

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KÜR KOŞULLARI VE YALITIMIN YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARIN  
GEÇİRİMLİLİK, İÇ-YAPI VE MEKANİK ÖZELİKLERİNE ETKİLERİ**



**DOKTORA TEZİ**

**Fatih ÖZALP**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Yapı Mühendisliği Programı**

**MART 2016**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KÜR KOŞULLARI VE YALITIMIN YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARIN  
GEÇİRİMLİLİK, İÇ-YAPI VE MEKANİK ÖZELİKLERİNE ETKİLERİ**



**DOKTORA TEZİ**

**Fatih ÖZALP  
(501062006)**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Yapı Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Özkan ŞENGÜL**

**MART 2016**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501062006 numaralı Doktora Öğrencisi Fatih ÖZALP, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “KÜR KOŞULLARI VE YALITIMIN YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARIN GEÇİRİMLİLİK, İÇ-YAPI VE MEKANİK ÖZELİKLERİNE ETKİLERİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Doç. Dr. Özkan ŞENGÜL** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Canan TAŞDEMİR** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Yılmaz AKKAYA** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Turan ÖZTURAN** .....  
Boğaziçi Üniversitesi

**Prof. Dr. Nabi YÜZER** .....  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi** : **12 Ocak 2016**  
**Savunma Tarihi** : **09 Mart 2016**



## ÖNSÖZ

Tez süresince bana desteğini esirgemeyen, öneri ve yönlendirmeleri ile bu çalışmanın tamamlanmasına değerli katkıları bulunan danışman hocam Doç. Dr. Özkan ŞENGÜL'e, tezimin her aşamasında bilgi ve birikimlerini benden esirgemeyen, başlamasında, devamında ve tamamlanmasında büyük katkıya sahip saygıdeğer hocam Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR'e, bilgi ve birikimlerinden yararlandığım Prof. Dr. Yılmaz AKKAYA hocama, tez çalışmalarına önerileri ile destek veren Prof. Dr. Canan TAŞDEMİR, Prof. Dr. Turan ÖZTURAN ve Prof. Dr. Halit Yaşa ERSOY hocalarıma ve deneysel çalışmalarımın bir bölümünde desteğini esirgemeyen Sn. Gülden KESKİN'e teşekkür ederim.

Bu çalışmalarımı tamamladığım ve hayatımın önemli bir bölümünü geçirdiğim, 2002 yılından beri çalışmakta olduğum, bilimsel çalışmalara desteğini esirgemeyen şirketim İSTON A.Ş.'ye, değerli yöneticilerine ve mesai birlikteliği yaptığım tüm çalışma arkadaşlarıma, tezimin başlamasında ve devam etmesinde beni teşvik eden Yrd. Doç. Dr. Ali Necip KOCATÜRK'e, yine birlikte çalıştığım sürece çalışmalarımın beni destekleyen Sn. Naci YILMAZ, Sn. Ehat Giray ARSLAN, Sn. Özkan BODURLAR ve Sn. Şenol YAŞAR'a, deneysel çalışmalarım boyunca verdikleri destek dolayısıyla Ar-Ge laboratuvarı çalışanlarına, teknik personel Sn. Murat AKISKA ve Sn. Selçuk ARSLAN'a teşekkür borçluyum.

Tez çalışmalarım boyunca göstermiş olduğu sabır ve anlayış için sevgili eşim Seda'ya, daima çalışma motivasyonumu artıran mutluluk kaynaklarım, canım kızlarım Selin Azra ve Nehir Erva'ya, hayatımın her aşamasında yanımda olan sevgi ve desteklerini hiç esirgemeyen kardeşlerim İbrahim, Zeynep ve Furkan Emre'ye, babam ve canım ANNEM'e teşekkür ederim.

Ocak 2016

Fatih ÖZALP





## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vii
KISALTMALAR .....	xi
SEMBOLLER .....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY .....	xvii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Çalışmanın Konusu .....	2
1.2 Çalışmanın Amaç ve Kapsamı .....	2
<b>2. BETONUN DURABİLİTESİ VE TECRİT MALZEMESİ KULLANILMASI KONUSUNDA YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>5</b>
2.1 Normal, Yüksek ve Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar.....	6
2.2 Betonun Dürabilitesi .....	12
2.3 Betonun Geçirimsizliği.....	14
2.4 Silis Dumanı Etkisi.....	16
2.5 Paspayı Etkisi .....	18
2.6 Rötne ve Çatlakların Oluşumu.....	20
2.7 Kür ve Sıcaklık Etkisi .....	22
2.8 Sıcaklık Etkisinde DEF (Delayed Ettringite Formation) Oluşumu.....	28
2.9 Donma Çözülme Etkisi .....	31
2.10 Buz Çözücü Kimyasalların Etkisi .....	33
2.11 Tecrit Malzemesi Etkisi.....	38
<b>3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>51</b>
3.1 Kullanılan Malzemeler .....	51
3.1.1 Çimento .....	51
3.1.2 Agregası .....	52
3.1.3 Silis Dumanı.....	53
3.1.4 Kimyasal Katkı Malzemesi.....	54
3.2 Beton Karışımları .....	54
3.3 Beton Üretiminde İzlenen Sıra .....	55
3.4 Kür Programı .....	56
3.5 Numune Kodlarının Belirlenmesi .....	58
3.6 Numune Boyutları ve Şekilleri .....	58
3.7 Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	59
3.7.1 Küp basınç deneyi.....	59
3.7.2 Yarma çekme deneyi.....	60
3.7.3 RILEM kırılma enerjisi deneyleri .....	61
3.7.3.1 RILEM kırılma enerjilerinin hesaplanması.....	63
3.7.3.2 RILEM enerji deneyinden net eğilme dayanımının hesaplanması ....	63

3.7.4 Elastisite modülü .....	64
3.7.5 Karakteristik boyların belirlenmesi .....	64
3.7.6 Hızlı klor iyonu geçirimsizliği deneyi .....	64
3.7.7 Kılcal su emme deneyi .....	65
3.7.8 Basınç altında su işleme derinliği deneyi .....	66
3.8 Beton ve plastik paspayları .....	67
3.8.1 Betondan paspayı .....	67
3.8.2 Plastik paspayı .....	68
3.9 Su itici tecrit malzemesi .....	68
3.9.1 Tecrit malzemesi özellikleri .....	69
3.9.2 Yaşlandırma ve donma çözülme programı .....	69
3.9.2.1 Yetersiz kür nedeniyle oluşan çatlak bulunan numunelere uygulanan yaşlandırma ve donma çözülme deney programı .....	70
3.9.2.2 Plastik rötre çatlağı bulunan numunelere uygulanan yaşlandırma ve donma çözülme deney programı .....	71
3.10 İç yapı incelemeleri için numunelerin hazırlanması .....	72
<b>4. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ</b>	<b>75</b>
4.1 Kür Koşullarının Betonların Mekanik ve Geçirimsizlik Özelliklerine Etkisi .....	75
4.1.1 Kür koşullarının basınç dayanımına etkisi .....	79
4.1.2 Kür koşullarının yarma çekme dayanımına etkisi .....	85
4.1.3 Kür koşullarının kırılma enerjisine etkisi .....	86
4.1.4 Kür koşullarının net eğilme dayanımına etkisi .....	89
4.1.5 Kür koşullarının elastisite modülüne etkisi .....	89
4.1.6 Kür koşullarının karakteristik boy sonuçlarına etkisi .....	90
4.1.7 Kür koşullarının hızlı klor iyonu geçirimsizliğine etkisi .....	91
4.1.8 Kür koşullarının kılcal su emmeye etkisi .....	93
4.1.9 Kür koşullarının basınç altında su işleme derinliğine etkisi .....	96
4.2 Paspayı Türünün Betonların Geçirimsizlik Özelliklerine Etkisi .....	96
4.2.1 Paspayı kullanılan betonların geçirimsizlik özellikleri .....	97
4.2.1.1 Paspayı kullanılan betonların hızlı klor iyonu geçirimsizliği .....	98
4.2.1.2 Paspayı kullanılan betonların kılcal su emmesi .....	99
4.2.3 Paspayı kullanılan ve kullanılmayan betonların geçirimsizlik özellikleri ..	101
4.2.3.1 Paspayı kullanılan ve kullanılmayan betonların hızlı klor iyonu geçirimsizliği .....	101
4.2.3.2 Paspayı kullanılan ve kullanılmayan betonların kılcal su emmesi ..	102
4.3 Tecrit Malzemesinin Betonların Geçirimsizlik Özelliklerine Etkisi .....	103
4.3.1 Kür çatlakları ve tecrit malzemesinin betonların geçirimsizliğine etkisi ..	103
4.3.1.1 Çatlakların kılcal su emmeye etkisi .....	104
4.3.1.2 Tecrit malzemesinin kılcal su emmeye etkisi .....	105
4.3.1.3 Yaşlandırmanın kılcal su emmeye etkisi .....	106
Yaşlandırmanın tecrit malzemesi uygulanmış çatlaklı numunelerde kılcal su emmeye etkisi .....	106
Yaşlandırmanın tecrit malzemesi uygulanmamış çatlaksız referans numunelerde kılcal su emmeye etkisi .....	107
4.3.2 Plastik rötre çatlakları ve tecrit malzemesinin betonların geçirimsizlik özelliklerine etkisi .....	108
4.3.2.1 Yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerinin yüzeylerine tecrit malzemesi uygulanan beton numunelerde kılcal su emmeye etkisi .....	109
4.3.2.2 Betonların yüzeylerine tecrit malzemesi uygulamasının ve laboratuvar koşullarında bekletmenin kılcal su emmeye etkisi .....	113

4.3.2.3 Betonların yüzeylerine tecrit malzemesi uygulanmaksızın yaşlandırma ve donma çözülmenin kılcal su emmeye etkisi.....	116
4.3.2.4 Betonların yüzeylerine tecrit malzemesi uygulamasının hızlı klor iyonu geçirimsizliğine etkisi .....	124
4.3.2.5 Betonların yüzeylerine tecrit malzemesi uygulanarak yaşlandırma ve donma çözülmenin hızlı klor iyonu geçirimsizliğine etkisi .....	124
<b>5. GENEL SONUÇLAR .....</b>	<b>127</b>
5.1 Kür Koşullarının Etkisi .....	127
5.1.1 Kür koşullarının mekanik özelliklere etkisi .....	127
5.1.2 Kür koşullarının geçirimsizlik özelliklerine etkisi .....	128
5.2 Paspayı Kullanılmasının Etkisi .....	129
5.3 Tecrit Malzemesinin Geçirimsizliğe Etkisi .....	130
5.4 Yaşlandırma ve Donma Çözülmenin Geçirimsizliğe Etkisi.....	130
5.5 İleri Çalışmalar İçin Öneriler .....	132
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>135</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>145</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>169</b>



## KISALTMALAR

<b>ASTM</b>	: Amerika Standartları
<b>BS</b>	: İngiltere Standartları
<b>BSEI</b>	: Geri Saçılmış Elektron Görüntüsü
<b>ÇYDB</b>	: Çok Yüksek Dayanımlı Beton
<b>DEF</b>	: Gecikmiş Etrenjit Oluşumu
<b>EM</b>	: Amerikan Ordusu-Mühendis Rehberi
<b>EN</b>	: Avrupa Standartları
<b>MIP</b>	: Civa Püskürtmeli Porozimetre
<b>NDB</b>	: Normal Dayanımlı Beton
<b>RILEM</b>	: Reunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions
<b>RPB</b>	: Reaktif Pudra Betonu
<b>S/Ç</b>	: Su/Çimento
<b>SD</b>	: Silis Dumanı
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>TM</b>	: Tecrit Malzemesi
<b>TS</b>	: Türk Standartları
<b>UV</b>	: Ultra Viyole
<b>UYDB</b>	: Ultra Yüksek Dayanımlı Beton
<b>YDB</b>	: Yüksek Performanslı Beton
<b>YPB</b>	: Yüksek Dayanımlı Beton



## SEMBOLLER

<b>C-S-H</b>	: Kalsiyum silikat hidrate
<b>MPa</b>	: Mega Paskal
<b>GPa</b>	: Giga Paskal
<b>C</b>	: Coulomb
<b>mA</b>	: Miliamper
<b>C-H</b>	: Kalsiyum Hidroksit
<b>C-S-H</b>	: Kalsiyum Silikat Hidrat
<b>M-S-H</b>	: Magnezyum Silikat Hidrat
<b>NaCl</b>	: Sodyum Klorür
<b>MgCl<sub>2</sub></b>	: Magnezyum Klorür
<b>GF</b>	: Özgül kırılma enerjisi
<b>Pmaks</b>	: Maksimum yük
<b>W<sub>0</sub></b>	: Yük-sehim eğrisi altında kalan alan
<b>m</b>	: Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı
<b>g</b>	: Yerçekimi ivmesi
<b>δ<sub>0</sub></b>	: Kirişin göçme sırasındaki deformasyonu
<b>A<sub>etkin</sub></b>	: Etkin kesit alanı
<b>f<sub>net</sub></b>	: Net eğilme dayanımı
<b>I</b>	: Mesnetler arası uzaklık
<b>B</b>	: Numune kesitinin genişliği
<b>D</b>	: Numune kesitinin yüksekliği
<b>a<sub>0</sub></b>	: Çatlak derinliği





## ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

<b>Çizelge 2.1</b> : Yüksek dayanımlı beton kullanılarak yapılan yüksek katlı binalar ve büyük açıklıklı köprüler için örnekler. ....	<b>8</b>
<b>Çizelge 2.2</b> : Normal dayanımlı beton (NDB), yüksek dayanımlı beton (YDB) ve reaktif pudra betonuna (RPB) ait bazı mekanik özelliklerin karşılaştırılması.....	<b>10</b>
<b>Çizelge 2.3</b> : Normal dayanımlı beton (NDB), yüksek dayanımlı beton (YDB) ve çok yüksek dayanımlı beton (ÇYDB) ait bazı özelliklerin karşılaştırılması.....	<b>11</b>
<b>Çizelge 2.4</b> : Reaktif pudra betonu (RPB) ile yüksek dayanımlı betonun (YDB) fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması.....	<b>11</b>
<b>Çizelge 2.5</b> : Betonun hasara uğramasının nedenleri (EM 1110-2-2002) .....	<b>14</b>
<b>Çizelge 2.6</b> : XS çevresel etki sınıfları için önerilen değerler (TS EN 206).....	<b>18</b>
<b>Çizelge 2.7</b> : Minimum paspayı kalınlıkları (EN 1992-1-1).....	<b>19</b>
<b>Çizelge 2.8</b> : XD3 çevresel etki sınıfı için önerilen değerler (BS 8500-1).....	<b>19</b>
<b>Çizelge 2.9</b> : Kür koşullarının poroziteye etkisi .....	<b>30</b>
<b>Çizelge 2.10</b> : Su/çimento oranı ve hidrasyon derecesinin kapiler poroziteye etkisi .....	<b>32</b>
<b>Çizelge 2.11</b> : XF çevresel etki sınıfları için önerilen değerler (TS EN 206) .....	<b>33</b>
<b>Çizelge 2.12</b> : Beton yüzeylerin tecrit işleminde kullanılan su itici malzemeler için koşullar (EN 1504-2).....	<b>46</b>
<b>Çizelge 2.13</b> : Hızlandırılmış test yöntemleri ile korozyonun önlenmesi için uygulanan tecrit malzemelerin etkinliklerinin karşılaştırılması .....	<b>47</b>
<b>Çizelge 2.14</b> : Silan ve siloksan uygulanan beton küp numunelerin 90 günlük klorür işleme derinlikleri .....	<b>47</b>
<b>Çizelge 3.1</b> : Çimentonun kimyasal özellikleri.....	<b>51</b>
<b>Çizelge 3.2</b> : Çimentonun fiziksel özellikleri .....	<b>51</b>
<b>Çizelge 3.3</b> : Çimentonun mekanik özellikleri .....	<b>52</b>
<b>Çizelge 3.4</b> : Silisli agregaların kimyasal bileşimi .....	<b>52</b>
<b>Çizelge 3.5</b> : Silisli agregaların fiziksel özellikleri.....	<b>52</b>
<b>Çizelge 3.6</b> : Silisli agregaların granülometreleri.....	<b>52</b>
<b>Çizelge 3.7</b> : Kırmataş I ve kırmataş II agregalarının fiziksel özellikleri.....	<b>53</b>
<b>Çizelge 3.8</b> : Kırmataş kumve doğal kum agregalarının fiziksel özellikleri .....	<b>53</b>
<b>Çizelge 3.9</b> : Silis dumanının kimyasal özellikleri. ....	<b>54</b>
<b>Çizelge 3.10</b> : Silis dumanının fiziksel özellikleri.....	<b>54</b>
<b>Çizelge 3.11</b> : Normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonların bileşimleri ve taze haldeki özellikleri.....	<b>55</b>
<b>Çizelge 3.12</b> : Hızlı klor iyonu geçirimsizlik sınıfları (ASTM C1202).....	<b>65</b>
<b>Çizelge 3.13</b> : Normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı beton paspayı numuneleri üretilmesinde kullanılan teorik taze beton bileşimi.....	<b>68</b>

<b>Çizelge 3.14</b> : Beton yüzeylerine uygulanan su itici tecrit malzemesinin özellikleri.	<b>69</b>
<b>Çizelge 3.15</b> : Donma çözülme çevrimlerinde kullanılan $MgCl_2$ çözeltilisinin fiziksel ve kimyasal özellikleri	<b>72</b>
<b>Çizelge 3.16</b> : Donma çözülme çevrimlerinde kullanılan $NaCl$ çözeltilisinin fiziksel ve kimyasal özellikleri	<b>72</b>
<b>Çizelge A.1</b> : Betonların 7. günde basınç dayanımları (MPa)	<b>147</b>
<b>Çizelge A.2</b> : Betonların 28. günde basınç dayanımları (MPa)	<b>147</b>
<b>Çizelge A.3</b> : Betonların 365. günde basınç dayanımları (MPa)	<b>147</b>
<b>Çizelge A.4</b> : Betonların 28. günde yarma çekme dayanımları (MPa)	<b>147</b>
<b>Çizelge A.5</b> : Betonların 140. günde kırılma enerjileri (N/m)	<b>148</b>
<b>Çizelge A.6</b> : Betonların 140. günde net eğilme dayanımları (MPa)	<b>148</b>
<b>Çizelge A.7</b> : Betonların 480. günde elastisite modülleri (GPa) ve karakteristik boy değerleri (mm)	<b>148</b>
<b>Çizelge A.8</b> : Betonların 28. günde hızlı klor iyonu geçirimsizlikleri (C)	<b>148</b>
<b>Çizelge A.9</b> : Betonların 28. günde hızlı klor iyonu geçirimsizlikleri (mA)	<b>149</b>
<b>Çizelge A.10</b> : Betonların 28. günde kılcal su emme değerleri (mm)	<b>149</b>
<b>Çizelge A.11</b> : Betonların 28. günde basınç altında su işleme derinlikleri (mm)	<b>149</b>
<b>Çizelge A.12</b> : Paspayı kullanılan betonların hızlı klor iyonu geçirimsizlikleri (C)	<b>150</b>
<b>Çizelge A.13</b> : Paspayı kullanılan betonların hızlı klor iyonu geçirimsizlikleri (mA)	<b>150</b>
<b>Çizelge A.14</b> : Paspayı kullanılan betonların 28. günde kılcal su emme değerleri (mm)	<b>150</b>
<b>Çizelge A.15</b> : Paspayı kullanılan betonların 140. günde kılcal su emme değerleri (mm)	<b>151</b>
<b>Çizelge A.16</b> : Paspayı kullanılmayan referans betonlar ve beton paspayı kullanılan betonların hızlı klor iyonu geçirimsizlikleri (C)	<b>151</b>
<b>Çizelge A.17</b> : Paspayı kullanılmayan referans betonlar ve beton paspayı kullanılan betonların hızlı klor iyonu geçirimsizlikleri (mA)	<b>151</b>
<b>Çizelge A.18</b> : Paspayı kullanılmayan referans betonlar ve beton paspayı kullanılan betonların kılcal su emme değerleri (mm)	<b>152</b>
<b>Çizelge A.19</b> : Referans ve çatlaklı betonların kılcal su emme değerleri (mm)	<b>152</b>
<b>Çizelge A.20</b> : Tecrit malzemesi uygulanan betonların kılcal su emme değerleri (mm)	<b>153</b>
<b>Çizelge A.21</b> : Yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri uygulanan betonların kılcal su emme değerleri (mm)	<b>153</b>
<b>Çizelge A.22</b> : Yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri uygulanan referans betonların kılcal su emme deney sonuçları (mm)	<b>154</b>
<b>Çizelge A.23</b> : Tecrit malzemesi uygulanmadan önce betonların kılcal su emme değerleri (mm)	<b>154</b>
<b>Çizelge A.24</b> : Tecrit malzemesi uygulanmasından sonra betonların kılcal su emme değerleri (mm)	<b>155</b>
<b>Çizelge A.25</b> : 28 çevrim yaşlandırma ve donma çözülme sonrası betonların kılcal su emme değerleri (mm)	<b>155</b>
<b>Çizelge A.26</b> : 84 çevrim yaşlandırma ve donma çözülme sonrası betonların kılcal su emme değerleri (mm)	<b>156</b>
<b>Çizelge A.27</b> : 112 çevrim yaşlandırma ve donma çözülme sonrası betonların kılcal su emme değerleri (mm)	<b>156</b>
<b>Çizelge A.28</b> : 196 çevrim yaşlandırma ve donma çözülme sonrası betonların kılcal su emme değerleri (mm)	<b>157</b>

<b>Çizelge A.29</b> : Tecrit malzemesinin betonların hızlı klor iyonu geçirimsizliğine etkisi (C).....	<b>157</b>
<b>Çizelge A.30</b> : Tecrit malzemesinin betonların hızlı klor iyonu geçirimsizliğine etkisi (mA) .....	<b>157</b>
<b>Çizelge A.31</b> : Yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerinin betonların hızlı klor iyonu geçirimsizliğine etkisi (C) .....	<b>158</b>
<b>Çizelge A.32</b> : Yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerinin betonların hızlı klor iyonu geçirimsizliğine etkisi (mA).....	<b>158</b>





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Gözeneklerin bağlantısı : (a) NDB. (b) UYDB.....	9
Şekil 2.2 : Silis dumanının boşlukları doldurma ve puzolanik özeliğinin betonun basınç dayanımına etkisi.....	17
Şekil 2.3 : Paspayı kalınlığının depasivizasyon olasılığına etkisi .....	20
Şekil 2.4 : Betonda erken yaşta oluşan gerilmelerin ve dayanımların zamanla gelişimi .....	21
Şekil 2.5 : Tipik buhar kürü devresi .....	23
Şekil 2.6 : Buhar kürünün ileriki yaşlarda beton basınç dayanımına etkileri .....	23
Şekil 2.7 : Çimento hamurunun dayanımının sıcaklıkla değişimi .....	24
Şekil 2.8 : Kür sıcaklığının beton dayanım gelişimine etkisi .....	27
Şekil 2.9 : Farklı kür sıcaklıkları uygulanan numunelerin basınç dayanımı gelişimi	28
Şekil 2.10 : Hidratasyon derecesinin kapiler boşluklara etkisi.....	31
Şekil 2.11 : 95 hafta 1,06 molar NaCl çözeltisine maruz bırakılan numuneler.....	36
Şekil 2.12 : 80 hafta 1,06 molar MgCl <sub>2</sub> çözeltisine maruz bırakılan numuneler.....	36
Şekil 2.13 : 95 hafta 6,04 molar NaCl çözeltisine maruz bırakılan numuneler.....	37
Şekil 2.14 : 10 hafta 6,04 molar MgCl <sub>2</sub> çözeltisine maruz bırakılan numuneler.....	37
Şekil 2.15 : Yüzey koruma sistemleri.....	39
Şekil 2.16 : Hidrofilik, hidrofobik, fazla hidrofobik, süper hidrofobik yüzeyler ....	40
Şekil 2.17 : Tipik alkil alkoksisisilan moloküler yapısı .....	41
Şekil 2.18 : İşleme derinliği ölçümü.....	43
Şekil 2.19 : Donma çözülmenin tecrit malzemesine etkisi.....	44
Şekil 3.1 : Normal ve yüksek dayanımlı betonlara ait karışım eğrisi .....	55
Şekil 3.2 : Buhar kürü (60°C) uygulaması kür diyagramı .....	57
Şekil 3.3 : Buhar kürü (90°C) uygulaması kür diyagramı .....	57
Şekil 3.4 : Yalıtılmış etüv kürü (150°C) uygulaması kür diyagramı .....	57
Şekil 3.5 : Numune boyutları ve şekilleri .....	58
Şekil 3.6 : Basınç dayanımı deneylerinde kullanılan cihaz .....	60
Şekil 3.7 : Yarma çekme deneylerinde kullanılan deney cihazı .....	61
Şekil 3.8 : RILEM kırılma enerjisi deneyi yükleme düzeni. ....	61
Şekil 3.9 : RILEM kırılma enerjisi deneyi yükleme deney düzeneği: (a) cihazın genel görünümü. (b) deney girişinin yakından görünüşü.....	62
Şekil 3.10 : Örnek bir yük-sehim eğrisi .....	63
Şekil 3.11 : Hızlı klor iyonu geçirimsizliği deney düzeneği.....	65
Şekil 3.12 : Kılcal su emme deney düzeneği .....	66
Şekil 3.13 : Basınç altında su işleme derinliği deney düzeneği.....	66
Şekil 3.14 : Yaşlandırma deney cihazı .....	70
Şekil 3.15 : Donma çözülme deney cihazı.....	70
Şekil 4.1 : Normal dayanımlı betonun iç yapısı (pp: tek nikol, xp: çift nikol, uv: ultraviyole ışık).....	76
Şekil 4.2 : Ultra yüksek dayanımlı betonun iç yapısı (pp: tek nikol, xp: çift nikol, uv: ultraviyole ışık).....	77

<b>Şekil 4.3</b> : Yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulanan normal dayanımlı betonun iç yapısı (uv: ultraviyole ışık).....	<b>78</b>
<b>Şekil 4.4</b> : Yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulanan ultra yüksek dayanımlı betonun iç yapısı (uv: ultraviyole ışık) .....	<b>78</b>
<b>Şekil 4.5</b> : Kür koşullarının 7 günlük betonların basınç dayanımına etkisi .....	<b>79</b>
<b>Şekil 4.6</b> : Kür koşullarının 28 günlük betonların basınç dayanımına etkisi.....	<b>80</b>
<b>Şekil 4.7</b> : Kür koşullarının 365 günlük betonların basınç dayanımına etkisi.....	<b>81</b>
<b>Şekil 4.8</b> : Normal dayanımlı betonda yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulanmasının çimento hidratasyonuna etkisi (pp: tek nikol, xp: çift nikol, uv: ultraviyole ışık).....	<b>82</b>
<b>Şekil 4.9</b> : Normal dayanımlı betonda yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulanması ile mikro çatlakların oluşması (pp: tek nikol, xp: çift nikol, uv: ultraviyole ışık) .....	<b>83</b>
<b>Şekil 4.10</b> : Ultra yüksek dayanımlı betonlarda 200°C etüv kürü işlemi sonrası ince kesitte çatlakların görüntüsü.....	<b>84</b>
<b>Şekil 4.11</b> : Kür koşullarının yarma çekme dayanımına etkisi .....	<b>85</b>
<b>Şekil 4.12</b> : Normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda su kürü uygulamasının yük-sehim ve yük- çatlak ağzı açılma deplasmanına etkisi.....	<b>86</b>
<b>Şekil 4.13</b> : Normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda 90°C buhar kürü uygulamasının yük-sehim ve yük- çatlak ağzı açılma deplasmanına etkisi.....	<b>87</b>
<b>Şekil 4.14</b> : Normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda 150°C yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulamasının yük-sehim ve yük- çatlak ağzı açılma deplasmanına etkisi.....	<b>87</b>
<b>Şekil 4.15</b> : Kür koşullarının kırılma enerjisine etkisi .....	<b>88</b>
<b>Şekil 4.16</b> : Kür koşullarının net eğilme dayanımına etkisi.....	<b>89</b>
<b>Şekil 4.17</b> : Kür koşullarının elastisite modülüne etkisi. ....	<b>90</b>
<b>Şekil 4.18</b> : Kür koşullarının karakteristik boya etkisi. ....	<b>91</b>
<b>Şekil 4.19</b> : Kür koşullarının hızlı klor iyonu geçirimsizliğine etkisi.....	<b>93</b>
<b>Şekil 4.20</b> : Kür koşullarının kılcal su emmeye etkisi. ....	<b>94</b>
<b>Şekil 4.21</b> : Normal dayanımlı betonda etüv kürü uygulanması ile çimento hamuru-agrega ara yüzeyinde oluşan çatlaklar (pp: tek nikol, xp: çift nikol, uv: ultraviyole ışık).....	<b>95</b>
<b>Şekil 4.22</b> : Kür koşullarının basınç altında su işleme derinliğine etkisi.....	<b>96</b>
<b>Şekil 4.23</b> : Aynı kesite sahip beton ve plastik paspayı numuneleri.....	<b>97</b>
<b>Şekil 4.24</b> : Paspayları kullanılmasının hızlı klor iyonu geçirimsizliğine etkisi.....	<b>98</b>
<b>Şekil 4.25</b> : Plastik paspayı kullanılan normal (solda) ve ultra yüksek dayanımlı (sağda) etüv kurusu numuneler.....	<b>99</b>
<b>Şekil 4.26</b> : Betondan paspayı kullanılan normal (solda) ve ultra yüksek dayanımlı (sağda) etüv kurusu numuneler.....	<b>99</b>
<b>Şekil 4.27</b> : Paspayları kullanılmasının 28 günlük numunelerde kılcal su emmeye etkisi.....	<b>100</b>
<b>Şekil 4.28</b> : Paspayları kullanılmasının 140 günlük numunelerde kılcal su emmeye etkisi.....	<b>101</b>
<b>Şekil 4.29</b> : Paspayı kullanılmayan referans numuneler ve beton paspayı kullanılan numunelerin hızlı klor iyonu geçirimsizliği.....	<b>102</b>
<b>Şekil 4.30</b> : Paspayı kullanılmayan referans numuneler ve beton paspayı kullanılan numunelerin kılcal su emmesi .....	<b>102</b>
<b>Şekil 4.31</b> : Kür çatlağı bulunan numunelerden karot numune alınması.....	<b>104</b>

Şekil 4.32 : Kür çatlağı bulunan beton silindir numune örnekleri.....	104
Şekil 4.33 : Çatlaklarının kılcal su emmeye etkisi. ....	105
Şekil 4.34 : Tecrit malzemesi (TM) uygulanmasının kılcal su emmeye etkisi .....	105
Şekil 4.35 : Yaşlandırmanın tecrit malzemesi (TM) uygulanmış kür çatlaklı numunelerdeki kılcal su emmeye etkisi .....	106
Şekil 4.36 : Yaşlandırmanın tecrit malzemesi uygulanmamış ve çatlak bulunmayan referans numunelerdeki kılcal su emmeye etkisi.....	107
Şekil 4.37 : Tecrit malzemesi (TM) uygulanması ve yaşlandırmanın kılcallık deney sonuçlarına etkisi.....	110
Şekil 4.38 : Tecrit malzemesi (TM) uygulaması yapılan normal dayanımlı betonda yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası iç yapı (pp: tek nikol, xp: çift nikol, uv: ultraviyole ışık).....	111
Şekil 4.39 : Tecrit malzemesi (TM) uygulaması yapılan ultra yüksek dayanımlı betonda yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası iç yapı (pp: tek nikol, xp: çift nikol, uv: ultraviyole ışık) .....	112
Şekil 4.40 : Tecrit malzemesi uygulanmadan laboratuvarında bekletilen (solda) ve tecrit malzeme uygulanarak yaşlandırma yapılan (sağda) normal dayanımlı betonun iç yapısı (uv: ultraviyole ışık).....	113
Şekil 4.41 : Tecrit malzemesi (TM) uygulanması ve laboratuvarında bekletmenin kılcal su emmeye etkisi. ....	114
Şekil 4.42 : Tecrit malzemesi (TM) uygulanan betonlarda yaşlandırma/laboratuvarında bekletme koşullarının kılcal su emmeye etkisi.....	114
Şekil 4.43 : Tecrit malzemesi (TM) uygulanmayan betonlarda yaşlandırmanın kılcal su emmeye etkisi. ....	116
Şekil 4.44 : Tecrit malzemesi uygulanmayan, yaşlandırma yapılan (solda) ve tecrit malzeme uygulanmayan, laboratuvarında bekletilen (sağda) normal dayanımlı betonun iç yapısı (uv: ultraviyole ışık).....	117
Şekil 4.45 : Tecrit malzemesi (TM) uygulanmayan normal dayanımlı betonda yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası etrenjit kristalleri oluşumu (pp: tek nikol, xp: çift nikol, uv: ultraviyole ışık).....	118
Şekil 4.46 : Tecrit malzemesi (TM) uygulanmayan normal dayanımlı betonda yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası karbonatlaşma oluşumu (pp: tek nikol, xp: çift nikol, uv: ultraviyole ışık).....	119
Şekil 4.47 : Tecrit malzemesi uygulanan (solda) ve tecrit malzeme uygulanmayan (sağda) normal dayanımlı betonun yaşlandırma çevrimleri sonrası iç yapısı (uv: ultraviyole ışık).....	121
Şekil 4.48 : TM uygulanmayan normal dayanımlı beton numunelerin donma çözülme çevrimleri sonrası görüntüsü.....	122
Şekil 4.49 : TM uygulanan normal dayanımlı beton numunelerin donma çözülme çevrimleri sonrası görüntüsü .....	122
Şekil 4.50 : TM uygulanmayan ultra yüksek dayanımlı beton numunelerin donma çözülme çevrimleri sonrası görüntüsü.....	123
Şekil 4.51 : TM uygulanan ultra yüksek dayanımlı beton numunelerin donma çözülme çevrimleri sonrası görüntüsü.....	123
Şekil 4.52 : Tecrit malzemesi (TM) uygulanmasının hızlı klor iyonu geçirimsizliğine etkisi .....	124
Şekil 4.53 : Yaşlandırmanın tecrit malzemesi (TM) uygulanmış çatlaklı numunelerdeki hızlı klor iyonu geçirimsizliğine etkisi. ....	125
Şekil A.1 : Su kürü uygulanan normal dayanımlı betonların yük- sehim ve yük- çatlak ağzı açılma deplasmanı eğrileri .....	159

<b>Şekil A.2 :</b>	Buhar kürü (60�C) uygulanan normal dayanımlı betonların yük- sehim ve y�k- çatlak ağzı açılma deplasmanı eğrileri .....	<b>159</b>
<b>Şekil A.3 :</b>	Buhar kürü (90�C) uygulanan normal dayanımlı betonların yük- sehim ve y�k- çatlak ağzı açılma deplasmanı eğrileri .....	<b>160</b>
<b>Şekil A.4 :</b>	Etüv kürü (150�C) uygulanan normal dayanımlı betonların yük- sehim ve y�k- çatlak ağzı açılma deplasmanı eğrileri. ....	<b>160</b>
<b>Şekil A.5 :</b>	Su kürü uygulanan yüksek dayanımlı betonların yük- sehim ve y�k- çatlak ağzı açılma deplasmanı eğrileri. ....	<b>161</b>
<b>Şekil A.6 :</b>	Buhar kürü (60�C) uygulanan yüksek dayanımlı betonların yük- sehim ve y�k- çatlak ağzı açılma deplasmanı eğrileri .....	<b>161</b>
<b>Şekil A.7 :</b>	Buhar kürü (90�C) uygulanan yüksek dayanımlı betonların yük- sehim ve y�k- çatlak ağzı açılma deplasmanı eğrileri. ....	<b>162</b>
<b>Şekil A.8 :</b>	Etüv kürü (150�C) uygulanan yüksek dayanımlı betonların yük- sehim ve y�k- çatlak ağzı açılma deplasmanı eğrileri. ....	<b>162</b>
<b>Şekil A.9 :</b>	Su kürü uygulanan ultra yüksek dayanımlı betonların yük- sehim ve y�k- çatlak ağzı açılma deplasmanı eğrileri. ....	<b>163</b>
<b>Şekil A.10 :</b>	Buhar kürü (90�C) uygulanan ultra yüksek dayanımlı betonların yük- sehim ve y�k- çatlak ağzı açılma deplasmanı eğrileri. ....	<b>163</b>
<b>Şekil A.11 :</b>	Etüv kürü (150�C) uygulanan ultra yüksek dayanımlı betonların yük- sehim ve y�k- çatlak ağzı açılma deplasmanı eğrileri. ....	<b>164</b>
<b>Şekil B.1 :</b>	Yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulanan normal dayanımlı betonun iç yapısı (uv: ultraviyole ışık).....	<b>165</b>
<b>Şekil B.2 :</b>	Yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulanan normal dayanımlı betonun iç yapısı (pp: tek nikol, xp: Çift nikol, uv: ultraviyole ışık).....	<b>165</b>
<b>Şekil B.3 :</b>	Yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulanan ultra yüksek dayanımlı betonun iç yapısı (uv: ultraviyole ışık).....	<b>166</b>
<b>Şekil B.4 :</b>	Yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulanan ultra yüksek dayanımlı betonun iç yapısı (pp: tek nikol, xp: Çift nikol, uv: ultraviyole ışık) .....	<b>166</b>
<b>Şekil B.5 :</b>	Tecrit malzemesi uygulanmayan laboratuvar ortamında bekletilen normal dayanımlı betonun iç yapısı (uv: ultraviyole ışık).....	<b>167</b>
<b>Şekil B.6 :</b>	Tecrit malzemesi uygulanmayan laboratuvar ortamında bekletilen normal dayanımlı betonun iç yapısı (pp: tek nikol, xp: Çift nikol, uv: ultraviyole ışık).....	<b>167</b>
<b>Şekil B.7 :</b>	Tecrit malzemesi uygulanmayan yaşlandırma yapılan normal dayanımlı betonun iç yapısı (uv: ultraviyole ışık).....	<b>168</b>
<b>Şekil B.8 :</b>	Tecrit malzemesi uygulanarak yaşlandırma yapılan normal dayanımlı betonun iç yapısı (uv: ultraviyole ışık).....	<b>168</b>



## **KÜR KOŞULLARI VE YALITIMIN YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARIN GEÇİRİMLİLİK, İÇ-YAPI VE MEKANİK ÖZELİKLERİNE ETKİLERİ**

### **ÖZET**

Betonun dayanım kazanma sürecinde içinde bulunduğu rutubet ve sıcaklık etkileri kür koşulları olarak tanımlanmaktadır. Çimentonun hidrasyonuna devam edebilmesi için ortamda su bulunması şarttır. Suyun olmaması durumunda hidrasyon yavaşlayarak durur ve bunun sonucu beton dayanım kazanmaz. Dolayısıyla, istenilen özelliklerde beton elde edebilmek için uygun kür koşullarının sağlanması gereklidir. Yerinde dökülen betonların en az yedi gün, puzolan içeren betonların ise daha uzun süreyle rutubetli tutulması önerilir. Üretim ve montaj akışının hızlı gerçekleştiği prefabrike beton sektöründe beton veya betonarme elemanlara uzun süreyle kür uygulanması pratik olmayıp üretim hızını yavaşlatmaktadır. Bu nedenle, böyle üretimlerde çimentonun hidrasyon hızını ve dolayısıyla dayanım kazanma hızını arttırmak için betonun içinde bulunduğu ortamın sıcaklığı yükseltilebilir. Hem yeterli rutubeti sağlamak hem de ortam sıcaklığını arttırmak için en yaygın kullanılan yöntem ise buhar kürüdür. Son yıllarda yaygınlaşmaya başlayan ve çeşitli uygulama alanları bulan ultra yüksek dayanımlı betonlarda, normal koşullarda uygulanan standart su kürü işlemi yerine, sıcaklığının yükseltilmesiyle yalıtılmış ortamda kür uygulanmaktadır.

Buhar kürünün uygulanması; sırasıyla; ön bekleme, kontrollü ısıtma, sabit sıcaklıkta tutma ve kontrollü soğutma olarak özetlenebilir. Bu adımların doğru biçimde uygulanamaması veya zamanlamasının doğru yapılamaması gibi hallerde betondan beklenen performansın elde edilememesi, hatta betonun çatlaması gibi durumlarla karşılaşılabilir. Örneğin ortam sıcaklığının hızlı düşmesi durumunda betonun dış yüzeyi hızlı bir şekilde soğurken iç kısımlar daha sıcak kalır, iç kısımlar ile dış yüzeyler arasında aşırı sıcaklık farkı meydana gelir, bu durumda deformasyonlar da farklı olduğundan betonda çatlamlar ortaya çıkabilir. Çatlayan bir elemanın mekanik özelliklerinin ve özellikle de geçirimsizlik özelliklerinin olumsuz etkileneceği açıktır. Örneğin, paspayında çatlak bulunması halinde klor iyonunun beton yüzeyinden içeriye taşınımı çok hızlı bir şekilde olur, böylece herhangi bir zamanda, çatlağın olduğu kısımdaki klorür konsantrasyonu, çatlak olmayan diğer bölgelere göre çok daha yüksek olur. Çatlaklı kısımdaki yüksek klorür konsantrasyonu sonucu bu bölgelerde korozyon çok daha kısa sürede meydana gelir. Ayrıca çatlaklardan başka zararlı etkilerin ve suyun taşınımı da hızla gerçekleşeceğinden bu etkiler betona çok daha kolay bir şekilde zarar verebilir. Donma-çözülme gibi fiziksel etkiler de daha hızlı biçimde hasar yaratabilir. Bu nedenlerle, betonarme elemanlardaki donatıya kadar ulaşan çatlakların uygun bir yöntemle onarılır. Ayrıca, yapının maruz kalacağı dış etkilere bağlı kalmak kaydıyla genişliği yaklaşık 0,2 mm'nin altındaki çatlaklar ve ağ şekilli çatlakların tecriti de gereklidir. Bundan dolayı çatlaklı beton yüzeylerinin su itici malzemelerle kaplanması önerilmektedir, ancak bu kaplamaların ömürleri, güneş ışınları, sıcaklık, ıslanma-kuruma, donma

çözülme gibi çeşitli çevresel etkiler altında işlevlerini sürdürüp sürdürmedikleri konusunda literatürde yeteri kadar çalışma olmayıp uygulamaların etkinlikleri hakkındaki bilgi birikimi sınırlıdır.

Servis ömrü daha uzun yapılar elde edebilmek için paspayının kalitesi dikkate alınmalı ve düşük geçirimsizliğe sahip, çatlak içermeyen paspayı sağlayabilmek amacıyla uygulanan kür koşullarına da gereken özen gösterilmelidir. Yeterli kalınlıkta paspayı ile donatı korozyondan korunabilir ve uzun servis ömrü sağlanabilir. Ancak paspayı tabakasının oluşturulmasında kullanılan malzemelerin kendisini çevreleyen beton ile oluşturduğu temas yüzeyinin geçirimsizliği üzerine literatürde yapılan çalışmalar yeterli değildir.

Sunulan bu çalışmanın temel amacı kür koşullarının betonun bazı fiziksel ve mekanik özelliklerine etkilerini incelemektir. Bu kapsamda yapılan deneysel çalışmada; normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı olmak üzere üç farklı sınıfta betonlar üretildi. Bu betonlar; standart koşullarda su kuru, buhar kuru ve yalıtılmış ortamda yüksek sıcaklık kuru olmak üzere üç farklı kür koşulunda tutuldu. Üretilen betonların basınç dayanımları, klor iyonu geçirimsizlikleri ve kılcal su emme değerleri belirlendi. Elde edilen deney sonuçları uygulanan kür koşullarının beton özelliklerini önemli oranda etkilediğini ortaya koydu. Buhar kuru uygulanması sırasında veya betonun dökümü sonrasında bakım koşullarındaki aksaklıklara bağlı olarak oluşan erken yaş çatlaklarının etkisi de çalışma kapsamında incelendi. Bu amaçla, üretilen bazı beton numunelerinde çatlaklar oluşturuldu ve bu çatlaklı beton yüzeyleri monomerik alkilalkoksilan esaslı su itici malzeme ile kaplandı. Ardından, geçirimsizlik deneyleri yapılarak bu malzemenin etkinliği değerlendirildi. Ayrıca, beton ve plastik olmak üzere farklı tip paspayı kullanılmasının betonların geçirimsizlik özelliklerine etkileri de çalışma kapsamında incelendi.

Çalışmada normal dayanımlı betonda nominal çimento dozajı  $300 \text{ kg/m}^3$ , su/ çimento oranı 0,52 olan beton karışımı kullanıldı. Yüksek dayanımlı beton için çimento dozajı  $500 \text{ kg/m}^3$ , su/ çimento oranı 0,32 olan beton karışımı ve ultra yüksek dayanımlı betonda ise çimento dozajı  $1000 \text{ kg/m}^3$ , su/ bağlayıcı oranı 0,17 ve su/çimento oranı 0,22 olan beton karışımları göz önüne alındı.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, yüksek sıcaklıktaki kür uygulamaları ile normal dayanımlı betonlar ve yüksek dayanımlı betonların basınç dayanımlarının azaldığı görülmektedir. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise yüksek sıcaklıktaki kür uygulamaları basınç dayanımını olumlu etkilemekte ve dayanımlar artmaktadır. Yüksek sıcaklıkta kür yapıldığında normal dayanımlı betonlardaki dayanım azalması yüksek dayanımlı betonlara göre çok daha belirgindir. Normal ve yüksek dayanımlı betonların yüksek sıcaklıktaki kür etkisine bağlı olarak iç yapıları zarar görmekte ve geçirimsizlikleri artmaktadır. Ancak, ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise buhar kuru uygulaması ile iç yapı iyileşmekte ve daha yoğun bir yapıya dönüşmektedir.

Tüm beton sınıflarında, plastik paspayı kullanılan numunelerde hem hızlı klor iyonu geçirimsizliği hem de kılcal su emme değeri beton paspayı kullanılan numunelere göre artış gösterdi. Plastik paspayı kullanılması ile ultra yüksek dayanımlı betonun hızlı klor iyonu geçirimsizliği değerinde oluşan artış, normal ve yüksek dayanımlı betonlara kıyasla daha fazladır. Paspayı kullanılmayan referans betonlar ile beton paspayı kullanılan numunelerin kılcal su emme ve hızlı klor iyonu geçirimsizliği özellikleri incelendiğinde ise tüm beton sınıflarında betonun geçirimsizlik değerlerinin paspayı kullanılması ile arttığı belirlendi.

Çatlak bulunan beton numunelere su itici tecrit malzemesi uygulanması ile betonların hem kılcal su emme değerinde hem de hızlı klor iyonu geçirimsizliği değerlerinde belirgin bir azalma görülmektedir. Bu azalma, bütün beton sınıflarında olmakla birlikte en belirgin etkiler normal dayanımlı betonlarda, sonra sırasıyla yüksek dayanımlı ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda olmaktadır. Tecrit malzemelerinin kullanılması ile çatlak bulunan numunelerin geçirimsizlik değerleri azalmaktadır. Yaşlandırma deneyi, hem çatlak bulunan tecrit malzemesi uygulanmış numunelere hem de çatlak bulunmayan referans beton numunelere uygulandığında, yaşlandırma etkisi ile başlangıçta çatlak bulunmayan referans numunelerde dahi ağ şeklinde çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Deney sonrasında tüm numunelerin kılcal su emme değerinde artış gözlemlenmiştir. Ancak, tecrit malzemesi uygulanan numunelerin yaşlandırma sonrasında kılcal su emme değerindeki artış daha azdır. Yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri tecrit malzemesi uygulanan tüm sınıflardaki beton numunelere zarar vermekte ancak normal dayanımlı betonda verdiği zarar, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betona göre daha fazla olmaktadır. Yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası normal dayanımlı betonlarda tecrit malzemesi etkinliği önemli ölçüde azalmaktadır. Bu çevrimler sonrası normal dayanımlı beton yüzeyinde tecrit malzemesi kaybolmakta, ancak ultra yüksek dayanımlı betonda yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası yüzeye uygulanan tecrit malzemesi görülmektedir. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonunda hızlı klor iyonu geçirimsizliği değeri ihmal edilebilecek düzeydedir. Bu sonuç tecrit malzemesi uygulanan ultra yüksek dayanımlı betonun yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerinden etkilenmediğini göstermektedir. Bu durumun oluşmasında tecrit malzemesi dışında betonun iç yapısı da etkilidir.



# **EFFECTS OF CURING CONDITIONS AND INSULATION ON PERMEABILITY, MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH STRENGTH CONCRETE**

## **SUMMARY**

Effects of the humidity and temperature on concrete are defined as curing conditions. There should be humidity in the air for cement to continue hydration process. In the absence of humid, hydration becomes slow until it stops and consequently, concrete will not gain strength. For this reason, appropriate curing conditions should be provided in order to get concrete having desired properties. 7 days for cast-in-place concrete, more than 7 days of curing in humid environment for concrete made of pozzolana cement are advised. However, in prefabricated concrete industry, where production and assembly processes are faster, applying long curing times for concrete and concrete elements slows production. In these situations, temperature can be increased to increase hydration rate and so strength gaining rate. The most common method for both maintaining appropriate humidity and for increasing temperature is to apply steam curing. Applying curing by increasing temperature in isolated environment is applied instead of standard humid curing under normal conditions while producing ultra-high strength concrete which have spread in the recent years.

Steam curing processes can be summarized as pre-waiting, controlled heating, holding at constant temperature and controlled cooling. In case of these processes are not applied correctly and timely, lack of strength of the concrete or cracking at the surface of the concrete can be seen. For example, in case of fast dropping of temperature in the environment cause the surface of the concrete to cool quickly while inside of the concrete is still warm. This causes high temperature difference between inside and surface of the concrete which will lead different deformations and so cracking. It is obvious that a cracked concrete is affected negatively, by means of permeability and mechanical properties. For instance, in case of presence of cracking on the concrete spacer, transportation of chloride ions will happen very quickly and thus Chloride concentration at the cracking area will be much higher than other places. This high-level chloride concentration causes corrosion to happen in much shorter time. Besides, because of fast passage of other harmful effects and water through these cracking, these effects may harm the concrete much more easily. Physical influences like freeze-thawing would create faster damage. For these reasons, cracking in concrete elements reaching steel reinforcement should be repaired appropriately. Additionally, depending on environmental effects faced by concrete elements, cracking smaller than 0.2 mm or web-shaped cracking should be insulated. For this, it is advised to cover the cracked concrete surface to be covered with water-repellent materials.

However, there are few studies in the literature concerning life-time of these cover materials and influences of environmental effects like sun-light, temperature, freeze-thawing on these materials.

In order to achieve structures with long service lives, the quality of concrete cover should be taken into account and to obtain a crack-free cover with low permeability, care should be given to the curing conditions. With sufficient cover thickness, the reinforcement can be protected from corrosion and long service life can be ensured. However, studies in the literature related to the permeability of the interfacial zone between the cover material and the surrounding concrete is not enough.

The main objective of the presented work is to study the effect of curing conditions on the physical and mechanical properties of concrete. In the experimental work; concretes in three different classes including normal strength, high strength and ultra high strength were cast. The concretes were cured in three different curing conditions which were; water curing at standard conditions, steam curing and high temperature curing in an isolated environment. Compressive strength, chloride permeability and capillary water absorption of the samples were determined. The experimental results demonstrated that curing conditions significantly affect the properties of concrete. The effect of early age cracks, occurring due to deficiencies in steam curing or the conditions after casting, were also investigated in the study. Cracks were formed on some of the concrete samples and the cracked concrete surfaces were coated with the water repellent material. Permeability tests were made by on these samples to investigate the effectiveness of this material. In addition, the effects of different types of cover spacers materials, such as concrete or plastic, on the permeability of concrete were also investigated.

In this study, for normal strength concrete 300 kg/m<sup>3</sup> cement and 0,52 water/cement ratio; for high-strength concrete 500 kg/m<sup>3</sup> cement and 0,32 water/cement ratio and for ultra-high-strength concrete 1000 kg/m<sup>3</sup> cement and 0,17 and 0,22 water/cement ratio are used.

Applying curing at high temperature causes decrease in compressive strengths of normal strength and high strength concrete. Whereas, applying curing at high temperature has positive impact on compressive strength of ultra-high strength concrete, in other words, increase in strength. Decrease in strength because of curing is more obvious for normal concrete than high strength concrete. Internal structure of normal and high-strength concrete are harmed by the effects of curing at high temperature that also cause increase in permeability. On the other hand, internal structure of ultra-high strength concrete is healing and becoming denser under curing at high temperature.

For all concrete classes, samples with plastic spacers have higher capillary water absorption and rapid chloride permeability compared to those with concrete spacers. The increase in the chloride permeability is higher for the ultra high strength concretes compared with normal and high strength concretes. When capillary water absorption and rapid chloride ion permeability of the concretes with and without spacers are analyzed, it is seen that the use of spacers increases the permeability for all concrete classes.

It is seen that applying water repellent material to cracked concrete samples decrease both capillary absorption and rapid chloride permeability values. These decreases are seen at all types of concrete, however, mostly at normal strength concrete, then high-strength concrete and the least at ultra-high strength concrete. Permeability values of cracked samples are decreased by using water repellent materials. Aging tests are applied to both water repellent material applied samples and blank samples not having cracking. Aging test creates web-shaped cracking even on the blank samples. As a result of these test capillary absorption values of all samples are increased, however, increase in water repellent material applied sample is less than the other samples. These cycles damage all concretes that the water repellent material had been applied. However, this damage is higher in normal strength concrete than those in the high and ultra high-strength concretes. The efficiency of the water repellent material is reduced significantly in normal strength concrete after aging and freeze-thaw cycles. After the aging and freeze-thaw cycles, the water repellent material on normal concretes is lost but those on ultra-high strength concrete is still observed. For ultra high strength concretes, the rapid chloride permeability values are negligible even after aging and freeze-thaw cycles. This result shows that ultra high-strength concrete is not affected by this aging. The internal structure of the concrete is also effective for this result.





## 1. GİRİŞ

Sürdürülebilirlik kavramında beton yapıların kullanım ömrünün uzatılması en önemli konulardan biridir. Beton; çimento, su ve agregadan oluşan kompozit bir malzeme olup istenilebilen forma sokulabilmesi ve bileşen malzemelerinin kolay ve ucuz şekilde temin edilebilmesi ile günümüzde en yaygın olarak kullanılan yapı malzemesidir. Betonun bu yaygın kullanımını dikkate alındığında bu malzemeyi daha etkin kullanmak esastır.

Betonun sürdürülebilirliği dürabilite kavramı ile yakından ilişkilidir. Dürabilite betonun işlevini, kendisinden beklenen servis ömrü boyunca yeterli performansta devam ettirme yeteneğidir. Beton servis ömrü boyunca birçok çevresel etkiye maruz kalmaktadır. Bunlar, betona ayrı ayrı etki ettiği gibi birkaçı aynı anda beton için zararlı etkiler oluşturabilir. Bu etkiler; fiziksel, kimyasal, fiziko-kimyasal veya mekanik yollarla olabilir. Bu etkilerden bazıları alkali agrega reaksiyonları, karbonatlaşma, klorür etkisi, termal etkiler, donma çözülme, ıslanma kuruma, sülfat etkileri ve asit etkileri olarak düşünülebilir.

Beton iç yapısının boşluksuz ve geçirimsiz olması dürabilite açısından önemlidir. Betonda oluşan zararların büyük bir kısmı sıvıların beton içerisine girmesi ve taşınması ile ilgilidir. Bu sıvıların birlikte betona nüfuz eden klorür ve diğer zararlı iyonlar beton içerisine gömülü donatıya ulaşarak donatının korozyona uğramasına neden olmaktadır. Korozyona uğrayan betonda çatlaklar oluşmakta ve bu durum zararlı iyonların daha kolay betona ulaşmasını sağlayarak birbirini tetikleyen bir hasarlar zincirinin betonarmede oluşumuna neden olmaktadır.

Betona zararlı iyonları taşıyan sıvıların girişi beton içindeki birbiri ile bağlantılı kılcal boşluklar ve çatlaklar nedeniyle olmaktadır. Betonda boşluklar ve çatlakların oluşumu ise beton tasarımına, döküm ve yerleştirme koşullarına, kür uygulamalarına, kimyasal katkıların kullanılmasına, fazla suyun terlemesi ve buharlaşması ve benzeri etkilere bağlıdır.

Dürabilite kavramında önemli diğer bir parametre beton elemanının içinde bulunan en dış donatının üzerindeki beton örtüsü olarak tanımlanan paspayı tabakasının kalınlığı ve kalitesidir. Geçirimsiz bir beton üretilmesi ve yeterli kalınlıkta paspayı kullanımı ile betonda klorür difüzyonu ve karbonatlaşma önemli ölçüde engellenebilir.

### **1.1 Çalışmanın Konusu**

Bu çalışmanın konusu farklı kür koşullarının betonun bazı fiziksel ve mekanik özelliklerine etkilerini belirlemektir. Ayrıca, kür etkileri ve/veya açık hava koşullarına maruz bırakılarak yüzeylerinde çatlak oluşturulan bazı beton numunelere su itici tecrit malzemesi uygulanarak geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır. Böylece çatlak bulunan numunelere tecrit işlemi yapılmasının etkinliği belirlenmiştir. Ayrıca bu numuneler tekrarlı yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerine tabi tutularak bu etkiler altında işlevlerini sürdürüp sürdürmedikleri araştırılmıştır. Çalışmada hem farklı kür koşullarına maruz bırakılan numunelerin hem de tecrit işlemi yapılan ve sonrasında tekrarlı yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri uygulanan numunelerin iç yapı incelemeleri de gerçekleştirilmiştir. Çalışmada beton paspayı ve plastik paspayı kullanılmasının betonların geçirimsizlik özelliklerine etkileri de araştırılmıştır.

### **1.2 Çalışmanın Amaç ve Kapsamı**

Bu çalışmanın esas amacı farklı kür koşullarının betonun bazı fiziksel, mekanik ve iç yapı özelliklerine etkilerini incelemektir. Bu kapsamda; normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı olmak üzere üç farklı sınıfta beton numuneleri üretilmiş ve bunlar standart koşullarda su kürü, buhar kürü ve yalıtılmış ortamda yüksek sıcaklık kürü olmak üzere üç farklı kür koşulunda tutulmuştur. Üretilen betonların basınç dayanımları, yarma çekme dayanımları, kırılma enerjileri, net eğilme dayanımları gibi mekanik özellikleri ile klor iyonu geçirimsizlikleri, basınç altında su işleme derinlikleri ve kılcal su emme değerleri gibi geçirimsizlik özellikleri belirlenmiştir.

Ayrıca, bazı numunelerde oluşturulan çatlaklı beton yüzeyleri su itici tecrit malzemesi ile yalıtılarak geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır. Su itici malzemenin etkisini inceleyebilmek amacıyla bu malzemenin uygulandığı betonların bazıları UV

ile yaşlandırma deneylerine ve donma çözülme çevrimlerine tabi tutulmuştur. Tekrarlı yaşlandırma ve donma çözülme deneylerinden sonra numunelerin geçirimsizlik özellikleri yeniden belirlenmiştir. Çalışmada, kapalı çevrimli deplasman kontrollü cihaz yardımıyla eğilme halinde betonun mekanik davranışına farklı kür süreçlerinin etkisi de incelenmiştir. Fiziksel ve mekanik davranışlar iç yapısal incelemelerle desteklenmiş ve karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışmada plastik ve beton paspayı kullanılmasının beton numunelerin geçirimsizlik özelliklerine etkileri de incelenmiştir. Bu kapsamda normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı üç farklı sınıf betonda plastik ve beton paspayı kullanılan numuneler üretilmiştir. Bu numunelere hızlı klor iyonu geçirimsizliği ve kılcal su emme deneyleri yapılarak numunelerin geçirimsizlik özellikleri incelenmiştir.

Yapılan bu çalışma ile kür koşullarının ve yüksek sıcaklık değerlerinde uygulanan ısıtma işlemlerinin betonların fiziksel, mekanik ve iç yapı özelliklerine etkileri incelenmiştir. Böylece, özellikle prefabrike sektöründe yaygın olarak kullanılan buhar kürü uygulamalarında maksimum sıcaklık değerlerine uyulmadığı takdirde beton özelliklerinde ortaya çıkabilecek değişimler incelenmiştir. Mineral katkı kullanılmayan normal ve yüksek dayanımlı betonda uygulanan ısıtma işlem sıcaklık değeri yükseldikçe betonların fiziksel ve mekanik özellikleri bu durumdan belirgin şekilde etkilenmektedir. Ayrıca, yüksek sıcaklıkta yapılan kür uygulamaları beton iç yapısını da etkilemekte, betonda çatlaklar oluşmasına ve hidrasyon ürünlerinin çimento hamuru içerisinde kararsız ve heterojen dağılımına sebep olmaktadır. Bu çalışma ile prefabrike beton ürünlerin bir an önce dayanım kazanmasını böylece, erken sürelerde sevk işlemini sağlamak için yüksek sıcaklıklarda buhar kürü uygulamalarında maksimum buhar kürü sıcaklıklarına uyulmadığı takdirde beton özelliklerindeki oluşabilecek değişiklikler incelenmiştir.

Çalışmada kür uygulamaları ve bakım şartlarına uyulmaması durumunda betonda erken yaşta oluşan çatlakların beton geçirimsizlik özelliklerine etkileri de incelenmiştir. Çatlakların oluşması ile betonun geçirimsizlik özelliklerinin arttığı, suyun ve diğer zararlı etkilerin betonarme donatıya çok daha kolay ulaştığı bilinmektedir. Bu çalışma kapsamında betonda kür uygulamaları ve bakım şartlarına uyulmaması nedeniyle ortaya çıkan ve genişliği 0,2 mm altında olan çatlakların tecrit edilmesi yapılmıştır. Ancak, literatürde tecrit malzemelerinin uygulanması sonrası servis şartları (yük etkisi, aşınma, donma çözülme, yaşlanma, ultraviyole etkisi, ıslanma-

kuruma, buz çözücülerin etkisi vb.) altında bu malzemelerin performansı hakkında yeterli sayıda çalışma mevcut değildir. Bu çalışmada tecrit işlemi uygulanan ve uygulanmayan numunelere yapılan donma çözülme, yaşlandırma, ıslanma-kuruma ve buz çözücü tuzların etkisi ile saha şartları sağlanmaya çalışılmış ve çeşitli yıpranma etkileri altında tecrit malzemelerin etkinliğini sürdürebilme özeliği belirlenmiştir. Böylece, 0,2 mm genişlik değerlerini aşmayan kılcal çatlaklar için yapılan tecrit işlemlerinin etkinlikleri konusunda literatüre katkıda bulunulmuş ve özellikle normal dayanımlı betonda yaşlandırma ve donma çözülme etkileri altında tecrit işleminin etkinliğini ilk uygulama yapılan durumuna göre karşılaştırılması yapılmıştır.

Betonarmede, paspayı örtüsünde çatlak bulunmaması ve paspayı kalınlığının yeterli olması donatının korozyondan önlenmesi için çoğu durumda yeterli görülmektedir. Ancak kür koşulları ve bakım şartlarına uyulmadığı takdirde paspayı örtüsünde çatlaklar oluşabilmektedir. Ayrıca donatının korozyona uğraması paspayı örtüsünün geçirimsizliği ile son derece ilgilidir. Paspayı örtüsü yeterli kalınlıkta olsa dahi kür koşulları ve bakım şartlarına uyulmaması paspayı örtüsünü etkileyebilmektedir. Bu nedenle paspayı örtüsünün kalitesi diğer bir deyişle geçirimsiz olmasını sağlamak önemlidir. Bu çalışmada paspaylarının kalınlığı ve kalitesi dışında bugüne kadar üzerinde pek çalışma yapılmayan bir konu olarak paspaylarının kendilerini çevreleyen beton ile oluşturdukları temas yüzeyinin geçirimsizlik özellikleri belirlenmiştir. Beton paspayları kullanılması ile plastik paspayı kullanılması durumuna göre betonların geçirimsizlik özelliklerinin karşılaştırılması ile yapıların servis ömrünün uzatılması konusuna katkıda bulunulmuştur.

## **2. BETONUN DÜRABİLİTESİ VE TECRİT MALZEMESİ KULLANILMASI KONUSUNDA YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR**

Beton bileşenlerinin büyük çoğunluğunun agregalar olması nedeniyle ucuz ve kolay temin edilebilmekte ve tüm dünyada en yaygın yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Betonla birlikte yaygın kullanıma sahip bir diğer yapı malzemesi ise çeliktir. Beton ve çelik kendi başlarına kullanıldıkları gibi birlikte de kullanılmaktadır. Bu malzemelerin kullanılmasında en önemli hususlardan birisi çelik malzemenin ileri teknolojiye dayanan tesislerde kontrollü olarak belirli standartlara göre üretilmesidir. Böylece özellikleri ve kalitesi daha iyi kontrol edilmektedir. Ancak, betonda durum daha karmaşıktır. Günümüzde inşaat faaliyetlerinin büyüklüğü dikkate alındığında beton ve özelliklerinin daha çok bilinmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Esasen çelik malzemeye benzer biçimde betonun temel hammaddesi olan çimento içinde standartlar oluşturulmuş ve sağlanması gerekli koşullar tanımlanmıştır. Ancak, çimentonun özellikleri ve kalitesinin bilinmesi betonun tümüyle özelliklerinin bilinmesi için yeterli değildir.

Betonda çimento dışında, farklı mineral katkıların kullanılması, kimyasal katkıların betona eklenmesi, geri kazanılan agregaların kullanılması vb. durumlar da beton özellikleri etkilenmektedir. Yine çelik ve sentetik fiberlerin betona katılması, betonlara buhar kürü, otoklav kürü vb. ısıl işlemlerin uygulanması, hidrolik presleme veya şok vibrasyon uygulamaları da betonun özelliklerini etkilemektedir. Ayrıca, beton hazırlandıktan sonra taşıma, yerleştirme, sıkıştırma ve kür işlemleri de betonun kalitesi üzerinde etkili olmaktadır. Kısacası betonun üretilmesi, sahada yerleştirilmesi ve kür uygulanması dahil her aşaması beton özelliklerini etkilemektedir.

Günümüzde farklı beklentilere yönelik birçok beton sınıfı ve çeşidi ortaya çıkmıştır. Betonlar kullanım amacı, kullanılan bileşen malzemelerin niteliği ve çeşitliliği,

agreganın maksimum tane boyutu, betonun birim ağırlığı ve maruz kalacağı çevresel etkiler vb. birçok kritere göre sınıflandırılmaktadır. Ancak yine de en yaygın olarak basınç dayanım değerlerine göre sınıflandırılmaktadır [1].

## **2.1 Normal, Yüksek ve Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar**

Normal dayanımlı betonların basınç dayanımları 20-50 MPa değişmektedir. Ancak, 1950'li yıllarda 34 MPa ve üzeri betonların, 1960'lı yıllarda ise 41 MPa ve üzerinin yüksek dayanımlı beton kabul edildiği düşünüldüğünde günümüzde bu tanımlar değişmiştir. Bazı kaynaklar 70 MPa basınç dayanıma kadar olan betonları normal dayanımlı beton olarak kabul etmektedir. Ayrıca, yüksek dayanımlı betonun basınç dayanımı değerleri için coğrafi bölgeler arasında da farklılıklar vardır. Örnek olarak, 62 MPa basınç dayanımına sahip betonların yaygın şekilde kullanıldığı bir bölgede 83-103 MPa arasında betonlar yüksek dayanımlı kabul edilirken, 34 MPa dayanımın yaygın ve ticari olarak kullanıldığı bölgelerde 62 MPa yüksek dayanıma karşılık gelmektedir [2].

Normal dayanımlı betonlar üretiminin kolay olması, ucuz hammadde ve işgücü temini ile ekonomik olarak üretilebilen betonlardır. Yapı sektöründe ekonomik üstünlükleri nedeniyle bu betonlar günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yüksek dayanımlı betonlar ise çimento içeriği minimum 400 kg/m<sup>3</sup> ve 28 günlük basınç dayanımları minimum 50 MPa olan betonlar şeklinde tariflenmektedir [3].

Yüksek dayanımlı betonların en temel özeliği erken yüksek dayanım ve çok yüksek nihai basınç dayanımı göstermesidir. Betonda dayanımın temel parametreleri su/çimento oranı ve çimento içeriğidir. Yüksek dayanımlı betonların üretilmesi için betonda su/çimento oranının azaltılması ile kılcal boşluklar azalmakta ve daha geçirimsiz bir iç yapı oluşmaktadır. Yüksek dayanımlı betonları, normal dayanımlı betonlardan ayıran temel özellikler daha yüksek erken dayanımlara sahip olması ve düşük su/çimento oranı ile daha geçirimsiz olmalarıdır.

Bugün yapıların servis ömürleri boyunca çeşitli etkiler nedeniyle hasara uğraması betonun önemli bir problemidir. Betonun tasarım şartlarına dayanım kriteri yanında dürabilitenin de ilavesi ile performansa göre tasarım gittikçe önem kazanmaktadır. Basınç dayanımının yanı sıra dürabilitesi de yeterli olan yüksek dayanımlı betonlar, özellikle uzun servis ömrü gerektiren yapılarda tercih edilmektedir. Bu betonlar

normal dayanımlı betonlara göre hem dayanım üstünlükleri hem de dürabilitesinin yüksek olması nedeniyle giderek dünyada daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde ise uzun süreler TS 500 yapım kuralları standardında en yüksek dayanımın 50 MPa [4] olması nedeniyle henüz istenilen seviyede yaygınlaşmamıştır.

Yüksek dayanımlı betonlar coğrafi, iklimsel ve kimyasal çevrenin zorlayıcı olduğu durumlarda, yüksek dayanımın ve yapının toplam ağırlığının önem kazandığı yapılarda tercih edilmektedir. Genel olarak; köprülerde, yüksek binalarda, trafiğe çabuk açılması gereken altyapı uygulamalarında, prefabrikasyon imalatlarında, sürekli su ile temas halindeki yapılarda; liman vb. zorlu çevre koşullarına maruz kalan yapılarda kullanılmaktadır.

Normal dayanımlı beton yerine yüksek dayanımlı betonlar ile daha ince ve narin kesitlerle aynı yükleri taşımak mümkün olmaktadır. Amerika'da bir köprü inşaatında 35 MPa dayanıma sahip normal dayanımlı beton yerine 60 MPa beton kullanılması ile toplam beton hacminde %30 tasarruf sağlanmıştır [5].

Normal dayanımlı beton ile yüksek dayanımlı beton arasındaki temel farklardan bir tanesi de yük-şekil değiştirme eğrisinde oluşan farklılıktır. Beton, üzerinde herhangi bir yük etkimese dahi içerisinde boşluk ve çatlaklar bulunan yarı gevrek bir malzemedir. Beton nispeten küçük yükler altında lineer bir davranış gösterirken daha büyük yük etkilerinde beton içerisindeki boşluklar ve çatlaklar harekete geçerek nonliner bir davranış sergilemeye başlar. Özellikle de çimento hamuru ile agrega temas yüzeyi arasındaki boşluklar ve çatlaklar büyüyerek betonda kalıcı şekil değiştirmeler meydana getirir. Bu kalıcı şekil değiştirmeler, kırılmanın gerçekleşeceği düzlemde tepe yükü çevresinde birikmeye başlar. Böylece çatlaklar belirli bir süre içerisinde daha da ilerleyerek betonun yük taşıma kapasitesinin hızla sıfıra düşmesi engellenir. Bu sebeple beton yarı gevrek bir malzeme kabul edilir [6].

Normal dayanımlı betonlarda yük-şekildeğiştirme eğrisinin lineerliği tepe yükü değerinin % 40 mertebesine ulaştığında kaybedilirken yüksek dayanımlı betonlarda bu eğri tepe yükünün % 90 değerine kadar lineer olarak devam edebilmektedir [7].

Bir diğer deyişle normal dayanımlı betonlar nihai dayanımlarının yarısına dahi ulaşmadığında betonda çatlaklar ve boşluklar gelişmeye başlayarak kalıcı şekil değiştirmeler olurken yüksek dayanımlı betonlarda nihai dayanım değerinin % 80- %

90 mertebesine kadar çatlaklar ve boşluklar gelişmemekte ve kalıcı şekil değiştirmeler olmamaktadır.

Normal dayanımlı betonlardan farklı olarak yüksek dayanımlı betonlarda, çimento hamuru ile agrega ara yüzeyindeki boşluklar ve kılcal çatlakların azaltılması ile agreganın dayanımı da ön plana çıkmaktadır. Normal dayanımlı betonlarda çimento hamuru agrega arayüzeyi zayıf olduğu için kırılmalar bu bölgede yaşanırken yüksek dayanımlı betonlarda çimento hamuru agrega arayüzünün iyileştirilmesi nedeniyle dayanım kayıpları agregaların kırılması ile oluşmaktadır. Yüksek dayanımlı betonlarda agrega dayanımlarının arttırılmasıyla beton dayanımında artışlar elde edilmektedir.

Dünyada yüksek dayanımlı betonlar en yaygın olarak yüksek katlı binalarda ve yüksek açıklıklı köprü gibi özel yapılarda kullanılmaktadır. Bu betonların kullanılması ile yüksek binalar kolon kesitleri azaltılarak, köprüler ise daha büyük açıklıklarla daha etkin şekilde inşa edilebilmektedir. Yüksek dayanımlı betonlar kullanılarak yapılan binalar ve köprülere örnekler Çizelge 2.1’de verilmektedir.

**Çizelge 2.1 :** Yüksek dayanımlı beton kullanılarak yapılan yüksek katlı binalar ve büyük açıklıklı köprüler için örnekler [2].

<b>Bina/Köprü Adı</b>	<b>Bulunduğu Yer</b>	<b>Yükseklik (m)</b>	<b>Açıklık (m)</b>	<b>Betonun Basınç Dayanımı (MPa)</b>	<b>Yapım Yılı</b>
Burj Khalife	Birleşik Arap Emirlikleri	828	-	80	2009
Taipei 101	Tayvan	509	-	69	2004
Petronas Kuleleri	Malezya	452	-	80	1998
CNT Süper Köprüsü	Japonya	-	40	102	1993
Concho Nehri Köprüsü	Amerika	-	48	101	1998

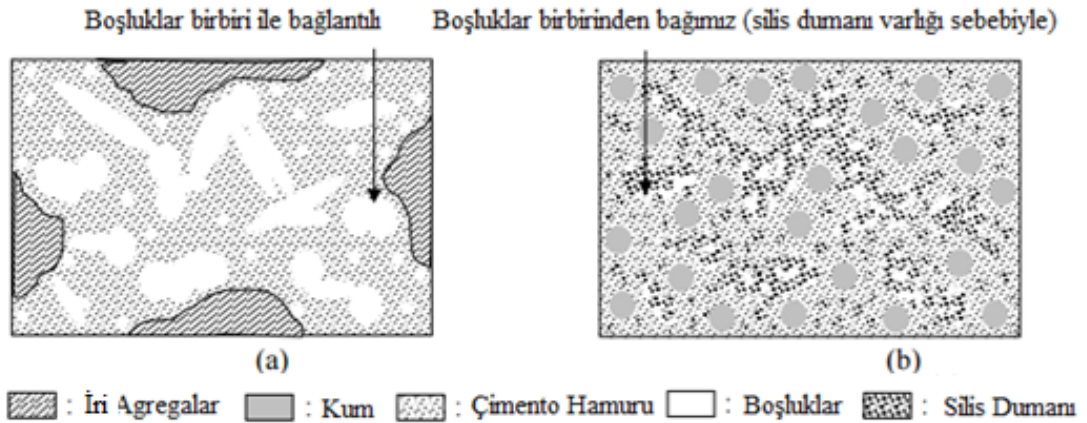
Yüksek performanslı beton (YPB) ile yüksek dayanımlı beton (YDB) geleneksel olarak eş anlamlı olarak kullanılmaktadır. Yüksek mukavemet elde edilmesi için su/çimento oranının azaltılması aynı zamanda betonun diğer özelliklerini de iyileştirir ve her iki beton türü için ortak özelliklerdir. Bununla birlikte, bugün yüksek performanslı betonlar tarifi mineral katkı ilavesi ile birlikte kabul edilmektedir.



Yüksek dayanımlı betonlar ile yüksek performanslı betonları ayıran temel etken mineral katkıların kullanımudur. Böylece, beton bazı olumsuz özelliklere sahip olmadan (yüksek hidratasyon ısısı vb.) su/çimento oranı azaltılması başarılmaktadır. Bu nedenle, performans kelimesi iç yapı ve beton bileşimi ile bağlantılıdır. Aslında, performans kelimesi betonun herhangi özeliği için de kullanılabilir. Taze betonda mükemmel işlenebilirlik, kütle betonlarda düşük hidratasyon ısısı, yollarda hızlı priz alan ve sertleşen beton ve depolama alanlarında geçirimsiz beton yüksek performansın göstergesi olarak düşünülebilir. Bunlarla birlikte, yapısal anlamda ise yüksek mukavemetli, yüksek süneklikte ve yüksek dayanıklılığa sahip beton yüksek performanslı olarak adlandırılabilir [8].

Aitcin [9] yüksek performanslı betonu, yüksek işlenebilirlik, yüksek dayanıklılık ve yüksek nihai mukavemete sahip beton olarak tariflemektedir [9].

Ultra yüksek dayanımlı betonlar (UYDB) ise iç yapıları ve özellikleri ile normal ve yüksek dayanımlı betonlardan oldukça farklıdır. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda geleneksel iri boyuttaki agregalar yerine silis oranı çok daha yüksek ve tane boyutu sınırlandırılmış agregalar kullanılmaktadır. Ayrıca, bu betonlarda silis dumanı kullanılmakta ve ısıl kür işlemleri uygulanarak iç yapı iyileştirilmektedir. Normal ve ultra yüksek dayanımlı betonların boşluk yapısı Şekil 2.1’ de verilmektedir [8].



Şekil 2.1 : Gözeneklerin bağlantısı: (a)NDB. (b)UYDB [8].

Beton sıcak kür uygulanması, bileşenleri ve karışımıyla ilişkili belirli sayıda temel ilkelerin uygulanmasıyla reaktif pudra betonu (RPB) elde edilir. Reaktif pudra betonları, ultra yüksek performanslı betonların özel bir türü olup basınç dayanımı 200 MPa ve üzeri olan betonlardır.

RPB araştırma programı, aşağıdaki ilkelerin uygulanmasıyla yürütülmektedir.

- İri agregaların çıkartılması ile homojenliğin artırılması,
- Sertleşme süreci ve öncesinde basınç uygulanması ve taneli karışımın optimize edilmesi ile sıkışmış yoğunluğun artırılması,
- Sıcak kür etkisiyle hızlı sertleşme ve iç yapının iyileştirilmesi,
- Karıştırma ve döküm işlemlerinin bilinen tekniklerle mümkün mertebe en iyisinin yapılması.
- Kısa kesilmiş çelik liflerin katılmasıyla sünekliğin artırılması.

İlk dört ilkenin uygulanması ile ultra yüksek dayanımlı beton üretilmesine rağmen süneklik normal betonlardan daha iyi değildir. Tellerin katılması ile çekme dayanımı artarken süneklik de istenilen seviyeye gelmiş olur. Böylece reaktif pudra betonları elde edilir [10].

Çizelge 2.2’de reaktif pudra betonların, normal ve yüksek dayanımlı betonlarla bazı mekanik özelliklerinin karşılaştırılması verilmektedir.

**Çizelge 2.2 :** Normal dayanımlı beton (NDB), yüksek dayanımlı beton (YDB) ve reaktif pudra betonuna (RPB) ait bazı mekanik özelliklerin karşılaştırılması [11].

<b>Mekanik Özellikler</b>	<b>NDB</b>	<b>YDB</b>	<b>RPB</b>
Basınç dayanımı (MPa)	20-60	60-115	200-800
Elastisite modülü (GPa)	20-30	35-40	60-75
Eğilme dayanımı (MPa)	4-8	6-10	50-140
Kırılma enerjisi (J/m <sup>2</sup> )	100-120	100-130	10000-40000

Ultra yüksek dayanımlı betonlarda su/çimento oranının çok düşük olması ve silis dumanı kullanılması nedeniyle hidrasyon hızlı olmakta ve yoğun bir çimento hamuru oluşmaktadır. Bu durumlarda geleneksel kürleme yöntemleri bu betonlar için yeterli olamayabilir. Ultra yüksek dayanımlı betonlar çok düşük geçirimsizliğe sahip olup suyun betona dışardan arzu edilen seviyede girişi mümkün olmamaktadır. Bu betonlarda, su emme özeliği olan hafif agregaların bir miktar kullanılması ile içsel kürleme yapılmakta ve bu yöntemle otojen deformasyona karşı etkin sonuçlar elde edilebilmektedir [12].

Bazı kaynaklarda ise yüksek dayanımlı betonlar ile ultra yüksek dayanımlı betonlar arasında ayrıca bir sınıflandırma daha mevcuttur. Normal, yüksek ve çok yüksek dayanımlı betonlar için bazı özelliklerinin karşılaştırılması Çizelge 2.3'te verilmiştir.

**Çizelge 2.3 :** Normal dayanımlı beton (NDB), yüksek dayanımlı beton (YDB) ve çok yüksek dayanımlı betona (ÇYDB) ait bazı özelliklerin karşılaştırılması [8].

	<b>NDB</b>	<b>YDB</b>	<b>ÇYDB</b>
Basınç dayanımı (MPa)	<50	50-100	100-150
Su/çimento oranı	> 0.45	0.45-0.30	0.30-0.25
Kimyasal katkılar	Gerekli değil	Su azaltıcı katkı veya süperakışkanlaştırıcı	Süperakışkanlaştırıcı
Mineral katkılar	Gerekli değil	Mineral katkı	Silis dumanı
Geçirimsizlik (m/s)	> 10 <sup>-12</sup>	10 <sup>-13</sup>	<10 <sup>-14</sup>

Ultra yüksek dayanımlı betonlar agrega tane boyutunun sınırlandırılmış (maksimum 2 mm) olması ve silis dumanı içermesi ile yüksek dayanımlı betonlardan çok daha az boşluklu ve geçirimsiz bir iç yapıya sahip olmaktadır. Ultra yüksek dayanımlı betonların yüksek dayanımlı betonlar ile bazı özelliklerinin karşılaştırılması ise aşağıda Çizelge 2.4'te verilmektedir.

**Çizelge 2.4 :** Reaktif pudra betonu (RPB) ile yüksek dayanımlı betonun (YDB) fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması [13].

<b>Özellik</b>	<b>Yüksek dayanımlı betona göre</b>
Aşınma Kapasitesi	2.5 kat az
Su Emmesi	7 kat az
Korozyon Hızı	8 kat az
Klorür Difüzyonu	25 kat az

Çizelge 2.5 incelendiğinde reaktif pudra betonların su emme, korozyon hızı ve klor iyonu difüzyonunun oldukça düşük olması bu betonların oldukça geçirimsiz bir iç yapıya sahip olduklarını göstermektedir. Bonneau ve diğ. (1997) bu betonların klor iyonu geçirimsizliklerinin 10 coulomb değerinin altında olduğu belirtmişlerdir. Bu

değer betonlar için klor iyonlarının geçirimsizliğinin önemsenmeyeceği ihmal edilebilir seviyeye karşılık gelmektedir [14].

## 2.2 Betonun Dürabilitesi

Betonarme yapılarda ve yapı elemanlarında karşılaşılan kısa servis ömrü sorunları yapıların ve beton karışımlarının performansa göre tasarımını daha önemli hale getirmektedir.

Yapı ve yapı elemanlarının sadece yük taşıma kapasitesini değil, sünekliğini, dürabilitesini ve işletilebilirliğini göz önüne alarak performansa dayalı olarak projelendirilmesi ve inşası, performansa göre tasarımın özüdür [15].

Betonun dayanıklılığı; betonun iç-dış çevresel etkilere, aşınma ya da diğer zararlı etkilere direnme yeteneği olarak tarif edilmektedir. Dayanıklı beton orijinal halini, kalitesini ve servis edebilirliğini koruyacaktır. Beton tasarımcıları için betonun dayanımı daima önemli bir parametre olmuştur. Ancak, son yıllarda dayanıksız yapıların zamanından önce hasara uğraması dürabilitenin öneminin artmasına neden olmuştur [16].

Betonarmenin üç temel bileşeni agrega, çimento hamuru ve çelik donatı olup bu bileşenlerin olumsuz performansları betonun hasarına yol açabilir. Su/çimento (s/ç) oranı beton dayanıklılık özelliklerine en büyük etkiye sahip olan temel parametre olarak kabul edilir. Betonda w/c oranında azalma ile çimento hamurundaki boşluklar azalarak beton daha az geçirgen hale gelir. Geçirimsizlik betonun dürabilitesi için en önemli parametrelerden birisi olup nem ve zararlı kimyasalların betona girişini kontrol etmektedir. Ayrıca, düşük su/çimento oranı betonun mukavemetini ve iç gerilmelerden kaynaklanan çatlaklara direncini artırır [17].

Yapılarda dürabilite sorunlarıyla karşılaşılmasının başlıca nedeni yapı tasarımında beton dayanımlarının esas alınması ve yeterli basınç dayanımının sağlanması durumunda yeterli dürabilitenin de sağlanacağını varsayılmasıdır. Ancak, mevcut yapılar üzerinde yapılan incelemeler ve elde edilen deneyimler bu yaklaşımın doğru olmadığını açık bir biçimde ortaya koymaktadır [18].

Öngörülme-yen dürabilite sorunlarından dolayı servis dışı kalma tehlikesinde olan birçok yapı gerek ülkemizde gerekse gelişmiş birçok ülkede mevcuttur. Bu yapıların yıkılarak yerine yenilerinin yapılması veya onarılması gerekmektedir. Gelişmiş

lkelerdeki, inşaat faaliyetlerinin %40'ını tamir ve bakım ilerinin oluşturduğu dnldğnde konunun önemi daha iyi anlaşılmaktadır [19].

Özellikle deniz etkisine maruz betonarme yapılarda zamanından çok daha önce hasarlar gözlemlenmekte ve bu hasarların onarımı veya yenilenmesi tüm dünyada hem zorluklar içermekte hem de önemli maliyetleri beraberinde getirmektedir [20,21].

Normal betonların kullanıldığı betonarme yapıların servis ömrünü etkileyen en önemli etken dürabilite sorunlarıdır. Bir betonarme yapı birden fazla zararlı etki altında olabilir, ayrıca yapının farklı bölgelerine değişik hasar verici mekanizmalar etki edebilir [15].

rnek olarak çeşitli kimyasal etkiler betonda hacim artışına, çatlamalara, dayanım kayıplarına veya donatı korozyonuna neden olabilir. Bazı agregalarda aktif silis olması durumunda, bu aktif silisler ile çimentoda bulunan alkalilerin reaksiyonu sonucu betonda çatlamalar görülebilir. Sülfatlar da betonda hacim artıı oluşturarak çatlamalara yol açabilir. Klorür ise beton içindeki donatıların korozyonuna neden olan başlıca etkendir. Kimyasal hasarlar temel olarak çeşitli iyonların beton içine girişi ve betonda taşınmasına bağlı olarak gelişir. Betonda çatlakların bulunması çeşitli zararlı maddelerin beton içine girişini hızlandırır [16].

Geçirimsiz ve boşluksuz bir beton üretimi ile donatı korozyonuna, asit, sülfat, don ve alkali reaktivitesine karşı gereken nlem alınmış olunur. Betonda geçirimsizliği sağlamak için su/imento oranının düşük olması ve agrega ile imento hamuru arasındaki temas yüzeyinin güçlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, bakım ve küre de gereken zen gösterilmelidir [22].

Betonların hasarına yol açan etkiler fiziksel, kimyasal ve mekanik kökenlidir. Bozulmanın fiziksel nedenleri olarak donma çözülme, buz çözücü tuzlar, içsel ve dışsal kaynaklı sıcaklık değişimleri sayılabilir. Kimyasal etkenler dışarıdan beton içine taşınan zararlı maddelerden veya beton bileşimini oluşturan bileşen malzemelerden kaynaklanabilir. Bunlar arasında alkali-karbonatlaşma reaksiyonları, alkali-agrega reaksiyonları, sülfat etkisi, asit etkisi, tuz etkileri ve muhtelif diğer kimyasal etkiler düşünülebilir. Mekanik yolla oluşan hasarlar ise erozyon, aşınma ve oyulma (kavitasyon) etkileridir. Çizelge 2.5'te betonun hasara uğramasının nedenleri verilmektedir [23].

**Çizelge 2.5 :** Betonun hasara uğramasının nedenleri (EM 1110-2-2002) [23].

<b>Betonun Hasara Uğramasına Neden Olan Etkiler</b>	
<b>Beklenmeyen Yükler</b>	<b>Erozyon</b>
<b>Kimyasal Reaksiyonlar</b>	Aşınma
Asit etkileri	Kavitasyon
Agresif su etkileri	<b>Donma çözülme</b>
Alkali-karbonatlaşma reaksiyonları	<b>Yerleşme ve Hareket</b>
Alkali-silika reaksiyonları	<b>Rötre</b>
Muhtelif kimyasal etkiler	Plastik
Sülfat etkileri	Kuruma
<b>Yapısal Hatalar</b>	<b>Sıcaklık Değişimleri</b>
<b>Gömülü Metallerin Korozyonu</b>	İçsel kaynaklı
<b>Dizayn Hataları</b>	Dışsal kaynaklı
Yetersiz yapısal tasarım	Yangın
Zayıf tasarım detayları	<b>Hava Etkileri ile Hasar</b>

Yapılar servis ömrü süresince çeşitli çevresel etkiler altında kalmaktadır. Yapının maruz kalacağı çevresel etki iyi belirlenmelidir. Yapı, çevresel etki altında işlevini yerine getirmeye devam edebilmeli, yapıda kullanılan malzemelerin dayanıklılığı yeterli olmalıdır. Günümüzde, yapısal tasarımın malzeme dayanımları yanında dürabilite kriterlerine göre yapılması giderek daha fazla kabul görmektedir [24].

TS EN 206 standardında betona etkiyen çevresel etkiler olarak, klor iyonları nedeniyle oluşan korozyon, karbonatlaşmadan kaynaklanan korozyon, deniz suyu, buz çözücü tuzlardan kaynaklanan klorürler, donma çözülme, aşınma ve kimyasal etkiler belirtilmiştir [25].

Yapının tamamı veya bir bölümü aşırı çevresel etkilere maruz kalırsa betonda mikro çatlaklar oluşmaktadır. Bu mikro çatlaklar genişledikleri zaman, bu çatlaklardan zararlı iyonlar ve gazlar yapıya girerek yapıda hasar oluşturmaktadır [26].

Costa ve Appleton [27,28] çelik donatının paslanmasında en önemli faktörün klorür kaynaklı olduğunu tespit etmişlerdir [27,28].

### **2.3 Betonun Geçirimsizliği**

Betonun dürabilitesi, betonun kimyasal etkiler, fiziksel etkiler, aşınma ve servis koşullarına karşı koyma kapasitesidir. Betonun hasarı karmaşık bir sorun olup zararlı iyonların beton içerisine taşınması ve betonu etkilemesi ile ilgilidir [29].

Dürabilitesi yüksek bir betonarme yapı elde edebilmek için, betonun ve içerisindeki donatının çevresel olumsuzluklardan korunması gerekmektedir. Betonlarda kılcal etki nedeni ile su geçirimsizliği meydana gelebilir. Yapının bulunduğu ortama ve kullanım amacına göre su ya da çeşitli zararlı kimyasallar betonun içine girerek yapıya zarar verir. Bu tür olumsuzlukların önüne geçmek için kullanılan betonun geçirimsizlik özelliklerinin belirlenmesi gerekir [30].

Betonun hasarı betonarme yapının yetersiz dayanıklılığının bir göstergesidir. Bu hasar dış veya iç etkilere birisi nedeni ile olabilir ve bu etkiler, fiziksel, kimyasal veya mekanik nedenlerden kaynaklanabilir. Hasar mekanik nedenlerle aşınma, erozyon ya da kaviteleşme şeklinde olur. Kimyasal mekanizmalar ise alkali-silika ve alkali-karbonat reaksiyonlarını içerir. Dışarıdan zararlı etkiler genellikle agresif iyonlar (klorürler, sülfatlar, vb.) ve karbon dioksit etkisinden (karbonatlaşma) kaynaklanır. Ayrıca doğal ve endüstriyel sıvı ve gazlar da zararlı kimyasal etkilere yol açar. Fiziksel hasarlar ise agreganın hacim sabitliğini bozması ve sıcaklık etkisinde çimento hamurunda oluşan değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Hasarın önemli bir nedeni de betonun donma çözülmesi ve buz çözücü tuzların etkisidir. Beton yapıların mekanik hasarlar dışında dayanıklılığındaki tüm olumsuz etkiler betonun içinden akışkanların taşınması sebebi ile olmaktadır. Beton yapıların dayanıklılığının belirlenebilmesi için geçirimsizlik özellikleri sürekli olarak incelenmektedir [31].

Betonun akışkan geçirimsizliği; basınçlı su geçirimsizliği, kılcal yolla su emme ve buhar geçirimsizliğinden oluşur. Geçirimsizlik bakımından gerekli önlemlerin alınmaması durumunda betonlarda bu üç geçirimsizlik olumsuz biçimde yüksek değerlere ulaşır, bu da dürabilite bakımından sorunlara yol açar. Betonun geçirimsizliğindeki en büyük etkenler de dışa açık büyük boşluklar ve çatlaklardır. Geçirimsizlikte olumsuz etki yapan bu boşluklar ve çatlaklar betonda en zayıf halka olarak bilinen agrega çimento hamuru temas yüzeyinde daha belirgindir [32].

Beton çimento hamuru, agrega ve çimento hamuru agrega ara yüzü olmak üzere üç fazlı olarak kabul edilebilir. Bu fazların tamamı boşluklar içermektedir. Birbirine bağlı kılcal boşluklar betonun geçirimsizliğine ve dayanıklılığına etki eden temel faktördür [33,34].

Beton içerisindeki çeşitli boyutlarda boşluklar bulunmaktadır. Bu boşlukların, boyutları, miktarları, aralarındaki uzaklık ve beton içerisinde dağılımları betonların dayanıklılığını etkilemektedir [35].

Çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan kılcal boşlukların boyutları birkaç mikron ile 1 cm arasında değişir. Bu boşlukların miktarı ve boyutları betonun su/bağlayıcı oranına ve çimentonun hidratasyon derecesine bağlıdır [31].

Düşük geçirimsizliğe ve yüksek dayanıma sahip betonlarda su ve tuz çözeltilerinin betona girmesi ve beton içinde taşınması güçtür. Klorür, nem ve oksijen donatıyı çevreleyen betonun gözenekli ve geçirimli olması durumunda donatıya daha hızlı ve kolay ulaşır. Geçirimsizlik özelliklerinin bilinmesi betonun dürabilite sorunlarının belirlenmesine katkıda bulunarak yapılarda maliyet etkin ve zamanında çözümler üretilmesini sağlamaktadır [36].

#### **2.4 Silis Dumanı Etkisi**

Betonda silis dumanı (SD) kullanımı sertleşmiş çimento hamurunun boşluk yapısını iyileştirir. Bu iyileşme daha küçük boşluklar oluşması, toplam boşluk miktarının azalması ve daha yoğun bir iç yapı elde edilmesi şeklinde gerçekleşir.

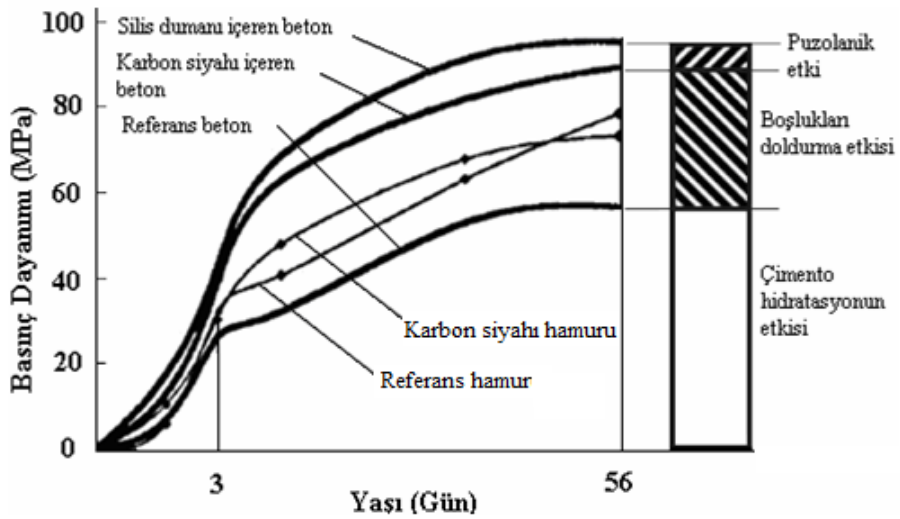
Silis dumanının sertleşmiş çimento hamuru ve harçlardaki iri gözenekleri azaltarak daha fazla sayıda küçük gözenek oluşturduğu ve gözeneklerin daha homojen olarak dağılmasını sağladığı bilinmektedir. Aynı zamanda çimento hamuru agrega arayüz bölgesinin de daha sıkı yapıda oluşması, SD katkılı betonlarda benzer bakım koşullarındaki normal betonlara göre geçirgenlik azalmaktadır [37].

Silis dumanı tane boyutları portland çimentosu tanelerine göre yaklaşık 100 kat daha küçüktür ve ortalama tane çapları 0,1 – 0,2 µm civarındadır. Çok yüksek inceliği ve yüksek puzolanik reaktivitesi nedeniyle silis dumanının betonun iç yapısına önemli etkileri vardır. Silis dumanı kullanımıyla birlikte betonun boşluk yapısında iyileşme sağlanarak, en zayıf halka olan agrega – çimento hamuru güçlendirilebilir. Silis dumanının ara yüzey özelliklerini iyileştirmede iki temel etken vardır; bunlar puzolanik etki ve boşlukları doldurma etkisidir. Farklı tane boyutlarında malzemelerin seçilmesiyle daha sıkı bir tane dizilişi elde edilerek boşluk oranı azaltılmakta ve bunun sonucu mekanik özellikler iyileştirilmektedir [38].



Silis dumanı kullanımı ile betonda kararsız bir bileşik olan ve kolaylıkla çözünebilen  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  bağlanmakta ve daha sıkı bir yapıya sahip C-S-H oluşmaktadır. Böylece betonun dayanım ve dayanıklılığı artmaktadır. Richard ve Cheyrezy (1994) tarafından  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  bağlamak için en uygun puzolan malzemesinin silis dumanı olduğu belirtilmiştir [11].

Goldman ve Bentur [39] silis dumanının beton dayanımının artırılmasında boşlukları doldurma özeliğinin puzolanik etkisinden daha önemli olduğunu belirtmişlerdir. Silis dumanı taneleri çimentoya göre çok daha ince olması nedeniyle çimento ile agrega taneleri arasındaki boşlukları doldurarak yoğun ve daha yüksek dayanımlı bir matris oluşmasını sağlamaktadır. Silis dumanının boşluk doldurma ve puzolanik özeliğinin beton basınç dayanımına etkilerinin incelendiği çalışmada silis dumanı yanında puzolanik özeliği olmayan karbon siyahı malzeme de kullanılmıştır. Aşağıda çalışma kapsamında silis dumanı içeren, karbon siyahı içeren ve referans olmak üzere üretilen betonların basınç dayanımı deney sonuçları verilmiştir. Betonların basınç dayanımlarının artırılmasında silis dumanının boşluk doldurma etkisinin puzolanik özeliğinden daha etkili olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 2.2) [39].



**Şekil.2.2 :** Silis dumanının boşlukları doldurma ve puzolanik özeliğinin betonun basınç dayanımına etkisi [39].

Silis dumanının betonda kullanımı çeşitli oranlarda olmaktadır. Genel olarak, bağlayıcıya oranla %15 mertebesine kadar kullanılmaktadır. Ancak, özel betonların tasarımında bu oran daha yüksek mertebelere çıkmaktadır. Lewis ve diğ. (2003) reaktif pudra beton üretimlerinde toplam çimentoya oranla %25 mertebesinde silis dumanı kullanmışlardır [40].

Şengül ve diğ. [41] puzolanik malzemelerin ve su/bağlayıcı oranının geçirimsizlik üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmada, su/çimento oranının düşürülmesinin betonların geçirimsizlik değerlerinde 2-3 kat azalmaya neden olurken mineral katkıların çimento yerine yüksek şekilde ikame edilerek kullanılması ile betonun geçirimsizlik değerlerinde 20 kata varan azalmalar gözlemlenmiştir [41].

## 2.5 Paspayı Etkisi

Yapım şartnamelerine ve beton teknolojisine uygun olarak inşa edilen yapılarda beton içine gömülü haldeki çelik donatı paspayı tabakasının varlığı sayesinde korozyona karşı korunmuş olur. Koruma işlemi iki şekildedir. Bunlardan ilki paspayı tabakasının kalınlığı nedeniyle sağlamış olduğu fiziksel koruma diğeri ise betonun mevcut yapısının bazik ortam olmasıdır. Fiziksel olarak korumanın etkinliği paspayı tabakası kalınlığı ve kalitesi ile ilgilidir. Betonun bileşiminden kaynaklanan koruması ise çimentonun hidrasyonu sonrası oluşan bazik ürünler sayesinde.

Ancak, betonarme yapı elemanının maruz kaldığı çevresel etkiler betona zarar verebilir ve bu etkiler genelde zararlı iyonların beton içine girmesi ve taşınması ile olmaktadır. Betonda en tehlikeli etki olarak klorürler ve karbonatlaşmanın neden olduğu donatının korozyonu düşünülebilir. TS EN 206'da çeşitli etki sınıflarındaki ortam koşulları ile bu ortam koşullarında betonların sahip olması gereken özellikler belirlenmiş olup Çizelge 2.6'da XS çevresel etki sınıfı örnek olarak verilmektedir.

**Çizelge 2.6 :** XS çevresel etki sınıfları için önerilen değerler (TS EN 206) [25].

Çevresel etki sınıfı	En büyük su/çimento oranı	En küçük dayanım sınıfı	En az çimento içeriği	Ortam
XS1	0,50	C30/37	300	Hava ile taşınan tuzlara maruz, fakat deniz suyu ile doğrudan temas etmeyen
XS2	0,45	C35/45	320	Sürekli olarak su içerisinde
XS3	0,45	C35/45	340	Gelgit, dalga ve serpinti bölgeleri

Betonda zararlı etkilerin büyük bir çoğunluğu klorürlerin ve gazların beton boşlukları ve çatlakları boyunca ilerleyerek donatıya ulaşması ve bu etkiler nedeniyle donatının korozyona uğramasından kaynaklanmaktadır. Bu sebeple, paspayı tabakasının

kalınlığı ile fiziksel ve mekanik özellikleri betonların servis ömürleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. TS EN 1992-1-1 standardında çeşitli çevre etki sınıfları için minimum paspayı kalınlıkları Çizelge 2.7’de verilmektedir. Burada S4 yapı sınıfı 50 yıllık servis ömrü için tasarlanan yapıya karşılık gelmektedir.

**Çizelge 2.7 : Minimum paspayı kalınlıkları (TS EN 1992-1-1) [42].**

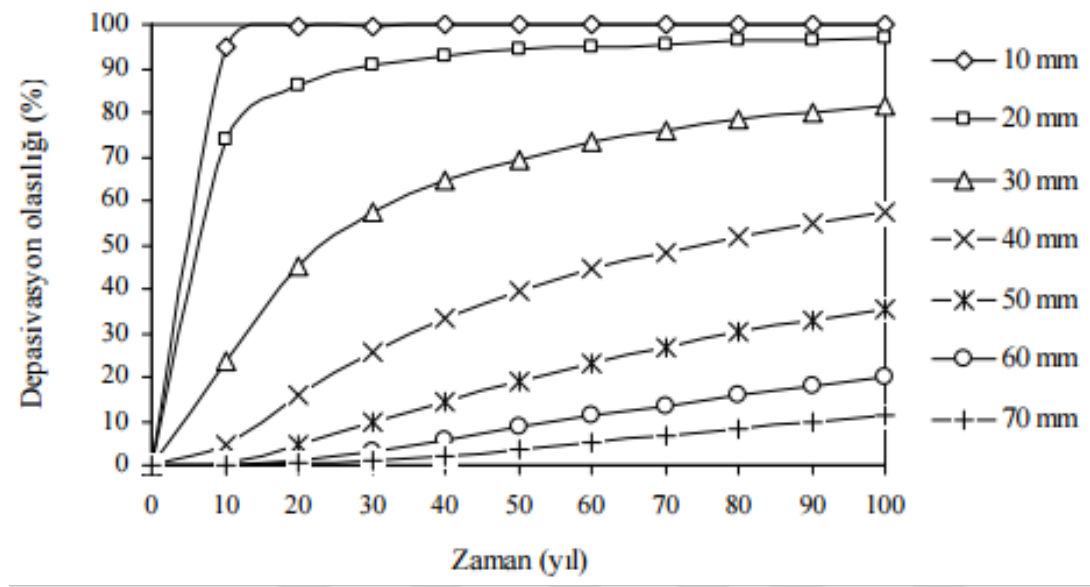
Yapı Sınıfı	Çevresel Etki Sınıfları						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Uzun süreli performans için İngiliz Standardı BS 8500-1’de; TS EN 206 standardı ve EN 1992-1-1 standardında belirtilenlere ilave olarak çimento türleri de değerlendirmeye alınmaktadır. Belirli bir çevresel etki sınıfı ve pas payı kalınlığı dikkate alınarak betonun en büyük su/çimento oranı, en düşük dayanım sınıfı ve çimento dozajının yanında, çimento türü de BS 8500-1’de ilave olarak önerilmektedir. Çizelge 2.8’de XD3 çevresel etki sınıfı örnek olarak verilmektedir. Burada standartlarda verilen koşulların tamamı bileşim kriterleri için minimum değerlerdir ve sadece bu koşulların sağlanması ile bir yapının yeterli dayanıklılığa ve uzun servis ömrüne sahip olacağını düşünmek doğru değildir.

**Çizelge 2.8 : XD3 çevresel etki sınıfı için önerilen değerler (BS 8500-1) [43].**

Basınç dayanımı sınıfı, maksimum su/çimento oranı ve minimum çimento miktarı					
Paspayı kalınlıkları (mm)	35+Δc	40+Δc	45+Δc	50+Δc	Çimento türü
	-	C45/55 0,35 380	C40/50 0,40 380	C35/45 0,45 360	CEM I, IIA, IIB-S, SRPC
Çevresel etki sınıfı (XD3)	-	C35/45 0,40 380	C32/40 0,45 360	C28/35 0,50 340	IIB-V, IIIA
	-	C32/40 0,40 380	C28/35 0,45 360	C25/30 0,50 340	IIIB, IVB-V

Şengül [44] tarafından 2. Fick Yasası modellenerek klor iyonlarının donatıya ulaşma sürelerinin belirlenmesine çalışılmıştır. Modeldeki parametreler değiştirilerek simülasyon programları yardımıyla farklı durumlar için korozyon olasılıkları elde edilmiştir. Şekil 2.3'te pas payı kalınlığının donatıdaki depasivasyon olasılığına etkisi gösterilmektedir [44].



Şekil 2.3 : Paspayı kalınlığının depasivasyon olasılığına etkisi [44].

Donatıyı örten pas payının kalınlığı arttıkça, seçilen depasivasyon olasılığına ulaşma süresi de uzamaktadır. Belirli bir depasivasyon olasılığı için, pas payı 10 mm ila 20 mm arasında iken bu olasılığa ilk birkaç yıl içinde ulaşılmaktadır. Ancak, pas payı 50 mm ve üzeri olarak seçildiğinde bu süre çok daha uzundur.

## 2.6 Rötne ve Çatlakların Oluşumu

Beton, harç ve çimento esaslı sıvalar sıcaklık ve nem değişiklikleri nedeniyle hacim değişimine uğrar ve hacim azalması yönündeki değişimler rötne olarak tanımlanmaktadır. Bu hacim azalmaları kısıtlanırsa, oluşan çekme gerilmeleri malzemenin çekme dayanım değerini aşınca çatlaklar oluşmaktadır. Bu tür çatlakların dayanıklılığı etkilediği ve malzemenin zaman içerisinde bazı özelliklerini kaybetmesine neden olduğu bilinmektedir [45].

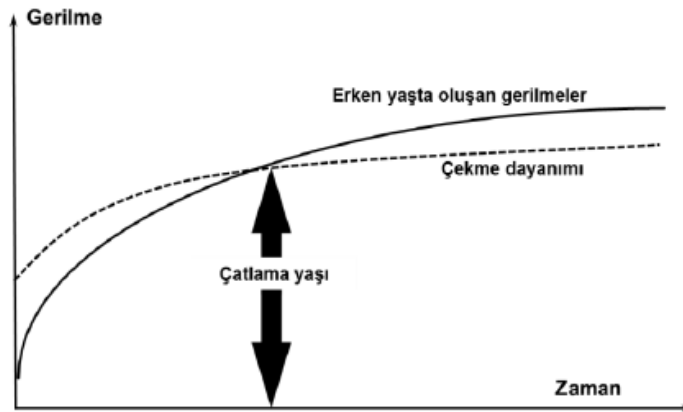
Betonda rötne sonucu oluşan çatlaklar engellenemez. Çimento ve suyun hidratasyonu sonucu oluşan hacim azalması sonucu oluşan rötne düşük değerlerde olmaktadır. Betonun kuruması sırasında suyun buharlaşması sonucu oluşan hacim azalması ise

en fazla görülen rötre tiplerinden biri kabul edilmektedir. Eğer betonda çok fazla rötre oluşursa, yapının dayanıklılığı ciddi bir şekilde zarar görmektedir [45].

Özellikle serbest rötre betonda çatlak oluşma potansiyelini etkileyen faktörlerden biridir. Buna ek olarak donatının varlığı, numune boyutu ve kısıtlama da bu faktörlerden sayılmaktadırlar. Rötre çatlaklarını belirlemek için rötrenin bütün evrelerinin ve mekanizmalarının incelenmesi gerekmektedir [46].

Rötrenin kuruma ve otojen rötre olarak tanımlanan tipleri de bulunmaktadır. Bu iki tip rötre dahil bütün rötre tipleri rötrenin her iki evresinde görülmektedir. Kuruma ve otojen rötreye ek olarak beton termal değişimlere, karbonatlaşma reaksiyonlarına ve kısıtlanma sonucu da rötreye maruz kalmaktadır [46].

Betonda boşluk sistemi kullanılan su/çimento oranı ve hidrasyon hızı ile yakından ilgilidir. Çatlaklar ise özellikle betonun erken yaşta dayanımı düşük ve hacimsel şekil değiştirmelerin en fazla olduğu erken yaşlarda gerçekleşir. Erken yaşlarda oluşan çatlama riski, gerilme analizi yapılarak hesaplanabilir. Bu süreç içerisinde, ısıl şekil değiştirmeler ve bünyesel rötre, betonu çatlatmaya çalışan gerilmelerdir. Zaman içinde giderek artan bu gerilmeler, betonun gelişmekte olan erken yaş çekme dayanımını aştığı noktada betonun çatlaması ile sonuçlanır. Bu durum Şekil 2.4'te verilmektedir [47].



**Şekil 2.4 :** Betonda erken yaşta oluşan gerilmelerin ve dayanımların zamanla gelişimi [47].

Alınacak tüm önlemlere rağmen, betonun çatlamasının kaçınılmaz olduğu durumda, çatlak genişliklerinin beton geçirimsizliği ve yapı dayanıklılığı açısından önem taşıdığı hatırlanmalıdır. Çatlak riski kontrolü, oluşan çatlakların yerinin ve zaman içinde genişliklerinin takibini de içermektedir. Çatlak genişliklerinin zaman içinde, betonun

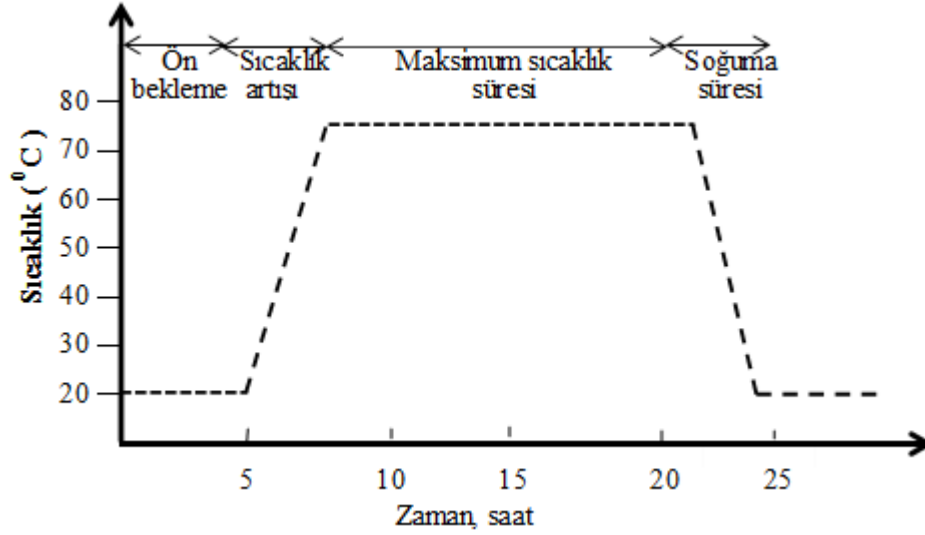
kendiliğinden kapanması mümkün değerlerin üzerine çıkması halinde, çatlakların enjeksiyon veya tamir malzemeleri ile onarılması gerekmektedir. Bu durumda, yapının hizmet ömrüne uygun tamir malzemeleri ve yöntemler uygulanmalıdır. Bu yüzden, erken yaş çatlaklarının tamirinde kullanılacak malzeme ve yöntemlerin de ön testleri, yapı üretimine başlamadan önce yapılarak uygunluğu kontrol altına alınmalıdır [47].

## **2.7 Kür ve Sıcaklık Etkisi**

Betonun boşluk yapısı klor iyonları gibi zararlı maddelerin beton içerisine taşınımında ve zarar vermesinde belirleyicidir. Klor iyonlarının beton içerisine girmesi ile çelik zarar görmekte ve korozyona uğramaktadır. Yüksek sıcaklıklar sonucunda beton iç yapısı daha boşluklu hale gelmektedir. Yüksek sıcaklıklarda hızlı gelişen çimento hidrasyonu sonucu olarak hidrasyon ürünleri üniform şekilde dağılamamakta ve bu durum daha büyük boşlukların oluşmasına neden olmaktadır. Düşük sıcaklıklarda ise hidrasyon daha yavaş gelişmekte ve hidrasyon ürünleri daha üniform dağılarak daha boşluksuz bir iç yapı oluşmasını sağlamaktadır. Böylece klor iyonları gibi zararlı maddelerin betona taşınımı zorlaşmaktadır.

Beton bünyesindeki boşluklar, C-S-H jeli boşlukları, kapiler boşluklar ve hava boşlukları olmak üzere üç farklı şekilde bulunmaktadır. Beton yüksek sıcaklığa maruz kaldığında çimento hamuru ile çimento hamuru agrega ara yüzünün boşluk yapısı bu durumdan etkilenmektedir. Katı fazlarda meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişiklikler toplam porozitede ve boşluk boyutunun dağılımında değişikliklere neden olmaktadır [48].

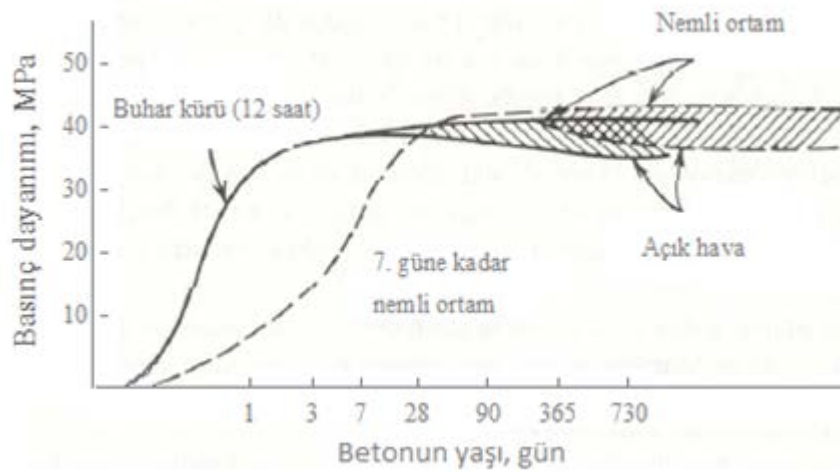
Betona uygulanan kür sıcaklığının yüksek olması, normal sıcaklıkta kür uygulanan betonların dayanımları ile karşılaştırıldığında, ilk günlerdeki dayanımın yüksek olmasını sağlamakla birlikte, daha sonraki günlerdeki dayanımın daha düşük olmasına yol açmaktadır. Hem betonun ilk günlerde kazanacağı dayanımın yüksek olmasını sağlamak, hem de daha sonraki günlerde betonun çok düşük dayanım göstermesini bir ölçüde engellemek amacıyla, betona uygulanan buhar kürü değişik ara sürelerle ve değişik sıcaklıklarda yerine getirilmektedir. Şekil 2.5'te, atmosferik basınçlı buhar kürü için uygulanan tipik bir kür devresi gösterilmektedir. Buradan da görülebileceği gibi, buhar kürünün toplam süresi dört ara süreden oluşmaktadır [49].



Şekil 2.5 : Tipik buhar kürü devresi.

Atmosferik basınçlı buhar kürünün kullanılmasındaki en büyük amaç beton elemanın bir an önce dayanım kazanmasını ve böylece ekonomiklik sağlamak olduğundan, çoğu zaman buhar kürü devresinin süresi, özellikle bekleme süresi, uygulamada yeterince uzun tutulmamaktadır. Oysa, bekleme süresinin betonun ilerideki performansına önemli etkileri olmaktadır [49].

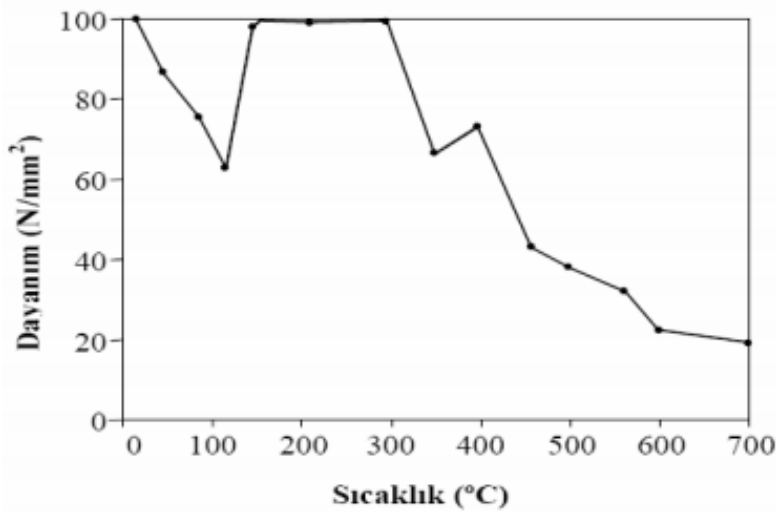
Gerwick [50] buhar kürünün beton özelliklerine etkileri üzerine yaptığı çalışmada uzun süreli nem ortamında kalan betonun nihai dayanımlarının buhar kürü uygulanan numunelerden fazla olduğunu belirtmiştir (Şekil 2.6) [50]. Çalışma sonucunda betona buhar kürü uygulamalarının betonun uzun süreli dayanım özelliklerini bir miktar azalttığı anlaşılmaktadır.



Şekil 2.6 : Buhar kürünün ileriki yaşlarda beton basınç dayanımına etkileri [50].

Buhar kürü uygulaması yapılacak beton elemanlarda portland çimentosu ile birlikte bir miktar ince taneli silis malzemede bulundurulması gerekmektedir. Aksi durumda, buhar kürüne tabi tutulan elemanın ilk günlerdeki davranışı normal betonunkine benzemesine rağmen buhar kürü süresinin ilerlemesiyle betonda oluşan C-S-H jelleri amorf yapıdan kristal yapıya dönüşerek kararsız hale gelmekte, uniform olarak dağılım göstermeyip boşlukları dolduramamakta ve beton dayanımını düşürmektedir [51].

Yüksek sıcaklıkların çimento hamurunun mekanik özelliklerine etkisi Şekil 2.7’de verilmiştir. 120°C sıcaklığa kadar dayanımdaki düşüş çimento hamurundaki su tabakalarının şişmesi nedeniyle bağların zayıflamasına bağlanmaktadır. Dayanımların bu sıcaklıktan sonra tekrar kazanılması, kimyasal olarak bağlı olmayan ve buharlaşabilen suyun kaybına (termal kuruma) bağlanmaktadır. Ayrıca çimento hamurunda henüz hidrate olmamış çimento tanelerinin hidrasyonu da bu davranışta etkili olmaktadır. Termal kurumanın bu yararlı etkisi mikro çatlakların oluştuğu ve mekanik özelliklerin bozulduğu 300°C’nin üzerinde sona ermektedir [52].



Şekil 2.7 : Çimento hamurunun dayanımının sıcaklıkla değişimi [52].

Kür, çimentonun hidrasyonunu arttırmak için sıcaklığın ve nemin uygun koşullarda tutulması işlemidir. Böylece, çimento hamurunun mümkün olduğunca hidrasyon ürünleri ile dolması sağlanmaktadır [34].

Çimentonun hidrasyonu ise katı çimento tanesinin su ile temasından sonraki fiziksel ve kimyasal reaksiyonların tümü olarak tanımlanmaktadır [53].



Hidratasyonun devam etmesi için, kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jellerin su ile doyurulması önemlidir [54].

Nem kaybının azaltıldığı ve sürekli nem ortamının sağlandığı uygun bir kürleme ile betonda boşluklar azalarak daha düzenli ve küçük boyuta sahip boşluklar oluşmaktadır [55].

Çimento ve su arasında reaksiyonlar diğer kimyasal reaksiyonlara benzer şekilde sıcaklık ile hızlanmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda hidratasyonun bu başlangıç hızı iç yapı içindeki hidratasyon ürünlerinin düzensiz dağılmasına ve çimentonun sonraki hidratasyonun gecikmesine neden olmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda, hidratasyon ürünlerinin çimento hamuru içerisinde dağılması için yeterli zaman olmamaktadır. Bu durum ise sertleşmiş çimento hamuru içerisinde hidratasyon ürünlerinin homojen olmayan dağılımına yol açmaktadır [56].

Neville [34] çimentonun hidratasyonu ile ilgili olarak normal sıcaklıklarda hidratasyonun başlamasından yaklaşık 6 ile 8 saat arasında maksimum bir ısı artışı olduğunu belirtmiştir [34].

Verbeck ve Helmuth [56] sıcaklığın 40°C olması durumunda iki saat içinde hidratasyon hızının %30 ile %40 arasında arttığını, buhar kürü sıcaklıklarına çıkılması durumunda ise bir saat içinde çimento tanelerinin yarısı veya daha fazlasının hidrate olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, aynı çalışmada yüksek sıcaklıklarda hidratasyon ürünlerinin tam olarak oluşmadığı ve yeterince dağılmadıkları tespit edilmiştir. Hidratasyonun hızlı olması sebebi ile hidratasyon ürünlerinin dağılımının yeterince olmadığı ve boşlukların da dolmadığı ifade edilmiştir. Yine hidratasyonun hızlı gerçekleşmesinin çimento taneleri etrafında geçirimsiz bir bölge oluşturduğu, bu durumda çimento tanelerinin sonraki hidratasyonunu zorlaştırdığı ve geciktirdiği tespit edilmiştir. Hidratasyonun hızlı olmasının betonda oluşan boşlukların daha büyük olmasına ve dayanımın düşmesine sebep olduğu belirtilmiştir [56].

Goto ve Roy [57] ısıl kür işlemlerinin betonda oluşan gözeneklerin boyutuna etkisini inceledikleri çalışmada 60°C'de uygulanan kür sonucunda 27°C kür işlemine kıyasla çapı 150 nm ve daha büyük gözeneklerin çok daha yüksek bir oranda oluştuğunu tespit etmişlerdir. Bu büyük gözenekler zararlı maddelerin beton içine taşınımını da kolaylaştırmaktadır [57].

Kjellsen ve diğ. [58] 5°C-50°C arasında değişen sıcaklıklarda imento hamurunun iç yapısını inceledikleri çalışmada, düşük sertleşme sıcaklıklarında hidratasyon ürünlerinin üniform bir dağılım gösterdiğini ve betonda birbirinden bağımsız küçük gözenekler oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Yüksek sıcaklıklarda ise heterojen şekilde rastgele dağılmış hidratasyon ürünleri ile büyük ve birbirine bağımlı boşluklar tespit etmişlerdir [58].

Kjellsen ve diğ. [59] yüksek sıcaklıklarda kür sonrasında hidratasyon ürünlerinin imento tanelerini çevreleyen yoğun bir kabuk oluşturduğunu gözlemlemişlerdir. 50°C sıcaklıkta ısıl kür işlemi uygulanması ile 25°C’de uygulanan kür işlemine göre gözeneklerin miktarında ve büyüklüklerinde artışlar olduğunu belirtilmişlerdir. 97°C buhar küründe ise boşluklar daha da büyümektedir. Çalışmada hidratasyon ürünlerinin düşük sıcaklıklarda daha düzgün dağılmakta olduğu ve betonun mukavemetinin büyük ölçüde i yapıdan etkilendiği belirtilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda C-S-H tanelerinin yakın ve çok yoğun olduğu ancak bu durumda betonun mukavemetini imento taneleri arasındaki mesafenin belirlediği ifade edilmiştir. Bu nedenle, yüksek sıcaklıklarda uygulanan kürün betonun sonraki yaşlarda dayanımı üzerinde zararlı bir etkisi olduğu ve yüksek kür sıcaklıklarının betonda boşlukların artmasına neden olduğu belirtilmiştir [59].

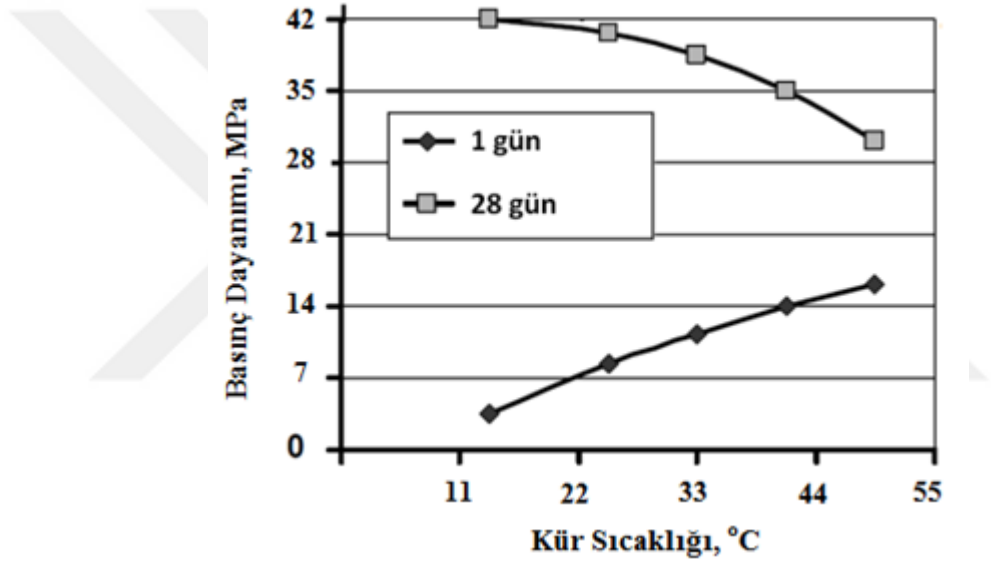
Aynı su/imento oranına ve aynı hidratasyon derecesine sahip imento hamurlarında yüksek ısıl işlem uygulanan imento hamurunda boşluklar daha büyük ve daha fazla sayıdadır. Bu durum betonun geçirimsizliğini önemli derecede etkilemektedir. Geçirimsizlik ise betonda dürabilite sorunlarının oluşmasına ve betonun zamanla dayanıklılığının azalmasına neden olmaktadır.

Beton dayanımı, betonun yaygın olarak kullanılan ve kabul gören özelliği olarak kabul edilmektedir. Dayanımın, imento hamurunun yapısı ile doğrudan ilgili olduğu için betonun kalitesi hakkında fikir vereceği düşünölmektedir. Betona ısıl kür işlemleri uygulanması çimentonun hidratasyonunu hızlandırmakta ancak betonun 7 günlük ve daha ileri yaşlardaki basınç dayanımını olumsuz biçimde etkilemektedir [34].

Isıl kür işlemleri ile hidratasyon ürünleri daha hızlı oluşmaktadır. Ancak, bu ürünlerin fiziksel yapısı daha zayıf olmakta ve sonrasında doldurulamayan daha büyük boşluklar oluşmaktadır. Bu boşlukların beton dayanımına bir katkısı olmaması

sebebi ile dayanım düşmektedir. Düşük sıcaklıklarda ise yavaş hidrasyon sebebi ile hidrasyon ürünleri daha üniform şekilde oluşmakta ve daha iyi bir dağılım göstermektedir. Böylece, beton ileri yaşlarda daha iyi mukavemet kazanmaktadır [56].

Yüksek sertleştirme sıcaklıklarında çimento hızlı şekilde hidrate olmakta ve bu nedenle hidrasyon ürünleri yüksek bir erken dayanıma sahip olmaktadır. Ancak, ileri yaşlarda çimento taneleri çevresinde yoğun bir kabuğun sonucu olarak hidrasyon yavaşlamaktadır. Ayrıca, ısı kütür işlemi sonrası daha gözenekli yapı oluşmaktadır. Bu durumda betonun ileri yaş dayanımları düşmektedir. Bu durum Şekil 2.8.'de verilmektedir [56].

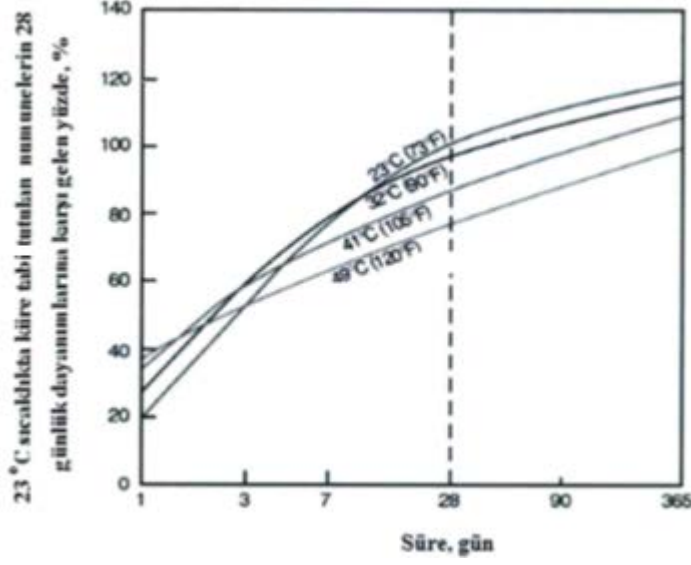


Şekil. 2.8 : Kür sıcaklığının beton dayanım gelişimine etkisi [56].

Betonun basınç dayanımı ile porozitesi arasında ilişki bulunmaktadır. Betonun porozitesi arttıkça basınç dayanımı azalmaktadır [60].

ACI 306 R [61] standardında, ilk 24 saat içinde 38°C'de küre tabi tutulan beton numunelerinin 28 günlük dayanımlarının normal koşullarda küre duruma göre %10-15 daha düşük çıktığı belirtilmiştir [61].

Şekil 2.9'da farklı sıcaklıklarda küre uygulanmış betonların karşılaştırmalı olarak basınç dayanımı deney sonuçları verilmektedir. Kür sıcaklığı arttıkça betonların 28 günlük ve sonrası dayanımları azalmaktadır [62].



**Şekil 2.9 :** Farklı kür sıcaklıkları uygulanan numunelerin basınç dayanımı gelişimi [62].

## 2.8 Sıcaklık Etkisinde DEF (Delayed Ettringite Formation) Oluşumu

Betona deniz suyunun (özellikle sülfat) etkisi, uzun yıllardan beri incelenmektedir. Sülfat iyonları, çimento içindeki  $C_3A$  (tri kalsiyum alüminat) ile reaksiyona girerek etrenjit bileşimini meydana getirir. Bu reaksiyonu önlemek için çimento bileşimindeki tri kalsiyum alüminatın düşük olması ( $C_3A < \%5$ ) gerekmektedir [1].

Hime ve Marusin (1999) yüksek dayanımlı betonlarda sıcak kür işlemi uygulanarak üretilen prekast ürünler üzerinde yaptıkları çalışmada dayanım kayıpları ile karşılaşmışlardır. Bu zararlar açık hava koşullarında prekast ürünler suya doygun hale getirilmesine rağmen oluşmuştur. Hasarlar, çatlakların oluşumu ve çimento hamuru ile iri agregalar arasında aderans kaybı ile ilişkilendirilmiştir. Bu zarar daha sonraları ise sertleşmiş betonda gecikmiş etrenjit oluşumu (DEF) olarak isimlendirilmiştir [63].

Gecikmiş etrenjit oluşumu (DEF) beton yerleştirildikten sonra aylar ya da yıllar içinde sürekli neme maruz bir ortamda meydana gelmektedir [63].

Bu reaksiyon klasik etrenjit reaksiyonundan farklı olarak  $SO_4^{2-}$  iyonlarının sertleşmiş betona sonradan girmesiyle değil, çimento içindeki  $SO_4^{2-}$  iyonlarından kaynaklandığı saptanmıştır. DEF oluşumu üç ana faktöre bağlanabilmektedir; 1) Çimentonun yapısında zamanla çözünecek yüksek oranda sülfat içermesi, 2- Betonun mikro ve

makro boşluk içermesi, 3- Yapı elemanının sürekli veya aralıklı olarak suyla temas etmesi veya nemli ortamda bulunması [64].

Almanya, Finlandiya, Amerika Birleşik Devletleri, Avustralya ve başka bazı diğer ülkelerde ısıtma işlemi uygulanan traverslerde bu hasarlar gözlemlenmiş olup hasarların gecikmiş etrenjitten kaynaklandığı sonucuna varılmıştır [63,65].

Stark ve Seyfarth [66] ısıtma kür işlemlerinin betonda gecikmiş etrenjit oluşumuna etkilerini inceledikleri çalışmada çeşitli kür sıcaklıkları uygulanan betonların 180 günlük ve 5 yıllık SEM incelemelerini gerçekleştirmişlerdir. Bu incelemeler sonucunda normal kür edilen numunelerin 180 günlük incelemesinde etrenjit oluşumuna rastlanmamıştır. Ancak, 5 yıllık olarak yapılan incelemede beton boşlukları çevresinde ama boşlukları tam olarak dolduramayan iğne şekilli etrenjit oluşumu gözlemlenmiştir. 60°C kür işlemi uygulanan numunelerde 180 günlük yapılan inceleme sonucunda hem boşluklar içerisinde hem de çimento hamuru ile agrega ara yüzünde iğne uçlu etrenjit oluşumu ile karşılaşmıştır. Bu numunelerde 5 yıllık yapılan inceleme sonrasında 180 günlük yapılan incelemeye göre daha fazla miktarda ve daha büyük kristal yapısına sahip etrenjit oluşumu gözlemlenmiştir. 90°C olarak uygulanan kür işlemi sonrasında ise etrenjit kristallerinin daha da büyük hale geldiği belirlenmiştir. Bu numunelerin 5 yıl sonraki SEM görüntüleri incelendiğinde çok sayıda mikro çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Çimento hamurundaki çatlaklar, boşluklar ve çimento hamuru agrega ara yüzünün etrenjitin bu yeni fazı olan gecikmiş etrenjit kristalleri ile dolduğu görülmüştür [66].

Günümüzde, gecikmiş etrenjit oluşumunda şu etkenlerin önemli rol oynadığı bilinmektedir:

1)Yüksek beton sıcaklıkları; a) Betonun 70°C'nin üzerinde uzun bir zaman aralığında küre tabii tutulması, b) Kütle betonunda ve/veya sıcak havada beton dökümünde yüksek iç sıcaklık, 2) Betonun değişken rutubet koşuluna maruz kalması, 3) Çimento türü (özellikle sülfat içeriği), 4) Geçirimsizlik (betonun boşluk yapısı) [67].

Kjellsen ve diğ. [58] ısıtma kür işlemlerinin betonun boşluk yapısına etkilerini araştırdıkları çalışmada çimento hamuruna sırasıyla 5°C, 20°C ve 50°C ısıtma işlemleri uygulamışlardır. Numuneler % 70 hidrasyon gelişimine ulaştığında bazı incelemeler ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada boşlukları ölçmek için

MIP ve elektron mikroskobu görüntülerinden faydalanılmıştır. Yapılan gözlem ve ölçümler neticesinde yüksek sıcaklıklarda çimento hidratasyonu daha hızlı bir şekilde ilerlemekte ancak hidratasyon ürünlerinin dağılması yavaşlamaktadır. Yüksek sıcaklıklarda çimento hidratasyon ürünlerini sınırlı bir süre içinde çimento tanelerinden önemli bir mesafede uzağa dağıtmak mümkün değildir. Bu durum çimento taneleri etrafında bariyer oluşturarak çimento tanelerinde ikincil nemlendirmeyi de önlemektedir. Betonda büyük hacimli boşluklar gelişmekte ve daha kaba bir boşluk yapısı oluşmaktadır. Bu durumda betonun elastisite modülünün azalmasına ve yük etkileri altında çatlayarak dayanımının azalmasına neden olmaktadır [58].

Kür sıcaklığı açık şekilde çimento hamurunun boşluk yapısını etkilemektedir. Yüksek sıcaklıklarda kür işlemi ile büyük boşlukların oluşmasında belirgin bir artma eğilimi olmakta ve buna bağlı olarak toplam porozitede bir artış gözlemlenmektedir.

Aşağıda Çizelge 2.9'da ısı kur sıcaklığı ile porozite arasındaki ilişki verilmektedir [58].

**Çizelge 2.9 :** Kür koşullarının poroziteye etkisi [58].

<b>Kür sıcaklığı</b>	<b>Porozite (MIP)</b>	<b>Porozite (BSEI)</b>
5 °C	33,2	% 4,3
20 °C	34,2	% 10,9
50 °C	35,7	% 15,1

Campbell ve Detwiler [68] betonun dayanıklılığının, betonun performansı için birincil derecede öneme sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Betonda dayanıklılığın genellikle 0,45 veya daha az su/çimento oranı ile sağlanacağını düşündüğünü ancak, betonun dayanıklılığını etkileyen sertleşme sürecinin ise çoğunlukla göz ardı edildiğini belirtmişlerdir. Klor iyonlarının betona nüfuz etkisi düşünüldüğünde çimento hamurunun gözenek yapısının oldukça önemli olduğunu, düşük su-çimento oranının beton performansını iyileştirilmesinde sınırlı etkinlik sağladığını ifade etmişlerdir [68].

Morsy [69] sıcaklığın betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkilerini incelediği çalışmada betonların SEM görüntülerini değerlendirmiş ve yüksek sıcaklıklarda C-S-

H kristallerinin daha yoğun bir yapıya sahip olduğunu ve kapiler boşlukları doldurmadığını tespit etmiştir. Bu durumun sonucu olarakta iç yapı daha heterojen olmaktadır [69].

## 2.9 Donma Çözülme Etkisi

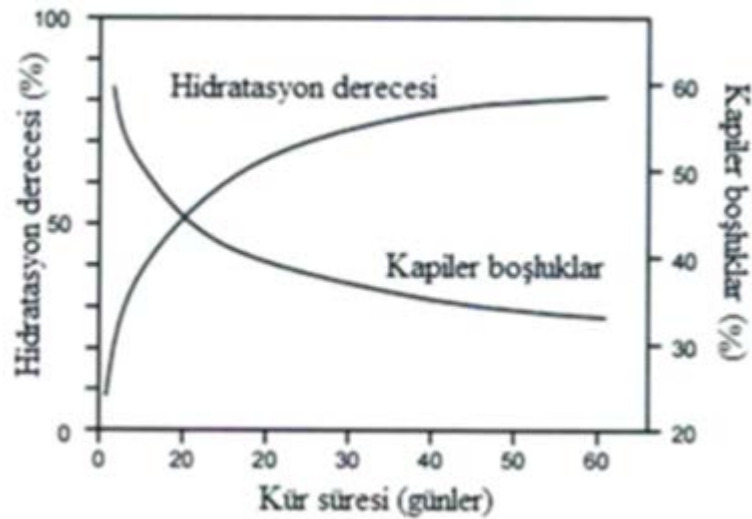
Beton bugün dünyada kullanılan en yaygın yapı malzemesidir. Bununla birlikte birçok çevresel etki betona zarar vermektedir. Betonun dayanıklılığını azaltan önemli faktörlerden bir tanesi de donma çözülme etkileridir [70].

Donma çözülmenin betona etkileri daha çok kapiler boşluklardaki suyun donması ve bu esnada hacminin yaklaşık %8 oranında artması sonucu oluşan hidrolik basınç nedeniyle olmaktadır [70].

Bu hidrolik basıncın büyüklüğü ise çimento hamurunun geçirimsizliğine, doygunluk derecesine, betonda boşlukların aralık faktörüne ve buz oluşum oranına bağlıdır [71].

Bilindiği gibi aralık faktörünün 0,2 mm'nin altında olması halinde betonun donma çözülmeye dirençli olabileceği yaygın kabul görmektedir.

Betonda kapiler boşluklar ne kadar az olursa donma çözülmenin zararlı etkileri de o mertebe düşük olmaktadır. Betonda kapiler boşluklar su/ çimento oranının düşmesiyle azaltılabilir. Ayrıca hidrasyon derecesi arttıkça yine betonda kapiler boşluklar azalmaktadır. Hidrasyon derecesinin kapiler boşluklara etkisi Şekil 2.10'da gösterilmektedir [72].



Şekil 2.10 : Hidrasyon derecesinin kapiler boşluklara etkisi.

Su/çimento oranı ve hidrasyon derecesinin kapiler poroziteye etkisini gösteren başka bir çalışma ise aşağıda Çizelge 2.10'da verilmektedir. Çalışmada su/çimento oranı azaldıkça ve hidrasyon derecesi yükseldikçe kapiler boşlukların azaldığı görülmektedir [73].

**Çizelge 2.10 :** Su/çimento oranı ve hidrasyon derecesinin kapiler poroziteye etkisi [73].

Su/çimento oranı (ağırlıkça)	Kapiler porozite (hacimce) %	
	% 50 hidrasyon derecesi	% 75 hidrasyon derecesi
0,40	31	18
0,50	39	28
0,60	46	36

Betonda birçok diğer çevresel etki gibi donma çözülme zararları da betonda kılcal boşlukların varlığı ile ilişkilidir. Kılcal boşluklardaki su donarken hacimce genişlemekte ve hidrolik basınç oluşturmaktadır. Genleşen su, hareket edecek yeterli yeni alanlar bulamadığında basınç etkisinde betonda çatlaklar oluşmaktadır. Betonda çatlakların oluşması, daha fazla suyun bu çatlak ve boşluklara dolması ve genişlemesine neden olacağından birbirini tetikleyen bir hasarın artmasına yol açmaktadır.

Betonda bu hasarın azaltılması için birbiri ile bağlantı içerisinde olmayan ancak, suyun donma çözülme etkisinde oluşan hacim değişiklikleri esnasında hareket edeceği alanlar oluşturulmaktadır. Donma çözülme altındaki betonlarda hasarı önlemek için kullanılan en etkin çözüm bu hava boşluklarının oluşturulmasıdır. Su/çimento oranının düşürülmesi, geçirimsizliğin azaltılması veya mineral katkıların kullanılması vb. uygulamalar ikincil öneme sahiptir. Donma çözülme etkilerine karşı beton bileşimi ve özellikleri için sınır değerler yerel ve uluslararası standartlarda belirlenmiş ve bu etkiler altındaki betonlarda minimum bir sürüklenmiş hava bulunması zaruri kılınmıştır.

TS EN 206-1 standardında etkili donma çözülme döngülerine karşı beton karışımı ve özellikleri için önerilen bir takım sınır değerler Çizelge 2.11'de verilmektedir.



**Çizelge 2.11** : XF çevresel etki sınıfları için önerilen değerler (TS EN 206).

Çevresel etki sınıfı	En büyük su/çimento oranı	En küçük dayanım sınıfı	En az çimento içeriği (kg/m <sup>3</sup> )	En az hava içeriği (%)
XF1	0,55	C30/37	300	-
XF2	0,55	C25/30	300	4,0
XF3	0,50	C30/37	320	4,0
XF4	0,45	C30/37	340	4,0

Çizelge incelendiğinde donma çözülme etkileri altında betonların performansları sürdürülebilmesi için belirli oranlarda hava içeriğine sahip olmaları zorunlu kılınmaktadır. BS EN 206-1 standardında minimum hava içeriği betonda kullanılan en büyük agrega tane boyutuna göre daha da artmaktadır [74].

Yüksek performanslı betonların normal dayanımlı betonlara göre yüksek dayanım ve dürabilite gibi üstünlükleri vardır. Ancak donma çözülme etkileri karşısında performansları artırmak için bu betonlarda da sürüklenmiş hava oluşturulmaktadır. Betonda oluşturulan bu hava boşlukları betonların dayanımlarının düşmesine neden olmaktadır. Her ne kadar bu dayanım kayıpları arzu edilmese de köprü vb. yapılarda şartnameler bu durumu zorunlu kılmaktadır [75].

Hale ve diğ. [75] yüksek performanslı betonların hava sürükleyici katkıları içermeden de azaltılmış su/çimento oranına bağlı olarak düşük geçirimsizlik özellikleri nedeniyle donma çözülme etkilerine karşı yeterince dayanıklı olduğunu göstermiştir. Ancak, donma çözülme etkileri su/çimento oranı dışında agreganın boyutu ve tipine, kullanılan çimentoya ve kür koşulları gibi diğer etkenlere de bağlıdır. Bu sebeplerle saha uygulamalarında herhangi bir uygunsuzlukla karşılaşılması için donma çözülme riskleri altındaki yüksek performanslı betonlarda hava sürükleyici malzemelerin kullanılması tavsiye edilmektedir [75].

## **2.10 Buz Çözücü Kimyasalların Etkisi**

Buz çözücü kimyasallar dünyada yaygın şekilde beton yollar ve köprüler üzerinde karın birikmesini ve buzun oluşmasını önlemek için kullanılmaktadır. Ancak, buz

çözücü tuzlar donma çözülme çevrimleri süresince betonda önemli hasarlara neden olabilmektedir [76].

Soğuk iklim bölgelerinde yolların yüksek oranda bir kısmı ağır kış koşullarına maruz kalmaktadır. Yollarda oluşan kar ve buzlanma sıklıkla karayolu güvenliğini ve kapasitesini etkilemektedir. Ayrıca, bu durumun ekonomik etkileri de olmaktadır. Kış ayları boyunca servis kolaylığı sağlamak amacıyla, çeşitli yöntemler kullanılır. Bunlardan bazıları buzun oluşumunu önleyici (Anti-icers) kimyasallar olup buz ile kaldırım arasında bağ oluşmasını önlemek için, bazıları ise buzlanma sonrası buz çözücü kimyasallar (Deicers) olarak yol üzerinde oluşan kar ve buzun temizlemek için kullanılır. Her iki tekniğin temel amacı karın temizlenmesi ile yollardan kar ve buzun kaldırılmasına yardımcı olmaktır [77].

Amerika'da yollardaki buz tehlikesinin azaltılması için çeşitli stratejiler üzerinde çalışılmaktadır. Bu amaçla, Amerika Ulusal Otoyol Araştırma Programı (NCHRP) çeşitli malzemeler ve bu malzemelerin uygulama yöntemleri için rehberler yayınlamaktadır. Bu yöntemler; a) buzlanmanın önlenmesi, b) buzun çözülmesi, c) kar ve sürtünme donanımı ile birlikte buzun kaldırılması, d) mekanik yolla çıkarma şeklindedir [78].

Buz çözücüler betonu fiziksel ve kimyasal olarak etkileyebilir. Fiziksel etkileri genellikle çatlaklar ve pullanma şeklinde olur. Pullanmanın sebebi olarak çeşitli mekanizmalar öngörülmektedir. Bunlar termal şok, yağış, tuz kristallerinin büyümesi ve ozmotik basınç etkisi olarak düşünülebilir. Buz çözücülerin kimyasal etkileri ise genellikle fiziksel etkilerine göre ikinci seviyede yine de önemlidir. Kimyasal reaksiyonlar buz çözücüler ile çimentonun hidratasyon ürünleri, agregalar ve donatı çeliği arasında olabilir. Buz çözücüler çimento hamuru içerisindeki etkileri kalsiyum hidroksitlerden (C-H) kalsiyumun ayrıştırılması ve kalsiyum silikat hidratlardan (C-S-H) kalsiyum iyonlarının ayrılarak yerine buz çözücülerdeki magnezyumun bağlanarak magnezyum silikat hidratların (M-S-H) oluşması ile brisit ( $Mg(OH)_2$ ), kompleks tuzlar ve kloridler oluşmasına yolaçar. Buz çözücülerden gelen alkalilerin etkisi ile alkali silika reaksiyonu ve alkali karbonat reaksiyonu başlayabilir ve hızlanabilir. Donatı çeliği çevresinde klor iyonlarının kritik konsantrasyonlarının birikimi de korozyonu başlatabilir [79-81].

Buz çözücülerin asfalt üzerindeki etkileri de söz konusu olmakla birlikte beton kaldırım ve yollar üzerinde önemli sorunlara neden olmaktadır. Buz çözücüler betonu hem fiziksel hem de kimyasal olarak belirgin bir biçimde etkiler [82].

Buz çözücülerin betona etkisi konusunda birçok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmaların çoğu beton ve harç numunelere donma çözülme çevrimleri yapılması ile ıslanma kuruma çevrimleri uygulanması şeklindedir. Donma çözülme çevrimleri buz çözücülerin betona olan fiziksel etkilerini daha iyi bir biçimde ortaya çıkarmak amacı ile yapılmaktadır. Islanma-kuruma çevrimleri ise donma etkisinden bağımsız olarak buz çözücülerin betona olan kimyasal etkilerinin belirlenebilmesi için gerçekleştirilmektedir.

Buz çözücü tuzlar, genellikle sodyum klorür ( $\text{NaCl}$ ), magnezyum klorür ( $\text{MgCl}_2$ ) ve kalsiyum klorür ( $\text{CaCl}_2$ ) tuzları kullanılmaktadır. Numune özellikleri ve deney metotlarındaki farklılıklara rağmen genelde sodyum klorüre maruz kalan numunelerde daha önemsiz etkiler ortaya çıkmaktadır. Magnezyum klorür etkisinde ise numunelerde çatlaklar, kütle kayıpları ve basınç dayanımı azalmaları olmak üzere önemli hasarlar yaşanmaktadır. Magnezyum klorür etkisindeki numunelerde bozulmanın nedeni M-S-H ve  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  oluşumundan kaynaklanmaktadır [83].

Lee ve diğ. [84] buz çözücü kimyasallarla ilgili yaptıkları çalışmada magnezyumun tüm formlarının betona zarar verdiğini tespit etmişlerdir. Magnezyum klorür kalsiyum silikat hidrat C-S-H kristallerini magnezyum silikat hidrata M-S-H dönüştürmesi ile betonda önemli zararlara sebep olmaktadır [84].

Darwin ve diğ. [85] buz çözücü kimyasalların betona etkilerini inceledikleri çalışmada  $\text{NaCl}$  ve  $\text{MgCl}_2$  çözeltilerini değişik konsantrasyonlarda kullanmışlardır. Çalışmada %3  $\text{NaCl}$  (1,06 mol) ve %15  $\text{NaCl}$  (6,04 mol) referans çözeltilerine molar olarak denk gelecek şekilde  $\text{MgCl}_2$  çözeltileri hazırlamışlardır.

Hazırlanan çözeltiler kullanılarak numuneler ıslanma kuruma çevrimlerine tabi tutulmuşlardır. Çalışma sonucunda, %3 gibi düşük konsantrasyonda kullanılan sodyum klorür çözeltisinin betona zarar vermekle birlikte aynı koşullardaki magnezyum klorür çözeltisine göre zarar etkisinin çok daha az olduğu görülmüştür. %15'lik sodyum klorür çözeltisi kullanımı durumunda ise numunelerde zarar büyük ve daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Ancak yine de magnezyum klorür çözeltisinin 10 haftalık sürede verdiği zarar etkisinin göreceli olarak sodyum klorür

çözeltisinin 95 haftada verdiği zarardan çok daha fazla olduğu görülmüştür. Magnezyum klorürün betona zararlı etkisinin hem beton boşlukları içerisinde kristallerin gelişmesi ile fiziksel zarar oluşturmasından hem de çimento hamurunda değişikliklere neden olarak kimyasal zarar etkisinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada sonuç olarak sodyum klorür çözeltisinin düşük konsantrasyonlarda numuneler üzerinde küçük etkiye sahip olduğunu, yüksek konsantrasyonlarda ise hasar büyümekle birlikte magnezyum klorür çözeltisine göre etkisinin daha az olduğunu tespit etmişlerdir. Magnezyum klorür çözeltisinin düşük konsantrasyonları dahi betonda ölçülebilir zararlar oluşturmaktadır [85].

Şekil 2.11 ve Şekil 2.14 arasındaki resimlerde buz çözücü tuzların betonda oluşturduğu zararlar görülmektedir.



**Şekil 2.11** : 95 hafta 1,06 molar NaCl çözeltisine maruz bırakılan numuneler [85].



**Şekil 2.12** : 80 hafta 1,06 molar MgCl<sub>2</sub> çözeltisine maruz bırakılan numuneler [85].



**Şekil 2.13** : 95 hafta 6,04 molar NaCl çözeltisine maruz bırakılan numuneler [85].



**Şekil 2.14** : 10 hafta 6,04 molar MgCl<sub>2</sub> çözeltisine maruz bırakılan numuneler [85].

Shi ve diğ. [86] buz çözücü tuzların betona etkisini inceledikleri çalışmada, magnezyum klorür iyonlarının betona zararlı etkisinin C-S-H kristallerini M-S-H yapısına dönüştürmesinden ileri geldiğini belirtilmişlerdir. Magnezyum klorür betonda hacim değişikliklerine, basınç dayanımının azalmasına ve mikro çatlakların oluşumuna neden olmaktadır [86].

Peterson [87] sodyum korür ve magnezyum klorür kullanarak yaptığı çalışmada magnezyum iyonlarının betona zararının sodyum klorür iyonlarından fazla olduğunu belirtmiştir. Numunelerin dayanımlarında düşüşler gözlemlemiş ve bu azalmaların birusit (Mg(OH)<sub>2</sub>) oluşumundan kaynaklandığını ifade etmiştir. NaCl çözeltisi ise harç haldeki prizma numunelerin basınç ve eğilme dayanımını daha az etkilemektedir [87].

Sutter ve diğ. [88] tarafından su/çimento oranı 0,40, 0,50 ve 0,60 olan beton karışımları üzerinde buz çözücü tuzlar ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda 84 günlük bir çevrim sonrasında magnezyum klorür çözeltisi uygulanan betonlarda önemli hasar gözlemlenirken sodyum klorür çözeltisi uygulanan numunelerde hasarın önemli olmadığı belirtilmiştir. Ayrıca numunelerin petrografik analizleri de çalışma kapsamında incelenmiş ve magnezyum klorür uygulanan çözeltilerde birusit oluşumu ile karşılaşılmıştır [88].

### **2.11 Tecrit Malzemesi Etkisi**

Beton ve betonarme yapılar bileşenlerinin dış çevre koşullarına maruz kalması sonucunda zamanla hasara uğrarlar. Betonların zarar görmesini engellemek için ideal çözüm bu zarar verici zararlı etkilerin betona temaslarını önlemektir. Ancak, bu durum pratikte mümkün olmayıp beton yüzeyine koruyucu kaplamaların kullanılması ile zararlı maddelerin girişi azaltılmaktadır [89].

Betonarme yapıların hasarına neden olan çeşitli faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

i) Endüstriyel çevre, deniz veya buz çözücü tuzlardan ileri gelen iyonların (klorür, sülfat) betona girmesi ve suyun varlığı ile taşınmasıdır. Zararlı iyonların betonu hasara uğratmasının asıl nedeni donatı etrafındaki pasif koruyucu tabakaya zarar vermesinden kaynaklanmaktadır [90-92].

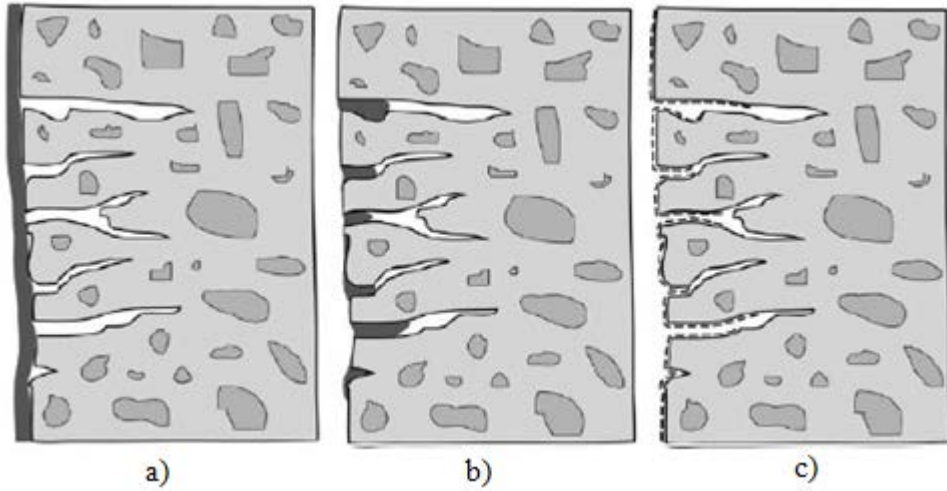
ii) Suyun diğer önemli etkisi suda çözünebilir  $CO_2$  ve  $SO_2$  gazlarının beton içine taşınması ve bu durumun betonda gömülü haldeki çelik donatı etrafında alkaliliğin azalmasına sebep olmasıdır [93].

iii) Yine betonda zararlı alkali agrega reaksiyonlarının gelişmesi ve donma çözülmenin yıkıcı etkileri içinde suyun varlığı başlıca etkindir.

Betona nüfuz eden suyun kolayca ve hızlı bir şekilde betondan uzaklaştırılması önemlidir. Yalıtım malzemeleri su geçişini azaltırken, betonu koruyabilmesi için de kaplama ile beton arasında herhangi aderans kaybı olmaksızın su buharı geçişine izin verecek nitelikte olmalıdır. Bu nedenle su girişini azaltmak için kullanılacak yalıtım amaçlı malzemelerin su emme ve su buharı geçirimsizliği özelliklerinin bilinmesi gereklidir [94].

Beton içerisinde kılcal boşluklar ağ şeklinde birbiri ile bağlantılı olarak su, gaz ve iyonların girişine ve taşınmasına neden olur. Bu taşınmanın gerçekleşmesinde; a) serbest haldeki moleküller veya iyonların konsantrasyon farkından dolayı difüzyonu b) hidrolik basınç farkları nedeniyle suya doymun numune boyunca sıvı veya gaz geçirimsizliği c) kılcal boşluklardaki yüzey gerilimine bağlı olarak kılcal sıvı emme etkili olmaktadır. Bu mekanizmalar içerisinde dış çevre koşulları altında en etkili ve diğerlerine baskın olan olan kılcal yolla sıvı emilmesidir. Klorür iyonlarının betona girmesi ve taşınması kılcal yolla su emilimi ve difüzyon etkisinde gerçekleşmektedir. Kılcal su emme dış kuvvetler etkisi olmaksızın kapiler boşluklardaki yüzey gerilimi nedeniyle boşluklu ve doymun halde olmayan katılar içerisinde suyun hareketi olarak tanımlanabilir [95].

Betonda su geçişini azaltmak için kullanılan yüzey yalıtım sistemleri temel olarak üç ana kategoriye ayrılmaktadır (Şekil 2.15). Bunlar, a) kaplamalar b) boşluk tıkaçıcılar c) boşluk astarları



**Şekil 2.15 : Yüzey koruma sistemleri.**

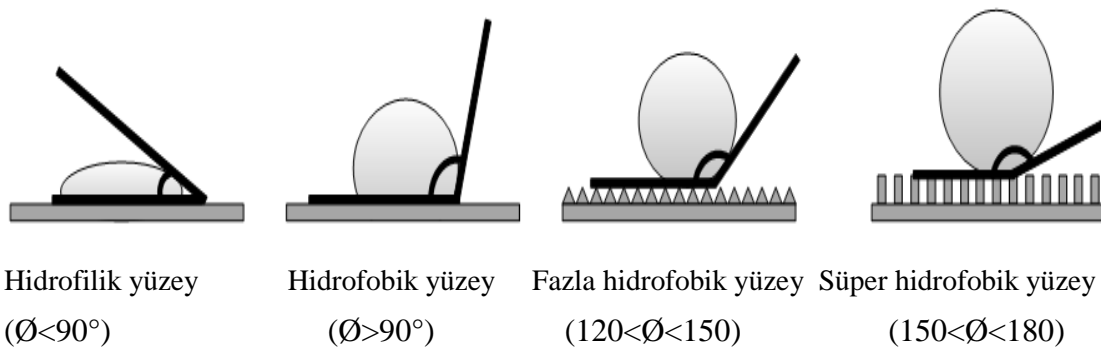
Kaplamalar genellikle epoksi reçineler, poliüretan reçineler, akrilik reçineler ve çimento esaslı modifiye polimerlerden oluşmaktadır. Kaplamalar her türü klorürlere karşı etkili olup korozyonu azaltmaktadır. Bu kaplamaların betona yapışma mukavemetinde çimento esaslı polimer modifiye kaplama sistemlerin diğerlerinden daha yüksek yapışma dayanımı olduğu, su geçirimsizliği açısından da epoksi ve poliüretan kaplamaların çimento esaslı kaplamalardan daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir [96].

Boşluk tıkaçıcılara örnek ise sodyum silikat gibi malzemelerdir. Bu malzemeler betonun kılcal boşluklarını doldurarak su girişini önlemeyi amaçlar. Ancak, büyük molokül yapıları nedeniyle boşlukları tam olarak dolduramazlar ve etkinlikleri halen tartışma konusudur [97].

Boşluk astarları veya diğer ismiyle tecrit malzemeleri ise küçük molokül yapıları nedeniyle boşluklara daha iyi nüfuz ederek ve bazı beton bileşenleri ile reaksiyona girerek hidrofobik bir astar oluşturur. Boşluk astarlarının en önemli üstünlüğü buhar geçirimsizliğine izin vermesidir. Kaplamalar ve boşluk tıkaçıcılar nemi kaplamanın altına hapsederek buharlaşmasını engeller. Ancak, bu durum kaplama altında su basıncı oluşmasına veya boşluklarda suyun donma çözülmesi ile betona zarar vermesine neden olur.

Bir malzemenin hidrofobik özelliği o malzemenin su iticilik yeteneği olarak tanımlanır ve uygulandığı yüzeyin kimyasal bileşimine ve yüzey geometrisine (yüzeyin mikro ve nano yapısal morfolojisi) bağlıdır [98].

Su damlası ile yüzey arasındaki temas açısı genel olarak hidrofobik özelliğin bir göstergesi olarak kabul edilir. Bu temas açısı 90 dereceden daha büyükse yüzeyin su itici eğilimde hidrofobik özellikte olduğu, 90 dereceden küçük ise yüzeyin su emme ve ıslanma eğiliminde olarak hidrofilik özellikte olduğu anlaşılır (Şekil 2.16). Beton normal durumlarda gözenekli yapısı ile hidrofilik bir malzeme olup su emme eğilimindedir [99].



**Şekil 2.16 :** Hidrofilik, hidrofobik, fazla hidrofobik, süper hidrofobik yüzeyler [100].

Betonu su geçirimsiz hale getirmek için hidrofobik malzeme uygulanmasında iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan birinci su itici malzemelerin beton yüzeyine uygulanarak beton yüzeyinin su geçirimsiz hale getirilmesidir. Bu durumda

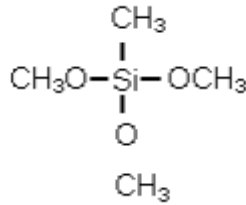


betonların donma çözülme etkilerine karşı dayanıklılıkları da arttırılmış olur [101,102]. İkinci yöntem ise su geçirimsizlik katkılarının beton karışımına doğrudan eklenmesi ile betonda su geçirimsizliğinin sağlanmasıdır [103].

Günümüzde birçok ticari ürün beton yüzeyinde su geçirimsizliği sağlanması için kullanılmaktadır. Böylece, donatının paslanması, çatlaklar, donma çözülme, tuz hasarı, mantar ve yosun gibi etkilerin önlenmesi amaçlanmaktadır. Ticari ürün olarak literatürde yer alan diğer birçok çalışmada su itici malzemeler olarak silanlar ve siloksanlar, sodyum silikat, silikon reçinesi, akrilik son kat ile silan/siloksan, alkilalkoksilan, iki bileşenli akrilik, terebentin silikon, siloksan akrilik, su bazlı alkilalkoksilan ve akrilik lateks kullanılmaktadır. Epoksi ve akrilik bazlı hidrofobik malzemelere karşın silan ve siloksan esaslı malzemeler daha küçük molokül yapısına sahiptir ve böylece betonun boşlukları daha iyi doldurarak yüzeyde daha etkin sonuçlar vermektedir [104].

Hidrofobik etkilerine ek olarak silan ve siloksan esaslı malzemeler betonla buz arasındaki bağı zayıflamasına da katkıda bulunmaktadır [105].

Alkoksil ve alkil silanlar rutin olarak hidrofobik yüzey işlemleri için kullanılır. Bir alkil alkoksilan tipik örneği Şekil 2.17’de gösterilmiştir.



**Şekil 2.17 :** Tipik alkil alkoksilan moloküler yapısı [104].

Tecrit amaçlı kullanılan malzemelerin betonların geçirimsizlik özelliklerine etkileri ve çeşitli zararlı koşullara karşı performansı üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. İbrahim ve Al-Gahtani [106] yalıtım amaçlı su itici tecrit malzemelerinin etkileri ile ilgili yaptıkları çalışmada, betonun klorür kaynaklı korozyon, karbonatlaşma ve sülfat etkisi gibi çeşitli zararlı koşullara maruz kaldığında donatıdaki korozyonu incelemişlerdir. Bu çalışmada (su/ çimento=0,45) olarak belirlenmiştir. Çalışmada beton numunelerin basınç mukavemetindeki azalma da belirlenmiştir. Beton yüzeyine sodyum silikat, silisyum reçine çözeltisi, silan /siloksan, silan / siloksan ve son kat akrilik, alkilalkoksilan ve iki bileşenli akrilik olmak üzere 6 farklı yüzey

uygulaması yapılmıştır. Bu uygulamalar sonrasında yüzeyine su itici yalıtım malzemesi uygulanan numunelerin, yüzeyine herhangi bir uygulama yapılmayan numunelere göre 3 ay sonrasında klorür konsantrasyonunda ve 5 hafta sonra ise karbonatlaşma derinliğinde azalmalar olduğu tespit edilmiştir. Sülfat çözeltisine 330 gün boyunca daldırıldıklarında ise yüzeyinde su itici malzeme bulunan numunelerdeki basınç dayanımı kayıpları daha az olmaktadır. Yüzeğe uygulanan tecrit malzemeleri içerisinde en etkin sonuçlar silan/siloksan ve son kat akrilik içinde numunelerde elde edilmiştir [106].

Pfeifer [107], Medeiros ve Helene [108], Moon ve diğ. [109] tarafından yapılan çalışmalar, hidrofobik uygulamaların klorür iyonu girişlerini ve dolayısıyla korozyonu önemli ölçüde azalttığını ortaya koymaktadır [107-109].

Ancak bu malzemelerin uzun süreli performansı ile ilgili bilgi sınırlıdır. Schueremans ve diğ. [110] su itici malzemelerin uzun süreli performansının belirlenmesi için yürüttükleri sınırlı sayıda çalışmalardan birisinde silan esaslı koruma malzemesinin bir limanın rıhtım duvarı üzerindeki uzun süreli etkilerini araştırmışlardır. Silan esaslı koruma malzemesinin 12 yıl boyunca deniz ortamına maruz kaldıktan sonra beton üzerinde koruyucu etkisinin halen mevcut olduğu görülmüştür [110].

Vries ve Polder [104] silan esaslı tecrit malzemelerinin yıllar içerisindeki etkinliğini belirlemek için yaptıkları çalışmada Hollanda'da 5 yıl boyunca dış çevre koşullarına maruz kalan numunelerin su emme ve klorür konsantrasyonlarını ölçmüş ve silan esaslı tecrit malzemesinin halen etkinliğini sürdürerek koruma özelliğinin devam ettiğini belirlemişlerdir [104].

Pfeifer ve Scali [107] tecrit malzemesinin UV yaşlandırma işlemleri sonrası performansını inceledikleri çalışmada yaşlandırma deneyleri sonucunda keten tohumu yağı içeren numunelerin klor iyonu girişlerini azaltma yeteneğinin yüzeyine silan uygulanan numunelerden çok daha iyi olduğunu belirlemişlerdir [107].

Wright ve diğ. [111] klorür iyonlarının geçirimsizliğini azaltmak için siloksan ve keten tohumu yağı uygulanmasının, silan uygulanmasından daha etkili olduğunu belirtmişlerdir [111].

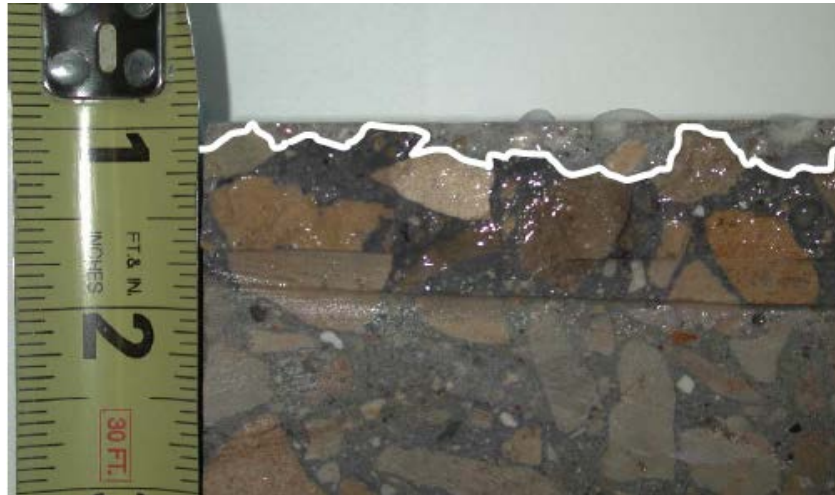
Whiting [112] köprü döşemelerinde kullanılan su bazlı silan uygulamalarının betonun klor iyonu geçirimsizliğine etkisini araştırdığı çalışmada silan malzemenin bir

katkısı olmadığını tespit etmiştir. Ancak daha sonrasında bu duruma köprü üzerinde geçmişte uygulanmış tecrit malzemesinin su itici özelliği nedeniyle yeni uygulanan silan malzemeye bariyer oluşturmasının neden olduğunu belirlemiştir. Bu nedenle yeniden tecrit işlemi yapılacak tüm uygulamalarda solvent bazlı ürünlerin kullanılması gerektiğini belirtmiştir. Su bazlı ürünler tekrarlanan tecrit uygulamalarında etkili olmamaktadır [112].

McGettigan [113] tecrit malzemelerin beton yüzeyine işleme derinlikleri ile ilgili yaptığı çalışmada köprü tabliyelerinin trafik nedeniyle yoğun şekilde aşınma etkilerine maruz kaldığını ayrıca ultraviyole ışınlarının tecrit malzemesinin etkin bileşen hammaddesine zarar verdiğini, bu durumların önlenmesi açısından tecrit malzemelerin betona işleme derinliğinin önemli olduğunu belirtmiştir.

Ancak silan ve siloksan esaslı tecrit malzemeleri için işleme derinliği boyunca etkinliğin olmadığı da ifade etmiştir. Araştırmada su işleme derinliğinin tamamında tecrit malzemesinin etkili olmadığı, sadece efektif bir bölümünün su itici özellikte olduğu belirtilmiştir [113].

Tecrit malzemesinin işleme derinliğini tespiti için standart bir deney yöntemi olmamakla birlikte uygulama yapılan numunenin yüzeyine dik en kesitinin ıslatılması ile ıslanmayan kuru bölüm bandı ölçülerek işleme derinliği belirlenmektedir. Şekil 2.18'de örnek bir işleme derinliği ölçümü verilmektedir.

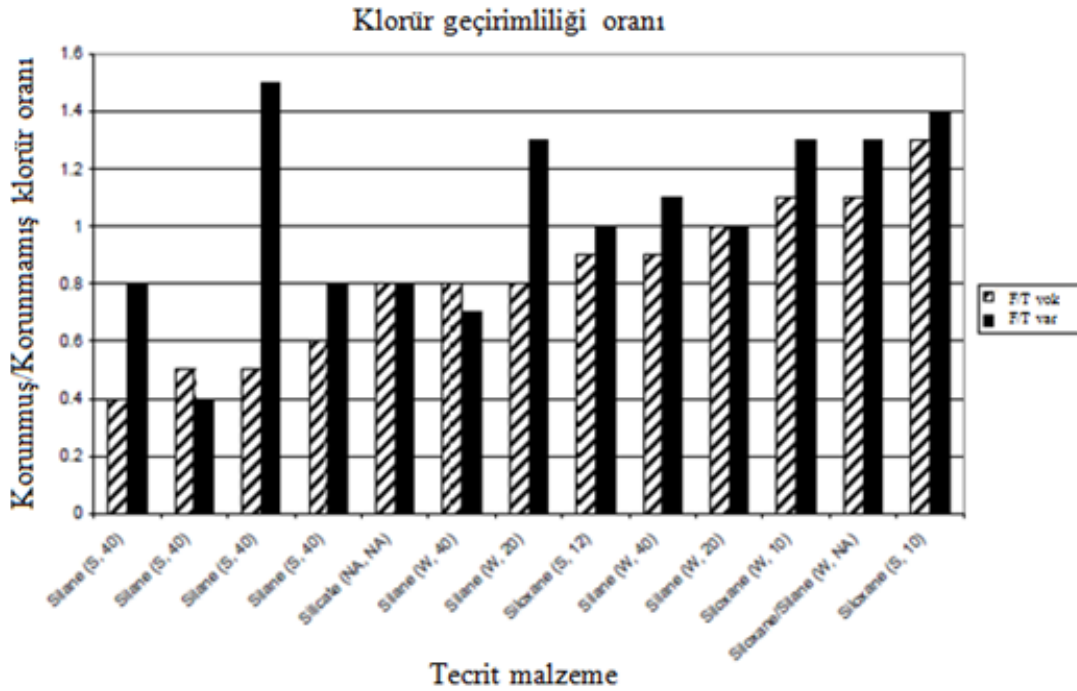


Şekil 2.18 : İşleme derinliği ölçümü [114].

Weyers ve diğ. [115] tecrit malzemesinin saha uygulamalarında servis süresinin tespiti için yaptıkları çalışmada, köprü tabliyelerinde yılda ortalama 0,17 mm bir

aşınma olduğunu tespit etmişlerdir. Bu durumda tecrit malzemesinin kullanım ömrü, tecrit malzemesinin efektif işleme derinliğinin köprü tabliyesindeki aşınma derinliğine bölünmesiyle belirlenmektedir. Tecrit malzemeleri için efektif işleme derinliği genellikle 1 mm olarak kabul edilmektedir. Çalışma sonucunda, silan ve siloksan tecrit malzemesi uygulamalarının trafik yüklerinin sebep olduğu aşınmadan dolayı servis ömrü sekiz yıl olarak tahmin edilmiştir [115].

Pincheira ve Dorshorst [114] donma çözülme çevrimlerinin su itici tecrit malzemesinin etkinliğine olan etkilerini araştırdıkları çalışmada silanlar ve siloksanları değişik konsantrasyonlarda su ve solvent bazlı olarak kullanmışlardır. Yapılan çalışmalar neticesinde donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılan tüm su itici tecrit malzemelerin klor iyonu girişini azaltıcı özelliklerinde belirgin azalma tespit edilmiştir. Ancak bu azalma etkileri farklı tecrit uygulamaları için farklı seviyede olmaktadır (Şekil 2.19). Donma çözülme çevrimleri sonrası en iyi üç performansın iki tanesi solvent bazlı silan esaslı tecrit malzemesinde, bir tanesi ise su bazlı silan esaslı tecrit malzemesi uygulanan numunelerde elde edilmiştir.



**Şekil 2.19** : Donma çözülmenin tecrit malzemeye etkisi [114].

Ayrıca yapılan çalışmada, tecrit malzemelerinin etkinliği için mutlaka donma çözülme çevrimleri sonrasındaki performansına göre karar verilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Başlangıçta donma çözülme etkileri olmaksızın iyi performans

gösteren numuneler donma çözülme çevrimi sonunda önemli derecede performans kaybına uğramaktadır. Çalışma sonucunda su itici tecrit malzemelerle yapılacak ileri çalışmalar için donma çözülme çevrimleri sonrası numunelerin klor iyonu geçirimsizlikleri belirgin şekilde arttığı için mutlaka donma çözülme etkileri altında performanslarının incelenmesi gerektiği belirtilmektedir.

Hagen [116] değişik oranlarda etkili madde içeren su ve solvent bazlı silan ve siloksan tecrit malzemeleri kullanarak donma çözülme çevrimleri yaptığı çalışmada her malzemenin donma çözülme etkileri karşısında farklı etkinlikleri olduğunu tespit etmiştir. Çalışmada tüm tecrit malzemelerinin donma çözülme çevrimleri sonrasında silan veya siloksan bazlı olması veya hangi miktarda etkin madde içerdiğinden bağımsız olarak klor iyonu geçirimsizliğinde artışlar ve etkinliklerinde düşüşler olduğu belirlenmiştir. Tecrit malzemeleri içerisinde en iyi sonuçlar %40 su bazlı silan, %40 solvent bazlı silan/siloksan karışımı ve %15 solvent bazlı siloksan esaslı tecrit malzemelerinde elde edilmiştir [116].

Basheer ve diğ. [117] silan ve siloksan esaslı malzemelerde klor iyonu girişine karşı direnç ile tecrit malzemesi işleme derinliği arasındaki korelasyonu araştırdıkları bir çalışmada bu korelasyonun çok düşük olduğunu veya hiç olmadığı sonucuna (  $R = 0,29$  ) ulaşmışlardır. Çalışmadaki tüm tecrit malzemeleri en az 1 mm ortalama işleme derinliğine ulaşmıştır. Tecrit malzemelerin işleme derinliği klor iyonu geçirimsizliğini etkilememektedir. Ancak bu çalışma sadece laboratuvar ortamında yapılmış ve yüzey tecrit malzemelerin aşınma ve donma çözülme etkileri sonrası etkinlikleri ise çalışma kapsamında incelenmemiştir [117]. Nitekim bu konuda Whiting [112] tarafından yapılan araştırmada donma çözülme etkileri altında her tecrit malzemesinin kendine özgün farklı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu durum işleme derinliği ile klor iyonu geçirimsizliği arasında neden korelasyon olmadığını açıklamaya yardımcı olmaktadır. Donma çözülme etkileri altında her tecrit malzemesi farklı oranda zarar görmekte bu durum klor iyonu geçirimsizliklerini de etkilemektedir [112].

Basheer ve diğ. [117] betonun nem içeriğinin tecrit malzemesinin işleme derinliğine etkisini araştırdıkları çalışmada betonun mevcut durumdaki neminin tecrit malzemesinin betona işleme derinliğinde etkili olabileceğini belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada beton numunelere silan nüfuz etme derinliği yüksek nem seviyelerinde azalmıştır. Çalışma sonuçları silanlar, siloksanlar, silan / siloksan karışımları için elde edilmiştir [117].

Sherman ve diğ. [118] yaptıkları çalışmada silan ve siloksan esaslı tecrit malzemelerinin uygulama koşullarında dikkat edilmesi gereken hususları belirtmişlerdir. Silan ve siloksan esaslı tecrit malzemelerinin yağ esaslı kaplama malzemeleri gibi beton gözeneklerini tıkayarak değil beton yüzeyi ile kimyasal reaksiyona girerek yüzeyde su ve klor iyonu geçirmeyen ancak su buharı geçişine izin veren bir tabaka oluşturduğunu ifade etmişlerdir. Ancak, silan ve siloksan tecrit malzemeleri ile beton arasında iyi bir bağın oluşabilmesi için yüzeyin kuru olması vurgulanmıştır. Tecrit malzemesinin etkinliğini sürdürebilmesi için her beş yılda bir tecrit malzemesinin yeniden uygulanması gerektiği ve bu uygulama öncesinde daha önceki tecrit malzemesinin yüzeyden kaldırılmasına gerek olmadığı ifade edilmiştir. Köprü tabliyelerinde ilk defa yapılacak uygulamalarda ise tecrit işlemi öncesi yüzeyin mutlaka temizlenmesi, yüzeyde sertleştirici kür malzemeleri kullanılmışsa veya yağ mevcutsa uzaklaştırılması gerektiği belirtilmiştir [118].

Tüm çevre koşulları için yeterli korumanın bir garantisi olmamakla beraber EN 1504-2 standardında da tecrit amaçlı kullanılacak malzemeler için sağlaması gereken koşullar belirtilmiş ve Çizelge 2.12’ de verilmiştir.

**Çizelge 2.12 :** Beton yüzeylerin tecrit işleminde kullanılan su itici malzemeler için koşullar (EN 1504-2) [119].

Özellik	Test Yöntemi	Koşullar
Donma çözülme-tuz çevrimi sonrası kütle kaybı	EN 13581	Tecrit yapılmayan numunedeki kütle kaybına tecrit yapılan numunede en az 20 çevrim daha sonra ulaşılmalı
Hidrofobik işleme derinliği	prEN 14630	Sınıf I < 10 mm Sınıf II > 10 mm
Su emme ve alkali dayanıklılığı	EN 13580	Tecrit yapılmayan numuneden su emme oranı < %7,5 ve alkali çözeltisine daldırma sonrası < %10
Kuruma oranı katsayısı	EN 13579	Sınıf I > %30 Sınıf II > %10
Klor iyonu difüzyonu	Ulusal standartlar	EN 1504-2’de bir şart yok Ancak kılcal su emme katsayısı küçük olmalı 0,01 (kg/m <sup>2</sup> sa <sup>0.5</sup> )

Ibrahim ve Al-Gahtani [106] tecrit malzemelerinin etkinliklerini araştırdıkları çalışmada çeşitli tecrit malzemeleri uygulanmış ve uygulama yapılmamış referans beton numunelerde sodyum klorür çözeltisi ve elektrik akımı yardımıyla çatlak oluşturmaya çalışmış ve numunelerde korozyonun başlaması için geçen süreleri belirlemişlerdir. Çalışmada su/imento oranı 0,45 ve 350 kg/m<sup>3</sup> imento içeriği olan betonlarda 2V ve %5 sodyum klorür çözeltisi kullanılarak çatlak oluşumu hızlandırılmış ve ASTM C 876 standardına göre %5 sodyum klorür çözeltisinde potansiyel korozyon ölçülmüştür. Çalışmaya ait sonuçlar izelge 2.13' te verilmektedir.

**Çizelge 2.13 :** Hızlandırılmış test yöntemleri ile korozyonun önlenmesi için uygulanan tecrit malzemelerin etkinliklerinin karşılaştırılması [106].

Uygulama	atlak oluşma zamanı <sup>1)</sup> (saat)	Korozyon başlamasına kadar geçen süre <sup>2)</sup> (gün)
Kaplanmamış	144	10
Sodyum silikat	176	12
Silikon reçine özeltisi	200-300	40
Silan/Siloksan	2125	55
Alkilalkoksisilan	>4350	340
Silane/Siloksan son kat akrilik	>4350	225
Çift bileşenli imento esaslı akrilik kaplama	>4350	320

Schueremans ve diğ. [110] tarafından beton yüzeylerine tecrit malzemesi uygulanmasının betonun klorür işleme derinliğine etkilerinin araştırıldığı çalışmaya ait sonuçlar ise izelge 2.14'te verilmektedir.

**Çizelge 2.14 :** Silan ve siloksan uygulanan beton küp numunelerin 90 günlük klorür işleme derinlikleri [110].

Uygulama	Klorür işleme derinliği (mm)
İzobütiltrialkoksasiloksan	1.5
İzooktiltrimetoksasiloksan/ İzooktiltrialkoksasiloksan	9.5
İzooktilsiloksan/ Metiltrimetoksasilan	11
Tecrit yapılmamış	48

Silan ve siloksan esaslı malzemeler kılcal boşluklardaki ve çatlaklardaki hidrate olmuş çimento taneleri ile kimyasal bir bağ oluşturarak su itici bir tabaka oluşturur. Attanayake ve diğ. [120] tecrit malzemelerin çatlaklar üzerinde etkinliğini inceledikleri çalışmada 0,05 mm genişliğe kadar olan çatlaklar için sadece silan esaslı tecrit malzemelerinin kullanabileceğini ve 0,05-2 mm için silan esaslı tecrit malzemeleri uygulandıktan sonra yüksek molokül ağırlıklı metakrilat (HMWM) uygulanmasının etkili olduğu belirtmişlerdir [120].

Jian-Guo ve diğ. [97] benzer şekilde tecrit malzemesinin çatlaklar üzerindeki etkisini birkaç aşamalı olarak incelemek için yaptıkları çalışmada, başlangıçta çatlak bulunmayan numunelere silan esaslı tecrit malzemesi uygulamış ve sonrasında numunelerde yarma çekme deneyi uygulayarak mekanik yöntemle çatlaklar oluşturmuşlardır. Çalışma sonucunda 0,08 mm genişliğe kadar olan çatlaklar için silan esaslı tecrit malzemelerinin kullanılmasının klor iyonu geçirimsizliğini etkili biçimde azalttığını belirtmişlerdir.

Ayrıca, başlangıçta maksimum 0,2 mm genişliğe kadar çatlak oluşturulmuş numunelerde silan esaslı tecrit malzemesi uygulanarak 1 yıl süreli hızlandırılmış tuzlu su çözeltisi ile ıslanma kuruma çevrimleri yapıldığında numunelerde hiç korozyon görülmediğini ifade etmişlerdir. Bu sonuçların su itici tecrit malzemelerin agresif çevre koşullarında betonun servis süresini uzattığına işaret ettiğini belirtmişlerdir.

Yine hiç çatlak bulunmayan numunelere silan esaslı tecrit malzemesi uygulanması sonrasında numunelere tuzlu su çözeltisinde hızlandırılmış ıslanma kuruma çevrimleri yapılmış ve bir yıl sonra dahi tecrit malzemesinin etkinliğini sürdürerek klor iyonu geçirimsizliğini etkili biçimde azalttığını göstermişlerdir [97].

Amerika'da köprü ve viyadük gibi önemli yapıların korozyondan önlenmesi için yüzeye uygulanan su itici tecrit malzemeleri ve çatlakların tamiri ile ilgili hemen her eyaletin (Illinois, Alabama, Denver, Minnesota, Kaliforniya, Kolorado, Dakota ve Wisconsin vb.) ulaştırma birimleri tarafından sıklıkla araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırmalarda hem kullanılacak malzemelerin laboratuvar performansları ölçülmekte hem de saha koşullarındaki etkinlikleri gözlemlenmektedir. Ayrıca, saha uygulamalarından alınan numunelerin performansları da belirli aralıklarla laboratuvar koşullarında ölçülerek kullanılan malzemeler ve tecrit işlemlerinin



etkinliği kontrol edilmektedir. Bu çalışmaların sonuçları belirli aralıklarla teknik raporlar şeklinde eyaletlerin resmi ulaştırma birimleri tarafından paylaşılmaktadır. Ayrıca, Amerikan Ulusal Otoyol Araştırma Programı (NCHRP) tarafından eyaletlerin yaptığı çalışmalar ve kendi ilave çalışmaları da dikkate alınarak malzemeler ve uygulama yöntemleri için deney yöntemleri oluşturulmaktadır. Aşağıda yapılan literatür taramaları ile laboratuvar ve saha çalışmaları sonucunda Minnesota ulaştırma birimi tarafından belirlenen su itici tecrit malzemelerinin sağlaması gereken şartlar ve kullanımında dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda özetlenmektedir [121].

- Su itici malzemelerin performansını ölçmek için NCHRP 244 Seri II belirtilen yöntem kullanılmalıdır. Bu yönteme göre su itici malzeme kullanılan numunelerin su emme ve klor iyonu geçirimsizliğinde % 75 azalma olmalı ve numuneler buhar geçirimsizliğine % 100 devam edebilmelidir.
- Penetrasyon derinliği ve klor iyonu geçirimsizliği için kalite güvence/kalite kontrol testleri yapılmalıdır.
- Silan esaslı ürünler genellikle siloksan esaslı ürünlere göre çok daha üstündür.
- Su bazlı ürünler daha önce tecrit yapılmış yerlerde yeniden uygulanmamalıdır. nceki su itici malzemenin özeliğinden dolayı yeni malzeme betona nüfuz edememektedir. Eski tabakanın üzerine yapılacak uygulamalarda solvent bazlı ürünler tercih edilmelidir.
- Solvent bazlı ürünler genel olarak su bazlı ürünlerden daha üstündür.
- Etkin katı madde içeriği yüksek tecrit malzemeleri genellikle tercih edilir.
- S40 (silan esaslı solvent bazlı % 40 etken katı madde içeren) malzemeler en yaygın kullanılan tecrit malzemesidir.
- Su geçirimsizliği için en iyi uygulama sıcaklığı 5°C ile 38°C arasındaki sıcaklıklardır. Yüksek sıcaklık ve rüzgar etkisinde solvent bazlı tecrit malzemeleri uçucu özelik göstermektedir. Bu sorunun giderilmesi için fazlaca solvent kullanılmasına ise olumsuz çevresel etkileri nedeniyle izin verilmemektedir.
- Uygulama sahası nemli ise en az iki gün kuruma süresi beklenmelidir.



### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde beton üretiminde kullanılan malzemelerin özellikleri, uygulanan kür koşulları ve sonrasında yapılmış olan taze ve sertleşmiş beton deneyleri verilmektedir. Ayrıca, beton ve plastik paspayı kullanılarak üretilen numuneler için beton ve plastik paspayı malzeme özellikleri sunulmaktadır. Daha sonra yüzeylerinde çatlak bulunan beton numunelerde yalıtım amaçlı kullanılan su itici tecrit malzemesi ve özellikleri ile bu malzemenin uygulandığı beton numunelerde gerçekleştirilen yaşlandırma ve donma çözülme deneylerinin detayları açıklanmaktadır.

#### 3.1 Kullanılan Malzemeler

##### 3.1.1 Çimento

Kullanılan çimento CEM I 42,5 R türü olup özgül ağırlığı  $3,15 \text{ g/cm}^3$ , blaine özgül yüzeyi  $416 \text{ m}^2/\text{kg}$ 'dır. Çimento bileşimi Çizelge 3.1'de, çimentonun fiziksel özellikleri Çizelge 3.2'de ve mekanik özellikleri Çizelge 3.3'te verilmektedir.

**Çizelge 3.1 : Çimentonun kimyasal özellikleri.**

Bileşen	Bileşen (%)
SiO <sub>2</sub>	20,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,28
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,61
CaO	63,99
MgO	2,18
SO <sub>3</sub>	2,88
Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	0,44
Klorür (Cl <sup>-</sup> )	0,0195
Kızdırma kaybı	2,49

**Çizelge 3.2 : Çimentonun fiziksel özellikleri.**

Fiziksel Özellikler	
Blaine Özgül Yüzeyi (cm <sup>2</sup> /g)	4166
90 mikronluk elekte kalan (%)	0,1
Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	3,15
Priz başlangıcı (dak.)	150
Priz sonu (dak.)	185
Le Chatelier (toplam, mm)	1,0

**Çizelge 3.3 : Çimentonun mekanik özellikleri.**

<b>Mekanik Özellikler</b>		
Basınç dayanımı, MPa	7 Günlük	28 Günlük
	43,1	56,1

### 3.1.2 Agregata

Ultra yüksek dayanımlı betonlar üretilirken tane boyutu 0,5 mm-2 mm arasında olan silis kumu ve 0-0,5 mm arasında silisli ince kum agregası kullanılmıştır.

Silisli agregaların kimyasal bileşimi Çizelge 3.4'te gösterilmektedir.

**Çizelge 3.4 : Silisli agregaların kimyasal bileşimi.**

<b>Kimyasal Özellikler</b>	Silis Kumu	İnce Kum
	(%)	(%)
SiO <sub>2</sub>	97,74	99,32
CaO	0,52	1,94
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,57	0,54
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06	0,03
MgO	0,03	0,17
K <sub>2</sub> O	0,017	0,008
Cl	0,07	0,014
Na <sub>2</sub> O	0,43	0,36

Silisli agregaların fiziksel özellikleri Çizelge 3.5'de sunulmaktadır. Elek analizi deney sonuçları ise Çizelge 3.6'dadır.

**Çizelge 3.5 : Silisli agregaların fiziksel özellikleri.**

<b>Fiziksel Özellikler</b>		
Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Silis Kumu	İnce Kum
	2,61	2,60

**Çizelge 3.6 : Silisli agregaların granülometrileri.**

<b>Elek Boyutu (mm)</b>	Silis Kumu	İnce Kum
	% Geçen	% Geçen
2	99	100
1	51	100
0,500	1	99
0,250	0	49
0,125	0	5

Normal dayanımlı betonlar ve yüksek dayanımlı betonlarda agrega olarak Kırmataş I (5-12 mm), Kırmataş II (12-22 mm), Kıрма kum (0-5 mm) ve Doğal kum (0-4 mm) kullanılmıştır. Kırmataş I ve Kırmataş II agregalarının fiziksel özellikleri Çizelge 3.7’de verilmektedir.

**Çizelge 3.7 : Kırmataş I ve kırmataş II agregalarının fiziksel özellikleri.**

<b>Fiziksel Özellikler</b>	<b>Kırmataş II (12-22mm)</b>	<b>Kırmataş I (5-12mm)</b>
Sıkı birim ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	1547	1564
Gevşek birim ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	1352	1381
Görünen özgül ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	2710	2700
Su emme (%)	0,8	0,8
Çok ince malzeme muhtevası (%)	0,55	0,92
Yassılık indeksi (%)	9	-
Los angeles aşınma (%)	21,9	-

Kırma kum ve doğal kum agregalarının fiziksel özellikleri Çizelge 3.8’de gösterilmektedir.

**Çizelge 3.8 : Kırma kum ve doğal kum agregalarının fiziksel özellikleri.**

<b>Fiziksel Özellikler</b>	<b>Kırmataş Tozu (0-5mm)</b>	<b>Doğal Kum (0-3mm)</b>
Sıkı birim ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	1823	1554
Gevşek birim ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	1540	1246
Görünen özgül ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	2690	2640
Su emme (%)	1,1	1,1
İncelik modülü	3,51	2,04
Metilen mavisi	1,0	0,75
Çok ince malzeme içeriği (%)	10,94	0,6
Kum eşdeğer (%)	76	92
Organik madde tayini	Açık	Açık

### 3.1.3 Silis dumanı

Ultra yüksek dayanımlı betonlarda silis dumanı olarak Norchem firmasından tedarik edilen silis dumanı kullanılmıştır. Normal ve yüksek dayanımlı betonların üretilmesinde silis dumanı kullanılmamıştır. Silis dumanının kimyasal özellikleri Çizelge 3.9’da ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.10’da verilmektedir.

**Çizelge 3.9 :** Silis dumanının kimyasal özellikleri.

Kimyasal Özellikler	Silis dumanı
	(%)
SiO <sub>2</sub>	95,71
SO <sub>3</sub>	0,21
Cl	0,07
Toplam Na <sub>2</sub> O eşdeğeri	0,39
Nem içeriği	0,10
Kızdırma kaybı	2,48

**Çizelge 3.10 :** Silis dumanının fiziksel özellikleri.

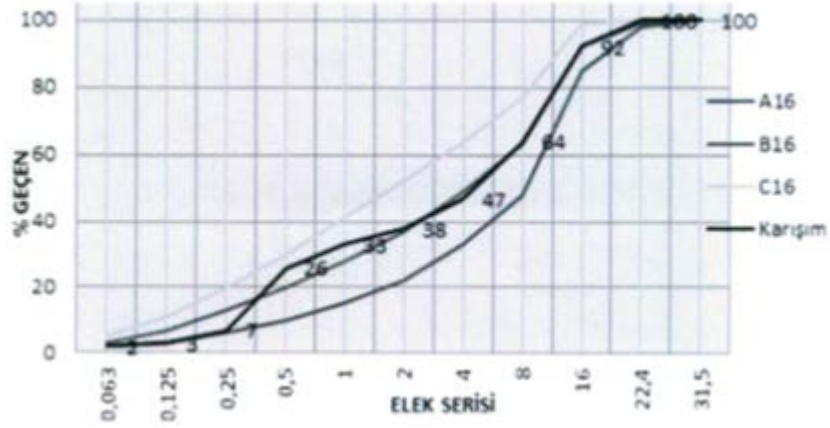
Fiziksel Özellikler	
Yoğunluk(gr/cm <sup>3</sup> )	2,27
45 mikronluk elekte kalan (%)	2,23
Gevşek birim ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	0,76
Özgül yüzey (m <sup>2</sup> /gr) (BET*)	23,44
Puzolanik aktivite indeksi (%)	133,6

### 3.1.4 Kimyasal katkı malzemesi

Bu çalışmada normal ve yüksek dayanımlı betonların üretilmesinde polikarboksilat esaslı Günerca firmasına ait GTS 33 hiperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise Chryso firmasına ait yeni nesil süperakışkanlaştırıcılardan Optima 208 kullanılmıştır. Bu hiperakışkanlaştırıcıların tercih edilmesinin nedeni yüksek oranda su azaltırken beton işlenebilirliğini üst seviyede tutması, betonun priz süresinde herhangi gecikmeye neden olmaması ve nihai performansının yüksekliğidir.

### 3.2 Beton Karışımları

Bu çalışmada normal dayanımlı betonlarda çimento dozajı 300 kg/m<sup>3</sup>, su/ bağlayıcı oranı 0,52 olan beton karışımı kullanılmıştır. Yüksek dayanımlı betonlar için çimento dozajı 500 kg/m<sup>3</sup>, su/ bağlayıcı oranı 0,32 olan beton karışımı ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda çimento dozajı 1000 kg/m<sup>3</sup>, su/ bağlayıcı oranı 0,172 ve su/çimento oranı 0,215 olan beton karışımı dökülmüştür. Normal ve yüksek dayanımlı betonlarda agrega oranları aynı şekilde kullanılmış olup karışım eğrisi aşağıda Şekil 3.1’de verilmektedir.



Şekil 3.1 : Normal ve yüksek dayanımlı betonlara ait karışım eğrisi.

Üretilen malzemeler silindir şeklinde hacmi ve ağırlıkça darası bilinen bir kaba normal ve yüksek dayanımlı betonlarda şişleme yöntemi ile ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise vibrasyon uygulanarak taze betonun birim ağırlığı bulunmuştur. Bir m<sup>3</sup> betondaki malzemelerin gerçek bileşimi Çizelge 3.11'de verilmektedir.

Çizelge 3.11 : Normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonların bileşimleri ve taze haldeki özellikleri.

	Normal dayanımlı beton	Yüksek dayanımlı beton	Ultra yüksek dayanımlı beton
Çimento (kg/m <sup>3</sup> )	302	501	952
Silis dumanı (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	238
Su (kg/m <sup>3</sup> )	154	155	114
Silisli pudra (0-0,5 mm) (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	486
Silis kumu (0,5 mm-2 mm) (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	314
Doğal kum (0-4 mm) (kg/m <sup>3</sup> )	479	432	-
Kırma kum (0-5 mm) (kg/m <sup>3</sup> )	376	340	-
Kırmataş I (5-12 mm) (kg/m <sup>3</sup> )	494	445	-
Kırmataş II (12-22 mm) (kg/m <sup>3</sup> )	592	534	-
Süperakışkanlaştırıcı (kg/m <sup>3</sup> )	3,6	7,0	119
Su/çimento oranı	0,52	0,32	0,22
Su/bağlayıcı oranı	0,52	0,32	0,17
Birim ağırlık, kg/m <sup>3</sup>	2401	2414	2223
Hesaplanan hava boşluğu (%)	2,4	2,8	5,8
Ölçülen hava boşluğu (%)	2,5	3,0	6,5

### 3.3 Beton Üretiminde İzlenen Sıra

Normal ve yüksek dayanımlı betonlar mikser içerisine bileşen malzemelerin tamamı alındıktan sonra karışım suyunun % 70'nin karışıma ilave edilmesi ve 1 dakika süreyle karıştırılması, sonrasında hiperakışkanlaştırıcı katkının ve geri kalan suyun

birlikte ilave edilmesi ile üretilmiştir. Taze beton birim ağırlık deneyi yapıldıktan sonra standart şişleme yöntemiyle yerleştirilerek kalıplara doldurulmuştur.

Ultra yüksek dayanımlı betonların üretimi sırasındaki izlenen yol ise aşağıdaki gibidir.

- Çimento, silis dumanı ve agregaların kuru olarak karıştırılması,
- Karışım suyunun %70'nin betona katılması ve karışımın 2 dakika süreyle karıştırılması,
- Karışım suyunun kalan miktarı ve katkının ilave edilmesi,
- Taze beton birim ağırlığının yapılması,
- Betonun kalıplara alınması ve vibrasyonun yapılması.

Numuneler üretildikten bir gün sonra kalıptan çıkarılmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler hemen sonrasında yalıtılmış ortamda etüv kürü, farklı sıcaklıklarda buhar kürü veya su kürü rejimlerine tabi tutulmuştur.

### **3.4 Kür Programı**

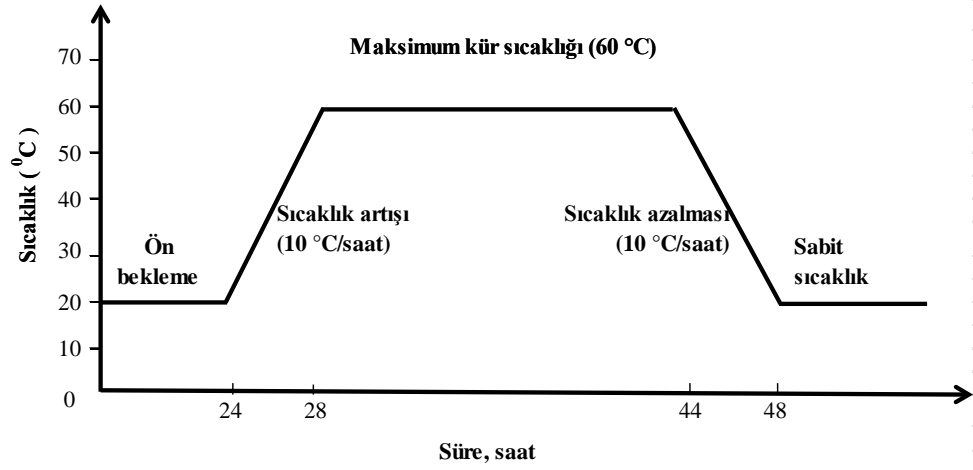
Üretilen numunelere dört farklı kür koşulu uygulanmıştır. Üretimden 24 saat sonra kalıptan çıkarılan numuneler;

- bazıları  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'deki standart su kürüne,
- bir kısmı bir gün süreyle  $60^{\circ}\text{C}$ 'de buhar kürü ve sonrasında su kürüne,
- bir kısmı bir gün süreyle  $90^{\circ}\text{C}$ 'de buhar kürü ve sonrasında su kürüne,
- diğerleri ise bir gün süreyle yalıtılarak  $150^{\circ}\text{C}$ 'de etüv kürü ve sonrasında su kürüne

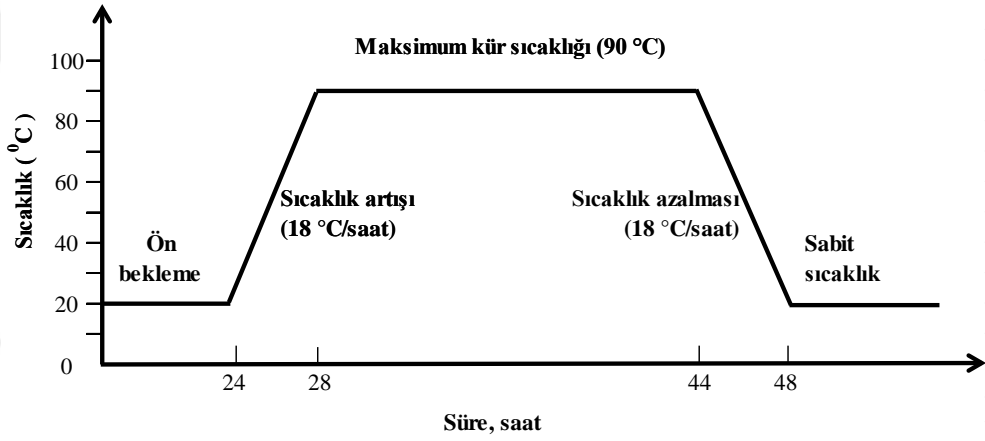
tabi tutulmuştur.

Farklı sıcaklıklarda uygulanan buhar kürlerinin ve yalıtılmış ortamda etüv kürünün uygulama adımları şematik olarak Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te gösterilmektedir.

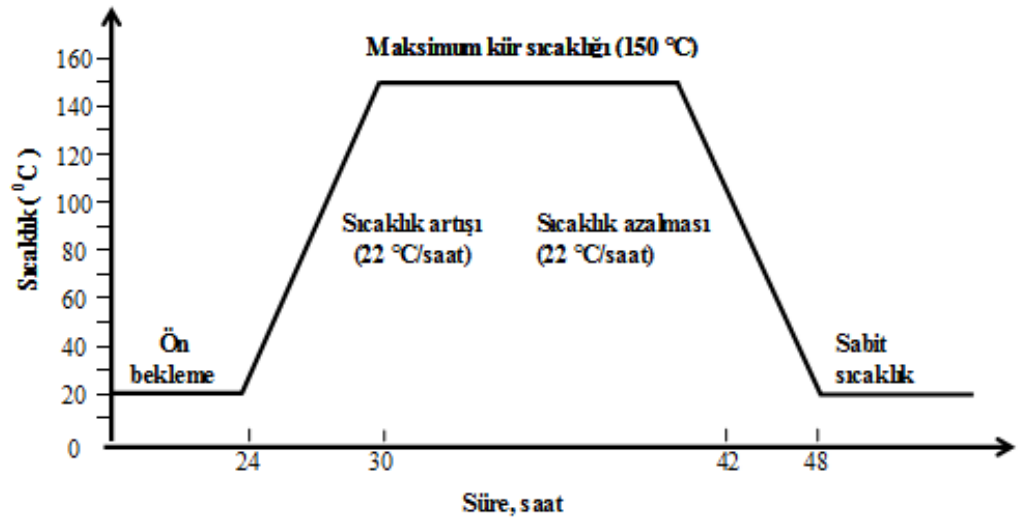




Şekil 3.2 : Buhar kürü (60°C) uygulaması kür diyagramı.



Şekil 3.3 : Buhar kürü (90°C) uygulaması kür diyagramı.



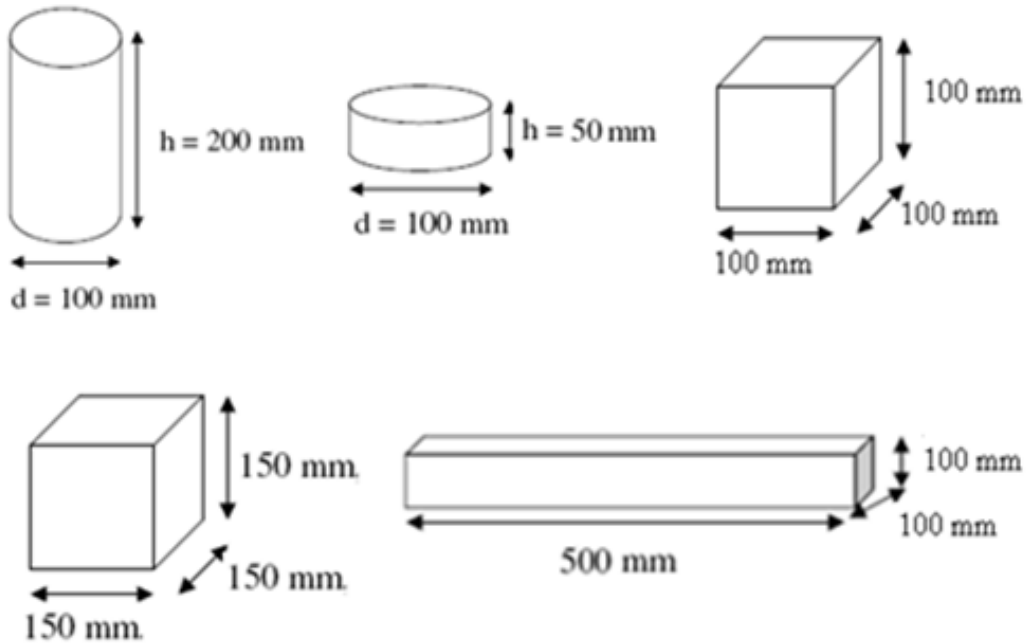
Şekil 3.4 : Yalıtılmış etüv kürü (150°C) uygulaması kür diyagramı.

### 3.5 Numune Kodlarının Belirlenmesi

Çalışmalarda kullanılan numunelere uygulanan kür işlemine bağlı olarak 150°C’de yalıtılmış ortamda etüv kürü (EN), 60°C’de buhar kürü (BN-60), 90°C’de buhar kürü (BN-90) ve su kürü (NN) olmak üzere kodlama yapılmış olup kodlamanın ilk harfi uygulanan kür işlemi ikinci harfi ise kür işlemi sonrası bekletme koşulları için kullanılmıştır. Numunelere verilen kodlamada su kürü sonrasında suda bekletme için NN, 60°C’de buhar kürü sonrasında suda bekletme için BN-60, 90°C’de buhar kürü sonrasında suda bekletme için BN-90 ve EN-150 yalıtılmış ortamda etüv kürü sonrasında suda bekletme durumunu tarif etmektedir.

### 3.6 Numune Boyutları ve Şekilleri

Çalışmalarda kullanılan numunelerin boyut ve şekilleri Şekil 3.5’te verilmiştir. Basınç dayanımı için bir kenarı 100 mm ve 150 mm olan küp numuneler, yarma çekme dayanımı için çapı 100 mm yüksekliği 200 mm silindir numuneler, kırılma enerjisi ile net eğilme dayanımı için bir kenarı 100 mm ve uzunluğu 500 mm kiriş numuneler, hızlı klor iyonu geçirirliliği ve kılcal su emme deneyleri için çapı 100 mm ve yüksekliği 50 mm olan silindir numuneler üretilmiştir.



Şekil 3.5 : Numune boyutları ve şekilleri.

### 3.7 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Farklı kür koşullarının betonların basınç dayanımı, yarma çekme dayanımı, kırılma enerjisi ve net eğilme dayanımı gibi mekanik özellikleri ile hızlı klor iyonu geçirimsizliği, kılcal su emme ve basınç altında su işleme derinliği gibi geçirimsizlik özelliklerine etkilerinin incelendiği ilk bölümde;

Standart küp basınç deneyleri 7, 28 ve 365 günlük, yarma çekme dayanımı beton deneyleri ise 28 günlük olarak yapılmıştır. Kırılma enerjisi ve net eğilme dayanımı deneyleri 140. günde gerçekleştirilmiştir. Basınç altında su işleme, kılcal su emme ve hızlı klor iyonu geçirimsizliği deneyleri 28. günde yapılmıştır.

Beton ve plastik paspayı kullanımının betonun geçirimsizlik özelliklerine etkilerinin incelendiği bölümde;

Aynı beton karışımlarından alınan ve aynı bekletme koşullarına tabii tutulan beton ve plastik paspayları kullanılan numunelerin geçirimsizlik özelliklerinde karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla numunelerde 28 günlük ve 140 günlük olmak üzere kılcal su emme ve 28 günlük hızlı klor iyonu geçirimsizliği deneyleri yapılmıştır.

Çatlaklar ve su itici tecrit malzemelerin betonun geçirimsizlik özelliklerine etkilerinin incelendiği son bölümde ise;

Numuneler 28. günü doldurduktan sonra başlangıçtaki geçirimsizlik özellikleri kılcal su emme ve hızlı klor iyonu geçirimsizliği deneyleri ile belirlenmiştir. Daha sonra, bu numunelere 28 gün saf su, 56 gün  $MgCl_2$ , 28 gün  $NaCl$  ve 84 gün  $NaCl$  olmak üzere 4 aşamada toplam 196 gün yaşlandırma ve donma çözülme deneyleri yapılarak her yaşlandırma ve donma çözülme çevrimi sonrası kılcal su emme değerleri yeniden belirlenmiştir. Ayrıca toplam 84 ve 196 günlük yaşlandırma ve donma çözülme çevrimi sonrası betonların hızlı klor iyonu geçirimsizliği de belirlenmiştir.

#### 3.7.1 Küp basınç deneyi

Normal ve yüksek dayanımlı betonda tüm basınç dayanımı deneyleri 150x150x150 mm küp numuneleri üzerinde 7, 28 ve 365. günlerde gerçekleştirilmiştir. Ultra yüksek dayanımlı betonda ise 7. günde 100x100x100 mm küp numuneleri üzerinde, 28 ve 365. günlerde 150x150x150 mm küp numuneleri kullanılmıştır. Deneyler, 5000 kN kapasiteli yükleme makinesi kullanılarak TS EN 12390-3 standardına göre

yapılmıştır. Basınç dayanımı deneylerinin yapılmasında kullanılan deney cihazına ait resimler aşağıda Şekil 3.6’da verilmektedir.



Şekil 3.6 : Basınç dayanımı deneylerinde kullanılan cihaz.

### 3.7.2 Yarma çekme deneyi

TS EN 12390-6 standardına göre yarma çekme deneyleri çapı 100 mm ve yüksekliği 200 mm’lik silindir numuneler üzerinde yapılmıştır. Numunelere çizgisel yük uygulanarak yarmada kırılma yükleri elde edilmiştir. Yük numunelere aktarılırken alttan ve üstten 4 mm kalınlıklı ince ahşap çubuklar kullanılmıştır. Bu deneyde betonun içerisinde oluşan basınç gerilmesinin değeri çekme gerilmesinden daha yüksektir. Ancak, betonun çekme yüklerine karşı direnci yüksek olmadığından betondaki kırılma çekme yükleri nedeniyle olmaktadır. Yükün uygulandığı yerlerde oluşan yerel basınç gerilmeleri, bu noktalardan uzaklaştıkça çekme gerilmelerine dönüşmekte ve bu çekme gerilmeleri çap boyunca sabit kalmaktadır. Böylece, kesitin orta bölgesinde oldukça üniform dağılımlı çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Burada uygulanan gerilme iki yönlü olduğundan eksenel çekme dayanımından daha büyük değerler elde edilmektedir. Çalışmada yarma çekme dayanımları aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır. Deneylerin gerçekleştirildiği yükleme cihazı Şekil 3.7’de gösterilmektedir.

$$f_t = (2P_{\max})/\pi DL$$

$$f_t = \text{Yarma çekme dayanımı (N/mm}^2\text{)}$$

$$P_{\max} = \text{Maksimum yük (N)}$$

$$D = \text{Silindirin çapı (mm)}$$

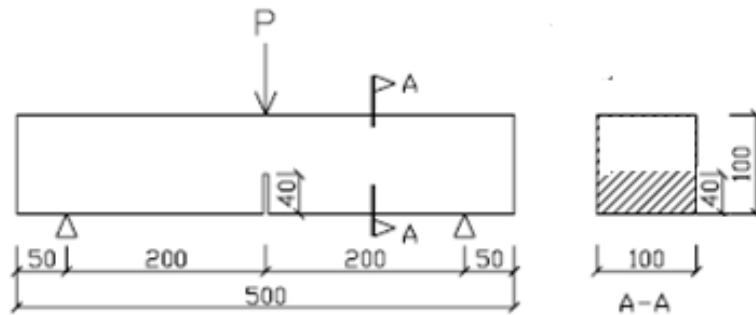
$$L = \text{Silindirin yüksekliği (mm)}$$



Şekil 3.7 : Yarma çekme deneylerinde kullanılan deney cihazı.

### 3.7.3 RILEM kırılma enerjisi deneyleri

Kiriş numunelerinin kırılma enerjisini elde etmek için kapasitesi 200 kN olan kapalı çevrimli çatlak ağzı açılma kontrollü deney makinesi kullanılmıştır. 100x100x500 mm ebatlarındaki numunelerin ortasında 40 mm derinliğinde, 5 mm genişliğinde çentik açılmıştır. Numune etkin kesit alanı 60x100 mm olarak seçilmiş olup yapılan deneylerle farklı kür işlemlerinin betonların enerji yutma kapasitesine etkileri araştırılmıştır. Kırılma enerjilerinin belirlenmesi için RILEM TC 50-FMC Teknik Komitesince önerilen üç noktalı eğilme deneyi kullanılmıştır (Şekil 3.8). Yükleme hızı normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonlar için 0,0175 mm/dakika olarak gerçekleştirilmiştir. Ancak, ultra yüksek dayanımlı betonlarda bu yükleme hızında gevrek kırılma meydana geldiği için yükleme hızı 0,003 mm/dakika olacak şekilde yükleme hızı azaltılarak kırılma enerjisi deneyleri gerçekleştirilmiştir.

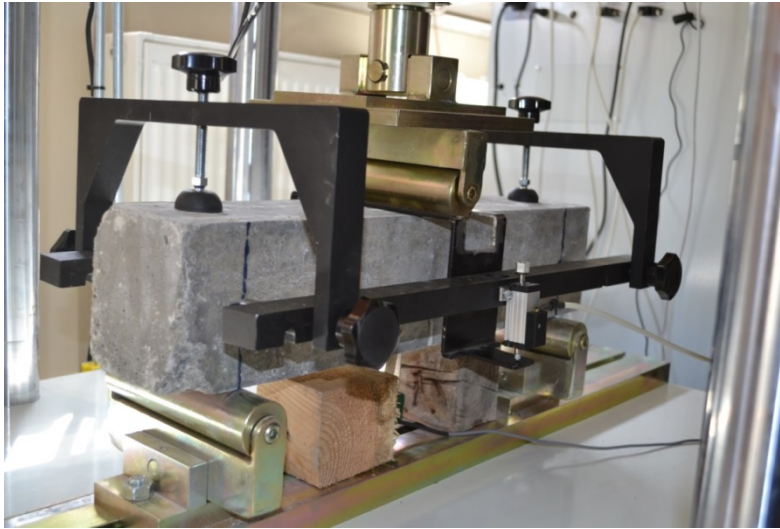


Şekil 3.8 : RILEM kırılma enerjisi deneyi yükleme düzeni.

Deney esnasında oluşan sehimi ölçmek için 2 adet LVDT alıcı, numune alt yüzeyine yerleştirilmiştir. Numuneler üzerine uygulanan yük değerleri ve bunlara karşılık gelen sehim sonuçları alıcılardan bilgisayara aktarılmak suretiyle toplanmış ve bu sonuçlardan Yük-sehim grafiklerine geçilmiştir. Deneylerden elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri kullanılarak, her numune için, kırılma enerjisi ve net eğilme dayanımı değerleri hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan yükleme deney düzeneği Şekil 3.9’da verilmektedir.



a) Cihazın genel görünümü.

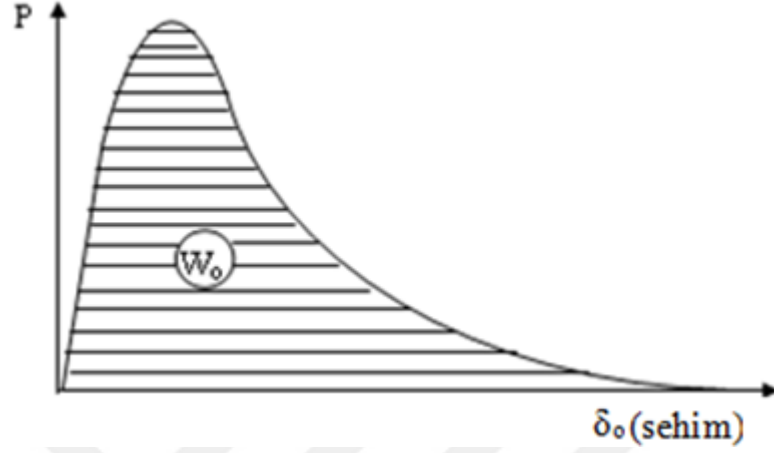


b) Deney kirişinin yakından görünüşü.

**Şekil 3.9** : RILEM kırılma enerjisi deneyi yükleme deney düzeneği: (a)cihazın genel görünümü. (b)deney kirişinin yakından görünüşü.

### 3.7.3.1 RILEM kırılma enerjilerinin hesaplanması

Yük-Sehim eğrisi altında kalan alan hesaplanarak kırılma süresince harcanan enerji değerine geçilmiştir. Şekil 3.10'da örnek bir yük-sehim eğrisi görülmektedir. Aşağıda eğri yardımıyla enerjinin nasıl hesaplandığı açıklanmaktadır.



Şekil 3.10 : Örnek bir yük-sehim eğrisi.

$$G_f = (W_o + mg\delta_o) / A_{lig},$$

$W_o$  = Yük-sehim eğrisi altında kalan alan (N/m),

$m$  = Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı (kg),

$g$  = Yerçekim ivmesi (9.81 m/sn<sup>2</sup>),

$\delta_o$  = Kirişin göçme esnasındaki deformasyonu,

$A_{lig}$  = Etkin kesit alanı (m<sup>2</sup>).

### 3.7.3.2 RILEM enerji deneyinden net eğilme dayanımının hesaplanması

Aşağıdaki bağıntı kullanılarak net eğilme dayanımları hesaplanmaktadır.

$$F_{net} = (3PL)/2BD^2,$$

$F_{net}$  = Net eğilme dayanımı,

$P$  = Kırılma yükü (N),

$L$  = Mesnetler arası uzaklık (mm),

$B$  = Numune kesitinin genişliği (mm),

$D$  = Numune kesitinin yüksekliği (mm).



### 3.7.4 Elastisite modülü

Bu çalışmada, betonların gerilme-deformasyon eğrisinin başlangıcından, tepe yükü dayanımının %40'lık değerine kadar olan bölgede bilgisayar programı yardımı ile elde edilen çok sayıda noktalara en küçük kareler yöntemi ile uydurulan en uygun doğrunun eğimi ile elastisite modülü hesaplanmıştır. Deney esnasında oluşan deformasyonu ölçmek için 2 adet LVDT alıcı, 100x200 mm silindir numune yan yüzeyine yerleştirilmiştir. Numuneler üzerine uygulanan gerilme değerleri ve bunlara karşılık gelen deformasyon sonuçları alıcılardan bilgisayara aktarılacak suretiyle toplanmış ve bu sonuçlardan gerilme-deformasyon grafiklerine geçilmiştir. Deneylerden elde edilen gerilme-deformasyon eğrileri kullanılarak, her numune için, elastisite modülü değerleri hesaplanmıştır.

### 3.7.5 Karakteristik boyların belirlenmesi

Karakteristik boy malzemenin sünekliğini ifade etmek için kullanılmaktadır. Kırılgan malzemelerin karakteristik boy değerleri sünek davranış gösteren malzemelere göre düşüktür. Malzemelerin sünekliğinin karşılaştırılmasında kırılma enerjisi yerine karakteristik boy değerlerinin kullanılması daha uygun bir yöntemdir. Aşağıda verilen bağıntı kullanılarak betonların karakteristik boy ( $l_{ch}$ ) değerleri hesaplanmıştır.

$$l_{ch} = G_f \cdot E / (f_{ct})^2$$

Burada  $G_f$  betonun kırılma enerjisini,  $E$  elastisite modülünü ve  $f_{ct}$  ise yarma çekme dayanımını göstermektedir.

### 3.7.6 Hızlı klor iyonu geçirimsizliği deneyi

Deney, ASTM C 1202'e göre deney çapı 100 mm, kalınlığı 50 mm olan beton silindir numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yan yüzeyleri elektrik iletmeyen bir malzeme ile kaplanıp 3 saat boyunca vakum uygulanmış, ardından numunelerin vakum etkisinde 1 saat su emmesi sağlanmıştır. Bu işlemlerden sonra numuneler su içine yerleştirilerek deney başlangıcına kadar suya doymun halde kalması sağlanmıştır. Numuneler sudan çıkartıldıktan sonra çözelti hücreleri arasına yerleştirilmiş, deney için hücrelerden birisi sodyum klorür, diğeri ise sodyum hidroksit ile doldurulmuştur. Ardından 60 V sabit potansiyel farkı uygulanmış ve geçen elektrik akım değeri beş dakika aralıklarla miliamper olarak kaydedilmiştir. Beton numuneler arasında yapılan karşılaştırmalarda ilk 5 dakika sonrasında miliamper cinsinden numunelerden geçen



akım değerleri kullanılmıştır. Ayrıca, altı saat sonunda iletilen elektrik akımı miktarı coulomb cinsinden belirtilmiştir. Hızlı klor iyonu geğirimsizliği deneylerinde numuneden geçen akım şiddeti ve ilgili standarda göre geçirimsizlik sınıfları izelge 3.12’de verilmektedir. Hızlı klor iyonu geğirimsizliği deneylerinde kullanılan deney düzeneği ise şekil 3.11’de verilmektedir.

**Çizelge 3.12 : Hızlı klor iyonu geçirimsizlik sınıfları (ASTM C1202).**

Geçen Akım (Coulomb)	Klorür Geğirimsizliği
>4000	Yüksek
2000-4000	Orta
1000-2000	Düşük
100-1000	ok Düşük
<100	İhmal Edilebilir



**şekil 3.11 : Hızlı klor iyonu geğirimsizliği deney düzeneği.**

### 3.7.7 Kılcal su emme deneyi

ASTM C 1585 standardına göre yapılan kılcal su emme deneylerinde  $\text{Ø}100 \times 50$  mm disk numuneler kullanılmıştır. Tüm numuneler deneye başlamadan önce  $60^\circ\text{C}$  sıcaklıkta 3 gün boyunca etüvde değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Etüvde kurutma işlemi, deney sonuçlarını etkilememesi için zamana yayılarak düşük sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Numunelerin su ile temas eden yüzeyleri haricindeki

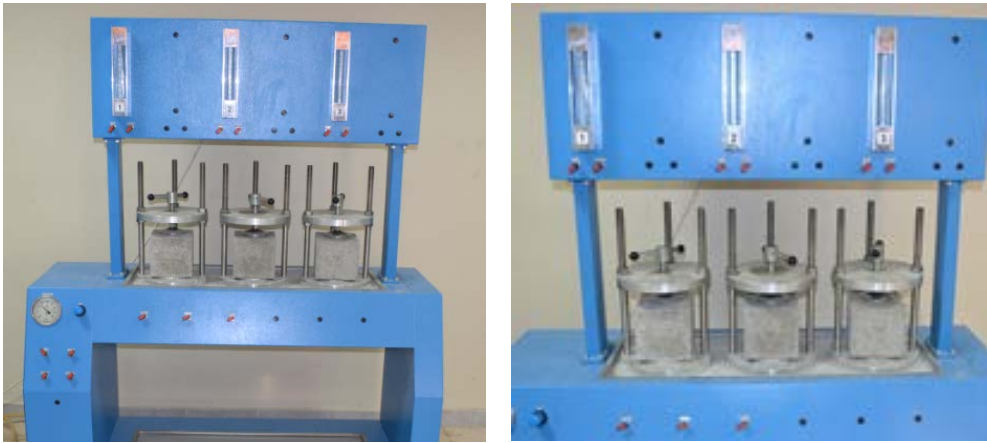
kısımları parafin ile kaplanmış ve sadece tek yüzeyden kılcallık etkisi ile su girişi sağlanmıştır. Deneysel esnasında ağırlık değişimleri 0,1 gr hassasiyetli terazi yardımı ile belirlenmiştir. Bu deney yönteminde numunenin su ile temas eden yüzeyinden kılcallık etkisinde suyun ilerlemesi ile numune ağırlığı artmasından su emme miktarı belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan kılcal su emme deney düzeneği Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12 : Kılcal su emme deney düzeneği.

### 3.7.8 Basınç altında su işleme derinliği deneyi

TS EN 12390-8 standardına göre yapılan deneyde, numuneler cihaza yerleştirilmiş ve numunelere  $(72 \pm 2)$  saat süreyle  $(500 \pm 50)$  kPa su basıncı uygulanmıştır. Basınç altında su işleme derinliği tayini deneylerinde kullanılan cihaz aşağıda Şekil 3.13’te verilmektedir.



Şekil 3.13 : Basınç altında su işleme derinliği deney düzeneği.

Deney bitiminde, numuneler basınçlı su uygulanan yüzeylerine dik şekilde, ortasından yarılarak ikiye bölünmüştür. Numunenin bölünmesi ve incelenmesi esnasında, basınçlı su uygulanan yüzey alt tarafa getirilmiştir. Numunenin bölünmesiyle ortaya çıkan numune yüzeyinin, su işleyen kısım kesitinin belirgin şekilde görülünceye kadar kurutulmasından hemen sonra, ıslak alanın sınırları işaretlenmiştir. Basınç uygulanan deney alanından itibaren, suyun işlediği ortalama derinlik ölçülerek kaydedilmiştir.

### **3.8 Beton ve plastik paspayları**

Çalışma kapsamında beton ve plastik paspayı kullanılarak beton numuneler üretilmiştir. Farklı tipte paspaylarının kullanıldığı beton numunelerin kılcal su emme ve hızlı klor iyonu geçirimsizliği belirlenerek farklı paspayı kullanımı durumunda betonların geçirimsizlik özellikleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca paspayı bulunmayan referans numunelerde üretilerek bu numunelere de kılcal su emme ve hızlı klor iyonu geçirimsizliği deneyleri yapılmıştır. Böylece, geçirimsizlik özellikleri belirlenmeye çalışılmış ve sonuçları paspayı bulunan numunelerle karşılaştırılmıştır.

#### **3.8.1 Betondan paspayı**

Çalışmalarda kullanılan betondan paspayları normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlar için ayrı ayrı üretilmiş olup, her dayanım sınıfında farklı beton karışımları kullanılarak kendi orijinal beton tasarımına da bağlı kalınacak şekilde tasarlanmıştır. Bu amaçla beton paspayları üretilirken öncelikle her dayanım sınıfı için beton karışımında bulunan iri malzemeler çıkarılarak aynı hacimde malzemenin diğer bileşen malzemeleri karışımda yer aldıkları hacimsel oran dikkate alınarak üretilmiştir. Normal ve yüksek dayanımlı betonlarda Kırmataş I (5-12 mm) ve Kırmataş II (12-22 mm) iri agregalar çıkarılarak geri kalan harç fazına paylaştırılmıştır. Ultra yüksek dayanımlı betonda ise silis dumanı kullanılmayarak aynı hacimde malzeme çimentoya ilave edilmiştir. Aşağıda normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı beton paspayları üretilmesinde kullanılan bileşen malzemeler ve kullanım miktarları Çizelge 3.13'te verilmektedir. Ancak, paspayı üretimleri esnasında teorik olarak hesaplanan su miktarları kullanıldığında istenilen kıvam özelliklerinde betonlar elde edilememiştir. Bu nedenle normal ve yüksek dayanımlı

paspayı üretiminde teorik beton karışımına 1 m<sup>3</sup> için 50 kg miktarda su ilave edilmiştir.

**Çizelge 3.13 :** Normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı beton paspayı numuneleri üretilmesinde kullanılan teorik taze beton bileşimi.

	Normal Dayanımlı Beton	Yüksek Dayanımlı Beton	Ultra Yüksek Dayanımlı Beton
Çimento (kg/m <sup>3</sup> )	500	800	1350
Su (kg/m <sup>3</sup> )	260	245	160
Silisli pudra (0-0,5 mm) (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	500
Silis kumu (0,5 mm-2 mm) (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	300
Doğal kum (0-4 mm) (kg/m <sup>3</sup> )	800	675	-
Kırma kum (0-5 mm) (kg/m <sup>3</sup> )	625	530	-
Süperakışkanlaştırıcı (kg/m <sup>3</sup> )	6	11	125
Birim ağırlık, kg/m <sup>3</sup>	2191	2261	2435

### 3.8.2 Plastik paspayı

Çalışma kapsamında normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda plastik paspayı kullanılan beton numuneleri üretilmiştir. Plastik paspayları prefabrike sektörde ve inşaat faaliyetlerinde donatı korozyonunun önlenmesi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında polietilen plastik paspayı numuneleri kullanılmıştır.

### 3.9 Su itici tecrit malzemesi

Çalışma kapsamında normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda hem kür uygulamaları sonrası betonlarda çatlaklar oluşturulmuş hem de bazı numunelerde açık hava ve rüzgar etkisinde plastik çatlaklar oluşturulmuştur. Oluşturulan çatlakların genişliği 0,2 mm ve altındadır.

Bu çatlakların su itici malzeme ile tecrit edilmesi çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla monomerik alkali alkoksilan esaslı, tek bileşenli, solventsiz, çok düşük viskoziteli, alkali dayanımı yüksek ve hidrofobik özellikte tecrit malzemesi kullanılmıştır.

### 3.9.1 Tecrit malzemesi özellikleri

Çalışmada bazı numunelerde kür etkisi ile bazı numunelerde ise açık hava ve rüzgar etkisinde oluşturulmuş genişliği 0,2 mm'yi aşmayan çatlakların bulunduğu beton yüzeyleri su itici malzeme kullanılarak tecrit edilmiştir. Çalışmada kullanılan tecrit malzemesinin özellikleri aşağıda Çizelge 3.14'te verilmektedir. Tecrit malzemesi numunelerin çatlak bulunan yüzeylerine 250 ml/m<sup>2</sup> miktarda tek kat olarak homojen şekilde fırça yardımı ile uygulanmıştır.

**Çizelge 3.14 :** Beton yüzeylerine uygulanan su itici tecrit malzemesinin özellikleri.

Teknik özellikler	
Malzeme yapısı	İleri Organo-Fonksiyonel Silan
Renk	Şeffaf
Yoğunluk (kg/litre)	0,88
Viskozite (mPa s)	0,95
Parlama noktası (°C)	> 60
Erime noktası (°C)	< -65
pH	11
Yeniden uygulanabilme süresi (dakika)	15-30

### 3.9.2 Yaşlandırma ve donma çözülme programı

Normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda buhar kürü uygulanması ve sonrasında ani olarak soğutma ile bazı numunelerde çatlaklar oluşturulmuştur. Ayrıca başka bir kısım numunede ise açık hava ve rüzgar etkisinde çatlaklar oluşturulmuştur. Her iki yöntemle oluşturulan çatlakların genişlikleri 0,2 mm altındadır.

Bu çalışma kapsamında, buhar kürü uygulanarak kür çatlağı oluşturulan numuneler ile açık hava ve rüzgar etkisinde plastik çatlaklar oluşturulan numunelere uygulanan çeşitli yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerin betonların geçirimsizlik özelliklerine etkileri belirlenmiştir.

Bu etkiler belirlenirken çatlak bulunan numunelere hem su itici özellikte tecrit malzemesi uygulanması hem de herhangi bir uygulama yapılmaksızın uygulanan yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrasında beton numunelerin

geçirimlilik özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca hiç çatlak bulunmayan referans beton numunelerde yaşlandırma ve donma çözülme etkilerine tabi tutularak sonuçları tecrit malzemesi uygulanan numuneler ile karşılaştırılmıştır. Çalışmalarda kullanılan yaşlandırma deney cihazı Şekil 3.14 ve donma çözülme deney cihazı Şekil 3.15 ile verilmektedir.



Şekil 3.14 : Yaşlandırma deney cihazı.



Şekil 3.15 : Donma çözülme deney cihazı.

### 3.9.2.1 Yetersiz kür nedeniyle oluşan çatlak bulunan numunelere uygulanan yaşlandırma ve donma çözülme deney programı

Yetersiz kür sonucu çatlak bulunan ve tecrit malzemesi uygulanan numunelere UV yaşlandırma deney cihazı ve donma çözülme deney kabini kullanılarak yaşlandırma deneyleri yapılmıştır. Yaşlandırma deneyleri her gün 4 saat 60°C sıcaklıkta UV lambaları ile ısıtma, 2 saat spreyleme yöntemi ile ıslanma ve 3 saat -20°C sıcaklıkta

donma çözülme kabininde bekletilerek uygulanmıştır. Böyle bir çevrim sonrası ertesi güne kadar numuneler oda sıcaklığında bekletilmiştir. Bu çevrime 14 gün boyunca devam edilmiştir. Ayrıca çatlak bulunmayan referans beton numunelere de aynı yaşlandırma deney programı uygulanarak sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

### **3.9.2.2 Plastik rötre çatlaklı bulunan numunelere uygulanan yaşlandırma ve donma çözülme deney programı**

Plastik rötre çatlaklı oluşturulan numunelere dört farklı yaşlandırma ve donma çözülme çevrimi uygulanmıştır. Burada farklı donma çözülme çevrimlerinin uygulanmasında temel amaç literatür bölümünde verilen farklı buz çözücü kimyasallar kullanılması durumunda bu tuzların betona zarar verme mekanizmalarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Donma çözülme çevrimlerinde hasar oluşmasının temel nedeni olan suyun donma ve çözülmesine bağlı olarak oluşan fiziksel hasar yanında farklı buz çözücü tuzlarla donma çözülme çevrimleri yapılarak buz çözücülerin donma çözülme etkileri altında betona kimyasal olarak zarar vermesi amaçlanmıştır. Böylece, tecrit işlemi uygulanan çatlaklı beton numunelerin yaşlandırma ve donma çözülme etkileri altında zarar görmesi sağlanarak etkinliğinin incelenmesine çalışılmıştır. Bu amaçla her yaşlandırma ve donma çözülme çevrimi sonrası numunelere kılcal su emme ve hızlı klor iyonu geçirimsizliği deneyleri yapılarak betonların geçirimsizlik özelliklerindeki değişimler incelenmiştir

Aşağıda numunelere uygulanan yaşlandırma ve donma çözülme işlemlerinin detayları verilmektedir.

- Çevrim I : 14 gün UV+ 14 gün saf su ile donma çözülme çevrimi (1 gün UV + 1 gün -20°C ile +20°C arasında EN 12390-9 standardına göre saf su ile toplam 28 çevrim).  
UV : 4 saat 60°C sıcaklıkta UV lambaları ile ısıtma, 2 saat devamlı su püskürtme ile ıslanma ve 18 saat laboratuvar ortamında bekletme.
- Çevrim II : 56 gün MgCl<sub>2</sub> çözeltisi ile donma çözülme çevrimi (-20°C ile +20°C arasında EN 12390-9 standardına göre MgCl<sub>2</sub> çözeltisi ile toplam 56 çevrim).

- Çevrim III : 28 gün %3 NaCl çözeltisi ile donma çözülme çevrimi (-20°C ile +20°C arasında EN 12390-9 standardına göre %3 NaCl çözeltisi ile toplam 28 çevrim).
- Çevrim IV : 84 gün %3 NaCl çözeltisi ile donma çözülme çevrimi (-20°C ile +20°C arasında EN 12390-9 standardına göre %3 NaCl çözeltisi ile toplam 84 çevrim).

Yukarıda belirtildiği üzere bazı numunelerde donma çözülme etkisinde suyun oluşturduğu fiziksel hasar dışında kimyasal hasar oluşabilmesi için MgCl<sub>2</sub> ve NaCl çözeltisi kullanılarak donma çözülme çevrimleri gerçekleştirilmiştir. Aşağıda çalışmada kullanılan magnezyum klorür ve sodyum klorür çözeltilerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri sırasıyla Çizelge 3.15 ve Çizelge 3.16'da verilmektedir.

**Çizelge 3.15 :** Donma çözülme çevrimlerinde kullanılan MgCl<sub>2</sub> çözeltisinin fiziksel ve kimyasal özellikleri.

<b>Malzeme özellikleri</b>	
Donma noktası (°C)	< -70
Renk	Şeffaf
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1,10
Parlama noktası (°C)	Parlamıyor
Korozyon (mg/cm <sup>2</sup> )	< 0,3
pH	7,1
Buz çözücü dozaj (gr/cm <sup>2</sup> )	0,01

**Çizelge 3.16 :** Donma çözülme çevrimlerinde kullanılan NaCl çözeltisinin fiziksel ve kimyasal özellikleri.

<b>Malzeme özellikleri</b>	
Donma noktası (°C)	< 0
Renk	Renksiz
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1,025
Parlama noktası (°C)	Parlamıyor
pH	7,12

### 3.10 İç yapı incelemeleri için numunelerin hazırlanması

Çalışmada farklı kür koşullarının betonun iç yapı özelliklerine etkilerini incelemek için betonlardan ince kesit numuneleri hazırlanarak tek nikol (pp), çift nikol (xp) ve ultraviyole ışık (uv) altında olmak üzere iç yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir.



Böylece, numunelerin boşluk yapısı, çimento hamurunun dağılımı, çatlaklar gibi durumların incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, yetersiz kür veya plastik rötre nedeniyle çatlak bulunan beton numunelere tecrit işlemi sonrası yapılan yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerinin betonların iç yapısına etkileri de çalışma kapsamında incelenmiştir. İç yapı incelemeleri yapılan numunelere üretimlerinden ince kesit hazırlanmasına kadar geçen süreçte uygulanan işlemler aşağıda verilmektedir.

Farklı kür koşullarına maruz bırakılan numuneler;

- 1 gün süreyle kalıpta bekleme
- 1 gün süreyle yalıtılarak 150°C’de etüv kürü
- 26 gün 20±2°C’deki standart su kürü
- 3 gün süreyle 60°C’de etüvde kurutma + 8 gün tek yüzey su teması
- 220 gün 20±2°C’deki laboratuvar ortamında bekletilmesi

Yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılan numuneler;

- 1 gün süreyle kalıpta bekleme (rüzgar ve sıcaklık etkisinde çatlak oluşumu)
- 1 gün sulu karot makinesi ile 100x50 mm silindir numune alınması
- 44 gün 20±2°C’deki laboratuvar ortamında bekleme
- 3 gün süreyle 60°C’de etüvde kurutma + 8 gün tek yüzey su teması (kılcallık)
- 1 gün tecrit malzemesi uygulanması
- 14 gün 20±2°C’deki laboratuvar ortamında bekleme
- 3 gün süreyle 60°C’de etüvde kurutma + 8 gün tek yüzey su teması (kılcallık)
- 24 gün 20±2°C’deki laboratuvar ortamında bekleme
- 28 gün Çevrim I uygulanması (yaşlandırma ve donma çözülme)
- 3 gün süreyle 60°C’de etüvde kurutma + 8 gün tek yüzey su teması (kılcallık)
- 55 gün 20±2°C’deki laboratuvar ortamında bekleme
- 56 gün Çevrim II uygulanması (yaşlandırma ve donma çözülme)
- 3 gün süreyle 60°C’de etüvde kurutma + 8 gün tek yüzey su teması (kılcallık)
- 87 gün 20±2°C’deki laboratuvar ortamında bekleme

Tecrit malzemesi uygulanmadan laboratuvar ortamında bekletilen numuneler;

- 1 gün süreyle kalıpta bekleme (rüzgar ve sıcaklık etkisinde çatlak oluşumu)
- 1 gün sulu karot makinesi ile 100x50 mm silindir numune alınması
- 353 gün 20±2°C’deki laboratuvar ortamında bekleme

İnce kesit numunelerinin hazırlanması toplamda iki günlük aşamada gerçekleştirilmiştir.

İlk gün; beton numuneler etüvde kurutulmuştur. Kesilmiş parçalar (30x45mm) plastik padding ile cam üzerine yapıştırılmış ve kesiciye paralel olacak şekilde sabitlenmiştir. Numuneler her iki yüzünden de vakumla tutturulmuşken yarım mesafe kadar kesilmiş ve sonra 3 adet roller kullanılarak traşlanmıştır. Numuneler epoksiye yatırılmış ve vakumda epoksi emdirilmiştir.

İkinci gün; epoksi emdirilmiş numuneler tekrar traşlanmıştır. Traşlama işlemi bittikten sonra numuneler temizlenip 35°C'lik etüvde en az 10 dakika bekletilmiştir. Kurutma işlemi bittikten sonra UV yapıştırıcısı ile numune cam ile kapatılmış ve 5-10 dakika süreyle UV lambasının altına bırakılmıştır.

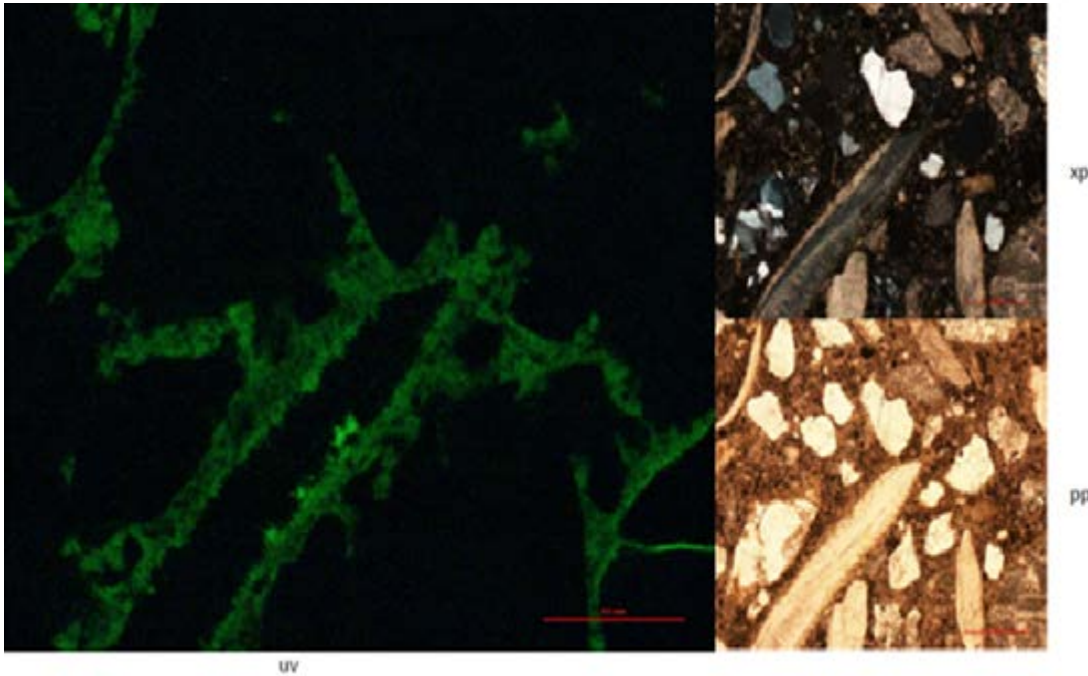
#### **4. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ**

Bu çalışmada normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlar üretilmiş ve farklı kür koşullarının bu betonların fiziksel, mekanik ve iç yapı özelliklerine etkileri incelenmiştir. Ayrıca, farklı dayanım sınıflarındaki bu betonlarda beton ve plastik paspayı kullanılan numuneler üretilerek bu numunelerin hızlı klor iyonu geçirimsizliği ve kılcal su emme gibi geçirimsizlik özellikleri elde edilmiştir. Çalışma kapsamında paspayı kullanılmayan referans beton numuneler de üretilerek paspayı kullanılmasının betonun geçirimsizlik özelliklerine etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Son olarak çalışmada çeşitli şekillerde çatlak oluşturulan beton numunelerin çatlak bulunan yüzeylerine su itici tecrit malzemesi uygulaması yapılmış ve tecrit işleminin etkinliği yapılan geçirimsizlik deneyleri ile karşılaştırılmıştır. Yine aynı numunelere çeşitli yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri uygulanarak bu işlemler sonrasında tecrit malzemesinin işlevini sürdürülebilirliği yapılan hızlı klor iyonu geçirimsizliği ve kılcal su emme deneyleri ile belirlenmiştir. Bu numunelerde yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası iç yapı incelemeleri de gerçekleştirilerek geçirimsizlik deney sonuçları desteklenmiştir.

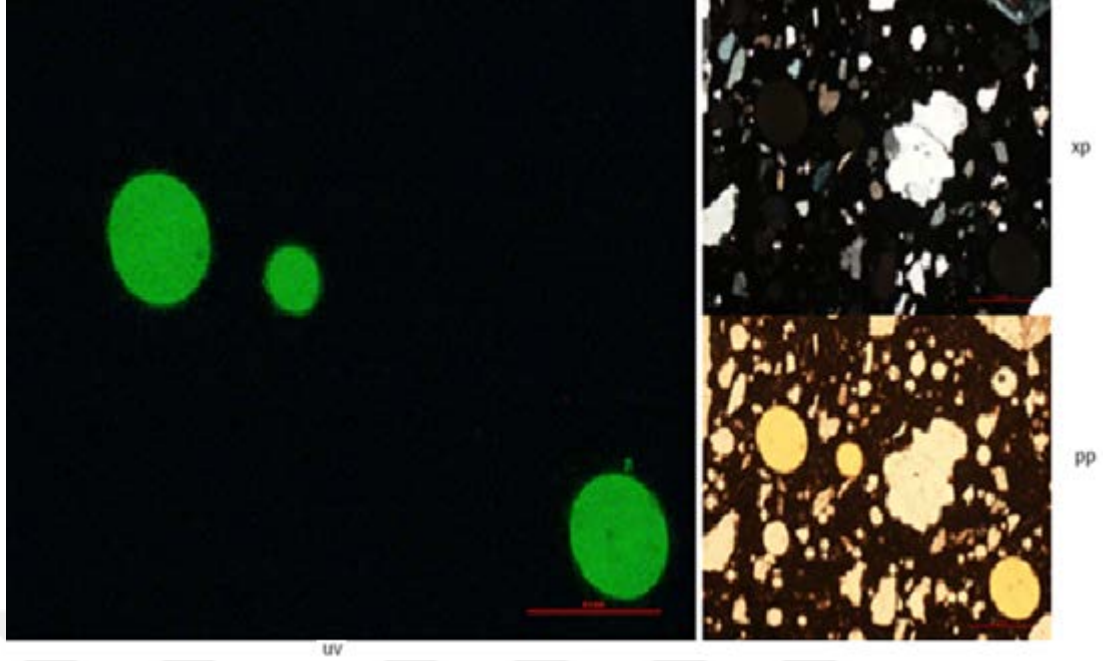
##### **4.1 Kür Koşullarının Betonların Mekanik ve Geçirimsizlik Özelliklerine Etkisi**

Bu çalışma kapsamında; normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlara su kürü, farklı iki sıcaklıkta buhar kürü ve yalıtılmış ortamda etüv kürü olmak üzere farklı kür uygulamaları yapılmış ve bu uygulamaların farklı dayanım sınıflarına sahip betonların mekanik ve geçirimsizlik özelliklerine etkileri belirlenmiştir. Bu kapsamda farklı kür koşullarının betonların basınç dayanımı, yarma çekme dayanımı, kırılma enerjisi, net eğilme dayanımı ve elastisite modülü gibi mekanik özelliklerine etkileri ile hızlı klor iyonu geçirimsizliği, kılcal su emme ve basınç altında su işleme derinliği gibi geçirimsizlik özelliklerine etkileri saptanmıştır.

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de normal ve ultra yüksek dayanımlı betonun etüv kürü uygulanmış numunelerine ait iç yapı görüntüleri verilmektedir. Yüksek dayanımlı betonda normal dayanımlı betonla aynı bileşen malzemeler kullanıldığı için iç yapı görüntüsü ayrıca verilmemiştir. Yapılan iç yapı incelemesinde geleneksel iri agregalarla üretilmiş normal dayanımlı betonda agrega olarak biyomikritik kireçtaşı, kuvars, kavkı ve karbonat parçaları, feldispat, magmatik kayaç parçaları ve çört bulunduğu görülmüştür. Ultra yüksek dayanımlı betonda ise kullanılan agregaların ince boyutta kuvars, feldispat ve granit kökenli olduğu tespit edilmiştir. Ultra yüksek dayanımlı betonların çok düşük su/çimento oranına sahip olması ile bu betonların iç yapı görüntüsü tamamen siyah renkte olup çimento hamuru yoğun şekilde tüm betonu kaplamaktadır. Burada dikkat çekici bir husus ultra yüksek dayanımlı betonlarda gözüken sürüklenmiş hava boşluklarının varlığıdır. Çimentoya oranla çok yüksek miktarda kullanılan su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı katkı bu betonda işlenebilirliği sağlarken çok fazla sayıda sürüklenmiş hava oluşmasına neden olmaktadır. Taze beton birim ağırlığı deneyi sonucu ultra yüksek dayanımlı betonda tespit edilen hava içeriği yaklaşık %6 seviyesinde gerçekleşmiştir. Normal ve yüksek dayanımlı betonda taze betonun hava içeriği %3 değerinin altında elde edilmiştir.



Şekil 4.1 : Normal dayanımlı betonun iç yapısı (pp: tek nikol, xp: çift nikol, uv: ultraviyole ışık).

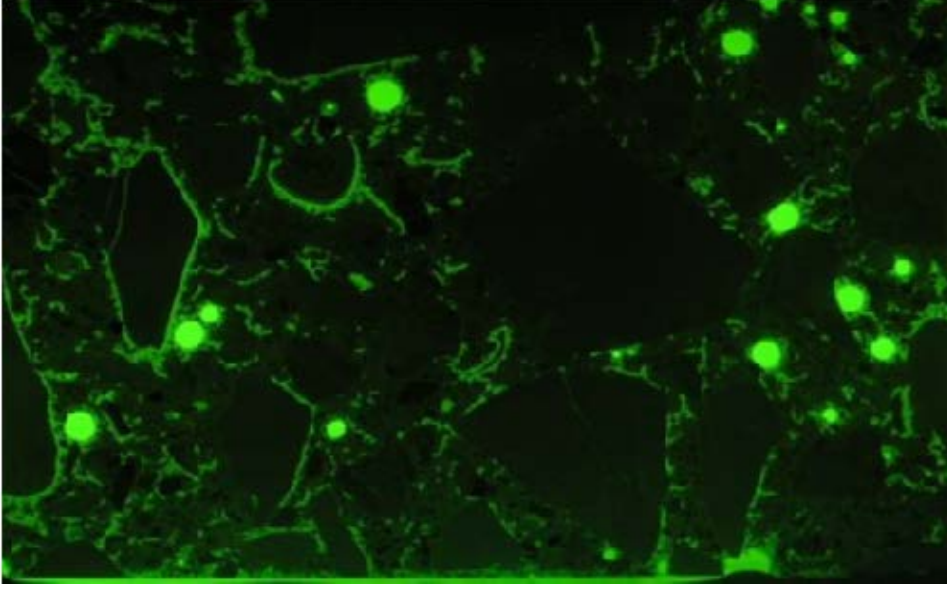


**Şekil 4.2 :** Ultra yüksek dayanımlı betonun iç yapısı (pp: tek nikol, xp: çift nikol, uv: ultraviyole ışık).

Betonda geçirimsizlik daha çok birbiri ile bağlantılı kılcal boşluklar ve çatlakların varlığı ile gerçekleşmektedir [19]. Ultra yüksek dayanımlı betonda oluşan birbiri ile bağlantısı bulunmayan sürüklenmiş haldeki hava boşluklarının ise geçirimsizlik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi bulunmamaktadır. Bu durum çalışmanın daha ileri kısmında verilecek hızlı klor iyonu geçirimsizliği, kılcal su emme ve basınç altında su işleme deney sonuçlarında irdelenmektedir.

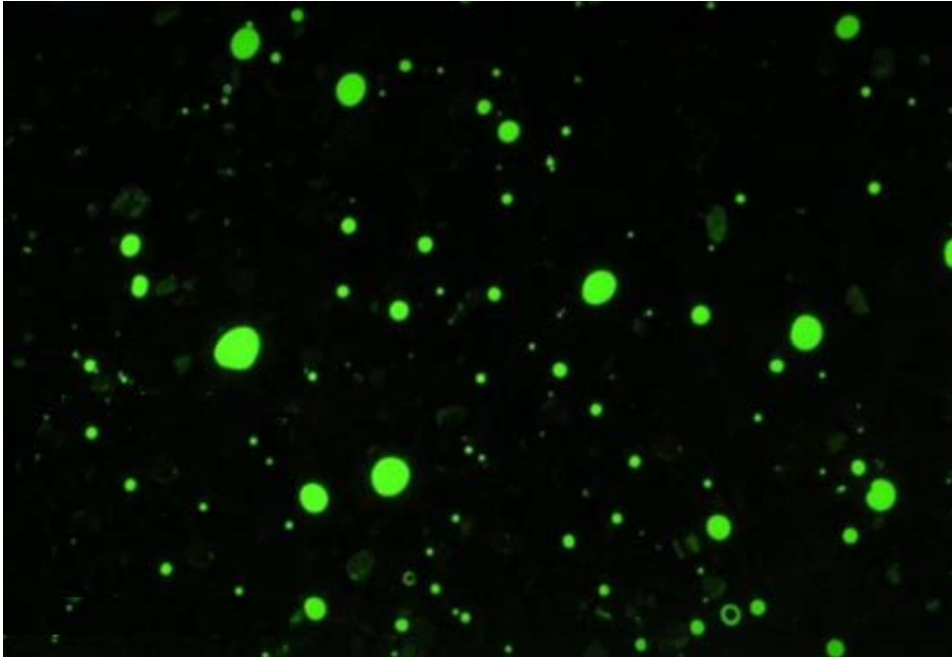
Burada normal dayanımlı beton ile ultra yüksek dayanımlı betonun iç yapıları karşılaştırıldığında ultra yüksek dayanımlı betonda iri agregaların olmaması, su/çimento oranının 0,17'ye düşürülmesi ve, ultra incelikte silis dumanı kullanılarak çimento taneleri arası boşluğun doldurulması ile ultra yüksek dayanımlı betonda çok daha yoğun bir yapının elde edildiği görülmektedir.

Normal dayanımlı betonun ultraviyole ışık altında iç yapısı incelendiğinde (Şekil 4.3) uygulanan ısı işlemleri birlikte hidrasyon ürünlerinin beton içinde yeterince dağılmadığı, agregaların etrafında boşluğun ve kılcallığın fazla olduğu görülmektedir. Uygulanan ısı işlemleri betonun boşluk yapısı üzerinde belirgin biçimde etkili olmakta, normal dayanımlı betonda boşlukların sayısı ve miktarında artışlara neden olmaktadır.



**Şekil 4.3 :** Yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulanan normal dayanımlı betonun iç yapısı (uv: ultraviyole ışık).

Ultra yüksek dayanımlı betonun ultraviyole ışık altında iç yapısı incelendiğinde ise (Şekil 4.4) çok daha yoğun bir iç yapı olduğu görülmektedir. Bu betonda uygulanan ısıtma işlemleri ile betonun iç yapısı gelişmekte daha kararlı ve boşluksuz bir iç yapı elde edilmektedir. Ayrıca, kullanılan agregaların tane boyutunun sınırlandırılması ve beton bileşiminde ultra ince silis dumanı kullanılması ile agrega taneleri ile çimento hamuru arayüzeyi de iyileştirilmekte ve kılcallık oldukça azalmaktadır.



**Şekil 4.4 :** Yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulanan ultra yüksek dayanımlı betonun iç yapısı (uv: ultraviyole ışık).

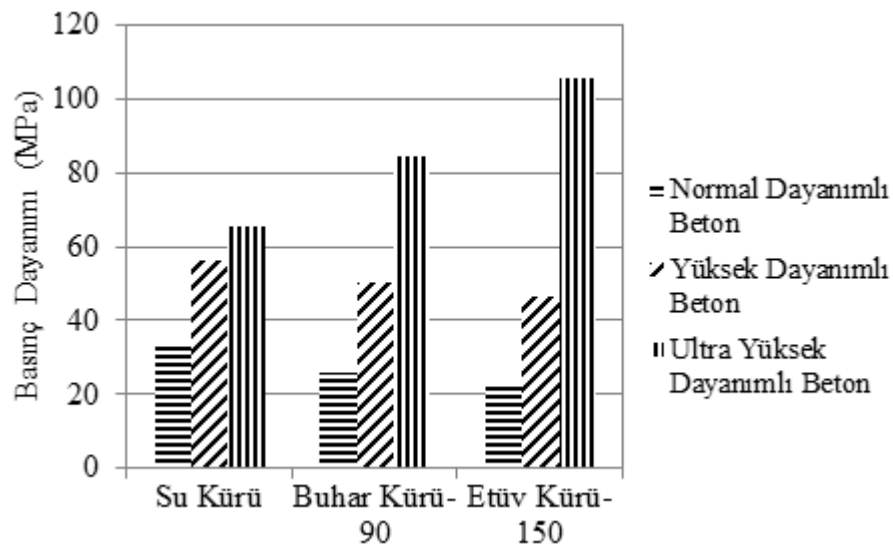
#### 4.1.1 Kür koşullarının basınç dayanımına etkisi

Basınç deneylerinde; numuneler 150°C yalıtılmış ortamda etüv kürü, 90°C buhar kürü, 60°C buhar kürü ve 20°C’de su kürü gibi çeşitli kür rejimlerine bir gün süreyle tabi tutulmuş ve sonrasında devamlı olarak su küründe bekletilmiştir.

Numunelerin 7 günlük basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.5’te sunulmuştur. Normal ve yüksek dayanımlı betonlarda, yalıtılmış ortamda 150°C’de etüv kürü uygulanmış numunelerde dayanım en düşüktür. Bu numuneleri sırasıyla 90°C’de buhar kürü uygulanan ve su kürü uygulanan numunelerin izlediği görülmüştür.

Normal ve yüksek dayanımlı betonlarda yüksek sıcaklık ile kür uygulamalarının betonun iç yapısında hasarlara neden olduğu ve basınç dayanımını önemli ölçüde azalttığı anlaşılmıştır. Bu durum, yapılan iç yapı incelemelerinde normal dayanımlı betonlara etüv kürü uygulaması sonrası çimento hamuru agrega ara yüzeyinde çatlakların varlığı ile desteklenmektedir. Isıl kür işlemleri ile normal ve yüksek dayanımlı betonların basınç dayanımında meydana gelen azalma etüv kürü uygulanmış numunelerde daha fazla olmaktadır.

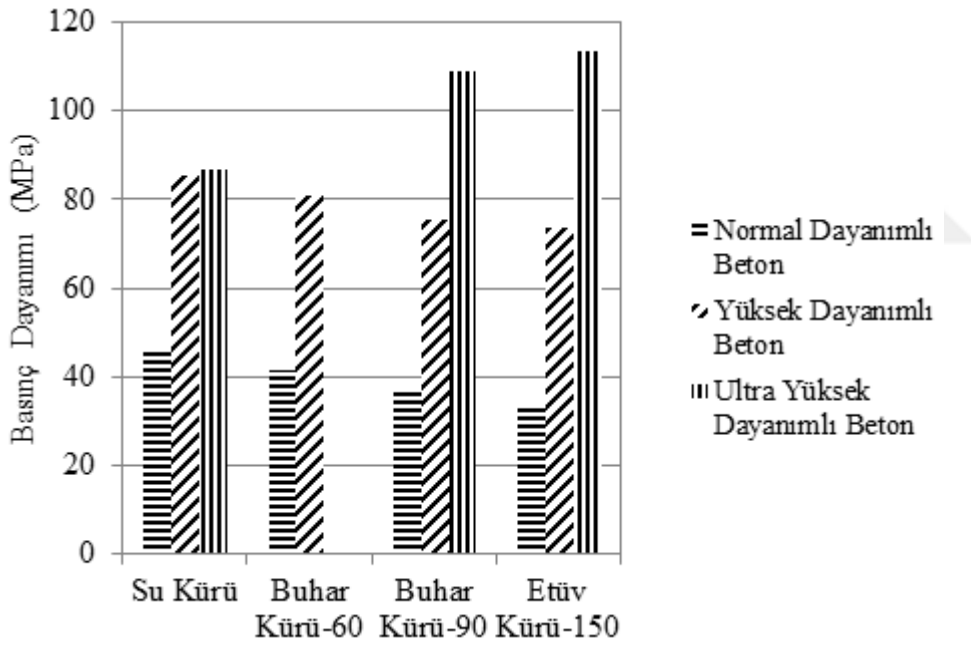
Ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise etüv kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımı en yüksektir. Bu numuneleri sırasıyla buhar kürü uygulanan numuneler ve su içerisinde bekletilen numuneler izlemiştir.



Şekil 4.5 : Kür koşullarının 7 günlük betonların basınç dayanımına etkisi.

28 günlük basınç dayanımları Şekil 4.6’da verilmektedir. Deney sonuçları, 7 günlük basınç dayanımlarına paralel olarak, 28 günlük normal ve yüksek dayanımlı beton

numunelerinde de etüv kürü ve buhar kürü gibi ısıtıl işlemler uygulanması ile dayanımın düştüğü, en yüksek dayanım sonuçlarının su kürü uygulanan numunelerde gerçekleştiği görülmüştür. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise 7 günlük deney sonuçlarına benzer olarak; hem buhar kürü, hem de etüv kürü ile elde edilen dayanımların su kürüne göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Ancak, burada dikkat çekici bir sonuç 28 günlük olarak yapılan basınç dayanımı deney sonuçlarında su kürü ve buhar kürü uygulanmış numunelerin basınç dayanımı, 7 günlük dayanımlarına göre belirgin şekilde artarken etüv kürü uygulanan numunelerde artış daha azdır. Bu durumun nedeni ultra yüksek dayanımlı betonlara erken yaşlarda uygulanan yüksek sıcaklıktaki ısıtıl işlemlerin çimento hidratasyonunu hızlandırması ve iç yapıyı iyileştirmesinden kaynaklanmaktadır [10]. Ultra yüksek dayanımlı betonların geçirimsiz iç yapıları nedeniyle su küründe dayanım kazanmaları ve iç yapısının gelişmesi daha uzun sürelerde gerçekleşmektedir [12].



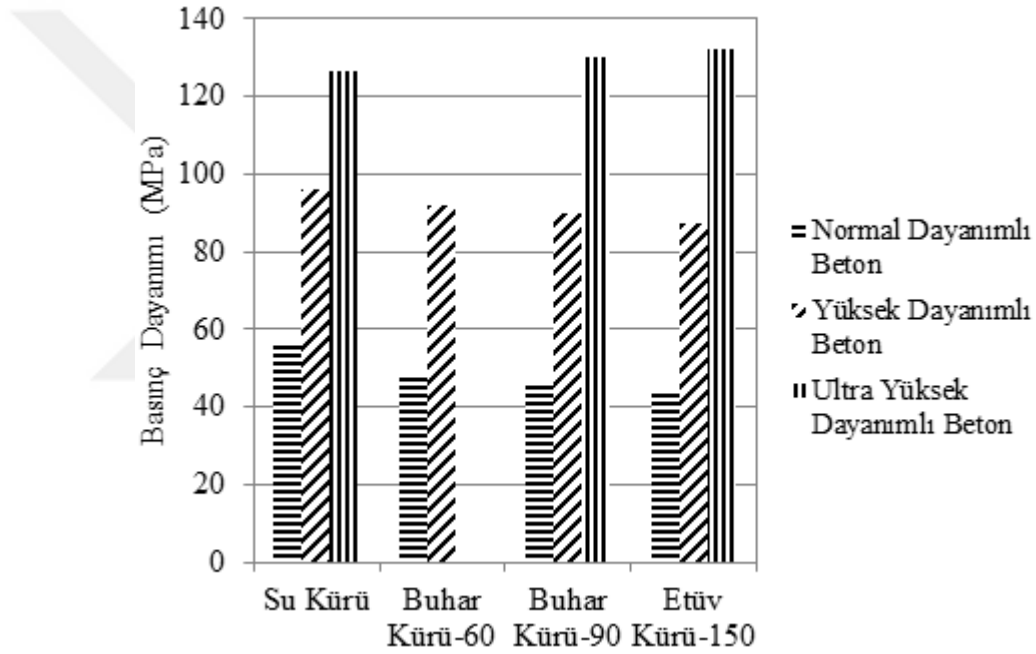
**Şekil 4.6 :** Kür koşullarının 28 günlük betonların basınç dayanımına etkisi.

Yapılan 7 ve 28 günlük deneylerden normal ve yüksek dayanımlı betonlarda buhar kürü ve etüv kürü şeklinde uygulanan ısıtıl işlemlerin betonun 7 ve 28 günlük basınç dayanımını olumsuz etkilediği görülmektedir. Bu betonlarda en yüksek dayanım sonuçları su kürü uygulanan numunelerde elde edilmektedir. Normal ve yüksek dayanımlı betonlarda ısıtıl kür işlemi uygulanması ile betonda kılcal boşluklar artmakta ve hidratasyon ürünleri çimento hamuru içerisinde heterojen biçimde dağılmaktadır. Bu durum normal ve yüksek dayanımlı betonların ısıtıl işlemler ile



dayanımının azalmasına neden olmaktadır [56]. Normal ve yüksek dayanımlı betona ısıtıl kr işlemleri uygulanması çimentonun hidratasyonunu hızlandırmakta, ancak betonun 7 günlük ve daha ileri yaşlardaki basınç dayanımını olumsuz etkilemektedir [31].

Numunelerin 365 günlük dayanımları ise Şekil 4.7'de verilmektedir. 365 günlük basınç dayanımları incelendiğinde 7 ve 28 günlük dayanım sonuçlarına benzer olarak normal ve yüksek dayanımlı betonların basınç dayanımlarının ısıtıl kr işlemleri ile azaldığı anlaşılmaktadır. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları daha düşük olan su kürü uygulanış numunelerin zamanla basınç dayanımlarının ısıtıl işlem uygulanış numunelere olduğa yaklaşığı görülmektedir.

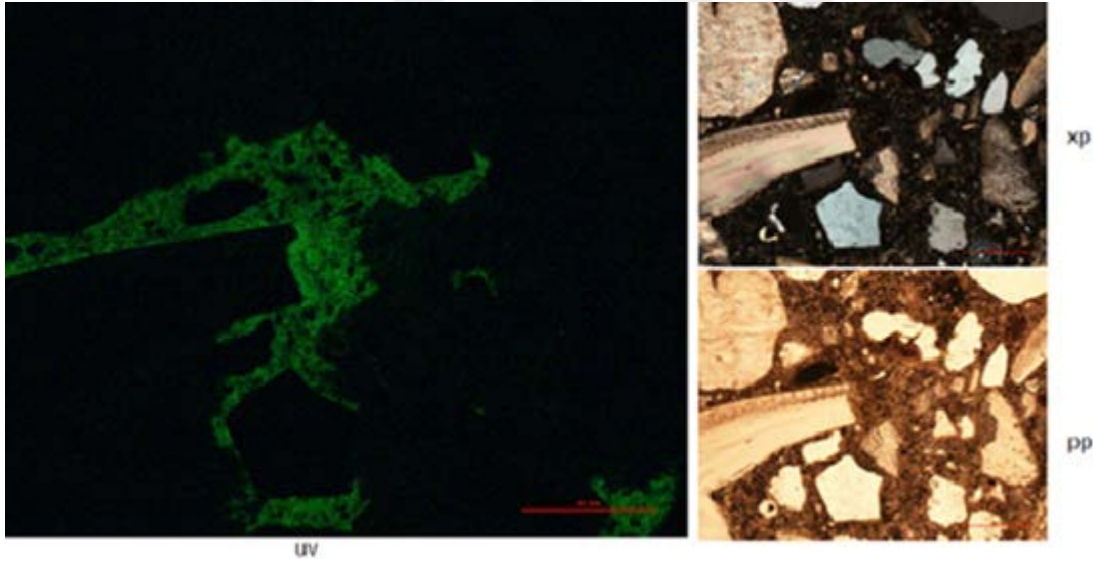


**Şekil 4.7 :** Kr koşullarının 365 günlük betonların basınç dayanımına etkisi.

Ultra yüksek dayanımlı betonda, bileşiminde iri agregaların kullanılmamış olması ve ultra incelikteki silis dumanı kullanılması ile çok yoğun ve geçirimsiz bir i yapı elde edilmektedir. Ultra yüksek dayanımlı betonların geçirimsiz iç yapıları nedeniyle imento tanelerinin hidrate olması daha uzun süreler almaktadır. Geçirimsizliği aşırı düşük olan bu betonların özeliği literatürde de belirtilmekte ve bu betonların içsel krleme yöntemiyle kr edilerek imento tanelerinin hidratasyonunun daha etkin sağlanması önerilmektedir [12]. Bu betonlarda suya doymun hafif agrega kullanılması ile hidratasyon derecesinin erken yaşlarda arttığı ve hafif agrega ilavesiyle su

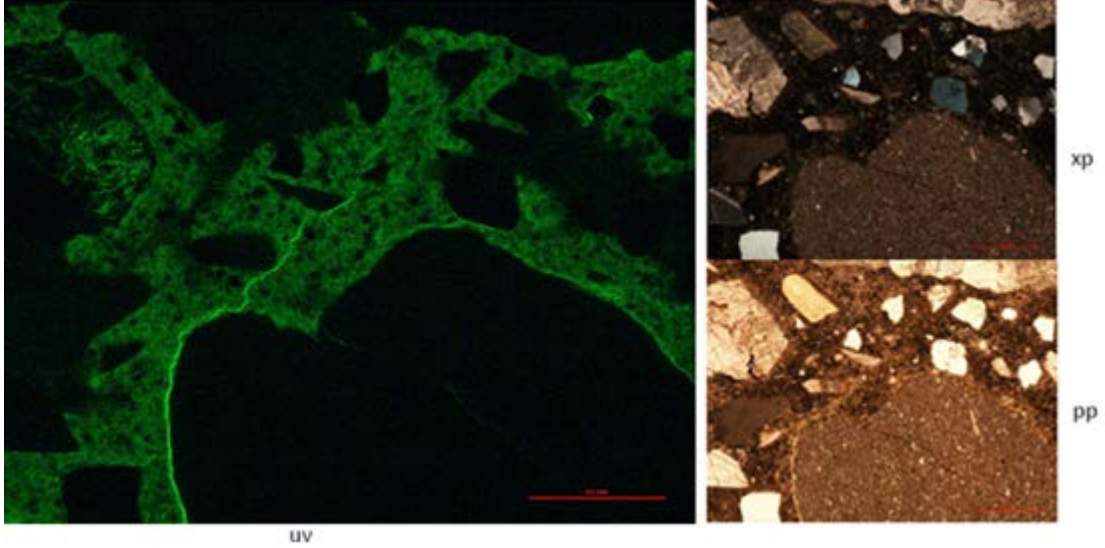
rezervuarlarının hamur fazı içerisinde daha yakın dağılırarak iyi bir içsel kürlenme sağlandığı belirtilmektedir [125].

Sonuç olarak 7, 28 ve 365 günlük basınç dayanımı deney sonuçları incelendiğinde normal ve yüksek dayanımlı betonlarda ısıl kür işlemleri uygulanması ile betonların basınç dayanımı değerleri düşmekte, en belirgin düşüşler ise uygulanan sıcaklık değerinin daha yüksek olduğu 150°C’de etüv kürü uygulanan numunelerde gerçekleşmektedir. Bu düşmenin sebebi ısıl işlemlerle birlikte çimento hidratasyonunun hızlanması, buna bağlı olarak hidratasyon ürünlerinin tam oluşamaması ve çimento hamuru içinde düzensiz olarak dağılmasından kaynaklanmaktadır [56,58]. Heterojen dağılan hidratasyon ürünleri tam hidrate olamayan çimento taneleri etrafında hidratasyonu engelleyici bir kabuk tabakası oluşturarak çimentonun kalan hidratasyonunu etkin şekilde devam ettirmesine de engel olabilmektedir [59]. Isıl işlemler uygulanmasının çimento hidratasyonunun homojen şekilde gelişmesine engel olması aşağıda normal dayanımlı betona yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulanması ile Şekil 4.8’de gösterilmektedir.



**Şekil 4.8 :** Normal dayanımlı betonda yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulanmasının çimento hidratasyonuna etkisi (pp: tek nikol, xp: çift nikol, uv: ultraviyole ışık).

Ayrıca, ısıl işlemler uygulanmasının betonların boşluk yapısına etki ettiği ve betonda daha büyük boşluklar ve çatlaklar oluşmasına neden olduğu da bilinmektedir [57]. Şekil 4.9’da bu çalışma kapsamında yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulanan normal dayanımlı betonların iç yapı incelemelerinde çimento hamuru ile agrega temas yüzeyinde kür etkisine bağlı oluşan belirgin çatlaklar görülmektedir.

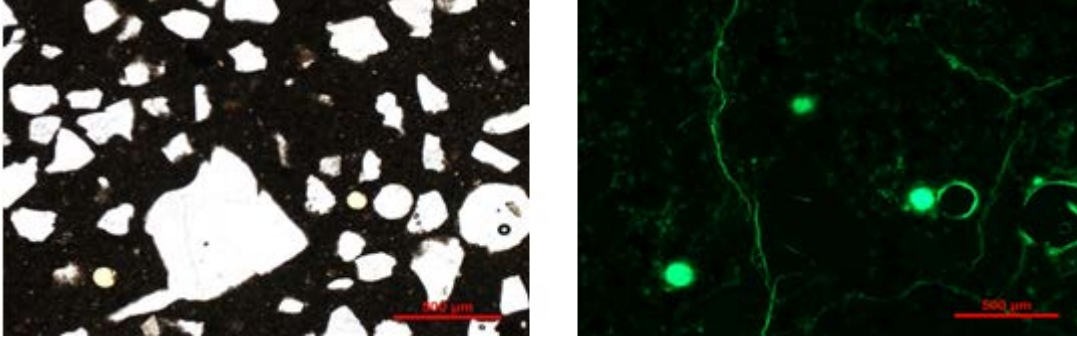


**Şekil 4.9 :** Normal dayanımlı betonda yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulanması ile mikro çatlakların oluşması (pp: tek nikol, xp: çift nikol, uv: ultraviyole ışık).

Ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise ısı k r işlemleri ile betonların basınç dayanımları yükselmektedir. Özellikle 7 ve 28 günlük numunelerin basınç dayanımı ısı k r uygulanmış numunelere su k r uygulanan numunelere göre belirgin şekilde yüksektir. Daha ileri yaşlarda ise imento tanelerinin sürekli hidrasyonu ile normal su k r uygulanmış numunelerin basınç dayanımları da ısı k r uygulanan numunelere yaklaŐmaktadır. Bu durumun nedeni geçirimsizliği çok düşük olan betonların su k r ile k rlenmesinin çok daha uzun sürelerde olabilmesi ile açıklanmaktadır. Ultra yüksekte dayanımlı betonlarda imento hidrasyonunu hızlandırmak ve daha fazla imento tanesinin etkin şekilde hidrate olabilmesi amacıyla suya doymun hafif agregaların kullanıldığı içsel k rleme, alternatif bir k r yöntemi olarak kullanılabilmektedir. Çimento tanecikleri içsel k rleme ile hidrate olacak suyu daha kolay bulmakta, böylece hidrate olmuş imento miktarı artmaktadır [11, 125].

Isı k r işlemleri uygulanması ile ultra yüksekte dayanımlı betonda da mikro çatlaklar oluşmaktadır. Ancak, bu betonda kullanılan silis dumanı hem imento taneleri arasındaki boşlukları doldurarak hem de hidrasyon sonucu oluşan kalsiyum hidroksiti daha kararlı ürünlere dönüŐtürerek ısı k r işlemleri ile dayanımların artmasını sağlamaktadır [10]. Ayrıca ultra yüksekte dayanımlı betonda hidrasyon sonucu oluşan kalsiyum hidroksitin çatlakları doldurması ile beton kendi kendini tamir edebilmektedir [126].

Ultra yüksek dayanımlı betonlarda ısıl kür işlemi sonrasında beton iç yapısında oluşan etkilerin incelendiği bir çalışmada yalıtılmış ortamda etüv kürü sonrası iç yapı ve oluşan kılcal çatlakların  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile dolması Şekil 4.10'da verilmiştir [123].



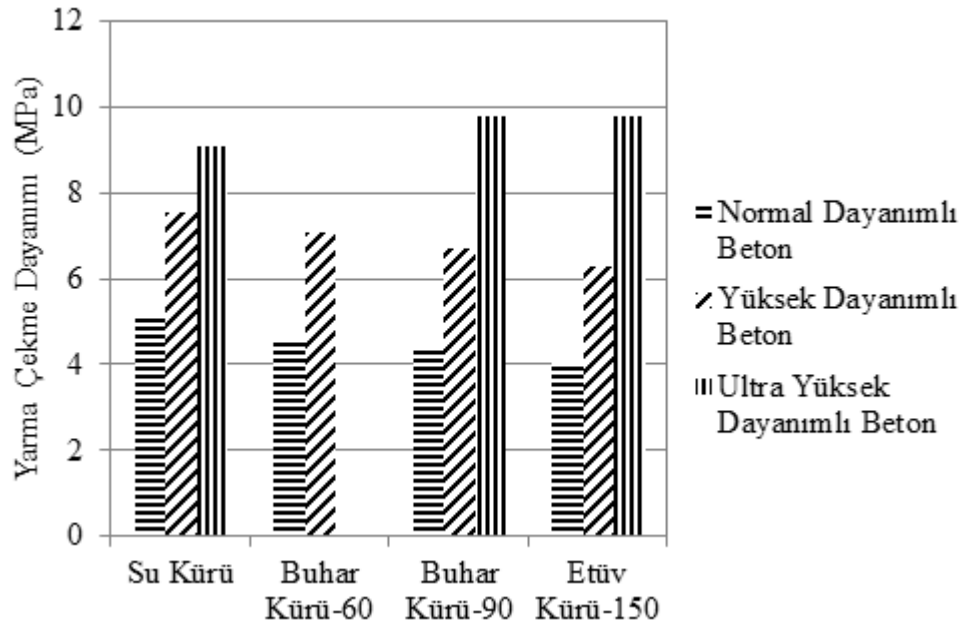
**Şekil 4.10 :** Ultra yüksek dayanımlı betonlarda 200°C etüv kürü işlemi sonrası ince kesitte çatlakların görüntüsü [123].

Yapılan basınç dayanımı ve iç yapı incelemelerinin tamamından sonuç olarak normal ve yüksek dayanımlı betonlarda ısıl kür işlemleri uygulanması ile betonun 7, 28 ve 365 günlük basınç dayanımı değerleri düşmektedir. Bu durumun sebebi ısıl işlemler etkisinde hidrasyonun hızlı olarak gelişerek hidrasyon ürünlerin tam olarak oluşmaması ve çimento hamuru içinde homojen dağılamamasından kaynaklanmaktadır. Isıl kür işlemleri uygulanması ile çimento hidrasyonun heterojen şekilde gelişmesi çalışma kapsamında yapılan iç yapı incelemelerinde de görülmektedir. Ayrıca normal dayanımlı betonda ısıl işlem uygulanması ile çok sayıda mikro çatlak oluşmaktadır. Bu çatlakların varlığı da betonun dayanım düşüşlerini açıklamaktadır. Normal ve yüksek dayanımlı betonun ısıl işlemler ile zarar görmesi hem buhar kürü uygulanan numunelerde hem de yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulanan numunelerde su kürü uygulanan numunelere göre dayanım azalması olarak görülmektedir. Bu dayanım düşüşleri sıcaklık değerinin en yüksek olduğu yalıtılmış ortamda 150°C etüv kürü uygulanan numunelerde daha belirgindir. Isıl işlem uygulanan numuneler içerisinde su kürü uygulanan numunelerle karşılaştırıldığında en az dayanım kaybı yaşanan numuneler 60°C sıcaklıkta buhar kürü uygulanan numunelerdir. Isıl işlem uygulanmasında normal ve yüksek dayanımlı betonda sıcaklık değeri yükseldikçe betonların iç yapısı daha olumsuz biçimde etkilenmekte ve dayanım kayıpları daha fazla olmaktadır. Isıl işlemler uygulanması ile su kürü uygulanan numunelere göre dayanım kayıpları karşılaştırıldığında ise dayanım değeri daha düşük ve daha boşluklu iç yapıya sahip

normal dayanımlı betonun bu durumdan en çok etkilendiği görülmektedir. Betonlarda su/çimento oranının düşmesi ve daha boşluksuz iç yapı oluşması ile ısı işlemlerin zararlı etkileri göreceli olarak azalmaktadır. Yüksek dayanımlı beton, ısı işlemlerin betonun iç- yapısında oluşturduğu olumsuz etkilerden normal dayanımlı betona göre daha az etkilenmektedir. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise ısı işlemler etkisinde silis dumanı çimentonun hidrasyonu sonucu oluşan kararsız bir ürün olan kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek bu ürünü daha kararlı C-S-H yapısına dönüştürmektedir. Böylece bu betonlarda ısıl kür işlemleri uygulanması ile basınç dayanımı değerleri artmaktadır. Ayrıca ultra yüksek dayanımlı betonda ısı işlemler ile oluşan çatlaklar hidrasyon ürünü kalsiyum hidroksit ile zamanla dolmakta ve beton kendi kendini tamir edebilmektedir.

#### 4.1.2 Kür koşullarının yarma çekme dayanımına etkisi

Yarma çekme dayanımı deneyleri 28 günlük gerçekleştirilmiş olup sonuçları Şekil 4.11'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde normal ve yüksek dayanımlı betonlarda basınç dayanımı sonuçlarına benzer şekilde ısıl kür işlemi uygulanması ile yarma çekme dayanımında düşüşler meydana geldiği, en yüksek yarma dayanımına su kürü uygulanmış numunelerin ulaştığı gözlemlenmiştir. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise ısıl işlem uygulanması ile su kürü uygulanmış numunelere göre yarma çekme dayanımının arttığı görülmüştür.

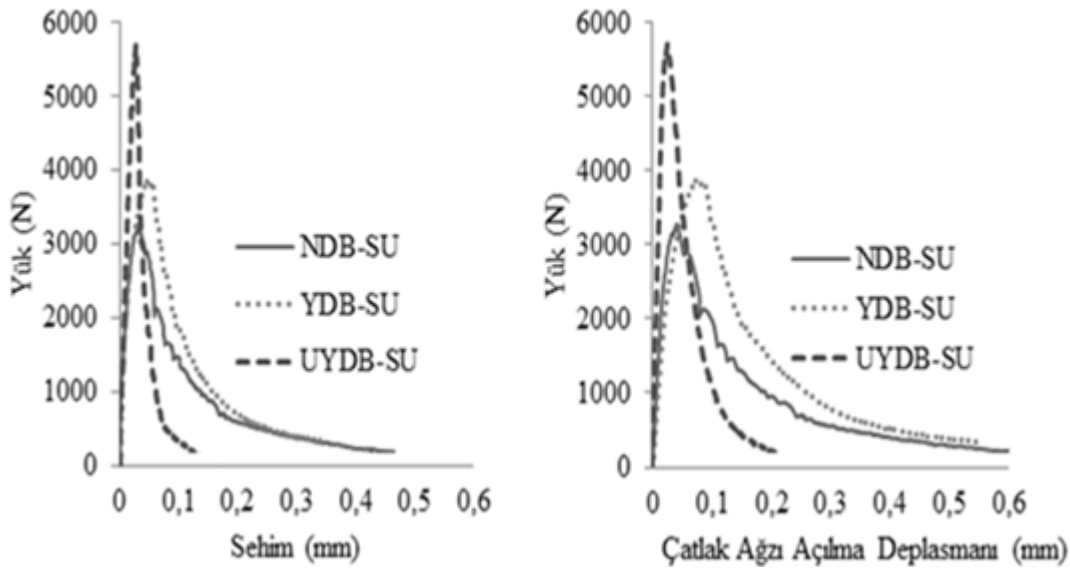


Şekil 4.11 : Kür koşullarının yarma çekme dayanımına etkisi.

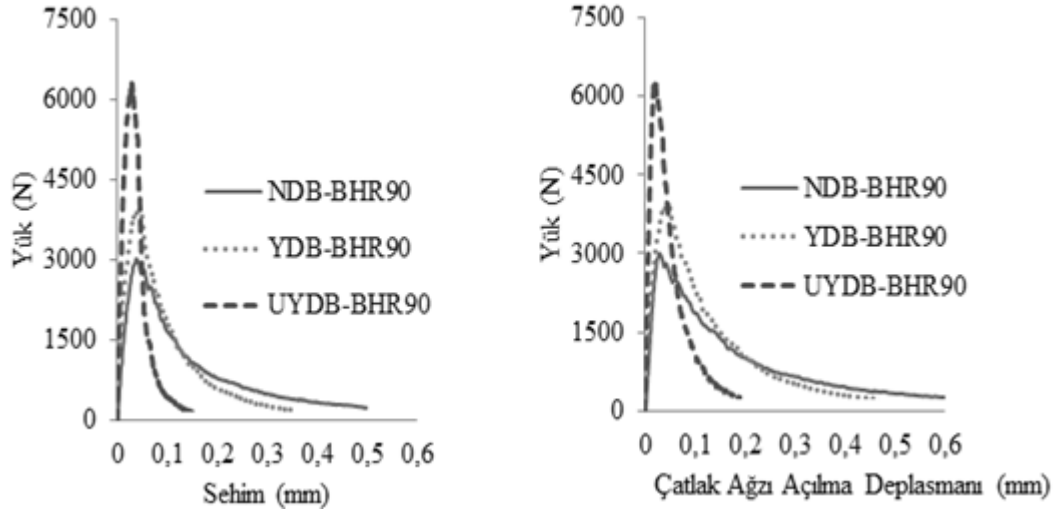
Bu üç farklı beton türü için yarma çekme dayanımı deney sonuçları birlikte değerlendirildiğinde normal ve yüksek dayanımlı beton için 60°C ve 90°C buhar kürü uygulaması ile 150°C yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulamalarının beton iç yapısında hasara neden olduğu ve beton özelliklerini olumsuz etkilediği görülmüştür. Ancak silis dumanı gibi çimento hidrasyonu sonucu oluşan ikincil ürünleri bağlama özeliği bulunan bileşen malzemelerin kullanıldığı ultra yüksek dayanımlı betonlarda, uygulanan ısı işlemlerin beton iç yapısında iyileşmeye ve yarma çekme dayanımında artışlarına neden olduğu anlaşılmıştır.

#### 4.1.3 Kür koşullarının kırılma enerjisine etkisi

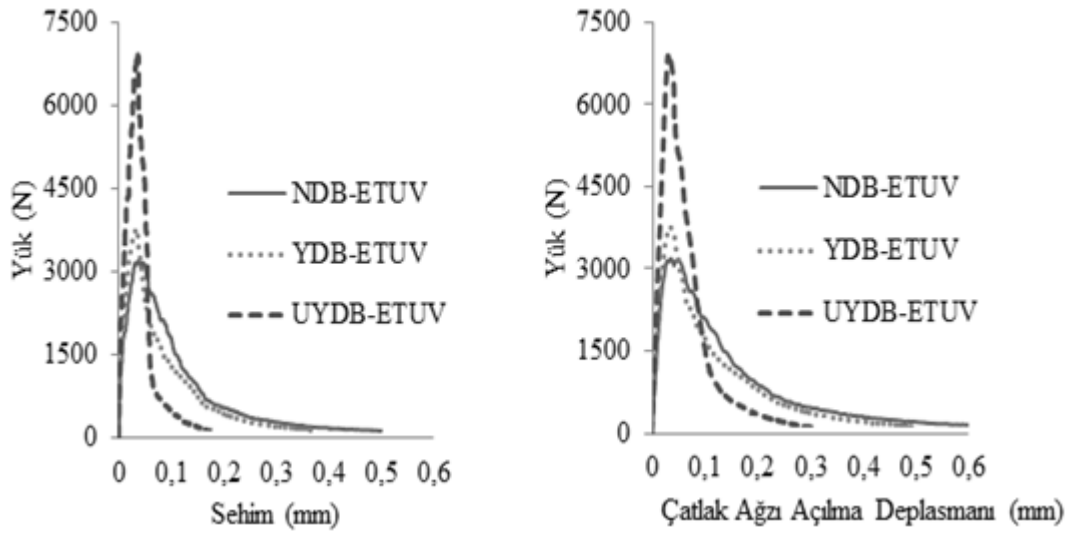
Çalışma kapsamında betonların eğilme dayanımları ve kırılma enerjisi değerleri de belirlenmiştir. Kırılma enerjisi deney sonuçları incelendiğinde normal ve yüksek dayanımlı betonda ısı kür işlemi uygulanması ile özellikle etüv kürü uygulanan numunelerde kırılma enerjilerinde belirgin azalmalar görülmüştür. Ultra yüksek dayanımlı betonun kırılma enerjisi ise ısı kür işlemi uygulanması ile artmaktadır. Aşağıda normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı beton numunelere uygulanan su kürü, buhar kürü ve yalıtılmış ortamda etüv kürü işlemleri sonrası yük- sehim ve yük çatlak ağzı deplasmanı eğrileri sırasıyla Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 ile verilmektedir. Bu grafiklerin oluşturulmasında sonuçları en iyi temsil eden bir numune kullanılmıştır.



**Şekil 4.12 :** Normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda su kürü uygulamasının yük-sehim ve yük- çatlak ağzı açılma deplasmanına etkisi.



**Şekil 4.13** : Normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda 90°C buhar kürü uygulamasının yük-sehim ve yük- çatlak ağzı açılma deplasmanına etkisi.

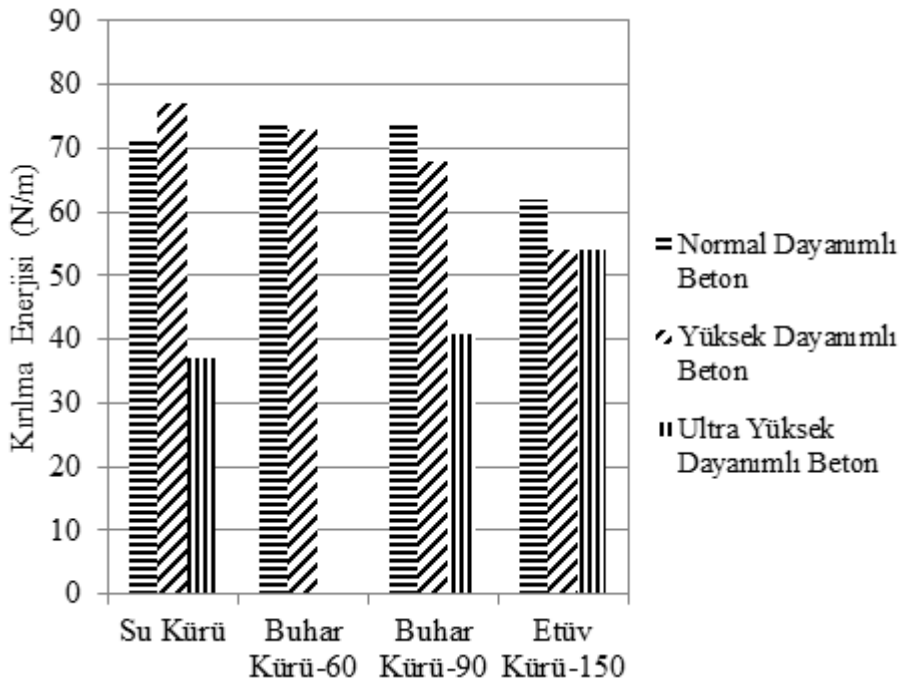


**Şekil 4.14** : Normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda 150°C yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulamasının yük-sehim ve yük- çatlak ağzı açılma deplasmanına etkisi.

Deney sonuçları incelendiğinde ısı kütür işlemleri uygulanması ile normal ve yüksek dayanımlı betonun kırılma enerjisi değerlerinde azalma olmaktadır. Bu azalma ısı kütür işlem sıcaklığının en yüksek olduğu etüv kürü uygulamalarında çok daha belirgin biçimde görülmektedir. Bu betonlarda kırılma enerjisindeki azalmanın temel nedeni, ısı kütür işlemleri uygulanması ile kırılma yükü değerlerinin düşmesidir. Ayrıca ısı kütür işlemleri uygulanması ile normal ve yüksek dayanımlı beton numuneleri daha gevrek davranış göstermekte ve yük altında şekil değiştirmeleri azalmaktadır.

Ultra yüksek dayanımlı betonda ise ısı kür işlemleri uygulanması ile betonun kırılma yükü değerleri artmakta ve buna bağlı olarak kırılma enerjisi değerleri de artmaktadır. Kırılma yük değerinin artmasında ısı kür işlemleri sonrası silis dumanının çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan ikincil ürünleri bağlaması etkili olmaktadır.

Normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonun yük- şekil değiştirme eğrileri ve kırılma enerjisi deney sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, betonun dayanımı arttıkça daha gevrek davranış gösterdiği bilinen bir durum olup yük- şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde bu çalışmada da yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonların normal dayanımlı betona göre çok daha gevrek bir davranış sergiledikleri görülmektedir. Bu durum kırılma enerjisi deney sonuçlarında da görülmektedir. Tüm beton sınıflarında kür uygulamalarının betonların kırılma enerjisine etkileri Şekil 4.15'te verilmektedir.



Şekil 4.15 : Kür koşullarının kırılma enerjisine etkisi.

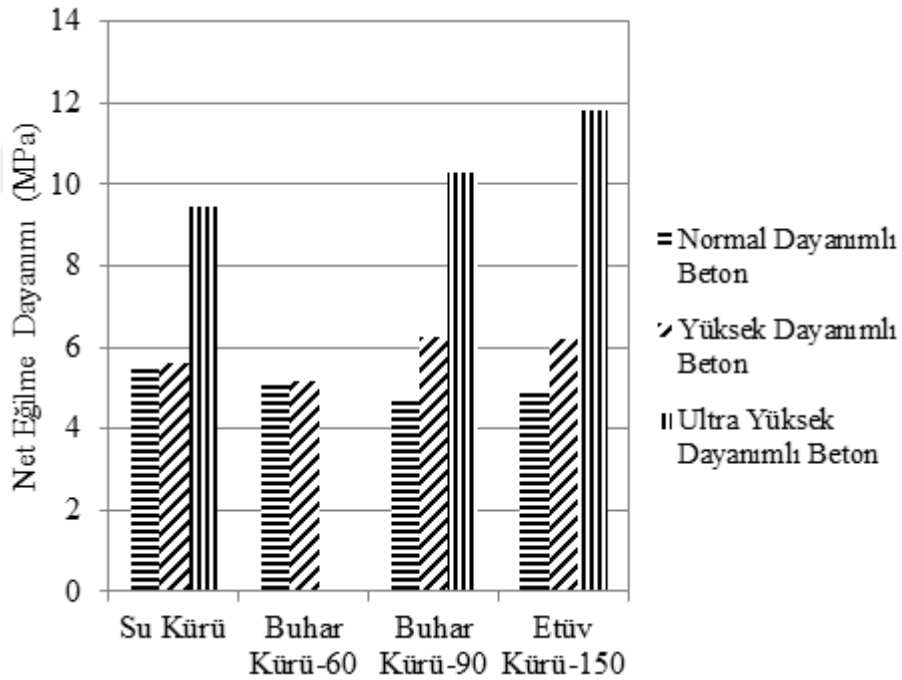
Kırılma enerjisi deney sonuçları incelendiğinde normal ve yüksek dayanımlı betonlara göre kırılma yük değeri daha yüksek olan ultra yüksek dayanımlı betonların gevrek davranışları nedeniyle kırılma enerjilerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Betonun mekanik davranışı için kritik öneme sahip olan sünekliğin ultra yüksek dayanımlı betonlarda önemli derecede azalması nedeniyle endüstriyel



uygulamalarda betonların bu olumsuz özeliğinin giderilmesi için çelik lifler veya sentetik liflerin beton bileşimine eklenmesi yaygın bir yöntemdir.

#### 4.1.4 Kür koşullarının net eğilme dayanımına etkisi

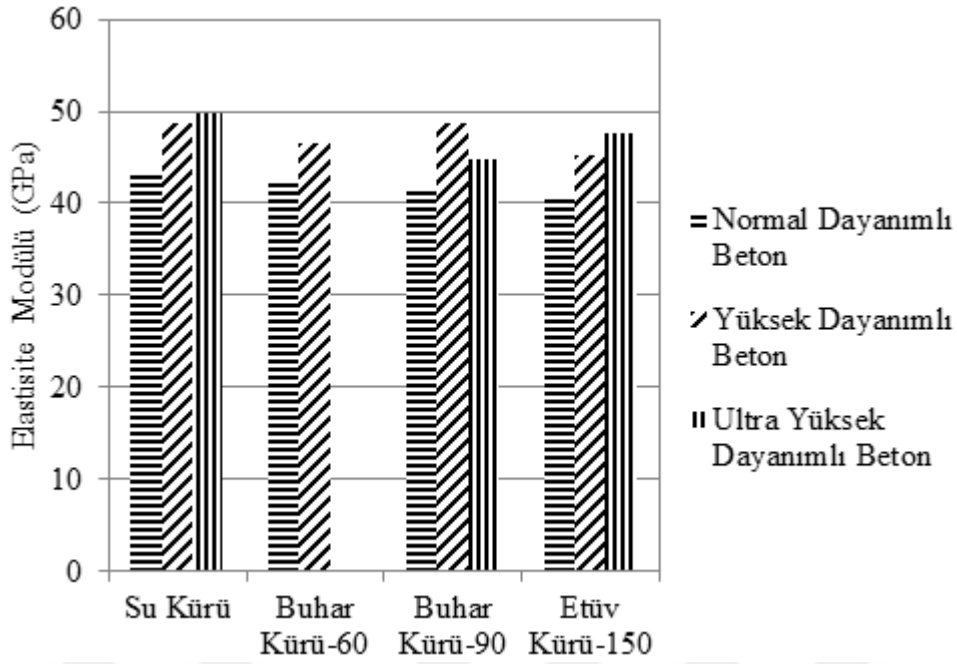
Kırılma enerjisi deneyleri yapılırken numunelerin kırılma esnasında maksimum yük değeri ve kırılma kesiti kullanılarak net eğilme dayanımı değerleri de hesaplanmış olup sonuçları Şekil 4.16'da verilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde normal ve yüksek dayanımlı betonlarda ısıl kür işlemleri uygulanmasının betonların net eğilme dayanımına önemli bir etkisi olmamıştır. Ancak ultra yüksek dayanımlı betonlarda ısıl kür işlemi uygulanan numunelerin net eğilme dayanımı su kürü uygulanan numunelerden fazla olmaktadır. Net eğilme dayanımdaki bu artış, beton bileşiminde silis dumanı bulunan ultra yüksek dayanımlı betonda silis dumanının belirli sıcaklık değerleri üzerinde  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  bağlaması ve iç yapıyı iyileştirerek kırılma yükü değerini arttırması ile açıklanmaktadır.



Şekil 4.16 : Kür koşullarının net eğilme dayanımına etkisi.

#### 4.1.5 Kür koşullarının elastisite modülüne etkisi

Çalışmada farklı kür koşulları uygulanan normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonların elastisite modülleri gerilme deformasyon eğrisi yardımı ile 480 günlük olarak belirlenmiş ve Şekil 4.17'de verilmiştir.

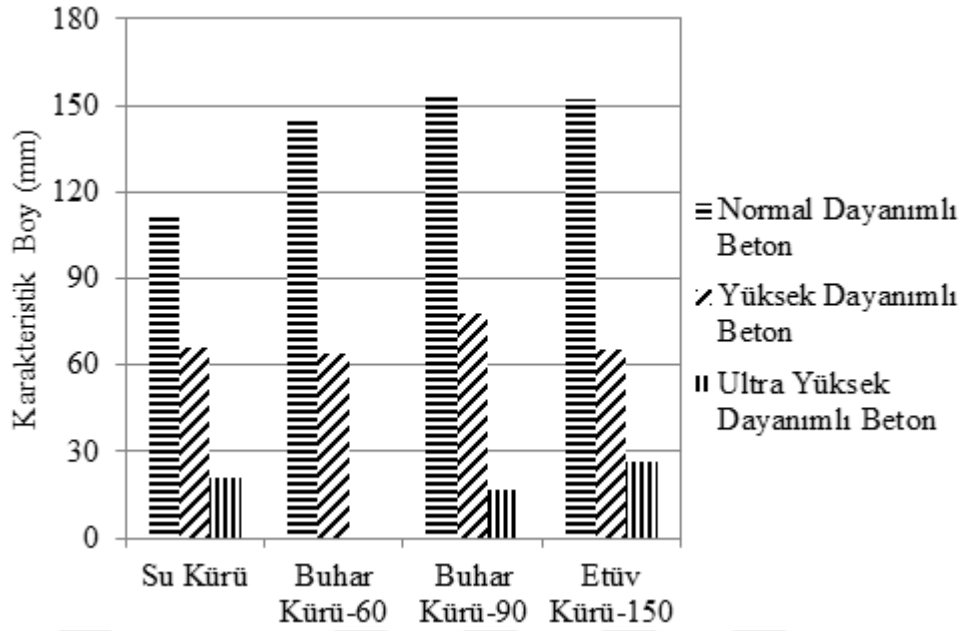


Şekil 4.17 : Kür koşullarının elastisite modülüne etkisi.

Deney sonuçları incelendiğinde betonun karakteristik bir özeliği olan ve gerilme altında deformasyonun belirlenmesinde kullanılan elastisite modülünün, tüm beton sınıfları için uygulanan farklı kür koşullarından önemli ölçüde etkilenmediği anlaşılmaktadır.

#### 4.1.6 Kür koşullarının karakteristik boy sonuçlarına etkisi

Betondaki kırılma parametrelerinin saptanması için nonlinear kırılma mekaniğine dayanan yöntemler geliştirilmiştir. Betonun kırılma parametrelerine etki eden etkenler arasında su/çimento oranı, maksimum agrega boyutu, agrega tipi ve agrega konsantrasyonu sayılabilir. Beton karışımlarında karakteristik boy ( $l_{ch}$ ) tasarım kriterlerine dahil edilmektedir. Karakteristik boy ( $l_{ch}$ ), kırılma enerjisi, elastisite modülü ve yarma çekme dayanımı gibi parametrelerden yararlanarak hesaplanmaktadır. Farklı kür uygulamalarının sünekliğin bir ölçüsü olan karakteristik boya etkisi Şekil 4.18'de verilmektedir. Deney sonuçlarına göre tüm beton sınıflarında farklı kür uygulamalarının betonların karakteristik boy değerlerine belirgin bir etkisi görülmemiştir. Ancak, farklı beton sınıfları için sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde en düşük karakteristik boy değerlerine ultra yüksek dayanımlı betonların sahip olduğu görülmektedir. Beton, basınç dayanımı azaldıkça daha sünek davranış göstermekte ve  $l_{ch}$  değerleri artmaktadır.



Şekil 4.18 : Kür koşullarının karakteristik boya etkisi.

#### 4.1.7 Kür koşullarının hızlı klor iyonu geçirimsizliğine etkisi

Normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı beton kullanılarak üretilen numunelere su kürü, farklı iki sıcaklık değerinde buhar kürü ve yalıtılmış ortamda etüv kürü olmak üzere dört farklı kür rejimleri uygulanmıştır. Kür rejimleri sonrasında numuneler su ortamında deney gününe kadar bekletilmiştir. Tüm numunelere 28 günlük olarak hızlı klor iyonu geçirimsizliği deneyleri yapılmış olup sonuçları Şekil 4.19'da verilmiştir.

Normal dayanımlı betonda deney sonuçları incelendiğinde uygulanan çeşitli kür rejimlerinden sonra en yüksek geçirimsizlik değerlerinin sırasıyla etüv kürü, buhar kürü ve su kürü uygulanmış numunelerde olduğu görülmektedir. Ayrıca, normal dayanımlı betonda uygulanan kür işlemleri değerlendirildiğinde, 90°C olarak uygulanan buhar kürü ve 150°C olarak uygulanan etüv kürünün beton iç yapısında hasarlara neden olduğu ve beton geçirimsizlik özelliğini olumsuz etkilediği görülmektedir.

Yüksek dayanımlı betonda uygulanan çeşitli kür rejimlerinden sonra en yüksek geçirimsizlik değerlerinin normal dayanımlı betona benzer olarak sırasıyla etüv kürü, buhar kürü ve su kürü uygulanmış numunelerde olduğu görülmektedir. Yüksek dayanımlı betonda uygulanan kür işlemleri sonuçları değerlendirildiğinde, 90°C olarak uygulanan buhar kürü ve 150°C olarak uygulanan etüv kürünün beton iç

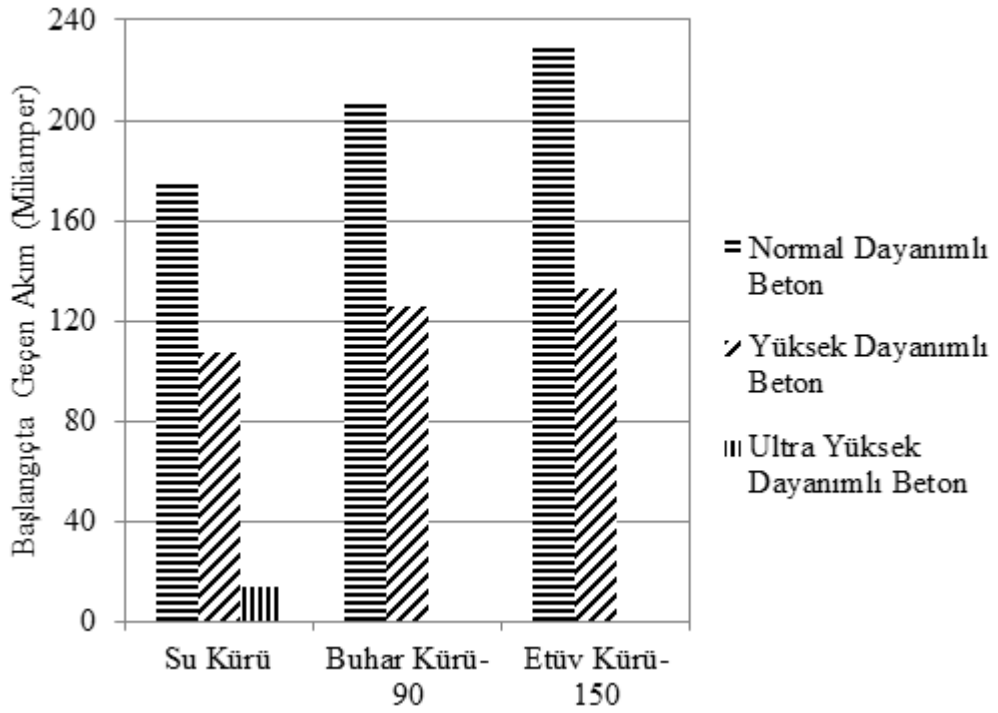
yapısında hasarlara neden olduğu ve beton geçirimsizlik özeliğini olumsuz etkilediği görülmektedir.

Ultra yüksek dayanımlı betonda 28 gün boyunca suda bekletilen numunelerin geçirimsizlik değerinin 13,5 Miliamper olduğu görülmüştür. Bu değer normal dayanımlı betonlarla kıyaslandığında çok düşük boşluk içeren bir yapıyı ifade etmektedir. Bu yapıya ulaşılmasında, su/çimento oranının çok düşük olması ve çimento taneleri arası boşlukların silis dumanı ile doldurulması ve puzolanik reaksiyonunda etkisiyle yoğun bir iç yapı etkili olmaktadır. Buhar kürü ve etüv kürü uygulanan numunelerde ise klor iyonu geçirimsizliği 1 Miliamper seviyesine kadar düşmektedir. Bu da ihmal edilebilir bir seviyede geçirimsizlik demektir. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda numunelere buhar kürü ve yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulanması ile karışımdaki silis dumanı çimentonun hidrasyonu sonrası kararsız bir bileşik olan  $\text{Ca(OH)}_2$  ile reaksiyona girerek kararlı bir yapı olan C-S-H oluşmaktadır. Böylece iç yapı daha kararlı hale gelmekte ve klor iyonu geçirimsizliği değerleri belirgin şekilde düşmektedir. Ancak, etüv kürü uygulanan numunelerde buhar kürü uygulanan numunelere göre klor iyonu geçirimsizliği değerinin kısmen daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu duruma neden olarak buhar kürüne göre daha yüksek sıcaklıkta etüv kürü uygulanması sürecinde çimentonun hidrasyon ürünlerinin homojen şekilde çimento hamuru içerisinde dağılamamasının neden olduğu düşünülmektedir [56]. Ayrıca, ultra yüksek dayanımlı betonlarda su/çimento oranının çok düşük olması ve silis dumanının da etkisi ile otojen rötre artmaktadır [128]. Bu betonlara yüksek sıcaklıklar uygulanması ile çimento hidrasyonunun hızlanmasına bağlı olarak termal ve otojen rötre etkisinde betonda mikro çatlaklar oluşmakta ve bu çatlaklar zamanla gelişerek büyümektedir [129].

Özalp ve diğ. [123] ultra yüksek dayanımlı betonlara 200°C etüv kürü uygulamasıyla iç- yapıda mikro çatlaklar oluştuğunu belirtmişlerdir [123]. Betonda çatlakların oluşması ve gelişmesi betonun geçirimsizlik özeliğini olumsuz etkilemektedir.

Normal dayanımlı betonda kür uygulanması ile hızlı klor iyonu geçirimsizliğindeki artış yüksek dayanımlı betona göre daha fazla olmaktadır. Bu durum normal dayanımlı betonların ısıl kür işlemi etkisinde daha fazla hasara uğradığını göstermektedir. Normal ve yüksek dayanımlı betonlarda elde edilen bu sonuç betonlarda dayanım azaldıkça ısıl kür işlemi sonrası iç yapıda oluşan hasarların daha fazla olduğuna işaret etmektedir. Ultra yüksek dayanımlı betonda ise ısıl kür işlemi

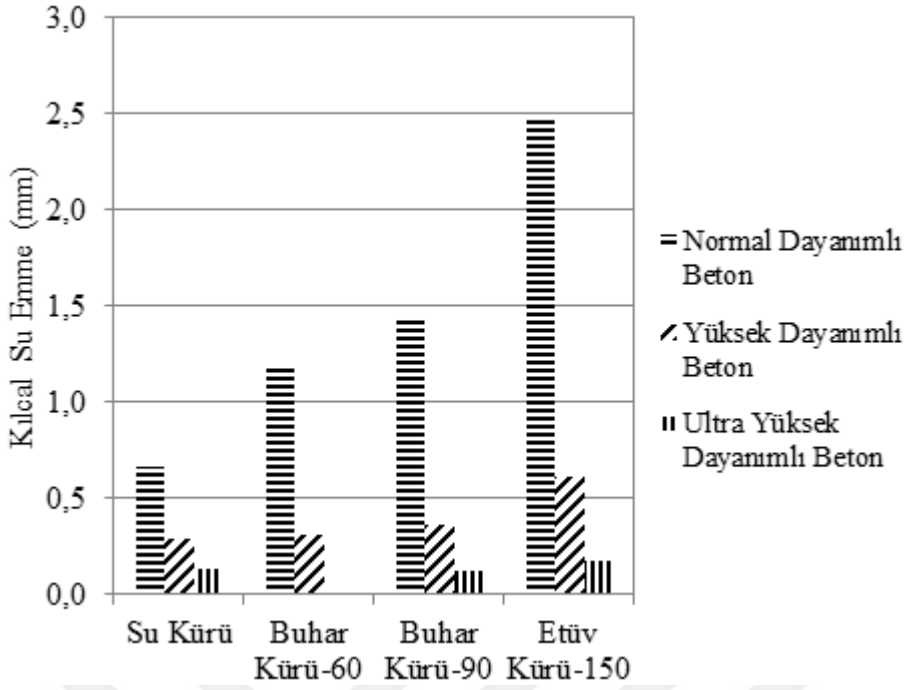
etkisinde en iyi sonuçlar buhar kürü uygulanan numunelerde gerçekleşmiştir. Yine etüv kürü uygulanmış numunelerin hızlı klor iyonu geçirimsizliği değerleri de bu betonda oldukça düşük çıkmaktadır. Ultra yüksek dayanımlı betonda en yüksek hızlı klor iyonu geçirimsizliği değerleri su kürü uygulanan numunelerde gerçekleşmiştir. Bu durum, basınç dayanımı ve yarma çekme dayanımı deney sonuçları ile de uyumludur. Normal ve yüksek dayanımlı betonda kür etkisinde iç yapıda hasarlar oluşmakta dayanım değerleri düşmekte ve hızlı klor iyonu geçirimsizlikleri artmaktadır. Ultra yüksek dayanımlı betonda ise kür etkisinde iç yapı iyileşmekte dayanım değerleri artmakta ve hızlı klor iyonu geçirimsizliği değerleri düşmektedir.



Şekil 4.19 : Kür koşullarının hızlı klor iyonu geçirimsizliğine etkisi.

#### 4.1.8 Kür koşullarının kılcal su emmeye etkisi

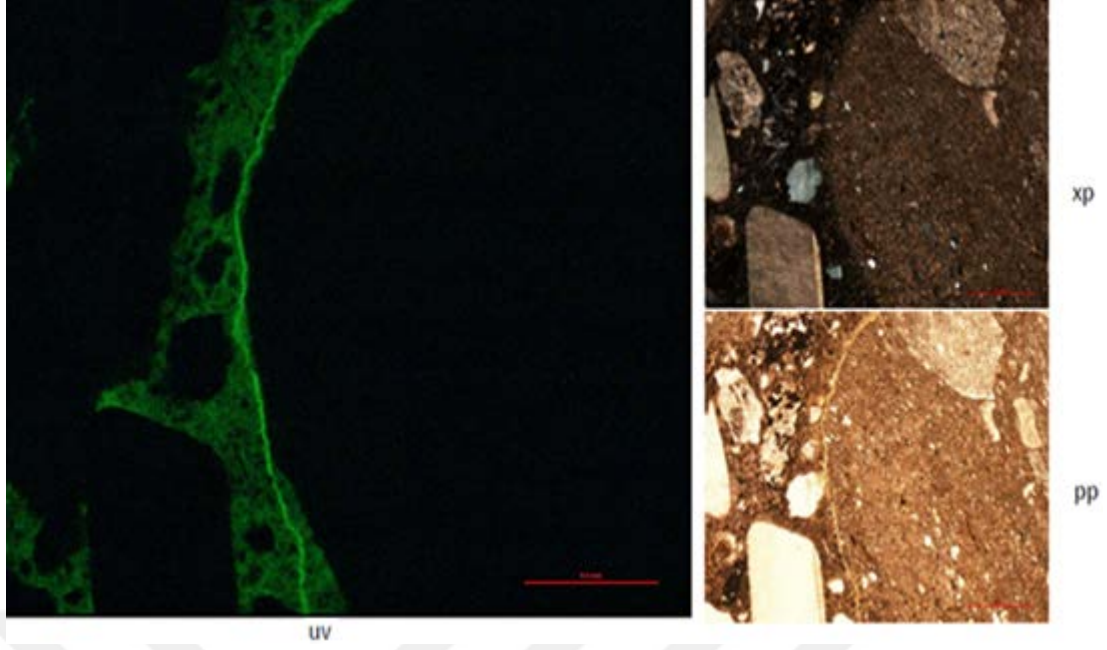
Beton numunelerde kılcal su emme deneyleri ASTM C 1585 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Numunelerin su ile temastan etkilenmemesi için yan yüzeylerine parafin malzeme sürülmüştür. Deneylerde 100 mm çapında ve 200 mm yükseklikteki silindir numunelerden kesilerek elde edilen 100x50 mm boyutlarındaki silindir numuneler kullanılmıştır. Yapılan deneylere ait sonuçlar Şekil 4.20'de verilmektedir.



Şekil 4.20 : Kür koşullarının kılcal su emmeye etkisi.

Kılcal su emme değerleri normal ve yüksek dayanımlı betonlar için etüv kürü uygulanan karışımlarda en yüksek elde edilmiş olup bu durumu sırasıyla 90°C buhar kürü, 60°C buhar kürü ve su kürü uygulanan numuneler izlemiştir. Normal ve yüksek dayanımlı betonlarda yüksek sıcaklık uygulanmasının yalnızca su kürü uygulanmış beton karışımlara göre kılcal su emme değerini önemli ölçüde artırdığı anlaşılmıştır. Bu durumun oluşmasında ısıl işlem uygulanması ile beton iç yapısında kusurlar ve çatlaklar meydana gelmesi, hidrasyon ürünlerinin tam olarak oluşmaması ve yeterince dağılamaması, kılcal boşlukların çapı ve miktarının artması etkili olmaktadır. Şekil 4.21’de verilen iç yapı incelemeleri ile bu durum görülmektedir. Isıl işlem uygulanan normal dayanımlı betonlarda belirgin şekilde çimento hamuru agrega ara yüzeyinde çatlaklar oluşmaktadır. Ayrıca, ısıl işlem uygulanan beton numunelerde çimento hidrasyonu homojen olarak gerçekleşmemektedir. Basınç dayanımı deney sonuçlarının incelendiği bölüm 4.1.1’de verilen iç yapı incelemelerinde bu durum görülmektedir.

Normal ve yüksek dayanımlı betonlarda kür sıcaklığı çimento hamurunun boşluk yapısını etkilemektedir. Yüksek sıcaklıklarda kür işlemi ile boşlukların oluşmasında belirgin bir artış olmakta, bu duruma bağlı olarak toplam porozite de artmaktadır [58].



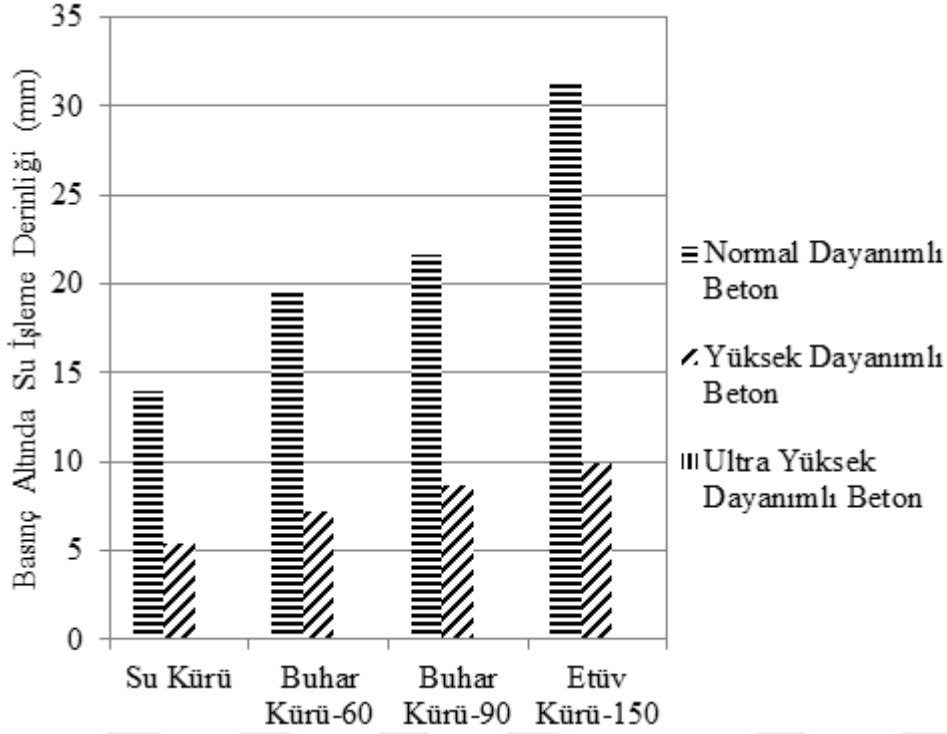
**Şekil 4.21 :** Normal dayanımlı betonda etüv kürü uygulanması ile çimento hamuru agrega ara yüzeyinde oluşan çatlaklar (pp: tek nikol, xp: çift nikol, uv: ultraviyole ışık).

Ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise buhar kürü uygulanan numunelerde kılcal su emme değeri en düşük düzeyde gerçekleşmiştir. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda etüv kürü uygulanan numunelerin kılcal su emmesi su kürü uygulanan numunelere göre daha yüksek çıkmaktadır. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda en iyi sonuçlar 0, 127 mm kılcal su emme miktarı ile 90°C’de buhar kürü uygulanan numunelerde elde edilmiştir. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda kullanılan bağlayıcı miktarının fazla olması ve su/bağlayıcı oranının çok düşük olması nedeniyle otojen rötre veya ısıl işlemler etkisinde betonda çok sayıda mikro çatlaklar oluşabilmektedir. Bu durum betonun geçirimsizlik özelliklerini önemli ölçüde olumsuz etkiler [129]. Bu çalışmada etüv kürü uygulanan numunelerin su kürü uygulanan numunelerden daha yüksek kılcal su emmeye sahip olması ısıl işlemler ve otojen rötre etkisinde betonda mikro çatlakların oluşumu ile açıklanmaktadır.

Normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonların kılcal su emme değerleri birlikte değerlendirildiğinde ise su/çimento oranının daha düşük olduğu ultra yüksek dayanımlı betonların kılcal su emme değeri daha düşük çıkmaktadır. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda iri agrega olmaması ve ultra incelikteki silis dumanın kullanılması ile kılcal su emme değerleri belirgin şekilde diğer beton sınıflarından daha düşük çıkmaktadır.

#### 4.1.9 Kür koşullarının basınç altında su işleme derinliğine etkisi

Normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlara basınç altında su işleme derinliği deneyi yapılmış olup sonuçları Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.22 : Kür koşullarının basınç altında su işleme derinliğine etkisi.

Yapılan deneyler sonunda normal ve yüksek dayanımlı betonlarda ısı kütür işlemleri uygulanması ile betonların basınç altında su işleme derinliklerinin arttığı görülmüştür. Bu artış etüv kütür uygulanan numunelerde buhar kütür uygulanan numunelere göre daha fazladır. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise hem ısı işlemler uygulanan hem de yalnızca su kütür ortamında bekletilen numunelerde basınç altında su işleme derinliği ölçülemediği. Ultra yüksek dayanımlı betonların oldukça geçirimsiz iç yapısı nedeniyle bu betonlara su girişi meydana gelmemiştir.

#### 4.2 Paspayı Türünün Betonların Geçirimsizlik Özelliklerine Etkisi

Çalışmanın bu bölümünde inşaat sektöründe yaygın olarak standart plastik paspayları ile betondan mamül paspayları kullanılmasının betonların geçirimsizlik özelliklerine etkileri karşılaştırılmıştır. Ayrıca, paspayı kullanılmayan referans beton numuneleri de üretilerek paspayının betonların geçirimsizlik özelliklerine etkileri belirlenmiştir.



#### 4.2.1 Paspayı kullanılan betonların geçirimsizlik özellikleri

Günümüzde paspayı tabakasının kalınlığı ve kalitesinin yapıların servis ömrüne olan katkısı daha fazla anlaşılmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde paspayı kalınlığı ve kalitesi dışında şimdiye kadar üzerinde fazla irdelenen yapılmadığı bir konu olan paspayı ile onu çevreleyen beton örtü tabakası arasındaki temas yüzeyinin geçirimsizlik özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla yaygın olarak kullanılan plastik paspayları ve bazı özel projelerde tercih edilen betondan mamül paspayları kullanılarak numuneler üretilmiş ve bu numunelerin geçirimsizlik özellikleri belirlenmiştir. Paspayları bilindiği üzere perde, kolon, döşeme, kazık vb. kullanıldığı yapı elemanının türüne göre farklı geometrilere olabilmektedir. Paspaylarının geometrik şekillerinin farklı olması durumunda içerisinde buldukları beton ile temas yüzeyleri de farklı olmaktadır. Hızlı klor iyonu geçirimsizliği ve kılcal su emme deney sonuçlarını etkileyebilecek bu durumun ortadan kaldırılması için aynı kesite sahip betondan paspayı ve plastik paspayları kullanılarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan beton ve plastik paspaylarına ait fotoğraf Şekil 4.23'te verilmektedir.



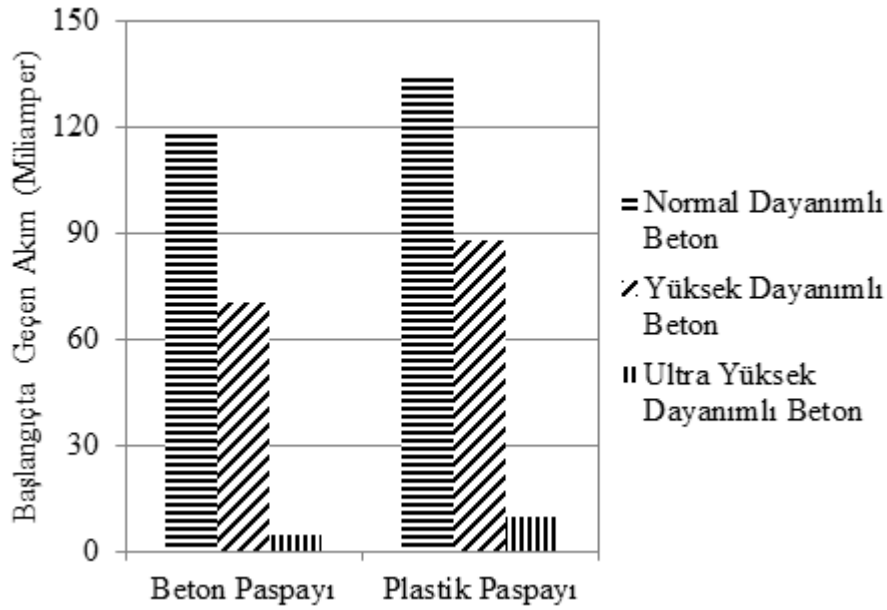
**Şekil 4.23 :** Aynı kesite sahip beton ve plastik paspayı numuneleri.

Ancak, çalışmalara başlanıldığında hızlı klor iyonu geçirimsizliği ve kılcal su emme deneyleri için açık hava koşullarında deney yaşımı bekleyen bazı plastik paspayı içeren numunelerde çatlakların oluşmaya başladığı görülmüştür. Bu çatlakların nedeni olarak kısıtlanmış rötre ile beton ve plastik malzemelerin termal genleşme katsayısının farklı olması gösterilebilir. Betonun deformasyonunun sınırlandırılması

durumunda kısıtlanmış rötre çatlakları oluştuğu bilinmektedir. Ayrıca, yapılan literatür araştırmaları beton ve plastik malzemelerin termal genleşme katsayısı arasında 10-15 kat farklılık olduğunu göstermektedir. Termal genleşme katsayısının bu oranda farklı olmasının plastik paspayı kullanılan betonlarda çatlak oluşmasında ve gelişmesinde etkili olabileceği düşünülmektedir [130].

#### 4.2.1.1 Paspayı kullanılan betonların hızlı klor iyonu geçirimsizliği

Çalışma kapsamında plastik ve betondan paspayları aynı kesit alanına sahip olacak şekilde kullanılmış, böylece aynı koşullar altında hızlı klor iyonu geçirimsizliği özellikleri tespit edilmiştir. Kısıtlanmış rötre ve termal genleşme katsayısı farklılığının beton ve plastik paspayı kullanılan numunelerde etkisini daha belirgin hale getirmek için numuneler etüv kurusu hale getirilmiştir. Hızlı klor iyonu geçirimsizliği deneylerinde plastik paspayı bulunan numunelerde kesit alanının bir bölümü elektrik iletme özeliği olmayan plastik kısım olduğu için bu numunelerde kesit alanı beton numunelere denk gelecek şekilde kesit düzeltilmesi de yapılmıştır. Deneylere ait sonuçlar Şekil 4.24'te verilmektedir.



Şekil 4.24 : Paspayı kullanılması hızlı klor iyonu geçirimsizliğine etkisi.

Beton paspayı ve plastik paspayı kullanılarak yapılan çalışmalar hızlı klor iyonu geçirimsizliği açısından değerlendirildiğinde tüm beton sınıflarında beton paspayları kullanılan numuneler, plastik paspayı kullanılan numunelere göre daha az geçirimsizliğe sahip olmaktadır.

#### 4.2.1.2 Paspayı kullanılan betonların kılcal su emmesi

Aynı kesite sahip beton ve plastik paspayı kullanılan numuneler açık havada bekletilmiş ve sonrasında numunelere etüv kurusu olarak kılcallık deneyi yapılarak sonuçları değerlendirilmiştir. İlk olarak orta kısımları boş silindirik kesite sahip beton ve plastik paspayları kullanılarak üretilen numuneler deney yaşına kadar açık havada bekletilmiştir. Hızlı klor iyonu geçirimsizliği deneyleri bölümünde belirtildiği üzere açık havada bekleyen plastik paspayı kullanılan numunelerde zamanla çatlaklar oluşmaya başladığı gözlemlenmiştir. Kılcal su emme deneyi için numunelerin 50°C sıcaklıkta etüvde değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulması ile plastik paspayı kullanılan numunelerde çatlaklar gelişerek daha da belirgin hale gelmiştir. Plastik paspayı kullanılan numunelerde etüvde kurutma işlemi sonrası oluşan çatlaklar Şekil 4.25’de verilmektedir. Beton paspayı kullanılan numunelerde ise gözle farkedilebilecek çatlaklar tespit edilmemiştir (Şekil 4.26).



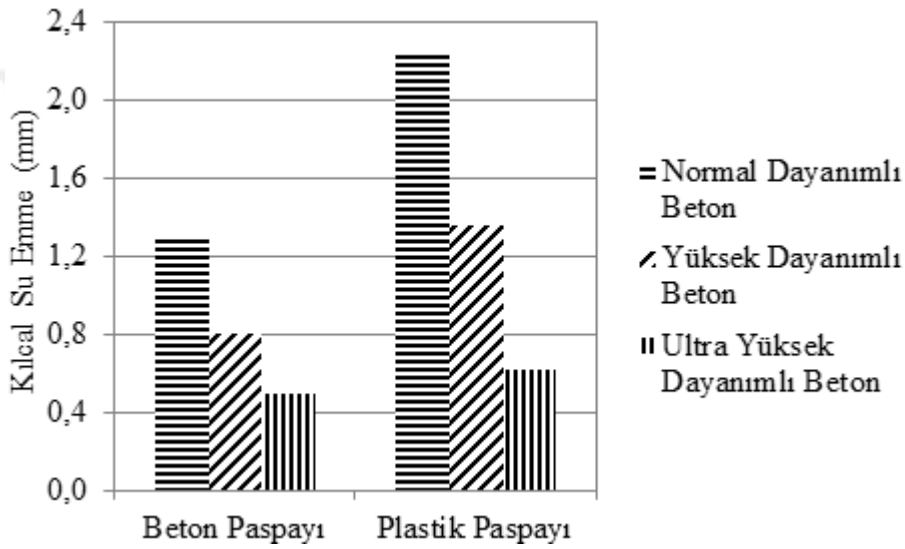
Şekil 4.25 : Plastik paspayı kullanılan normal (solda) ve ultra yüksek dayanımlı betonda (sağda) etüv kurusu numuneler.



Şekil 4.26 : Betondan paspayı kullanılan normal (solda) ve ultra yüksek dayanımlı betonda (sağda) etüv kurusu numuneler.

Beton paspaylarına ve plastik paspayları malzemelerine su emme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney sonucu olarak plastik paspaylarının hiç su emmediği, kılcal su emme değerlerinin ihmal edilebilecek seviyede olduğu görülmüştür. Ancak beton paspayları için su emme değeri % (6-8) arasında değişmektedir. Bu durum yüzeyden kılcal yolla su emmenin tayin edildiği bu deneylerde hızlı klor iyonu geçirimsizliği deneylerine benzer şekilde kesit düzeltmesi yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Etüv kurusu numunelere yapılan kesit düzeltmesi sonrasında kılcallık deney sonuçları Şekil 4.27’de verilmiştir.

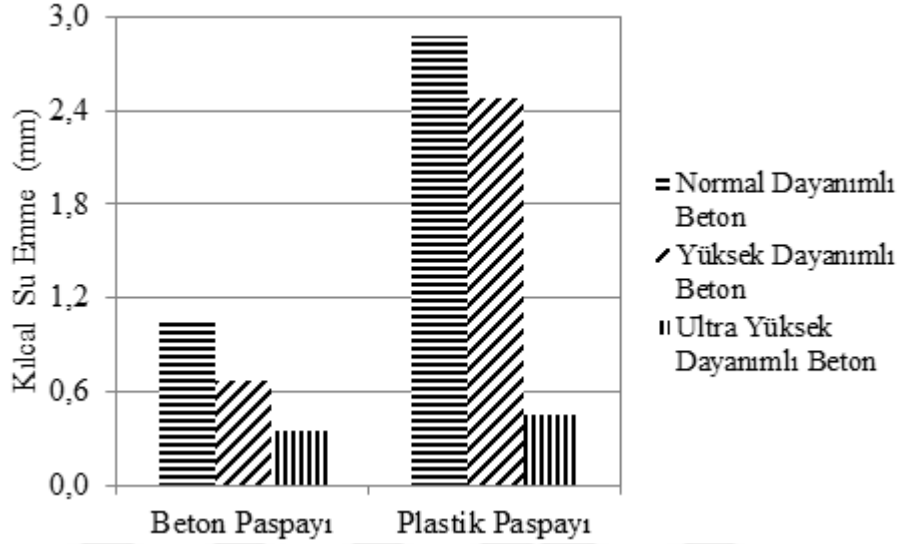


**Şekil 4.27 :** Paspayları kullanılmasının 28 günlük numunelerde kılcal su emmeye etkisi.

Kılcallık deney sonuçları incelendiğinde tüm beton sınıflarında beton paspayı kullanılan numunelerin kılcal su emme değerinin plastik paspayı kullanılan numunelerden belirgin şekilde düşük olduğu görülmektedir.

Bu bölümde yapılan çalışmalarda plastik paspayı kullanılan tüm numunelerde kısıtlanmış rötre ve/veya zamanla beton ve plastik malzemelerin termal genişleme katsayılarının farkından kaynaklanan çatlakların oluştuğu görülmektedir. Oluşan bu çatlaklar plastik paspayı kullanılan beton numunelerin hem kılcal su emme değerini hem de hızlı klor iyonu geçirimsizliğini arttırmaktadır. Çalışmada ayrıca çatlakların zaman içerisindeki gelişimi ve betonun geçirimsizlik özelliklerine etkisini incelemek amaçlı beton paspayı ve plastik paspayı kullanılan numunelerde 140 günlük kılcal su emme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kılcal su emme deneylerinde daha önce 28

günlük kılcal su emme deneyine tabi tutulan aynı numuneler kullanılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde beton paspayı kullanılan numunelerin geçirimsizlik özellikleri hidrasyonun gelişmesine bağlı olarak zamanla azalırken plastik paspayı kullanılan numunelerde zamanla çatlakların daha da genişlemesine bağlı olarak kılcal su emme değerleri artmaktadır. Kılcal su emme deney sonuçları Şekil 4.28’ de verilmiştir.



Şekil 4.28 : Paspayları kullanılmasının 140 günlük numunelerde kılcal su emmeye etkisi.

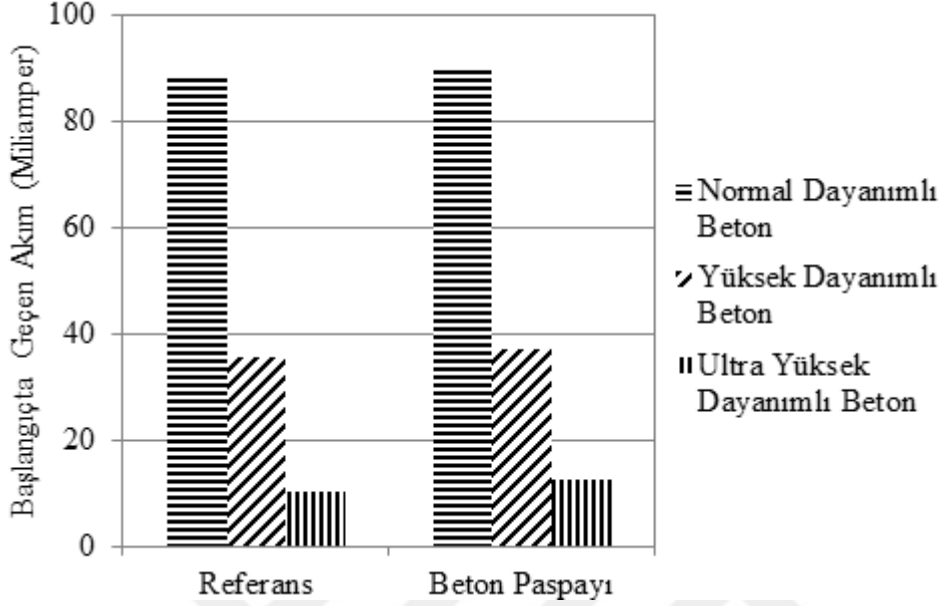
#### 4.2.3 Paspayı kullanılan ve kullanılmayan betonların geçirimsizlik özellikleri

Yine tez çalışmaları kapsamında beton paspayı kullanılan ve paspayı bulunmayan referans beton numuneleri üretilmiş ve paspayı kullanımının betonun geçirimsizlik özelliklerine etkileri belirlenmiştir. Ayrıca, yapılan çalışmaların sonuçları beton ve plastik paspayı kullanılarak yapılan önceki çalışmalarla karşılaştırılarak sonuçları değerlendirilmiştir.

##### 4.2.3.1 Paspayı kullanılan ve kullanılmayan betonların hızlı klor iyonu geçirimsizliği

Paspayı kullanılmayan referans beton numuneler ve beton paspayı kullanılan numunelere hızlı klor iyonu geçirimsizliği testleri yapılmış olup deney sonuçları Şekil 4.29’da verilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde beton paspayı kullanılmasının referans beton numunelere göre tüm beton sınıflarında klor iyonu geçirimsizliğinde bir miktar artışa neden olduğu ancak bu artışın anlamlı sayılabilecek seviyede yüksek olmadığı görülmüştür. Bu artışın nedeni daha ince malzemeler kullanılarak üretilen

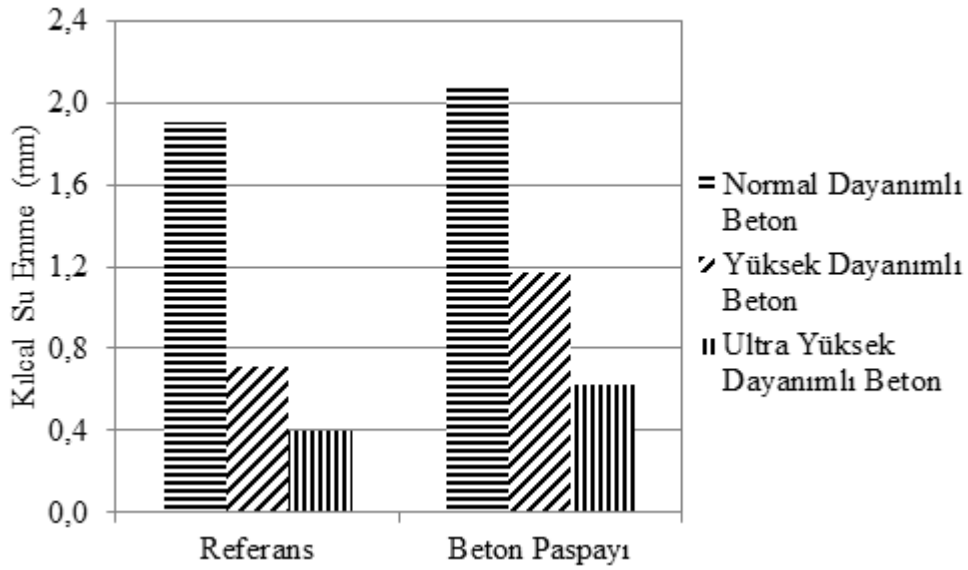
paspaylarının kendi dayanım sınıfındaki betonlardan daha fazla geçirimsizliğe sahip olması olabilir. Ayrıca beton paspayları ile onları çevreleyen beton arasındaki temas yüzeyi boşluklarından kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.



**Şekil 4.29 :** Paspayı kullanılmayan referans numuneler ve beton paspayı kullanılan numunelerin hızlı klor iyonu geçirimsizliği.

#### 4.2.3.2 Paspayı kullanılan ve kullanılmayan betonların kılcal su emmesi

Beton paspayı kullanılan numuneler ve kullanılmayan referans beton numunelere yapılan kılcal su emme deneylerine ait sonuçlar Şekil 4.30’da verilmiştir.



**Şekil 4.30 :** Paspayı kullanılmayan referans numuneler ve beton paspayı kullanılan numunelerin kılcal su emmesi.

Sonuçlar incelendiğinde beton paspayı kullanılan numunelerin kılcal su emme değerleri her beton sınıfı için paspayı kullanılmayan referans numunelerden fazla çıkmaktadır. Kılcal su emme değerindeki bu artış paspayı numunelerinin kendi sınıflarındaki betonlardan daha fazla kılcal yolla su emmesi veya beton paspayları ile beton arasındaki temas yüzeyi çatlakları ile boşluklarından kılcal yolla emilen sudan kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

### **4.3 Tecrit Malzemesinin Betonların Geçirimsizlik Özelliklerine Etkisi**

Tez çalışmasının bu bölümünde buhar kürü uygulanması ile bazı beton numunelerde kür çatlakları oluşturulmuştur. Ayrıca, bir kısım numunede ise açık hava ve rüzgar etkisinde beton sertleşme sürecinde iken plastik rötre çatlakları oluşturulmuştur. Betonlarda erken yaşta oluşan genişliği 0,2 mm'nin altındaki çatlaklarla ağ şekilli mikro çatlakların su itici monomerik alkilalkoksilan esaslı bir malzemeye tecriti yapılmıştır. Bu tecrit uygulamalarından önce ve sonra betonlarda kılcal su emme ve hızlı klor iyonu geçirimsizliği deneyleri yapılarak geçirimsizlik özellikleri karşılaştırılmıştır. Daha sonra, çatlakları tecrit edilen numuneler UV ile yaşlandırma deneylerine ve donma çözülme çevrimlerine tabi tutulmuştur. Yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerinden sonra numunelerin geçirimsizlik özellikleri yeniden belirlenmiş ve çevrimler öncesi durumla karşılaştırmalar yapılmıştır.

#### **4.3.1 Kür çatlakları ve tecrit malzemesinin betonların geçirimsizliğine etkisi**

Normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlara üretim sonrası buhar kürü uygulaması yapılmış ve sonrasında ani soğuma etkisinde numunelerde çatlaklar oluşturulmuştur. Bu numunelerden karot makinesi kullanılarak çatlakların bulunduğu bölümlerden silindir numuneler elde edilerek (Şekil 4.31 ve Şekil 4.32) bu silindir numunelere kılcallık deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca, çatlak bulunan numunelere su itici monomerik alkilalkoksilan bazlı tecrit malzemeleri uygulanarak kılcal su emme deneyleri ve hızlı klor iyonu geçirimsizliği deneyleri yapılarak tecrit malzemesinin etkinliği belirlenmiştir.

Yine çalışma kapsamında tecrit işlemi gerçekleştirilen numunelere UV yaşlandırma ve donma çözülme deney cihazları kullanılarak yaşlandırma deneyleri ve donma çözülme çevrimleri yapılmış ve tekrarlı olarak gerçekleştirilen bu çevrimler



sonrasında tecrit malzemesinin etkinliğini sürdürme yeteneği kılcal su emme deneyleri ile belirlenmiştir.



şekil 4.31 : Kür çatlağı bulunan numunelerden karot numune alınması.

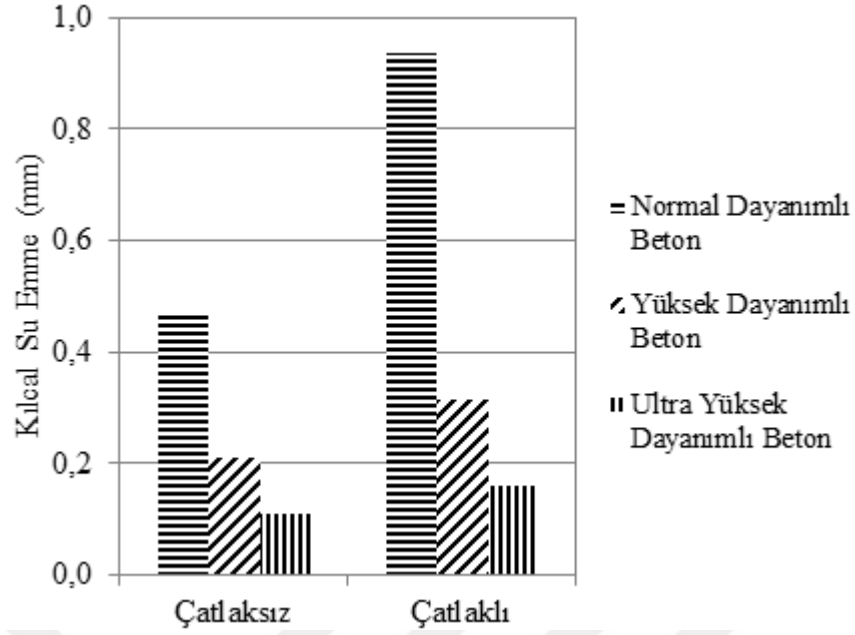


şekil 4.32 : Kür çatlağı bulunan beton silindir numune örnekleri.

#### 4.3.1.1 Çatlakların kılcal su emmeye etkisi

Çalışmalarda çatlak bulunan numuneler ve çatlak bulunmayan referans numunelerde kılcallık deneyleri yapılmış ve sonuçlar şekil 4.33'te verilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde tüm beton sınıflarında çatlakların oluşturulması ile betonların kılcal su emme değerlerinde belirgin artışlar görölmektedir. Çatlaklar ile kılcal su emme değerlerinde en belirgin artış normal dayanımlı betonlarda olmaktadır. Bu artış agrega tane boyutu sınırlandırılan ve silis dumanı gibi ultra incelikteki malzemeler kullanılan ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise en az seviyede gerçekleşmiştir. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda kür etkisinde çatlaklar oluşturulsa dahi geçirimsiz iç yapı nedeniyle kılcal yolla emilen su miktarındaki artış normal ve yüksek dayanımlı betonlara göre daha az olmaktadır. Deneyler 14 günlük numunelerde gerçekleştirilmiştir.

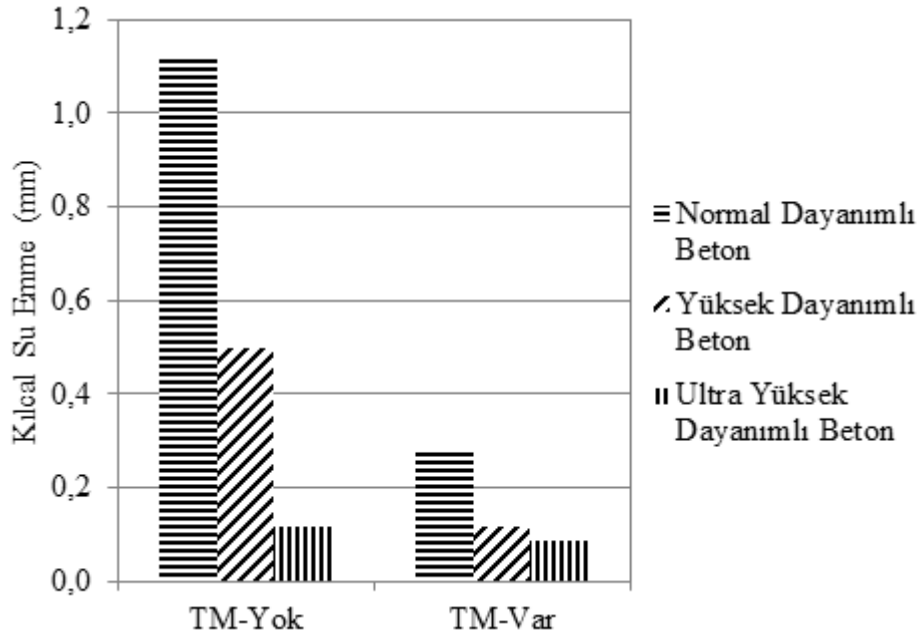




Şekil 4.33 : Çatlaklarının kılcal su emmeye etkisi.

#### 4.3.1.2 Tecrit malzemesinin kılcal su emmeye etkisi

Numuneler 56 günlük olduğunda kılcal su emme deneyleri çatlakların bulunduğu numunelerde tekrar edilmiş ve sonrasında aynı numunelere alkilalkoksilan esaslı tecrit malzemesi  $250 \text{ ml/m}^2$  olacak şekilde tek kat olarak uygulanmıştır. Tecrit malzemesi uygulanmasının etkisi Şekil 4.34’te verilmiştir.



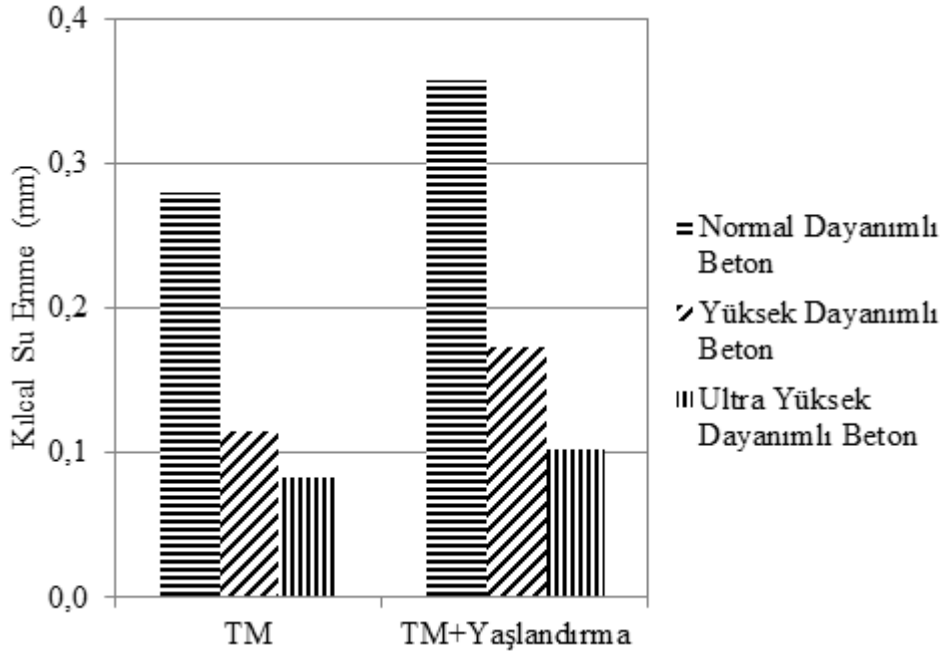
Şekil 4.34 : Tecrit malzemesi (TM) uygulanmasının kılcal su emmeye etkisi.

Çatlak bulunan yüzeylere tecrit malzemesi sürülmesi ile tüm beton sınıflarında kılcal su emme değerlerinde azalma görülmüştür. Su itici malzeme kullanılması ile özellikle normal dayanımlı betonların kılcal su emme değerleri önemli ölçüde azalmaktadır. Betonlarda dayanım değeri yükseldikçe daha kararlı ve boşluksuz bir iç yapı oluşmaktadır. Bu nedenle iç yapının daha iyi olduğu betonlarda tecrit malzemesinin etkisi normal dayanımlı betonlara göre daha azdır.

#### 4.3.1.3 Yaşlandırmanın kılcal su emmeye etkisi

##### 4.3.1.3.1 Yaşlandırmanın tecrit malzemesi uygulanmış çatlaklı numunelerde kılcal su emmeye etkisi

Su itici tecrit malzemelerin kullanılması ile tüm beton sınıflarında kılcal su emme değerleri belirgin şekilde azalmaktadır. Bu çalışmada kullanılan tecrit malzemesinin zamanla etkinliğini devam ettirebilme özelliğinin belirlenmesi hedeflenmektedir. Bu amaçla tecrit işlemi uygulanan çatlak bulunan numunelere 14 gün boyunca yaşlandırma deneyleri yapılarak yaşlandırma sonrasında geçirimsizlik deneyleri tekrar edilmiştir. Böylece yapılan tecrit işleminin etkinliği belirlenmiştir. Şekil 4.35’de çatlak bulunan numunelerin tecrit işlemi uygulanması sonrası yaşlandırma deneyleri yapılmasından sonra bir kez daha belirlenen kılcal su emme deney sonuçları verilmiştir.

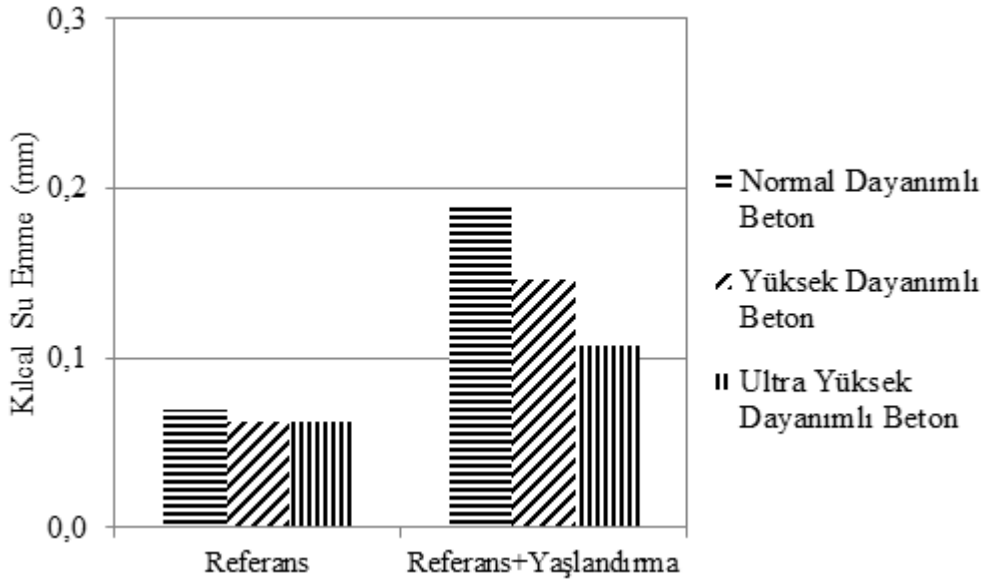


**Şekil 4.35 :** Yaşlandırmanın tecrit malzemesi (TM) uygulanmış kür çatlaklı numunelerdeki kılcal su emmeye etkisi.

Yaşlandırma deneyleri her gün 4 saat 60°C sıcaklıkta UV lambaları ile ısıtma, 2 saat spreyleme yöntemi ile ıslanma ve 3 saat -20°C sıcaklıkta donma çözülme kabininde bekletilme şeklinde uygulanmıştır. Bu çevrim sonrası ertesi güne kadar numuneler oda sıcaklığında bekletilmiştir. Bu çevrime 14 gün boyunca devam edilmiştir.

#### 4.3.1.3.2 Yaşlandırmanın tecrit malzemesi uygulanmamış çatlaksız referans numunelerdeki kılcal su emmeye etkisi

Çatlak bulunan ve tecrit malzemesi uygulanan numunelere benzer şekilde, çatlak bulunmayan ve tecrit malzemesi uygulanmamış referans betonlarında kılcal su emmeleri başlangıç durumunda ve aynı yaşlandırma çevrimleri sonrasında yeniden belirlenmiştir. Sonuçlar Şekil 4.36'da verilmiştir.



Şekil 4.36: Yaşlandırmanın tecrit malzemesi uygulanmamış ve çatlak bulunmayan referans numunelerdeki kılcal su emmeye etkisi.

Yaşlandırma işlemi sonrası deney sonuçları incelendiğinde hem çatlak bulunan tecrit malzemesi uygulanmış numunelerde hem de referans betonların kılcal su emme değerlerinde yaşlandırma etkisinde artışlar meydana gelmiştir. Ancak burada tecrit malzemesi bulunan numunelerin kılcal su emme miktarındaki artış tecrit malzemesi bulunmayan referans beton numunelerden az olmuştur. Bu deneylerden sonuçla yaşlandırma işleminin hiç çatlak bulunmayan referans betonların dahi kılcal su emme değerini arttırdığı anlaşılmaktadır. Tecrit malzemesi uygulanan çatlak bulunan numunelerinde yaşlandırma etkisinde kılcal su emme değerleri artmıştır. Ancak, yaşlandırma etkisinde kılcal su emme miktarında artış tecrit işlemi uygulanan

betonlarda daha az olmuştur. Bu durumda tecrit uygulanan betonların yaşlandırma etkisinde kılcal su emme değerlerinde artış olduğu ancak uygulanan tecrit malzemesinin etkinliğini belirli ölçüde devam ettirdiği anlaşılmaktadır.

#### **4.3.2 Plastik rötre çatlakları ve tecrit malzemesinin betonların geçirimsizlik özelliklerine etkisi**

Normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı beton taze halde açık hava ve rüzgar etkisinde bırakılarak yüzeylerinde çatlaklar oluşturulmuştur. Beton yeterince dayanım kazandıktan sonra karot makinesi kullanılarak çatlaklı kısımlardan silindir numuneleri çıkarılmıştır. 28 günü tamamlayana kadar laboratuvar ortamında bekletilen çatlaklı numunelerin bir kısmına su itici tecrit malzemesi (TM) uygulanmış olup, TM uygulanması öncesi ve sonrasında kılcallık deneyleri yapılarak tecrit işleminin etkinliği değerlendirilmiştir. Ayrıca, tecrit malzemesi uygulanan numunelere yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri yapılması veya sürekli laboratuvar ortamında bekletme koşullarının beton numunelerin kılcal su emmesine etkileri de incelenmiştir. Belirli bir grup numune de ise TM uygulanmaksızın yaşlandırma işlemi gerçekleştirilmiş ve sonuçları TM uygulanan numuneler ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Burada belirtilen uygulamaların daha kolay ve anlaşılır olması için çalışmalar üç grup olarak planlanmış ve gerçekleştirilmiştir.

Birinci grup numunelere TM uygulanması öncesinde ve TM uygulaması sonrasında kılcallık deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu numunelere detayları bölüm 3.9.2.2’de verilen 28 çevrim, 56 çevrim, 28 çevrim ve 84 çevrim olmak üzere toplam 196 çevrim yaşlandırma ve donma çözülme işlemi gerçekleştirilmiştir. Her yaşlandırma ve donma çözülme çevrimi sonrasında kılcal su emme deneyi tekrar edilerek UV yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri uygulanmasının tecrit malzemesi uygulanmış beton numunelerin geçirimsizlik özelliklerine etkileri belirlenmiştir.

İkinci grup numunelerde ise birinci gruptaki numune çalışmalarına benzer biçimde TM uygulama öncesi ve sonrası kılcal su emme deneyleri yapılmıştır. Ancak, bu kez birinci grup numunelerden farklı olarak ikinci grup numuneler 28 gün, 56 gün, 28 gün ve 84 gün olmak üzere 20°C laboratuvar koşullarında bekletilmiş ve kılcal su emme deneyleri her bekletme sonrası yeniden gerçekleştirilmiştir. Böylece, TM

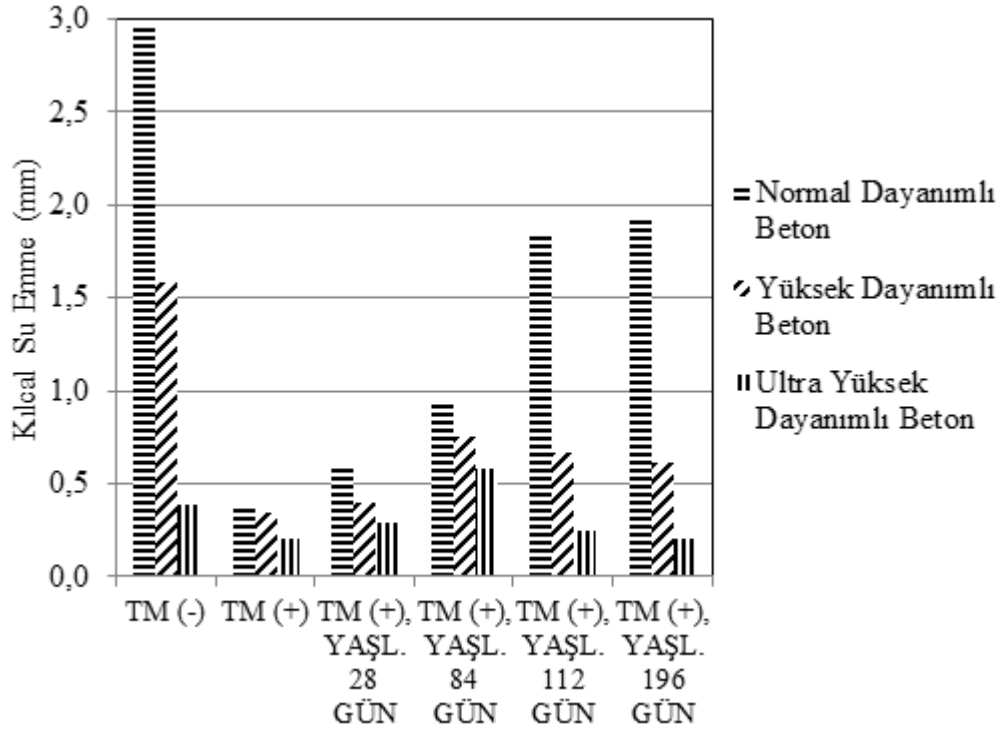
uygulanmış betonlarda yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri yapılmasının veya laboratuvarında bekletme koşullarının betonların kılcal su emme değerine etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Son olarak üçüncü grup numunelere ise TM hiç uygulanmamış olup bu numunelere birinci gruptaki gibi 28 çevrim, 56 çevrim, 28 çevrim ve 84 çevrim olmak üzere toplam 196 çevrim UV yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri yapılmıştır. Her yaşlandırma ve donma çözülme çevrimi sonrasında kılcal su emme deneyi tekrar edilerek UV yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri uygulanmasının tecrit malzemesi uygulanmamış beton numunelerin geçirimsizlik özelliklerine etkileri belirlenmiştir. Ayrıca, çalışma kapsamında yapılan tüm deneylerin sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Yine çalışma kapsamında bazı numunelerin 28 çevrim ve sonrasında 56 çevrim olmak üzere toplam 84 çevrim yapılan yaşlandırma ve donma çözülme işlemleri sonrasında iç yapı incelemeleri de gerçekleştirilmiş olup deney sonuçları iç yapı incelemeleri ile desteklenmiştir.

#### **4.3.2.1 Yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerinin yüzeylerine tecrit malzemesi uygulanan beton numunelerde kılcal su emmeye etkisi**

Birinci grup çalışmalarda yüzeylerinde çatlak bulunan beton numunelerin tecrit malzemesi uygulanmamış başlangıç durumda ve TM malzeme uygulanması sonrasında kılcal su emme değerleri belirlenmiştir. Yine TM uygulanan numunelere 28, 56, 28 ve 84 çevrim olmak üzere toplam 196 çevrim yaşlandırma ve donma çözülme işlemi yapılmıştır. Her çevrim sonrası betonların kılcal su emme değeri yeniden belirlenmiştir. Sonuçlar Şekil 4.37'de verilmektedir.

Sonuçlar incelendiğinde çatlaklı numunelerin kılcal su emme değerlerinin TM uygulanması ile belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. Çatlak bulunan yüzeylere tecrit malzemesi sürülmesi ile tüm beton sınıflarında kılcal su emme değerlerinde azalma görülmüştür. Su itici malzeme kullanılması ile birlikte normal dayanımlı betonların kılcal su emme değerleri önemli ölçüde azalmaktadır. Betonlarda dayanım değeri yükseldikçe daha kararlı ve boşluksuz bir iç yapı oluşmaktadır. Bu nedenle iç yapının daha iyi olduğu betonlarda tecrit malzemesinin etkisi normal dayanımlı betonlara göre daha azdır.

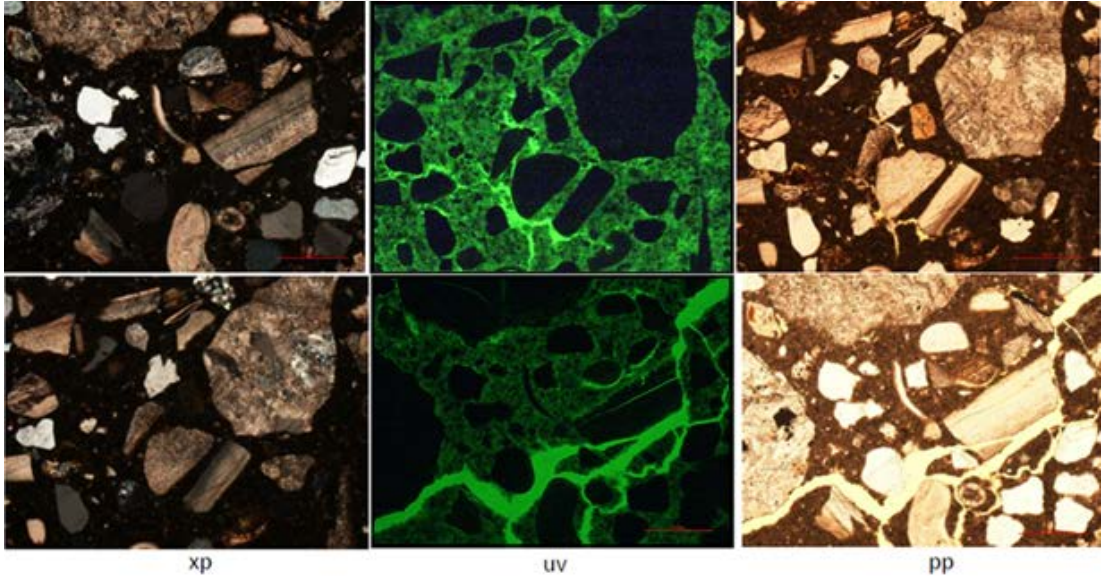


**Şekil 4.37 :** Tecrit malzemesi (TM) uygulanması ve yaşlandırmanın kılcallık deney sonuçlarına etkisi.

Yaşlandırma deney sonuçları incelendiğinde her yaşlandırma çevrimi sonrası normal dayanımlı betonların kılcal su emme miktarı daha da artmaktadır. Yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlar iç yapısının daha geçirimsiz ve kararlı olması nedeniyle yaşlandırma etkilerinden normal dayanımlı betonlara göre daha az etkilenmektedir. Burada deney sonuçlarında ilginç bir sonuç; yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda en yüksek kılcal su emme değerleri 56 çevrim magnezyum klorür ( $MgCl_2$ ) çözeltisi ile yapılan donma çözülme çevrimleri sonrasında elde edilmiştir. Bu sonuçların elde edilmesinde magnezyum klorür çözeltisinin betona kimyasal olarak zarar vermesinin etkili olduğu düşünülmektedir [79-81]. Magnezyum klorür ( $MgCl_2$ ) betonda dayanım ve dayanıklılığı sağlayan kalsiyum silikat hidratları (C-S-H) çok daha zayıf olan magnezyum silikat hidratlara (M-S-H) dönüştürmektedir. Ayrıca, çimento hidratasyonunun ikincil ürünü kalsiyum hidroksitler ( $Ca(OH)_2$ ) ile reaksiyona girerek birusit  $Mg(OH)_2$  oluşumuna neden olmaktadır. Yeni oluşan bu ürünler betonun dayanım ve dayanıklılığını olumsuz etkilemekte ve betonda bozulma süreçlerini hızlandırmaktadır. Sonuç olarak, TM uygulanması ile tüm beton sınıflarında kılcal su emme değerleri düşmekte en belirgin etkiler ise geçirimsizliği daha fazla olan normal dayanımlı betonda gerçekleşmektedir. Yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri tüm sınıflardaki beton numunelere zarar vermekte, ancak yüksek

ve ultra yüksek dayanımlı beton numunelerde verdiği zarar normal dayanımlı betona göre daha düşük düzeyde kalmaktadır. Normal dayanımlı betonlara uygulanan tüm yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası kılcal su emme değeri artmaktadır. Yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda kılcal su emme en fazla magnezyum klorür ( $MgCl_2$ ) çözeltisi ile yapılan donma çözülme çevrimleri sonrası gerçekleşmektedir. Magnezyum klorür çözeltilerinin bu zarar verici etkisi betonda suyun donma ve çözülmesinden kaynaklanan fiziksel zarar yerine kimyasal olarak çimento hidrasyonu sonucu oluşan ürünleri daha zayıf ve kararsız bileşiklere dönüştürmesi sonucunda oluşmaktadır.

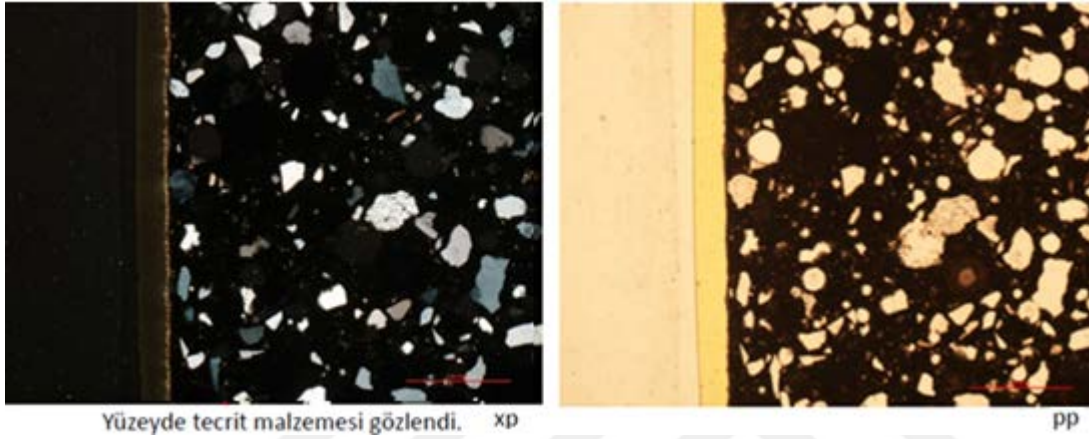
Çalışmada bazı numunelerde iç yapı incelemeleri de gerçekleştirilmiştir. Aşağıda tecrit malzemesi uygulanan normal dayanımlı beton numunelerin 28 çevrim UV ve donma çözülme çevrimi ile 56 çevrim ( $MgCl_2$ ) çözeltisi ile donma çözülme işlemine tabi tutulması sonrası iç yapı görüntüleri verilmiştir. Normal dayanımlı betonda çok sayıda mikro çatlak iç yapı incelemelerinde Şekil 4.38’de gözükmektedir.



**Şekil 4.38 :** Tecrit malzemesi (TM) uygulaması yapılan normal dayanımlı betonda yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası iç yapı (pp: tek nikol, xp: çift nikol, uv: ultraviyole ışık).

Normal dayanımlı beton dışında ultra yüksek dayanımlı betona ait iç yapı incemelesine ait fotoğraf Şekil 4.39’da verilmektedir. Ultra yüksek dayanımlı betonun iç yapı görüntüleri incelendiğinde uygulanan tecrit malzemesi belirgin şekilde yüzeyde gözükmektedir. Yaşlandırma işlemleri sonrasında normal dayanımlı betonda tecrit malzemesi yüzeyde yaşlandırma ve donma çözülme etkilerine bağlı

olarak kaybolmaktadır. Ultra yüksek dayanımlı betonda yapılan yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası ise tecrit malzemesi belirgin şekilde iç yapı incelemelerinde görülmektedir. Yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası yapılan kılcal su emme deney sonuçları incelendiğinde de normal dayanımlı betonlarda yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası kılcal su emme değerleri tecrit malzemesinin ilk uygulama yapılan durumuna göre belirgin şekilde artmaktadır.

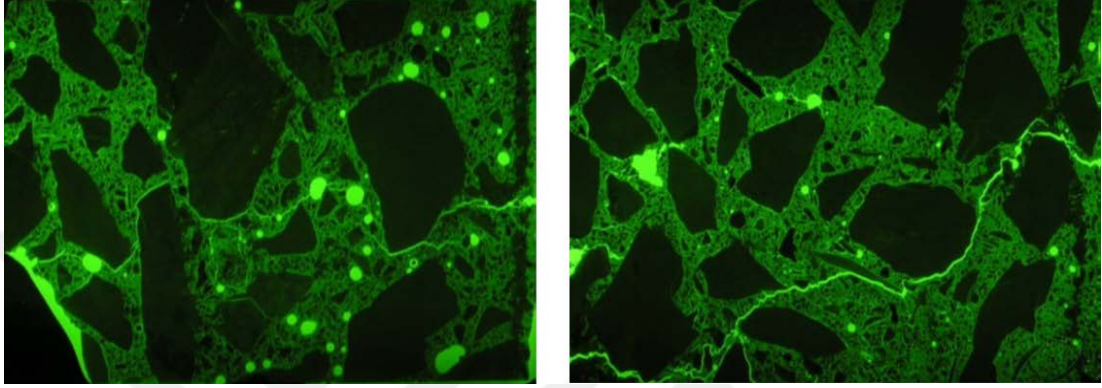


**Şekil 4.39 :** Tecrit malzemesi (TM) uygulaması yapılan ultra yüksek dayanımlı betonda yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası iç yapı (pp: tek nikol, xp: çift nikol).

Normal dayanımlı betonlar tecrit malzemesi uygulandıktan sonra yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerine tabi tutulduklarında sürekli olarak kılcallık değerleri artmakta ve bu çevrimlerden olumsuz etkilenmektedir. Ancak, yapılan iç yapı incelemelerinde; tecrit malzemesi uygulanmadan laboratuvar koşullarında bekletilen numuneler ile toplamda 84 yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılan numunelerin iç yapı fotoğrafları birbirine oldukça benzemektedir (Şekil 4.40). Bu iç yapı incelemelerinden 28 çevrim ve 56 çevrim olarak toplam 84 çevrim yaşlandırma ve donma çözülmenin normal dayanımlı betonun iç yapısına önemli ölçüde zarar vermediği anlaşılmaktadır. Bu durum 84 çevrim olarak yapılan yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası kılcal su emme değerleri ile örtüşmektedir. Ancak, donma çözülme çevrimlerine devam edilerek toplam 196 çevrim yaşlandırma ve donma çözülme çevrimi sonrası kılcallık değeri normal dayanımlı betonlarda tecrit malzemesinin ilk uygulama yapıldığı başlangıç durumuna göre belirgin şekilde artmaktadır. Yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerinin etkileri beton sınıfları için değerlendirildiğinde tecrit malzemesi uygulanan ultra



yüksek dayanımlı betonların bu çevrimlerden etkilenmediği anlaşılmaktadır. Normal dayanımlı betonların ise başlangıç 84 çevrim yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerinde kılcal su emme değeri bir miktar artmakla birlikte, betonların iç yapısının başlangıç çevrimlerinden etkilenmediği anlaşılmaktadır. Ancak, yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerine devam edilerek toplam 196 çevrim sonrasında normal dayanımlı betonda kılcallık değeri önemli ölçüde artmaktadır.

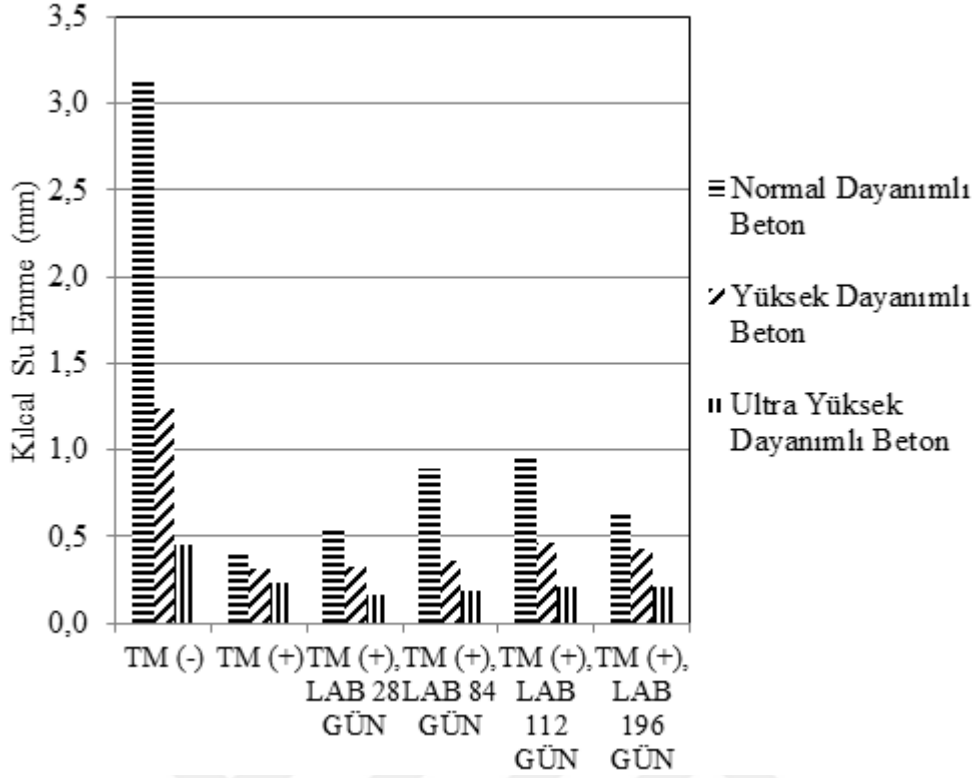


**Şekil 4.40 :** Tecrit malzemesi uygulanmadan laboratuvarda bekletilen (solda) ve tecrit malzemesi uygulanarak yaşlandırma yapılan (sağda) normal dayanımlı betonun iç yapısı (uv: ultraviyole ışık).

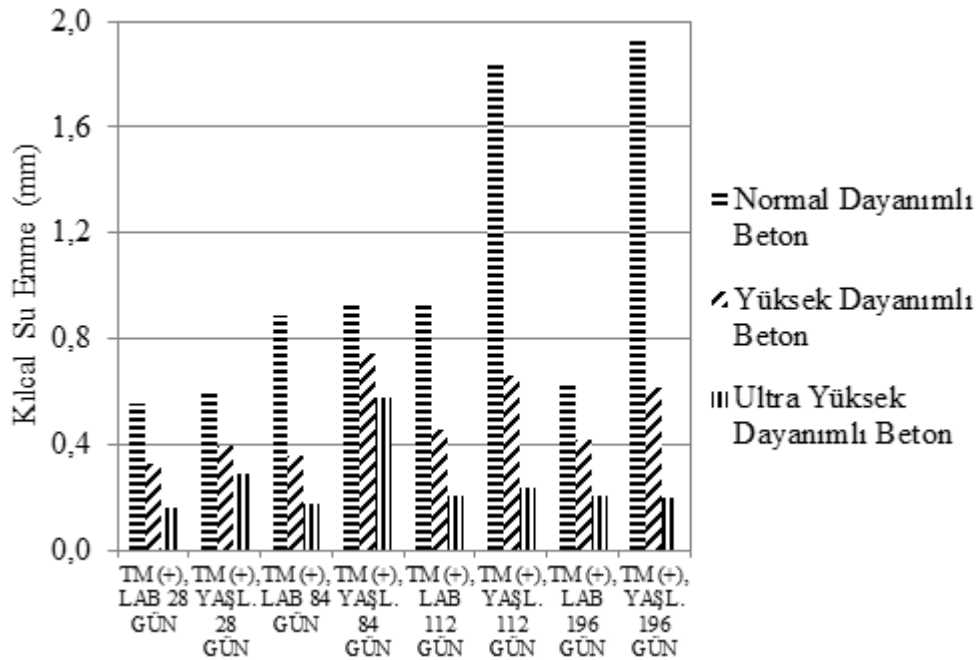
#### **4.3.2.2 Betonların yüzeylerine tecrit malzemesi uygulamasının ve laboratuvar koşullarında bekletmenin kılcal su emmeye etkisi**

Bu ikinci grup çalışmalarda, birinci grup çalışmalarına benzer biçimde çatlak bulunan numunelerin başlangıç durumunda ve TM malzeme uygulanması sonrasında kılcal su emme değerleri belirlenmiştir. Yine TM uygulanan numunelere 28, 56, 28 ve 84 gün olmak üzere toplam 196 gün laboratuvarda bekletme işlemi yapılmıştır. Her bekletme çevrimi sonrası betonların kılcal su emme miktarı yeniden belirlenmiştir. Tüm sonuçlar Şekil 4.41’de sunulmaktadır. Çatlak bulunan ve TM uygulaması yapılan numunelere yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri uygulanması ile laboratuvar ortamında bekletme koşullarının karşılaştırmalı deney sonuçları ise Şekil 4.42’de sunulmaktadır.

Deney sonuçları incelendiğinde çatlak bulunan numunelerde TM uygulanması ile kılcal su emme değerleri belirgin şekilde düşmektedir. Bu durum önceki bölüm çalışma sonuçları ile uyumludur.



Şekil 4.41 : Tecrit malzemesi (TM) uygulanması ve laboratuvarında bekletmenin kılcal su emmeye etkisi.



Şekil 4.42 : Tecrit malzemesi (TM) uygulanan betonlarda yaşlandırma/laboratuvarında bekletme koşullarının kılcal su emmeye etkisi.

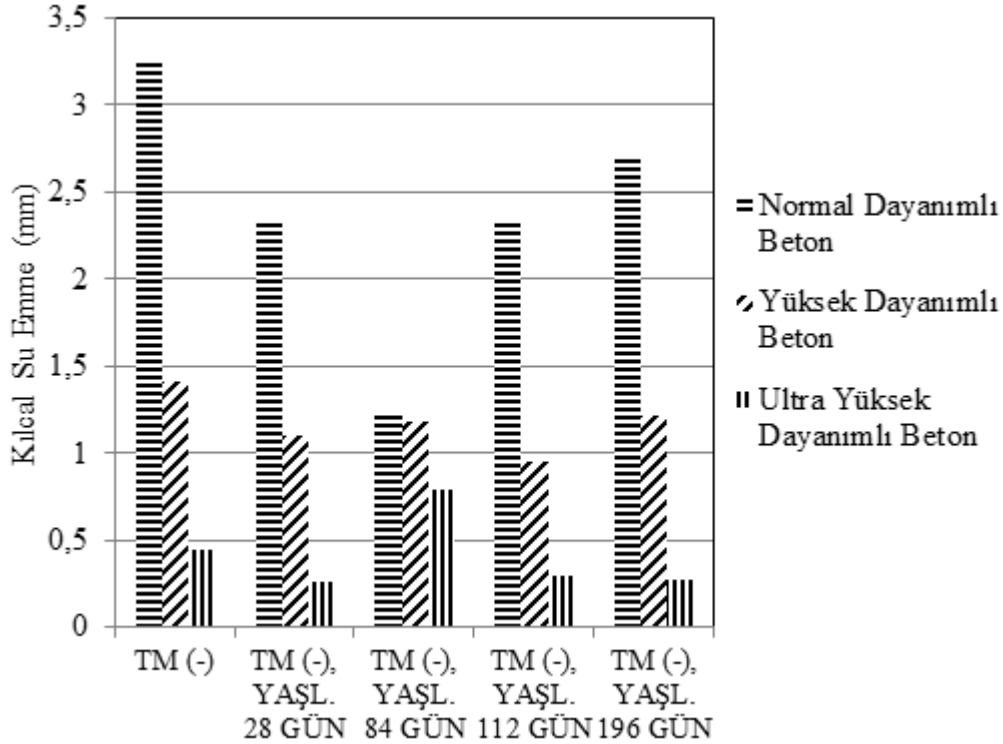
Tecrit malzemesi uygulanması sonrası sürekli olarak laboratuvarda bekletilen numunelerin kılcal su emme değerlerinde dalgalanmalar gözükmemekte ancak tüm beton sınıflarında ilk uygulamanın yapıldığı duruma göre 196 çevrim sonrası artışlar görülmektedir. Bu durumun nedeni; her kılcal su emme deneyi öncesi numuneler 3 gün süreyle 60°C sıcaklıkta değişmez ağırlığa ulaşınca kadar kurutularak deneye başlanmasıdır. Bu sıcaklıkların betonların iç yapısında hasarlara neden olduğu çalışmanın ilk bölümünde kür koşullarının betona etkileri kısmında verilen literatür çalışmalarından bilinmektedir [56]. Ayrıca, yüksek sıcaklıklar alkilalkoksilan esaslı tecrit malzemesine de kısmen zarar vermektedir. Burada laboratuvar ortamında bekletilen numunelerin 196 çevrim sonrası kılcal su emme miktarındaki artışlar numunelerin etüvde kurutulması işlemi ile açıklanmaktadır.

Tecrit malzemesi uygulanan numunelere laboratuvar ortamında bekletme ve yaşlandırmanın etkileri birlikte değerlendirildiğinde 112 ve 196 çevrim yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri yapılan normal dayanımlı numunelerin geçirimsizlik özellikleri belirgin şekilde laboratuvar koşullarında bekletilen numunelerden yüksek çıkmaktadır. Yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrasında normal dayanımlı beton numunelerde kılcal su emme değerleri artmaktadır. Yapılan bu deneylerden elde edilen sonuçlara göre; TM uygulanması yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda daha etkin sonuçlar vermekte ve malzeme etkinliğini sürdürmeye devam etmektedir. Ancak, normal dayanımlı betonlarda yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrasında tecrit malzemesi etkinliğini önemli ölçüde kaybetmektedir. Sonuçta, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda tecrit malzemesi etkinliğinin yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası azalmakta olduğu, ancak bu betonların kendi iç yapı özelliklerinin yeterince geçirimsiz olması nedeniyle yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerinin bu betonları daha az etkilediği anlaşılmaktadır. Burada deney sonuçları incelendiğinde ilginç bir başka sonuç ise ultra yüksek dayanımlı betonlarda 28 çevrim UV yaşlandırma ve donma çözülme çevrimi ve sonrasında 56 çevrim MgCl<sub>2</sub> çözeltisi kullanılarak toplam 84 çevrim olarak yapılan yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası bu betonların kılcal su emmesi başlangıçta çatlak bulunan ve tecrit malzemesi uygulanmamış ilk durumdan dahi belirgin şekilde yüksektir. Bu durumun donma çözülme etkilerinin beton numunelerde fiziksel hasar

oluşturmasından değil, magnezyum klorür çözeltisinin betonun kimyasal yapısına verdiği zarardan kaynaklandığı düşünülmektedir [85-88].

#### 4.3.2.3 Betonların yüzeylerine tecrit malzemesi uygulanmaksızın yaşlandırma ve donma çözülmenin kılcal su emmeye etkisi

Bu grup çalışmalarda ise çatlak bulunan numunelere TM malzeme uygulanması yapılmamıştır. Başlangıçta kılcal su emme değerleri belirlenmiştir. Yine TM uygulanmadan numunelere 28, 56, 28 ve 84 çevrim olmak üzere toplam 196 çevrim yaşlandırma ve donma çözülme işlemi yapılmıştır. Her yaşlandırma ve donma çözülme çevrimi sonrası betonların kılcal su emme miktarı yeniden belirlenmiştir. Tüm sonuçlar Şekil 4.43'te sunulmaktadır.

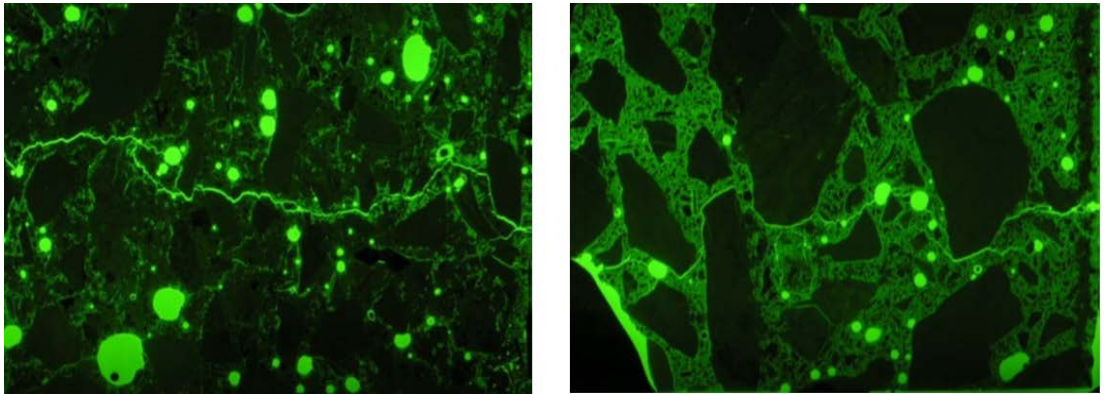


**Şekil 4.43 :** Tecrit malzemesi (TM) uygulanmayan betonlarda yaşlandırmanın kılcal su emmeye etkisi.

Kılcal su emme deney sonuçları incelendiğinde tecrit malzemesi uygulanmayan normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı beton numunelerde yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası ilk 28 çevrimde özellikle tüm beton sınıfı numunelerde belirgin şekilde kılcal su emme değerinin azaldığı görülmektedir. Normal dayanımlı betonlarda bu azalma eğilimi sonraki 56 çevrim boyunca devam etmiştir. Yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonda ilk 28 günlük yaşlandırma ve donma çözülme ve

sonrasında yapılan 56 çevrim donma çözülme sonrası toplam 84 gün olarak uygulanan yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası kılcal su emme değerleri daha yüksek çıkmaktadır. Özellikle, ultra yüksek dayanımlı beton numunelerin kılcal su emme değerleri incelendiğinde en yüksek değer 56 çevrim  $MgCl_2$  çözeltisi ile yapılan donma çözülme işlemi sonrası gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum çözeltinin beton iç yapısına verdiği kimyasal zararlar açıklanmaktadır. Ultra yüksek dayanımlı beton numunelerde  $MgCl_2$  çözeltisi içinde bulunan Mg iyonları betonun dayanım ve dayanıklılığında büyük öneme sahip kalsiyum silikat hidratlar C-S-H ile reaksiyona girerek magnezyum silikat hidratları M-S-H oluşturmaktadır. Ayrıca  $MgCl_2$  çözeltisinin ultra yüksek dayanımlı betonda bulunan  $Ca(OH)_2$  ile reaksiyona girerek birusit ( $Mg(OH)_2$ ) oluşumuna sebep olduğu düşünülmektedir [83].

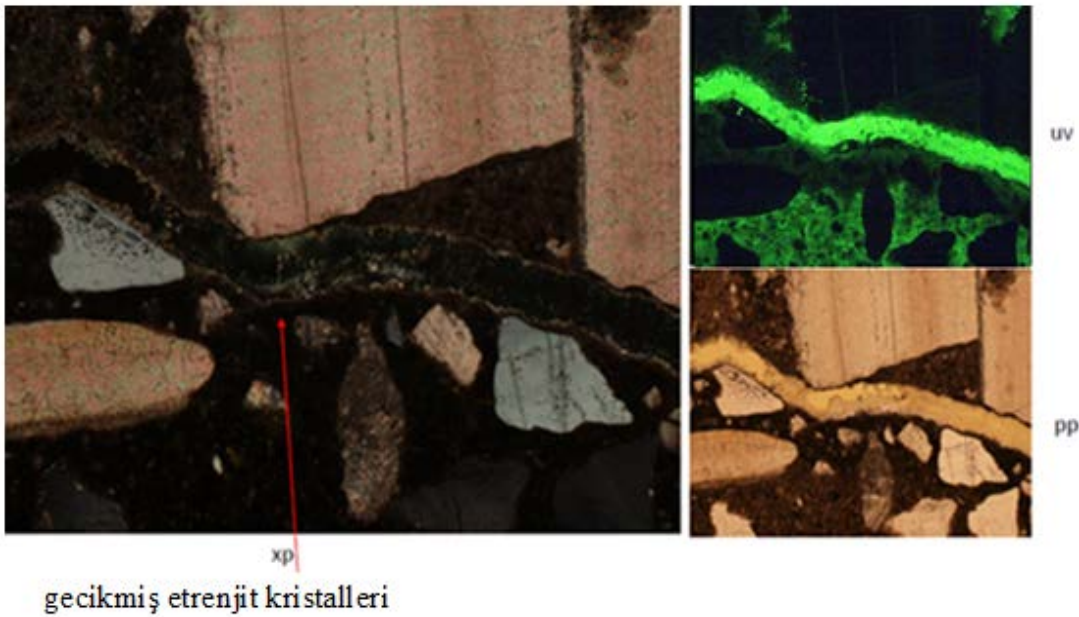
Tecrit malzemesi uygulanmayan beton numunelerde dikkat çeken en önemli husus özellikle ilk yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası tüm beton sınıflarında kılcal su emme değerinin azalmasıdır. Bu durumun nedeni olarak tecrit işlemi uygulanıncaya kadar su ile herhangi bir teması olmayan laboratuvar koşullarındaki numunelerin yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri süresince su ile buluştuğunda çimentonun hidratasyonun devam etmesi için uygun ortam oluşmuş ve yeni oluşan hidratasyon ürünlerinin beton içerisindeki boşluk ve çatlakları azaltarak kılcal su emmeyi azalttığı düşünülmüştür. Bu durum tecrit işlemi uygulanmadan yaşlandırma çevrimlerine tabi tutulan ve su ile herhangi bir teması olmadan sürekli laboratuvar koşullarında bekletilen numunelerin iç yapı incelemelerinde de görülmektedir (Şekil 4.44).



**Şekil 4.44 :** Tecrit malzemesi uygulanmayan, yaşlandırma yapılan (solda) ve tecrit malzemesi uygulanmayan, laboratuvarında bekletilen (sağda) normal dayanımlı betonun iç yapısı (uv: ultraviyole ışık).

Yaşlandırma çevrimlerine maruz bırakılan numunelerin yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri boyunca su ile temasına bağlı olarak hidrasyonunun devam ettiği ve böylece, daha boşluksuz ve gelişmiş bir iç yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bu durum betonda döküm sonrası bakım koşullarına dikkat edilmesi (nemli ortamın sağlanması) ile hidrasyonun devam etmesini ve betonun iç yapısının gelişimini göstermektedir. Plastik rötre çatlakları bulunan beton numunelerde yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri ortamda suyun varlığı ile başlangıç çevrimlerinde betonun hidrasyonunun gelişmesine neden olarak kılcallık değerlerinin azalmasını sağlamaktadır.

Ayrıca, betonda gecikmiş etrenjit oluşumu gözlemlenmiş olup çatlakların etrenjit kristalleri ile dolarak kılcal yolla emilen su miktarının azalmasında etkili olduğu düşünülmektedir. Nitekim yapılan bazı çalışmalarda etrenjit gibi suda çözünmeyen reaksiyon ürünlerinin betonun su geçirimsizliğini azalttığı belirtilmektedir [1]. Burada gecikmiş etrenjit kristalleri ile karşılaşılmasının nedeni her kılcal su emme deneyi öncesi numunelerin 60°C sıcaklıkta değişmez ağırlığa ulaşmaya kadar kurutulmasıdır. Ayrıca, yaşlandırma ve donma çözülme etkisindeki numunelerde sürekli su ile temas sonrası bu numunelerde gecikmiş etrenjit oluşumu görülmektedir. Şekil 4.45’de normal dayanımlı betonda yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası gecikmiş etrenjit oluşumu görülmektedir.

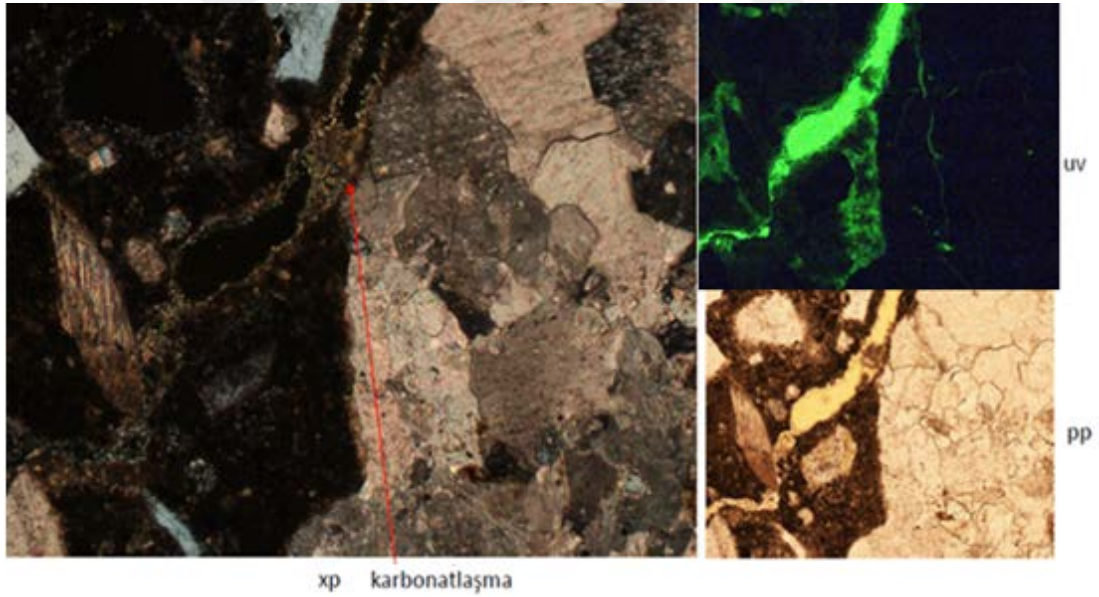


**Şekil 4.45 :** Tecrit malzemesi (TM) uygulanmayan normal dayanımlı betonda yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası etrenjit kristalleri oluşumu (pp: tek nikol, xp: çift nikol, uv: ultraviyole ışık).



Yine normal dayanımlı betonda yapılan iç yapı incelemelerinde mikro çatlakların içerisinde karbonatlaşma meydana geldiği ve çatlakların karbonatlaşma ürünleri ile dolarak kılcal yolla emilen suyun azalmasında bu durumda etkili olabileceği düşünülmüştür. Karbonatlaşmanın beton ve özellikle çimento hamuru içerisinde önemli değişikliklere yol açtığı bilinmektedir. Karbonatlaşmanın en belirgin etkisi betonda donatı korozyonuna neden olarak olumsuz biçimde gerçekleşmekle birlikte diğer etkileri ise olumludur. Karbonatlaşma ile suda çözünebilen  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  suda çözünmeyen  $\text{CaCO}_3$ 'e dönüşür ve kılcal boşluklar azaltılarak dürabilitenin artması sağlanabilir [124].

Renée ve Henk (2012) karbonatlaşma reaksiyonu ile betondaki çatlaklar içerisinde  $\text{CaCO}_3$  oluştuğunu ve oluşan bu ürünün genişliği 0,2 mm aşmayan çatlakları doldurarak suyun ve diğer zararlı kimyasalların betona girişini ve ilerlemesini azaltarak betonun kendi kendini tamir etmesini sağladığını belirtmektedir [131]. Şekil 4.46'da mikro çatlaklar içerisinde karbonatlaşma oluşması verilmektedir.



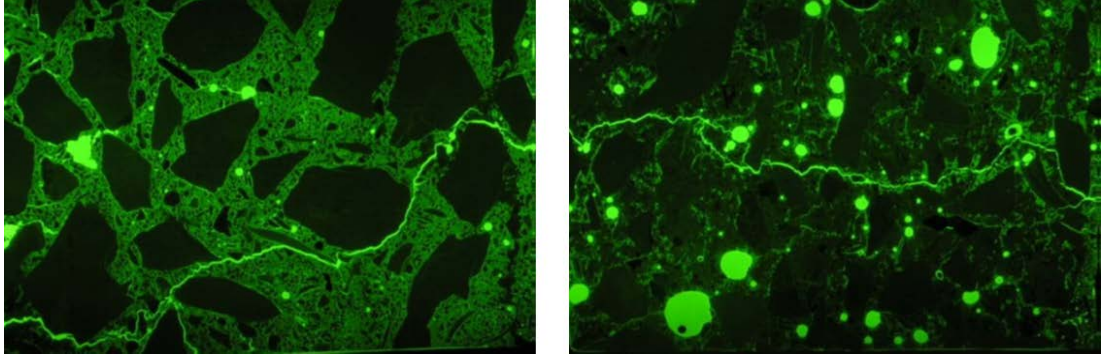
**Şekil 4.46 :** Tecrit malzemesi (TM) uygulanmayan normal dayanımlı betonda yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası karbonatlaşma oluşumu (pp: tek nikol, xp: çift nikol, uv: ultraviyole ışık).

Burada tecrit malzemesi uygulanmayan betonlarda ilk yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerinde numunelerin su ile teması ve buna bağlı olarak çimento hidrasyonunun gelişimi ile kılcal su emme değerlerinde azalma görülmekte, donma çözülme çevrimlerine devam edilmesi ile toplam 196 çevrim sonrası özellikle normal ve yüksek dayanımlı beton numunelerin belirgin şekilde kılcal su emme değerlerinde

artış gerçekleşmektedir. Normal dayanımlı betonlarda gerçekleşen artış yüksek dayanımlı betonlara göre daha fazladır. Ultra yüksek dayanımlı betonda yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri oldukça geçirimsiz iç yapı nedeniyle bu betonlara çok fazla zarar vermemektedir [132]. Yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerinin bu betonlarda çimento hidrasyonunu devamını sağlayarak 196 çevrim sonrasında dahi iç yapının gelişmesine katkıda bulunduğu kılcal su emme deney sonuçlarından anlaşılmaktadır.

Tecrit uygulanmış betonlara yapılan yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerinde ise tecrit malzemesi beton yüzeyinde astar görevi görerek betonun yapılan ilk yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerinden başlayarak su ile temasını engellemektedir. Bu nedenle tecrit malzemesi uygulanan numunelerin yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerinin ilk aşamasından başlamak üzere kılcallık değerleri sürekli olarak artmaktadır. Tecrit malzemesi uygulanmayan numunelerde yaşlandırma ve donma çözülme etkisinde betonların su ile temasına bağlı olarak hidrasyon gelişmekte ve iç yapı iyileşmektedir. Hidrasyonun gelişmesi ile agregalar etrafındaki boşluklar ve kılcallık azalmaktadır. Ancak, tecrit malzemesi uygulanmayan betonlarda tecrit malzemesi yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerinde betonun suyla temasını engellemekte böylece hidrasyonun gelişmesini engellemektedir. Şekil 4.47'de tecrit malzemesi uygulanan ve tecrit malzemesi uygulanmayan numunelerin yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası iç yapı görüntüsü verilmektedir. Tecrit malzemesi uygulanmayan beton numunelerin yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri etkisinde iç yapısının hidrasyonun devam etmesi ile gelişmesi görülmektedir. Tecrit malzemesi uygulanmayan numunelerde agrega etrafında boşluklar hidrasyon ürünleri ile dolmakta ve kılcal boşluklar azalmaktadır. Tecrit malzemesi uygulanan numunelerde ise agrega etrafında kılcal boşluklar daha fazla olmasına rağmen kılcal su emme değeri tecrit malzemesi uygulanmayan numunelerden daha az olmaktadır. Bu durumun nedeni tecrit malzemesi uygulanan numunelerin iç yapısının daha geçirimsiz olmasından değil tecrit malzemesinin beton yüzeyinde suyun girişini engelleyici etkisinden kaynaklanmaktadır. Başlangıç 84 yaşlandırma ve donma çözülme çevrimi sonrası normal dayanımlı betonda tecrit malzemesi etkinliğini sürdürmektedir.





**Şekil 4.47 :** Tecrit malzemesi uygulanan (solda) ve tecrit malzemesi uygulanmayan (sağda) normal dayanımlı betonun yaşlandırma çevrimleri sonrası iç yapısı (uv: ultraviyole ışık).

Yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerine devam edilerek toplam 196 çevrim sonrası tecrit malzemesi uygulanan normal dayanımlı betonda ise tecrit malzemesi etkinliğini önemli ölçüde kaybetmekte ve kılcal su emme değeri belirgin biçimde artmaktadır. Ancak, yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerinin her aşamasında tecrit malzemesi uygulanmayan betonların kılcal su emme değeri tecrit malzemesi uygulanan numunelerden fazla olmaktadır.

Yaşlandırma çevrimleri sonucu normal dayanımlı betonda tecrit malzemesi uygulanan ve uygulanmayan numunelerde oluşan olumsuz etki Şekil 4.48' ve Şekil 4.49'da verilmektedir. Fotoğraflar incelendiğinde kılcal su emme deney sonuçlarına benzer biçimde tecrit malzemesi uygulanmayan numunelerde pullanma ve yüzeyden parça kopmalar şeklinde gözle görülen hasar çok daha fazladır. Normal dayanımlı betonda kopan parçalar etüvde değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuş ve tecrit malzemesi uygulanan numunelerde  $0,27 \text{ kg/m}^2$  ve uygulanmayan numunelerde ise  $9,72 \text{ kg/m}^2$  pullanma tespit edilmiştir. Yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonda ise hem tecrit malzemesi uygulanmayan hem de tecrit malzemesinin uygulandığı numunelerde gözle saptanabilen bir hasar oluşmamıştır. Sonuçta, yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri tecrit malzemesi uygulanan normal ve yüksek dayanımlı betonların kılcal su emme değerini olumsuz etkilemekte ve kılcal su emme değerleri artmaktadır. Ancak, aynı yaşlandırma ve donma çözülme çevrimine tabi tutulan tecrit malzemesi uygulanmış ve uygulanmayan normal ve yüksek dayanımlı betonlarda tecrit malzemesi bulunan numunelerdeki kılcal su emme daha azdır. Ayrıca, normal dayanımlı betonda yaşlandırma ve donma çözülme etkileri ile oluşan pullanma hasarı tecrit malzeme uygulanmayan numunelerde tecrit malzemesi uygulanan numunelere göre çok daha fazladır.



**Şekil 4.48 :** TM uygulanmayan normal dayanımlı beton numunelerin donma çözülme çevrimleri sonrası görüntüsü.



**Şekil 4.49 :** TM uygulanan normal dayanımlı beton numunelerin donma çözülme çevrimleri sonrası görüntüsü.

Ultra yüksek dayanımlı betonda ise tecrit malzemesi uygulanan ve uygulanmayan numuneler arasında hem kılcal su emme deney sonuçlarında hem de gözle yapılan kontrolde önemli bir fark görülmemektedir. Bu durum Şekil 4.50 ve Şekil 4.51’de verilmektedir.





**Şekil 4.50 :** TM uygulanmayan ultra yüksek dayanımlı beton numunelerin donma çözülme çevrimleri sonrası görüntüsü.



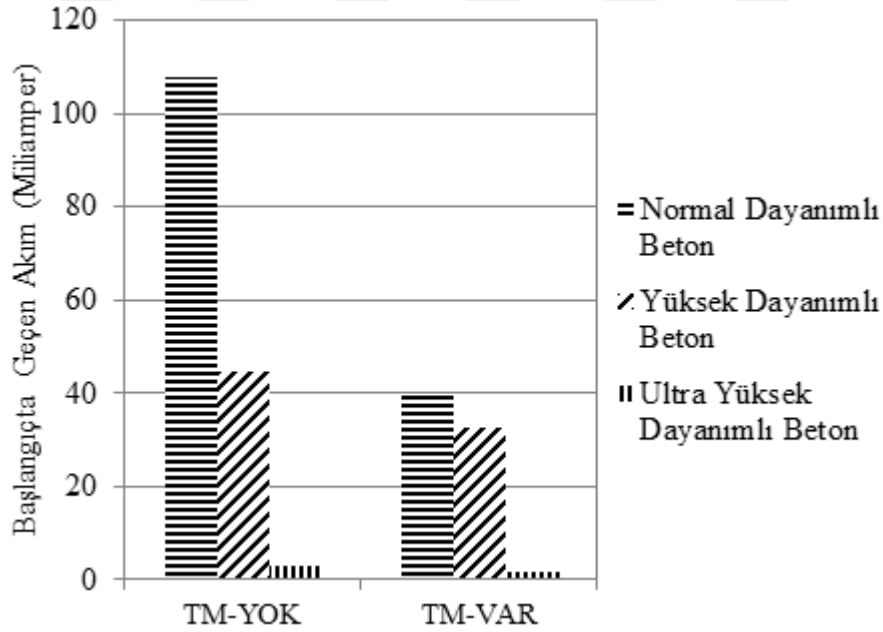
**Şekil 4.51 :** TM uygulanan ultra yüksek dayanımlı beton numunelerin donma çözülme çevrimleri sonrası görüntüsü.

Tüm bu deneylerden sonuçla tecrit malzemesinin yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrasında etkinliği normal ve yüksek dayanımlı betonlarda azalmakta, ancak tümüyle etkisini kaybetmemektedir.

Ultra yüksek dayanımlı betonlar ise tecrit malzemesinin varlığından bağımsız şekilde son derece boşluksuz ve geçirimsiz iç yapıları nedeniyle yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerinden çok daha az etkilenmektedir.

#### 4.3.2.4 Betonların yüzeylerine tecrit malzemesi uygulamasının hızlı klor iyonu geçirimsizliğine etkisi

Betonların çatlak bulunan yüzeylerine tecrit malzemesi uygulanmadan önce ve sonrasında betonların hızlı klor iyonu geçirimsizliği değerleri belirlenmiştir. Deneyler sonucunda tecrit malzemesi uygulanmasının hızlı klor iyonu geçirimsizliğini tüm betonlarda belirgin şekilde azalttığı görülmüştür. Tecrit malzemesi uygulanması öncesi ve sonrasında hızlı klor iyonu geçirimsizlikleri deney sonuçları Şekil 4.52’de verilmektedir.

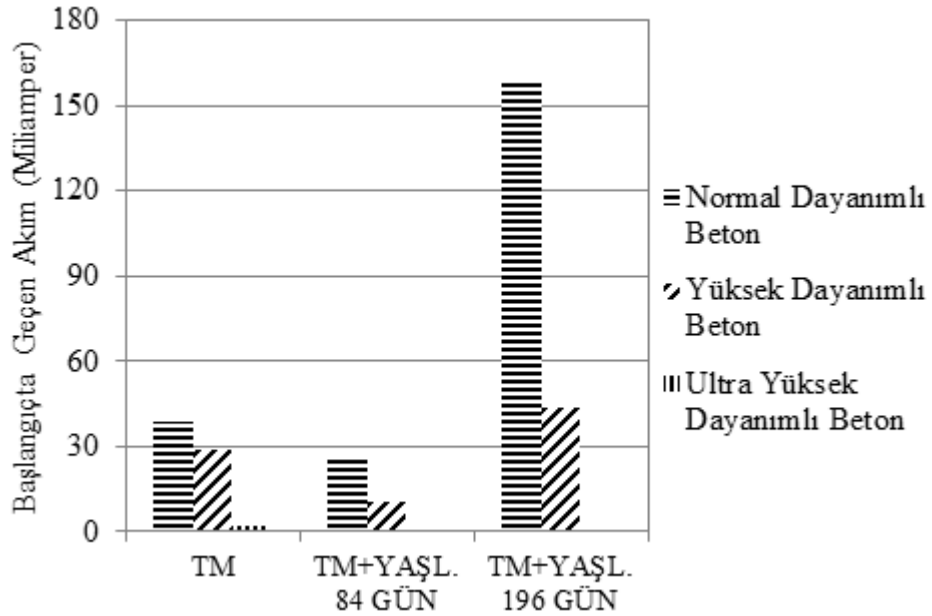


Şekil 4.52 : Tecrit malzemesi (TM) uygulanmasının hızlı klor geçirimsizliğine etkisi.

#### 4.3.2.5 Betonların yüzeylerine tecrit malzemesi uygulanarak yaşlandırma ve donma çözülmenin hızlı klor iyonu geçirimsizliğine etkisi

TM uygulanan numunelere 84 ve 196 çevrimden oluşan yaşlandırma deneyleri yapılarak hızlı klor iyonu geçirimsizliği değerleri yeniden belirlenmiştir. Yaşlandırmada ilk 28 çevrim numunelerin 1 gün süreyle TS EN 12390-9 standardında verilen donma çözülme çevrimine saf su ile tabi tutulması ve ertesi gün 4 saat UV lambaları ile 60°C sıcaklıkta numunelerin ısıtılması, sonrasında 2 saat

süreyle su spreyleme yöntemi ile ıslanma-kuruma etkisine bırakılması ve nihayet 18 saat süre laboratuvarda bekletilmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir. İlk 28 çevrimden oluşan yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası numunelerde 56 çevrim TS EN 12390-9 standardına göre  $MgCl_2$  çözeltisi kullanılarak donma çözülme çevrimlerine devam edilmiştir. Toplam 84 çevrim olarak yapılan bu yaşlandırma işlemleri sonrasında numunelerin hızlı klor iyonu geçirimsizliği değerleri yeniden belirlenerek yaşlandırma ve donma çözülme etkisinde su itici tecrit malzemesinin etkinliği değerlendirilmiştir. Hızlı klor iyonu geçirimsizlikleri belirlenen numunelere donma çözülme işlemine %3 NaCl çözeltisi kullanılarak 112 çevrim daha devam edilmiş ve toplamda 196 çevrim sonrasında hızlı klor iyonu geçirimsizlikleri tekrar belirlenmiştir. Yapılan deneylere ait sonuçlar Şekil 4.53'te verilmiştir.



**Şekil 4.53 :** Yaşlandırmanın tecrit malzemesi (TM) uygulanmış çatlaklı numunelerdeki hızlı klor iyonu geçirimsizliğine etkisi.

Deney sonuçları incelendiğinde TM uygulanmış numunelere 84 yaşlandırma ve donma çözülme çevrimi yapılması durumunda çimentonun hidrasyonuna bağlı olarak iç yapının iyileşmekte olduğu görülmektedir. Yaşlandırma deneyleri öncesinde laboratuvar ortamında bekletilen numunelerin yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerinde ilk defa su ile teması gerçekleşmiş ve çimentonun hidrasyonu gelişerek daha geçirimsiz bir iç yapı oluşmuştur. Ancak donma çözülme deneylerine 112 çevrim daha devam edilmesi ile toplam 196 çevrim sonrası donma çözülme çevrimleri özellikle normal dayanımlı betonda çok belirgin şekilde

hasar oluşturmuş ve klor iyonu geçirimsizlikleri TM uygulaması yapılan ilk duruma göre belirgin şekilde artmıştır. Yüksek dayanımlı beton içinde yaşlandırma deneylerine devam edilmesi ile hızlı klor iyonu geçirimsizlikleri artmaktadır. Ancak bu artış normal dayanımlı betona göre daha düşük seviyededir. Ultra yüksek dayanımlı betonda ise 196 çevrim yaşlandırma ve donma çözülme sonrası hızlı klor iyonu geçirimsizliği ihmal edilecek düzeyde olup 0,1 Miliamper olarak ölçülmüştür. Ultra yüksek dayanımlı betonların son derece geçirimsiz iç yapısı nedeniyle bu betonlarda tecrit malzemesi yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerinden ihmal edilebilecek kadar az zarar görmekte ve etkinliğini sürdürmektedir. Ancak, bu derece düşük seviyede hızlı klor iyonu geçişinde tecrit malzemesinin varlığı dışında, bu betonların su ile teması durumunda çok yüksek çimento içeriği nedeniyle hidrasyonun devam ederek daha da geçirimsiz bir iç yapı oluşması da etkili olmaktadır [133].

## 5. GENEL SONUÇLAR

Çalışmada incelenen normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı üç farklı sınıftaki betonlara; su kürü, farklı iki sıcaklıkta buhar kürü ve yalıtılmış ortamda etüv kürü olmak üzere dört farklı kür uygulandı. Ayrıca, kür etkileri ile açık hava ve rüzgar koşullarına maruz bırakılarak yüzeylerinde çatlak oluşturulan bazı beton numunelere, su itici tecrit malzemesi uygulanarak geçirimsizlik deneyleri yapıldı. Bu betonlara tekrarlı yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri yapılarak bu etkiler altında tecrit işleminin etkinliğini sürdürüp sürdürmediği araştırıldı. Beton paspayı ve plastik paspayı kullanılmasının betonların geçirimsizlik özelliklerine etkileri de belirlendi. Ayrıca, betonların iç yapı incelemeleri de çalışma kapsamında gerçekleştirildi. Yapılan bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

### 5.1 Kür Koşullarının Etkisi

#### 5.1.1 Kür koşullarının mekanik özelliklere etkisi

- Kür koşullarının betonun 7, 28 ve 365 günlük basınç dayanımlarına etkileri incelendiğinde; normal ve yüksek dayanımlı betonlarda ısıtılmış kür işlemi uygulanan numunelerin basınç dayanımları su kürü uygulanan numunelerden daha düşük oldu. Bu betonlarda en yüksek dayanımlar su kürü uygulanmış numunelerde görüldü. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise en yüksek dayanım yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulanan numunelerde elde edildi.
- Normal dayanımlı betonlarda ısıtılmış kür uygulanması sonrasında basınç dayanımı kayıpları yüksek dayanımlı betonlara göre daha belirgindir. Normal ve yüksek dayanımlı betonlarda yüksek sıcaklıklarda uygulanan kür işlemleri betona zarar verdi ve beton basınç dayanımı değerlerini su kürü uygulanan numunelere göre belirgin şekilde düşürdü.
- Ultra yüksek dayanımlı betonda 7, 28 ve 365 günlük basınç dayanımları incelendiğinde başlangıçta daha düşük dayanıma sahip su kürü uygulanan

numunelerin, 365 günlük basınç dayanımlarının ısıtma işlemi uygulanan numunelere oldukça yaklaştığı görüldü. Ultra yüksek dayanımlı betonun su ile kürlenmesi daha uzun sürelerde gerçekleşti.

- Yarma çekme dayanımları incelendiğinde normal ve yüksek dayanımlı betonlarda uygulanan ısıtma kür işlemlerinin beton iç yapısına zarar verdiği ve yarma çekme dayanımını azalttığı, ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise ısıtma işlemi uygulanmasının yarma çekme dayanımları üzerine az da olsa olumlu bir etkisi olduğu görüldü.
- Normal ve yüksek dayanımlı betonlarda uygulanan ısıtma kür işlemi ile betonların kırılma enerjisinde azalmalar görüldü. Özellikle, yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulanmış numunelerde bu düşüş daha belirgindir. Normal ve yüksek dayanımlı betonlarda etüv kürü uygulanması ile hem maksimum yük değerinde hem de yük altında nihai şekil değiştirme değerinde azalmalar görüldü. Bu durum betonların kırılma enerjilerinin azalmasına yol açtı. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise ısıtma kür işlemleri uygulanması ile betonun kırılma enerjisi değeri arttı. Bu betonda kür işlemi sonrası hem tepe yükünde hem de nihai şekil değiştirme değerinde artışlar oldu.
- Normal ve yüksek dayanımlı betonların net eğilme dayanımı uygulanan ısıtma kür işlemlerinden etkilenmekle birlikte belirgin bir düşme veya artış eğilimi olmadı. Ancak, ultra yüksek dayanımlı betonlarda ısıtma kür işlemi uygulanması betonların net eğilme dayanımı üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu belirlendi.
- Elastisite modülü ve karakteristik boy değerleri tüm beton sınıflarında uygulanan kür işleminden fazla etkilenmedi. Beton sınıfları kendi arasında değerlendirildiğinde; karakteristik boy değerlerinin ultra yüksek dayanımlı betonda daha düşük değerlerde olduğu, normal dayanımlı betonda ise en yüksek değerleri aldığı belirlendi. Betonda dayanım değerleri arttıkça karakteristik boyların azaldığı belirlendi.

### **5.1.2 Kür koşullarının geçirimsizlik özelliklerine etkisi**

- Normal ve yüksek dayanımlı betonda yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulanmış numunelerin en yüksek hızlı klor iyonu geçirimsizliği değerine sahip olduğu görüldü. Bu betonlarda en düşük geçirimsizlik değeri su kürü uygulanan



numunelerde elde edildi. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda buhar kürü ve etüv kürü uygulamaları ile hızlı klor iyonu geçirimsizlikleri önemli ölçüde azaldı. Buhar kürü uygulanan numunelerde klor iyonu geçirimsizliği 10 Coulomb düzeye kadar diğer bir deyişle ihmal edilecek seviyeye düştü.

- Kür koşullarının kılcal su emmeye etkileri incelendiğinde, normal ve yüksek dayanımlı betonlarda ısıtılma kür işlemleri uygulanması ile kılcal su emme değeri arttı ancak ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise buhar kürü uygulanması kılcal su emme değerini azalttı.
- Normal ve yüksek dayanımlı betonlarda basınç altında su işleme derinliğinin ısıtılma kür işlemleri uygulanan numunelerde su kürü uygulanan numunelere göre daha yüksek olduğu görüldü. Bu betonlarda en yüksek su işleme derinliği yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulanmış numunelerde görüldü. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise hem su kürü uygulanan numunelerde hem de ısıtılma işlemi uygulanan numunelerin tamamında basınç altında su işleme derinliği ölçülemedi. Bu betonlarda çok yoğun ve geçirimsiz iç yapı nedeniyle betona su nüfuz etmedi.

## **5.2 Paspayı Kullanılmasının Etkisi**

- Kesitleri aynı olan beton ve plastik paspaylarının kullanıldığı normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda hızlı klor iyonu geçirimsizliği ve kılcal su emme deney sonuçları incelendiğinde plastik paspayı kullanılması ile betonun geçirimsizlik özelliğinin arttığı görüldü. Betonda, plastik ve beton paspayları arasındaki termal genleşme katsayısının farklılığı ve rötrenin kısıtlanması sonucunda plastik paspayı kullanılan numunelerde çatlaklar oluştu. Bu çatlaklar betonların geçirimsizlik özelliklerini olumsuz etkiledi. Böylece, plastik paspayı kullanılan numunelerin geçirimsizlik değerleri beton paspayı kullanılan numunelerden fazladır.
- Paspayı kullanılmayan referans betonlar ile beton paspayı kullanılan beton numunelerde hem kılcal su emme deneyleri hem de hızlı klor iyonu geçirimsizliği deneyleri gerçekleştirildi. Zorunlu olarak kullanılması gerekli olan paspayları ile betonun geçirimsizlik özelliklerinin arttığı gözlemlendi. Paspayı kullanılmayan betonların hem kılcal su emme değerlerinde hem de hızlı klor iyonu geçirimsizliklerinde tüm beton sınıflarında azalmalar görüldü.

### 5.3 Tecrit Malzemesinin Geçirimsizliğe Etkisi

- Çatlak bulunan numunelerin kılcal su emme değerlerinde çatlak bulunmayan referans numunelere göre belirgin şekilde artış gözlemlendi. Normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonların tamamında betonda çatlakların varlığı ile kılcal su emme değerleri arttı.
- Su/çimento oranı daha fazla dolayısıyla daha geçirimsiz bir iç yapıya sahip normal dayanımlı betonda çatlaklar geçirimsizlik değerlerinin daha fazla artmasına sebep oldu. Normal dayanımlı beton, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlara göre çatlaklardan kılcal su emme özelliği açısından daha çok etkilendi.
- Tecrit malzemesi uygulanması ile tüm beton türlerinde kılcal su emme değerlerinde azalma oldu. Ancak bu azalma en belirgin şekilde normal dayanımlı betonlarda sonra sırası ile yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda gerçekleşti. Su itici tecrit malzemesi uygulanması ile betonun kılcal su emme değerleri azaldı, en belirgin azalma normal dayanımlı betonda gerçekleşti. Betonlarda dayanım değeri yükseldikçe daha kararlı ve boşluksuz bir iç yapı oluştu. Bu nedenle iç yapının daha iyi olduğu betonlarda tecrit malzemesinin etkisi normal dayanımlı betonlara göre daha azdır.

### 5.4 Yaşlandırma ve Donma Çözülmenin Geçirimsizliğe Etkisi

- Betonlarda yaşlandırma deneyi hem yetersiz kür nedeniyle oluşan çatlak bulunan tecrit malzemesi uygulanmış numunelere hem de çatlak bulunmayan referans beton numunelerde yapıldı ve her iki durumda yaşlandırma etkilerine bağlı olarak numunelerin kılcal su emme değerlerinde artış olduğu gözlemlendi. Kılcal su emme değerindeki bu artış yaşlandırma etkisi ile çatlak bulunmayan numunelerde dahi zamanla ağ şeklinde kılcal çatlakların oluşmaya başlamasından kaynaklandı. Tecrit malzemesi uygulanan numunelerin kılcal su emme miktarındaki artış, referans numunelere oranla daha azdır. Bu durum, tecrit işleminin etkinliğinin yaşlandırma çevrimi sonrasında azalmakla birlikte devam ettiğini gösterdi.
- Yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri tecrit malzemesi uygulanan tüm sınıflardaki beton numunelere zarar vermekte, ancak normal dayanımlı beton numunelerde verdiği zarar, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betona göre daha fazladır. Normal dayanımlı betonlara uygulanan yaşlandırma ve donma çözülme

çevrimleri ile kılcal su emme değeri her yaşlandırma sonrası daha da artmaktadır. Bu durum iç yapı incelemeleri ile de desteklendi. Yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası normal dayanımlı beton yüzeyinde tecrit malzemesi görülmedi, ancak ultra yüksek dayanımlı betonda yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası yüzeye uygulanan tecrit malzemesi belirgin bir şekilde görüldü.

- Yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda en yüksek kılcal su emme değeri magnezyum klorür çözeltisi ile yapılan donma çözülme çevrimleri sonrası gerçekleşti. Bu betonlarda, magnezyum klorür çözeltisi ile yapılan donma çözülme çevrimleri sonrasında kılcal su emme değeri sodyum klorür (NaCl) çözeltisi ile yapılan donma çözülme çevrimleri sonrasına göre daha yüksektir.
- Tecrit malzemesi uygulanması sonrası sürekli olarak laboratuvar ortamında bekletilen numunelerin kılcal su emme değerlerinde sapmalar görülmekte, ancak tüm beton sınıflarında ilk uygulama yapıldığı duruma göre 196 çevrim sonrası artışlar kaydedilmektedir. Laboratuvar ortamında bekletilen numunelerin kılcal su emme değerinin artmasında kılcallık deneyi öncesi numunelerin 60°C sıcaklıkta etüvde değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulması etkili oldu. Kür koşullarının incelendiği ilk bölüm çalışmalardan betona uygulanan ısı işlemlerin iç yapıda hasarlara neden olduğu görüldü. Ayrıca yüksek sıcaklıklar alkilalkoksilan esaslı tecrit malzemesine de kısmen zarar vermektedir.
- Tüm beton sınıflarında laboratuvar koşullarında bekletilen numunelerin kılcal su emme değeri yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri yapılan numunelerden daha düşüktür. Laboratuvar ortamında bekletilen numunelerin kılcal su emme değerinin düşük olması yaşlandırma ve donma çözülme işlemlerinin tecrit malzemesi uygulanan numunelere zarar verdiğini gösterdi.
- Yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerine kadar su ile herhangi bir teması olmayan tecrit malzemesi uygulanmamış laboratuvar koşullarında bekletilen numunelerin yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri süresince su ile ilk bulunduğu anda, çimentonun hidrasyonun devam etmesi için uygun ortam oluşması ve yeni oluşan hidrasyon ürünlerinin 0,2 mm gibi belirli çatlak genişliğinin altında bulunan çatlakları ve betondaki diğer boşlukları doldurması ile kılcal su emme değerinin azaldığı görüldü.

- Ayrıca tecrit malzemesi uygulanmadan yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerine tabi tutulan numunelerin iç yapı incelemelerinde betonda gecikmiş etrenjit oluşumu görüldü ve çubuksu etrenjit kristalleri ile çatlakların dolduğu gözlemlendi. Yine iç yapı incelemelerinde çatlakların karbonatlaşma etkisinde kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) ile dolduğu görüldü. Her iki durumda da oluşan bu yeni ürünlerin suda çözünmeyerek ve kılcal boşlukları doldurarak geçirimsizliğin azalmasında etkili olabileceği düşünüldü.
- Çatlak bulunan ve tecrit malzemesi (TM) uygulanan betonların hızlı klorür iyonu geçirimsizliği TM uygulanması ile belirgin şekilde azaldı. TM uygulanan numunelere yapılan yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrasında ise tüm beton sınıflarında belirli bir dönem için beton iç yapısının iyileştiği ve çatlakların hidrasyon ürünleri ile dolduğu anlaşıldı. Böylece hızlı klor iyonu geçirimsizliği azaldı. Ancak, normal ve yüksek dayanımlı betonlarda yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerine devam edilmesi ile belirgin şekilde hızlı klor iyonu geçirimsizliğinin arttığı görüldü. Bu artış normal dayanımlı betonlarda daha belirgindir.
- Ultra yüksek dayanımlı betonlarda azalma eğilimi sonraki yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri boyunca devam etti. Bu betonlarda 196 çevrim sonunda ölçülen akım değeri 2 Coulomb olarak tespit edildi. Bu değer çok düşük ve ihmal edilebilir düzeydedir. Bu sonuç, ultra yüksek dayanımlı betonun tamamen geçirimsiz olduğuna, yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerinden etkilenmediğine işaret etmektedir. Böyle düşük bir değerde hızlı klor iyonu geçirimsizliğinde tecrit malzemesi dışında betonun iç yapısında oldukça geçirimsiz olması etkili oldu.

## 5.5 İleri Çalışmalar İçin Öneriler

Bu bölümde, çalışmanın devamı niteliğinde araştırılması gereken konular verilmiştir.

- Normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda ısıtma işlemleri sonrasında betonun boşluk yapısı ve kritik boşluk çapı bu betonların hamur fazlarında MIP ile incelenebilir.
- Sıcaklık ve tekrarlı ıslanma kuruma etkileri betonda gecikmiş etrenjit oluşumuna yol açabilir. Gecikmiş etrenjit oluşumu daha kapsamlı incelenebilir.

- Yüksek sıcaklıkta kr uygulanmasının farklı dayanım sınıflarındaki betonların aşınma ve darbe dayanımı özelliklerine etkileri incelenebilir.
- Beton ve plastik paspayı kullanılan numunelerin yangın etkisinde davranışları incelenebilir. Böylece, paspaylarının yangın etkisinde davranışları karşılaştırılabilir.
- Daha fazla sayıda silan ve siloksan esaslı yalıtım malzemeleri kullanılarak çalışmalar yapılabilir ve bu yalıtım malzemelerinin yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri sonrası performansları karşılaştırılabilir.
- Tecrit malzemesi uygulanması sonrası yaşlandırma ve donma çözülme etkileri dışında aşınma etkisi de incelenebilir. Ayrıca, tecrit malzemesi uygulanan betonların sonradan mekanik yolla oluşabilecek çatlaklar için de performansları araştırılabilir.



## KAYNAKLAR

- [1]. **Mehta, P.K. & Monteiro, P.J.M.** (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, McGraw-Hill, fourth edition (2014)
- [2]. **ACI 363-10.** (2010). *State-of-the-art report on high-strength concrete*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2010.
- [3]. **Phan, T.L.** (2008). *High strength concrete at high temperature- an overview*. Retrieved from <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build02/PDF/b02171.pdf>.
- [4]. **TS 500.** (2000). *Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları*. Türk Standardı. Şubat 2000.
- [5]. **Aitcin, P.C.** (1998). *High-performance concrete, modern concrete technology*. E & FN Spon, London, 1998, 591 pages.
- [6]. **Akkaya, Y., Bayramov F., Taşdemir M.A.** (2003). Betonun kırılma mekaniği: tasarımda kullanılan mekanik özellikler ile kırılma parametreleri arasındaki bağıntılar, *Türkiye Mühendislik Haberleri, Cilt 426, Sayı. 4*, ss. 70-75, 2003.
- [7]. **Iravani, S. & Macgregor J.G.** (1994). *High performance concrete under high sustained compressive stresses*, (Structural Engineering Report), Department of Civil Engineering, University of Alberta, June 1994.
- [8]. **Buyukozturk, O. ve Lau, D.** (2007). High performance concrete: Fundamentals and application, *The International Conference on Developments and Application of Concrete Technology*, 28-30 November, Istanbul, Turkey.
- [9]. **Aitcin, P.C.** (2003). The durability characteristics of high performance concrete: a review, *Cement and Concrete Composite*, 25, p 409-420
- [10]. **Richard, P. & Cheyrezy, M.** (1995). Composition of reactive powder concrete, *Cement and Concrete Research*, 25, 1501-1511
- [11]. **Richard, P. & Cheyrezy, M.H.** (1994). *Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength*, (Internal Report), 15p., Bouygues
- [12]. **Reinhardt, H.W. & Weber, S.** (1998). Self-curing high performance concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Nov 1998, p 208-209
- [13]. **Staquet S. & Espion B.** (2000). Influence of cement and silica fume type on compressive strength of reactive powder concrete, *6th International Symposium on HPC*, University of Brussels, Belgium, (2000), pp. 1 – 14.

- [14]. **Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J., Aaitcin, P.C.** (1997). Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes, *ACI Materials Journal*, 94, 4, 286–290, 1997.
- [15]. **Taşdemir, M.A. ve Şengül, Ö.** (2013). Normal ve lifli beton karışımlarının performansına dayalı tasarımı, *3.Yapı Denetimi Sempozyumu*, Diyarbakır.
- [16]. **ACI Committee 201.** (1992). *Guide to durable concrete*, American Concrete Institute, ABD
- [17]. **Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D.** (2003). *Concrete*. 2nd Edition. Pearson Education, Inc. NJ, USA.
- [18]. **Gjørv, O.E.** (2003). Durability of concrete structures and performance-based quality control, *International Conference on Performance of Construction Materials in the New Millenium*, Cairo.
- [19]. **Baradan, B. ve Yazıcı, H.** (2013). Betonun dürabilitesi (dayanıklılık, kalıcılık), *Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları*, Kasım-Aralık, İstanbul, 2013.
- [20] **Ann, K.Y., Ahn, J.H., Ryou J.S.** (2009). The importance of chloride content at the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structures, *Construction and Building Materials*, 2009. 23(1): p. 239-245.
- [21] **Song, H.W., Kwon, S.J.** (2009). Evaluation of chloride penetration in high performance concrete using neural network algorithm and micro pore structure, *Cement and Concrete Research*, 2009. 39(9): p. 814-824.
- [22]. **Taşdemir, M.A.** (2005). Betonun dayanım ve dürabiliteye göre tasarım ve üretimi, *İMO İstanbul Şubesi Beton Kurs Notları*, 15 s.
- [23]. **EM 1110-2.** (2002). *Evaluation and repair of concrete structures chapter 3: causes of distress and deterioration of concrete*. US Army Corps of Engineers, 2002.
- [24]. **Gjørv O. E., Sakai, K.** (2000). *Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century, Structural Durability Design*. E&FN Spon, 41-56, 2000, ISBN 0-419-25060-3
- [25]. **TS EN 206.** (2014). *Beton -Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk Standardı*. Türk Standartları Enstitüsü.
- [26]. **ACI 224 R.** (1998). *Control of Cracking in Concrete*, American Concrete Institute, 1998.
- [27]. **Zornoza, E.** (2009) Improvement of the chloride ingress resistance of mortars by using spent cracking catalyst, *Cement and Concrete Research*, 2009. 39(2): p. 126-139.
- [28]. **Costa, A. & Appleton, J.** (1999). Chloride penetration into concrete in marine environment—Part I: Main parameters affecting chloride penetration, *Materials and Structures*, 1999. 32(4): p. 252-259.
- [29]. **ACI 116.R.** (2005). *Cement and Concrete Terminology*. Detroit: American Concrete Institute; 2005
- [30]. **Onaran, K.** (2000). *Malzeme Bilimi*, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul



- [31]. Neville, A.M. (2000). *Properties of Concrete*, Harlow, England; New York: Prentice Hall/Pearson Education, 2000, pp.8, 10, 482-485.
- [32]. Erdoğan, M. (1992). İstanbul ve dolayının yapay agrega potansiyeli, *3.Mühendislik Jeolojisi Sempozyumu*, Ç.Ü. Mühendislik Fakültesi, Adana. 1992.
- [33]. De Schutter, G. & Audenaery, K. (2004). Evaluation of water absorption of concrete as a measure for resistance against carbonation and chloride migration, *Materials and Structures*, No. 37, pp.591-596, 2004.
- [34]. Kroop, J. & Hilsdorf, H.K. (1995). *Performance Criteria for Concrete Durability*, (RILEM Report) 12, E&FN Spon, London, 327 pp., 1995, ISBN 0-419-19880-6
- [35]. Comite Euro-International du Beton. (1989). *Durable concrete structures\_CEB : design guide*, Comite Euro-International du Beton, Bulletin No.182, Lausanne, Switzerland
- [36]. Canadian Strategic Highway Research. (1995). *Concrete durability technical brief*. Available from <http://www.cshrp.org/products/csbf-e5.pdf>.
- [37]. Yeğınobalı, A. (2011). *Silis dumanı betonda kullanımı*, TÇMB/AR-GE/Y01.01, Ankara, 2011.
- [38]. Şengül, Ö., Taşdemir M. A., Koç, İ., Tarhan M., Erenoğlu, T. (2010) Doğal ve endüstriyel mineral katkıları içeren betonların tasarımı, mekanik özellikleri ve dırabilitesi, *İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Bülten. Sayı 110*. Eylül- Ekim 2010. Sayfa 15-21.
- [39]. Goldman, A. & Bentur, A. (1993). The influence of microfillers on enhancement of concrete strength, *Cement and Concrete. Research*, 23,4, pp. 962-972, 1993.
- [40]. Lewis, R., Sear, L., Wainwright, P., Ryle, R. (2003). *Cementitious additions, in Advanced Concrete Technology; Constituent Materials, chapter 3*, Eds. Newman, J. & Choo, B. S., Elsevier Butterworth-Heinemann, Burlington.
- [41]. Şengül, Ö., Taşdemir, M.A., Yüceer, Z. (2005). Uçucu kül ve cüruf içeren betonların klor geçirimsizliğine karşı optimizasyonu, *6. Ulusal Beton Kongresi*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul, s.181-190, 2005.
- [42]. TS EN 1992-1-1. (2009). *Beton Yapıların Projelendirilmesi: Bölüm 1-1: Genel Kurallar ve Bina Kuralları*. Türk Standartları Enstitüsü.
- [43]. BS 8500-1. (2012). *Concrete - Complementary British Standard to BS EN 206-1 - Part 1: Method of Specifying and Guidance for the Specifier*, British Standards Institution.
- [44]. Şengül, Ö. (2011). Klorür etkisindeki betonarme yapıların dırabilitesi için olasılığa dayalı tasarım, *Teknik Dergi*, 2011, 5409-5423.
- [45]. Yatağan, M.S. ve Karagüler, M. E. (2011). Çimento esaslı malzemelerde kısıtlanmış rötre ve dırabilite ilişkisinin incelenmesinde kullanılan deneysel yöntemler, *Hazır Beton Kongresi*, İstanbul.2011

- [46]. **Holt, E. & Levio, M.** (2004). Cracking risks associated with early age shrinkage, *Cement and Concrete Composites, Volume 26*, No. 5, pp.521-530,2004.
- [47]. **Akkaya, Y.** (2013). Sertleşmekte olan beton özelliklerinin çatlak riski açısından değerlendirilmesi, *Hazır Beton Kongresi*, İstanbul.
- [48]. **Alonso C., Andrade C., Khoury, G.A.** (2003). Porosity&Microcracking, *International Centre for Mechanical Sciences*, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.
- [49]. **Erdoğan, T. Y. & Erdem, T. K.** (2002). Buhar kürü uygulamasında beton özelliklerini etkileyen faktörlerden bekleme süresinin önemi. *ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu*, 14 Ekim 2002, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [50]. **Gerwick, B. C.** (1993). *Construction of Prestressed Concrete Structures*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, pp. 19-23, 91-94.
- [51]. **Liu, B., Xie, Y., Li, J.** (2005). Influence of steam curing on the compressive strength of concrete containing supplementary cementing materials, *Cement and Concrete Research, Vol. 35*, 994–998, 2005
- [52]. **Dias, W.P.S., Khoury, G.A., Sullivan, P.J.E.** (1990). Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperature up to 700°C, *ACI Materials Journal, No. 87*, pp. 160-166, 1990.
- [53]. **Stark, J.** (2011). Recent advances in the field of cement hydration and microstructure analysis, *Cement and Concrete Research. Vol. 41*, pp 666-678.
- [54]. **Taylor, G.D.** (2000). *Materials in Construction, An introduction*. Third edition. Pearson education limited. England. U.K, pp 50-51.
- [55]. **Alamri, A.M.** (1988). *Influence of curing on the properties of concrete and mortars in hot climates*, (Ph. D. Thesis), Leeds University, U.K. 1988
- [56]. **Verbeck, G.J. & Helmuth, R.A.** (1968). Structures and physical properties of cement paste. *Proc. 5th Int. Symp. On the Chemistry of Cement, Tokyo, Vol. 3*, pp. 1-32, 1968.
- [57]. **Goto, S. & Roy, D.M.** (1981). The effect of w/c ratio and curing temperature on the permeability of hardened cement paste, *Cement and Concrete Research, Vol. 11, No. 7*, pp. 575-9, 1981.
- [58]. **Kjellsen K.O., Detwiler, R.J., Gjorv, O.E.** (1990a) Pore structure of plain cement pastes hydrated at different temperatures, *Cement and Concrete Research, Vol. 20*, pp. 927- 933, 1990a.
- [59]. **Kjellsen, K.O., Detwiler R.J., Gjorv, O.E.** (1990b). Development of microstructure in plain hydrated at different temperatures, *Cement and Concrete Research, Vol. 21*, pp. 179- 189, 1990b.
- [60]. **Vodak, F., Tirtik, K., Kapickova, O., Hoskova S., Demo P.** (2004). The effect of temperature on strength-porosity relationship for concrete, *Construction and Building Materials, Vol. 18*, pp. 529-534.

- [61]. **ACI 306 R.** (2010). *Guide to Cold Weather Concreting.*
- [62]. **Kosmatka, S. H., Kerkhoff, P., and William, C.** (2010). *Design and Control of Concrete Mixtures.* Portland Cement Association Publication, 2003
- [63]. **Hime, W.G. & Marusin, S. L.** (1999). *Delayed Ettringite Formation: Many Questions and Some Answers,* ACI SP-177, Bernard Erlin (Editor), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1999, pp. 199-206.
- [64]. **Akman, M.S.** (2003). Gecikmiş etrenjit oluşumu (DEF), *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi 5.Ulusal Beton Kongresi,* İstanbul, sayfa:9-16
- [65]. **Heinz, D. & Ludwig, U.** (1987). *Mechanism of Secondary Ettringite Formation in Mortars and Concrete Subjected to Heat Treatment,* ACI SP-100, John M. Scanlon (Editor), American Concrete Institute, Framington Hills, MI, 1987, pp. 2059-2071.
- [66]. **Stark, J. & Seyfarth, K.** (1999). *Ettringite Formation in Hardened Concrete and Resulting Destruction,* ACI SP-177, Bernard Erlin (Editor), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1999, pp. 125-140.
- [67]. **Taşdemir M. A.** (2002). Betonun dayanım ve dürabiliteye göre tasarımı ve üretimi, *İMO İstanbul Şubesi Sürekli Eğitim Seminerleri,* 2 Kasım, 2002, Harbiye-İstanbul.
- [68]. **Campbell, G. & Detwiler, R.** (1993). Development of Mix Designs for Strength and Durability of Steam-Cured Concrete, *Concrete International,* pp.37-39, 1993.
- [69]. **Morsy, M. S.** (1996). *Physico-mechanical studies on thermally treated concrete* (Ph.D. Thesis) Ain Shams University, Egypt 1996
- [70]. **Richardson, M. G.** ( 2002). *Fundamentals of Durable Reinforced Concrete,* First Edition, Spon Pres, pp. 51, 77, 101, 133, 160-179, 194.
- [71]. **Shang, H. Y. & Song, J. O.** (2009). Behaviour of air-entrained concrete after freze thaw cycles, *Acta Mechanica Solida Sinica, Vol. 22, No. 3*
- [72]. **Young, F. J., Mindess, S., Gray, R.J., Bentur, A.** (1998). *The Science and Technology of Civil Engineering Materials,* Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1998.
- [73]. **Pigeon, M. & Pleau, R.** (2006). *Durability of Concrete in Cold Climates.* London: Taylor & Francis.
- [74]. **BS EN 206-1.** (2013). *Concrete. Specification, performance, production and conformity.*
- [75]. **Hale, W. M., Freyne S. F., Russell B. W.** (2008). Examining the frost resistance of high performance concrete, *Construction and Building Materials, Vol.23,* 878-888.
- [76]. **Marchand, J., Pigeon, M., Bager, D., and Talbot, C.** (1999). Influence of chloride solution concentration on deicer salt scaling deterioration of concrete, *ACI Materials Journal, Vol. 96, No. 4, July-Aug.,* pp. 429-435.

- [77]. **Salt Institute.** (2012). *Winter Road Safety*. <http://www.saltinstitute.org/Uses-benefits/Winter-road-safety>. Accessed February 1, 2012
- [78]. **Blackburn, R. R., Bauer, K. M., Amsler, D. E., Boselly S. E., McElroy, A.D.** (2004). *Snow and Ice Control: Guidelines for Materials and Methods*, NCHRP Report 526. Transportation Research Board, 2004.
- [79]. **Harnick, A. B., Meier, V., Rosli, A.** (1980). *Combined Influence of Freezing and Deicing Salt on Concrete: Physical Aspects. Durability of Building Materials and Components*. London, United Kingdom, 1980.
- [80]. **Wang, K., Nelsen D. E., Nixon W. A.** (2006). Damaging effects of deicing chemicals on concrete materials. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 28, No. 2, 2006, pp. 173-188.
- [81]. **Cody, R. D., Cody, A. M., Spry, P.G., Gan., G.L.** (1996). Experimental deterioration of highway concrete by chloride deicing salts. *Environmental & Engineering Geoscience*, Vol. 2, No. 1996, pp. 14.
- [82]. **Hassan, Y.A., El Halim, O. A., Razaqpur, A. G., Bekheet, W., Farha, M. H.** (2002). Effects of runway deicers on pavement materials and mixes: comparison with road salt. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 128, No. 4, 2002, pp. 385-391.
- [83]. **Kurdowski, W.** (2004). The protective layer and decalcification of c-s-h in the mechanism of chloride corrosion of cement paste. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 9, 2004, pp. 1555-1559
- [84]. **Lee, H., Cody, A. M., Cody, R. D., Spry, P. G.** (2000). Effects of various deicing chemicals on pavement concrete deterioration, proceedings, *Mid-Continent Transportation Symposium, Center for Transportation Research and Education*, Iowa State University, Ames, Iowa, pp. 151-155.
- [85]. **Darwin, D., Browning, J., Gong L., Hughes, S. R.** (2008). Effects of deicers on concrete deterioration. *ACI Materials Journal*, Vol. 105, No. 6, 2008, pp. 622-627.
- [86]. **Shi, X., Fay, L., Peterson, M.M., Berry, M., Mooney, M.** (2011). A feseem/edx investigation into how continuous deicer exposure affects the chemistry of portland cement concrete, *Construction and Building Materials*, 25(2), 957-966.
- [87]. **Peterson, O.** (1995). Chemical effects on cement mortar of calcium magnesium acetate as a deicing salt. *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 3, 1995, pp. 617-626.
- [88]. **Sutter, L., Dam, T. V., Peterson, K., Johnston, D.** (2006). Long-term effects of magnesium chloride and other concentrated salt solutions on pavement and structural portland cement concrete: phase I results, *Transportation Research Record*, Vol. 1979, No. 2006, pp. 60-68.
- [89]. **Barbucci, A., Delucchi, M., Cerisola, G.** (1997). Organic coatings for concrete protection. liquid water and water vapor permeabilities, *Progress in Organic Coatings*, Vol.30 (1997) 293-297
- [90]. **Lees, T.P.** (2003). *Durability of Concrete Structures*, edited by Mays, G. (Taylor&Francis e- Library). 2003.

- [91]. Fluckiger, D., Elsener, B., Studer, W., Bohni, H. (1983). *Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete*, Sheffield Academic Press, 1983
- [92]. Pfeifer, D.W. & Perenchio, W.F. (1982). *Rebar Corrosion Problems in Concrete*, Nate, Houston, TX, 1982.
- [93]. Lees, T.P. (1992). *Durability of Concrete Structures*, edited by G. Mays (E&FN Spon, London) 15, 1992.
- [94]. **The National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 244- Series II.** (1981). *Water Absorption, Water Vapor Transmission and Chloride Intrusion*.
- [95]. Kropp, J. & Hilsdorf, H.K. (1995). *Performance criteria for concrete durability*, (RILEM Report 12), Taylor and Francis, Oxford, UK.
- [96]. Al-Zahrani, M.M., Al-Dulaijan, S.U., Ibrahim, M., Saricimen, H., Sharif, F.M. (2002). Effect of waterproofing coatings on steel reinforcement corrosion and physical properties of concrete, *Cement and Concrete Composites*, 24, pp. 127 – 137.
- [97]. Jian-Guo, D., Akira Y., Wittmann, F.H., Yokota, H., Zhang, P. (2010). Water repellent surface impregnation for extension of service life of reinforced concrete structures in marine environments: The role of cracks, *Cement and Concrete Composites*, 32, pp. 101 – 109.
- [98]. Liu, Y. (2006). Super-hydrophobic surfaces from a simple coating method: A bionic nanoengineering approach, *Nanotechnology*, vol. 17, pp. 3259-3263, 2006.
- [99]. Nosonovsky, M. (2007). Multiscale roughness and stability of superhydrophobic biomimetic interfaces, *Langmuir*, vol. 23, no. 6, pp. 3157-3161, 2007.
- [100] Vivian, I. F., Hejazi, V., Nosonovsky, M., Sobolev, K. (2013). Self-assembling particle-siloxane coatings for superhydrophobic concrete, *ACS Applied Materials & Interfaces*, pp. 1-47, 2013.
- [101] Moriconi, G. & Tittarelli, F. (2009). Effectiveness of surface or bulk hydrophobic treatments in cementitious materials, *Protection of Historical Buildings*, pp. 1071-107, 2009.
- [102] Raupach, M. & Wolff, L. (2005). Investigations on long-term durability of hydrophobic treatment on concrete, surface coatings international part B: *Coatings Transactions*, vol. 99(2), pp. 127-133, 2005.
- [103]. Sobolev, K. & Shah, S. (2008). Recent Developments and Future Perspectives, Farmington Hills, MI, USA, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 19(10), pp. 809-819; 93-120, 2007; 2008.
- [104]. Vries, J. & Polder, R.B. (1997) Hydrophobic treatment of concrete, *Construction and Building Materials*, 11, 4, pp. 259 -265.
- [105]. Xiaojian, G. & Ying, Z. (2011). Influence of silane treatment on the freeze-thaw resistance of concrete, *Advanced Materials Research*, vol. 250, pp. 565-568, 2011.

- [106]. **Ibrahim, M. & Al-Gahtani, A.S.** (1999). Use of surface treatment materials to improve concrete durability, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 11(1), pp. 36-40, 1999.
- [107]. **Pfeifer, D.W. & Scali, J.** (1981). Concrete Sealers for Protection of Bridge Structures Department of Transportation, NCHRP 244, Washington DC.
- [108]. **Medeiros, M.H.F. & Helene, P.** (2008). Efficacy of surface hydrophobic agents in reducing water and chloride ion penetration in concrete, *Materials and Structures*, 41, 1, pp. 59 – 71.
- [109]. **Moon, H.Y., Shin, D.G. , Choi, D.S.** (2007). Evaluation of the durability of mortar and concrete applied with inorganic coating material and surface treatment system, *Construction and Building Materials*, 21, pp. 362 – 369.
- [110]. **Schueremans, L., Gemert D.V., Giessler, S.** (2007). Chloride penetration in RC-structures in marine environment-Long term assessment of a preventative hydrophobic treatment, *Construction and Building Materials*, 21, pp. 1238 – 1249.
- [111]. **Wright, J., Shen, Z., Rizkalla, S.** (1993). A three-year field and laboratory evaluation of linseed oil as a concrete sealer. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 20(5), 844-854.
- [112]. **Whiting, N.** (2006). Technical Memorandum: Bridge of Hope Sealing and Chloride Intrusion. Maplewood, MN: Minnesota Department of Transportation: Office of Materials, Minnesota Road Research. November 2006.
- [113]. **McGettigan, E.** (1995). Factors affecting the selection of water-repellent treatments. *Preservation of Historic Masonry*, 26(4), 22-26.
- [114]. **Pincheira, J. A. & Dorshorst, M. A.** (2005). Evaluation of Concrete Deck and Crack Sealers. Madison, WI: Wisconsin Highway Research Program.
- [115]. **Weyers, R. E., Zemajtis, J., Drumm, R. O.** (1995). Service Lives of Concrete Sealers. Transportation Research Record. (1490), 54-59.
- [116]. **Hagen, M. G.** (1995). Field Performance of Penetrating Sealers for Concrete Bridge Decks: Final Report. Minnesota Dept. of Transportation, Office of Minnesota Road Research, Maplewood, MN.
- [117]. **Basheer, L., Cleland, D. J., Long, A. E.** (1998). Protection provided by surface treatments against chloride induced corrosion. *Materials and Structures*. 31(211), 459-464.
- [118]. **Sherman, Matthew R., Carrasquillo, R. L., Fowler, D. W.** (1993). Field Evaluation of Bridge Corrosion Protection Measures, Report No. FHWA/TX-93+1300-1, Texas Department of Transportation, Austin, Texas.
- [119]. **EN 1504-2.** (2005). *Products And Systems For The Protection And Repair Of Concrete Structures. Definitions, Requirements, Quality Control And Evaluation Of Conformity. Part 2: Surface Protection Systems For Concrete.* European Standard.

- [120]. **Attanayake, U., Liang, X., Ng, S., Aktan, H.** (2006). Penetrating sealants for concrete bridge decks-selection procedure. *Journal of Bridge Engineering*. 11(5), 533-540.
- [121]. **Karl, J., Arturo E.S., Catherine, F., Jacob, R.** (2009). Crack and Concrete Deck Sealant Performance. Minnesota Transportation of Department. MN/RC 2009-13 Report. March 2009.
- [122]. **ASTM C-1202.** (2003). *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, Vol. 04.02, pp. 650 - 655
- [123]. **Özalp, F., Akkaya, Y., Sengul, C., Akcay, B., Tasdemir, M. A., and Kocaturk, A. N.** (2007). Curing Effects on Fracture of High Performance Cement Based Composites With Hybrid Steel Fibers, *FraMCoS-6 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, Jun. 17-22 2007, Catania, Italy.
- [124]. **Akman, M.S.** (1997). Betonlarda Karbonatlaşma ve Yeniden Alkalizasyon Süreçleri. *Türkiye İnşaat Mühendisliği 14. Teknik Kongre*, sayfa 403-416.
- [125]. **Akçay, B. ve Taşdemir, M. A.** (2008). Çimentolu Malzemelerin Otojen Deformasyonu ve Kırılma Parametreleri: *İTÜ Mühendislik Dergisi*. Cilt 7. Sayı 2, sayfa 65-74.
- [126]. **Wu, Min., Johannesson, B., Geiker, M.** (2012). A review: Self-healing in Cementitious Materials and Engineered Cementitious Composite as a Self-healing Material, *Construction and Building Materials*, 28, pp. 571 – 583.
- [127]. **Kishi T, Ahn T. H., Hosoda, A., Takaoka, H.** (2007). Self-healing Behavior by Cementitious Recrystallization of Cracked Concrete Incorporating Expansive Agent. *In: Proceedings of the First International Conference on Self-healing Materials, the Netherlands; April 18–20, 2007.*
- [128]. **Zhang, M. H., Tam, C.T., Leow, M.P.** (2003). Effect of Water-to-Cementitious Materials Ratio and Silica Fume on the Autogenous Shrinkage of Concrete, *Cement and Concrete Composites*, 33, pp. 1687 – 1693.
- [129]. **Jennifer, J. S. & Harald, S. M.** (2012). Microstructure of Ultra High Performance Concrete and its Impact of Durability. *3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, Kassel; March 7–9, 2012.
- [130]. **Lewitt M.,** 2007. *Materials, Manufacture, Properties and Usage, Precast Concrete*. pp.26-32, October 2007
- [131]. **Renée M. M. & Henk M. J.** (2012). Bacteria-based self-healing concrete – introduction. *Second International Conference on Microstructural-related Durability of Cementitious Composites*, Amsterdam, 11-13 April 2012.
- [132]. **Russell, H. G. & Graybeal B. A.** (2013). Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community. *U.S.*

*Government of Transportation Federal Highway Administration (FHWA), Report No. FHWA-HRT-13-060, McLean, VA, 46-47, June 2013.*

- [133]. **Graybeal, B.** (2006). Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete, *FHWA, U.S. Department of Transportation*, Report No. FHWA-HRT-06-103, McLean, VA, 2006.





## **EKLER**

**EK A:** Deney sonuçları

**EK B :** İç yapı inceleme resimleri





**EK A****Çizelge A.1 : Betonların 7. günde basınç dayanımları (MPa).**

Numune Kodu	Normal Dayanımlı Betonlar			Yüksek Dayanımlı Betonlar			Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar		
	NN	BN-90	EN	NN	BN-90	EN	NN	BN-90	EN
Numune 1	34,0	26,2	23,6	56,4	51,5	47,3	67,8	83,7	111,5
Numune 2	34,9	25,6	23,3	58,5	50,5	45,7	63,1	84,9	100,4
Numune 3	34,5	26,0	23,5	54,0	49,6	47,1	66,0	85,8	-
Ortalama	34,5	25,9	23,5	56,3	50,5	46,7	65,6	84,8	106,0

**Çizelge A.2 : Betonların 28. günde basınç dayanımları (MPa).**

Numune Kodu	Normal Dayanımlı Betonlar				Yüksek Dayanımlı Betonlar				Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar		
	NN	BN-60	BN-90	EN	NN	BN-60	BN-90	EN	NN	BN-90	EN
Numune 1	47,3	40,6	36,2	33,1	87,2	80,7	76,7	72,5	87,2	109,3	114,2
Numune 2	46,4	42,8	36,2	33,4	85,3	81,3	75,8	74,4	85,2	112,9	111,4
Numune 3	46,2	42,0	37,4	32,4	84,3	81,1	74,9	74,2	88,6	104,7	115,5
Ortalama	46,6	41,8	36,6	33,0	85,6	81,0	75,8	73,7	87,0	109,0	113,7

**Çizelge A.3 : Betonların 365. günde basınç dayanımları (MPa).**

Numune Kodu	Normal Dayanımlı Betonlar				Yüksek Dayanımlı Betonlar				Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar		
	NN	BN-60	BN-90	EN	NN	BN-60	BN-90	EN	NN	BN-90	EN
Numune 1	56,8	50,5	46,8	43,5	97,4	94,0	88,4	85,4	124,5	129,5	131,6
Numune 2	56,2	47,2	45,4	45,0	95,2	89,8	91,4	89,6	128,8	130,4	132,6
Ortalama	56,5	48,9	46,1	44,3	96,3	91,9	89,9	87,5	126,7	130,0	132,1

**Çizelge A.4 : Betonların 28. günde yarma çekme dayanımları (MPa).**

Numune Kodu	Normal Dayanımlı Betonlar				Yüksek Dayanımlı Betonlar				Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar		
	NN	BN-60	BN-90	EN	NN	BN-60	BN-90	EN	NN	BN-90	EN
Numune 1	5,24	4,68	4,51	4,06	7,72	7,14	6,68	6,18	8,95	9,64	9,71
Numune 2	5,31	4,60	4,30	4,00	7,55	7,19	7,12	6,38	9,23	9,84	10,02
Numune 3	5,04	4,61	4,56	4,16	7,41	7,03	6,45	6,41	9,13	9,88	9,69
Ortalama	5,20	4,63	4,46	4,07	7,56	7,12	6,75	6,32	9,10	9,79	9,81

**Çizelge A.5 :** Betonların 140. günde kırılma enerjileri (N/m).

Numune Kodu	Normal Dayanımlı Betonlar				Yüksek Dayanımlı Betonlar				Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar		
	NN	BN-60	BN-90	EN	NN	BN-60	BN-90	EN	NN	BN-90	EN
Numune 1	68	82	70	52	78	70	73	58	35	36	53
Numune 2	69	73	77	66	70	61	73	56	41	50	58
Numune 3	77	67	74	68	82	87	58	49	36	36	52
Ortalama	71	74	74	62	77	73	68	54	37	41	54

**Çizelge A.6 :** Betonların 140. günde net eğilme dayanımları (MPa).

Numune Kodu	Normal Dayanımlı Betonlar				Yüksek Dayanımlı Betonlar				Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar		
	NN	BN-60	BN-90	EN	NN	BN-60	BN-90	EN	NN	BN-90	EN
Numune 1	5,47	5,19	4,39	4,32	6,44	4,73	6,51	6,29	8,99	10,45	12,53
Numune 2	5,22	5,00	5,02	5,40	5,02	5,47	6,58	6,40	9,98	10,51	11,42
Numune 3	5,95	5,18	4,97	5,31	5,49	5,36	5,78	5,97	9,51	10,02	11,52
Ortalama	5,55	5,12	4,79	5,01	5,65	5,19	6,29	6,22	9,49	10,33	11,82

**Çizelge A.7 :** Betonların 480. günde elastisite modülleri (GPa) ve karakteristik boy değerleri (mm).

	Normal Dayanımlı Betonlar				Yüksek Dayanımlı Betonlar				Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar		
	NN	BN-60	BN-90	EN	NN	BN-60	BN-90	EN	NN	BN-90	EN
Elastisite Modülü	43,0	42,1	41,4	40,8	48,6	46,6	48,7	45,2	49,7	44,7	47,5
Karakteristik Boy	113	145	154	152	66	64	78	66	21	17	26

**Çizelge A.8 :** Betonların 28. günde hızlı klor iyonu geçirimsizlikleri (C).

Numune Kodu	Normal Dayanımlı Betonlar				Yüksek Dayanımlı Betonlar				Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar		
	NN	BN-60	BN-90	EN	NN	BN-60	BN-90	EN	NN	BN-90	EN
Numune 1	5953	7657	8251	8978	3026	3175	3650	4013	308	8	23
Numune 2	6356	7385	8118	9629	2871	3010	3445	4005	356	7	22
Numune 3	5942	7983	8108	9698	3048	3238	3495	3980	310	7	23
Ortalama	6084	7675	8159	9435	2982	3141	3530	3999	325	7	23

**Çizelge A.9 :** Betonların 28. günde hızlı klor iyonu geçirimsizlikleri (mA).

Numune Kodu	Normal Dayanımlı Betonlar			Yüksek Dayanımlı Betonlar			Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar		
	NN	BN-90	EN	NN	BN-90	EN	NN	BN-90	EN
Numune 1	184,8	220,8	204,4	112,8	121,2	130,8	13,4	0,3	1,0
Numune 2	179,4	193,2	253,4	101,4	128,6	135,1	13,8	0,2	0,9
Numune 3	162,0	-	-	106,9	126,9	-	13,3	0,2	1,0
Ortalama	175,4	207,0	228,9	107,0	125,6	133,0	13,5	0,2	1,0

**Çizelge A.10 :** Betonların 28. günde kılcal su emme değerleri (mm).

NDB				YDB				UYDB			Karekök Süre ( $S_n^{1/2}$ )
NN	BN-60	BN-90	EN	NN	BN-60	BN-90	EN	NN	BN-90	EN	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,064	0,068	0,047	0,055	0,047	0,030	0,008	0,021	0,017	0,021	0,021	8
0,068	0,098	0,072	0,136	0,055	0,038	0,025	0,034	0,030	0,038	0,030	17
0,098	0,115	0,098	0,183	0,064	0,038	0,025	0,042	0,030	0,038	0,042	24
0,123	0,149	0,132	0,263	0,072	0,051	0,042	0,059	0,030	0,038	0,042	35
0,136	0,161	0,149	0,314	0,072	0,064	0,055	0,068	0,030	0,042	0,042	42
0,200	0,221	0,187	0,386	0,106	0,085	0,064	0,089	0,034	0,042	0,047	60
0,225	0,301	0,276	0,573	0,136	0,106	0,089	0,123	0,055	0,047	0,059	85
0,259	0,344	0,331	0,679	0,136	0,119	0,098	0,136	0,055	0,047	0,064	104
0,285	0,369	0,357	0,756	0,153	0,132	0,110	0,153	0,059	0,059	0,064	120
0,293	0,391	0,382	0,815	0,157	0,140	0,115	0,166	0,068	0,064	0,072	134
0,450	0,671	0,752	1,533	0,212	0,234	0,208	0,306	0,102	0,081	0,119	304
0,594	0,968	1,189	2,259	0,259	0,280	0,280	0,425	0,110	0,119	0,153	518
0,628	1,049	1,299	2,386	0,276	0,293	0,314	0,480	0,132	0,119	0,153	588
0,645	1,104	1,363	2,446	0,285	0,306	0,352	0,539	0,132	0,119	0,157	657
0,667	1,176	1,448	2,471	0,293	0,318	0,365	0,616	0,136	0,127	0,174	831

**Çizelge A.11 :** Betonların 28. günde basınç altında su işleme derinlikleri (mm).

Numune Kodu	Normal Dayanımlı Betonlar				Yüksek Dayanımlı Betonlar				Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar		
	NN	BN-60	BN-90	EN	NN	BN-60	BN-90	EN	NN	BN-90	EN
Numune 1	15,5	18,0	21,5	29,5	6,0	8,0	9,5	10,5	0	0	0
Numune 2	12,5	21,0	22,0	33,5	5,0	6,5	8,0	9,5	0	0	0
Ortalama	14,0	19,5	22,0	31,5	5,5	7,5	9,0	10,0	0	0	0

**Çizelge A.12 :** Paspayı kullanılan betonların hızlı klor iyonu geçirimsizlikleri (C).

Numune Kodu	Normal Dayanımlı Betonlar		Yüksek Dayanımlı Betonlar		Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar	
	Beton Paspayı	Plastik Paspayı	Beton Paspayı	Plastik Paspayı	Beton Paspayı	Plastik Paspayı
Numune 1	4365	3728	1660	1595	119	154
Numune 2	3972	3563	1919	1876	127	256
Numune 3	-	-	2172	1569	100	259
Ortalama	4169	3646	1917	1680	115	223

**Çizelge A.13 :** Paspayı kullanılan betonların hızlı klor iyonu geçirimsizlikleri (mA).

Numune Kodu	Normal Dayanımlı Betonlar		Yüksek Dayanımlı Betonlar		Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar	
	Beton Paspayı	Plastik Paspayı	Beton Paspayı	Plastik Paspayı	Beton Paspayı	Plastik Paspayı
Numune 1	119,7	101,8	59,7	64,1	4,8	4,6
Numune 2	116,8	109,7	73,1	80,4	5,3	8,5
Numune 3	-	-	78,9	64,0	4,4	10,0
Ortalama	118,3	105,8	70,6	69,5	4,8	7,7

**Çizelge A.14 :** Paspayları kullanılan betonların 28. günde kılcal su emme değerleri (mm).

BETON PASPAYI			PLASTİK PASPAYI			Karekök Süre ( $S_n^{1/2}$ )
NDB	YDB	UYDB	NDB	YDB	UYDB	
0	0	0	0	0	0	0
0,057	0,081	0,047	0,102	0,136	0,102	8
0,121	0,144	0,089	0,204	0,217	0,136	17
0,166	0,174	0,115	0,261	0,259	0,153	24
0,204	0,208	0,144	0,318	0,306	0,153	35
0,223	0,234	0,174	0,369	0,357	0,153	42
0,268	0,268	0,191	0,446	0,403	0,178	60
0,350	0,323	0,238	0,548	0,471	0,217	85
0,363	0,327	0,251	0,586	0,505	0,221	104
0,420	0,352	0,259	0,656	0,548	0,234	120
0,459	0,365	0,268	0,713	0,586	0,234	134
0,752	0,531	0,357	1,102	0,777	0,318	304
0,936	0,611	0,395	1,350	0,875	0,361	440
1,032	0,675	0,416	1,484	0,921	0,391	518
1,146	0,718	0,437	1,599	0,947	0,425	588
1,268	0,781	0,484	1,739	1,028	0,476	789
1,312	0,811	0,497	1,783	1,079	0,493	831

**Çizelge A.15 :** Paspayı kullanılan betonların 140. günde kılcal su emme değerleri (mm).

BETON PASPAYI			PLASTİK PASPAYI			Karekök Süre ( $S_n^{1/2}$ )
NDB	YDB	UYDB	NDB	YDB	UYDB	
0	0	0	0	0	0	0
0,057	0,051	0,051	0,127	0,102	0,089	8
0,096	0,070	0,076	0,223	0,191	0,102	17
0,134	0,083	0,083	0,274	0,229	0,102	24
0,159	0,115	0,089	0,350	0,280	0,115	35
0,191	0,127	0,108	0,427	0,344	0,115	42
0,223	0,153	0,127	0,510	0,420	0,127	60
0,274	0,185	0,134	0,643	0,535	0,140	85
0,312	0,210	0,146	0,732	0,599	0,153	104
0,344	0,223	0,159	0,815	0,662	0,153	120
0,389	0,236	0,166	0,879	0,726	0,153	134
0,401	0,268	0,191	0,943	0,803	0,204	147
0,624	0,395	0,242	1,420	1,299	0,229	304
1,045	0,662	0,350	2,236	1,924	0,344	789
1,070	0,682	0,350	2,274	1,962	0,357	831

**Çizelge A.16 :** Paspayı kullanılmayan referans betonlar ve beton paspayı kullanılan betonların hızlı klor iyonu geçirimsizlikleri (C).

Numune Kodu	Normal Dayanımlı Betonlar		Yüksek Dayanımlı Betonlar		Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar	
	REF.	BP	REF.	BP	REF.	BP
Numune 1	2678	3012	881	872	202	290
Numune 2	2856	2882	837	928	226	266
Ortalama	2767	2947	859	900	214	278

**Çizelge A.17 :** Paspayı kullanılmayan referans betonlar ve beton paspayı kullanılan betonların hızlı klor iyonu geçirimsizlikleri (mA).

Numune Kodu	Normal Dayanımlı Betonlar		Yüksek Dayanımlı Betonlar		Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar	
	REF.	BP	REF.	BP	REF.	BP
Numune 1	87,6	89,2	34,9	38,0	9,8	12,7
Numune 2	89,0	90,8	35,7	36,2	10,4	12,1
Ortalama	88,3	90,0	35,3	37,1	10,1	12,4

**Çizelge A.18 :** Paspayı kullanılmayan referans betonlar ve beton paspayı kullanılan betonların kılcal su emme değerleri (mm).

PASPAYI KULLANILMAYAN-REFERANS			BETON PASPAYI			Karekök Süre (Sn <sup>1/2</sup> )
NDB	YDB	UYDB	NDB	YDB	UYDB	
0	0	0	0	0	0	0
0,127	0,076	0,038	0,153	0,102	0,064	8
0,229	0,140	0,076	0,280	0,217	0,115	17
0,318	0,191	0,102	0,357	0,268	0,153	24
0,382	0,255	0,115	0,446	0,331	0,178	35
0,459	0,280	0,140	0,522	0,369	0,217	42
0,561	0,318	0,166	0,650	0,433	0,255	60
0,688	0,357	0,178	0,803	0,497	0,318	85
0,828	0,408	0,191	0,943	0,586	0,331	104
0,917	0,433	0,191	1,032	0,637	0,344	120
0,955	0,459	0,204	1,108	0,662	0,369	134
1,006	0,459	0,217	1,134	0,675	0,382	147
1,427	0,561	0,268	1,605	0,854	0,459	304
1,860	0,701	0,382	2,051	1,146	0,624	789
1,898	0,713	0,395	2,076	1,172	0,624	831

**Çizelge A.19 :** Referans ve çatlaklı betonların kılcal su emme değerleri (mm).

Normal Dayanımlı Betonlar (NDB)		Yüksek Dayanımlı Betonlar (YDB)		Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar (UYDB)		Karekök Süre
Çatlak Var	Çatlak Yok	Çatlak Var	Çatlak Yok	Çatlak Var	Çatlak Yok	
0	0	0	0	0	0	0
0,1655	0,064	0,073	0,038	0,038	0,019	8
0,22	0,096	0,092	0,064	0,038	0,025	17
0,2645	0,127	0,1085	0,070	0,0445	0,038	24
0,3345	0,153	0,1335	0,070	0,048	0,038	35
0,3725	0,172	0,1465	0,076	0,048	0,045	42
0,4555	0,185	0,1845	0,115	0,064	0,045	60
0,557	0,223	0,2005	0,115	0,0765	0,045	85
0,5955	0,268	0,2035	0,121	0,08	0,045	104
0,659	0,287	0,226	0,134	0,089	0,064	120
0,6945	0,312	0,2355	0,146	0,099	0,076	134
0,7355	0,318	0,2485	0,153	0,102	0,076	147
0,9335	0,465	0,312	0,210	0,159	0,108	304



**Çizelge A.20 :** Tecrit malzemesi uygulanan betonların kılcal su emme değerleri (mm).

TM -VAR			TM-YOK			Karekök Süre (Sn <sup>1/2</sup> )
NDB	YDB	UYDB	NDB	YDB	UYDB	
0	0	0	0	0	0	0
0,038	0,025	0,000	0,140	0,108	0,013	8
0,064	0,038	0,006	0,191	0,121	0,019	17
0,070	0,045	0,013	0,217	0,159	0,019	24
0,083	0,045	0,019	0,306	0,178	0,032	35
0,083	0,064	0,019	0,369	0,223	0,032	42
0,089	0,064	0,019	0,471	0,280	0,045	60
0,102	0,070	0,025	0,586	0,312	0,045	85
0,108	0,076	0,025	0,675	0,344	0,057	104
0,140	0,076	0,025	0,764	0,376	0,057	120
0,159	0,089	0,032	0,803	0,395	0,064	134
0,166	0,089	0,038	0,854	0,414	0,070	147
0,280	0,115	0,083	1,121	0,497	0,115	304

**Çizelge A.21 :** Yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri uygulanan betonların kılcal su emme değerleri (mm).

TM -VAR			TM-VAR+YAŞLANDIRMA			Karekök Süre (Sn <sup>1/2</sup> )
NDB	YDB	UYDB	NDB	YDB	UYDB	
0	0	0	0	0	0	0
0,038	0,025	0,000	0,045	0,051	0,006	8
0,064	0,038	0,006	0,064	0,064	0,019	17
0,070	0,045	0,013	0,076	0,076	0,032	24
0,083	0,045	0,019	0,089	0,083	0,032	35
0,083	0,064	0,019	0,102	0,108	0,032	42
0,089	0,064	0,019	0,121	0,121	0,038	60
0,102	0,070	0,025	0,140	0,121	0,038	85
0,108	0,076	0,025	0,166	0,127	0,051	104
0,140	0,076	0,025	0,191	0,127	0,057	120
0,159	0,089	0,032	0,210	0,153	0,057	134
0,166	0,089	0,038	0,223	0,159	0,064	147
0,280	0,115	0,083	0,357	0,172	0,102	304

**Çizelge A.22 :** Yaşlandırma ve donma çözülme çevrimleri uygulanan referans betonların kılcal su emme değerleri (mm).

TM –YOK (ŞAHİT)			TM-YOK (ŞAHİT+YAŞLANDIRMA)			Karekök Süre ( $S_n^{1/2}$ )
NDB	YDB	UYDB	NDB	YDB	UYDB	
0	0	0	0	0	0	0
0,006	0,013	0,006	0,025	0,019	0,013	8
0,019	0,013	0,013	0,025	0,019	0,019	17
0,025	0,013	0,019	0,045	0,032	0,032	24
0,025	0,019	0,019	0,051	0,032	0,038	35
0,032	0,019	0,025	0,057	0,038	0,045	42
0,032	0,025	0,038	0,076	0,057	0,064	60
0,032	0,025	0,038	0,089	0,070	0,070	85
0,045	0,032	0,045	0,096	0,076	0,076	104
0,045	0,045	0,045	0,115	0,089	0,089	120
0,051	0,045	0,051	0,140	0,096	0,089	134
0,051	0,045	0,057	0,153	0,127	0,096	147
0,070	0,064	0,064	0,191	0,146	0,108	304

**Çizelge A.23 :** Tecrit malzemesi uygulanmadan önce betonların kılcal su emme değerleri (mm).

NDB			YDB			UYDB			Karekök Süre ( $S_n^{1/2}$ )
TM YOK	TM VAR*	TM VAR	TM YOK	TM VAR*	TM VAR	TM YOK	TM VAR*	TM VAR	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,386	0,331	0,471	0,217	0,191	0,408	0,051	0,038	0,038	8
0,641	0,516	0,739	0,301	0,274	0,471	0,059	0,051	0,051	17
0,854	0,790	0,962	0,374	0,357	0,561	0,068	0,076	0,051	24
0,964	0,847	1,064	0,416	0,369	0,599	0,072	0,076	0,064	35
1,121	0,943	1,185	0,459	0,408	0,662	0,085	0,083	0,07	42
1,321	1,115	1,338	0,522	0,471	0,732	0,102	0,089	0,083	60
1,571	1,325	1,529	0,611	0,541	0,803	0,127	0,115	0,108	85
1,732	1,471	1,650	0,654	0,599	0,879	0,136	0,121	0,108	104
1,830	1,567	1,732	0,705	0,624	0,904	0,14	0,127	0,108	120
1,915	1,650	1,796	0,747	0,656	0,943	0,149	0,14	0,121	134
1,996	1,739	1,866	0,798	0,694	0,975	0,161	0,153	0,121	147
2,522	2,255	2,248	0,947	0,828	1,146	0,217	0,191	0,146	304
2,828	2,618	2,535	1,087	0,955	1,248	0,272	0,261	0,236	440
3,074	2,930	2,758	1,257	1,096	1,401	0,365	0,35	0,293	588
3,168	3,013	2,834	1,312	1,159	1,471	0,399	0,401	0,338	789
3,261	3,127	2,943	1,41	1,236	1,573	0,437	0,446	0,376	831

**Çizelge A.24 :** Tecrit malzemesi uygulanmasından sonra betonların kılcal su emme değerleri (mm).

NDB			YDB			UYDB			Karekök Süre (Sn <sup>1/2</sup> )
TM YOK	TM VAR*	TM VAR	TM YOK	TM VAR*	TM VAR	TM YOK	TM VAR*	TM VAR	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,386	0,025	0,032	0,217	0,006	0,000	0,051	0,013	0,006	8
0,641	0,025	0,038	0,301	0,006	0,019	0,059	0,019	0,013	17
0,854	0,032	0,038	0,374	0,025	0,019	0,068	0,032	0,019	24
0,964	0,038	0,051	0,416	0,032	0,025	0,072	0,038	0,025	35
1,121	0,038	0,064	0,459	0,032	0,025	0,085	0,038	0,025	42
1,321	0,038	0,064	0,522	0,032	0,038	0,102	0,038	0,038	60
1,571	0,064	0,070	0,611	0,045	0,045	0,127	0,051	0,051	85
1,732	0,064	0,076	0,654	0,051	0,064	0,136	0,051	0,057	104
1,830	0,076	0,083	0,705	0,064	0,064	0,140	0,057	0,057	120
1,915	0,076	0,096	0,747	0,064	0,070	0,149	0,064	0,064	134
1,996	0,083	0,096	0,798	0,070	0,070	0,161	0,064	0,064	147
2,522	0,146	0,159	0,947	0,108	0,121	0,217	0,121	0,089	304
2,828	0,204	0,210	1,087	0,166	0,178	0,272	0,140	0,127	440
3,074	0,293	0,299	1,257	0,210	0,242	0,365	0,172	0,159	588
3,168	0,363	0,357	1,312	0,293	0,312	0,399	0,210	0,185	789
3,261	0,395	0,382	1,410	0,306	0,338	0,437	0,229	0,197	831

**Çizelge A.25 :** 28 çevrim yaşlandırma ve donma çözülme sonrası betonların kılcal su emme değerleri (mm).

NDB			YDB			UYDB			Karekök Süre (Sn <sup>1/2</sup> )
TM YOK	TM VAR*	TM VAR	TM YOK	TM VAR*	TM VAR	TM YOK	TM VAR*	TM VAR	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,170	0,013	0,045	0,093	0,019	0,045	0,030	0,013	0,025	8
0,323	0,038	0,070	0,166	0,038	0,045	0,051	0,025	0,038	17
0,399	0,045	0,076	0,195	0,038	0,057	0,068	0,032	0,045	24
0,484	0,051	0,083	0,255	0,057	0,057	0,068	0,045	0,051	35
0,556	0,051	0,083	0,276	0,057	0,057	0,076	0,045	0,051	42
0,705	0,076	0,083	0,331	0,057	0,076	0,076	0,045	0,051	60
0,845	0,076	0,096	0,391	0,070	0,089	0,106	0,064	0,057	85
0,981	0,089	0,127	0,450	0,076	0,089	0,106	0,064	0,070	104
1,057	0,102	0,127	0,476	0,083	0,089	0,110	0,070	0,070	120
1,117	0,146	0,127	0,501	0,083	0,096	0,110	0,070	0,076	134
1,694	0,229	0,280	0,722	0,127	0,185	0,140	0,121	0,134	304
1,958	0,350	0,338	0,841	0,185	0,223	0,183	0,146	0,153	440
2,276	0,510	0,573	1,057	0,318	0,382	0,246	0,153	0,287	789
2,314	0,554	0,599	1,100	0,325	0,395	0,255	0,159	0,287	831

**Çizelge A.26 :** 84 çevrim yaşlandırma ve donma çözülme sonrası betonların kılcal su emme değerleri (mm).

NDB			YDB			UYDB			Karekök Süre (Sn <sup>1/2</sup> )
TM YOK	TM VAR*	TM VAR	TM YOK	TM VAR*	TM VAR	TM YOK	TM VAR*	TM VAR	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,064	0,032	0,032	0,038	0,025	0,096	0,076	0,006	0,083	8
0,170	0,032	0,070	0,106	0,025	0,121	0,098	0,013	0,102	17
0,200	0,045	0,108	0,115	0,032	0,127	0,136	0,013	0,102	24
0,280	0,045	0,134	0,149	0,032	0,146	0,157	0,013	0,108	35
0,331	0,051	0,191	0,170	0,051	0,159	0,183	0,019	0,127	42
0,365	0,076	0,236	0,195	0,051	0,185	0,208	0,038	0,146	60
0,442	0,108	0,331	0,263	0,057	0,217	0,246	0,045	0,191	85
0,514	0,146	0,382	0,369	0,070	0,274	0,327	0,045	0,268	120
0,527	0,166	0,427	0,391	0,096	0,274	0,344	0,045	0,325	134
0,535	0,178	0,433	0,416	0,102	0,306	0,369	0,051	0,338	147
0,739	0,312	0,624	0,645	0,140	0,395	0,501	0,070	0,439	304
0,943	0,548	0,707	0,900	0,210	0,541	0,586	0,121	0,497	518
0,964	0,611	0,771	1,023	0,274	0,599	0,628	0,134	0,541	588
1,070	0,758	0,815	1,062	0,299	0,656	0,684	0,134	0,554	657
1,121	0,815	0,834	1,083	0,331	0,675	0,701	0,146	0,573	726
1,185	0,841	0,885	1,130	0,331	0,707	0,764	0,159	0,573	789
1,227	0,885	0,924	1,176	0,357	0,745	0,790	0,178	0,573	831

**Çizelge A.27 :** 112 çevrim yaşlandırma ve donma çözülme sonrası betonların kılcal su emme değerleri (mm).

NDB			YDB			UYDB			Karekök Süre (Sn <sup>1/2</sup> )
TM YOK	TM VAR*	TM VAR	TM YOK	TM VAR*	TM VAR	TM YOK	TM VAR*	TM VAR	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,459	0,025	0,038	0,051	0,025	0,045	0,064	0,013	0,025	8
0,637	0,051	0,083	0,089	0,038	0,070	0,064	0,013	0,038	17
0,726	0,051	0,121	0,115	0,051	0,089	0,064	0,013	0,038	24
0,790	0,064	0,166	0,166	0,051	0,127	0,076	0,038	0,051	35
0,803	0,064	0,197	0,166	0,064	0,127	0,089	0,038	0,057	42
0,955	0,089	0,268	0,229	0,064	0,166	0,102	0,038	0,083	60
1,096	0,127	0,331	0,280	0,076	0,197	0,115	0,038	0,083	85
1,108	0,166	0,408	0,293	0,076	0,204	0,115	0,038	0,089	104
1,197	0,217	0,452	0,306	0,076	0,204	0,115	0,038	0,089	120
1,287	0,242	0,510	0,369	0,102	0,236	0,115	0,051	0,102	134
1,287	0,242	0,510	0,369	0,115	0,236	0,115	0,051	0,102	147
1,822	0,433	0,828	0,535	0,166	0,357	0,166	0,102	0,134	304
2,051	0,573	1,096	0,650	0,217	0,408	0,191	0,127	0,140	518
2,306	0,701	1,459	0,803	0,306	0,529	0,255	0,153	0,204	657
2,331	0,879	1,764	0,904	0,420	0,611	0,280	0,178	0,223	789
2,331	0,943	1,834	0,943	0,459	0,656	0,293	0,204	0,236	831

**Çizelge A.28 :** 196 çevrim yaşlandırma ve donma çözülme sonrası betonların kılcal su emme değerleri (mm).

NDB			YDB			UYDB			Karekök Süre (Sn <sup>1/2</sup> )
TM YOK	TM VAR*	TM VAR	TM YOK	TM VAR*	TM VAR	TM YOK	TM VAR*	TM VAR	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,516	0,025	0,261	0,548	0,013	0,051	0,025	0,025	0,006	8
1,936	0,025	0,395	0,599	0,025	0,070	0,025	0,051	0,006	17
2,038	0,038	0,497	0,599	0,025	0,083	0,064	0,051	0,032	24
2,140	0,038	0,548	0,624	0,051	0,089	0,064	0,051	0,032	35
2,166	0,064	0,586	0,624	0,051	0,102	0,064	0,051	0,038	42
2,280	0,064	0,771	0,688	0,064	0,127	0,064	0,064	0,045	60
2,306	0,076	0,981	0,688	0,064	0,153	0,076	0,064	0,051	85
2,318	0,089	1,025	0,701	0,064	0,153	0,076	0,064	0,057	104
2,382	0,115	1,127	0,739	0,076	0,172	0,089	0,064	0,064	120
2,535	0,217	1,573	0,904	0,166	0,293	0,178	0,102	0,089	304
2,599	0,331	1,745	1,006	0,242	0,382	0,191	0,127	0,127	440
2,637	0,522	1,854	1,121	0,331	0,503	0,217	0,166	0,178	657
2,701	0,611	1,904	1,172	0,382	0,567	0,242	0,178	0,178	789
2,701	0,637	1,930	1,210	0,420	0,611	0,268	0,204	0,197	831

**Çizelge A.29 :** Tecrit malzemesinin betonların hızlı klor iyonu geçirimsizliğine etkisi.

Numune Kodu	Normal Dayanımlı Betonlar		Yüksek Dayanımlı Betonlar		Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar	
	TM-VAR	TM-YOK	TM-VAR	TM-YOK	TM-VAR	TM-YOK
Numune 1	1524	2772	722	1213	55	72
Numune 2	1423	3235	628	949	46	59
Numune 3	1558	2645	998	1085	53	53
Ortalama	1502	2884	783	1082	51	61

**Çizelge A.30 :** Tecrit malzemesinin betonların hızlı klor iyonu geçirimsizliğine etkisi (mA).

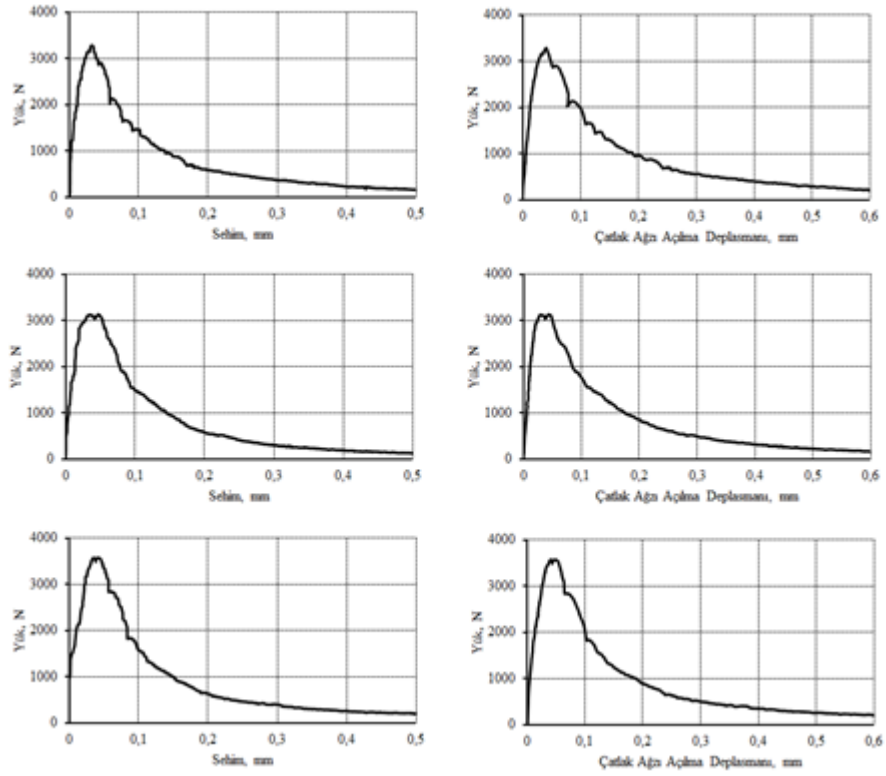
Numune Kodu	Normal Dayanımlı Betonlar		Yüksek Dayanımlı Betonlar		Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar	
	TM-VAR	TM-YOK	TM-VAR	TM-YOK	TM-VAR	TM-YOK
Numune 1	38,7	110,6	30,1	51,3	2,4	3,0
Numune 2	41,0	114,7	27,4	40,2	2,1	2,6
Numune 3	38,1	98,7	-	42,9	2,3	2,3
Ortalama	39,6	108,0	28,8	44,8	2,3	2,6

**Çizelge A.31 :** Yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerinin betonların hızlı klor iyonu geçirimsizliğine etkisi (C).

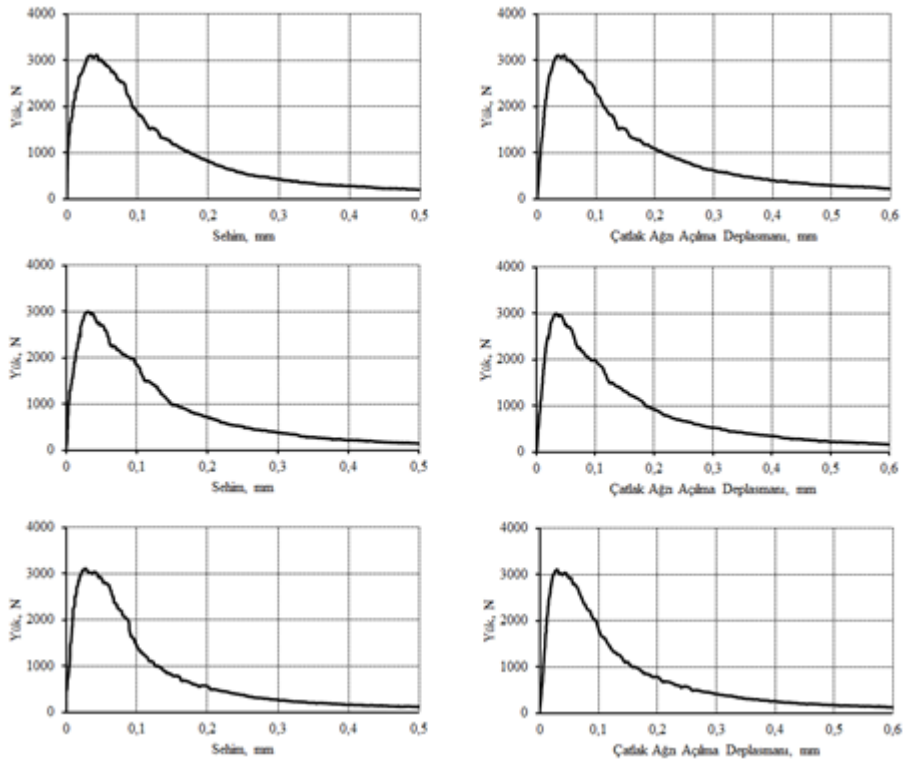
Karışım Kodu	Normal Dayanımlı Betonlar			Yüksek Dayanımlı Betonlar			Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar		
	TM	TM-YAŞL. 84	TM-YAŞL. 196	TM	TM-YAŞL. 84	TM-YAŞL. 196	TM	TM-YAŞL. 84	TM-YAŞL. 196
Numune 1	1524	896	5763	722	343	1056	55	4	2
Numune 2	1558	695	5439	628	219	1127	46	4	2
Numune 3	1423	-	-	-	-	-	53	-	-
Ortalama	1502	796	5601	675	281	1092	51	4	2

**Çizelge A.32 :** Yaşlandırma ve donma çözülme çevrimlerinin betonların hızlı klor iyonu geçirimsizliğine etkisi (mA).

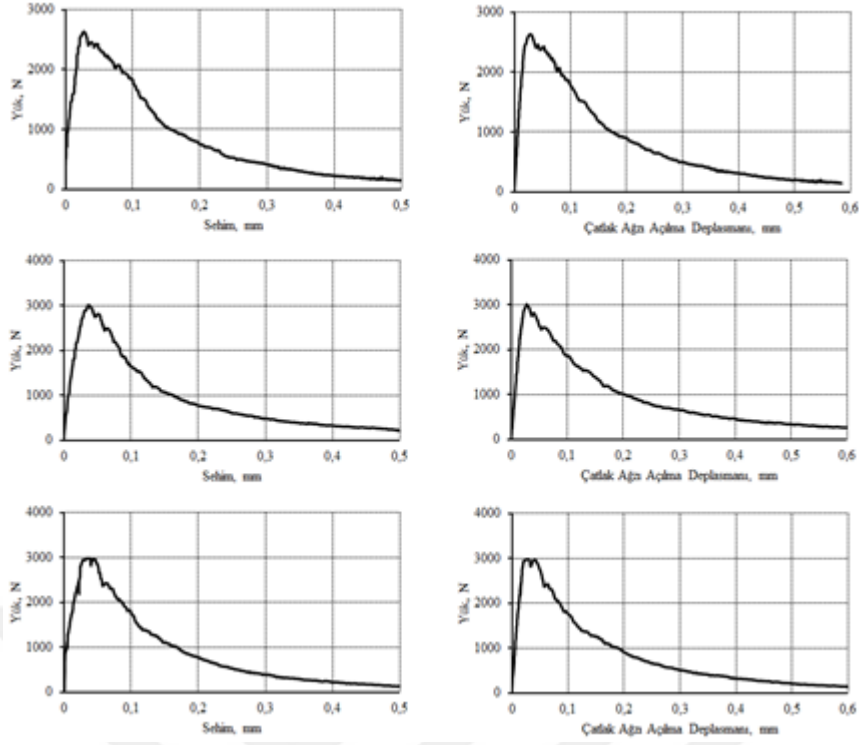
Karışım Kodu	Normal Dayanımlı Betonlar			Yüksek Dayanımlı Betonlar			Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar		
	TM	TM-YAŞL. 84	TM-YAŞL. 196	TM	TM-YAŞL. 84	TM-YAŞL. 196	TM	TM-YAŞL. 84	TM-YAŞL. 196
Numune 1	38,7	28,5	156,4	30,1	11,6	45,1	2,4	0,2	0,1
Numune 2	41,0	24,0	162,0	27,4	10,1	43,2	2,1	0,2	0,1
Numune 3	38,1	-	-	-	-	-	2,3	-	-
Ortalama	39,3	26,3	159,2	28,8	10,9	44,2	2,3	0,2	0,1



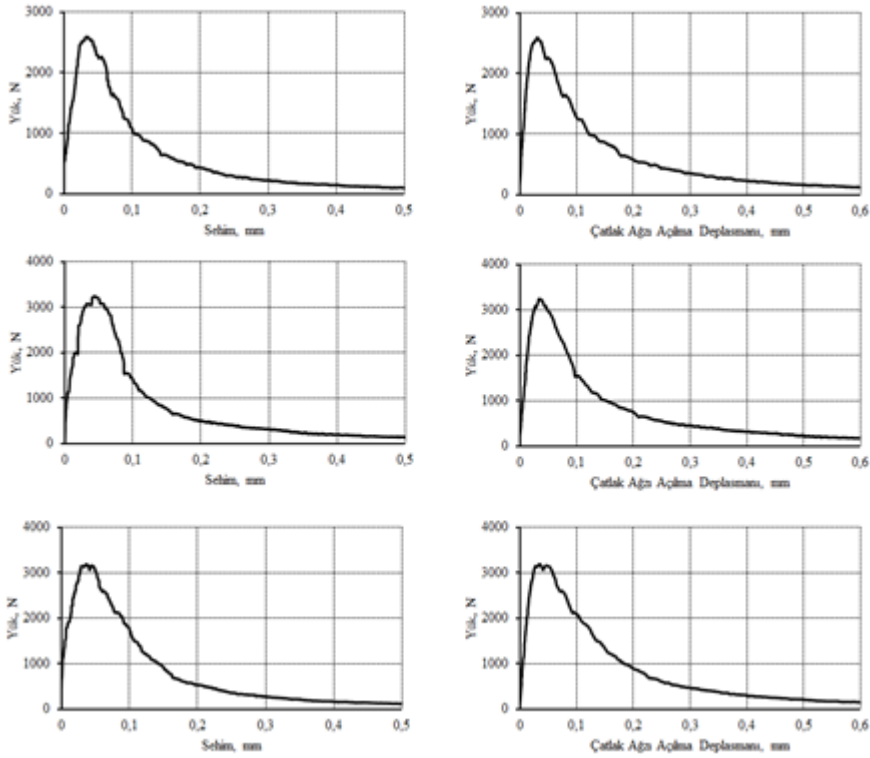
**Şekil A.1 :** Su kürü uygulanan normal dayanımlı betonların yük- sehim ve yük- çatlak ağız açılma deplasmanı eğrileri.



**Şekil A.2 :** Buhar kürü (60°C) uygulanan normal dayanımlı betonların yük- sehim ve yük- çatlak ağız açılma deplasmanı eğrileri.

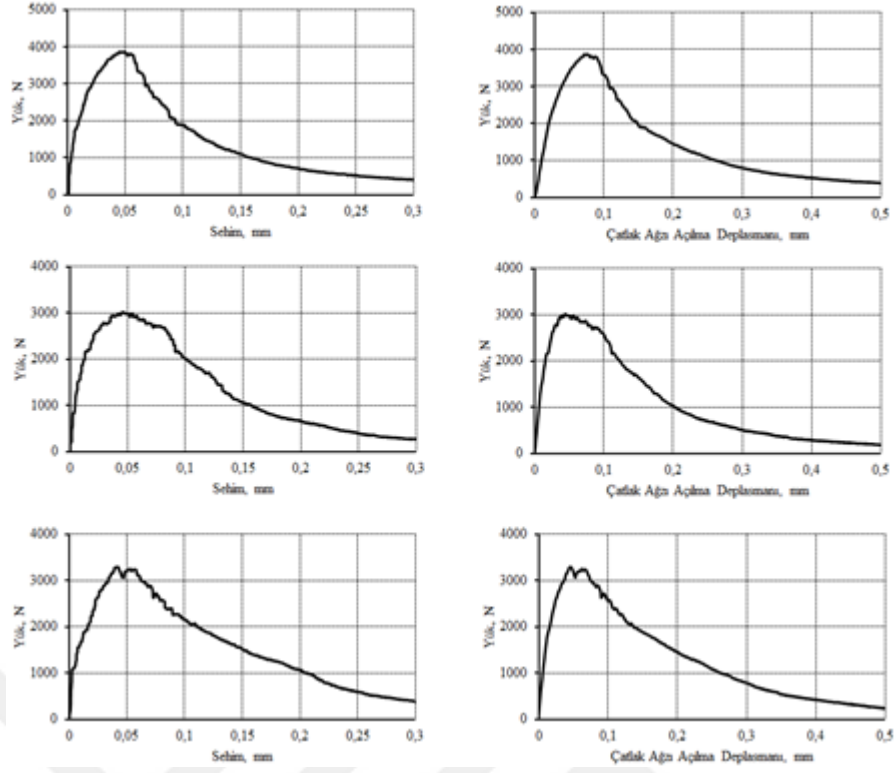


**Şekil A.3 :** Buhar kuru (90°C) uygulanan normal dayanımlı betonların yük- sehim ve yük- çatlak ağız açılma deplasmanı eğrileri.

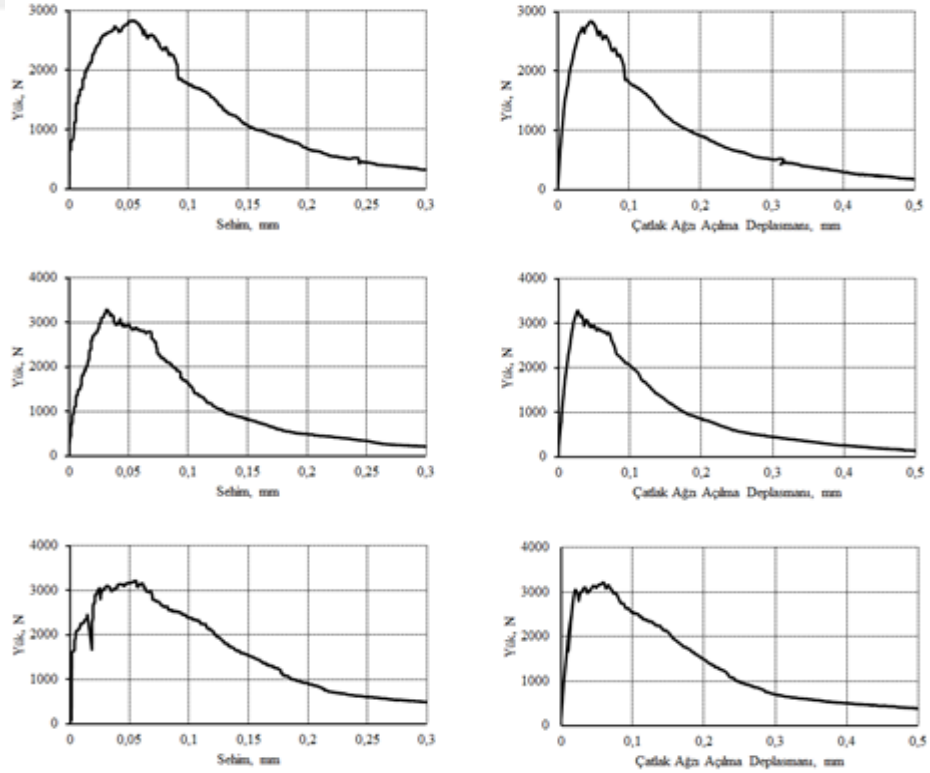


**Şekil A.4 :** Etüv kuru (150°C) uygulanan normal dayanımlı betonların yük- sehim ve yük- çatlak ağız açılma deplasmanı eğrileri.

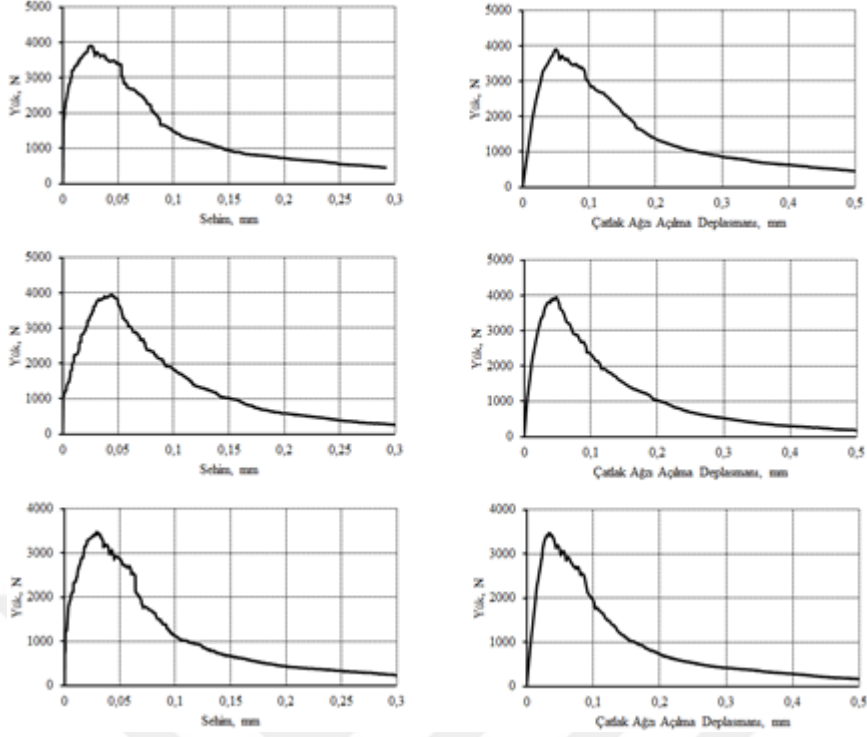




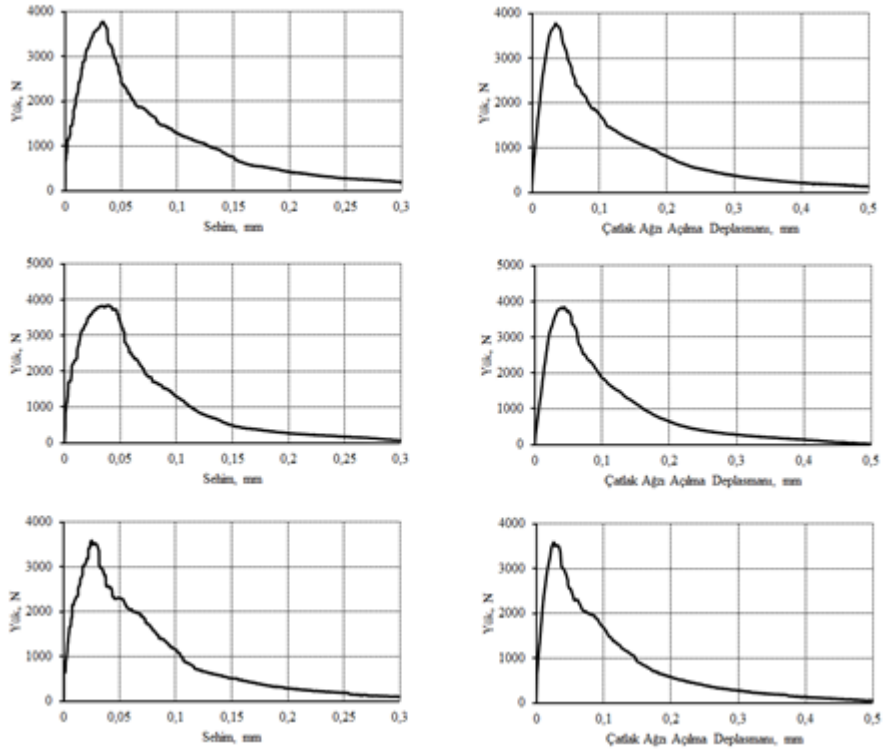
**Şekil A.5 :** Su kürü uygulanan yüksek dayanımlı betonların yük- sehim ve yük- çatlak ağız açılma deplasmanı eğrileri.



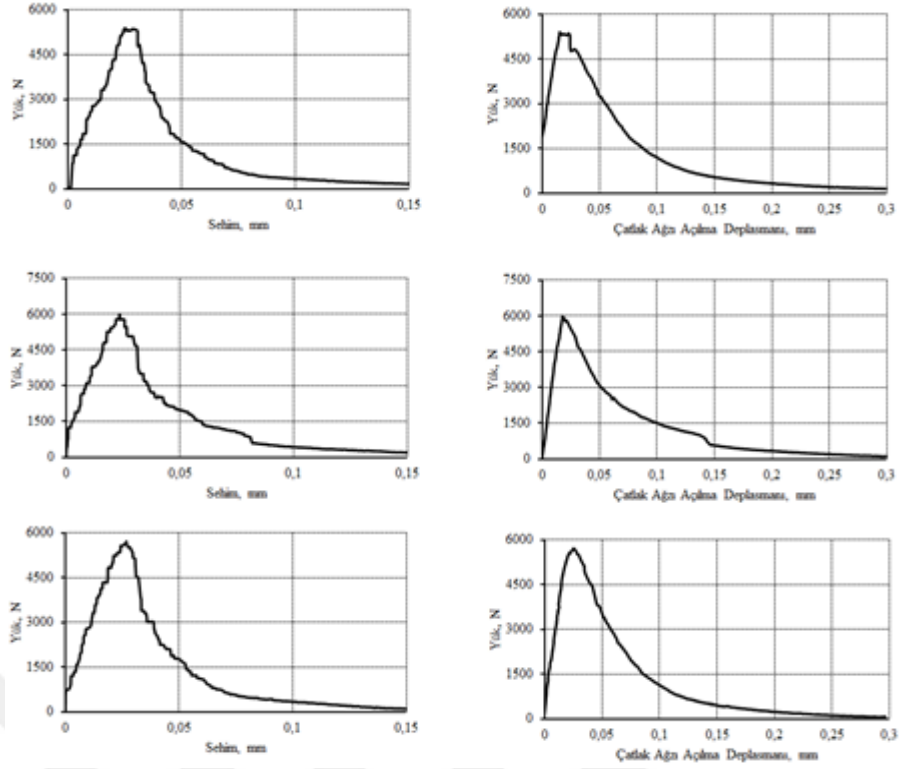
**Şekil A.6 :** Buhar kürü (60°C) uygulanan yüksek dayanımlı betonların yük- sehim ve yük- çatlak ağız açılma deplasmanı eğrileri.



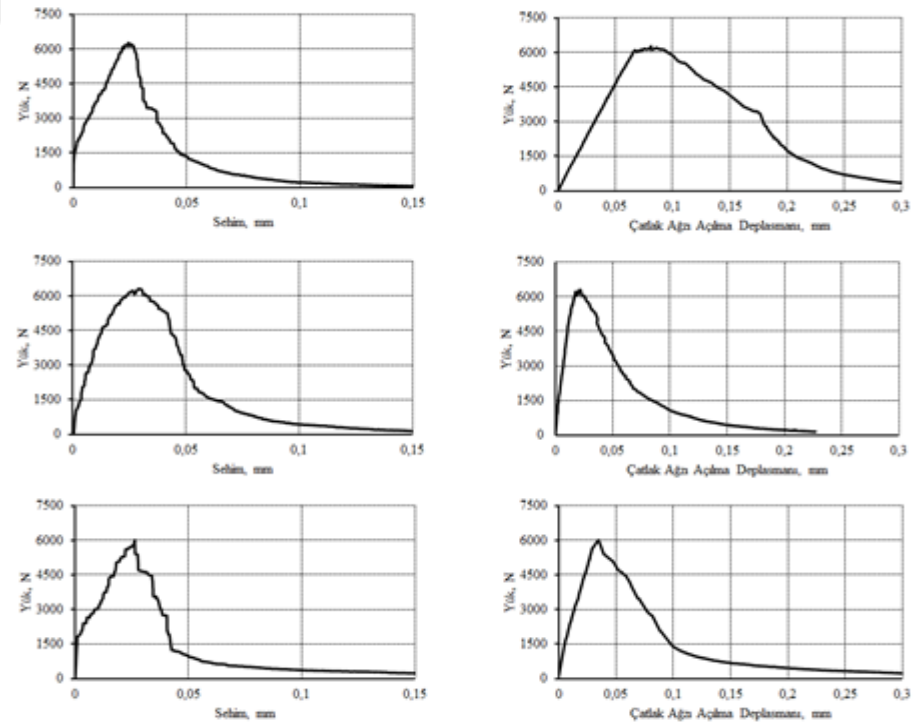
**Şekil A.7 :** Buhar kürü (90°C) uygulanan yüksek dayanımlı betonların yük- sehim ve yük- çatlak ağız açılma deplasmanı eğrileri.



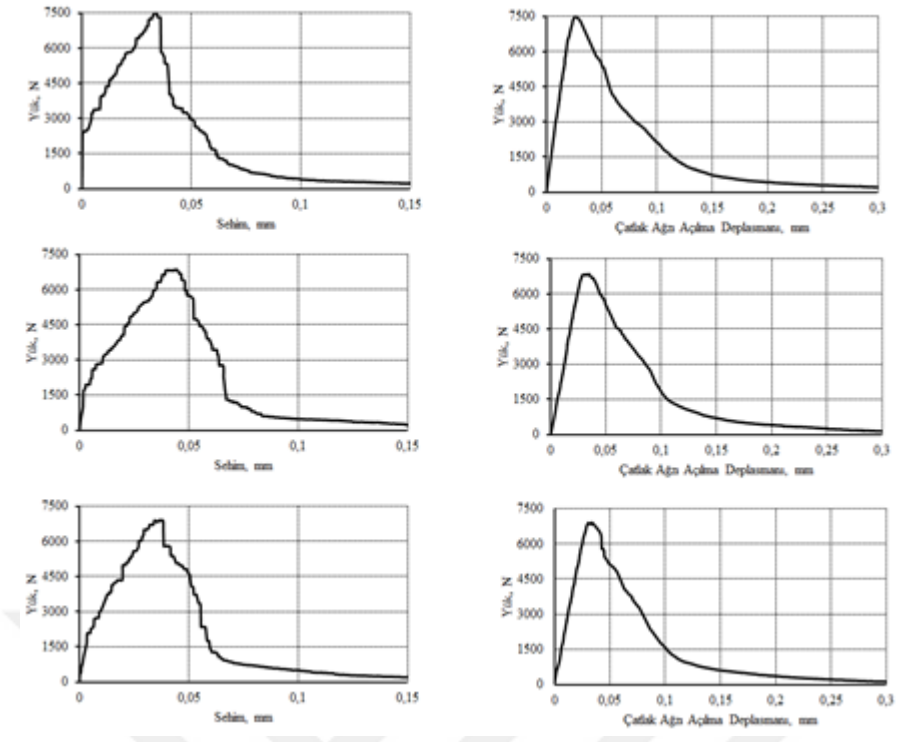
**Şekil A.8 :** Etüv kürü (150°C) uygulanan yüksek dayanımlı betonların yük- sehim ve yük- çatlak ağız açılma deplasmanı eğrileri.



**Şekil A.9 :** Su kürü uygulanan ultra yüksek dayanımlı betonların yük- sehim ve yük- çatlak ağız açılma deplasmanı eğrileri.

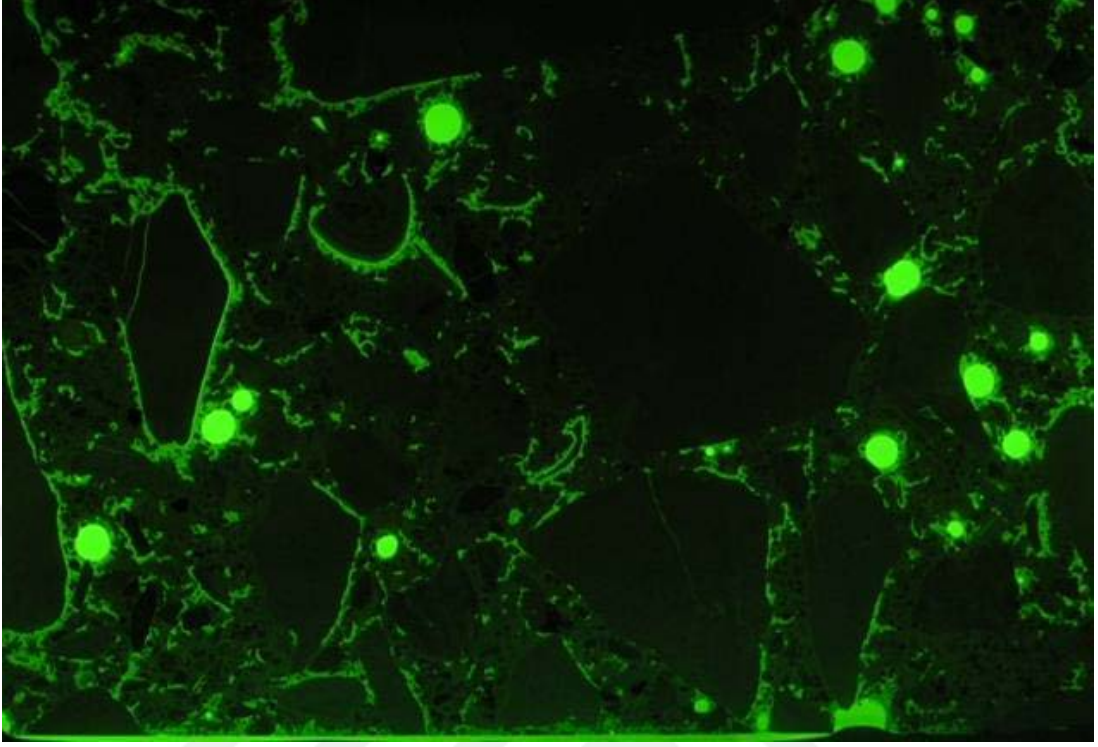


**Şekil A.10 :** Buhar kürü (90°C) uygulanan ultra yüksek dayanımlı betonların yük- sehim ve yük- çatlak ağız açılma deplasmanı eğrileri.



**Şekil A.11 :** Etüv kürü (150°C) uygulanan ultra yüksek dayanımlı betonların yük-sehim ve yük- çatlak ağız açılma deplasmanı eğrileri.

## EK B

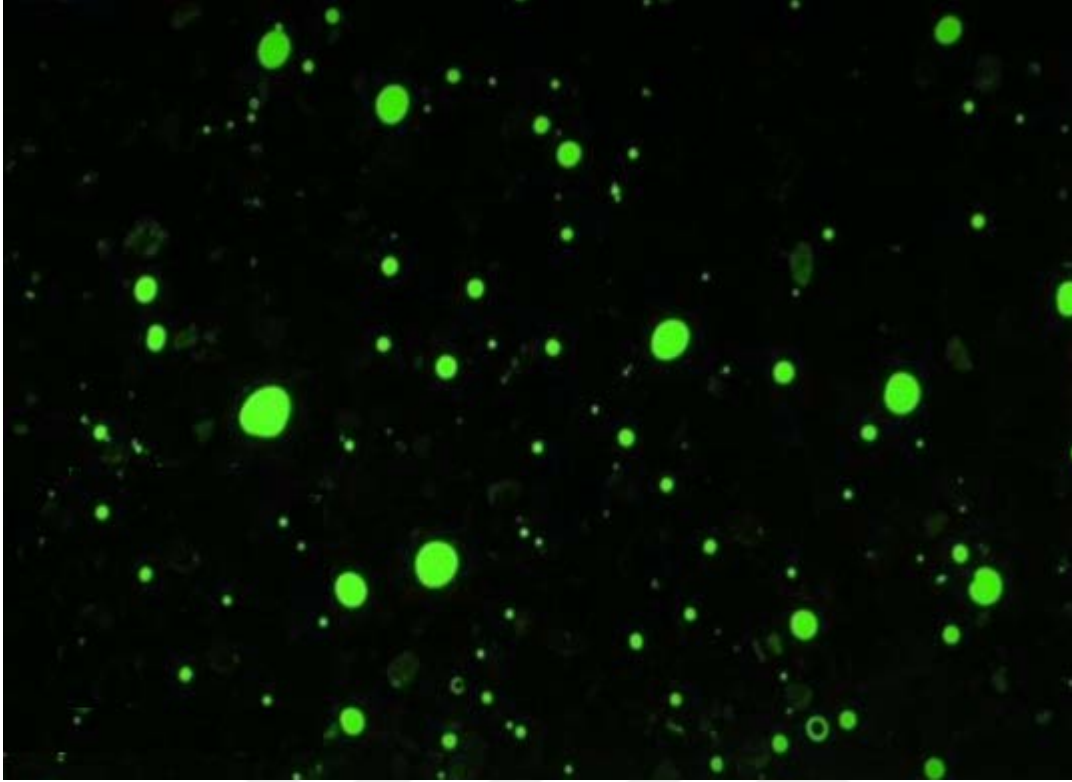


**Şekil B.1 :** Yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulanan normal dayanımlı betonun iç yapısı (uv: ultraviyole ışık).

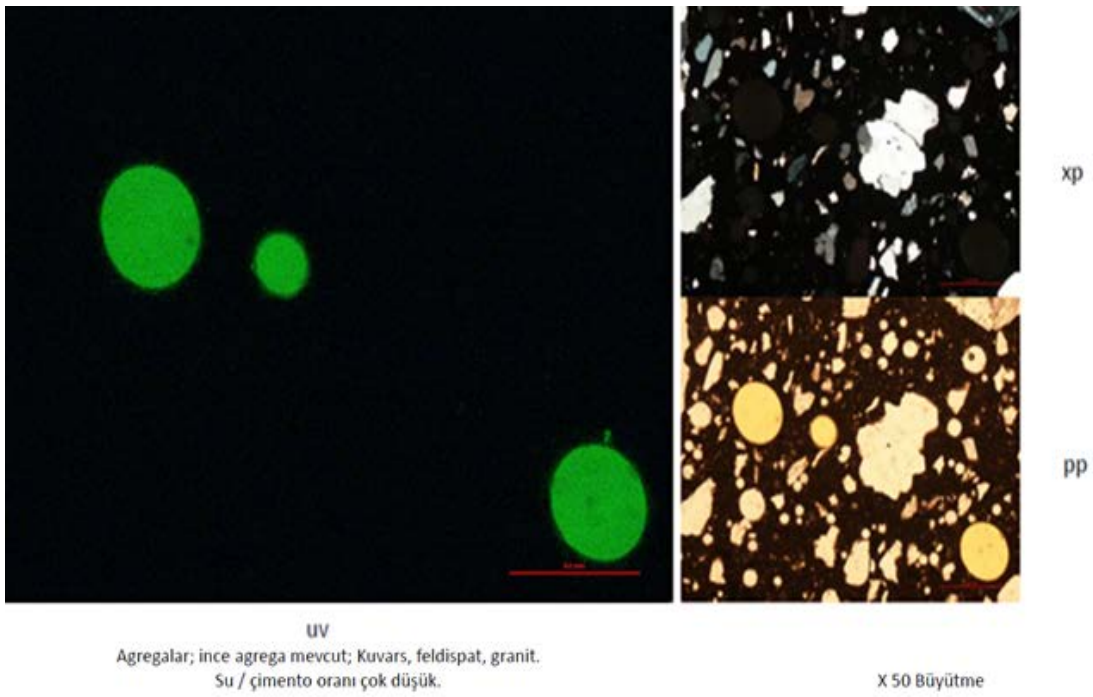


**Şekil B.2 :** Yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulanan normal dayanımlı betonun iç yapısı (pp: tek nikol, xp: çift nikol, uv: ultraviyole ışık).

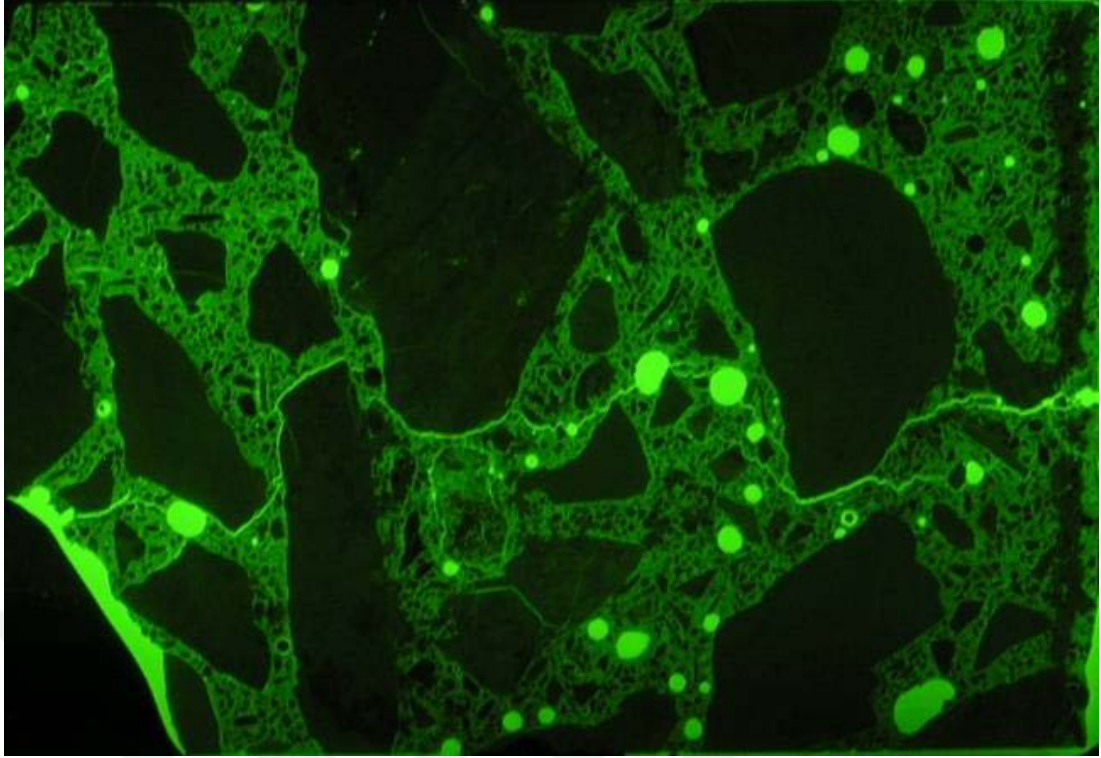




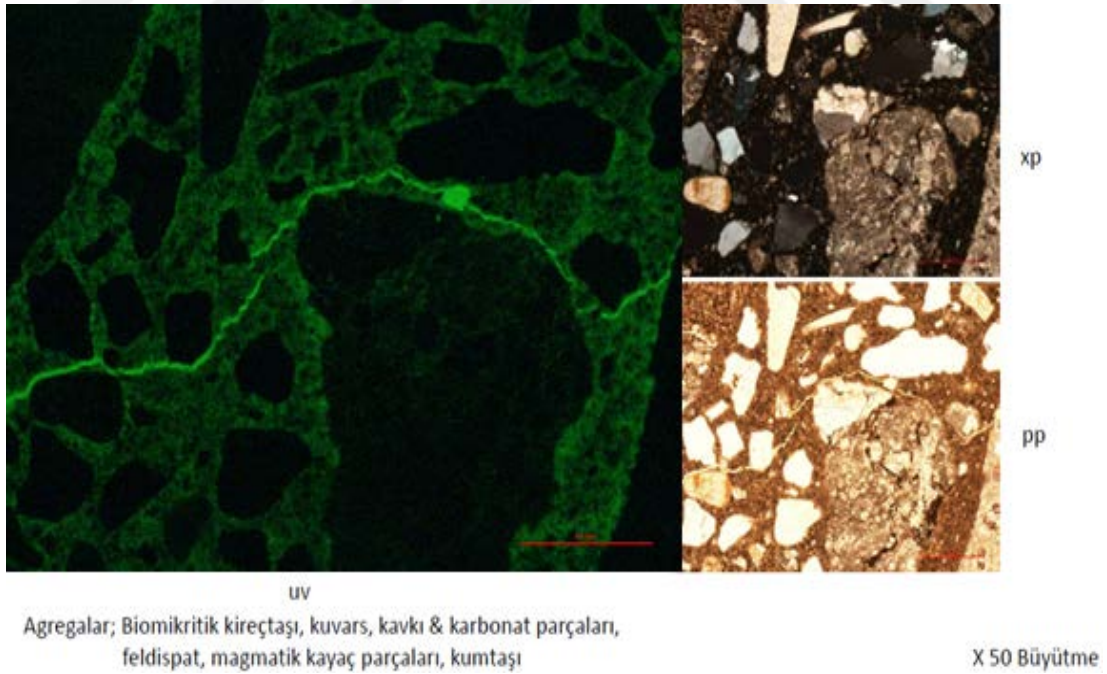
**Şekil B.3** : Yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulanan ultra yüksek dayanımlı betonun iç yapısı (uv: ultraviyole ışık).



**Şekil B.4** : Yalıtılmış ortamda etüv kürü uygulanan ultra yüksek dayanımlı betonun iç yapısı (pp: tek nikol, xp: çift nikol, uv: ultraviyole ışık).



**Şekil B.5 :** Tecrit malzemesi uygulanmayan laboratuvar ortamında bekletilen normal dayanımlı betonun iç yapısı (uv: ultraviyole ışık).

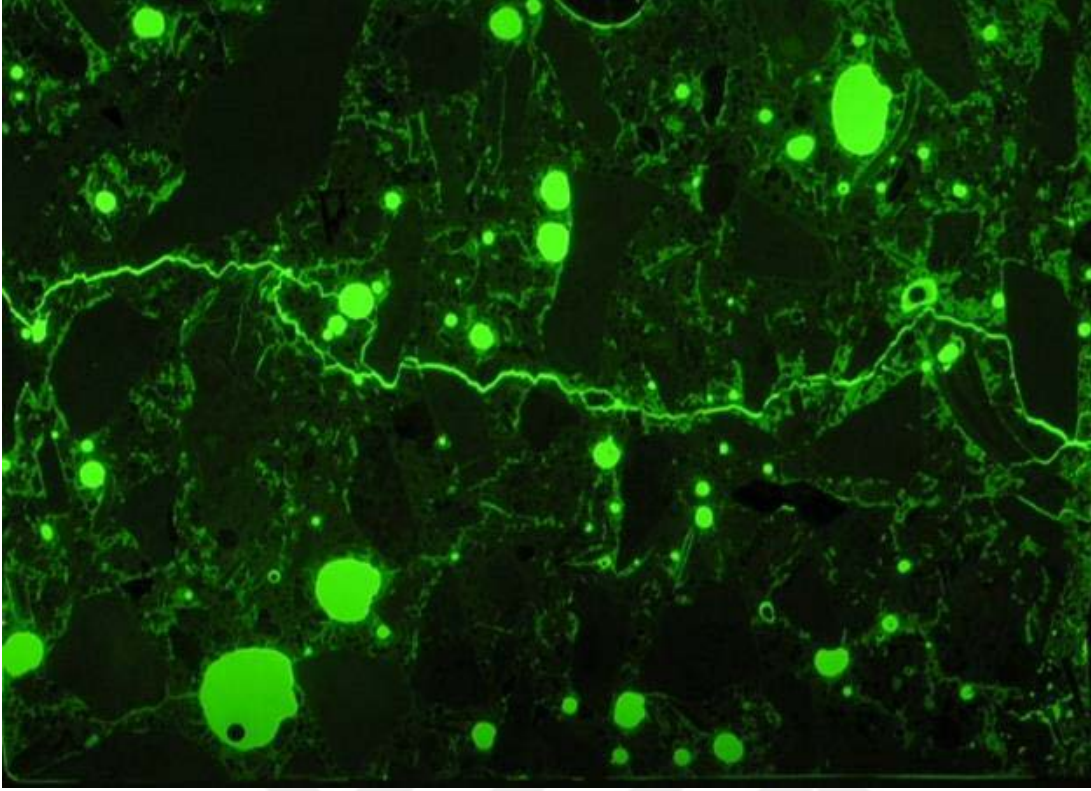


Agregalar; Biomikritik kireçtaşı, kuvars, kavkı & karbonat parçaları,  
feldispat, magmatik kayaç parçaları, kumtaşı

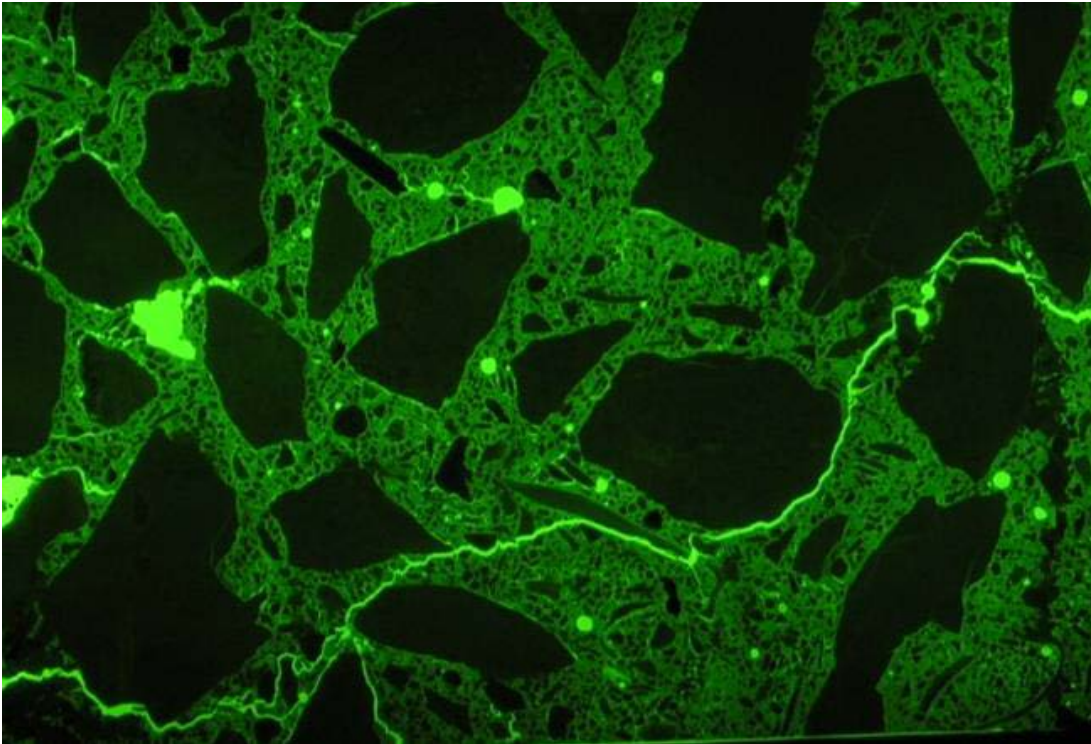
X 50 Büyütme

**Şekil B.6 :** Tecrit malzemesi uygulanmayan laboratuvar ortamında bekletilen normal dayanımlı betonun iç yapısı (pp: tek nikol, xp: çift nikol, uv: ultraviyole ışık).





**Şekil B.7 :** Tecrit malzemesi uygulanmayan yaşlandırma yapılan normal dayanımlı betonun iç yapısı (uv: ultraviyole ışık).



**Şekil B.8 :** Tecrit malzemesi uygulanarak yaşlandırma yapılan normal dayanımlı betonun iç yapısı (uv: ultraviyole ışık).



## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad** : Fatih ÖZALP  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 1979-KAYSERİ  
**E-posta** : fatih\_ozalp@yahoo.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2003, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2006, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- İSTON A.Ş.' de Ar-Ge birimi yöneticisi olarak çalışmaktadır.
- AB. 7. Çerçeve Programı Hibeleri, TÜBİTAK 1007, 1501 ve 1509 destek programları, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı projelerinde araştırmacı ve yürütücü olarak çalıştı.
- Reaktif Pudra Betonlar ve Balistik Etkilere Dayanıklı Kompozit Sistemler konularında patentleri mevcuttur.

### DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Özalp, F., Şengül, Ö., Taşdemir M. A.** (2015). Kür Koşulları ve Tecrit Malzemesinin Betonun Geçirimsizlik ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. *THBB Hazır Beton Dergisi*. Temmuz- Ağustos, 69-74.

### DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Özalp, F.**, 2009. Reaktif Pudra Beton. Patent numarası: 2009 08387.
- **Özalp, F.**, 2013. Balistik etkilere karşı dirençli (anti balistik) yapı elemanları ve üretim yöntemleri. Patent numarası: 2013 04177.

- **Özalp, F., Taşdemir M. A.** (2006). Ultra Yüksek Performanslı Betonların Mekanik Davranışı, (Yüksek Lisans Tezi), İTÜ, 2006.
- **Ozalp, F.,** Akkaya, Y., Sengul, C., Akcay, B., Tasdemir M. A., and Kocaturk A.N. (2007). Curing Effects on Fracture of High Performance Cement Based Composites With Hybrid Steel Fibers, *FramCoS-6 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, June. 17-22 2007, Catania, Italy
- Kiremitçi, C. A., Taşdemir, M. A., Arslan, E. G., **Özalp, F.** (2008). Çelik Tel Donatılı Ultra Yüksek Performanslı Betonların Mekanik Davranışları, *Uluslararası Hazır Beton Kongresi*, İstanbul, s. 86-95, 19-21 Haziran 2008
- Copur, A., Guler, S., **Ozalp, F.,** Aydoğan, M. (2013). Performance of CFRP wrapped UHPC Columns under Axial Compression (*International Journal of Chemical, Environmental & Biological Sciences (IJCEBS) Volume 1, Issue 1*, 2013.
- Cetin, C., Delibas, T., Kaya, O., **Ozalp, F.,** Kırca, O., Yaman, I. O. (2014). Rapid Repair of Concrete Roads Using Calcium Aluminate Cement Based Mortar in Winter Conditions, *12th International Symposium on Concrete Roads*, September 23-26 2014, Czech Republic.
- Sarı, M., Şengül, C., Akkaya, Y., **Özalp, F.,** Kaya, Ö., Taşdemir, M. A. (2015). Effects of Macro-Synthetic Fibers on Mechanical Behavior and Permeability Properties of Concrete. *XVII. ERMCO Congress*. June 2015.
- **Özalp, F.,** Yılmaz, H.D., Kaya, Ö., Kara, M., Kılıç, Y. (2015). İnşaat ve Yıkıntılardan Geri Kazanılan Agregaların Çeşitli Beton Elemanların Üretiminde Değerlendirilmesi. *9. Ulusal Beton Kongresi*, Nisan 2015, 411-420
- **Özalp, F.,** Şengül, Ö., Taşdemir, M. (2015). Kür Koşulları ve Tecrit Malzemesinin Betonun Geçirimlilik ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. *THBB Hazır Beton dergisi*, Temmuz- Ağustos 2015, 69-74.
- **Özalp, F.,** Yılmaz, H.D., Kaya, Ö., Kara M., Şahin, A. (2016). Effects of Recycled Aggregates from Construction and Demolition Wastes on Mechanical and Permeability Properties of Various Concrete Elements. *Construction & Building Materials, Volume 110*, 17-23, May 2016.