

Mikrodalga İle Hızlandırılmış Kürün Uçucu Küllü
Harç Özelliklerine Etkisi

Yaşar Özgün Topkara

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Mart 2009

Accelerated Microwave Curing Effects on
The Properties of Fly Ash Cement Mortar

Yaşar Özgün Topkara

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

March 2009

Mikrodalga ile Hızlandırılmış Kürün Uçucu Küllü
Harç Özelliklerine Etkisi

Yaşar Özgün TOPKARA

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. İlker Bekir TOPÇU

Mart 2009

ONAY

Yapı Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Yaşar Özgün Topkara'nın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Mikroalga İle Hızlandırılmış Kürün Uçucu Küllü Harç Özelliklerine Etkisi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. İlker Bekir TOPÇU

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. İlker Bekir TOPÇU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Atıf ÇAY

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ö. Fatih ESER

Üye : Yrd. Doç. Dr. Selim ŞENGEL

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet CANBAZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

Prefabrik beton yapım işleminde kür süresinin azaltılması; üretimi artırmak, sermayeyi korumak ve çalışma alanını kısıtlamak için önemli bir etkidir. Bu gereksinimi karşılamak için bu çalışmada harici bir ısıtma kaynağının kullanımı araştırıldı. Çimento hamurunu ve betonu ısıtmak için alternatif tekniklerin kullanımı 20 senedir çeşitli şekillerde araştırılıp denenmektedir. Suyun mikrodalga enerjisini emmesi ve su içerikleri dolayısıyla çimento karakterli malzemelerin küründe mikrodalga enerjisi uygulanabilmektedir. Suyun dielektrik doğası nedeniyle çimento karakterli malzemelere mikrodalga enerjisi uygulanması beraberinde ısı açığa çıkardığından, mikrodalga ile ısı artırılması çimento hidratasyonunu hızlandıracak potansiyele sahip alternatif bir yöntem oluşturmaktadır.

Bu çalışmada mikrodalga kür işleminin, katkısız, uçucu küllü (F sınıfı uçucu kül), kimyasal katkılı, 4x4x16 cm boyutlarında harç numunelerine etkisi incelendi. Burada sunulan çalışmanın ana hedefi mikrodalga kür işleminin çimento harcının özellikleri üzerindeki etkisini belirlemektir. Bu özelliklerdeki olası bir gelişmenin bulunabilmesi için, Portland çimentosunun bir miktarı puzolanik madde uçucu küllü yer değiştirilerek 28 günlük basınç dayanımı hesaplandı. Kontrol numuneleri için çelik kalıplar kullanılırken, mikrodalga kürlü harç numunelerinde cam ve polistiren kalıpların kullanımı tercih edildi. Yapılan deney sonuçları, hava ve su kürlü kontrol harcınkilerle karşılaştırıldı.

Yapılan bu çalışma sonucunda, mikrodalga kür yönteminin harç numunelerinin hidratasyon hızını arttırarak kısa sürede erken dayanım kazanmalarını sağladığı ortaya çıkmıştır. Elde edilen sonuçlar mikrodalga kür yönteminin beton teknolojisinde yeni bir alternatif kür yöntemi olarak gelişebileceğini göstermektedir. Bu yöntem kısa sürede yüksek basınç dayanımı sağladığı gibi diğer yöntemlere göre daha az enerji tüketimi yapılan, gelişmelere de açık bir hızlandırılmış kür yöntemidir.

Anahtar Kelimeler: mikrodalga kür, harç, basınç dayanımı, uçucu kül.

SUMMARY

It is important in the precast concrete process to reduce the curing period for the productivity, capital saving, and reduction of workshop area. To satisfy this demand, the use of an external heating source has been investigated. The use of alternative techniques for heating cement paste and concrete has been investigated randomly in the last 20 years. Microwave energy can be applied on the curing of the cementitious materials because of their water content and absorption of microwave energy by water. Because microwave energy generates heat in cementitious materials due to the dielectric nature of the water, microwave enhanced heating is a potential alternative method for accelerating cement hydration.

In this study, microwave curing process effects were investigated on control (no admixture), fly ash (F class fly ash) and chemical admixture, 4x4x16 cm mortar specimens. The main aim of the work presented here is to assess the effects of microwave curing process on the properties of fly ash cement mortar. Exploring the possibility of property improvements, appropriate amounts of pozzolanic material fly ash were substituted for a portion of the Portland cement and the 28 day compressive strength was determined. While conventional steel moulds were used for control specimens, glass and polystyrene moulds were chosen for microwave cured mortars. The tested results were compared with those of the conventional mortar specimen that were cured in water and air conditions.

As a result of this study, it came out that; microwave energy can accelerate the hydration of cement paste, resulting in rapid strength development of cement paste in an early period. The obtained results show that microwave curing method can develop as a new alternative curing method in concrete technology. This method is an uncovered accelerated curing method that provides not only high compressive strength but also low energy consumption.

Key Words: Microwave curing, mortar, compressive strength, fly ash.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanmasında bana yol gösteren ve yardımları ile çalışmalarımı yönlendiren hocam Sayın Prof. Dr. İlker Bekir TOPÇU'ya, teknik konularda yardımcı olan Sayın Arş. Gör. Uğur TOPRAK'a, laboratuvar çalışmalarımda yardımcı olan Sayın İnş. Tek. Sevgin YILMAZ'a ve hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aileme en içten dileklerle teşekkürlerimi sunarım.

Yaşar Özgün TOPKARA

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL ONAY	iv
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. BETON TEKNOLOJİSİNDE HIZLANDIRILMIŞ KÜR	2
3. MİKRODALGA KÜR.....	8
3.1. Mikrodalga Çalışma Mekanizması	10
3.2. Mikrodalga Kür Yöntemi ile İlgili Yapılmış Deneysel Çalışmalar	12
4. AMAÇ VE KAPSAM	24
5. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	25
5.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler	25
5.1.1. Çimento	25
5.1.2. Kum.....	25
5.1.3. Su.....	25
5.1.4. Uçucu kül	27
5.1.5. Süperakışkanlaştırıcı katkı	28
5.1.6. Mikrodalga fırın	30
5.1.7. Harç kalıpları.....	32
5.2. Numunelerin Üretimi.....	34
5.3. Deney Numunelerinin Saklanması	36
5.4. Yapılan Deneyler	37
5.4.1. Ultrases geçiş süresi deneyi.....	37
5.4.2. Eğilme dayanımı deneyi.....	39
5.4.3. Basınç dayanımı deneyi	41
6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	43
7. SONUÇLARIN İRDELENMESİ	52
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	53
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	55

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Normal-MK basınç dayanım değerlerinin karşılaştırılması,.....	9
3.2. MK yöntemi uygulanmış boşluklu beton plaka,	9
3.3. Buhar ve MK uygulanmış beton numunesinin mikro yapısı,	16
3.4. Buhar ve MK beton numunesindeki mikro çatlak,	16
3.5. MK harçların dayanım kazanma yüzdeleri,	17
3.6. Uçucu kül kullanım oranları ve basınç dayanımı ilişkisi,.....	18
3.7. Erken dayanım deney zamanı ve basınç dayanımı ilişkisi,	20
3.8. MK işlemci ve dielektrik ölçüm cihazı,.....	21
3.9. Basınç dayanım kazanımı karşılaştırması,.....	22
3.10. Çimento hamuru SEM görüntüleri,	23
5.1. CEN Standart kumu	27
5.2. Tipik bir F sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü,	28
5.3. Harç karışımlarında kullanılan süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı	30
5.4. Deneylerde kullanılan mikrodalga fırın	31
5.5. Mikrodalga fırın ve kalıplar	32
5.6. Deneylerde kullanılan XPS, çelik ve cam kalıplar	33
5.7. Deneylerde kullanılan XPS ve cam kalıplar	34
5.8. Harç karışımı mekanik karıştırıcısı	35
5.9. Beton kür havuzu	37
5.10. Ultrases geçiş süresi deneyi	39
5.11. Harç eğilme cihazı	40
5.12. Basınç deneyi	42
5.13. Elektronik deney presi	42
6.1. Kür yöntemi ve basınç dayanımı ilişkisi.....	44
6.2. Kür yöntemi ve eğilme dayanımı ilişkisi.....	45
6.3. Kür yöntemi ve ultrases geçiş hızları ilişkisi	46

6.4. XPS kalıpta uçucu kül kullanım oranları ve basınç dayanımı ilişkisi	47
6.5. Cam kalıpta uçucu kül kullanım oranları ve basınç dayanımı ilişkisi	48
6.6. Cam kalıpta uçucu kül kullanım oranları ve ultrases geçiş hızları ilişkisi.....	49
6.7. Kür yöntemi ve basınç dayanımı ilişkisi.....	51
6.8. Kalıp türü ve basınç dayanımı ilişkisi.....	51
6.9. Kalıp türü ve ultrases geçiş hızları ilişkisi	52

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Hava sıcaklığına bağlı tipik ısıtma süreçleri	6
3.1. Harç numunelerinin deney kombinasyonları	13
3.2. Farklı mineral katkılı harç numunelerinin basınç dayanımı karşılaştırılması	14
3.3. Beton numunelerine yapılan hızlı klor geçirgenliği deney sonuçları	15
3.5. 7 ve 28 gün dayanım tahmininde kullanılan veriler	19
5.1. CEM I 42.5 kimyasal bileşenleri	26
5.2. CEN standart kumunun tanecik büyüklüğü dağılımı	26
5.3. Çayırhan uçucu külü kimyasal bileşimi	29
5.4. Çayırhan uçucu külü elek analizi	30
5.5. Karıştırıcı kanadının hızları (TS EN 196-1)	35
5.5. Ultrases geçiş hızı ile beton kalitesi arasındaki ilişkisi	39

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
MHz	: Mega Hertz
GHz	: Giga Hertz
s/ç	: Su/çimento
ç/k	: Çimento/kum
ç/k/a	: Çimento/kum/agrega
dk	: Dakika
°C	: Santigrat derece (Celcius)
W	: Watt
MK	: Mikrodalga kür
NK	: Normal kür
MPa	: Mega Pascal (N/mm^2)
R^2	: Korelasyon Katsayısı
TS	: Türk Standardı
ASTM	: American Society for Testing and Materials

1. GİRİŞ

Beton; çimentonun yanı sıra diğer çimento karakterli uçucu kül ve cürufu çimento, agregası (kırmı taş, alçıtaşı, granit, kum gibi), su ve kimyasal katkıdan oluşan bir inşaat malzemesidir. Beton kelimesi Latince bir kelime olan concretus'tan gelip, sertleştirilmiş veya sert anlamındadır. Hidratasyon olarak bilinen bir kimyasal sürecin ardından beton suyla karıştırılıp yerleştirildikten sonra, sertleşir. Tüm bileşenleri birlikte tutan çimento su ile tepkimeye girmesiyle çok sert bir kompozit meydana gelir.

Türkiye'de oldukça genç fakat gelişimini sürdüren bir sektör olan hazır beton sektörü, 15 yıl gibi kısa bir süre içerisinde yıllık 1–2 milyon m³'ten 2004 yılında 30 milyon m³'e yaklaşan ve 2007 yılında 74.4 milyon m³ üretim rakamlarını yakalamıştır (Karakule, 2004). Avrupa Hazır Beton Birliği (ERMCO) verilerine göre, aralarında Türkiye'nin de bulunduğu 22 Birlik üyesi ülkenin 2007 yılı toplam hazır beton üretimi 495.7 milyon m³ olmuştur. Dünyadaki ekonomik ve teknik olanaklar geliştikçe, bu tüketim yeni alanlara da yayılmaktadır (ERMCO, 2007). Dünyada beton insan yapımı bütün malzemelerden daha çok kullanılmıştır (Lomborg, 2001).

Santralde standarda uygun üretilmiş, taşınmış, dökülmüş, yerleştirilmiş ve bitirilmiş beton uygulaması, betonun ilk dayanımını alması sonrasında çevre koşullarına göre küretilmediğinde kötü sonuçlar verir. Betonun bakımı bir başka deyişle betonun kuru, beton yerleştirildikten sonra veya beton ürünlerinin üretiminden sonra oluşabilecek su kaybını engellemek ve hidratasyonun uygun şekilde ve zamanda gerçekleşmesini sağlamaktır. Çimento hidratasyonu günlerce, haftalarca hatta aylarca sürer. Hidratasyon reaksiyonunun devamı için yeterli miktarda su ve sıcaklık gerekmektedir. Bu koşullar sağlanmadığı takdirde betondan beklenen dayanım ve dayanıklılık elde edilemez. Yerine yerleştirilmiş olan betonun içerisindeki suyun buharlaşarak azalmaması, betonda yeterli miktarda su bulundurulması ve yerleştirilmiş olan betonun içerisindeki sıcaklığın betondaki hidratasyonu yavaşlatacak, durduracak derecelere düşmemesi betonun kuru için gerekli olan koşullardır (Erdoğan, 2003).

Betonun kürü için başlıca 3 yöntem vardır;

- Betonun yüzeyi sulanır, gölet yapılır, ıslak kum, talaş ya da telis bezi serilir,
- Betonun yüzeyi polietilen tabakalarla kaplanır,
- Beton özelliklerini geliştiren kür katkıları kullanılır.

Su göleti düz yüzeyli beton yollarda, döşemelerde ve kaldırımlarda 5 cm su dolu göletler oluşturularak, suyun kapalı bir alanda tutulması için yapılır. Sürekli olarak beton yüzeyine su püskürtülmesi mükemmel bir su ile kür yoludur. Islak örtüler, telis bezi veya diğer su tutucu örtüler kullanılır. Polietilen örtüler yatay elemanlarda kalıplar söküldükten sonra en geç yarım saat içinde ve döşemelerde beton yeterli sertliği kazanır kazanmaz uygulanır. Katkı kullanımında ise uygulanan kimyasal kür malzemeleri işin cinsine göre farklılık gösterir. Beyaz veya alüminyum renginden olan kimyasal katkıları beton yüzeyinde sürekli bir zar tabakası oluşturur. Bu tabaka buharlaşmayı çok düşük seviyelere indirdiği gibi özellikle sıcak mevsimlerde beton yol gibi uygulamalarda güneş ışınlarının beton yüzeyinde kırılmasına ve yüzeyden yansımaya neden olurlar.

TS 500 "Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları" Standardı beton dökümü sırasında alınan numunelerin 20 °C sıcaklıktaki su içinde saklanıp 28 günlük basınç dayanımlarının belirlenmesini öngörür. Standart deney yöntemi olarak adlandırılan bu uygulamanın en önemli eksik yanı ise sonuç alınana dek 28 gün bekleniyor olmasıdır. Hazır beton üretim ve üretimindeki gelişmeler, yatay ve düşeyde ulaşılan pompalama uzaklıkları göz önüne alınırsa, beton kalitesinin belirlenmesi için geçen sürede çok önemli miktarlarda beton dökümü gerçekleştirilmiş olur. Artan konut gereksinimini en kısa sürede ve ekonomik biçimde karşılayabilmek için inşaat teknolojisi sanayileşme ve seri üretime yönelmiş ve sonuç olarak prefabrikasyon, tünel kalıp ve benzeri yöntemler geliştirilmiştir. Bu süre sonunda elde edilen basınç dayanım değeri amaçlanan sınıf dayanımının altında kalırsa önlem almak için çok geç kalınmış olur. Beton kalitesini belirlemek için 28 günden daha kısa zamana gereksinim duyulmaktadır. Betonun priz almasını ve basınç dayanımı kazanmasını hızlandırmak için çimentonun hidratasyonunu hızlandıran ısıtılı işlemlere dayanan kür yöntemlerinden yararlanılmaktadır.

2. BETON TEKNOLOJİSİNDE HIZLANDIRILMIŞ KÜR

Günümüzde hazır beton ve inşaat teknolojilerindeki gelişmeler sonucu, betonun 28 günlük basınç dayanımının önceden belirlenebilmesi için ısıtım işlemleri ile çimento hidratasyonunu hızlandırıp betonun erken dayanım kazanması üzerine birçok çalışmalar yapılmıştır. Sıcak su kürü, kaynar su kürü ve hidratasyon ısısı kürü 1979'da TS 3323 ile tanımlanan hızlandırılmış kür yöntemlerindendir. Hızlandırılmış kür uygulaması daha çok yerinde beton uygulamalarında kullanılır. Kalıpların kısa sürede sökülmesi ve betonda yüksek dayanım kazanmak burada amaçlanan unsurlardır. Bu durumlarda, beton elemanlarının etrafında yapay bir ortam oluşturulur. Beton elemanlara kontrollü bir şekilde ısı ve nem verilir. Daha çok portatif buhar jeneratörleri ve sıcak su boruları idealdir. Hızlandırılmış kür uygulaması enerji gerektirdiği için masraflı bir uygulamadır. Kür sonrası hızlı ısı kaybı ise betonda termal gerilimlere neden olabilir (Engin, 2006).

TS 3323'te tanımlanan yöntemlerden hidratasyon ısısı küründe üretilen numuneler yalıtımlı özel kalıplara yerleştirilmekte, çimentonun hidratasyon ısısı sonucu sıcaklık artmakta, sertleşme hızlanmakta, 48 saat sonunda kalıplardan çıkarılan numunelerin 49 saat sonunda basınç dayanımları test edilmektedir. Bu yöntemin de 48 saatlik kür süresinin uzunluğu, sonuçların üretim sırasındaki beton sıcaklığından, çimento tipinden, priz geciktirici ve hızlandırıcı katkılardan çok etkilenmesi gibi dezavantajları vardır.

ASTM C 684-74'te tanımlanıp ülkemizde de aynen kullanılan bir diğer hızlandırılmış kür yöntemi olan kaynar su küründe üretimden 23 saat sonra kaynar suya yerleştirilen numuneler, 3.5 saat kürden sonra çıkarılıp 28.5 saat sonunda denenmektedirler. Bu yöntemde işlem sıcaklığının çok yüksek olması ve ani ısıtma ve soğutma hızları nedeniyle, elde edilen hızlandırılmış basınç dayanım değerlerinin dağılımı oldukça yüksek çıkmakta, bu da tahminin hassasiyetini düşürmektedir. Buna karşılık işlem sıcaklığının yüksekliği hızlandırılmış dayanımların da yüksek olmasına yol açmakta ve hızlandırılmış dayanımlarla standart dayanımlar arasındaki farkın azalması, tahminin hassasiyetini olumlu etkilemektedir. Bu yöntemde, kaynar su ile çalışmanın yaratacağı sağlık sorunları ve 28.5 saatlik çevrim süresi nedeniyle çalışma saatlerinin dışına taşması da yöntemin diğer dezavantajları olarak değerlendirilmektedir.

Sıcak su yönteminde ise numuneler üretilir üretilmez 35 °C'deki suya yerleştirilmekte, 23.5 saat sonunda çıkarılıp 24 saat sonunda deneyleri yapılmaktadır. Bu yöntem, uygulaması oldukça kolay, çalışma saatlerine uygun, yumuşak bir ısı işlem çevrimidir. İşlem sıcaklığı düşük olduğu için beton bünyesi zarar görmemekte, böylece basınç dayanım değerlerinin dağılımı düşük olmaktadır. Fakat yine işlem sıcaklığının düşüklüğü nedeniyle basınç dayanımları düşük olmaktadır (Kurbetçi ve Öztekin, 2004).

En az hassasiyet gerektiren uygulamalarda bile, betonun en yüksek dayanımına ulaşması için düzgün şekilde kürünün yapılmasına önem verilmelidir. Betonun yerleştirilmesinden sonra kür başlar. Bütünüyle dayanım ve güç kazanmak için çimentonun neme ve kontrol altına alınmış bir çevreye gereksinimi vardır. Çimento hamuru, başlangıçta çok zayıf olsa da sertleşir ve rijitleşir, sonraki günler ve haftalarda güç kazanır. Yaklaşık 3 haftada, genellikle son dayanımının % 90'ına ulaşsa da, on yıllar boyunca dayanım kazanmaya devam eder. İlk 3 günde betonun hidrasyonu ve sertleşmesi çok önemlidir. Yerleştirme sırasında rüzgarın buharlaştırma faktörü gibi bir nedenle anormal hızlı kuruma ve büzülme henüz önemli ölçüde dayanım kazanmadığı bir sırada büzülme çatlaklarıyla sonuçlanan artan çekme gerilmelerine neden olabilir.

Betonun erken dayanımı daha uzun süre nemli tutularak artırılabilir. Kürden önceki gerilmeler ne kadar azaltılırsa çatlak oranı o kadar azalır. Yüksek erken dayanımlı beton daha hızlı bir hidrasyon sürecine göre tasarlanır. Bu da genellikle büzülme ve çatlakların artmasına yol açan yüksek oranda çimento kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Bu süreçte beton kontrollü sıcaklık ve nemli hava koşullarında bulunmalıdır. Uygulamada beton yüzeyini su ile spreyleme ve su göleti oluşturularak sağlanır, böylelikle beton kütlesi zararlı çevre etkilerinden korunmuş olur. Betonun uygun şekilde kürü yüzeyi erken kururken yüksek dayanım ve düşük geçirgenliği sağlayarak çatlak oluşumunu önler. Çimentonun ısı veren hidrasyonundan dolayı çok ısınmadan ya da donmadan kaçınmak için de önlem alınması gerekir. Hatalı kür yüzeyde pullanma, düşük dayanım, zayıf aşınma direnci ve çatlaklara yol açar.

İdeal bir hızlandırılmış kür çevriminde hızlandırılmış dayanımlar olabildiğince yüksek olmalıdır ve bu da kür sıcaklığını artırarak sağlanabilir. Zira hızlandırılmış

dayanımlarla standart dayanımlar arasındaki farkın azalması tahminin hassasiyetini arttıracaktır. Bunun yanında, hızlandırılmış basınç dayanımı değerlerindeki dağılım da olabildiğince düşük olmalıdır. Çimento hamuru içerisindeki gözenekler ve katı tanecikler çok küçük ve çok sayıdadır. Su daha az dirençle karşılaşacağı için daha az sayıdaki fakat çok daha büyük çaplı boşluklardan geçme eğilimindedir. Bu nedenle de çimento hamurunun bir bütün olarak geçirimsizliği çimento jelinin geçirimsizliğinden 20-100 defa daha büyük olmaktadır. Bu nedenle de çimento hamurunun geçirimsizliğinin büyük oranda kapiler boşluklara bağlı olduğu söylenebilir (Baradan vd., 2002).

Isıl işlem uygulamasının sertleşmiş çimento hamuru yapısında yüksek sıcaklıkta hidrasyon sonucu hidrasyon ürünlerinin heterojen dağılımı, kristalleşmenin ve porozitenin artması gibi kaçınılmaz yapısal bozukluklara yol açtığı; fakat kalıcı hacim artışı, ısıl gerilme ve su kaybı sonucu oluşan fiziksel bozuklukların ise önlenabilir oldukları söylenmektedir. Bu bilimsel olgu, beton bünyesindeki yapısal ve fiziksel bozuklukları sınırlamak açısından kür sıcaklığının fazla olmamasını gerektirmektedir. Aynı zamanda ısıl işlem çevriminin ön bekleme süresi, ısıtma hızı, soğuma süresi unsurlarına önem verilmesi gerektiğine işaret edilmektedir (Kamara and Rabbat, 2005).

Hızlandırılmış dayanım deneylerinde temel olarak iki yaklaşım vardır. Birincisi kür sıcaklığı göreceli olarak düşük tutulur ve alınan beton numunelerine bekletilmeden kür uygulanır. Bu durumda işlem sıcaklığının düşüklüğü nedeniyle basınç dayanımları düşük olmaktadır. İkinci yöntemde ise daha yüksek kür sıcaklığı söz konusudur, ancak bu sıcaklık uygulanmadan önce betonun ön beklemeden geçmesi gerekir. Bu durumda da kür süresinin uzunluğu nedeniyle çalışma saatlerinin dışına taşması bu yöntemin dezavantajları olarak değerlendirilmektedir. Normal koşullarda kür uygulamasında beton yerleştirmeden sonraki ilk 7 gün nemli bir ortamda tutulmalı ve sıcaklığı en az 10 °C'nin üstünde korunmalıdır. Hızlandırılmış kür uygulaması dışında yerleştirmeden sonraki ilk 3 gün yüksek erken dayanımlı betonun sıcaklığı 10 °C'nin üzerinde ve bulunduğu ortam nemli tutulmalıdır. Sonuç olarak yüksek basınçlı ya da atmosfer basıncında buharla, ısı ve nem uygulanması ile kür veya kabul edilen diğer yöntemler, kür süresini düşürmeye ve basınç dayanımı kazanımına olanak tanınmalıdır.

Hızlandırılmış kür betonu en azından yükleme anında tasarlandığı basınç dayanımına eşit dayanıma ulaştırmalıdır. Buhar kürlü betonun basınç dayanımı sürekli olarak uygun sıcaklıklarda nemli ortamda kürü yapılan beton kadar yüksek değildir. Buhar kürlü numunelerin elastisite modülleri de normal sıcaklıklarda nemli ortamda kürü yapılan numunelerden farklılık gösterebilir. Buhar kürü uygulandığı zaman beton karışım oranlarını buhar kürlü test numunelerine göre ayarlamak doğru olur. Standart ve yeterli sonuçlar elde edebilmek için hızlandırılmış kürün özenli bir bakıma gereksinimi vardır. Beton içindeki en önemli malzeme olan çimentonun hidratasyonu için nemli ortama gerek duyulduğundan kür sırasında nem kaybını önlemek esastır.

Betona ısı uygulamak ise pahalı bir seçenektir, bu nedenle uygulamada sadece sonuçta elde edilen avantajın artan masraflardan daha ağır bastığı durumlarda kullanılır. Saha inşaatı uygulamalarında günlük inşaat döngüsü ancak 14 saatlik kür süresine olanak tanır. Örneğin beton yol uygulamalarında bu sürede betonun tabaka haline gelmesi için yaklaşık 10 MPa dayanım kazanması gerekir. Fakat soğuk hava koşullarında hızlandırılmış kür uygulanmadan buna ulaşmak zordur. Saha inşaatında hızlandırılmış kür için gerekli ısı hesaplanabilir. Yerleştirme sıcaklığından 54 °C sıcaklığa ulaşabilmek için her metreküp başına derece artışı için 0.75 kW kullanılır. İnşaat çeliği için de % 10 eklenir. Bu demektir ki 5-25 °C yerleştirme sıcaklıklarındaki betonu yeterli sıcaklığa ulaştırabilmek için fazladan metreküp başına 40.4 kW ile 24.0 kW ısı gerekli demektir. Isıtmanın süresi hava sıcaklığına bağlıdır, ama tipik ısıtma süreçleri Çizelge 2.1’de gösterildiği şekildedir (Newman and Choo, 2003).

Çizelge 2.1. Hava sıcaklığına bağlı tipik ısıtma süreçleri, (Newman and Choo, 2003)

Hava Sıcaklığı, °C	Isıtma Süresi, saat
+15	5.0
+10	5.5
+5	6.0
0	6.5
-5	7.0
-10	7.5

Isıtıcıların sayısı ve dizilimi kür edilen kesitin boyutlarına, ısıtıcı tipine, ısı kayıplarına bağlıdır. Isıtıcı sayısı aşağıda olduğu gibi hesaplanabilir:

$$IS = \frac{GI (kW/m^3) \times H (m^3)}{IS (h) \times IK (kWh)} \quad (1)$$

IS : Isıtıcı Sayısı

GI : Gerekli Isı

H : Hacim

IS : Isıtma Süresi

IK : Isıtıcı Kapasitesi

Prefabrik beton üretiminde ısıtıcıların boyutları ufak olur ve daha çabuk yüksek sıcaklıklara ulaştırabilme kapasiteleri mevcuttur. Isı uygulamasından önce genellikle bir gecikme olur. Bu ısı uygulaması betonun özelliklerine zararlı etkilerini kabul edilebilir sınırlar içerisinde tutarken kür süresini en aza indirmek için tasarlanır.

Hızlandırılmış kürün beton özelliklerine şu etkileri vardır;

- Ulaşılan en yüksek sıcaklığa bağlı olarak % 30 kadar son basınç dayanımı kaybına neden olurlar,
- Ulaşılan sıcaklığa bağlı olarak gözeneklilik oranında büyük artış olur,
- Kür sıcaklığı yüksek ise gecikmiş etrenjit oluşumu riski çok yüksektir,
- Hacim kısıtlanmasından dolayı erken yaş termal çatlak oluşumu riski yüksektir.

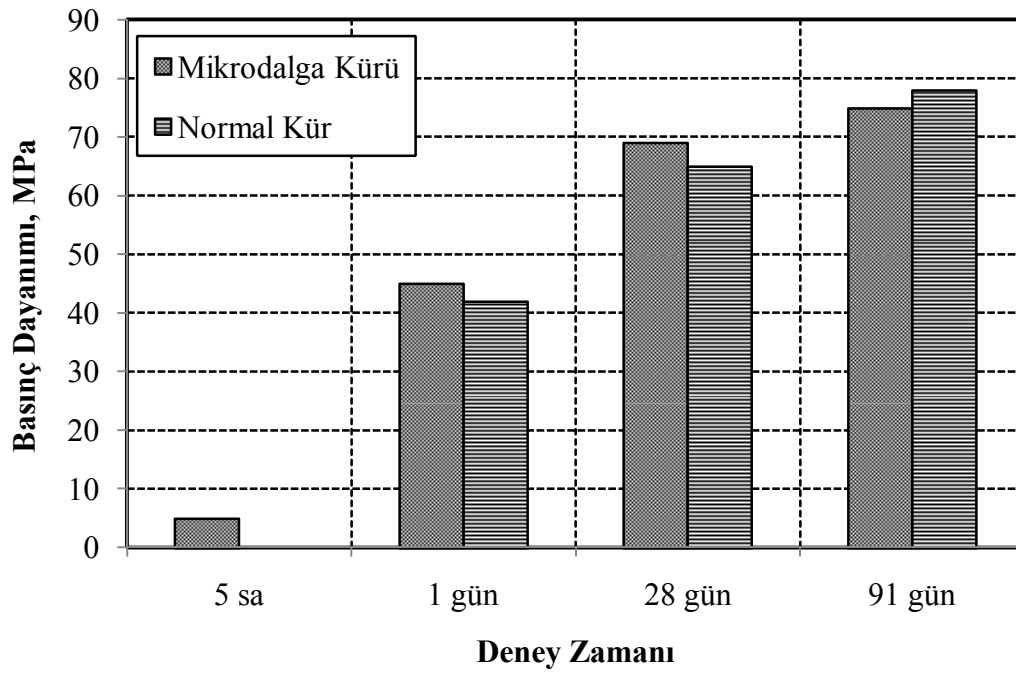
Isıl işlem uygulamasının, sertleşmiş çimento hamuru yapısında, yüksek sıcaklıkta hidrasyon sonucu ürünlerin heterojen dağılımı, kristalleşmenin ve porozitenin artması gibi yapısal bozukluklara yol açtığı ancak kalıcı hacim artışı, ısıl gerilme ve su kaybı sonucu oluşan fiziksel bozuklukların önlenabilir oldukları söylenmektedir. Basınç dayanımındaki düşüşün ve gözeneklilikteki artışın nedeni olarak çimento taneciklerine çok yakın hidrasyon ürünleri oluşması ve bunların çimento tanecikleri arasına üniform dağılmaması gösterilebilir. Hızlandırılmış kür sırasında ulaşılan en yüksek sıcaklık 65 °C'yi aşmazsa uzun vadede betonun özelliklerine etkisi büyük olmaz.

3. MİKRODALGA KÜR

Mikrodalga kür (MK) henüz standartlarda olmamasına rağmen özellikle yurtdışı yayınlarda araştırma konusu olmuştur. Deney süresi diğer yöntemlerde 24 saatin üzerinde iken mikrodalga kür yönteminde 6 saat gibi kısa bir sürede istenilen dayanımı elde edilebilir. Mikrodalga kür yönteminde, beton içerisindeki su molekülleri yardımıyla homojen ısı yayılımı oluşturulup çimentonun hidrasyonu hızlandırılarak betonun erken dayanım kazanması sağlanır. Bu yöntem diğer ısı işlemlerin dezavantajlarını en aza indirmektedir. Mikrodalga kürü maddelerin dikarbonizasyonu esasına dayanarak sera gazı emisyonlarını düşüren seçenekler arasında bulunur. Betonun hızlandırılmış mikrodalga kürü, düşük maliyetlerle CO₂ emisyonlarının % 40 oranında azalmasının yanı sıra enerji tasarrufu sağlar (Hargroves and Smith, 2005).

Mikrodalga enerjisi kullanılarak betonun kürü kimyasal katkılar olmadan, var olan hızlandırılmış kür yöntemlerinden çok daha az olan altı saat gibi kısa bir sürede daha verimli ve düşük enerjili hızlandırılmış ısı işlemler ile yapılabilir. Bu da bildiğimiz buhar veya diğer ısı işlemler ile yapılan kürden neredeyse üç kat daha hızlıdır. Bu yöntem diğer ısı işlemlerinin taşımış olduğu dezavantajları en aza indirmektedir. Bu teknoloji yoğun laboratuvar süreci geçirmiş ve ticari anlamda kullanılmak için denemeler yapılmıştır. İçi boşluklu beton plaka üretimi de bunlardan biridir.

Şekil 3.2’de boşluklu beton plaka, 4.5 saatlik bir mikrodalga kür işleminden geçtikten sonra kalıptan çıkarılmıştır. Bu ürünün aktif mikrodalga ısıtma işlemi, 40 MJ kullanılan bütün işlemin yalnızca % 10’u kadardır. Bu nedenle bu yöntem düşük enerjili hızlandırılmış bir kür sistemi olarak kabul edilebilir. Deney süresinin çok kısa olması, boyut kavramının mikrodalga kür ile ısıtmada önemli bir engel olmaması ve homojen bir ısıtmanın oluşması bu yöntemi önemli kılan özelliklerin başında gelmektedir. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi kür süresinin önemli ölçüde azaldığı gibi bu teknoloji uygulanan betonun basınç dayanımı da beton yaşlandıkça artan hızlı bir yükselme gösterirken ileri yaş dayanımında düşme söz konusudur (Mak et al., 2002).



Şekil 3.1. Normal-MK basınç dayanım değerlerinin karşılaştırılması, (Mak et al., 2002)



Şekil 3.2. MK yöntemi uygulanmış boşluklu beton plaka, (Mak et al., 2002)

Başlangıçta tren raylarının alt yastıkları, içi delikli beton döşeme plakaları, duvar panelleri prefabrik betonlarının hızlı kürü için geliştirilen bu yöntem; tuğla, kaldırım,

çatı kiremidi, beton boru ve direkleri kapsayan geniş ürün aralığında etkin biçimde kullanılabilir. Hatta beton yollar bile bu etkileyici hızlı kür teknolojisi için bir pazar alanı olabilir. Prefabrik beton endüstrisinde halen kullanımda olan buhar kürünün, otoklavların, ısıtılmış kür havuzlarının tamamlayıcısı olabilmesi ya da etkin biçimde yerine geçebilmesi bu teknolojinin esnekliğini gösterir. Mikrodalga ile ısıtma aynı zamanda kalıbın ısıtılmasına da gerek duymadan enerji tüketimini de düşürmektedir.

3.1. Mikrodalga Fırınlarda Çalışma Mekanizması

Mikrodalgalar, elektromanyetik spektrumun radyo dalgaları ile kızıl ötesi ışınlar arasındaki bölümde kalırlar. Frekansları 1 GHz ila 1000 GHz arasında, dalga boyları 0.1-100 cm olan elektromanyetik dalgalardır. Dalgaların frekansları ile dalga boyu arasında; yüksek frekanslı dalgaların kısa dalga boyu, alçak frekanslı dalgaların ise uzun dalga boyu yayması ilişkisi vardır. Mikrodalgaların frekansı düşük, dalga boyları daha uzundur. Bu yüksek dalga boyundaki dalgalar, fırın kapaklarındaki deliklerden geçemez ve içeri yansır. Mikrodalga fırınlarda 2.5-3 GHz'lik frekanslar kullanılır.

Su gibi polar moleküller içeren maddeler kolayca mikrodalga ile ısıtılabilir. Pozitif yükler kısmi olarak hidrojen atomları ve negatif yükler de kısmi olarak oksijen atomu üzerinde toplandığı için su molekülü polar bir moleküldür. Su bu özelliği sayesinde elektriksel enerjiyi pek çok molekülden daha iyi emebilmektedir. Bu tür maddelere elektrik alanı uygulandığında polar moleküller frekansa bağlı olarak polaritesi hızla değişen elektrik alanı nedeniyle dönme eğilimi (dipol dönmesi) göstermektedir. Ev tipi mikrodalga fırının içerisine konan maddenin molekülleri saniyede 2.5-3 milyar kez titreşir. Bu titreşim sayesinde de maddenin molekülleri ısınır dolayısıyla maddenin kendisi de ısınır. Mikrodalgalar ve radyo dalgaları, frekansa ve malzemenin dielektrik özelliklerine bağlı olarak yansıtılabilir, emilebilir veya malzeme tarafından emilmeden geçirilebilir. Cam, porselen, kağıt ve ısıya dayanıklı plastik maddeler gibi ambalaj malzemeleri dielektrik ısıtma frekanslarındaki elektromanyetik dalgaları hiç emmeden geçirirler. Mikrodalgalar, duvara çarpan bir topun geri dönmesi

gibi, metallerden yansıyıp geri dönerler. İçersinde başta su molekülleri olmak üzere, yağ, şeker ve tuz içeren maddeler mikrodalgayı emerek ısıya dönüşmesine yol açarlar.

Mikrodalga, magnetron adı verilen vakum tüpünden üretilir. Magnetron, 60 Hz'lik elektrik enerjisini mikrodalgalara dönüştürür, mikrodalga fırın bu şekilde çalışır. Bu frekanstaki dalgalar, başta su olmak üzere bazı maddeler tarafından emilirler ve bu maddelerin moleküllerini atomik devinime uğratarak enerjiyi ısıya dönüştürürler. Suyun, mikrodalga enerjisini emme oranı kuru maddelerin emme oranlarından 100 kat büyüktür. Emilen enerjinin miktarı, malzemenin içerdiği nem miktarı ile doğru orantılıdır. Bu nedenle içinde daha çok su molekülü taşıyan maddeler daha hızlı ısınır.

Mikrodalga ile ısıtma, geleneksel yöntemlerden hem daha hızlıdır hem de işlem sürecinde yalnızca ısıtılan madde etkilenir, ortam ısınmaz. Isının iletim yoluyla dıştan içe doğru gitme zorunluluğu yoktur. Ayrıca mikrodalga fırınların iç sıcaklığı oda sıcaklığına eşittir. Mikrodalga etki sonucu oluşan ısı, geleneksel sistemin tersine, ürünün içinde daha sıcak olup dış yüzeyde gerek buharlaşma gerekse ısının ışıınımı nedeni ile daha ılıktır. Bu hal, içerden dışarıya doğru bir ısıtma oluşturur. İçerde sıcaklığın daha fazla oluşu, ürün içindeki basıncı arttırdığından, ürünün içindeki nem, basıncın itmesi ile çok daha hızlı bir şekilde ürünün dış çeperlerine taşınır.

Mikrodalga fırının çalışmasındaki en önemli özelliklerinden birinin, maddeyi normal ısıtma sistemlerinde olduğu gibi dıştan içe doğru değil, içten dışa doğru ısıtması olduğu söylene de bu bir mantık hatasıdır. Diğer ısıtma yöntemlerinde ısı dıştan içe doğru yayıldığı için, mikrodalgaların etkisi içten dışa olarak algılanmaktadır; aslında mikrodalga fırınlarda ısıtma, her yere aynı anda etki etme şeklindedir. Mikrodalgalar maddenin içine nüfuz eder, hatta bunu yaparken madde dışında kalan hava moleküllerini de ısıtmaz, böylece enerjisini verimli kullanmış olur. Ayrıca mikrodalga fırın içerisindeki maddenin katmanları arasında sıcaklık farkı yoktur; çünkü mikrodalga ısısı maddenin tüm moleküllerini aynı anda ısıtır ve enerjilerini artırır.

Mikrodalgayla ısıtmanın dezavantajı madde kalınlaştıkça iç kısımlara etkimenin azalmasıdır. Mikrodalga enerjisinin kullanım potansiyelini azaltan en önemli sorun,

düşük dayanıma sahip numunelerin ısıtma zorluklarından daha çok numunenin emdiği enerjiyi tutmasıdır. Isıl kayıplar birincil olarak radyasyondur. Böylece sistem sıcaklığını arttırmak için gerekli olan güç miktarında önemli bir yükselme gerekli olur. Sorunun üstesinden gelmek için yansıtıcı gümüş aynalı duvar kullanımı gibi önlemler alınmaktadır. Ayrıca ısıtmanın içten başlaması da ciddi sorunlara, hatalara neden olabilir. Özellikle içte "sıcak nokta" adı verilen aşırı ısınan bölgelerin oluşması bölgesel ergimeler, bölgesel faz farklılıkları gibi olumsuz sonuçlara yol açabilir (Gökçe, 2006).

3.2. Mikrodalga Kür Yöntemi ile İlgili Yapılmış Deneysel Çalışmalar

Daha önce yurt içinde ve çoğunlukla yurt dışında yapılan deneysel çalışmalarda, mikrodalga kürün çevrimini etkileyen parametreler, beton ve harç numuneleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Çalışmalarda farklı kür çevrim zamanları, farklı kalıplar ve bazen endüstriyel nitelikte mikrodalga enerjisi üreten büyük makineler kullanılmıştır.

Hutchison, et al. (1991), mikrodalga enerjisi ile Portland Çimentosu harcının ısı artışının hızlandırılmasını konu alan bir çalışma yapmışlardır. Tipik Portland Çimentosu ve silika kumu kullanılarak, 0.44 su-çimento oranıyla, 4x4x16 cm prizmatik polistiren kalıplarda hazırlanan çimento harcı üzerinde mikrodalga kür deneyleri yapılmıştır. Harç dökümünden hemen sonra iki adet harç numunesi mikrodalga fırın içerisine yerleştirilmiş, ısıtmadan sonra harç numuneleri buhar odasına bırakılmıştır. Kontrol numuneleri de dökümden hemen sonra buhar odasına bırakılmıştır. 24 saat sonunda bütün numuneler kalıptan çıkarılarak kalsiyum hidroksit çözeltisine yerleştirilmiştir. Deney zamanına kadar kalsiyuma doymun ortamda bekletilmişlerdir.

Hutchison, et al. (1991), yaptıkları çalışmanın deneysel aşamasında harç numunelerinin hidratasyon derecelerini, işlemiden sonraki ilk 24 saatteki iç sıcaklıklarını ve basınç dayanım değerlerini ölçmüşlerdir. Deney verilerine göre mikrodalga enerjisi çimento hidratasyonu için yalnız ilk 24 saat içerisinde hızlandırıcı bir etki oluşturuyor. Mikrodalga enerjisi uygulanmış harç numunelerinin sıcaklığı kısa zamanda artmış, indüksiyon süreci önemli ölçüde kısalmıştır. Sıcaklığın artmasının

yanında deney numunesinin aldığı enerji miktarını da arttırmıştır. Sonuçlara göre mikrodalga ile ısıtmanın 1, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Yapılan çalışmada hızlandırılmış mikrodalga kürünün uzun dönemde çimento harcının basınç dayanımını etkilemeden kür süresini kısalttığı sonucuna varılmıştır.

Lee, et al. (2007), çalışmalarında buhar ve mikrodalga kürünün betonun dayanım gelişimi ve geçirgenliği üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi farklı mineral katkıları kullanılarak oluşturulan numuneler ve kontrol numuneleri 2 farklı buhar kürü ve 4 farklı mikrodalga kürü işleminden sonra basınç dayanımı ve hızlı klor geçirgenliği deneyleri yapılmıştır. Hazırlanan harç deney numuneleriyle ilgili karışım ve kür uygulaması bilgileri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Harç numunelerinin deney kombinasyonları, (Lee, et al. 2007)

Çimento Kum Oranı	Bağlayıcı Su Oranı	Bağlayıcı İkamesi	Buhar Kürü Sıcaklığı	Buhar/Su Kürü Süresi	Mikrodalga Kürü Süresi
0.36	0.45	(1) Tip I Çimento	(1) 65 °C	7 saat buhar kürü + 17 saat su kürü	(1) 0 dk
		(2) % 10 Silis Dumanı			(2) 20 dk
		(3) % 20 Uçucu Kül	(2) 75 °C		(3) 40 dk
		(4) % 40 Yüksek Fırın Cürufu			(4) 60 dk

Lee, et al. (2007), çalışmalarını buhar kürü ve mikrodalga kürü ya da ikisi birden uygulanınca beton numunelerin basınç dayanımı kazanma hızını belirlemek, dayanım ve geçirgenlik değerlerini ölçmek için mineral katkılı ya da katkısız 50 mm’lik harç küp numuneler kullanılarak yürütmüşlerdir. Buhar kürü değişkenleri 65-75 °C sıcaklıklar olarak kullanılmıştır. Yüksek sıcaklıktaki 7 saatlik buhar küründen ve kalıp sökümünden sonra 17 saatlik su kürü uygulanmıştır. Son olarak da 0, 20, 40 ve 60 dakikalık 700 Watt güçte mikrodalga kür işleminden geçirilmiştir. Harç numuneleri içerisinde 1 litre su bulunan cam kaba yerleştirilip mikrodalga fırın içinde bekletilmiştir.

Belirlenen sürelerdeki mikrodalga kür işleminden sonra harç numuneleri ısıtılıp, cam kap 100 °C'ye getirilerek içindeki su buharlaştırılmıştır. Mikrodalga kürünün ardından harç numunelerinin sıcaklığı oda sıcaklığına düşürülüp, kalsiyum okside doymuş çözelti bir suya yerleştirilerek deneylere başlanmıştır. Uygulanan kür parametreleri ve harç numunelerinin basınç dayanımları Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Mineral katkılı harç numunelerinin basınç dayanımları, (Lee, et al. 2007)

Bağlayıcı İkamesi Kür Yöntemi	Basınç Dayanımı, MPa			
	Tip I Çimento	% 10 Silis Dumanı İkameli	% 20 Uçucu Kül İkameli	% 40 Y.Fırın Cürufu İkameli
BK65dk+MK0dk	26.61	32.96	19.83	19.71
BK65dk+MK20dk	35.71	48.25	27.14	28.13
BK65dk+MK40dk	43.16	57.18	32.90	31.69
BK65dk+MK60dk	45.89	57.11	33.77	31.89
BK75dk+MK0dk	30.79	37.12	24.12	21.15
BK75dk+MK20dk	37.79	48.56	32.14	29.44
BK75dk+MK40dk	49.26	62.98	37.27	33.88
BK75dk+MK60dk	50.43	63.40	38.33	35.07
7 gün su kürü	37.92	47.42	31.22	28.74
14 gün su kürü	45.25	59.89	41.91	39.24
28 gün su kürü	51.96	66.11	47.93	43.27

*BK: Buhar Kürü, MK: Mikrodalga Kür

Buhar ve mikrodalga kürü uygulanmış harç numuneleri üzerinde yapılan basınç dayanımı sonuçları, yüksek kür sıcaklığı ve uzun kür süresinin harç numunelerine daha yüksek erken dayanım sağladığını gösteriyor. Mikrodalga işlemi sonucunda harç numunelerinin basınç dayanımları artıyor. Buhar küründen sonra 20 dakikalık mikrodalga işlemi sonucunda kazanılan basınç dayanımı 10 MPa olarak belirtilmiş. Çimento yerine % 20 uçucu küllü ya da % 40 cürufu harç numuneleri kontrol

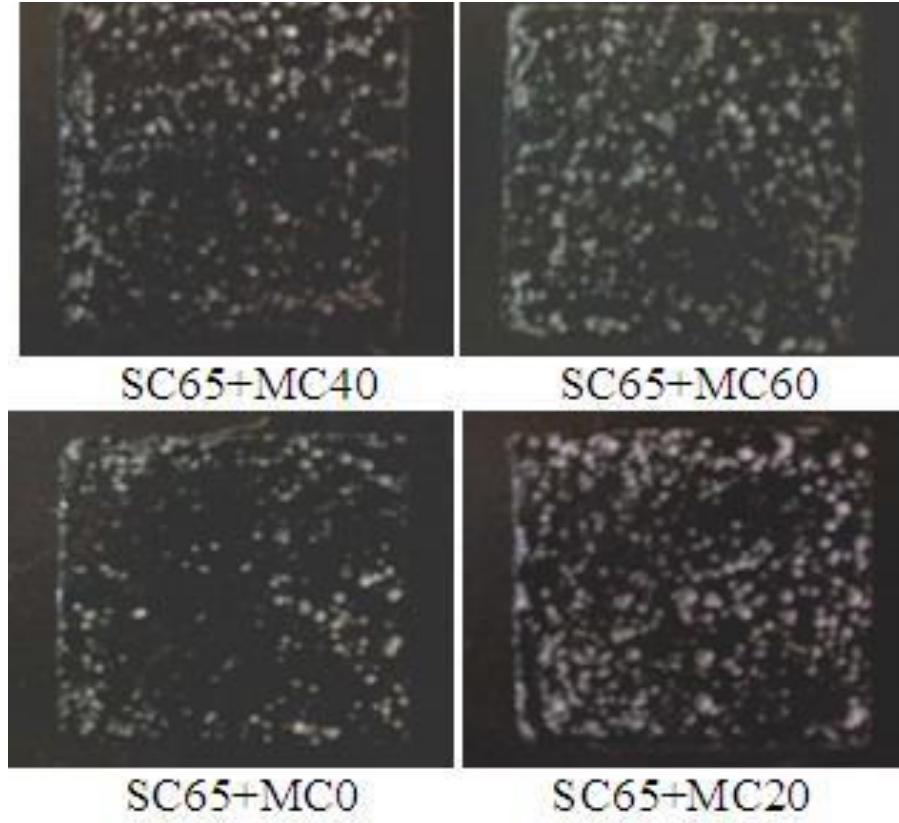
numunelerinden daha yavaş dayanım kazanmışlar. Çimento yerine % 10 silis dumanı kullanılan harç numuneleri ise mikrodalga kürüne iyi cevap vererek yüksek oranda dayanım kazanma hızına ulaştılar. İki günlük hızlı klor geçirgenliği deney sonuçları gösterildiği Çizelge 3.3'ten anlaşıldığı üzere 65 dk buhar kürlü ve 20 dk mikrodalga kürlü numune en yüksek değere sahip. Farklı mineral katkı kullanılan beton numunelerden en düşük geçirimlilik değerine sahip olan ise silis dumanı kullanılandır.

Çizelge 3.3. Beton numunelerinin klor geçirgenliği deney sonuçları, (Lee, et al. 2007)

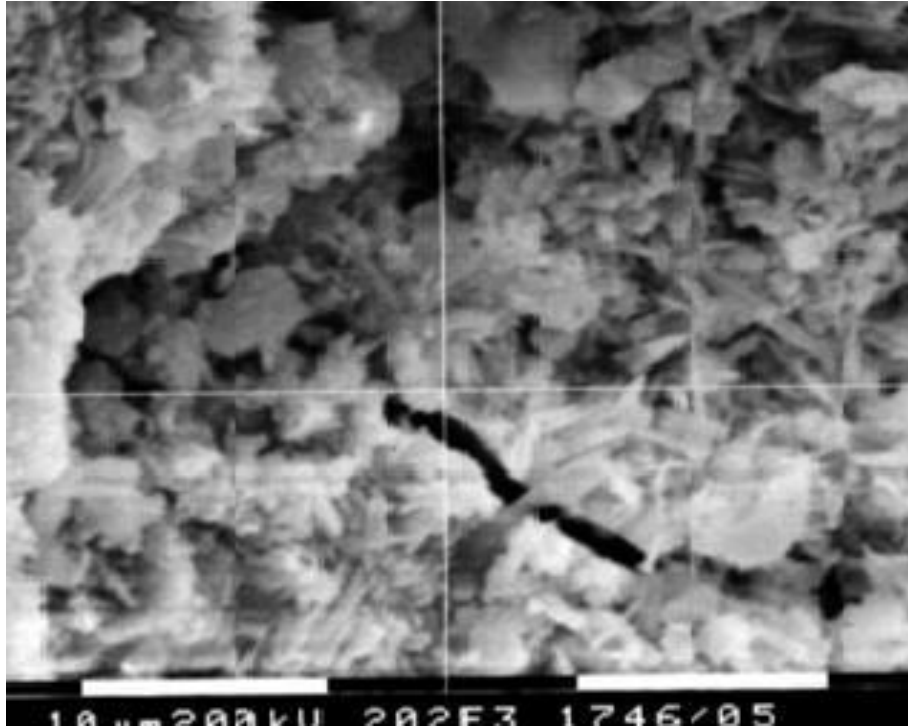
Bağlayıcı İkamesi Kür Yöntemi		Geçen Toplam Yük, Coulomb			
		Tip I Çimento	% 10 Silis Dumanı Değişimli	% 20 Uçucu Kül Değişimli	% 40 Y. Fırın Cürufu Değişimli
BK65dk+MK0dk	+ 1 gün su kürü	8984	4558	8992	5698
BK65dk+MK20dk		9203	5335	9613	6669
BK65dk+MK40dk		6839	3954	7160	4943
BK65dk+MK60dk		6986	4848	8825	6060

Buhar kürü ve mikrodalga kürünün çimento harcı üzerindeki etkilerini görebilmek için bazı deney numunelerinden kesitler alınmış ve bu kesitler siyaha boyanmıştır. Ardından boşluk ve mikro çatlakları açığa çıkarmak için çinko oksit tozu, boyanan kesitlerin üzerine serpilmiştir. Mikrodalga kür işlemi harç numunelerinin hidrasyon hızını arttırarak erken dayanım kazanmalarını sağlamaktadır. Fakat erken basınç dayanımı artan numunelerin mikrodalga kür sonucu oluşan mikro çatlaklı ve boşluklu yapı nedeniyle 28 günlük basınç dayanımlarında azalmalar gözlenebilmektedir.

Şekil 3.3'te de görüldüğü gibi mikrodalga kür işlemi, buhar kürü işlemine göre harç numunesi içinde daha fazla çatlak ve boşluk üretmektedir. Buhar kürünün 65 dk uygulanmasının ardından uygulanan 20, 40 ve 60 dakikalık mikrodalga kürlerinde kesitin daha pürüzlü olduğu görülmüştür. Sadece buhar kürü uygulanan numunenin kesiti düzgündür. Mikrodalga kür sonucu, betonun 28 günlük basınç dayanımlarında artan boşluklu ve mikro çatlaklı yapı nedeniyle belirli bir azalma oluşmaktadır.

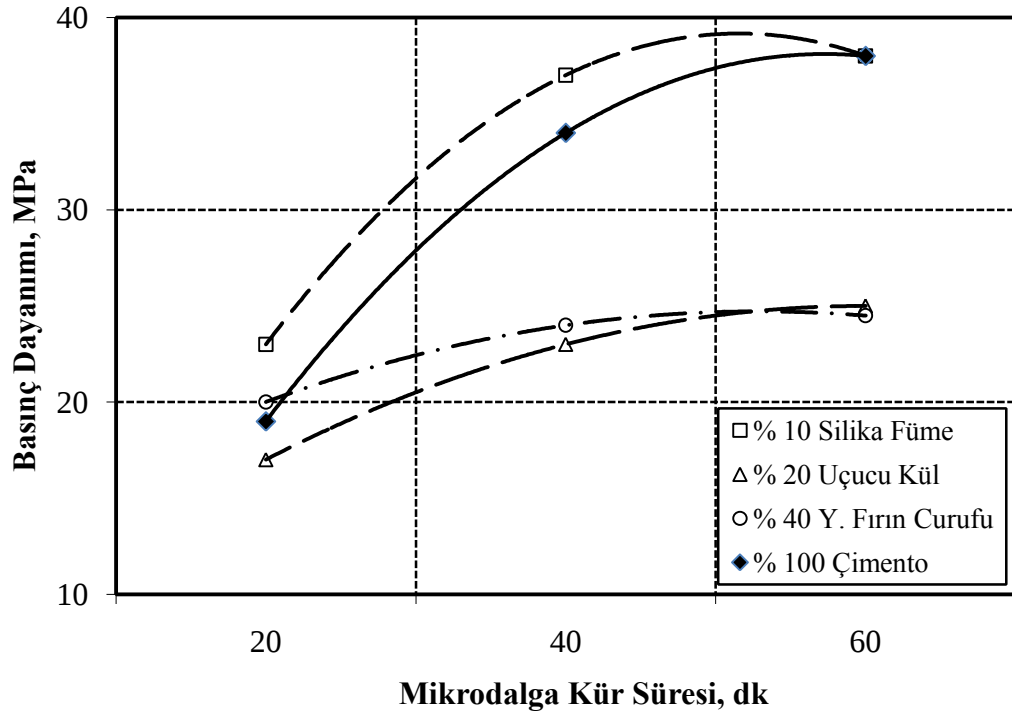


Şekil 3.3. Buhar ve MK uygulanmış beton numunesinin mikro yapısı, (Lee, et al. 2007)



Şekil 3.4. Buhar ve MK beton numunesindeki mikro çatlak, (Lee, et al. 2007)

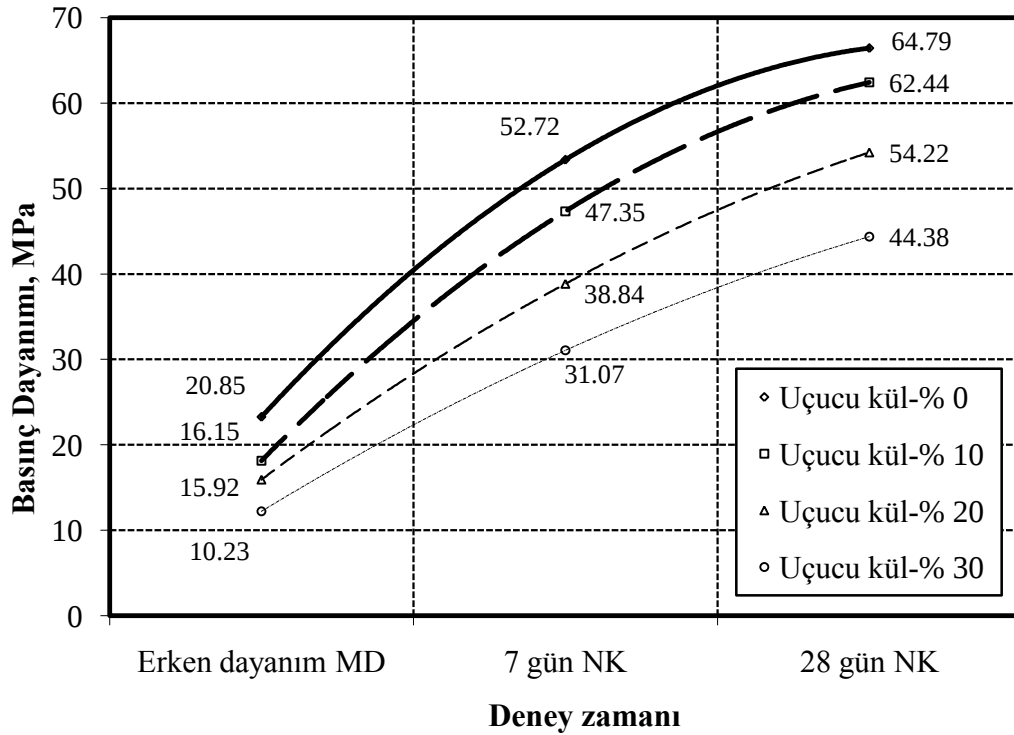
Şekilde 3.5'te görüldüğü gibi harç numunesinin dayanım kazanma gelişimi 40 dakikadan sonra durduğu için 40 dakikalık bir mikrodalga kürü işlemi enerji tasarrufu göz önüne alındığında en uygun süredir. Silis dumanı, uçucu kül ve cüruf gibi mineral katkıların kullanımı ise düşük geçirimli bir beton sağlamaktadır. Mikrodalga kürülü beton geçirimlilikte buhar kürülü betona göre üstünlük sağlamasa da basınç dayanımında daha yüksek değerler göstermektedir. Buna dayanarak mikrodalga kürünün çimentonun hidrasyonunu hızlandırıcı bir etki yarattığı söylenebilir.



Şekil 3.5. MK harçların dayanım kazanma yüzdeleri, (Lee, et al. 2007)

Akdağ (2007), 4x4x16 cm prizma harç numuneler üzerinde mikrodalga kür etkisini s-ç oranı, ç-k oranı, ön bekleme süresi, mikrodalga kür uygulama süresi, erken dayanım deney süresi ve mikrodalga güç kademesi olmak üzere altı adet deney parametresini kullanarak mikrodalga kür çevrimine etkileri araştırmıştır. Aynı işlem tüm parametreler için uygulanarak tüm parametrelerin en uygun değerleri bulunmuştur. Ardından ultrases geçiş süresi, eğilme ve basınç dayanımları deney sonuçlarıyla incelenmiştir.

Kontrol numunelerinde bulunan en uygun parametreler ağırlıkça % 0, % 10, % 20 ve % 30 çimento yerine uçucu kül kullanılan edilen harç numunelerinde kullanılarak yapılan mikrodalga kür çevrimlerinde Şekil 3.6’da göülen değerler elde edilmiştir.



Şekil 3.6. Uçucu kül kullanım oranları ve basınç dayanımı ilişkisi, (Akdağ 2007)

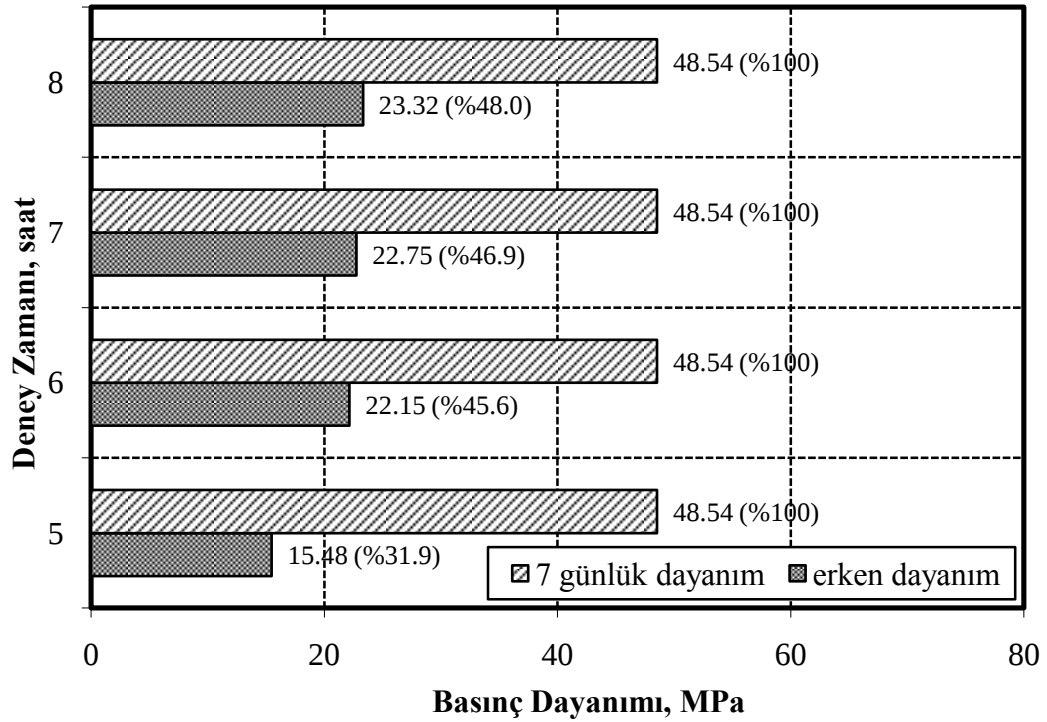
Çizelge 3.5’te farklı karışım oranlı harç numunelerinde mikrodalga kür sonrası erken basınç dayanım sonuçları ve bu numunelerin normal kür sonrası 7 ve 28 gün sonundaki basınç dayanımları sonuçları verilmiştir. Harç numunelerinde s-ç oranları 0.4, 0.5 ve 0.6 olmak üzere, ç/k da 1:2, 1:2.5 ve 1:3 olmak üzere üçer farklı karışım oranı kullanılmıştır. Bununla beraber s-ç oranı 0.4 ve ç-k oranı 1:2 sabit olmak üzere % 10, % 20 ve % 30 uçucu küllü katkı harç numuneler deneylerde kullanılmıştır.

Dayanım tahminlerindeki sapmalar ve olumsuzlukların nedeni olarak mikrodalga kür işlemi sonucunda oluşan yapının çok boşluklu olması gösterilmektedir. İleri yaş dayanımında oluşan dayanım azalmasını mikrodalga kür çevrimini etkileyen parametrelerin en uygun değerlerinin belirlenerek % 7-8’lere azaltılabildiği belirtilmiştir.

Çizelge 3.5. 7 ve 28 gün dayanım tahmininde kullanılan veriler, (Akdağ 2007)

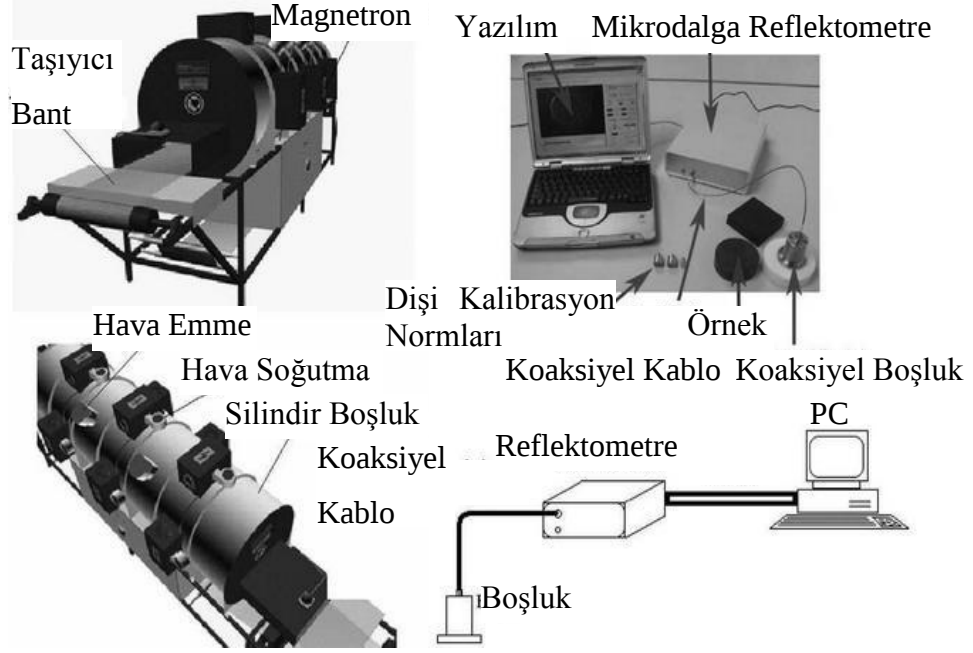
Karışım oranları			Erken dayanım MD, MPa	7 gün NK, MPa	28 gün NK, MPa
UK	S/Ç	Ç/K			
0	0.6	1:3	6.51	28.52	40.37
			6.75	29.30	41.52
			7.52	30.89	41.68
0	0.5	1:3	10.76	34.12	49.50
			11.53	37.05	51.35
			11.85	36.59	51.01
0	0.4	1:3	11.22	37.20	53.26
			14.00	39.14	55.02
			14.27	39.17	55.13
0	0.4	1:2.5	14.19	42.05	56.05
			15.62	44.01	58.32
			17.86	44.53	58.81
0	0.4	1:2	20.08	50.36	62.11
			23.07	54.41	65.82
			23.30	53.39	66.45
10	0.4	1:2	18.15	47.35	62.44
			17.56	47.52	61.05
			19.35	46.18	61.32
20	0.4	1:2	15.92	38.84	54.22
			17.11	37.65	53.94
			16.52	40.03	54.50
30	0.4	1:2	12.23	31.07	44.38
			11.35	29.58	43.71
			10.89	32.56	45.05

Uçucu kül katkısı kullanılmayan harç numunelerde belirlenen 6 saatlik en uygun erken dayanım deney zamanı 8 saate çıkmıştır. Bu artışın nedeni, uçucu kül katkısının betonun erken yaş dayanım kazanma hızını düşürmesi olarak gösterilebilir. Uçucu kül katkısı kullanılmadan yapılan deneylerde bulunan ön bekleme süresi 30 dk, uçucu küllü harçlarda 45 dk olarak belirlenmiştir. Bunun nedeninin de uçucu külün betonda priz alma süresini geciktiren bir puzolanik madde olarak bilinmesi öngörülmüştür.



Şekil 3.7. Erken dayanım deney zamanı ve basınç dayanımı ilişkisi, (Akdağ 2007)

Şekil 3.7’de en büyük dayanım artışının % 31.9’dan % 45.6’ya 5 ile 6 saat arasında olduğu görülebilmektedir. Altı saatten sonra dayanım artış hızı azaldığı için en uygun erken dayanım deney zamanı olarak 6 saat belirlenmiştir. Akdağ (2007), çalışmasının sonucunda mikrodalga kürün harç numunelerinin hidrasyon hızını artırarak erken dayanım kazanmalarını sağlamakta olduğunu; fakat erken dayanımı artan numunelerin mikrodalga kür sonucu oluşan mikro çatlaklı ve boşluklu yapı nedeniyle 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarında % 15’lere varan azalmalar olduğunu gözlemlemiştir. İleri yaş basınç dayanımında oluşan bu azalmayı mikrodalga kür çevrimini etkileyen parametrelerin en uygun değerlerini belirleyerek % 7-8’lere azaltabilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda uçucu kül katkısız harç numuneler için bulunan en uygun mikrodalga kür çevrimi parametreleri; ön bekleme süresi 30 dk, mikrodalga kür süresi 45 dk, mikrodalga güç kademesi 90 W ve erken dayanım deney zamanı ise 6 saattir. Uçucu kül katkılı harç numuneler için bulunan parametrelerde ise sadece ön bekleme süresi 45 dk’ya ve erken dayanım deney zamanı da 8 saate çıkmıştır.

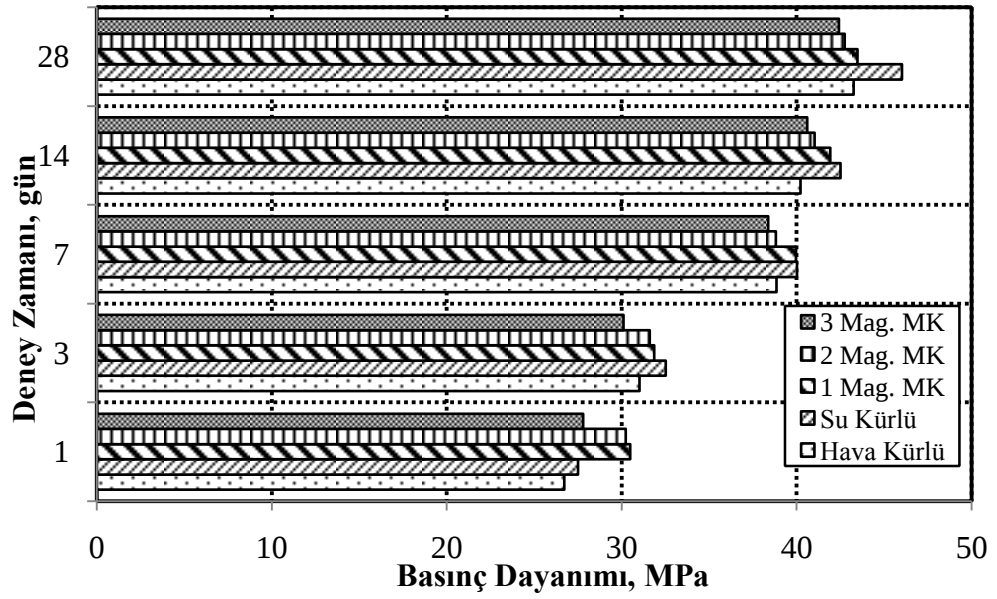


Şekil 3.8. MK işlemci ve dielektrik ölçüm cihazı, (Rattanadecho, et al. 2007)

Rattanadecho, et al. (2007), sürekli mikrodalga ısıtma işlemci kullanarak çimento harcının basınç dayanımının gelişimini incelemişlerdir. Bugüne kadar yapılan çalışmaların ev tipi mikrodalga fırınlarda yapıldığını, çimento hamuru üzerinde yapılan mikrodalga ısıtma işlemlerinin bu iş için üretilmiş özel endüstriyel tipli mikrodalga makinelerinde yapılması gerektiğini düşünmüşlerdir. Şekil 3.8’de kullanılan sürekli bant kurutuculu mikrodalga ısıtma işlemci makine ve çimento hamuru numunelerinin dielektrik ölçümlerinin yapıldığı portatif cihaz şematik çizimiyle birlikte verilmiştir.

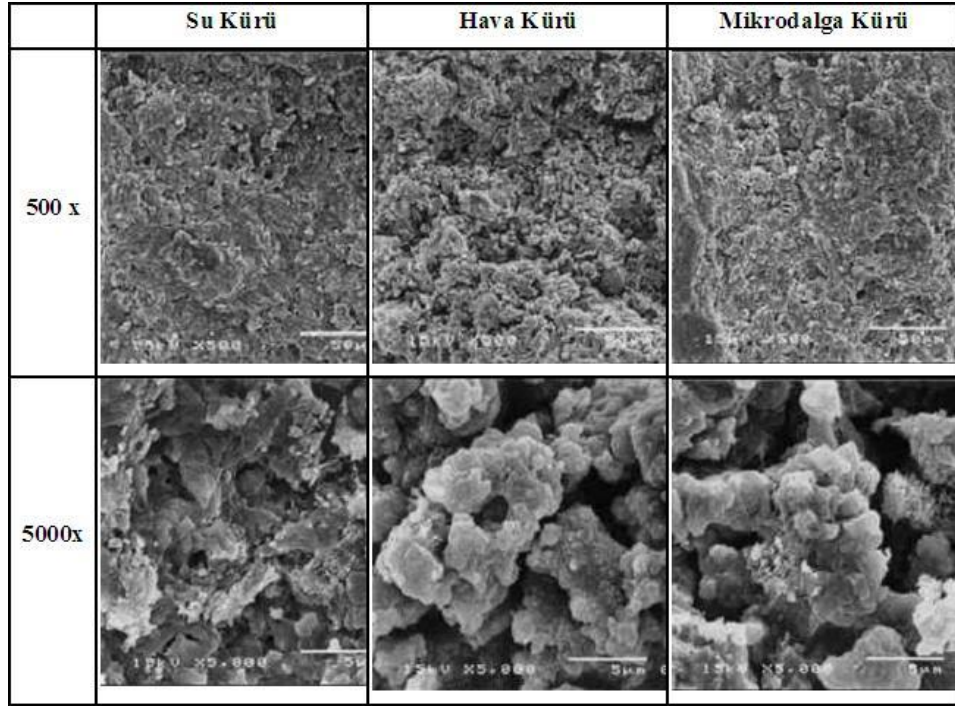
Sürekli bant sistemli kurutma makinesi kullanarak mikrodalga ısıtma yöntemi diğer basit mikrodalga sistemli küre ve buhar kürüne göre daha derin bir şekilde içeriye işleyip üniform ısıtılmış bir harç oluşturur. Mikrodalga kürünü daha derine işleyerek uygulamak aynı zamanda iletken ısıtma sistemli buhar kürünün tersine, kütle ısıtma oranı ikiye katlandığında basınç dayanımını ve yüzey kalitesini kötü etkilememektedir. Deney sonuçları mikrodalga kürünün çimento hamurunun basınç dayanımı gelişimini kötü etkilemediğini göstermektedir. Sonuçlar başlangıçta mikrodalga kürü yönteminin yüksek erken dayanımlı ve uzun dönem performansında küçük bozukluklar bulunan çimento hamuru üretimini sağlayabiliyor. Ayrıca mikrodalga sürekli bant sistemli

kurutucu diğer sistemlere göre daha hızlı, tekrarlanabilir, daha verimli, boşluğu çevreleyecek şekilde dizilmiş çoklu magnetronları sayesinde mikrodalgaların maddenin çoklu düzlemlerine daha derin işleyerek kalın katmanları daha hızlı ısıtabilir, mikrodalga enerjisi çimento hidrasyonunu hızlandırarak yüksek erken basınç dayanımı sağlamaktadır, ısı kaybı olmadığı için de düşük enerji tüketimi sağlanır.



Şekil 3.9. Basınç dayanım kazanımı karşılaştırması, (Rattanadecho, et al. 2007)

Şekil 3.9’da farklı kür yöntemlerinde basınç dayanım kazanımı karşılaştırması, magnetron değerleri değiştirilerek verilmiştir. Deney sonuçlarından mikrodalga enerjisi çimento hamuruna 28 günlük dayanımını önemli miktarda düşürmeden yüksek erken dayanımı sağladığı, aynı zamanda enerji tüketimini ve kür süresini düşürdüğü görülmektedir. Çimento hamurunun mekanik özelliklerini çözümlemek için çimento hamurunun iç yapısı araştırılmıştır. Tarayıcı Elektron Mikroskobu (SEM) tekniği ile elde edilen çeşitli yöntemlerle kürü yapılmış çimento hamuru numunelerinin genel dokuları Şekil 3.10’da görülmektedir. Su kürü, hava kürü ve hızlandırılmış mikrodalga kürü uygulanan çimento hamuru numunelerinin benzer birer mikro yapı düzenine sahip oldukları belirlenmiştir. Bununla beraber hızlandırılmış mikrodalga kürü yönteminin de çimento hamurunun mikro yapısını çok değiştirmede sonucuna varılmıştır.



Şekil 3.10. Çimento hamuru SEM görüntüleri, (Rattanadecho, et al. 2007)

Mikrodalga kür yöntemi ile yapılan deneysel çalışmaların genel sonuçları şunlardır;

- Mikrodalga kür, betonun ısisını içerisinde bulundurduğu su moleküllerinin mikrodalga enerjiyi emmesi yoluyla artırır. Bunun sonucu çimento hidratasyon hızı artar ve betonun erken dayanım kazanması sağlanmış olur,
- Mikrodalga kür çevrimi uygulanacak numunelerin kalıpları mikrodalgaları emmeyen ve içerisinde mikrodalgaları geçiren özellikte olmalıdır,
- Mikrodalga kür çevrimini etkileyen parametreler olarak; ön bekleme süresi, erken dayanım deney zamanı, güç kademesi ve kür süresi sayılabilir.
- Mikrodalga kür sonucu, betonun 28 günlük basınç dayanımlarında artan boşluklu ve mikro çatlaklı yapı nedeniyle belirli bir azalma oluşmaktadır,
- Mikrodalga kür teknolojisi sayesinde enerji tüketimi ve kür süresi düşürülebilmektedir.

4. AMAÇ VE KAPSAM

Bu çalışmada, mikrodalga ile uygulanan hızlandırılmış kürün hazırlanan uçucu küllü harç numuneleri üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi temel amaç kabul edilmiştir. Tez çalışmasında mikrodalga kür çevrimlerinin harç numunelerinin kürü üzerine etkisi mineral katkı olarak uçucu külün ve kalıp olarak 4 mm kalınlığında normal düz cam ve ekstrüde polistiren köpük (XPS) malzeme seçilmesiyle ultrases geçiş süresi, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deney sonuçlarıyla incelenmiştir.

Deneyler 4x4x16 cm boyutlarında harç numuneler üzerinde yapılmıştır. Uçucu kül katkısı kullanılmadan hazırlanan kontrol numuneler üzerinde yapılan deneyler daha sonra günümüzde beton üretimlerinin büyük çoğunluğunda mineral ve kimyasal katkıları kullanıldığı için, ağırlıkça çimento yerine kullanılan uçucu küllü ve süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkıları numuneler üzerinde denenmiştir. Deneylerde mineral katkı uçucu kül olarak deneylerde Çayırhan F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır.

Mikrodalga kür çevrimleri yapılırken s-ç, ç-k, kimyasal katkı oranı, ön bekleme süresi, erken dayanım deney zamanı, uygulanacak güç kademesi ve kür süresi olmak üzere altı ana parametre sabit tutulmuştur. Sabit tutulan bu parametreler harç numuneler üzerinde mikrodalga kür çevriminde kullanılarak bu harç numunelerinin standart kür sonucu oluşan 7 ve 28 günlük basınç dayanımları incelenmiştir.

Bu ilişki ile harç dökümünden kısa bir süre sonra hızlandırılmış mikrodalga kür sonucu elde edilen erken çekme ve basınç dayanımları, ultrases geçiş süreleri ile numunenin normal kür sonucu oluşan 7 ve 28 günlük standart çekme ve basınç dayanımları, ultrases geçiş süreleri deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Farklı cins kalıplar kullanılarak, hızlandırılmış mikrodalga kürün uçucu kül (UK) katkıları çimento harç numuneleri üzerindeki dayanım ve iç yapı etkileri araştırılmıştır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bir yapıda kullanılacak betonun hızlandırılmış mikrodalga kür yöntemiyle erken dayanımını ve betonun harç özelliklerine etkisini belirlemek için öncelikle o yapıda kullanılacak beton özelliklerini temsil edebilecek numunelerin hazırlanıp laboratuvar ortamında gerekli deneylerinin yapılması gerekmektedir. Bu amaçla kontrol ve uçucu kül, süperakışkanlaştırıcı katkılı 4x4x16 cm boyutlarında harç numuneler üretilip mikrodalga kür çevrimleri uygulanmış ve laboratuvar ortamında ultrases geçiş süresi, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri yapılarak sonuçları yorumlanmıştır.

5.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde kullanılan çimento, kum, su, uçucu kül, mikrodalga fırın ve harç kalıpları hakkında detaylı bilgiler alt başlıklarda verilmiştir.

5.1.1. Çimento

Bu çalışmada yapılan deneyler için hazırlanan numunelerde Eskişehir Çimento Fabrikası üretimi olan CEM I 42.5 Portland çimentosu kullanılmıştır. TS EN 197-1'e göre çimentonun kimyasal bileşenlerinin karşılaştırılması Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

5.1.2. Kum

Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde TS EN 196-1 Madde 5.1.2'de belirtilen özelliklerde, 1350±5 gram ağırlığında plastik paketlerde CEN standart kum kullanıldı. CEN standart kumunun tanecik büyüklüğü dağılımı Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

5.1.3. Su

Deneylerde karışım suyu olarak şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

Çizelge 5.1. CEM I 42.5 kimyasal bileşenleri

CEM I 42.5	Elde edilen değerler, %	TS EN 197-1 Standart Değerler	
		En az	En çok
SiO ₂	20.96	-	-
Al ₂ O ₃	5.58	-	-
Fe ₂ O ₃	3.69	-	-
Fe ₂ O ₅	-	-	-
CaO	63.97	-	-
MgO	1.69	-	5
TiO ₂	-	-	-
K ₂ O	-	-	-
Na ₂ O	-	-	-
SO ₃	2.84	-	3
Cl	0.008	-	-
Kızdırma Kaybı	1.15	-	4
Tayin Edilemeyen	0.05	-	-
Çözülmez Kalıntı	0.40	-	1

Çizelge 5.2. CEN standart kumunun tanecik büyüklüğü dağılımı

Kare göz açıklığı, mm	Kümülatif elekte kalan, %
2.00	0
1.60	7 ± 5
1.00	33 ± 5
0.50	67 ± 5
0.16	87 ± 5
0.08	99 ± 1

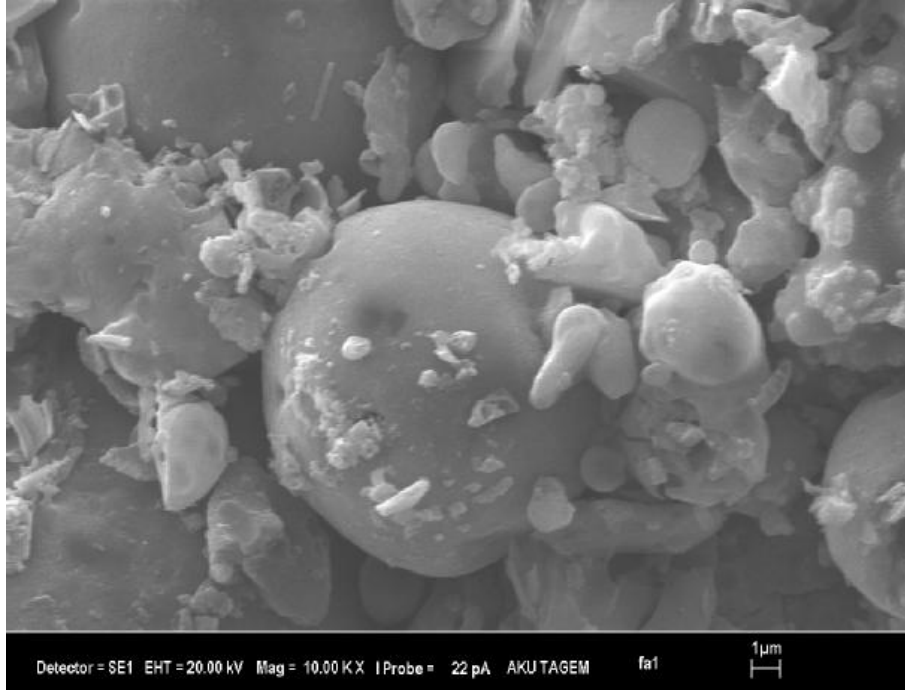


Şekil 5.1. CEN Standart kumu

5.1.4. Uçucu kül

Bu çalışmada yapılan deneylerde antrasit ve taş kömürünün yakılmasından elde edilen Çayırhan Termik Santrali atığı F sınıfı uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Kimyasal özellikleri TS 687'ye göre, fiziksel özellikleri ise TS 639'a göre bulunmuş ve kimyasal bileşimi Çizelge 5.3'te ASTM C 618 ve TS 639'daki sınırlamalarıyla verilmiştir. Yapılan analizlerden de görüldüğü üzere Çayırhan uçucu kulu reaktif kireç miktarının $< \% 10$ olmasından dolayı TS EN 197-1'e göre V (silissi uçucu kül) sınıfına dahil olmaktadır. Ancak analitik CaO miktarının $> \% 10$ olmasından dolayı ve $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \% 70$ koşulunu sağladığından dolayı ASTM C 618'de belirtilen F sınıfı (düşük kireçli) uçucu kül sınıfına da girmektedir. Bütün bu değerlerden yola çıkarak Çayırhan uçucu külünün standartlardaki değerleri karşıladığı sağlamaktadır. TS EN 450 Standardına göre SO_3 için getirilen $\% 3$ 'lük sınırın altında SO_3 içermesi ($\% 2.64$) serbest kireç miktarının $\% 1$ 'in altında olması nedeniyle bu standarda da uymaktadır. Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları santralde kullanılan kömürün içerdiği mineral

safsızlıklarının tipi ve miktarına bağlıdır. Genellikle uçucu küllerin % 85'ini SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO ve MgO oluşturur. Çayırhan Termik Santrali atığı F sınıfı uçucu külüne ait elek analiz değerleri Çizelge 5.4'te görülmektedir. Uçucu külün elek analizinde 45 μm elek altı malzemenin % 57.96 gibi iyi bir değerde olduğu düşünülmektedir. İnce boyutlu malzemelerin iri taneler arasında kalan boşlukları doldurmak sureti ile düşük çimento içeriklerinde yüksek dayanım verdiği bilinmektedir. Sonuç olarak, Çayırhan Termik Santrali atığı F sınıfı uçucu külünün kimyasal bileşim açısından standartlarda istenilen koşullara tamamıyla uygun bir kül olduğu anlaşılmaktadır. Uçucu külün, % 57.96'sı 45 μm daha küçük tane boyutuna sahiptir. 500 μm elekten % 99.37'si geçmiştir. Uçucu kül 1-1000 μm arasında farklılık gösteren ve çoğunluğu küresel boyutlarda, bazıları düzensiz şekilli taneciklerdir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Tipik bir F sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü, (Demir, 2005)

5.1.5. Süperakışkanlaştırıcı katkı

Bütün harç karışımlarında Şekil 5.3'te görülen Epocon SP 517 adlı süperakışkanlaştırıcı kimyasal beton katkısı çimentonun ağırlıkça % 1'i oranında

kullanılmıştır. Çok yüksek dağılma yapısına sahip olan modifiye polimer esaslı bir katkıdır. Klorür içermeyip, koyu kahve renkte, sıvı fazda, su içerisinde çözülen, yoğunluğu 1.15 g/cm^3 olan bu katkının kullanım dozajı çimento ağırlığının % 1.0-1.5 aralığındadır. Dispersiyon etkisi ile beton karışımı içerisindeki ince çimento ve katkı parçacıklarının yapışmasını önler ve su gereksinimini azaltır. Deneylerde kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkı ASTM C494'e göre Tip A-F olup, TS 934-2'ye uygundur.

Çizelge 5.3. Çayırhan uçucu külü kimyasal bileşimi

Oksitler	UK, %	ASTM C 618 Limitleri		TS 639 Limitleri
		F sınıfı	C sınıfı	
SiO ₂	48.44	-	-	-
Al ₂ O ₃	22.16	-	-	-
Fe ₂ O ₃	9.32	-	-	-
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	79.92	en az 70.0	en az 50.0	en az 70.0
CaO	9.18	-	-	-
MgO	0.71	en çok 5.0	en çok 5.0	en çok 5.0
TiO ₂	1.01	-	-	-
K ₂ O	1.87	en çok 5.0	en çok 5.0	-
Na ₂ O	2.00	en çok 5.0	en çok 5.0	-
SO ₃	2.64	en çok 5.0	en çok 5.0	en çok 5.0
Kızdırma Kaybı	2.43	en çok 12.0	en çok 6.0	en çok 10.0
Cl ⁻	0.17			
Serb. CaO	0.91			
Reak. SiO ₂	40.89			
Reak. CaO	8.78			

Çizelge 5.4. Çayırhan uçucu külü elek analizi

Elek boyutu (µm)	% Geçen
1000	100.00
500	99.37
250	95.64
200	88.73
106	76.20
90	71.68
45	57.96



Şekil 5.3. Harç karışımlarında kullanılan süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı

5.1.6. Mikrodalga fırın

Mikrodalga fırın (Şekil 5.2), bu özel fırınların içindeki magnetron adı verilen vakum tüpünden üretilir. Magnetron, 60 Hz'lik elektrik enerjisini mikrodalgalara dönüştürür, mikrodalga fırın bu şekilde çalışmaya başlar. Bu frekanstaki dalgalar, başlıca su olmak üzere bazı maddeler tarafından emilirler, dalgalar, bu maddelerin moleküllerini atomik devinime uğratarak mikrodalga enerjiyi ısıya dönüştürürler. Mikrodalga fırınlarda genellikle 2.5-3 GHz'lık frekanslar kullanılır. Bu frekansta çalışan bir fırının içerisine konan maddenin molekülleri saniyede 2.5-3 milyar kez titreşir. Bu titreşim sayesinde de maddenin molekülleri, dolayısıyla kendisi ısınır.

Suyun, mikrodalga enerjisini emme oranı kuru malzemelerin emme oranlarından 100 kat daha büyüktür. Emilen enerjinin miktarı, malzemenin içerdiği nem miktarı ile

doğru orantılıdır. Mikrodalgaların enerjileri, ısıtılan cisim içinde ısıya dönüştüğü için, cisim içinde bir radyasyon oluşması gibi bir durum genellikle söz konusu değildir. Çalışma sürecinde yalnızca cisim ısınır, mikrodalga fırın ve ortam ısınmaz. Diğer ısıtma yöntemlerinde ısı dıştan içe doğru yayılır; ancak mikrodalga fırınlarda ısıtma her bölgeye eşit şekilde ve tüm atomları hareketlendirerek olmaktadır, mikrodalga diğer ısıtıcılar gibi iletim yoluyla ısıtma yapmamaktadır. Mikrodalgaların çoğu plastik, cam ve porselen tarafından emilmeden geçerken, metaller tarafından da yansıtılırlar.

Yayılan mikrodalga fırın içinde düzgün dağılımını sağlamak için mikrodalga fırın içerisinde döner bir tabla veya dalga yayıcıdan hemen sonra yerleştirilen bir pervane kullanılır. Bu çalışmada kullanılan mikrodalga fırında, Şekil 5.5'ten de görüldüğü gibi, mikrodalga fırın içinde düzgün dağılımını sağlamak için plastik döner tabla ve onun üzerinde cam tabak kullanılmıştır. Kullanılan mikrodalga fırının, sıfırdan 60 dk'ya kadar zaman ayarı ve 90 W'dan 720 W'a kadar da güç ayarı vardır.



Şekil 5.4. Deneylerde kullanılan mikrodalga fırın

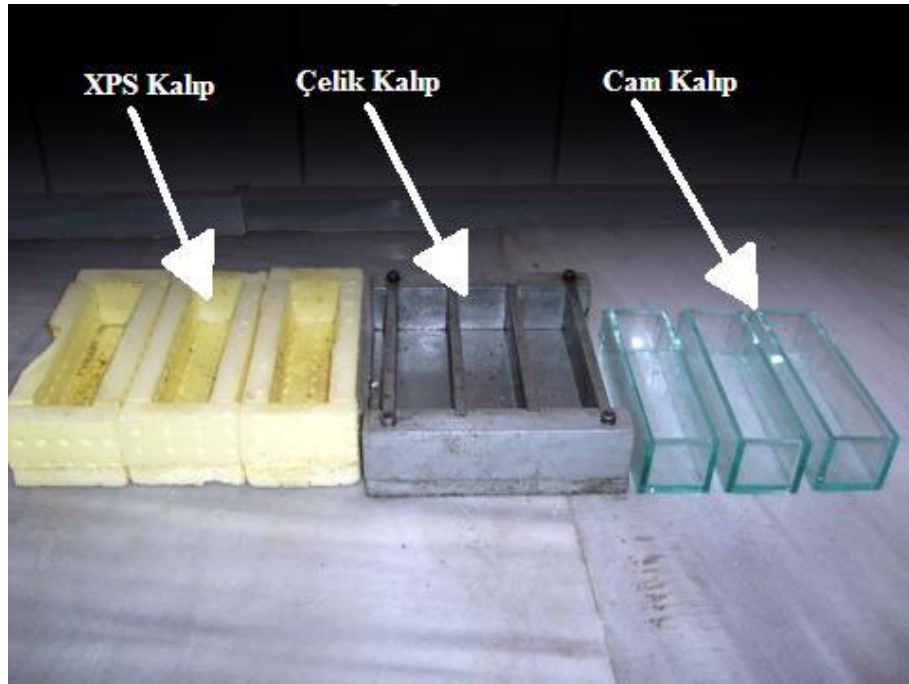


Şekil 5.5. Mikrodalga fırın ve kalıplar

5.1.7. Harç kalıpları

Deneylerde üç tip kalıp kullanılmıştır. Birincisi normal koşullarda kür uygulanacak harç numunelerinin kalıpları olan, çelik levhadan yapılmış üç yatay bölmesi olan standart 4x4x16 cm boyutlarında Şekil 5.6’da gösterilen kalıplardır. Diğer kalıp türleri ise mikrodalga fırın içersinde kür uygulanacak harç numuneler için üretilen özel kalıplardır. Bu özel harç kalıplarından birisi extrude polistiren (XPS) köpük malzemeden, diğeri ise 4 mm kalınlıkta normal düz camdan üretilmiştir ve yapıştırıcı olarak da 300 °C’ye dayanıklı UV direnci yüksek silikon malzeme kullanılmıştır.

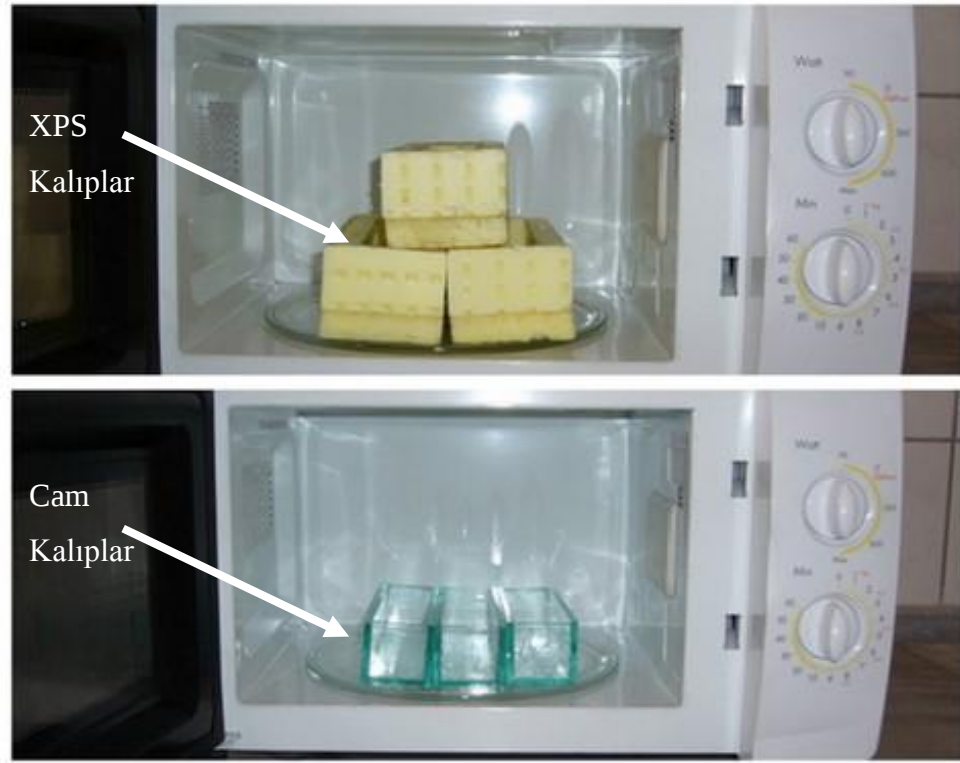
Bu çalışmada harç numuneleri döküldükten yaklaşık 30 dk sonra mikrodalga fırında kür çevrimine koyulacağı için ve mikrodalga fırında metal kalıp kullanımı uygun olmadığı için özel kalıplar üretilmiştir. Mikrodalga fırında metaller önceden belirtmiş olduğumuz gibi mikrodalgaları emmezler, yansıtırlar ve bunun sonucunda numunelere mikrodalgalar sadece kalıbın üstünden ulaşabileceği için homojen bir ısıtma olamaz.



Şekil 5.6. Deneylerde kullanılan XPS, çelik ve cam kalıplar

Hızlandırılmış mikrodalga kür deneylerinde harç kalıbı olarak kullanılacak malzemenin mikrodalgayı emmemesi ve mikrodalgaların içerisinden geçmesine izin vermesi gerekmektedir. Tüm bu özellikler göz önüne alınarak, harç kalıbı üretiminde farklı cins malzemeler kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan XPS köpük ve cam malzemeleri Şekil 5.7’de gösterilmiştir. Dielektrik özellikleri nedeniyle XPS ve cam malzemeler mikrodalgayı emmez, yani ısınmaz ve mikrodalgalar içersinden kolaylıkla geçerek harç numunelerinin homojen bir şekilde ısınmasını sağlarlar.

Ayrıca XPS köpük malzeme, iyi bir ısı yalıtım malzemesi olduğu için kalıp içinde oluşan ısı dışarıya çıkmaz ve böylece fazladan enerji kaybı XPS köpük kalıp ile önlenmiş olur. Normal düz cam ise mikrodalga enerjisinin tamamen geçişini sağlayan, mikrodalga fırınlarda en çok kullanılan malzeme olduğu için karşılaştırma ve harç numunesinin özelliklerinde değişim gözlemlemek amacıyla seçilmiştir.



Şekil 5.7. Deneylerde kullanılan XPS ve cam kalıplar

5.2. Numunelerin Üretimi

Deney numunelerinin üretiminde kullanılacak karışım malzemeleri ± 1 gr hassasiyetli elektronik terazide tartılıp hazırlandıktan sonra, mekanik harç karışımı standart mikserde Çizelge 5.5'te gösterilen hızlarda karıştırılarak kalıplara döküm işlemi yapılır. Harç karışımı karıştırıcı makinesi Şekil 5.8'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.5. Karıştırıcı kanadının hızları (TS EN 196-1)

Hızlar	Kendi Eksenine Etrafında (devir / dakika)	Kabın Eksenine Etrafında (devir / dakika)
Düşük Hız	140 ± 5	62 ± 5
Yüksek Hız	285 ± 10	125 ± 10



Şekil 5.8. Harç karışımı için standart mikserde

TS EN 196-1'e göre mekanik karıştırıcıda harç karışımı yapılırken izlenilen yol;

- Mekanik karıştırıcı düşük devirde çalışırken karıştırma kabına su konulur ve üzerine çimento eklenir,
- 30 sn boyunca su ve çimento karışır, daha sonra karıştırma işlemi devam ederken 30 sn boyunca sürekli kum ilave edilir,
- Kum ilavesi de tamamlandıktan sonra mekanik karıştırıcı yüksek devire ayarlanıp 30 saniye daha karıştırmaya devam edilir, bu karıştırma sonunda

mekanik karıştırıcı durdurulur ve 1 dk 30 sn bekletilir. Bekleme süresinin ilk 15 saniyesinde lastik sıyrıcı ile kabın çeperlerine ve tabanına yapışan harç sıyrılır ve kabın ortasına toplanır.

- Mekanik karıştırıcı son olarak yüksek devirde 60 sn daha çalıştıktan sonra harç karışımı önceden temizlenip, yağlama işlemi yapılmış 4×4×16 cm kalıplara yerleştirilir.

Kalıplara harç yerleştirmesi iki tabaka halinde sarsma tablası üzerinde yapılmalıdır. İlk tabaka yarıya kadar doldurulduktan sonra sarsma tablası çalıştırılıp vibrasyon ile yerleşim sağlanır. İkinci tabakada aynı şekilde doldurulup yerleştirme işlemi yapılır ve harcın fazlası metal bir masterla sıyrılır ve her yöne doğru bir kere enine testere hareketi ile çekmek suretiyle yavaş yavaş hareket ettirilir. Prizmaların yüzeyi, master hemen hemen düz tutularak düzleştirilir. Numuneleri tanımlamak amacıyla kalıplar etiketlenir.

5.3. Deney Numunelerinin Saklanması

TS EN 196-1’de belirtilen kurallara göre üretilen numunelere standart su kürü ve hızlandırılmış mikrodalga kür olmak üzere iki tür kür uygulaması yapılır. Standart kür işleminde üretilen çimento harç numuneleri ıslak çuvallarla sarılarak 24 saat laboratuvarında nemli ortamda bekledikten sonra 20 ± 2 °C sıcaklıkta beton kür havuzunda deney zamanını beklemeye bırakılır. Hızlandırılmış mikrodalga kür çevrimi uygulanan çimento harç numuneleri ise mikrodalga fırındaki kür sonrasında ıslak çuvallarla sarılarak erken dayanım deney saatine kadar veya ileri yaş dayanımları belirlenmek üzere 24 saat süreyle laboratuvarında nemli ortamda beklemeye bırakılırlar.

Dökümden sonra 24 saat ıslak çuvallarla sarılı olarak bekletilen numuneler 7 ve 28 günlük ileri yaş dayanım deneyleri için deney günlerine kadar Şekil 5.9’da gösterilen (20 ± 2) °C sıcaklıktaki su ile dolu beton kür havuzunda saklanırlar. Deney günlerinde havuzdan çıkarılıp, kalıpları sökülerek dayanım deneyleri yapılır.



Şekil 5.9. Beton kür havuzu

5.4. Yapılan Deneyler

Laboratuvar koşullarında üretilen harç numuneler mikrodalga kür ve normal kür sonucunda deney zamanına kadar kirece doygun su ile dolu kür havuzunda saklanmışlardır. Mikrodalga kür uygulanan numunelerin bir kısmı üzerinde kür sonrası erken dayanım deneyleri uygulanırken bir kısmı üzerinde de 7 ve 28. gün sonunda bu deneyler uygulanmıştır. Erken ve ileri yaş deneyleri olmak üzere, tüm numuneler üzerinde ultrases geçiş süresi, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır.

5.4.1. Ultrases geçiş süresi deneyi

Bu deneyin temeli ultrases dalgalarının katı bir madde içinde yayılmasına dayanır. Sesin duyulabilen titreşimi 16-16000 Hz arasındadır. Frekansın 16000 Hz'nin üzerine çıkması durumunda kulakla duyulamayan ve ultrases denilen ses dalgaları ortaya çıkmış olur. Ultrases geçiş hızı malzemenin denetiminde kullanılmaktadır. Ultrases geçiş hızı

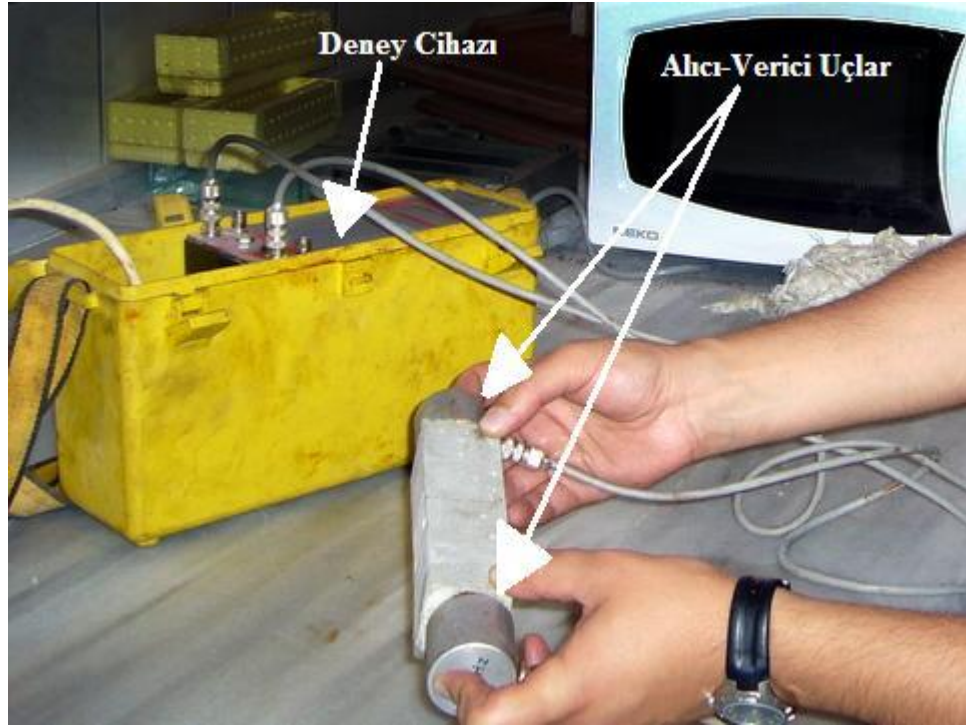
değeri ultrases dalgasının beton numunenin bir yüzünden diğerine geçiş süresi (t) ve iki yüz arasındaki uzaklığın (l) hassas bir şekilde ölçülmesi ve aşağıdaki eşitlik yardımıyla ultrases geçiş hızın (v) hesaplanması ile bulunur (Demir, 2000).

$$V = l / t \text{ (km/sn)} \quad (2)$$

Ultrasesin beton içerisinde ilerleme hızı, betonun iç yapısı hakkında bilgi verir. Betonun bir yüzünden gönderilen ses dalgaları ilerlerken boşluklarla karşılaşır. Ses dalgaları boşluklar içinde yol alamadıklarından, etrafından dolaşır ve ultrases dalgasının iki nokta arasındaki geçiş süresi artar; dolayısıyla ultrases geçiş hızı azalır. Ultrases geçiş hızı düşükse betonun mikro çatlaklı bir iç yapıya sahip olduğu düşünülebilir.

Ultrases geçiş hızının düşük olması betonun boşluklu bir yapıya sahip olduğunu ve beton kalitesinin düşük olduğunu gösterir. Ultrases dalgalarının su içinde % 93'ü, havada ise tamamı yansır. Bu nedenle alıcı ve verici ile numune arasında bir boşluk bulunması durumunda ultrases dalgalarını numune içine sokmak imkansızdır. Bu durumun meydana gelmemesi için alıcı, verici ve malzeme arasında ince bir yağ tabakası oluşturularak herhangi bir boşluğun oluşması engellenir. Prizmatik çimento harç numunesinin boyuna tutulduğunda karşılıklı iki kenarı gres yağı ile yağlanarak alıcı ve verici uçlar yerleştirilip ultrases deney cihazında okuma yapılır (Karakurt, 2002).

Ultrases geçiş süresi deneyi yapılmadan önce ultrases deney cihazının kalibrasyonu yapılmalıdır. Bunun için cihazın alıcı ve verici uçları gres yağı ile yağlanarak ultrasonik deney cihazının göstergesinden plastik silindir deney numunesi için 51 µsn değeri okuyuncaya kadar ince ayar yapılarak cihazın kalibrasyonu sağlanmış olur. Bu işlemden sonra sırasıyla tüm numuneler için ultrases dalgası geçiş süreleri Şekil 5.10'daki gibi belirlenir ve numune uzunluğu (mm) bu geçiş sürelerine (µsn) bölünerek prizmatik numuneler için ultrases geçiş hızları (km/sn) cinsinden bulunmuş olur. Ultrases geçiş hızı ile beton kalitesi arasındaki ilişki Çizelge 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.10. Ultrases geçiş süresi deneyi

Çizelge 5.6. Ultrases geçiş hızı ile beton kalitesi arasındaki ilişkisi

Ultrases Geçiş Hızı (km/sn)	Beton Kalitesi
4.5	Çok İyi
3.5-4.5	İyi
3.0-3.5	Şüpheli
2.0-3.0	Zayıf
2.0	Çok Zayıf

5.4.2. Eğilme dayanımı deneyi

Deneylerde Şekil 5.11’de görülen çimento harcı eğilme cihazı kullanılmıştır. Mekanik olarak kaldıraç esasına göre tasarlanmış ve 1/50 üst kaldıraç kolundan oluşturulmuş olup, kollar hassas bıçakların üzerine oturtulmuştur. Çekme ve eğilme dayanımı deneyleri için değiştirilebilen alt çene ayarlı olarak yapılmıştır.



Şekil 5.11. Harç eğilme cihazı

Yüklemeler, çapı 2 mm olan saçmaların bir kabın içine akışı ile sağlanmaktadır. Numune kırıldığında kesici saçma akışını durdurmaktadır. Eğilme aletinin duyarlılığı 1000 N'dan daha az yüklerde % 1, daha büyük yüklerde % 0.8 olmaktadır.

Eğilme dayanımı deney aletinin yükleme düzeni birbirinden 100 mm uzaklıkta olan 10 mm çaplı iki destek silindirden oluşmaktadır. Bu iki silindirin tam ortasında aynı çapta üçüncü bir yükleme silindiri vardır. Çimento harç prizmaları, kalıptan çıkmış yan yüzlerinden biri üzerine ve uzunluğuna eksenine destek silindirler eksenine dik gelecek şekilde silindirler üzerine oturtulur. Numune alttaki halka yardımı ile sıkıştırılarak deney cihazına sabitlenir. Bu arada haznedeki saçmaların akışını engelleyen sürgü açılarak kovaya akışı sağlanır. Kovadaki demirlerin terazide kova ağırlığı ile beraber tartılmasıyla numunenin kopmasını sağlayacak kuvvet bulunup (3) numaralı formülden en büyük moment mukavemet momentine bölünerek eğilme dayanımı bulunur.

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{\frac{P \times L}{4}}{\frac{b \times h^2}{6}} \quad (3)$$

σ : Eğilme dayanımı (kgf/cm²)

M: En büyük moment

W: Mukavemet momenti

P : Kırılma yükü (kgf)

b : Kesit genişliği

h : Kesit yüksekliği

5.4.3. Basınç dayanımı deneyi

Mekanik dayanımları arasında basınç dayanımının en yüksek olması dolayısıyla beton, yapılarda basınca maruz kalacak şekilde kullanılmaktadır. Yapılan birçok çalışmada betonun basınç dayanımı ile diğer özellikleri arasında bir bağ aranmıştır. Yapılan bu çalışmalar sonucunda betonun çekme, eğilme, aşınma, geçirimsizlik gibi özelliklerinin basınç dayanımı ile aynı yönde değiştiği gözlemlenmiştir.

İlk olarak eğilme dayanımı deneyi yapılan numuneler iki ayrı parçaya ayrılmış durumdadır. TS 03287 betonun eğilmede çekme deneyinden çıkan deney numunesi parçaları üzerinde basınç dayanımı deneyi yapılması metodu uygulanarak basınç dayanımı deneyi uygulanır. Her bir harç karışımının deney sonucu 3 adet numunenin ortalaması alındığı için basınç dayanımı için 3 adet prizma numuneden 6 adet basınç dayanımı numunesi elde edilmiş olur. Her yarım numunenin alt ve üst yüzeylerine Şekil 5.12’de görüldüğü gibi 4×4 cm boyutlarında metal kırma başlığı yerleştirilerek Şekil 5.13’te görülen elektronik deney presinde basınç deneyine tutulur. Kırma başlıkları arasındaki yarım prizma 4×4×4 cm boyutlarında bir küp numune gibi davranış göstermektedir. Kesit alanı P kırılma kuvvetine bölünerek basınç dayanımı elde edilmiş olur. 6 numunenin tümünde bu deney yapıldıktan sonra sonuçların aritmetik ortalaması alınarak harcın istenen yaş için basınç dayanımı elde edilmiş olur (Topçu, 2006 a).



Şekil 5.12. Basınç deneyi



Şekil 5.13. Elektronik deney presi

6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Yapılan deneysel çalışmaların sonuçları, mikrodalga kürü ile normal kürlü harç numunelerinin ultrases geçiş süresi, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deney sonuçlarının karşılaştırılması, uçucu külün ve süperakışkanlaştırıcının sonuçlara etkileri ve farklı cins kalıp seçmenin deney sonuçlarına etkileri olarak üç aşamada açıklanmıştır.

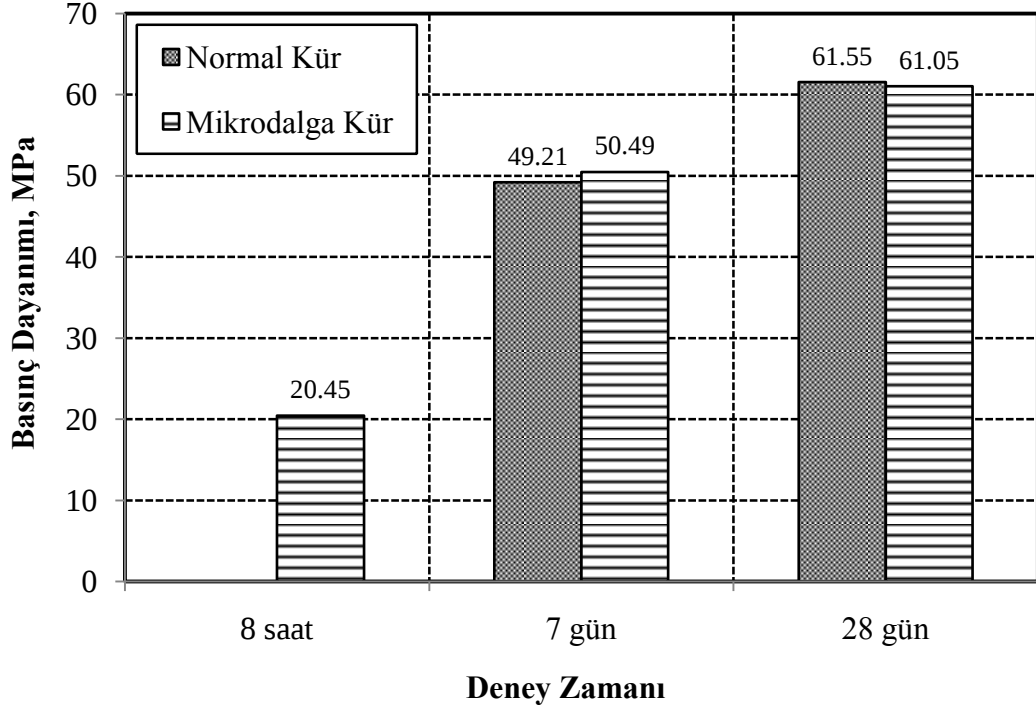
6.1. Mikrodalga Kürün Harç Numuneleri Üzerindeki Etkilerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada, mikrodalga kürünün harç numuneleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Mikrodalga kürü yapılırken kür çevrim parametreleri sabit tutulmuş, bu parametreler için Akdağ (2007)'in çalışmasında uçucu kül katkılı harç numunelerinin mikrodalga kürü için uygun bulunduğu değerler kullanılmıştır.

Mikrodalga kürü uygulanırken aşağıdaki parametreler sabit alınmıştır;

- $s/\phi = 0.40$
- $\phi/k = 1:2$
- güç kademesi : 90 W
- ön bekleme süresi : 45 dk
- mikrodalga kür süresi : 45 dk
- erken yaş deney süresi : 8 saat

Harç numunelerinde aşırı ısınma sonucu yüzeyde derin çatlaklar ve çok boşluklu bir iç yapı oluşmaması için 45 dk'lık kür süresi, aralarda 10'ar dk mikrodalga güç kapalı iken fırın içinde dinlendirmeli 20 dk + 15 dk + 10 dk olmak üzere kesikli güç uygulamalarıyla toplamda kür süresi 45 dk olacak şekilde deneyler yapılmıştır. Ara verilmeden, 10'ar dakikalık dinlendirmeler yapılmadan sürekli mikrodalga güç uygulandığında ise yüzeyde pullanmalar, bozukluklar meydana gelmektedir.

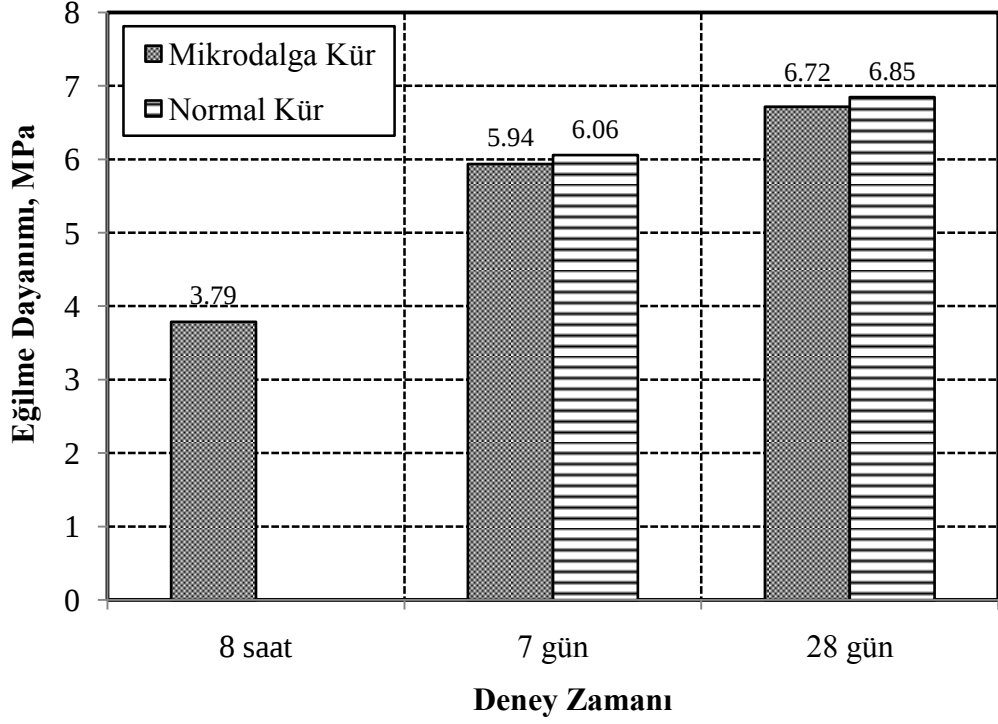


Şekil 6.1. Kür yöntemi ve basınç dayanımı ilişkisi

Şekil 6.1’de XPS kalıp kullanılarak mikrodalga kür uygulanmış ve çelik kalıp ile normal kür uygulanmış mineral ve kimyasal katkı bulunmayan çimento harç numunelerinin basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. Mikrodalga kürü numunelerin basınç dayanımları 8 saatten 7 güne % 146.90, 7 günden 28 güne % 20.92, toplamda 8 saatten 28 güne % 198.53 artış göstermiştir. Normal kürü harç numunelerinin basınç dayanımları ise 7 günden 28 güne % 25.08 artış göstererek, mikrodalga kürü numunelere göre % 119.89 daha fazla artmıştır. XPS kalıplı mikrodalga kürü numunelerin basınç dayanımları normal su kürü uygulanmış numunelere göre 7 günde % 2.60 daha yüksek, 28 günlük basınç dayanımları ise % 0.81 daha düşüktür.

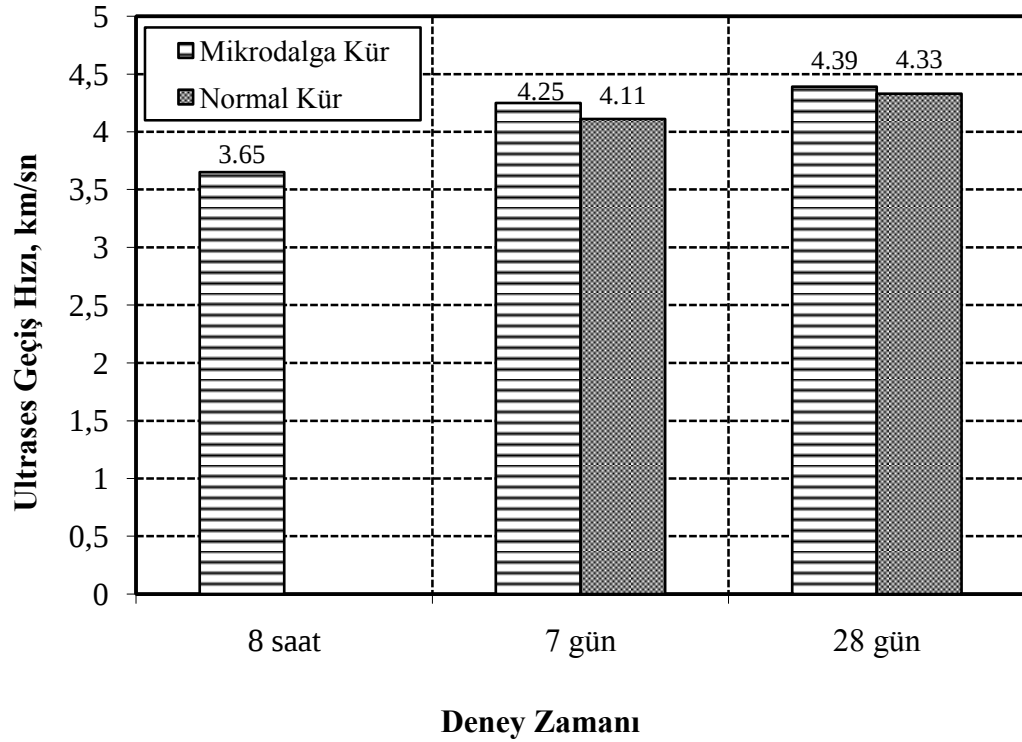
Yüksek erken basınç dayanım değerleri elde edilmiş, farklı kür yöntemleri kullanılan numunelerin deney sonuçları çok farklı çıkmamış, 28 günlük basınç dayanımları birbirlerine yakın değerler bulunmuştur. Mikrodalga kürü mineral ve kimyasal katkısız çimento harcı numunesinin 7 günlük basınç dayanım değeri daha yüksek olmasına karşın, 28 günlük basınç dayanım değeri daha düşüktür.

Şekil 6.2’de görüldüğü üzere mikrodalga kürlü numunelerin eğilme dayanımları da basınç dayanımları gibi normal kürlü deney sonuçlarına yakındır. Normal kürlü numunelerin eğilme dayanımları mikrodalga kürlülere göre daha yüksektir.



Şekil 6.2. Kür yöntemi ve eğilme dayanımı ilişkisi

Mikrodalga kürlü harç numunelerinin eğilme dayanımları 8 saatten 7 güne % 56.73, 7 günden 28 güne % 13.13 artış göstermiştir. Normal kürlü harç numunelerinin eğilme dayanımları ise 7 günde 28 güne % 13.04 artarak mikrodalga kürlü harç numunelerin 28 günlük eğilme dayanımlarından % 1.94 daha düşük bir değere ulaşmıştır. Mikrodalga kürlü numunelerin ilk 8 saat sonundaki eğilme dayanım değeri 28 gün sonunda % 77.31 artmış; normal kürlü harç numunesinin 28 günlük eğilme dayanımının % 1.90 altında bir değere ulaşmıştır. Mikrodalga kürü çimento harç numunelerine ilk 8 saatte normal kürlü harç numunelerinin 7 günde kazandığı eğilme dayanımının % 62.54’ünü, 28 günde kazandığı eğilme dayanımının % 55.33’ünü kazandırmaktadır.



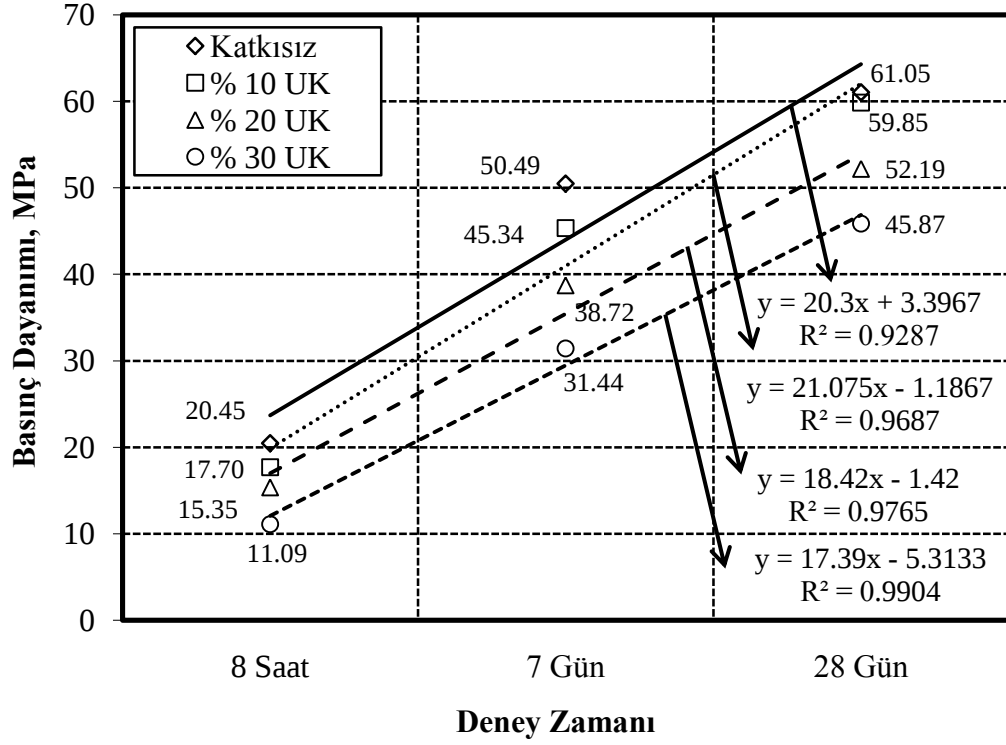
Şekil 6.3. Kür yöntemi ve ultrases geçiş hızları ilişkisi

Malzemelerin iç yapısı hakkında fikir veren ultrases geçiş süresi deneyinin sonuçlarına göre mikrodalga kürlü numuneler erken yaşta Çizelge 5.6'daki verilere göre iyi bir iç yapı özelliğine sahiptir (Şekil 6.3). Mikrodalga kürlü numuneler 7 ve 28 günlük deneylerde normal kürlü numunelerden az da olsa daha iyi değerlere sahiptir. XPS kalıp kullanılarak üretilen MK harç numunelerinin ultrases geçiş hızı değerleri 8 saatten 7 güne % 16.44, 7 günden 28 güne % 3.29 artış göstermiştir. Normal kürlü harç numunelerinde ise bu değer 7 günden 28 güne % 5.35 olmuştur. Mikrodalga kürlü harç numuneleri normal kürlü harç numunelerine göre 7 günde % 3.41, 28 günde ise % 1.39 daha yüksek ultrases geçiş hızı değerlerine ulaşmıştır. Mikrodalga kürü harç numunelerine ilk 8 saatte normal kürlü harç numunelerinin 7 günlük ultrases geçiş hızının % 88.81'ine, 28 günlük ultrases geçiş hızlarının ise % 84.30'una ulaştırmıştır.

6.2. Mineral ve Kimyasal Katkıların Deney Sonuçlarına Etkisi

Uçucu küller betonda mineral katkı maddeleri olarak kullanılan yapay bir puzolandır ve çoğunlukla kendi başına bağlayıcılık özellikleri olmadıkları halde,

sönmüş kireçle hidrasyon reaksiyonuna girerek suda sertleşir. Uçucu külün beton özelliklerine olumsuz etkileri arasında betonun ilk günlerdeki dayanım kazanma hızını düşürmesi ve beton prizini geciktirmesi sayılabilir (Topçu, 2006 b).



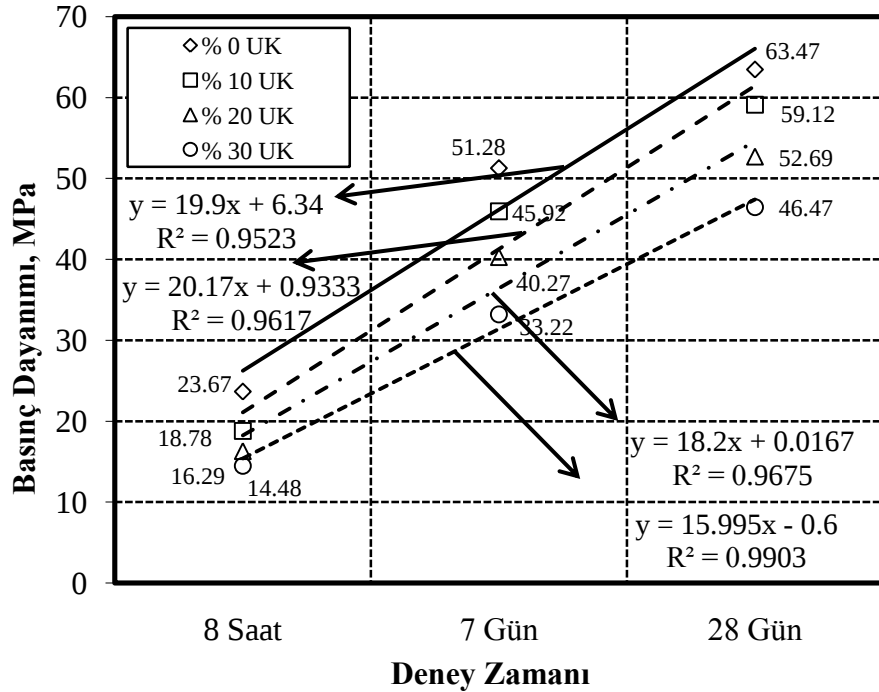
Şekil 6.4. XPS kalıpta uçucu kül kullanım oranları ve basınç dayanımı ilişkisi

Şekil 6.4'te farklı oranlarda mineral katkı kullanılmış çimento harçlarının XPS kalıplar kullanılarak uygulanan mikrodalga kürü sonucunda yapılan 28 günlük basınç deneylerinin, çelik kalıp kullanılarak hazırlanan normal kür uygulanmış harç numunelerinin basınç dayanımlarıyla karşılaştırılmıştır. Uçucu küllü harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları arasında büyük bir fark yoktur. Yalnız çimento yerine ağırlıkça uçucu kül kullanıldıkça basınç dayanımları düşmektedir.

İlk 8 saatte mikrodalga kürlü uçucu küllü harç numuneleri katkısız numunelere göre % 10 UK % 13.45, % 20 UK % 24.94, % 30 UK % 45.77 daha düşük basınç dayanım değerleri göstermiştir. Uçucu küllü harç numunelerinin kontrol numunelerin basınç dayanımlarına oranları olan bu değerler 7 günlük numunelerde ise % 10 UK %

10.20, % 20 UK % 23.31, % 30 UK % 62.27 olarak değişmiştir. 28 gün sonunda mikrodalga kürlü harç numuneleri % 10 UK % 1.97, %20 UK % 14.51, % 30 UK % 24.87 katkısız numunelerden daha düşük basınç dayanımlarına ulaşmıştır. Basınç dayanımları artışları 8 saatten 7 güne katkısız % 146.90, % 10 UK % 156.16, % 20 UK % 152.25, % 30 UK % 183.50; 7 günden 28 güne ise katkısız % 20.92, % 10 UK % 32.00, % 20 UK % 34.79, % 30 UK % 45.90 olarak bulunmuştur. Mikrodalga kürlü % 30 UK harç numunesinin basınç dayanımının katkısız olan harç numunesinin basınç dayanımına oranı % 75.14, % 20 UK % 85.49, % 10 UK % 98.03 olarak görülmüştür.

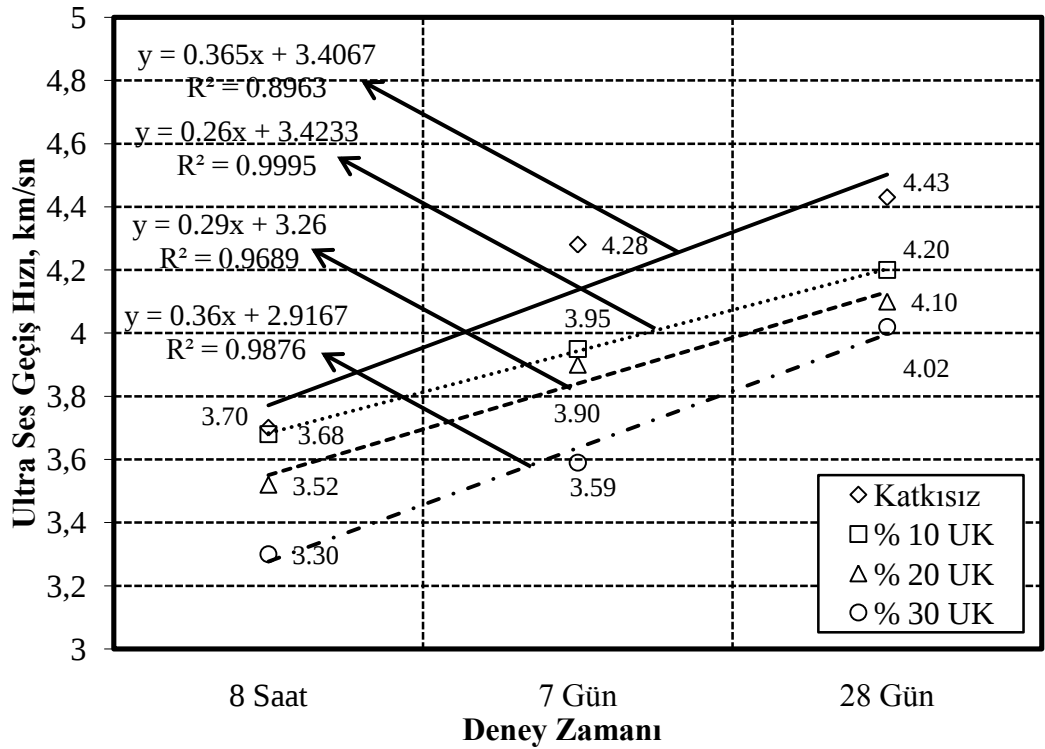
Yüksek dayanımlı betonlar üretilirken süperakışkanlaştırıcılara gerek duyulmaktadır. Kimyasal içeriğinden dolayı betonun erken dayanımını arttırdıklarından özellikle prefabrikasyonda kullanımı tercih edilmektedir. Ayrıca bu özelliğinden erken kalıp alınması gereken işlerde kullanılmakta ve dolayısıyla zaman kazandırmaktadırlar. Süperakışkanlaştırıcılar su kullanımını % 15 ile 30 arasında azaltır (Topçu, 2005).



Şekil 6.5. Cam kalıpta uçucu kül kullanım oranları ve basınç dayanımı ilişkisi

Cam kalıplı numunelerin basınç dayanımları farklı oranlarda uçucu kül kullanımıyla değişimlerine göre Şekil 6.5'te belirtilmiştir. Buna göre kimyasal ve mineral katkısız olan harç numunesinin basınç dayanımları en yüksek değerleri oluşturmaktadır. Uçucu kül kullanım oranlarına göre ilk 8 saatten 7 güne basınç dayanım artışları % 0 UK % 116.65, % 10 UK % 144.52, % 20 UK % 147.21, % 30 UK % 129.42 olarak bulunmuştur. Bu değerler 7 günden 28 güne sırasıyla % 23.77, % 28.75, % 30.84, % 39.89 olarak değişmektedir. İçerisinde uçucu kül olmayan numunenin 28 günlük basınç dayanımı % 10 UK numunenin % 7.36, % 20 UK numunenin % 20.46, % 30 UK numunenin % 36.58 daha yüksek değere ulaşmıştır.

Mikrodalga kürlü cam kalıplı çimento harç numunelerin ultrases geçiş süresi deneyi sonucunda, basınç dayanımı deneyine paralel olarak uçucu külü daha yüksek olan numunelerde düşük ultrases geçiş hızı değerleri aldığı görülmüştür (Şekil 6.6).



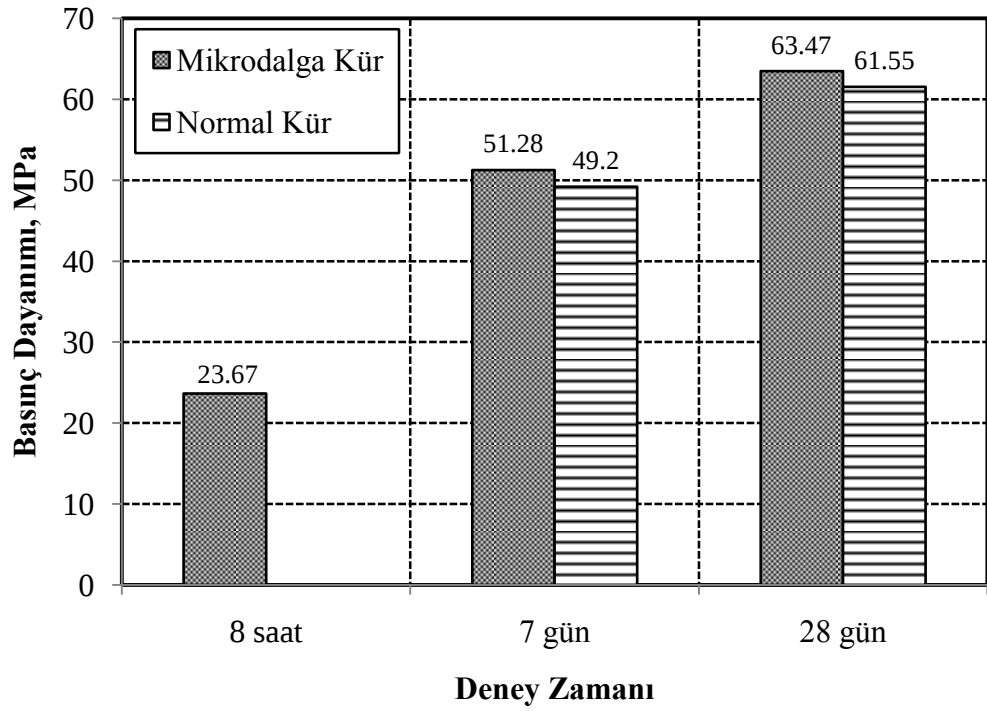
Şekil 6.6. Cam kalıpta uçucu kül kullanım oranları ve ultrases geçiş hızları ilişkisi

Uçucu kül kullanılmayan numunenin ultrases geçiş hızı ilk 8 saatte % 10, % 20 ve % 30 uçucu küllü numunelerinkine oranla sırasıyla % 0.54, % 5.11, % 12.12 daha yüksektir. Uçucu kül kullanım oranları % 10, % 20 ve % 30 olan harç numunelerinin, uçucu kül kullanılmayan numunenin 28 günlük ultrases geçiş hızına oranları sırasıyla % 94.81, % 92.55, % 90.75 olarak bulunmuştur. Bu durumda uçucu kül oranları % 0, % 10, % 20 ve % 30 olan mikrodalga kürlü harç numunelerinin 8 saatten 28 güne ultrases geçiş hızı artışları sırasıyla % 19.73, % 14.13, % 16.48, % 21.82 olarak değişmektedir.

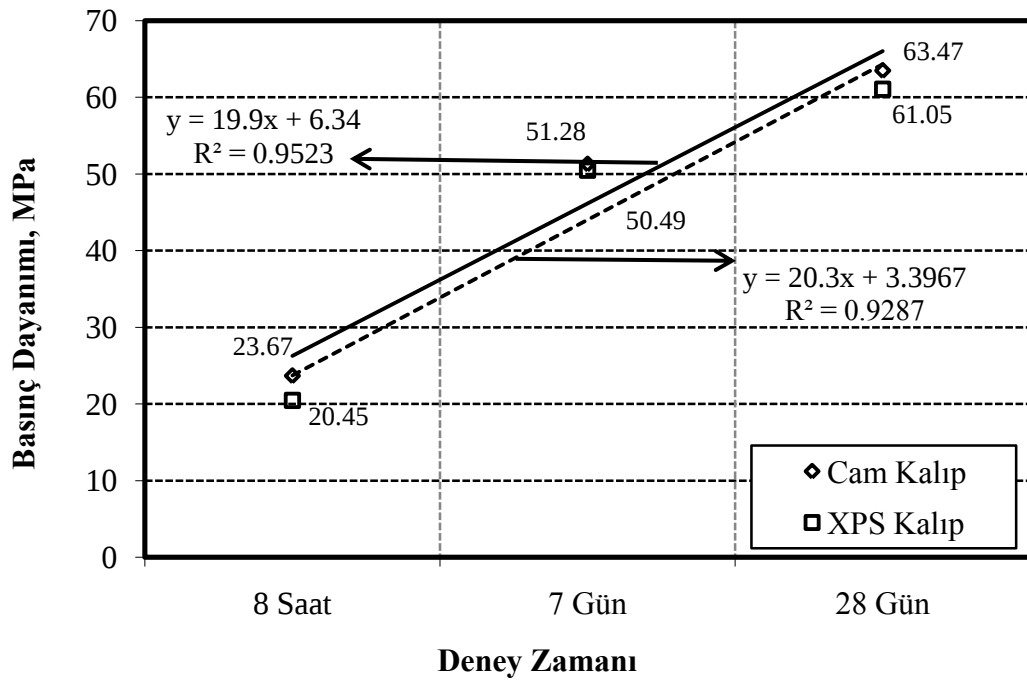
6.3. Farklı Malzemedan Kalıp Kullanmanın Deney Sonuçlarına Etkisi

Bu çalışmada, mikrodalgaın içersinden emilmeden geçmesine olanak tanıyan cam, mikrodalga küründe harç numunesi kalıbının malzeme etkisini görmek ve daha uygun sonuçlar elde etmek için kullanılmıştır. Cam kalıp ev tipi mikrodalga fırınlarda en çok kullanılan malzeme çeşididir. Mikrodalga ışınları aynı güneş ışınlarının geçtiği gibi camın içinden hiç emilmeden geçerler. Bu nedenle cam kalıplar alternatif kalıp olarak seçilmiştir. Cam kalıp kullanılarak elde edilen kimyasal ve mineral katkısız mikrodalga kürlü numuneler ve aynı karışım özelliklerine sahip normal kürlü numunelerin basınç dayanım değerleri karşılaştırıldığında birbirlerine yakın değerler çıkmaktadır (Şekil 6.7).

Normal kürlü harç numunelerinin, mikrodalga kürlü cam kalıplı harç numunelerinin basınç dayanımlarına oranları 7 günde % 4.06, 28 günde % 3.03 daha düşük çıkmıştır. Cam kalıplarda mikrodalga kürlü harç numunelerin ilk 8 saatte ulaştığı basınç dayanımı, normal kürlü numunelerin 7 günde ulaştığı dayanımın % 48.11'i, 28 günde ulaştığı dayanımın % 38.46'sı olarak bulunmuştur. Cam kalıplı numunelerin dayanımları 8 saatten 7 güne % 116.65, 7 günden 28 güne % 23.77 artış göstermiştir. Basınç dayanım deney sonuçları hızlandırılmış mikrodalga küründe alternatif kalıp olarak seçilen cam kalıp kullanımının erken dayanım deney sonuçlarını arttırdığını göstermektedir. Elde edilen bu sonuçlar camın dielektrik özellikleri nedeniyle mikrodalga ışınlarını tümüyle emmeden geçirmesinden kaynaklanmaktadır.

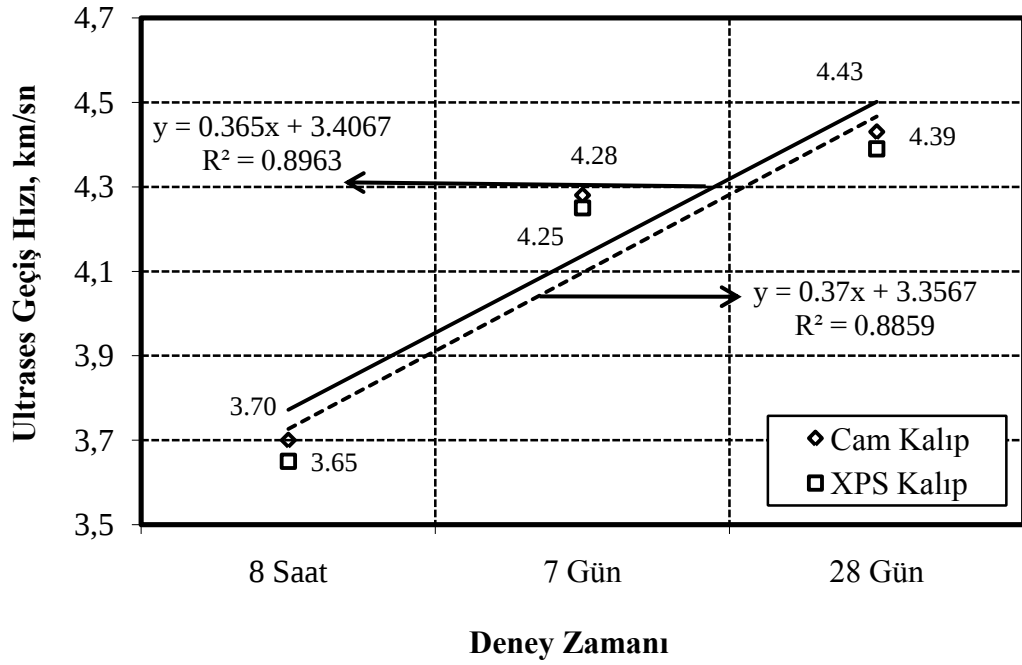


Şekil 6.7. Kür yöntemi ve basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 6.8. Kalıp türü ve basınç dayanımı ilişkisi

Şekil 6.8’de normal düz cam ve XPS kalıp kullanılarak elde edilen basınç dayanımları görülmektedir. Cam kalıpla bulunan basınç dayanımları XPS kalıpla bulunan basınç dayanımlarına göre özellikle 8 saatte daha yüksektir. Cam kalıplı numunelerin dayanımları 8 saatte yapılan deneyde XPS kalıplı numunelerin dayanımlarından % 15.75, 7 günde % 1.57, 28 günde % 3.96 daha yüksek bulunmuştur. Cam kalıplı harç numunelerinin dayanımları ilk 8 saat ile 7 gün arasında % 116.65, 7 gün ile 28 gün arasında % 23.77 artış göstermiş, buna karşılık XPS kalıplı numuneler ilk 8 saatten 7 güne % 146.89, 7 günden 28 güne ise % 20.92’lik artış göstermiştir.



Şekil 6.9. Kalıp türü ve ultrases geçiş hızları ilişkisi

Cam kalıplı harç numunelerinin mikrodalga küründen sonra ultrases geçiş hızları 8 saat sonunda XPS kalıplı harç numunelerinkinden % 1.37, 7 gün sonunda % 0.71, 28 gün sonunda ise % 0.91 daha yüksek değerlerde bulunmuştur (Şekil 6.9). Cam kalıplı harç numunelerinin ultrases geçiş hızları 8 saat ile 7 gün arasında % 15.68, 7 gün ile 28 gün arasında % 3.51 artarken; XPS kalıplı harç numunelerinin ultrases geçiş hızları 8 saat ile 7 gün arasında % 16.44, 7 gün ile 28 gün arasında % 3.30 artış göstermiştir.

7. SONUÇLARIN İRDELENMESİ

Uçucu küllü harçlarda mikrodalga ile uygulanan hızlandırılmış kürün harç numunelerinin özelliklerine etkisini araştırmak için yapılan bu çalışmada bulunan genel sonuçların irdelenmesi, elde edilen sonuçların nedenleriyle birlikte aşağıda belirtilmiştir:

- Mikrodalga kürlü numunelerin 28 günlük deney sonuçları normal kürlü numunelerden önemli ölçüde düşük değildir, cam kalıplı, mikrodalga kürlü, katkısız harç numunesinin 28 günlük basınç dayanım sonucu 63.47 MPa iken, normal kürlü katkısız harç numunesinin 61.55 MPa olduğu gibi çoğunlukla yüksek değerler elde edilmiştir. Ağırlıkça % 0, % 10, % 20 ve % 30 çimento yerine uçucu kül kullanılan mikrodalga kürlü XPS kalıplı hazırlanmış harç numunelerinin aynı özelliklerdeki normal kürlü numunelerin dayanımlarına oranları sırasıyla şu şekildedir; % 99.19, % 101.12, % 96.24, % 104.56.
- Deneyler sonucunda cam kalıplı numuneler olumlu sonuç vermektedir. Ağırlıkça % 0, % 10, % 20 ve % 30 çimento yerine uçucu kül kullanılan mikrodalga kürlü, cam kalıplı numunelerinin aynı özelliklerdeki XPS kalıplı numunelerin dayanımlarına oranları sırasıyla şu şekildedir; % 103.96, % 98.78, % 100.96, % 101.31. Katkısız harçlarda yapılan ultrases geçiş süresi deneyleri sonucunda cam kalıplı numuneler, XPS kalıplı numunelerden 8 saatlik erken yaş deneyinde % 1.37, 28 günlük ileri yaş deneyinde % 0.91 daha yüksek değerler almıştır. Malzemenin iç yapısındaki bozuklukların önlenmesi açısından cam kalıp kullanılmalıdır.
- Uçucu kül ve süperakışkanlaştırıcı kullanımı çimento harçlı numunelerin basınç dayanımlarına olumsuz etki etmektedir. Ancak süperakışkanlaştırıcı katkı harcın kalıba daha düzgün yayılmasını sağladığından iç yapıyı olumlu etkilediği düşünülmektedir. Cam kalıpla % 30 uçucu kül kullanımı ile elde edilen mikrodalga kürlü numunelerin 28 günlük basınç dayanımı deney sonucu 46.47 MPa iken, aynı koşullarda deney yapılan katkısız numunesinin basınç dayanımı deney sonucu 63.47 MPa'dır; yani % 36.58 daha düşüktür.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Uçucu küllü harçlarda mikrodalga ile uygulanan hızlandırılmış kürün harç numunelerinin özelliklerine etkisini araştırmak için yapılan bu çalışmada bulunan genel sonuçlar ve gelecek çalışmalar için yapılabilecek öneriler aşağıda belirtilmiştir:

- Mikrodalga kür, çimento harcının ısınıp içerisinde bulundurduğu su moleküllerinin mikrodalga enerjiyi emmesi yoluyla arttırır. Bunun sonucu çimento hidratasyon hızı artar ve harcın erken dayanım kazanması sağlanmış olur. Mikrodalga enerjisi ile yapılan kür işleminde ısı kaybı olmadığı için diğer hızlandırılmış kür yöntemlerine göre daha düşük enerji tüketimi sağlanır.
- Harç numunelerinin yerleştirildiği cam kalıplar mikrodalga fırın özelliklerine uygun kalıplardır. Bu kalıplar mikrodalga fırına yerleştirildiğinde hem ısıyı emmezler hem de numunenin bütününe eşit miktarda ısıtma uygulanır. Daha sonra yapılacak olan çalışmalarda da mikrodalga fırın özelliklerine uygun cam kalıplar kullanılması mikrodalga enerjisinin tam verimliliği açısından gereklidir.
- Elde edilen bu sonuçlar mikrodalga kür yönteminin beton teknolojisinde yeni bir alternatif kür yöntemi olarak gelişebileceğini göstermektedir. Mikrodalga kür yöntemi kısa sürede yüksek dayanım sağladığı gibi gelişmelere de açık bir yöntemdir. Beton numuneleri için özel bir mikrodalga ısıtma işlem makinesi üretilip daha farklı beton ya da harç numuneleri üzerinde çalışılabilir.
- Bundan sonraki çalışmalara mikrodalga kür yönteminde sıcaklık ve nem değişimlerinin hassas bir şekilde incelenmesi önerilebilir; çünkü mikrodalga kür yöntemi beton ve harç numunelerin içerisindeki su moleküllerinin ısınması yoluyla tüm yapının ısınması olayına bağlıdır. Bu işlem sırasında numunenin aşırı ısınması sonucu buharlaşan su molekülleri, boşluklu ve mikro çatlaklı yapı oluşmasına neden olurken, numunenin yeterince ısınmamasında ise erken

dayanımlarda artışın çok düşük olması etkindir. Bu nedenle numunenin iç sıcaklık değişimi ve nem kaybı bu yöntemde çok önemli bir yer oluşturmaktadır.

- Uçucu kül ve süperakışkanlaştırıcı mikrodalga kür edilen çimento harç numunelerinin basınç dayanımlarını kullanım oranlarına bağlı olarak oldukça düşürmektedir. Diğer taraftan gelecek çalışmalarda farklı mineral katkıların mikrodalga kür üzerine etkileri de araştırma konusu olabilir. Mikrodalga kür yönteminin hangi katkı türünde nasıl davranışlar gösterdiği belirlenebilir.
- Mikrodalga kür yönteminin dezavantajlarından biri olan kalınlık arttıkça mikrodalga ısıtma etkisinin azaldığı düşünüldüğünde mikrodalga kür yönteminde önemli faktör olan numune boyutları bir sonraki çalışmalarda araştırılabilir. Farklı boyutlarda numuneler hazırlanarak en uygun sonuçların hangi boyutlardaki harç numunelerinde elde edilebildiği belirlenebilir.
- Kısa zamanda erken yüksek basınç dayanımı elde edilirken daha ileriki yaşlarda basınç dayanımının ne olacağını da araştırmak gerekir. İleriki yaşlarda 28 gün ve 90 günden sonra hidrasyon hızının ilk yaşlarda daha yavaş olduğu normal kürlü harç numuneleriyle mikrodalga kürlü harç numunelerinin basınç dayanımlarının karşılaştırılması araştırma konusu olarak seçilebilir.
- Uçucu külün kullanımı beklenildiği gibi 7 ve 28 günlük basınç dayanım deneyi sonuçlarını düşürmüştür; ancak 90 günden sonraki ileri yaş basınç dayanım değerini de yükselteceği beklenmektedir. Bunun araştırılması için ileri yaş basınç dayanım deneyleri yapılabilir. Harç karışımlarında mineral katkının yanı sıra süperakışkanlaştırıcı kullanımı önceki çalışmalarla karşılaştırma yapma olanağını sağlamıştır. Harcın kalıba düzgün yerleşmesine bağlı olarak süperakışkanlaştırıcının basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ultrases geçiş süresi değerlerine olumlu etki ettiği görülmüştür.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akdağ, D., Mineral Katkılı Harçlarda Mikrodalga ile Uygulanan Hızlandırılmış Kürde En Uygun Kür Çevriminin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 66s., 2007.
- ASTM C 618, Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, Annual Book of ASTM Standards, ASTM, Philadelphia.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), D.E.Ü. Müh. Fak. Yayını, No. 298, 2002, İzmir, s.18
- Demir, İ., Uçucu Külün Hafif Yapı Malzemesi Üretiminde Kullanılması, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2005 (1), ss. 21 - 24
- Demir, N., 2000, Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonların Ultrases Geçim Hızı-Dayanım İlişkisi Üzerine Bir Araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 45 s.
- Engin , Y., Betonun Bakımı, THBB Hazır Beton Dergisi, 2006, Sayı 73, ss. 69-73.
- Erdoğan, T.Y., Beton, ODTU Geliştirme Vakfı Yayıncılık, 2003, Ankara, s. 371
- ERMCO, European Ready Mixed Concrete Industry Statistics Year 2007, 9 p., 2008.
- Gökçe, E., 2006, Mikrodalga Enerji Yöntemi İle Harç Numunelerine Hızlandırılmış Kür Uygulanması, Bitirme Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, 55s.
- Hargroves, K., Smith, M.H., The Natural Advantage of Nations, Earthscan, 2005, p. 332.
- Hutchison, R.G., Chang, J.T., Jennings, H.M and Brodwin, M.E., 1991, Thermal Acceleration of Portland Cement Mortars with microwave energy, Cem. Concr. Res. Vol. 21, 795-799.

- Kamara, M., E., Rabbat, B., G., Building Code Requirements For Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, 2005, pp. 71-72.
- Karakule, F., Akakın, T., Uçar, S., Türkiye’de ve Dünyada Hazır Beton Sektörü, Beton 2004 Kongresi Bildirileri, İstanbul, s.2-15.
- Karakurt, C., 2002, Farklı Çimentolu Betonlarda Olgunluk Kavramı, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 80 s.
- Kurbetçi, Ş., Öztekin, E., Değiştirilmiş Sıcak Su Yöntemi ile Beton Basınç Dayanımının Tahmini, İMO Teknik Dergi, 2004, ss. 3145-3153.
- Lee, M. G., Huang, Y., Kan, Y. C., The Strength and Rapid Chloride Permeability of Microwave Cured Concrete, International Journal of Applied Science and Engineering, Vol. 5, Issue 1, pp. 53-63, 2007.
- Leung, C.K.Y. and Pheeraphan, T., 1997, Determination of Optimal Process for Microwave Curing of Concrete, Cem. Concr. Res., 27 (3), 463-472.
- Lomborg, B., The Skeptical Environmentalist: Measuring the Real State of the World, Cambridge University Press, 2001, pp. 138-139.
- Mak, S.L., Banks, R.W., Ritchie, D.J., Shapiro, G., Advances in microwave curing of concrete, presented to 4th World Congress on Microwave & Radio Frequency Applications, Sydney, Australia, 22-26 September 2002.
- Newman, J., Choo, B.S., (2003), Advanced Concrete Technology: Testing and Quality, Butterworth-Heinemann Publication, London, pp. 4/27-4/28.
- Pheeraphan, T., 1997, Accelerated Curing of Concrete with Microwave Energy, PhD Thesis, MIT, USA, 201 p.
- P. Rattanadecho, N. Suwannapum, B. Chatveera, D. Atong, N. Makul, Development of compressive strength of cement paste under accelerated curing by using a continuous microwave thermal processor. Materials Science and Engineering: A, Volume 472, Issues 1-2, pp. 299-307, 2008.

- Topçu, İ.B., Karakurt, C., 2002, Farklı Çimentolar İle Üretilen Betonlarda Olgunluk Kavramı, ECAS 2002, Uluslar Arası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara, ss. 476-483.
- Topçu, İ.B., Karakurt, C., Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufunun Çimento Üretiminde Katkı Olarak Kullanımı, 7. Ulusal Beton Kongresi, 28-30 Kasım 2007, İstanbul, ss. 395-404.
- Topçu, İ.B., Karakurt, C., Mikrodalga Enerji Yöntemi ile Beton ve Harç Numunelerine Hızlandırılmış Kür Uygulaması, İnşaat Haber, Temmuz-Ağustos 2006, Sayı 9, ss. 94-97.
- Topçu, İ.B., Işıkdag, B., Tatar, Ö., 2005, Eskişehir’de Hazır Beton Üretiminde Kullanılan Katkı Maddelerinin Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkileri, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 12, Sayı 1, ss. 21-26.
- Topçu, İ.B., Toprak, M.U., Akdağ, D., Determination of optimal microwave curing cycle for fly ash mortars, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 35, Number 4, pp. 349-357, 2008.
- Topçu, İ.B., Toprak, M.U., Akdağ D., Mikrodalga Kür Yöntemi ile Beton Dayanımın Erken Belirlenmesi, İMO Teknik Dergi, 2008, ss. 4539-4544.
- Topçu, İ.B., Toprak, M.U., Topkara, Y.Ö., Mikrodalga Kür Yönteminin Uçucu Küllü Harç Özelliklerine Etkisi, İMO Teknik Dergi, basılmak üzere sunuldu.
- Topçu, İ.B., 2006 a, Yapı Malzemeleri ve Beton Deneyleri El Kitabı, Eskişehir, ss. 16-17.
- Topçu, İ.B., 2006 b, Beton Teknolojisi, Uğur Ofset A.Ş., Eskişehir, ss. 72-74.
- TS EN 196-1, 2002, Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 500, 2000, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.