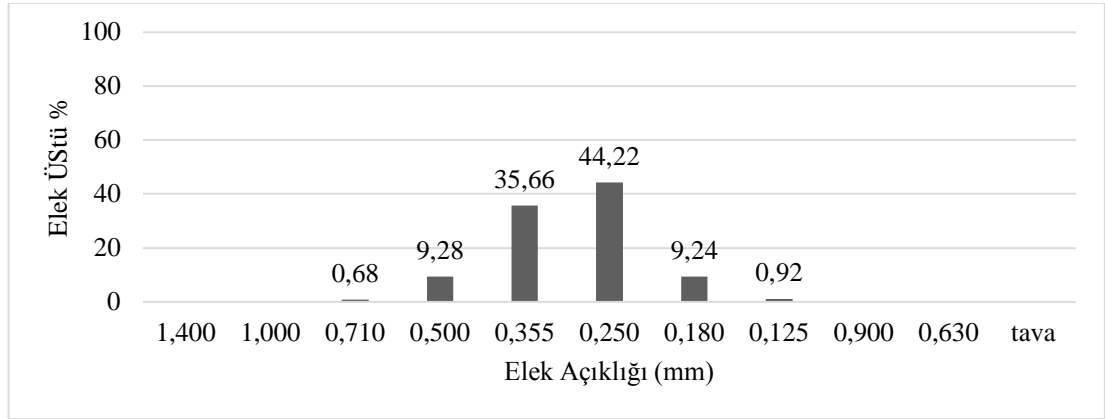
Teknik olarak bu yöntem, hazırlanan kalıplar belirli süre ve güç değerlerinde mikrodalga ışınımına maruz bırakılarak, içerdikleri suyun buharlaştırılması ve bu sayede dehidrasyonla silika jel oluşturarak mukavemet kazanma olarak açıklanır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Deneyselerde Kullanılan Malzemeler

5.1.1 Kum

Deneyselerde Şile yöresine ait, Siltaş Kumları San. Tic. A.Ş. ' den temin edilen, yıkanmış ve kurutulmuş silis kumu kullanılmıştır. Yapılan elek analizi neticesinde kumun AFS tane boyutunun 41.09 olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.1' de yapılan elek analizi gösterilmektedir. Şile yöresi kumlarının köşelilik katsayısı 1,21-1,43 aralığında değişmektedir [57].



Şekil 5.1: Kullanılan silis kumuna ait tane boyut dağılımı

5.1.2 Sodyum silikat

Deneyselerde, bağlayıcı olarak döküm endüstrisinde tercih edilen modül ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) değerlerine uygun olarak sipariş edilen, Koruma Klor Alkali Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmasından temin edilen sodyum silikat kullanılmıştır. Deneyseler boyunca temin edildiği ambalajında muhafaza edilen sodyum silikattan, günlük deney miktarlarına yakın miktarlarda alınarak, açık havadan ve güneş ışığından uzak halde saklanmıştır. Kullanılan sodyum silikata ait analiz sonuçları Çizelge 5.1' de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1: Kullanılan cam suyuna ait analiz sonuçları.

Yapılan Analiz	Spesifikasyonlar	Birim	Sonuçlar	Analiz Yöntemi
Görünüş	Sarımtırak sıvı	-	Hafif sarılık	Görsel
Sodyum Oksit (Na ₂ O)	12,0-13,5	%	13,01	Titrimetrik
Silis (SiO ₂)	23,5-27	%	26,54	Volumetrik
Baume (20°C)	min. 43,00	°Be	43,6	Bomemetre
Modül	min. 2,00	-	2,04	-
Yoğunluk (20°C)	1,422-1,436	gr/cm ₃	1,43	Densimetre

5.1.3 Karbondioksit

Deneylerde Linde R744 marka sıvılaştırılmış karbondioksit gazı kullanılmıştır. Kullanılan gaza ait teknik veriler Çizelge 5.2' de verilmiştir. Gaz debisinin ayarlanmasında tüp üzerine monte edilen Yıldızlar marka manometreli regülatör kullanılmıştır.

Çizelge 5.2: Kullanılan karbondioksite ait özellikler.

Teknik Özellikler	
Saflık	> %99,9
Nem	< 10 ppm
Basınç (21°C' de)	50-60 bar

5.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar

Deneylerde kullanılan cihazlar aşağıda sıralanmıştır.

Temin edilen silis kumunun elek analizini yapmak için Octagon-200 marka elek analiz cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.2). Elek seti eksiksiz bir şekilde temin edilmiş olup, 1,400-1,000-0,710-0,500-0,355-0,250-0,180-0,125-0,90-0,63 mm'lik elek açıklığına sahip elekleri içermektedir.



Şekil 5.2: Elek analiz cihazı [58]

Sodyum silikat – kum – su karışımlarının hazırlanmasında, karıştırıcı olarak Şekil 5.3’ de gösterilen Ridsdale marka AFS standartlarında, 35 rpm devirle dönen döner çelik koni üzerine sabitlenmiş iki S bıçaklı laboratuvar tipi karıştırıcılar kullanılmıştır.



Şekil 5.3: Karışım Hazırlama Mikseri

Karışımından oluşturulacak AFS standardında kum numunelerin hazırlanmasında kullanılan tüpler, sertleştirme prosesine göre ikiye ayrılır. Her iki tüpün ebatları $5,08 \pm 0,002548$ cm iç çap ve $12 \pm 0,1778$ cm yüksekliktir.

CO₂ prosesi uygulanacak tüpler, Ridsdale marka 65-70 Rockwell C sertliğinde Şekil 5.4' te gösterilen çelik tüplerdir [59].



Şekil 5.4: Çelik tüp (kalıp)

Mikrodalga ve geleneksel yöntemle sertleştirilecek numunelerde kullanılan tüpler, özgül ağırlığı: $2,1-2,2$ gr/cm³ olan, 260 °C' a kadar kullanım imkanı olan, politetrafloroetilen (teflon) (Şekil 5.5) malzemedan CNC tornada işlenerek yaptırılmıştır. Tüpler sıcaklığa ve mikrodalga ışınımına maruz kaldığında gösterecek olduğu fiziksel tepkilerin belirlenmesi için, ilk olarak deneme deneyleri yapılmış, deney standartlarına uygun karışımlardan numuneler hazırlanıp şekillendirilerek mikrodalga fırın ortamında denenmiştir. Teflon malzemedan yapılmış tüpler, maksimum güç ve maksimum süre değerleri için dahi herhangi bir olumsuz durum göstermemiştir.



Şekil 5.5: Teflon tp (kalıp)

Karışım hazırlandıktan sonra, tüpler içerisine standarda uygun halde şekillendirmek için 6,666 kg'lık elik ağırlığa sahip AFS standartlarına uygun Ridsdale marka tokmak kullanılmıştır (Şekil 5.6).



Şekil 5.6: Ridsdale tokmak (rammer)

Şekillendirilmiş numunelere,CO₂ uygulayarak sertleştirmek için, CO₂ tüpüne bağlı Ridsdale marka gaz verme aparatı kullanılmıştır (Şekil 5.7).



Şekil 5.7: CO₂ uygulama aparatı

Mikrodalga yöntemiyle sertleştirilme yapılacak numuneler için LG marka MS3040S model 30 lt iç hacminde gücü 850(max.)-680-510-340-170(min) Watt olarak ayarlanabilir 10 sn' lik aralıklarla işlem süresi ayarlama opsiyonuna sahip ev tipi mikrodalga fırın kullanılmıştır. Homojen ısıtma için, fırın zeminindeki cam altlık döner yapıdadır (Şekil 5.8).



Şekil 5.8: Mikrodalga fırın

Geleneksel yöntemle sertleştirilme yapılacak numuneler için Heraeus marka laboratuvar tipi etüv kullanılmıştır (Şekil 5.9).



Şekil 5.9: Etüv

Mikrodalga yöntemi ile sertleştirilmiş ve sonrasında ısıl işlem uygulanacak numuneler için Heraeus marka laboratuvar tipi yüksek sıcaklık kapasitelerine sahip fırın kullanılmıştır (Şekil 5.10). Fırın ısıtma hızı 500 °C / saat olarak ayarlanmıştır.



Şekil 5.10: Fırın

Tüm yöntemler ile sertleştirilen numunelerin, oda sıcaklığındaki mukavemetleri (basma mukavemeti) ve mikrodalga sertleştirilmesi sonrası ısıl işlem görmüş numunelerin oda sıcaklığına soğutulmaları sonrası gösterdikleri basma mukavemet (kalıcı mukavemet) ölçümleri için İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı bünyesinde mevcut olan Instron 1195 marka, 1mm/dk hassasiyet ile hareket kabiliyetine sahip basma mukavemeti test cihazı (Şekil 5.11) kullanılmıştır.



Şekil 5.11: Mukavemet Test Cihazı

CO₂, mikrodalga, geleneksel yöntem ve mikrodalga sertleştirme sonrası ısıl işlem görmüş numunelerde elde edilen kum matriks-sodyum silikat bağlayıcı sistemi arasındaki bağ köprü yapılarının karakterizasyonu için taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışmaları İTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Biyomalzeme Araştırma ve Karakterizasyon Laboratuvarı bünyesinde mevcut olan JEOL JSM 7000F model taramalı elektron mikroskobu ünitesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu incelemelerinde numunelere 40-50 nm aralığında Pt kaplama uygulanmıştır.

5.3 Deneylerin Yapılışı

5.3.1 Kum – cam suyu karışımının hazırlanması

Deneylerde ölçüme tabi tutulacak standart numune karışımlarının hazırlanması aşamasında ilk olarak, temin edilen silis kumuna havalandırmanın sağlanması ve

mikser içi boyut dağılımlının homojen olması için 1 dakika boyunca mikserde karıştırma işlemi uygulanmıştır.

Daha sonra çalışılmak istenen sodyum silikat oranları olan %2, %3, %4' e göre ölçümü yapılan sodyum silikat, mikser kapağı açılmadan (mikser durdurulmadan) st ızgaradan içeri yavaş bir şekilde eklenerek, tüm reçetelerde sabit olan % 0,5' lik su ilavesi yapılmış, bu şekilde 2 dakika daha karıştırmaya devam edilmiştir. 2 dakika sonunda st kapak açılarak bir spatül yardımıyla mikser etrafında kalan alanda bıçakların ulaşmadığı noktalardaki kumlar karıştırılarak kapak kapatılmış ve karışım içerisinde kuru kum kalmaması için 3 dakika daha karıştırma sürdürülmüştür.

Toplamda 6 dakika mikserde kalan karışım, atmosfere açık ortamda CO₂ kaparak topaklanmaması için kapalı kaplarda üzeri nemli bez ile örtülerek saklanmış ve numune hazırlanması için hızlı bir şekilde kullanılmış, deney boyunca küçük miktarlarda karışımlar, sürekli olarak hazırlanarak sıhhatli sonuçlar alınması hedeflenmiştir.

5.3.2 Deney numunelerinin hazırlanması

Deney numuneleri AFS (American Foundry Society) standartlarına göre 50 ±3 mm yüksekliğinde silindirik olması gerektiğinden, öncelikle bu yüksekliği teşkil edebilecek kum miktarı kr deneylerle tespit edilerek yaklaşık olarak 155 g bulunmuştur.

Her kombinasyondan basma mukavemeti ölçümü için 7 adet numune tartılarak, uygulanacak yönteme göre seçilen tüplere (kalıp) doldurularak, Ridsdale marka 6,666 kg'lık tokmak altında çevirmeli kol yardımı ile 3 kez dövülerek AFS standardında silindirik numuneler haline getirilmiştir.

5.3.3 Standart numunelerin CO₂ yöntemiyle sertleştirilmesi

Standartta uygun şekilde dövülerek hazırlanan numuneler bekletilmeden CO₂ ile sertleştirme işlemine alınır. Verilecek CO₂ miktarı çok önemli olduğundan tp üzeri, manometreli regülatörün doğru çalıştığından emin olunmalıdır.

CO₂ debisi 10 lt/dk olacak şekilde ayarlandıktan sonra tüpün yanında bulunan kronometre çalıştırılarak aparata oturtulan tp içinden 30 sn boyunca CO₂ geçişi sağlanmıştir.

Süre sonunda yeterli mukavemetete sahip olan numune, kalıba uygun aparatla çıkarılarak testlere hazır hale gelmiş, testlere alınincaya kadar kapalı bir kaptan nemden uzak bir şekilde muhafaza edilmiştir.

5.3.4 Mikrodalga yöntemiyle sertleştirme

Sodyum silikat – kum – su karışımından hazırlanan numunelerde, mikrodalga ile sertleştirme uygulanacağı zaman, CO₂ prosesindeki metal tüp mikrodalgaya giremeyeceği için, yüksek sıcaklıkta çalışma imkânı veren teflon malzemedan yaptırılan tüpler kullanılmıştır.

CO₂ prosesinde olduğu gibi tokmak altında 3 kez dövülerek hazırlanan numune, bekletilmeden ve kalıptan çıkarılmadan mikrodalga fırına konmuş ve çalışılması planlanan sürelerde (240, 360, 480 sn) ve güç (510, 680, 850 W) kombinasyonlarında sertleştirme işlemi yapılmıştır.

Zaman ayarlı fırında başlangıç ile bitiş arasında herhangi bir şekilde fırın durdurulmayıp numune giriş çıkışı olmamış, çevrimler her kombinasyon için ayrı ayrı ilerlemiştir. Bu sayede aynı şartlar sağlanmaya çalışılmıştır.

5.3.5 Geleneksel yöntemle sertleştirme

Sodyum silikat – kum – su karışımından hazırlanan yaş numuneler, geleneksel yöntemle sertleştirme yapılacağında yine teflon tüpler kullanılmış olup, tokmak altında 3 kez dövülerek hazırlanan numuneler, kalıptan çıkarılmadan ve bekletilmeksizin önceden 110°C' ye ısıtılmış etüvde 120 dk. boyunca sertleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Sürenin dolması ile etüvden alınan numuneler, kalıp sıyrıcısı yardımı ile kalıptan çıkarılarak oda sıcaklığına kadar soğuduktan sonra kapalı kaplara alınıp nemden korunarak test için bekletilmiştir.

5.3.6 Mikrodalga sonrası ısıtma işlemi uygulaması

Mikrodalga sertleştirme yöntemi uygulanan kum karışımlarındaki basma mukavemetine sıcaklığın etkisi, kum matriksin geri dönüşümü ve kalıp kumunun sarsakta kalıptan sıyrılması prosesleri hakkında bilgiler veren kalıcı mukavemetin belirlenmesi amacıyla, kalıplardan ayrılan standart numunelere önceden ısıtılmış fırında 100°C aralıklarla, 100 °C' den 800 °C'e kadar 30 dk. süre ile pişirme işlemi uygulanmıştır.

6. SONUÇLAR VE İRDELEME

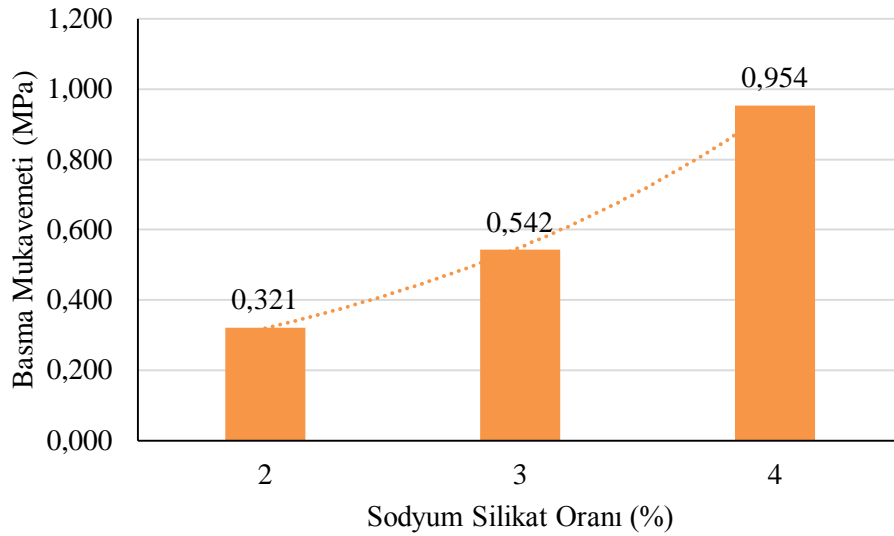
6.1 Mekanik Test Sonuçları

6.1.1 CO₂ yöntemi

CO₂ yöntemiyle hazırlanmış olan AFS standartlarındaki silindirik numunelerden elde edilen basma mukavemeti değerleri Çizelge 6.1’de görülmekte olup değişim grafiksel olarak Şekil 6.1’ de verilmiştir.

Çizelge 6.1: CO₂ yöntemiyle sertleştirilen numunelerin basma mukavemetleri.

Numune no.	Basma Mukavemeti (MPa)		
	2%	3%	4%
1	0,221	0,622	0,961
2	0,406	0,573	1,200
3	0,284	0,491	0,798
4	0,322	0,544	0,775
5	0,374	0,481	1,034
Ortalama	0,321	0,542	0,954
Std.Sapma	0,07	0,06	0,18



Şekil 6.1: CO₂ sertleştirmesinde sodyum silikat oranına bağlı mukavemet değişimi

Şekil 6.1'den görüldüğü gibi, %2 sodyum silikat oranında %4'e doğru artış ile doğru orantılı olarak, basma mukavemetlerinde 0,321±0,07 MPa'dan 0,954±0,18 MPa'a ulaşılmış olup, yaklaşık olarak 3 kat yüksek mukavemet gözlenmiştir.

Literatürde [60], 2,5 modüle sahip ve %2,5 sodyum silikat bağlayıcılı kalıp kum karışımlarına CO₂ yöntemi uygulaması sonucunda, ortalama 0,60 MPa'lık bir basma mukavemet değerine ulaşıldığı görülmüştür. Bir diğer literatürde [61], 2,0 modül ve %2,5 sodyum silikat katkılı kalıp kumlarının CO₂ yöntemiyle sertleştirilmesi çalışmasında yaklaşık 0,5 MPa basma mukavemeti rapor edilmiştir. Bu çalışmada kullanmış olduğumuz 2,04 modüle sahip %3 oranında sodyum silikat bağlayıcı içeren numunelerimizde 0,542±0,06 MPa basma mukavemeti elde edilmiş olup, bu değer literatürdeki mukavemet değerlerine yakın olduğu görülmektedir.

6.1.2 Mikrodalga yöntemi

Sodyum silikat oranlarına, mikrodalga güçlerine ve işlem sürelerine göre farklı kombinasyonlarda sertleştirme uygulanmış olan numunelere ait basma mukavemet ölçümlerinden elde edilen değerler, %2 sodyum silikat ilavesi için Çizelge 6.2, %3 sodyum silikat ilavesi için Çizelge 6.3 ve %4 sodyum silikat ilavesi için Çizelge 6.4'de görülmektedir.

Çizelge 6.2: MD'da sertleştirilen %2 sodyum silikat bağlayıcılı numunelerin basma mukavemetleri.

Numune no.	Basma Mukavemeti (MPa)								
	510 W			680 W			850 W		
	4 (dk.)	6 (dk.)	8 (dk.)	4 (dk.)	6 (dk.)	8 (dk.)	4 (dk.)	6 (dk.)	8 (dk.)
1	1,414	2,265	2,908	4,274	4,920	4,250	4,073	3,755	5,283
2	1,309	3,217	2,968	3,363	3,824	4,337	4,151	4,307	5,763
3	1,462	3,543	3,968	3,999	3,916	3,876	3,935	3,934	4,585
4	1,522	3,573	4,296	3,707	4,287	4,482	4,843	4,776	5,124
5	1,255	3,063	2,924	4,793	3,518	4,151	3,842	5,334	5,331
Ortalama	1,392	3,132	3,413	4,027	4,093	4,219	4,169	4,421	5,217
Std.Sapma	0,11	0,53	0,67	0,55	0,54	0,23	0,40	0,64	0,43

Çizelge 6.3: MD’da sertleştirilen %3 sodyum silikat bağlayıcılı numunelerin basma mukavemetleri.

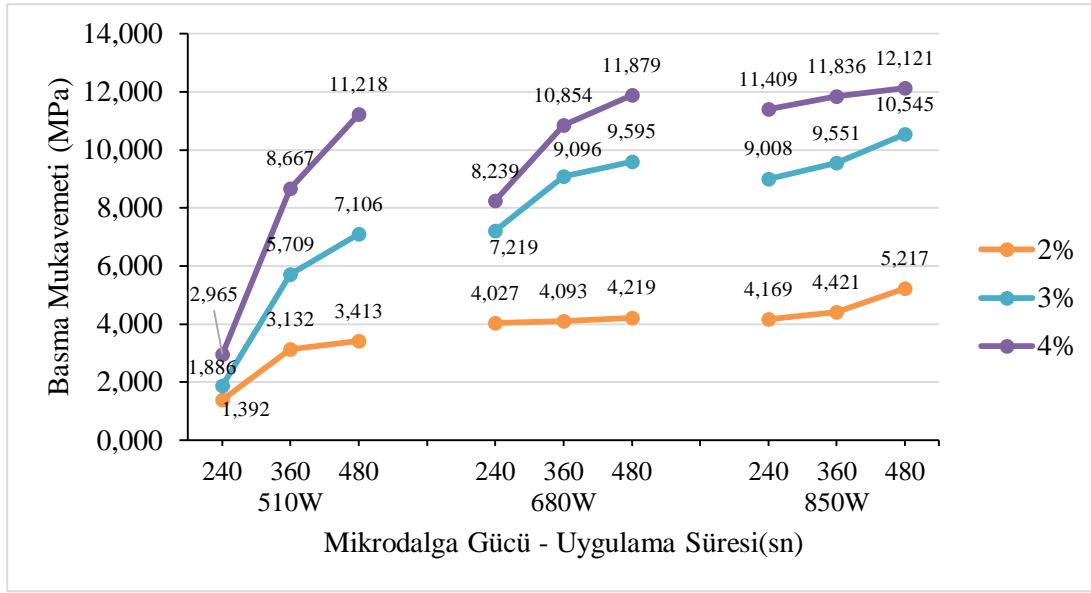
Numune no.	Basma Mukavemeti (MPa)								
	510 W			680 W			850 W		
	4 (dk.)	6 (dk.)	8 (dk.)	4 (dk.)	6 (dk.)	8 (dk.)	4 (dk.)	6 (dk.)	8 (dk.)
1	1,617	5,192	6,917	7,641	8,879	9,186	9,046	9,632	10,298
2	2,155	6,509	6,710	7,687	9,694	9,054	9,087	9,764	10,195
3	1,932	5,894	6,415	7,746	9,278	9,036	8,809	9,317	10,386
4	2,235	5,910	7,152	7,072	8,758	10,210	9,081	9,267	10,635
5	1,492	5,040	8,338	5,952	8,869	10,488	9,019	9,777	11,211
Ortalama	1,886	5,709	7,106	7,219	9,096	9,595	9,008	9,551	10,545
Std.Sapma	0,33	0,60	0,74	0,76	0,39	0,70	0,11	0,24	0,41

Çizelge 6.4: MD’da sertleştirilen %4 sodyum silikat bağlayıcılı numunelerin basma mukavemetleri.

Numune no.	Basma Mukavemeti (MPa)								
	510 W			680 W			850 W		
	4 (dk.)	6 (dk.)	8 (dk.)	4 (dk.)	6 (dk.)	8 (dk.)	4 (dk.)	6 (dk.)	8 (dk.)
1	2,928	9,491	12,364	10,073	11,614	11,941	11,097	11,466	12,01
2	3,931	7,914	12,29	8,837	9,948	10,8	11,148	12,879	11,102
3	1,897	8,009	11,998	10,785	9,933	13,393	12,032	10,878	12,148
4	2,972	9,469	12,264	8,947	11,388	12,172	11,32	11,567	11,87
5	3,099	8,449	12,11	8,552	11,386	11,09	11,449	12,388	13,476
Ortalama	2,965	8,667	11,218	8,239	10,854	11,879	11,409	11,836	12,121
Std.Sapma	0,72	0,77	0,15	0,95	0,84	1,02	0,38	0,79	0,86

Sodyum silikat oranı, mikrodalga gücü ve uygulanan sertleştirme süresine bağlı olarak kalıp – kum karışımlarındaki basma mukavemet değişimleri grafiksel olarak Şekil 6.2’ de verilmektedir.

Grafikten de görüldüğü gibi mikrodalga ile sertleştirme prosesine ait basma mukavemeti değerleri kendi arasında kıyaslandığında; sabit mikrodalga gücü ve sabit uygulama süresi dikkate alındığında, sodyum silikat miktarı %2’den %4’e çıkarıldığında, basma mukavemetlerinde artış görülmektedir.



Şekil 6.2: MD sertleştirme sonrası elde edilen değerler

Örneğin, 510W güç, 480 sn. süre uygulanan numunelerde basma mukavemeti, $3,413 \pm 0,67$ MPa'dan $11,218 \pm 0,15$ MPa'a çıkarak, yaklaşık 3,2 kat artış göstermiştir. Benzer şekilde, 850 W güç ve 480 sn süre uygulanan numunelerde de sodyum silikat miktarının %2'den %4'e çıkması durumunda $5,217 \pm 0,43$ MPa' dan $12,121 \pm 0,86$ MPa'a yükselerek yaklaşık 2,3 kat artmıştır.

Sabit sodyum silikat oranı ve sabit mikrodalga uygulama süresi dikkate alındığında, %3 sodyum silikat içeriğinde ve 480 sn uygulama süresi için, basma mukavemeti mikrodalga gücünün 510 W'tan 850 W'a artırılması neticesinde yaklaşık 1,5 kat artarak $7,106 \pm 0,74$ MPa' dan $10,545 \pm 0,41$ MPa'a yükselmiştir.

Mikrodalga uygulama süresinin 240 sn'den 480 sn'e artırılması, sabit sodyum silikat oranı (%4) ve mikrodalga gücünde (680 W) ise sabit olması durumunda, basma mukavemeti 1,5 kat artarak $8,239 \pm 0,95$ MPa'dan $11,879 \pm 1,02$ MPa'a artış göstermiştir.

Literatürde [14], mevcut olan çalışmada, modülü 2,3 olan sodyum silikat kullanarak %1-2 katkı oranlarında hazırlanan kalıp kum karışımlarına, 700-2000 W mikrodalga gücü 30-120 sn uygulama aralıklarında, artan mikrodalga gücü ve uygulama süresi ve artan sodyum silikat oranı ile basma mukavemetlerinde rapor edilen artışlar bu çalışmada elde edilen sonuçlarla paralellik göstermektedir. Literatürde [14]'de yapılan çalışmada, 120 sn ve 700 W mikrodalga gücü uygulamasıyla 1,72 MPa'lık basma mukavemeti rapor edilmiş olup, 680 W mikrodalga gücü, 240 sn uygulama süresi ile

%2 sodyum silikat katkılı numunelerimizde $4,027\pm 0,55$ MPa'lık basma mukavemeti değerleri tespit edilmiştir. Söz konusu basma mukavemet değerlerindeki farka uygulama süresinin ve sodyum silikat modülünün etkisinin neden olduğu öngörülmektedir.

Literatürde [62], 2,0 modül ve %2,5 sodyum silikat katkılı kalıp kumlarının mikrodalga yöntemiyle 700 W güçte 240 sn. sertleştirilmesi çalışmasında yaklaşık 12,30 MPa basma mukavemeti rapor edilmiştir. Çalışmamızda ise 2,0 modül ve %3 sodyum silikat katkılı numunelerin 680 W güç ve 240 sn. sertleştirilmesi sonucunda, yaklaşık $7,219\pm 0,76$ MPa basma mukavemet değeri elde edilmiştir. Söz konusu mukavemet farkının literatürdeki kaynakta belirtilmemiş olmasına rağmen, kullanılan kumun tane boyut özelliklerinin farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

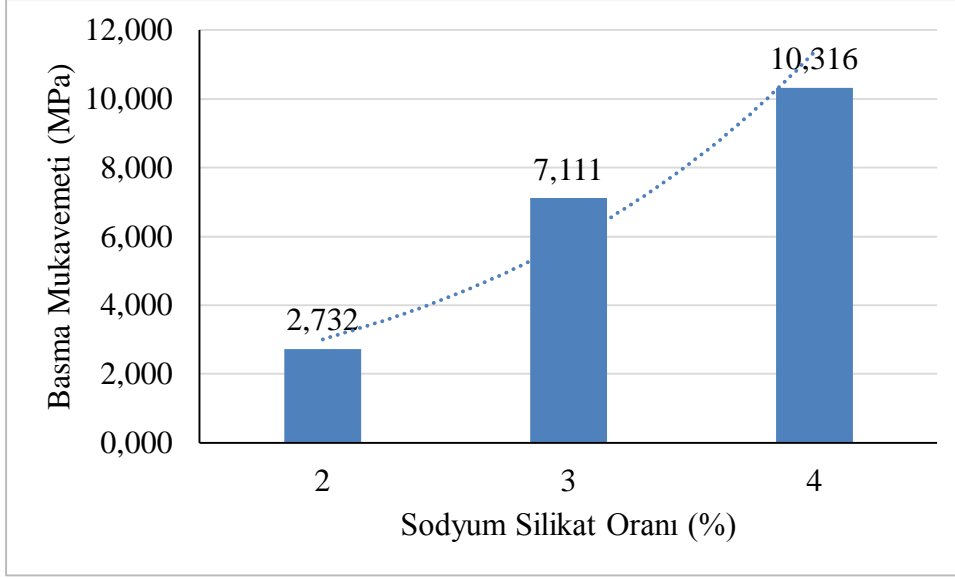
6.1.3 Geleneksel yöntem

Üç farklı sodyum silikat oranına göre hazırlanan numuneler, geleneksel yöntem olarak adlandırılan etüvde ısı işlem ile sertleştirme sonrası, basma mukavemeti değerleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, Çizelge 6.5'te verilmekte olup, grafiksel olarak Şekil 6.3' de sodyum silikat oranı basma mukavemeti ilişkisi gösterilmiştir.

Çizelge 6.5: Geleneksel yöntem basma mukavemetleri.

Numune no.	Basma Mukavemeti (MPa)		
	2%	3%	4%
1	2,514	7,47	10,113
2	2,968	7,914	10,465
3	2,131	6,797	9,382
4	3,582	6,67	10,001
5	2,464	6,703	11,621
Ortalama	2,732	7,111	10,316
Std. Sapma	0,56	0,56	0,83

Şekil 6.3'de görüldüğü gibi, artan sodyum silikat oranıyla basma mukavemetinde artış gözlenmektedir. %2 sodyum silikat oranında $2.732\pm 0,56$ MPa olan basma mukavemeti, sodyum silikat oranının %4 olması durumunda yaklaşık 3,75 kat artış göstererek $10,316\pm 0,83$ MPa değerine ulaşmıştır.



Şekil 6.3: Geleneksel sertleştirme sonrası elde edilen değerler

Literatürde [60], 2,5 modüle sahip ve %2,5 sodyum silikat bağlayıcılı kalıp kum karışımlarına geleneksel yöntem ile sertleştirme uygulaması sonucunda, ortalama 11,87 MPa'lık bir basma mukavemet değerine ulaşıldığı rapor edilmiştir.

6.1.4 MD sertleştirme sonrası ısıtma işlem uygulaması

Mikrodalga sertleştirme sonrası ısıtma işlem uygulaması için, %3 sodyum silikat içeren numunelerden mikrodalga ile sertleştirme işleminde orta güç seçeneği olan 680W ve ortalama süresi olan 6 dk.' da işlem görmüş numuneler seçilmiştir. Seçilen numunelere 100 °C aralıklarla 100 °C'den 800 °C' e kadar 30 dakika pişirme işlemi uygulanmıştır. Ancak, 800°C' de pişirilen numunelerde görülen numune ortasındaki, ileri boyutlu çatlaklar, numunelerin standart dışı kalması nedeniyle daha yüksek sıcaklıklara çıkılmamıştır (Şekil 6.4).



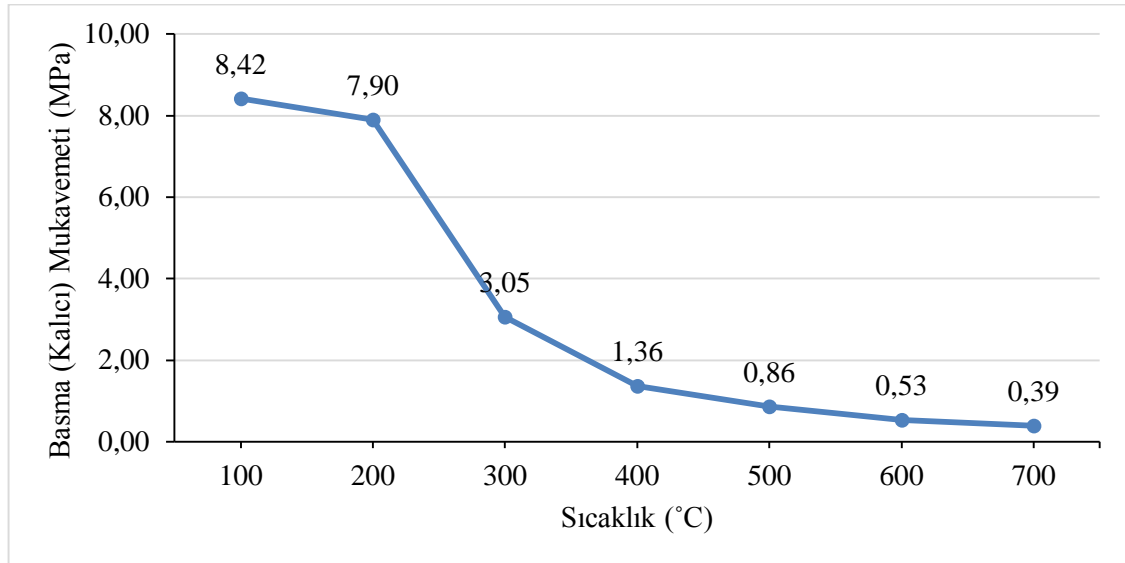
Şekil 6.4: Standart dışı kalmış numune

Mikrodalga ile sertleştirilmiş numunelere uygulanan ısıtma işlemi sonrası basma (kalıcı) mukavemet sonuçları Çizelge 6.6’da gösterilmektedir.

Çizelge 6.6: MD sonrası ısıtma işlemi uygulanmış numunelere ait basma mukavemetleri.

Numune no.	Basma (Kalıcı) Mukavemeti (MPa)						
	Mikrodalga 680 W. - 6 dk. + Isıtma işlemi 30 dk.						
	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C
1	9,094	8,387	3,039	1,427	0,833	0,500	0,458
2	8,077	7,984	3,259	1,281	0,785	0,650	0,314
3	8,083	7,321	2,862	1,368	0,971	0,437	0,408
Ortalama	8,418	7,897	3,054	1,359	0,863	0,529	0,393
Std. Sapma	0,59	0,54	0,20	0,07	0,10	0,11	0,07

Çizelge 6.6’ daki değerlerden görüldüğü gibi mikrodalga sertleştirme işlemi sonrası ısıtma işlemi uygulanmış numunelerde kalıcı mukavemetin 100°C’ den 700°C’ ye doğru artan sıcaklıkla azaldığı belirlenmiştir. Mukavemetlerdeki değişim grafiği Şekil 6.5’ te görülmektedir.



Şekil 6.5: MD sonrası ısıtma işlemi ait basma (kalıcı) mukavemeti değerleri

Bu mukavemet düşüşü, mikrodalga uygulaması ile oluşan silika jel yapısındaki bağ köprülerinin sıcaklığın etkisi ile bozunmasından kaynaklanmaktadır[54]. Basma (kalıcı) mukavemetindeki düşüş, literatür [63]’deki 2,5 modül oranına sahip,%2,5 sodyum silikat katkıli numunelerin 900 W mikrodalga sertleştirme işlemi sonrası

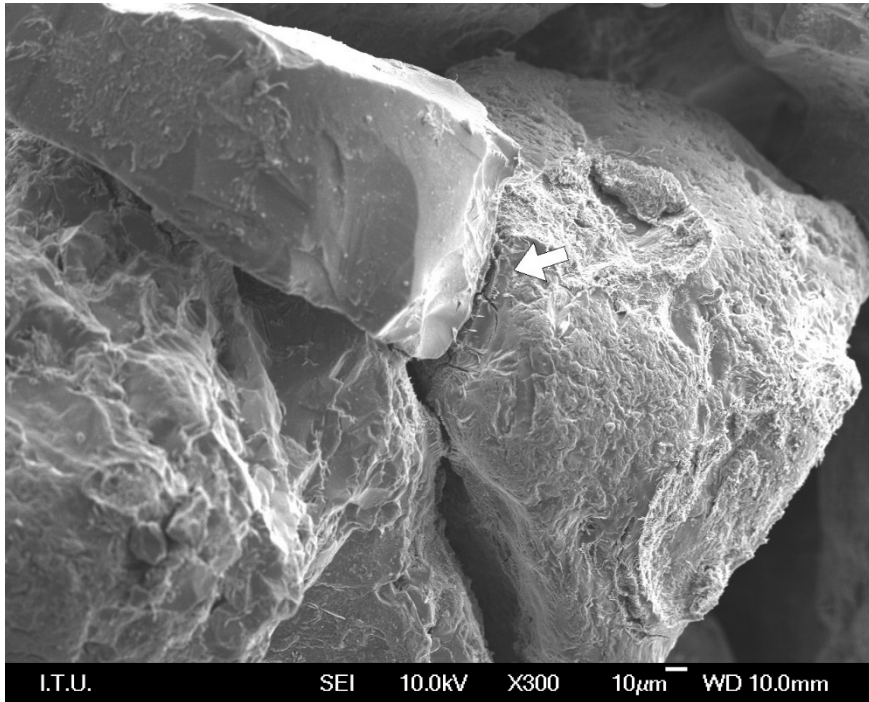
100-1200 °C aralığında gözlemlenen basma (kalıcı) mukavemet düşüşü ile uyumluluk göstermektedir.

6.2 Mikroyapı Analiz Sonuçları

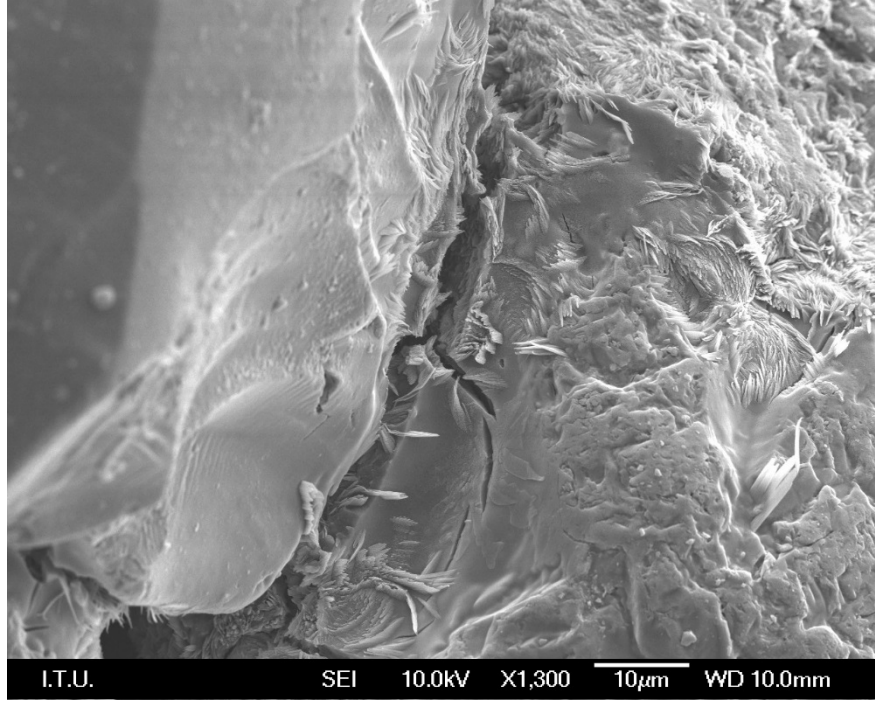
6.2.1 CO₂ yöntemi

CO₂ yöntemi ile sertleştirilen numuneler için yapılan SEM çalışmalarında elde edilen görüntüler Şekil 6.6 ve Şekil 6.7'de verilmektedir. Gözlemlenen çatlakların sadece yüzeysel olmayıp, kum taneleri arasındaki bağlara derin bir şekilde nüfuz ettiği görülmektedir. Sertleştirme yöntemleri içerisinde basma mukavemet özellikleri açısından en düşük değerlerin CO₂ prosesinde tespit edildiği dikkate alındığında, düşük mukavemet davranışının mikroyapı gözlemleri ile örtüştüğü görülmüştür.

Zayıf adhezyon kuvvetleri (düşük mukavemet) kalıp kumunun tekrar kullanımına imkan vermesine rağmen, arzu edilen mukavemet değerleri için, daha fazla sodyum silikat ilavesi ve daha uzun CO₂ uygulama süresine ihtiyaç duyulduğu bilinmektedir.



Şekil 6.6: CO₂ yöntemi uygulanmış numunede tane yüzeyleri ve çatlaklar (x300)



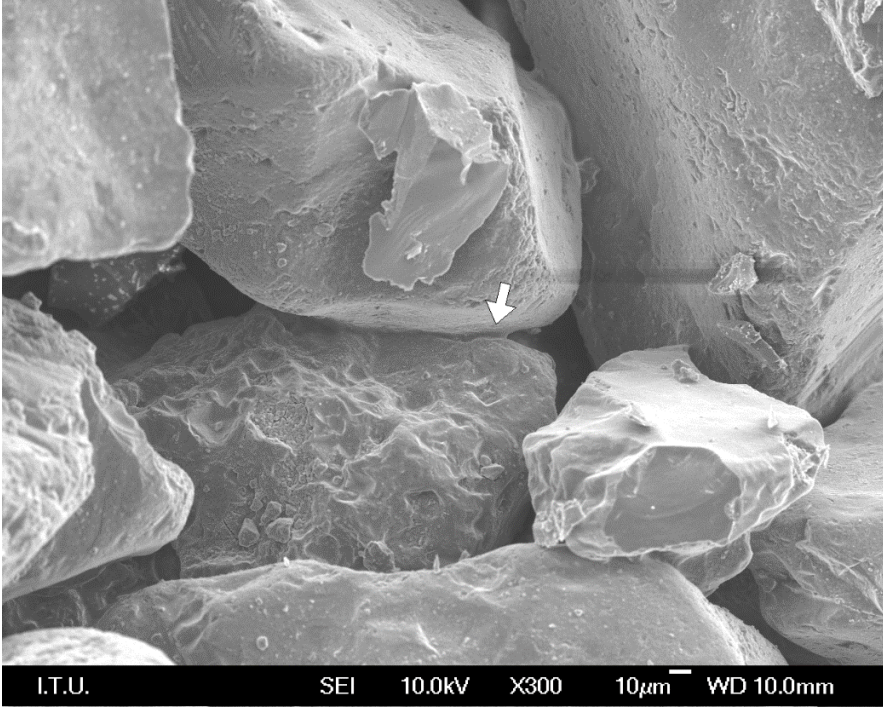
Şekil 6.7: CO₂ yöntemi uygulanmış numunede tane yüzeyleri ve çatlaklar (x1300)

6.2.2 Mikrodalga yöntemi

Şekil 6.8 ve Şekil 6.9’de mikrodalga yöntemi ile 510 W güçte, 4 dk, Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’de 510 W güçte, 8 dk Şekil 6.12 ve Şekil 6.13’de 850 W güçte, 8 dk sertleştirme işlemine tabi tutulan %3 sodyum silikat katkılı numunelerin SEM çalışmalarından alınan görüntüleri verilmektedir.

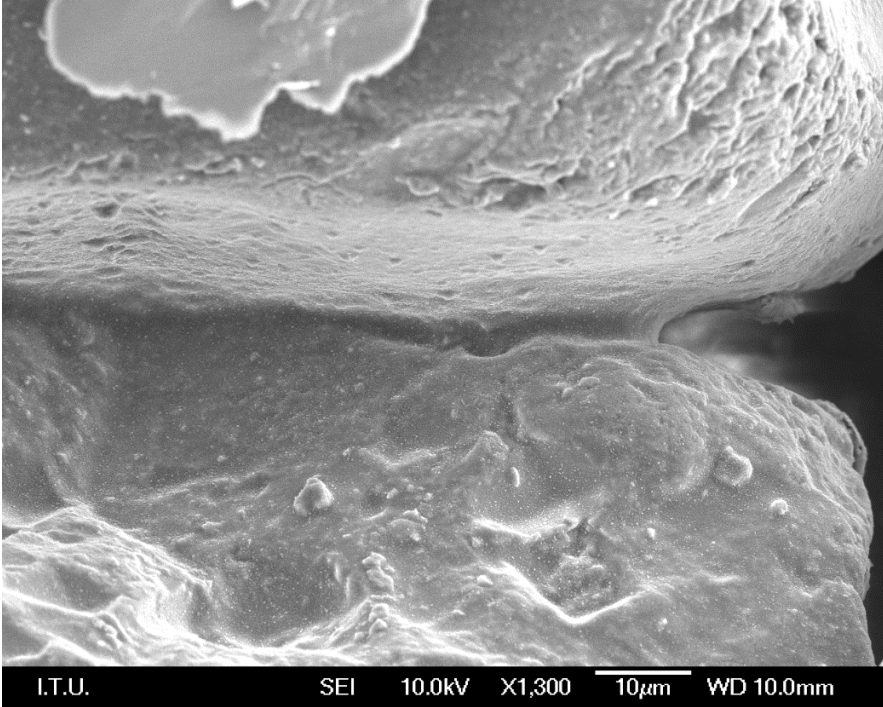
Bu yönteme ait taramalı elektron mikroskobu görüntülerinden (Şekil 6.7-Şekil 6.12) mikrodalga sertleştirmesinin kum taneleri arasındaki çatlaksız, kuvvetli bağ oluşumuna etkisi gözlemlenmektedir. Şekil 6.9 - Şekil 6.11 - Şekil 6.13’ deki sodyum silikat köprülerine ait yüzey görüntüleri, geleneksel yöntem ve CO₂ yöntemi ile elde edilen yüzeylerden daha düzgün, pürüzsüz ve hatasız formda olduğu gözlemlenmiştir.

Mikrodalga yönteminde, hızlı sıcaklık artışı sayesinde, bağlayıcının taneleri birbirine çekme etkisi yüzey hatalarına neden olmamakta, bağ köprüleri arasında yumuşak geçişler yapan camsı film oluşumu sağlanmakta ve geleneksel yöntemde olduğu gibi kullanılan bağlayıcının viskozitesinde olumsuz bir davranış (viskozite düşüşü) gözlenmemekle birlikte 100°C üzerinde bu durum silika tane yüzeyinin ıslanabilirliği açısından olumlu bir etki yaratmaktadır.

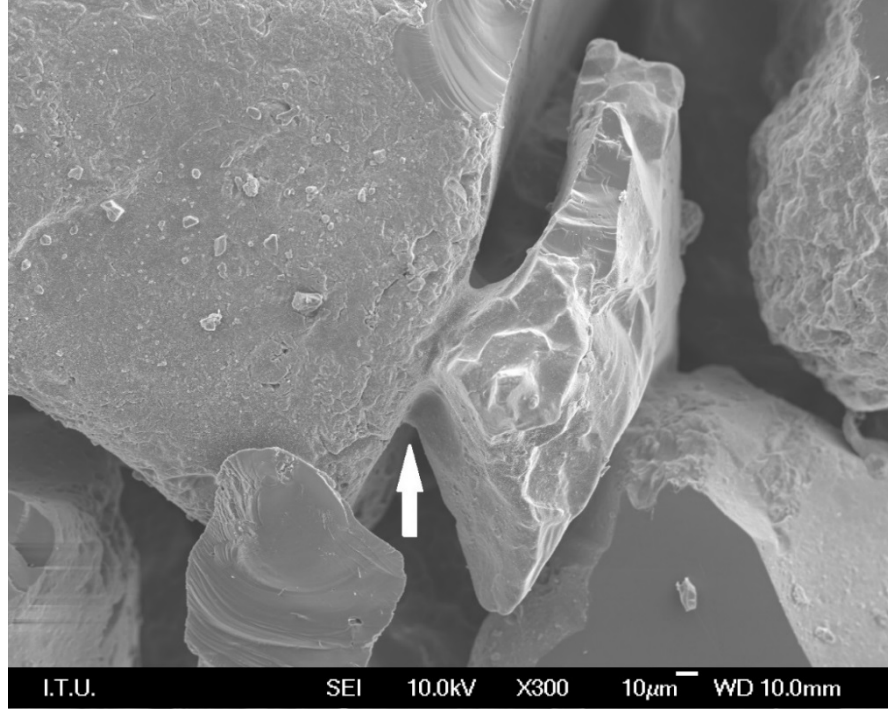


Şekil 6.8: 510 W (4dk) MD sertleştirilmesi uygulanmış numunede kum taneleri ve bağlar (300x)

Şekil 6.8’de gösterilen mikroyapı görüntüsünde, ok ile gösterilen taneler arasındaki bağ köprülerinin daha yakın bir görüntüsü (1300x) Şekil 6.9’da gösterilmiştir.

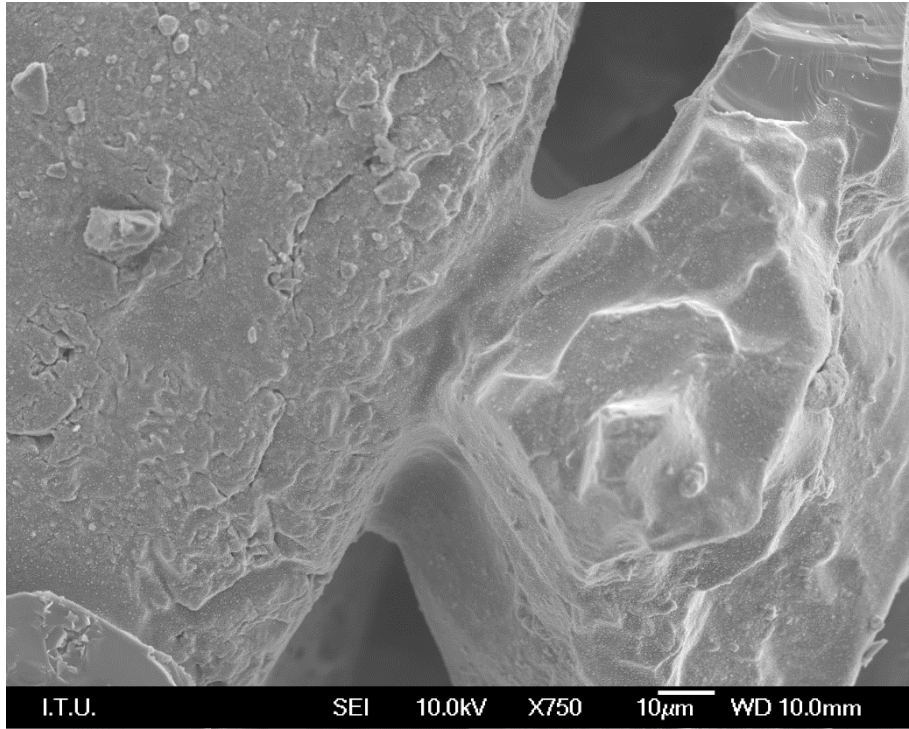


Şekil 6.9: 510 W (4dk) MD sertleştirilmesi uygulanmış numunede kum taneleri ve bağ köprüsü (1300x)

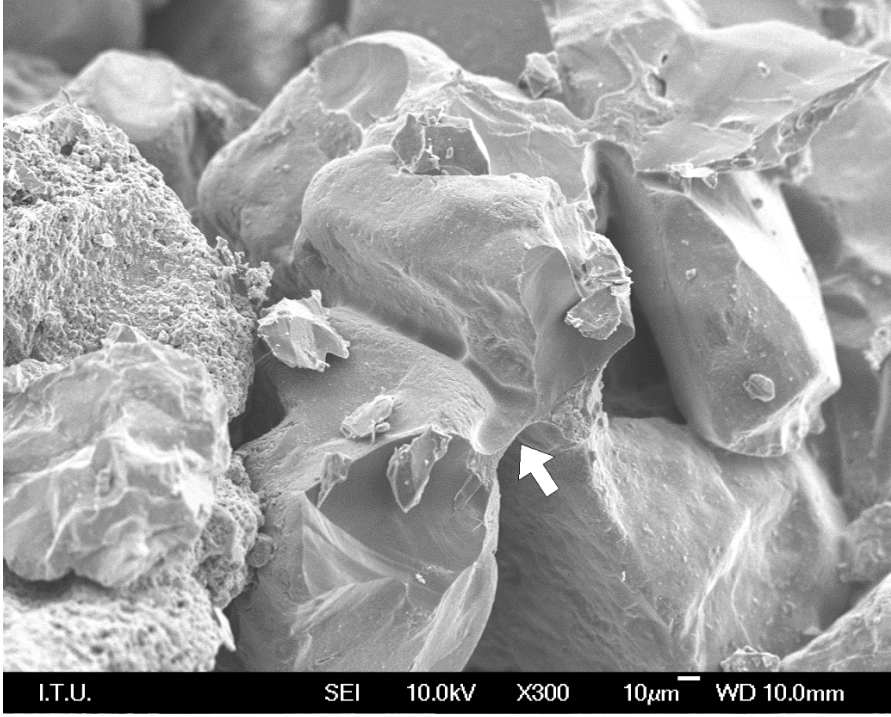


Şekil 6.10: 510 W (8dk) MD sertleştirilmesi uygulanmış numunede kum taneleri ve bağlar (300x)

Şekil 6.10'da gösterilen mikroyapı görüntüsünde, ok ile gösterilen taneler arasındaki bağ köprülerinin daha detaylı bir görüntüsü (750x) Şekil 6.11'de gösterilmiştir.

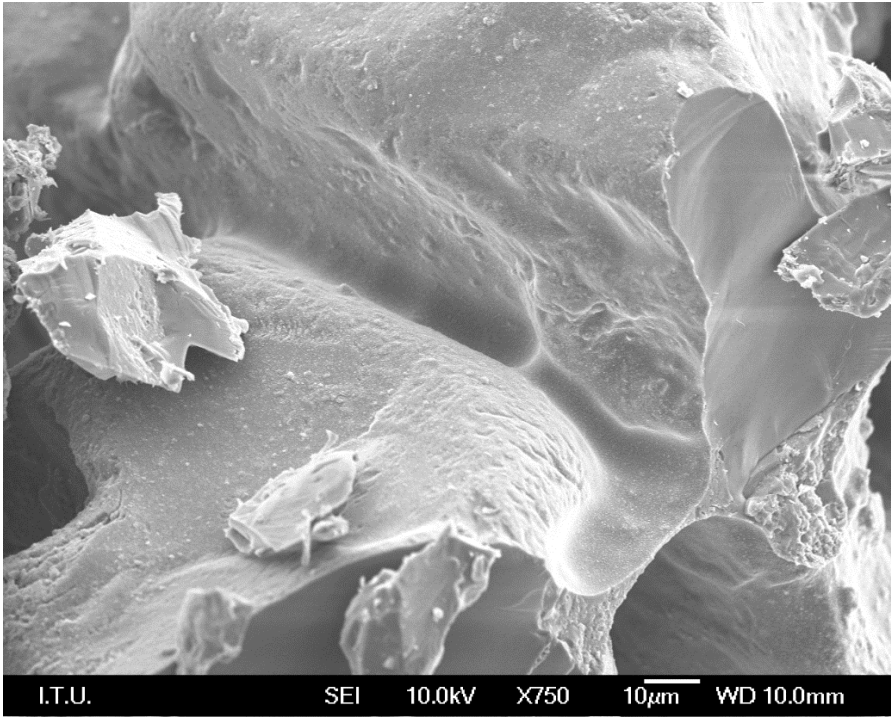


Şekil 6.11: 510 W (8dk) MD sertleştirilmesi uygulanmış numunede kum taneleri ve bağ köprüsü (750x)



Şekil 6.12: 850 W (8dk) MD sertleştirilmesi uygulanmış numunede kum taneleri ve bağlar (300x)

Şekil 6.12’de gösterilen mikroyapı görüntüsünde, ok ile gösterilen taneler arasındaki bağ köprülerinin daha detaylı bir görüntüsü (750x) Şekil 6.13’de gösterilmiştir.



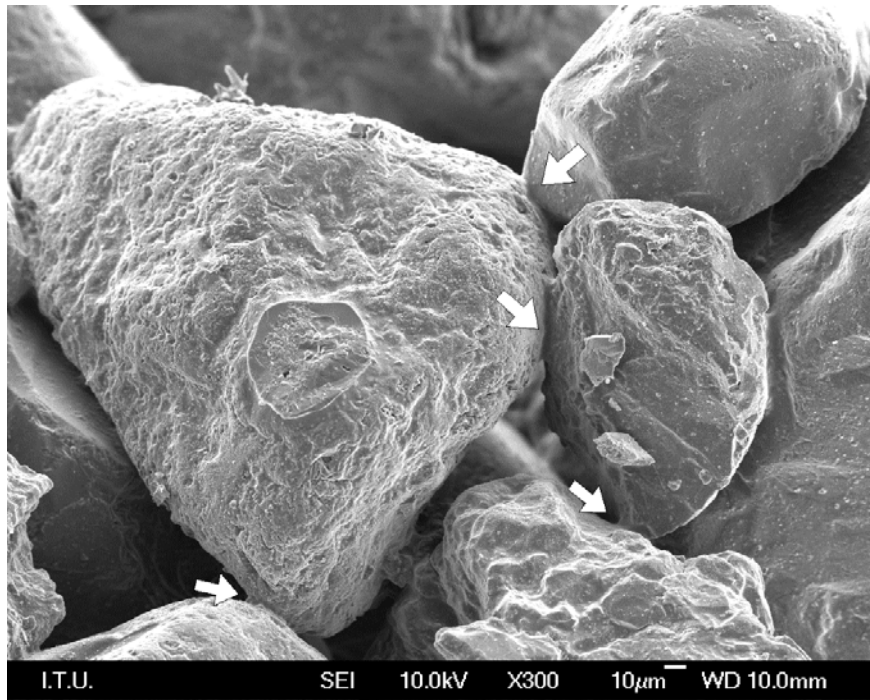
Şekil 6.13: 850 W (8dk) MD sertleştirilmesi uygulanmış numunede kum taneleri ve bağ köprüsü (750x)

6.2.3 Geleneksel yöntem

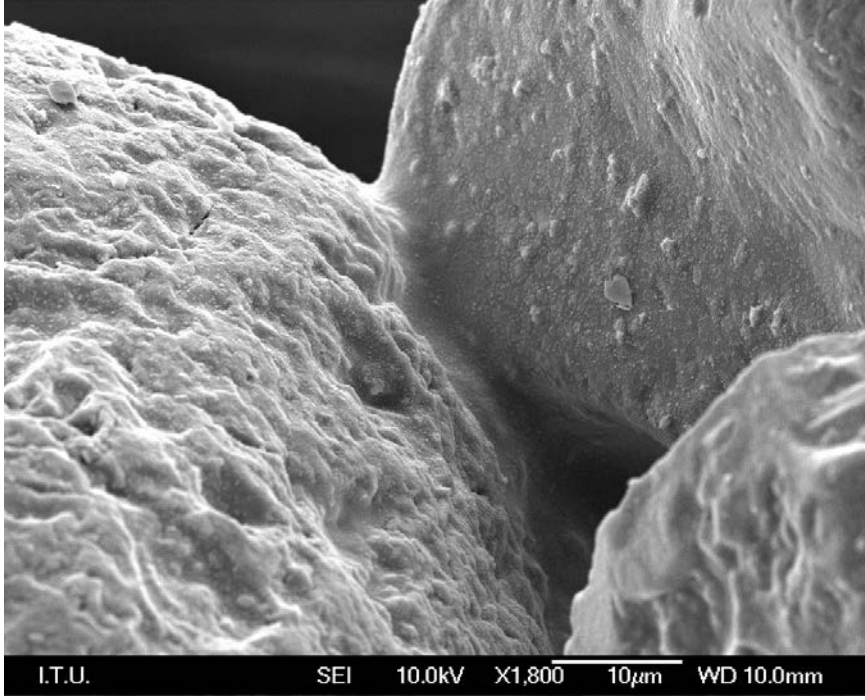
Geleneksel yöntemi ile sertleştirilmiş numunelerden elde edilen SEM görüntüleri Şekil 6.14'te ve Şekil 6.15'te verilmektedir.

Geleneksel yöntemi ile sertleştirilme sonrası elde edilen bağ köprüsü örneği Şekil 6.15'te verilmekte olup, kum taneleri arasındaki bağ köprülerinin düz, CO₂ prosesindeki oluşan bağlardan daha düzenli ve çatlaksız olduğu görülmektedir. Bu düzenli yapı, basma mukavemetlerinde tespit edilen yüksek değerleri doğrulamaktadır.

Aynı sertleştirme mekanizmasının iki farklı yöntemi olan mikrodalga ve geleneksel yöntemler kıyaslandığında, geleneksel yöntemde ısı iletiminin ve dolayısıyla dehidrasyon sertleşme mekanizmasının mikrodalga prosesine göre yavaş ilerlemesi, sodyum silikat bağlayıcısının akışkanlığında düzensizliklere neden olarak, bağ köprüleri üzerinde pürüzlü yapıya neden olmaktadır. Mikrodalga yönteminde daha önce de bahsedildiği gibi hızlı ısıtmadan kaynaklı olarak bu problem yaşanmamakta, 100°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kum tanelerinin yüzey ıslanabilirliğini olumlu etkilemesi sayesinde, daha düzgün geçişli bağ köprüleri oluşmakta ve elde edilen mukavemet değerleri, geleneksel yöntemden daha yüksek olmaktadır.



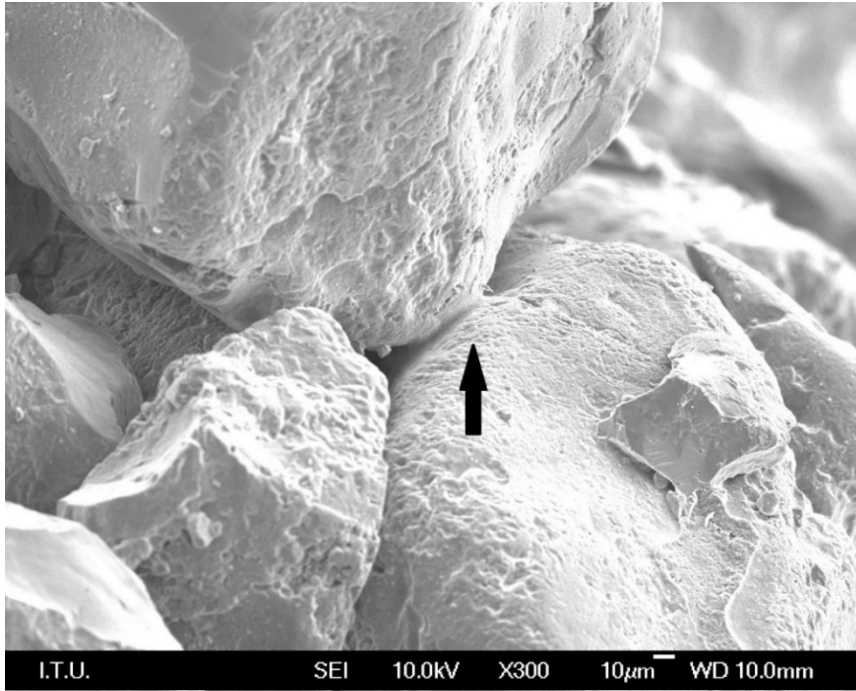
Şekil 6.14: Geleneksel yöntemde ait numunede tane yüzeyleri ve bağlar (x300)



Şekil 6.15: Geleneksel yöntemle üretilen numunedeki tane yüzeyleri ve bağ köprüsü (x1800)

6.2.4 MD sertleştirme sonrası ısıtma işlemi uygulaması

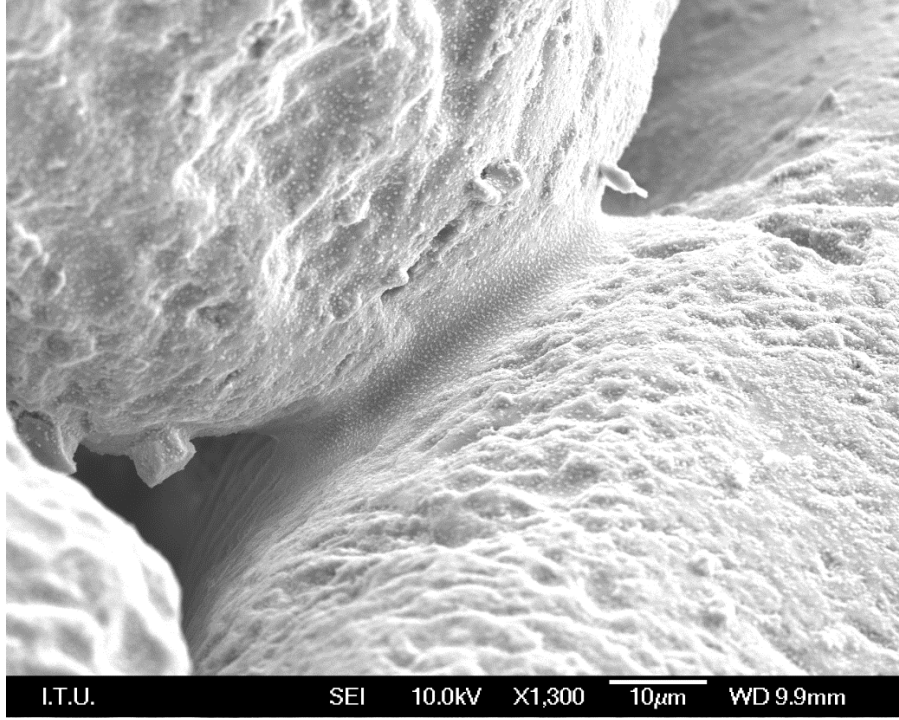
Mikrodalga sertleştirme sonrası 100°C’de 30 dk ısıtma işlemi gören numunelerin mikroyapı analizinde elde edilen görüntüler Şekil 6.16, Şekil 6.17’de verilmiştir.



Şekil 6.16: MD sertleştirme sonrası 100°C’de ısıtma işlemi gören numunedeki bağ yapısı (x300)

Şekil 6.16’te görülen 100°C’de ısıtılmış numunelerdeki kum taneleri arasındaki bağların herhangi bir çatlak içermediği, bağ köprüleri üzerindeki pürüzlerin yüksek sıcaklık etkisi ile sodyum silikat yapısındaki bozunmadan kaynaklandığı görülmektedir.

Şekil 6.16’da gösterilen mikroyapı görüntüsünde, ok ile gösterilen taneler arasındaki bağ köprülerinin daha detaylı bir görüntüsü (1300x) Şekil 6.17’de gösterilmiştir.

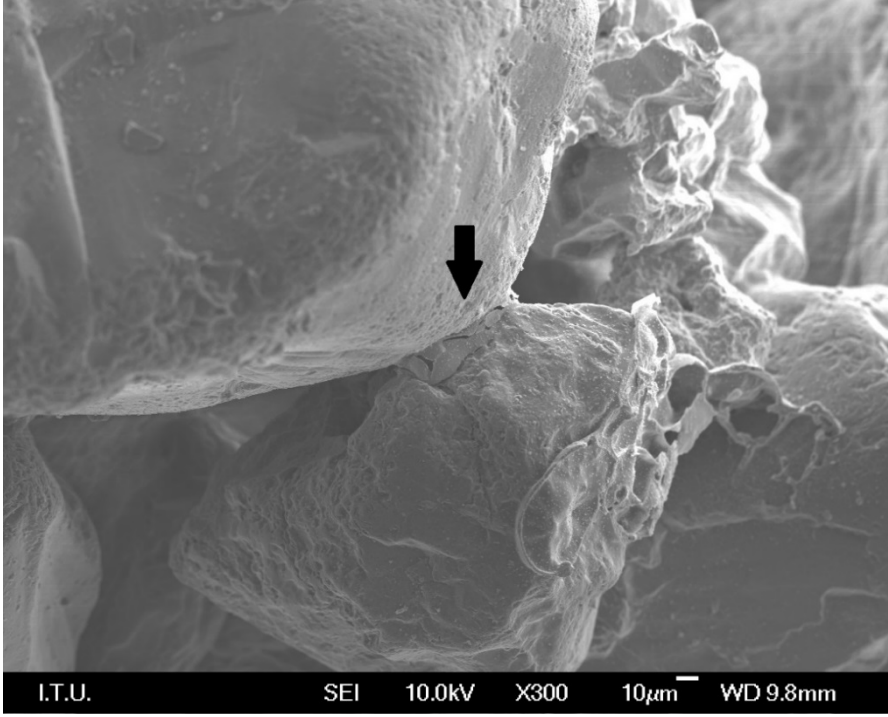


Şekil 6.17: MD sertleştirme sonrası 100°C de ısıtılmış numunede bağ yapısı (x1300)

Şekil 6.17’de görülen kum taneleri arası bağlar ise 600 °C’ de sodyum silikat yapının tamamen bozunmasıyla dağılmıştır. Bu durum, Şekil 6.5’te elde edilen grafikteki sıcaklık artışı ile basma mukavemetlerindeki ani düşüş olarak verilere yansımıştır.

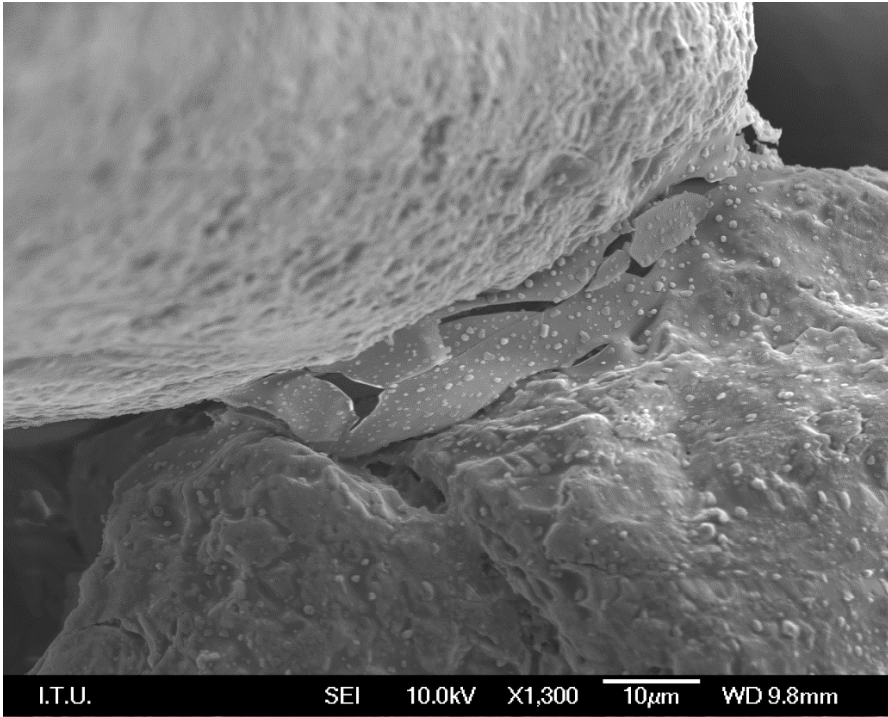
Mikrodalga sertleştirme sonrası 600°C’ de 30 dk ısıtılmış numunelerin mikroyapı analizinde elde edilen görüntüler Şekil 6.18, Şekil 6.19’ da verilmiştir.

Görüntülerden de görüldüğü gibi, sıcaklık arttıkça bağ köprüleri daha rijit davranış göstermiş, daha sonrasında da cam kıvamında kırıklar olarak kendini göstermiştir. Bunun yanı sıra, bağlar üzerindeki noktacıklar halinde kendini gösteren yapı, sodyum silikatın yüksek sıcaklık ile bozunması sonucu matris yüzeyinde pürüzlülük olarak kendini göstermiştir.



Şekil 6.18: MD sertleştirme sonrası 600°C de ısıl işlem gören numunede bağ yapısı (x300)

Şekil 6.18’de gösterilen mikroyapı görüntüsünde, ok ile gösterilen taneler arasındaki bağ köprülerinin daha detaylı bir görüntüsü (1300x) Şekil 6.19’da gösterilmiştir.



Şekil 6.19: MD sertleştirme sonrası 600°C de ısıl işlem gören numunede bağ yapısı (x1300)

7. GENEL SONUÇLAR

Bu yüksek lisans tezinde, sodyum silikat bağlayıcılı kalıp kum karışımlarında mikrodalga sertleştirme mekanizması incelenmiş ve karakterizasyon çalışmaları yapılarak diğer sertleştirme yöntemleri olan CO₂ yöntemi ve Geleneksel kurutma yöntemi ile kıyaslanarak proses, mekanik özellik, yapı ilişkileri tanımlanmıştır. Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- 1) Kum karışım numunelerine CO₂ uygulanarak yapılan sertleştirme yönteminde artan sodyum silikat oranına paralel olarak basma mukavemetlerinde artış gözlenmiştir.
- 2) Mikrodalga ile sertleştirme prosesinde kontrol edebildiğimiz 3 parametre olan mikrodalga gücü, uygulama süresi ve sodyum silikat miktarı artışına paralel olarak basma mukavemeti değerleri de artmaktadır.
- 3) Geleneksel yöntem olarak geçen ve kum karışımı numunelerine uygulanan ısıyla sertleştirme esasına dayanan proseste sodyum silikat bağlayıcı miktarı arttıkça elde edilen basma mukavemeti değerleri artmıştır.
- 4) Mikrodalga sertleştirilmesi sonrasında oluşan silika jel yapısındaki bağların sıcaklıkla olan değişimlerinin incelenmesi amacı ile 800°C'e kadar yapılan pişirimler sonucu bağ köprülerinin yüksek sıcaklıklarda bozularak basma mukavemetlerinde düşüşe neden olduğu görülmüştür.
- 5) CO₂ yöntemi ile sertleştirilen kalıp kum karışımlarının basma mukavemet değerleri geleneksel yöntem ile kıyaslandığında, düşük mukavemetlere rastlanmış olup, bu durumun kalıp kumlarının yeniden kullanılması aşamasında avantaj olduğu görülmüştür.
- 6) Mikrodalga yöntemi ile sertleştirilen numunelerden elde edilen basma mukavemeti değerlerine, geleneksel yöntem kullanarak ulaşmak mümkündür. Ancak, çalışma süreleri açısından değerlendirildiğinde, mikrodalga yöntemi yaklaşık beş kat daha hızlı olup, endüstriyel uygulama açısından avantaj sağlamaktadır. Aynı zamanda, mikrodalga enerjisinin sahip olduğu etkin verimlilik göz önüne alındığında elektrik sarfiyatı bakımından üstünlükleri

olmakla birlikte, yöntemin CO₂ gazı maliyetlerine de gereksinim duymaması diğer bir avantajdır.

- 7) Mikrodalga yöntemi ile istenen mukavemet değerlerine ulaşmak için kullanılması gereken bağlayıcı miktarının CO₂ yöntemine göre çok daha az olmasının diğer bir avantajı, kumun dağılılabile özelliğine olumlu etki yaratır.
- 8) Çalışmada yapılan tüm sertleştirme yöntemlerinde elde edilen mukavemet değerleri ile bağ yapıları ilişkisi SEM incelemesinde görülen mikroyapı analizi ile doğrulanmıştır.
- 9) Döküm endüstrisinde sodyum silikat bağlayıcılı kalıp kum karışımlarında istenen yüksek sıcaklık mukavemeti minimum 0,344 MPa ve maksimum 4,136 MPa' dır. Mikrodalga sertleştirilmesi ile elde edilen sonuçlar doğrultusunda, en düşük güç, en az süre ve en düşük bağlayıcı oranına sahip numunelerde görülen ortalama mukavemet değerinin 1,392 MPa olduğu düşünüldüğünde, gerekli olan minimum mukavemet değerinin rahatlıkla sağlandığı görülmüştür.
- 10) Mikrodalga ile sertleştirme yönteminde, yaş mukavemeti çok düşük olan numunelerin kalıptan çıkarılmadan sertleştirilmesi zorunluluğu endüstriyel açıdan dezavantaj yaratmaktadır.
- 11) Mikrodalga yöntemiyle sertleştirilen numunelerin nem absorpsiyonu, dehidrasyon mekanizmasıyla sertleştirmeden dolayı daha yüksektir, bu da sertleştirilen kalıpların bekleme özelliklerinin olumsuz olmasına yol açacağından, bu özelliklerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

KAYNAKLAR

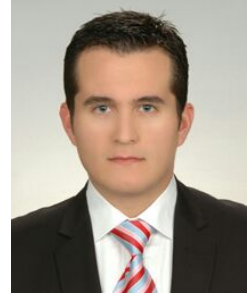
- [1] **Zitian F., Xuanpu D. ve Xun L.** (2004). The Water-glass sand process principle and application. *China Machine Press*, 1-5, Beijing, China.
- [2] **Zitian F., Jina W. ve Jun L.** (2007). Performance changes and answer strategies of the sodium silicate reclaimed sand hardened with ester after recurrent use, *China Foundry*, 56, 1203-1206, China.
- [3] **Andrade R. M., Cava S. ve Silva S. N.** (2005). Foundry sand recycling in the troughs of blast furnaces: a technical note. *Journal of Materials Processing Technology*, 159, 125-134.
- [4] **Zitian F., Naiyu H. ve Xuanpu D.** (2004). In house reuse and reclamation of used foundry sands with sodium silicate binder. *International Journal of Cast Metals Research*, 17, 51-56.
- [5] **Guangdong C., Xiangdong L. ve Jinfu L.** (2006). Effects of waterglass tensile strength and collapsibility of water-glass cured by microwave heating. *China Foundry Machinery and Technology*. 6, 18-19, China.
- [7] **Huaji L. ve Weidong X.** (2002). Study on the materials used for making models of sodium silicate bonded sand core heating by microwave energy. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 25, 116-119, China.
- [8] **Menezes R. R., Souto P. M., ve Kiminami RHGA.** (2007). Microwave hybrid fast sintering of porcelain bodies. *Journal of Materials Processing Technology*, 190, 223-229.
- [9] **Millos C. J., Whittaker A. G., ve Brechin E. K.** (2007). Microwave heating – A new synthetic tool for cluster synthesis. *Polyhedron*, 26, 1927-1933.
- [10] **Qunying M. ve Xianjun L.** (2004). Applications of microwave heating technology. *Physics*, 33, 438-442, China.
- [11] **Benitez R., Fuentes A., ve Lozano K.** (2007). Effects of microwave assisted heating of carbon nanofiber reinforced high density polyethylene. *Journal of Materials Processing Technology*, 190, 324-331.
- [12] **Basak T.** (2007). Role of metallic, ceramic and composite plates on microwave processing of composite dielectric materials. *Material Science and Engineering A*, 457, 261-274.
- [13] **Alibaş, İ.** (2001). Bazı sebze ve meyvelerin mikrodalga ışınlarla kurutulmasında kurutma parametrelerinin belirlenmesi. *Uludağ Üniversitesi, Tarım Makinaları Ana Bilim Dalı, (Yüksek Lisans Tezi)*, Bursa.
- [14] **Jina W., Zitian F., Xiaolei Z. ve Di P.** (2007). Properties of sodium silicate bonded sand hardened by microwave heating, *State Key Laboratory of Material Processing and Die and Mould Technology*, Huazhong University of Science and Technology, *China Foundry*, 4, 26-30, Wuhan.

- [15] **M.E.B. Kitapları.** (1983). Mikrodalga, *1. Baskı*, İstanbul
- [16] **Kuşlu, S.** (2001). Mikrodalga Enerjisinin Kimyasal Reaksiyonlar Üzerine Olan Etkilerinin Araştırılması: Pirit Minerallerinin $[H_2SO_4 + Fe_2(SO_4)_3 \cdot 5,03 H_2O]$ çözeltilerinde Mikrodalga Enerjisi İle Çözündürülmesi, *Atatürk Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi*, Erzurum.
- [17] **Eskibalçı, M.F.** (2007). Cevher Hazırlama ve Zenginleştirmede Mikrodalga Enerjinin Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *İstanbul Üniversitesi, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi*, İstanbul.
- [18] **M.E.B. Kitapları.** (t.y). *Manyetik Alan ve İndüksiyon*, İstanbul.
- [19] **Url-1** <<http://www.ozdisan.com/temelbilg/elektronigin-fiziksel-esaslari.pdf>>, alındığı tarih: 01.05.2014.
- [20] **Koşalay, İ.** (2008). Enerji iletim hatlarının meydana getirdiği elektromanyetik alanlar ve değerlendirmeler, *VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*, Ankara.
- [21] **Buğdaycı N.** (2011). Kuantum Kuramı ve Gerçeklik, *Kuantum Çalıştayı*, Şirince, Selçuk.
- [22] **Chow T. V. ve Reader H.C.** (2000). Understanding microwave heating cavities, (ISBN 1-58053-094-X, Sf. 9-35), London.
- [23] **Çolakoğlu, K.** (1996). Fen ve mühendislik için fizik, Modern fizik ilaveli, Serway'dan çeviri, *Palme Yayıncılık*, (Cilt 1, Sf. 884-893).
- [24] **Yıldız K. ve Alp A.** (2000). Metalurjik proseslerde mikrodalga kullanımı, *Metalurji Dergisi*, (Cilt 24, Sayı:125, s.24-29).
- [25] **Haque K. E.** (1999). Microwave energy for mineral treatment processes - a brief review, *International Journal of Mineral Processing*, (Cilt 57,Sf. 1-24).
- [26] **Dieter B.** (2003). Physical waves in adsorption technology, *Separation and Purification Technology*, (Cilt 33, Sf. 163-177)
- [27] **Thostenson E.T. ve Chou T.W.** (1999). Microwave processing: Fundamentals and applications, *Composites*, (Cilt 30, Sf. 1055-1071)
- [28] **Kanat A.** (2001). İ.T.Ü. KOSGEB'de geliştirilmekte olan mikrodalga fırında elma meyvesinin kurutulmasına yönelik bir çalışma, *İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi*.
- [29] **Jones D., Kingman S.W., Lelyveld T.P., Mavrofidis, S.D. ve Miles N.J.** (2002). Microwave heating applications in environmental engineering- A Review Resources, *Conservation and Recycling*, (Cilt 34, Sf. 75-90)
- [30] **Xia D.K. ve Pickles C.A.** (1997). Applications of microwave energy in extractive metallurgy, *Canadian Institute of Mining Bulletin*, (Cilt 90, Sf. 96-107)
- [31] **Artan E. T.** (1997). Mikrodalga güç uygulama aparatlarında ısı dağılımının simülasyonu, *İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- [32] **İdris A. Khalid K. ve Omar W.** (2004). Drying of silica sludge using microwave heating, *Applied Thermal Engineering*, (Cilt 24, Sayı 5,6 syf 905-918).
- [33] **Türkoğlu İ.** (2002). Mikrodalga, *Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi*, Elazığ.
- [34] **Gümüşderelioğlu M., Kaynak G.** (2012). Mikrodalgalar ve uygulamaları, *Bilim ve Teknik Dergisi, Temmuz Sayısı*, (Sf. 38-42)
- [35] **Stuerga D.** (2008). Microwave-Material Interactions and Dielectric Properties, *Microwaves in Organic Synthesis*, (2th Edition) , Weinheim.
- [36] **Bal C., Mete F.C.,** (2011). Konveksiyonel ve mikrodalgafırımların ısıl analizi, *Dokuz Eylül Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Bitirme Projesi*, İzmir.

- [37] **Toraman Ö.Y., Depçi T.** (2007). Kömürde mikrodalga ile önışlem uygulamaları, *Madencilik*, (Cilt 46, Sayı 3, Sayfa 43-53)
- [38] **Clark, D.E., Folz, D.C. ve West, J.K.** (2000). Processing Materials with Microwave Energy, *Material Science Engineering (A287)*, Sf.153-158)
- [39] **Engin, T.S.** (2007). Kömürlerin Mikrodalga Enerji ile Sıvılaştırılmasına O-Metilleme Önışleminin Etkisi, *Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi*, Ankara.
- [40] **Lindroth, D.P.** (1986). Microwave Drying of Fine Coal, Report of investigations, U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines 9005, USA.
- [41] **Whittless, D.N., Kingman, S.W. ve Reddish, D.J.** (2003). Application of Numerical Modelling for Prediction of the Influence of Power Density on Microwave-Assisted Breakage, *Internal Journal of Mineral Processing*, (Cilt 68, Sf. 71-91)
- [42] **Kuşkonmaz, N. ve Kutbay, I.** (2004). Mikrodalga Isıtmanın Seramik Üretiminde Kullanımı, *Metalurji, TMMOB* (Sayı:137, Sf. 52-56)
- [43] **W. H. Sutton.** (1989). Microwave Processing of Ceramic Materials, *Ceramic Bulletin*, (Cilt 68, No. 2)
- [44] **Yıldız, K. ve Alp, A.** (1999). Using of Microwave in Metallurgical Processes, *Metalurji, TMMOB*, (Cilt 24, No.125, 1300-4824)
- [45] **Jones, S.** (2013). Seven Applications You Didn't Know Were Compatible with Microwave
- [46] **Stuchly, M. A. ve Stuchly S.S.** (1983). Industrial, scientific, medical and domestic applications of microwaves, *IEE Proceedings*, (Cilt 130, No 8, Sf.467-502)
- [47] **Koç, A.** (2000). Mikrodalga enerjisinin cevher hazırlamadaki kullanımı, *İ.Ü. Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü, Seminer Çalışması*, İstanbul.
- [48] **Çavuşoğlu, E.** (1981). Döküm Teknolojisi Kitabı, İstanbul.
- [49] **Aran, A.** (1989). Metal Döküm Teknolojisi, İstanbul.
- [50] **Reynold, C. Merrill.** (1949). Industrial Applications of the Sodium Silicates, *Ind. Eng. Chem.*, (Cilt 41, Sf. 337-345) Philadelphia.
- [51] **McDonald M., Hamilton JR.** (t.y.). Recent Developments in Soluble Silicate Based Binders and Coatings, PA,USA.
- [52] **Url-2** <<http://www.cees-silicates.org/publications.html>>, alındığı tarih: 29.04.2014
- [53] **Tokuro N., Tatsuya H. ve Yoshinari M.** (2003). Chemical bonding state of sodium silicate, *Original Research Article Advances in Quantum Chemistry*, (Cilt 42, Sf. 187-198)
- [54] **Brown J.R.** (2000). Foseco Ferrous Foundryman's Handbook, *Chapter 14-Sodium silicate bonded sand* (Cilt 11, Sf. 204-215)
- [55] **Istvan H., Runbo L., Mukesh A. ve Neil M.** (2007). Dissociation, molweight, and vibrational spectra of aqueous sodium silicate solutions, *Studies in Surface Science and Catalysis*, (Cilt 170, Sf. 800-805)
- [56] **Url-3** < <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/637082/water-glass>>, alındığı tarih: 22.04.2014 (*Encyclopaedia Britannica. Inc. Web.*)
- [57] **Komaç, O. Ş.** (1985). CO₂-Sodyum silikat bağlı kum sistemlerine etki eden parametrelerin incelenip maça ve kalıp özelliklerinin geliştirilmesi, *İTÜ Fen Bil. Enst., Doktora Tezi*, İstanbul.
- [58] **Url-4** < <http://www.endecotts.com/products/sieve-shakers/octagon-d200-digital.aspx>>, alındığı tarih: 21.04.2014.

- [59] **Ridsdale, & Co Ltd. Catalogue.** (t.y.). Middlesbrough, England
- [60] **Stachowicz, M., Granat K., Nowak D.** (2010). Effect of hardening method and structure of linking bridges on strength of water glass moulding sands, *Archives of Foundry Engineering*, Wroclaw University of Technology, (Cilt 10, Özel Sayı 2/2010 Sf. 141-146), Poland.
- [61] **Stachowicz M., Granat K., Nowak D., Haimann K.** (2010). Effect of hardening methods of moulding sands with water glass on structure of bonding bridges, *Archives of Foundry Engineering*, Wroclaw University of Technology, (Cilt 10, Özel Sayı 3/2010 Sf. 123-128), Poland.
- [62] **Stachowicz M., Granat K., Nowak D., Haimann K. Wikiera R.** (2007). The influence of hardening method on basic properties of water glass moulding sands, (Cilt 1, No. 4)
- [63] **M. Stachowicz a, K. Granat a, D. Nowak.** (2011). Effect of bentonite addition on residual strength of microwave-hardened waterglass-containing moulding sands, *Archives of Foundry Engineering*, Wroclaw University of Technology, (Cilt 11, Özel Sayı 3/2011, Sf. 199-204)

ÖZGEÇMİŞ



Adı Soyadı: Serdar KADIOĞLU

Doğum Yeri ve Tarihi: Eskişehir / 03.04.1988

E-posta: skadioglu@itu.edu.tr

Lisans: Afyon Kocatepe Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, 2010

Yüksek Lisans: İTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği A.B.D. , Üretim Metalurjisi ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, 2014