

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETON KARIŞIM TASARIMININ GEÇİRİMLİLİĞE
VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Cemil Utkan ÇORBACIOĞLU

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2008

**BETON KARIŞIM TASARIMININ GEÇİRİMLİLİĞE
VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Cemil Utkan ÇORBACIOĞLU

(501061140)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2008

Tezin Savunulduğu Tarih : 11 Haziran 2008

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Yılmaz AKKAYA

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR

Prof.Dr. Fevziye AKÖZ (YTÜ)

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Bu tezi yöneten ve çalışmalarım sırasında değerli bilgi ve tecrübeleri ile yanımda olan sayın tez hocam Doç. Dr. Yılmaz Akkaya'ya,

Yorumları ve önerileriyle büyük yardımını gördüğüm sayın hocam ve İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Dekanı Prof. Dr. M. Ali Taşdemir'e,

Türkiye'nin en önemli projelerinden biri olan MARMARAY projesine ait yapı malzemesi laboratuvarında yoğun çalışma ortamlarında bana zaman ayırarak yardımlarını esirgemeyen sevgili arkadaşlarım ve değerli İnşaat Yüksek Mühendisleri Tahsin Alper Yıkıcı ve Hüseyin Oytun Yazan'a,

Deneysel çalışmalarımın değerlendirilmesi ve yorumlanmasında yardımını esirgemeyen Araş. Gör. Özkan Şengül'e,

Uzun ve zorlu deneysel çalışmalarım sırasındaki yardımları dolayısıyla İ.T.Ü. Marmaray Yapı Malzemesi Laboratuvarı teknisyenleri Mehmet Ali Küçük, Namık Kemal Özkan, Cüneyt Yıldız ve Erdoğan Kılavuz ve karşılığını ödeyemeyeceğim birçok emekleri geçen çok değerli diğer tüm çalışanlara,

Tezimin sonuca ulaştırılması aşamasında büyük desteğini gördüğüm sevgili arkadaşlarım İpek Köksal'a, Başak Güneş Başat'a ve bana büyük sabır gösteren ev arkadaşlarıma,

Sevgi, destek ve özveri ile bana kuvvet veren sevgili arkadaşım İnşaat Mühendisi Selen Beytekin'e,

Amacım doğrultusunda beni her zaman maddi manevi destekleyen, yetiştiren ve güvenen çok sevdiğim anneme, babama ve ileride unutulmayacak filmlerin yönetmeni olmasını dilediğim kardeşim Çağdaş'a,

Teşekkürlerimi sunarım.

Tezimi bu sene içerisinde kaybettiğim ve beni bir yerlerden gururlanarak izlediğine inandığım canım anneanneme adıyorum.

Saygılarımla,

Haziran 2008

Cemil Utkan ÇORBACIOĞLU

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI VE GENEL BİLGİLER	3
2.1. Betonda Geçirimlilik ve Durabilite	4
2.2. Betonda Klor Etkisi	8
2.2.1. Klorun Beton İçerisindeki Hareketi	10
2.2.2. Serbest ve Bağlı Klor İyonları	11
2.2.3. Klorun Bağlanma Kapasitesi	12
2.2.4. Belirleyici Özellikler	12
2.3. Rötire ve Rötire Çatlakları	12
2.3.1. Rötreyi Etkileyen Faktörler	15
2.3.2. Kısıtlanmış Rötire	16
2.3.3. Plastik Rötire	18
2.3.4. Kuruma Rötresi	18
2.4. Pompalanabilir Beton	20
2.5. Prekast beton	21
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	23
3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	23
3.1.1. Çimento	23
3.1.2. Mikrosilika	24
3.1.3. Katkı maddeleri	25
3.1.4. Uçucu Kül	26
3.1.5. Agregalar	26
3.2. Beton Karışımı	28
3.3. Üretimde İzlenen Sıra	29
3.4. Numune Kodları	30
3.5. Taze Beton Deneyleri	30
3.5.1. Çökme deneyi	30
3.5.2. Birim Ağırlık Deneyi	31

3.6. Sertleşmiş Beton Deneyleri	32
3.6.1. Silindir basınç deneyi	32
3.6.2. Kılcal Su Emme deneyi	33
3.6.3. Hızlı Klor Geçirirmliliği Deneyi	35
3.6.4. Klor Difüzyon Deneyi	36
3.6.5.1. RILEM Kırılma Enerjisi Deneylerinden Kırılma Enerjisinin Hesaplanması	38
3.6.5.2 RILEM Kırılma Enerjisi Deneylerinden Net Eğilme Dayanımlarının Hesaplanması	39
3.7. Kısıtlanmış Rötire Deneyi – Halka Testi	40
4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ	42
4.1. Basınç dayanımına su/çimento oranı değişimi etkisi	42
4.2. Kılcal su emme miktarına su/çimento oranı değişimi etkisi	45
4.3. Klor geçirirmliliğine su/çimento oranı değişimi etkisi	46
4.4. Kısıtlanmış Rötire Çatlağı ile Su/Çimento Oranı Arasındaki İlişki	48
4.5. Kiriş Numunelerde RILEM Kırılma Enerjisi Deney Sonuçları	50
4.6. Kılcallık Katsayısı ile Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki	52
4.7. Kılcallık Katsayısı ile Klor Geçirirmlilik Katsayısı Arasındaki İlişki	53
4.8. Kılcallık Katsayısı ile Efektif Klor Geçirirmlilik Katsayısı Arasındaki İlişki	53
4.9. Klor Geçirirmlilik Katsayısı ile Klor Geçirirmliliği Arasındaki İlişki	54
4.10. Çatlak Günündeki Numune Yaşı ile Çatlak Oluşum Günündeki Kırılma Enerjisi Arasındaki İlişki	55
4.11. Çatlak Günündeki Numune Yaşı ile Çatlak Oluşum Günündeki Eğilme Dayanımı Arasındaki İlişki	55
4.12. Çatlak Oluşum Günündeki Eğilme Dayanımı ile Kırılma Enerjisi Arasındaki İlişki	56
4.13. Çatlak Oluşum Günündeki Kırılma Enerji ile 7 Günlük Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki	57
4.14. Çatlak Oluşum Günündeki Eğilme Dayanımı ile 7 Günlük Basınç Arasındaki İlişki	58
5. GENEL SONUÇLAR	59
KAYNAKLAR	61
EKLER	64
ÖZGEÇMİŞ	80

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1 CEM I 42,5 N Çimentosunun Fiziksel Özellikleri	23
Tablo 3.2 CEM I 42,5 N Çimentosunun Kimyasal Özellikleri	23
Tablo 3.3 CEM I 42,5 N Çimentosunun Basınç Dayanımı	24
Tablo 3.4 Mikrosilikanın Kimyasal Özellikleri	24
Tablo 3.5 Glenium Sky 506 Marka Süperakışkanlaştırıcının Teknik Özellikleri	25
Tablo 3.6 Glenium Sky ACE 30 Marka Süperakışkanlaştırıcının Teknik Özellikleri	25
Tablo 3.7 Agregaların Fiziksel Özellikleri	26
Tablo 3.8 Agregaların Tane Boyutu Dağılımı-Pompalanabilir Beton	27
Tablo 3.9 Agregaların Tane Boyutu Dağılımı-Prekast Beton	27
Tablo 3.10 Beton Karışım Dizaynı – Pompalanabilir Beton	29
Tablo 3.11 Beton Karışım Dizaynı – Prekast Beton	29
Tablo 3.12 Laboratuvar Numune Kodları ve Açıklaması	30
Tablo 3.13 Çökme Deneyi Sonuçları	31
Tablo 3.14 Birim Ağırlık Deneyi Sonuçları	32
Tablo 3.15 Silindir Basınç Deneyi Sonuçları	33
Tablo 3.16 Hızlı Klor Geçirimsizlik deney sonuçlarına göre betonun klor geçirimsizliği yönünden değerlendirilmesi	35

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Betonarme Yapıda Korozyon	6
Şekil 2.2 : Betonarme Yapı Üzerinde Bozunma Mekanizmaları	7
Şekil 2.3 : İki farklı Tipteki Betonda Klor Profili	10
Şekil 2.4 : Beton İçerisindeki Serbest ve Bağlı Klor İyonlarının Derinlik İle Değişimini Gösteren Grafik	11
Şekil 2.5 : Çimento Hamurundaki Kuruma Rötresine Sebep Olan Mekanizmalar	19
Şekil 2.6 : Pompalanabilir Beton	21
Şekil 2.7 : Prekast Beton Elemanı	22
Şekil 3.1 : Agregaların Tane Boyutu Dağılımı Granülometresi	19
Şekil 3.2 : Kılcal Su Emme Deneyi Düzenegi	34
Şekil 3.3 : Kılcal Su Emme Deneyi Örnek Sonuç Grafiği	35
Şekil 3.4 : Hızlı Klor Geçirimsiliği Deneyi Numunesi	36
Şekil 3.5 : Hızlı Klor Geçirimsiliği Deneyi Düzenegi	36
Şekil 3.6 : Klor Difüzyon Deneyi Düzenegi	37
Şekil 3.7 : RILEM Kırılma Enerjisi Deneyi Düzenegi	38
Şekil 3.8 : Örnek Yük-Sehim Eğrisi	39
Şekil 3.9 : Halka Testi Deney Düzenegi	40
Şekil 3.10 : Beton Halka ile Çelik Halka Arasındaki Gerilmeler	41
Şekil 3.11 : Çelik Halkada Okunan Gerilme-Numune Yaşı Grafiği	41
Şekil 4.1 : Pompalanabilir Betonda Su/Çimento Oranının Değişimi ile Basınç Dayanımının Değişim Grafiği	42
Şekil 4.2 : Prekast Betonda Su/Çimento Oranının Değişimi ile Basınç Dayanımının Değişim Grafiği	43
Şekil 4.3 : Pompalanabilir ve Prekast Betonda 28 Günlük Basınç Dayanımlarının Karşılaştırılması	44
Şekil 4.4 : Pompalanabilir ve Prekast Betonda 7 Günlük Basınç Dayanımlarının Karşılaştırılması	44
Şekil 4.5 : Kılcallık Katsayısı-Su/Çimento Oranı Değişim Grafiği	45
Şekil 4.6 : Kılcal Su Emme Deneyinde Son Okunan I Değeri-Su/Çimento Oranı Değişim Grafiği	46
Şekil 4.7 : Pompalanabilir ve Prekast Betonda Su/Çimento Oranının Değişimi İle Hızlı Klor Geçirimsiliği Değişimi Grafiği	47
Şekil 4.8 : Pompalanabilir ve Prekast Betonda Su/Çimento Oranının Değişimi İle Klor Geçirimsilik Katsayısı (K _{cr}) Değişimi Grafiği..	48
Şekil 4.9 : Pompalanabilir ve Prekast Betonda Su/Çimento Oranının Değişimi İle Efektif Klor Geçirimsilik Katsayısı (D _e) Değişimi Grafiği	48
Şekil 4.10 : Çatlak Oluştugu Gündeki Numune Yaşı ile Su/Çimento Oranı İlişkisi	49

Şekil 4.11	: Çatlak Oluştugu Günündeki Çatlak Genişliği ile Su/Çimento İlişkisi	50
Şekil 4.12	: Beton Halkadaki Çatlak	50
Şekil 4.13	: Kırılma Enerji ile Su/Çimento Oranı İlişkisi	51
Şekil 4.14	: Eğilme Dayanımı ile Su/Çimento Oranı İlişkisi	52
Şekil 4.15	: Kılcallık Katsayısı ile Basınç Dayanımı İlişkisi	52
Şekil 4.16	: Kılcallık Katsayısı ile Klor Geçirimsizlik Katsayısı Arasındaki İlişki	53
Şekil 4.17	: Kılcallık Katsayısı ile Efektif Klor Geçirimsizlik Katsayısı Arasındaki	53
Şekil 4.18	: Klor Geçirimsizlik Katsayısı ile Klor Geçirimsizliği Arasındaki İlişki	54
Şekil 4.19	: Çatlak Günündeki Numune Yaşı ile Çatlak Oluşum Günündeki Kırılma Enerjisi Arasındaki İlişki	55
Şekil 4.20	: Çatlak Günündeki Numune Yaşı ile Çatlak Oluşum Günündeki Eğilme Dayanımı Arasındaki İlişki	56
Şekil 4.21	: Numunenin Çatladığı Gündeki Kırılma Enerjisi ile Eğilme Dayanımı Arasındaki İlişki	57
Şekil 4.22	: Numunenin Çatladığı Gündeki Kırılma Enerjisi ile 7 Günlük Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki	58
Şekil 4.23	: Numunenin Çatladığı Gündeki Eğilme Dayanımı ile 7 Günlük Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki	58
Şekil A.1	: PMP-0,30 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği	64
Şekil A.2	: PMP-0,35 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği	64
Şekil A.3	: PMP-0,38 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği	65
Şekil A.4	: PMP-0,40 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği	65
Şekil A.5	: PMP-0,45 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği	66
Şekil A.6	: PMP-0,50 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği	66
Şekil A.7	: PMP-0,55 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği	67
Şekil A.8	: PRK-0,30 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği	67
Şekil A.9	: PRK-0,32 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği	68
Şekil A.10	: PRK-0,35 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği	68
Şekil A.11	: PRK-0,40 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği	69
Şekil A.12	: PRK-0,45 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği	69
Şekil A.13	: PRK-0,50 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği	70
Şekil A.14	: PMP-0,55 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği	70
Şekil B.1	: PMP-0,30 Betonda Yük-Sehim Grafiği	71
Şekil B.2	: PMP-0,35 Betonda Yük-Sehim Grafiği	71
Şekil B.3	: PMP-0,38 Betonda Yük-Sehim Grafiği	72
Şekil B.4	: PMP-0,40 Betonda Yük-Sehim Grafiği	72
Şekil B.5	: PMP-0,40 Betonda Yük-Sehim Grafiği	73
Şekil B.6	: PMP-0,40 Betonda Yük-Sehim Grafiği	73
Şekil B.7	: PMP-0,40 Betonda Yük-Sehim Grafiği	74

BETON KARIŞIM TASARIMININ GEÇİRİMLİLİĞE VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

ÖZET

Yüksek performanslı betonları durabilite açısından incelemek amacıyla yapılan bu çalışmada, betonun durabilitesine etki eden kılcallık, klor geçirimsizlik ve rötre gibi faktörler için literatür incelenmiş, betonda geçirimsizlik ve kısıtlanmış rötre ile ilgili deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu deneylerden alınan sonuçlar, basınç dayanımı ve RILEM kırılma enerji deneylerinden elde edilen sonuçlarla birlikte karşılaştırılmalı şekilde analiz edilmiştir.

Literatür çalışmasında gösterilen sertleşmiş beton deneyleri iki ana başlıkta toplanmıştır. Birinci başlık, betonun mekanik özelliklerini belirleyen ve 7–28 günlük silindir basınç dayanımları sonuçlarını veren silindir basınç deneyi ile kırılma enerjisi ve eğilme dayanımı sonuçlarını veren RILEM kırılma enerjisi deneyini içermektedir. İkinci ana başlıkta ise betonun durabilite özelliklerini belirleyen kılcal su emme deneyi, hızlı klor geçirimsizlik deneyi, klor difüzyon deneyi, kısıtlanmış rötre deneyi ve halka deneyleri incelenmiştir.

Deneysel çalışmalarda pompalanabilir beton ve prekast beton adlarıyla iki farklı tür beton dizaynı, agrega ağırlıkları ve çökme değerleri sabit tutularak yedi farklı su/çimento oranı için hazırlanmıştır.

Pompalanabilir beton dizaynının prekast beton dizaynına göre fazladan uçucu kül ve mikrosilika içermesi, mineral katkı ve mineral katkısız betonları karşılaştırma olanağı vermiştir. Deneyler sonucunda, kılcal su emme ve klor geçirimsizliği incelendiğinde, mineral katkı betonların mineral katkısız betonlara göre daha geçirimsiz oldukları görülmüştür.

Her iki tür beton için de su/çimento oranları değiştirilerek halka testleri yapılmış ve kısıtlanmış rötre potansiyelleri çatlak oluştuğu gün referans alınarak incelenmiştir. Halka testinde beton halka için hazırlanan karışımlardan beton kirişler de dökülmüştür. Halkada çatlak oluştuğu gün, RILEM kırılma enerjisi deneyinde beton kirişler de kırılıp gözlemlenmiştir. Deney analizi sonucunda, betonun kırılma enerjisi ve eğilme dayanımı elde edilmiştir. Erken yaşta çatlak oluşan numunenin kısıtlanmış rötre potansiyeli yüksek olarak kabul edilmiştir. Sonuç olarak su/çimento oranının artışıyla kısıtlanmış rötre potansiyelinin düştüğü gözlemlenmiştir. Çatlak oluşan günlerde çatlak kalınlığı ölçülmüş, bunun sonucunda da kısıtlanmış rötre potansiyelinin artışıyla çatlak kalınlığının da arttığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak beton karışım tasarımında agrega miktarı ağırlıkça sabit tutularak su/çimento oranı değiştirildiğinde betonun geçirimsizliği ve mekanik özellikleri doğrudan etkilenmektedir. Betonun kür koşulları da bu anlamda çok önem kazanmaktadır.

THE EFFECT OF CONCRETE MIX DESIGN ON PERMEABILITY AND MECHANICAL CHARACTERISTICS

SUMMARY

In this thesis, studied and researched to analyze concretes with high performance in terms of durability, first of all a literature review is done for the factors effecting on durability of concrete such as: capillarity, rapid chloride permeability and shrinkage. Then experiments are conducted to analyze the permeability characteristics of concrete and restrained shrinkage potential and at the end results are compared to the results of compressive strength and fracture energy experiments.

Tests on hardened concrete, which are presented in the literature review, are classified in two main groups. The first group includes cylinder compressive strength experiments related to mechanical properties of the concrete during 7-28 days. Fracture energy and compressive strength tests on tensile strength of the concrete are also analyzed within the first group. The second group includes the capillary water absorption experiment defining the durability of concrete as well as rapid chloride permeability experiment, chloride diffusion experiment and restrained shrinkage ring experiments.

In the experimental studies, two different types of concrete, namely pumpable concrete and precast concrete, are prepared according to seven different water-cement ratios under the same conditions. The aggregate content and slump values are kept constant.

The design of pumpable concrete, which contains a higher level of microsilica and flyash ratio compared to the design of precast concrete, enables to compare the effect of mineral additives on concretes. The results of capillary water absorption and chloride permeability experiments have proved that the permeability of the mineral additive concrete is lower than the concrete without mineral additive.

Ring experiments are performed for both types of concrete to define potential restrained shrinkage results, by taking the age of cracked specimen as reference. In the experiments different water/cement ratio values are examined. The mortar that had been prepared for the ring test is also used for the prismatic concrete samples in the fracture energy test. The specimens for the ring test are watched over to take notice of the cracks. Meanwhile the fracture test is started when cracks occur in the ring test. After these tests, the fracture energy and the compressive strength of the concrete are analyzed. Specimen that has cracked early has been accepted as having a high potential restrained shrinkage. As a result, it is shown that as the water to cement ratio increases, the potential restrained shrinkage results increases as well. Moreover, it is also shown that an increase in the potential restrained shrinkage causes an increase in the thickness of the crack which is measured at the same day when it occurs.

Prismatic concrete samples are also cast with both pumpable and precast concrete types. These concrete samples are tested according to the fracture energy method, on the same day when the first crack on the ring occurs. The analysis of this experiment provides the fracture energy and tensile strength measurements for the concrete on the day of restrained shrinkage cracking.

In conclusion, designing concrete in circumstances of constant quantity of aggregate, the permeability and mechanical characteristics of concrete are directly affected by changes in water/cement ratio. In addition to this, the curing conditions also affect the concrete in the same way.

1. GİRİŞ

Beton günümüzde kullanılan en yaygın yapı malzemesidir ve özellikle yüksek performanslı ve yüksek dayanımlı betonlar önem kazanmış durumdadır. Bununla beraber bu betonların durabilitesi de yapının servis ömrü bakımından günümüzde aranan bir özellik durumuna gelmiştir. Bu tez çalışmasının içeriğinde de betonun durabilitesini etkileyen özelliklerden betonun geçirimsizliği ve mekanik özellikleri, iki farklı beton tasarımında farklı su/çimento oranları kullanarak incelenmiştir.

Betonda durabilite bir yapının çevresel etkilere karşı servis ömrü boyunca sahip olduğu dayanımdır. Bundan dolayı bir yapı için sağlam ve güvenilir kelimesi kullanılırken projelendirmenin yanında imalat yapılırken doğru malzeme seçimi, malzemenin iyi kullanımıyla ve yapının maruz kalabileceği çevresel faktörler önceden belirlenerek alınacak önlemlerle ileride en az bakım gerektirecek şekilde kaliteli imal edilmesi istenmektedir. Bu şekilde yapılmış olan imalat yapının durabilitesini güçlendirir, istenildiği gibi servis ömrü uzun, sağlam ve güvenilir bir yapı oluşturulmuş olur.

Betonun boşluksuz ve geçirimsiz olması yani mikro yapısı durabilite açısından önemlidir. Dolayısıyla boşluksuz ve geçirimsiz elemanı etkileyen tüm özellikler durabiliteyi de doğrudan etkiler. Bunların başında betonda rötre sonucu oluşan çatlaklar gelir ve durabilite için önemli bir sorun teşkil eder. Bu tez çalışmasında betonun rötresi çelik bir halka yardımıyla kısıtlanmış durumdaki rötre potansiyeli ile incelenmiştir.

Betonun durabilitesini etkileyen diğer bir faktör ise betona klor etkisidir. Betonun klor geçirimsizliği yine bu çalışmada önemli bir yer teşkil etmektedir. Bu konu ile ilgili hızlı klor ve yavaş klor geçirimsizliği deneyleri her iki bileşime sahip betona uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca geçirimsizlikle ilgili kılcal su emme deneyi yapılmış ve sonuçlar aynı şekilde karşılaştırmalı değerlendirmeye alınmıştır.

Deneyisel çalışmalar da betonun çatlak potansiyelini belirleyebilmek için halka testi yapılmış ve farklı su/çimento oranlarındaki betonlarda çatlak oluşumu gözlenmiştir.

Bu deney sonuçları ise; betonun mekanik özelliklerini veren RILEM kırılma enerjisi deneyi ve silindir basınç deneyi sonuçlarıyla karşılaştırılarak grafiksel sonuçlara ulaşılmış ve analizler yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar sonucunda beton karışım tasarımının betonun geçirimsizliği ve mekanik özellikleri üzerinde etkileri belirlendi.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI ve GENEL BİLGİLER

Beton; çimento, agrega, su ve gerektiğinde bir katkı maddesini belirli oranlarda bir araya getirerek elde edilmiş bir karışımı, istenilen şekil ve boyutta kalıplar içine boşluksuz olarak yerleştirerek ve uygun bakım koşulları altında sertleştirmek yolu ile elde edilen önemli bir kompozit yapı malzemesidir. Betonarme basit olarak, beton ile çelik olan donatı çubuklarının beraber çalışacak ve birbirlerinin eksikliklerini tamamlayacak şekilde bir araya getirilmesi olarak tanımlanabilir.

Çimento, su, agrega ve gerektiğinde katkı maddelerinin bir araya getirilmesiyle oluşan betonda, çimento ve suyun birleşmesiyle oluşan “çimento hamuru” bağlayıcılık görevi yapmaktadır. Çimento hamuru, kum-çakıl gibi binlerce agrega tanesinin yüzeyini kaplamakta, taneler arasındaki boşlukları doldurmakta ve beton kütlelerini oluşturan malzemelerin bir bütün olarak bir arada olmasını sağlamaktadır.

Çimento ve suyun bir araya getirilmeleriyle elde edilen çimento hamuru, başlangıçta, plastik bir yapıya sahiptir ve bu iki malzemenin birleştiği andan itibaren aralarında hidrasyon (çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonlar) başlamaktadır. Hidrasyonun devam etmesiyle başlangıçta plastik yapıya olan çimento hamuru giderek plastikliğini kaybetmekte, zamanla katılaşp sert bir malzeme durumunu almaktadır.

Rötre, sertleşmiş betonun, harcın ve çimento şerbetinin, buharlaşmadan oluşan su kaybı sonucu zamana bağlı hacim azalması olarak tanımlanmaktadır [1].

Rötre, sade beton elamanlarda ve betonarme elemanlarda hasara sebep olabilir. Beton eleman içinde nem dağılımının üniform olması nedeniyle, numunenin dış yüzeyi öncelikle kuruyup rötreye uğrarken, iç tabaka ıslak kalmakta ve büzülmemektedir. Yani, kuruma sürecinin başlangıcı aşamasında iç tabaka basınç etkisi altında iken dış yüzey çekme etkisi altında kalmaktadır, Çekme gerilmeleri yüzey tabakada yerel mikro çatlamlara veya çekme deformasyon yumuşamasına sebep olmaktadır. Çekme gerilmesinden kaynaklanan betonun non-lineer inelastik davranışına bağlı olarak, mikro çatlaklar sonuçta nem dağılımı üniform dağılıma ulaşırken tamamıyla kapanamazlar. Sonuç olarak, numunenin ölçülen rötresi her zaman gerçek rötresinden daha küçüktür. Öte yandan, kuru rötre numuneleri için tam kesit alanı basınç altındadır ve bu yüzden basınç yönüne dik doğrultudaki düzlemlerde mikroçatlama görülmektedir. Böylece gözlenen numune rötresi

mikro çatlama ve bununla ilgili geri çevrilemeyen deformasyonlar tarafından azaltılamazlar [1].

Büzölme sonucu yüzey katmanlarda çekme gerilmeleri oluşurken iç katmanlarda basınç gerilmeleri oluşur. Bu oluşum sonucu beton yüzeyinde çatlaklar meydana gelir. Bu çatlaklar betonun dış etkilere karşı dayanıklılığını olumsuz etkileyerek servis ömrünü azaltır [2].

Rötre olayı çimentonun bünyesinden dolayı meydana gelmektedir. Çimento miktarının fazla olması, hidrasyon ilgisi çok yüksek çimento kullanımı ortam sıcaklığının çok yüksek olması gibi faktörler rötrein daha şiddetli olmasına sebep olmaktadır. Özellikle baraj gövdesi gibi kütle betonlarında, yol betonlarında , havaalanı betonlarında rötre önemli problemler yaratmaktadır. Gerekli önlemlerin alınabilmesi için kullanılmakta olan betonun rötresi hakkında bilgiye sahip olunması gerekir. Bu bilgileri elde edebilmek için deney yapılmalıdır. Rötre birçok faktöre bağlıdır. Özellikle zamana bağlı bir oluşum olması, rötre deneylerinin uzun süre almasına neden olmaktadır [3].

2.1. Betonda Geçirimsizlik ve Durabilite

Betonun durabilitesi; betonun hava tesirlerine, kimyasal etkilere, aşınmaya ve diğer bozunmalara karşı gösterdiği dayanıklılık olarak tanımlanır [4].

Permeabilite betonun durabilitesi için çok önemli bir özelliktir. Beton geçirimsiz ise durabilitesinden söz edilemez. Geçirimsizlik, suyun ve dolayısı ile suyun içindeki zararlı kimyasal maddelerin beton içerisindeki hareket edebilme kabiliyetlerini ifade eder.

Suyun beton içindeki hareketi; boşluk cinsine, boşluk büyüklüğüne, boşluk dağılımına ve mikro ve makro çatlaklara bağlıdır. Bu yüzden boşluk ve çatlakları belli bir seviyenin altında tutmak beton durabilitesi açısından hayati önem taşır. Boşluk ve çatlaklar içerisindeki gaz ve su hareketleri ile taşınan zararlı kimyasallar durabiliteyi olumsuz yönde etkiler. Boşlukların yapısı ve çatlakların oluşmasında çimentonun kimyasal birleşimi ve beton içerisindeki agregaların özellikleri de etkilidir [5].

Betonda karşılaştığımız birçok sorunun başlıca nedeni betonun geçirimli olmasıdır. Bu sorunların başlıcaları; sülfat etkisi, alkali-silika reaksiyonu, korozyon, donma ve yangın dayanımına olumsuz etkileridir.

Sülfat etkisi sülfat iyonlarının sertleşmiş betondaki alüminli ve kalsiyumlu bileşenlerle kimyasal reaksiyona girmesi sonucu etrenjit ve alçı taşı oluşturmaları ile gerçekleşir. Sülfatlı suların beton üzerindeki korozif etkisi iki şekilde ortaya çıkar. Birinci etki sülfat anyonlarının, çimento hidratasyon ürünü hidrat kireçle tepkimesi sonucu alçıtaşı oluşumudur. Sülfat tuzunun katyon türüne bağlı olarak alçı taşı ile birlikte oluşturduğu reaksiyon ürünü, NaOH gibi suda eriyen veya $Mg(OH)_2$ gibi suda erimeyen türde olabilir. Sülfatların asıl önemli etkisi, alçı taşı ile veya suda erimiş halde bulunan kalsiyum sülfatla C_3A 'ın reaksiyona girmesiyle ortaya çıkar. Etrenjit, içerdiği kristal suyunun fazlalığı nedeniyle büyük hacim artışına sebep olur. Kristalleşen katı haldeki tuz betonun boşluk çeperlerinde büyük basınç gerilmeleri oluşturur; önce çatlamlar şeklinde olan hasar, ileri yaşlarda ayrışmaya ve parça dökülmelerine sebep olur.

Alkali agrega reaksiyonu, betonda kullanılan çimentodan veya dış kaynaklardan gelen alkali hidroksitlerle, beton içindeki agregaların içerdiği reaktif bileşenler arasında meydana gelen bir kimyasal reaksiyondur. Alkali agrega reaksiyonunun bilinen üç oluşum şekli vardır: Alkali - karbonat reaksiyonu (AKR), alkali - silikat reaksiyonu (yavaş ilerleyen alkali silika reaksiyonu) ve alkali - silika reaksiyonu . Alkali karbonat reaksiyonu (AKR), dolomit ve/veya kil mineralli ve ince taneli kireçtaşı içeren agregalardan imal edilmiş betonlarda meydana gelmektedir. Alkali silikat reaksiyonu ise fillosilikat grubu minerallerden oluşmuş agrega içeren betonlarda görülmektedir [6].

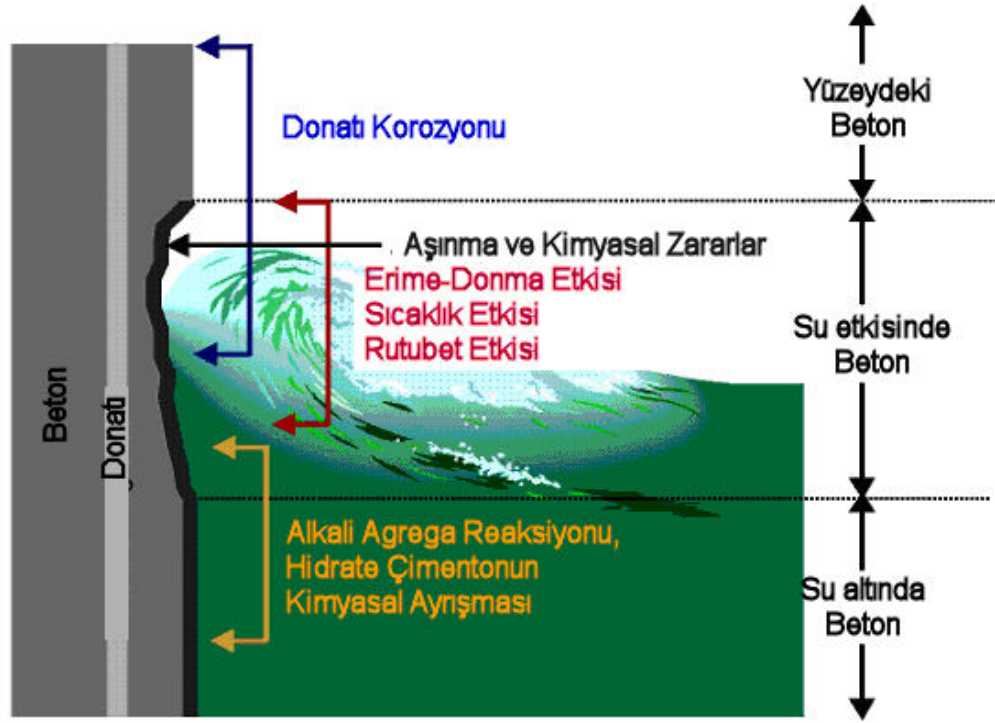
Genel olarak "korozyon", metalik malzemelerin katı, sıvı ve gazlar tarafından aşındırılması ile özelliklerini kaybetmesi ve kullanılmaz hale gelmesi olarak tanımlanabilir. Metal ve alaşımların kararlı halleri olan bileşik haline dönme eğilimleri yüksektir. Bunun sonucu olarak metaller içinde bulundukları ortamın elemanları ile reaksiyona girerek, önce iyonik hale ve oradan da ortamdaki başka elementlerle birleşerek bileşik haline dönmeye çalışırlar; yani kimyasal değişime uğrarlar ve bozunurlar. Sonuçta metal veya alaşımın fiziksel, kimyasal, mekanik veya elektriksel özelliği istenmeyen değişikliklere ve Şekil 2.1'de gözüktüğü gibi zarara uğrar. Korozyon hem metal veya alaşımın bozunma reaksiyonuna, hem de bu

reaksiyonun sebep olduğu zarara verilen addır. Korozyon, metalik malzemelerin içinde bulundukları ortamla reaksiyona girmeleri sonucu, dışarıdan enerji vermeye gerek olmadan, doğal olarak meydana gelen bir olaydır.



Şekil 2.1: Betonarme Yapıda Korozyon

Pratikte çeşitli bozunma mekanizmaları betonarme yapı üzerine aynı anda etki edebilirler. Şekil 2.2'deki şematik diyagram betonarme bir yapı üzerindeki çeşitli bozunma mekanizmalarının nasıl çalıştığını göstermektedir.



Şekil 2.2: Betonarme Yapı Üzerinde Bozunma Mekanizmaları

Beton durabilitesi, betonun kalitesine bağlı olup, performansta bileşen malzemeler, karışım oranları, üretim yöntemi, betonun bakım ve kürü gibi süreçler ile çevre koşulları etkilidir. Beton uygun şekilde kür edilmemişse mukavemet yaklaşık %30 düşebilir, ancak durabilite daha da olumsuz etkilenir; kür edilmemiş betonun geçirimliliği yaklaşık 10 kat artabilir, bu da korozyonu olumsuz şekilde etkiler ve durabilite önemli ölçüde azalır. Uygun beton durabilitesi için amaca uygun malzeme seçilmeli, su da dâhil bütün bileşenler standartlara uygun olmalı karışım iyi tasarlanmalı ve taze betonun yeterli biçimde yerine yerleştirilmesi sağlanmalı, özellikle ilk sertleşme sürecinde yüksek sıcaklık farklarından kaçınılmalı, beton iyi korunmalı ve gerekli kür aksatılmadan yapılmalıdır. Tüm bunlar yapılırsa betonda oluşabilecek oturma çatlaklarının, plastik rötre çatlaklarının ve kısıtlanmış rötre çatlaklarının önüne geçilebilir. Bu çatlakların önlenmesi betonun durabilitesi açısından yararlıdır [4].

Beton kullanılacağı yerdeki çevresel şartlara göre geçirimsizliğini tespit etmek amacıyla kılcal su emme, yavaş ve hızlı klor geçirimsizliği gibi deneyler yapılmaktadır.

2.2. Betonda Klor Etkisi

Yüksek kalite betonların klor dayanımlarının belirlenmesi için yüksek kalitedeki betonlara klor penetrasyonunu incelenir ve analizi yapılır. Donatıya zarar vermeyecek oranda betona klor girişini belirlemek bir bakıma durabilitesine etki etmeyecek ve servis ömrünü azaltmayacak miktarı bulmak için bu analizler yapılır.

Özellikle deniz yapılarında kullanılan betonarme elemanlarda klor difüzyonu çok önem kazanmıştır, çünkü klor iyonları betonarme donatının korozyona uğramasına yol açmaktadır.

Servis ömrü dört etkene bağlıdır:

1. Korozyonun başlama zamanı
2. Korozyonun beton yüzeyinde görünür olması
3. Betonarme elemanda çatlakların ve dökülmelerin başlaması
4. Donatı miktarının azalması sonucu betonarme elemanın taşıma kapasitesinin düşmesi

Betonarme elemanda korozyonun başlaması sonucu iki önemli özellik olumsuz yönde değişmeye başlar; yapının taşıma kapasitesi ve sünekliği.

Klor etkisine karşı alınacak önlemlerin yapım aşamasındayken uygulanması, klor difüzyonu başladıktan sonraki aşamada yapılan tamirata göre son derece kolay ve düşük maliyetlidir. Servis ömrünü belirlerken sadece laboratuvar çalışmaları neticesinde belirlenmez bunun yanında bu zararlara uğramış betonarme yapılar incelenerek deney sonuçlarıyla karşılaştırılır ve olasılık yöntemleriyle servis ömrü tahmin edilir. Klor difüzyonunu betondaki değişik derinliklerdeki klor dağılım konsantrasyonlarını belirleyerek tanımlayabiliriz. Klor dağılımı (değişik derinliklerdeki klor konsantrasyonları) çevresel faktörlerin, yapının dizaynının ve malzeme özelliklerinin zamana bağlı fonksiyonu olarak gösterilebilir.

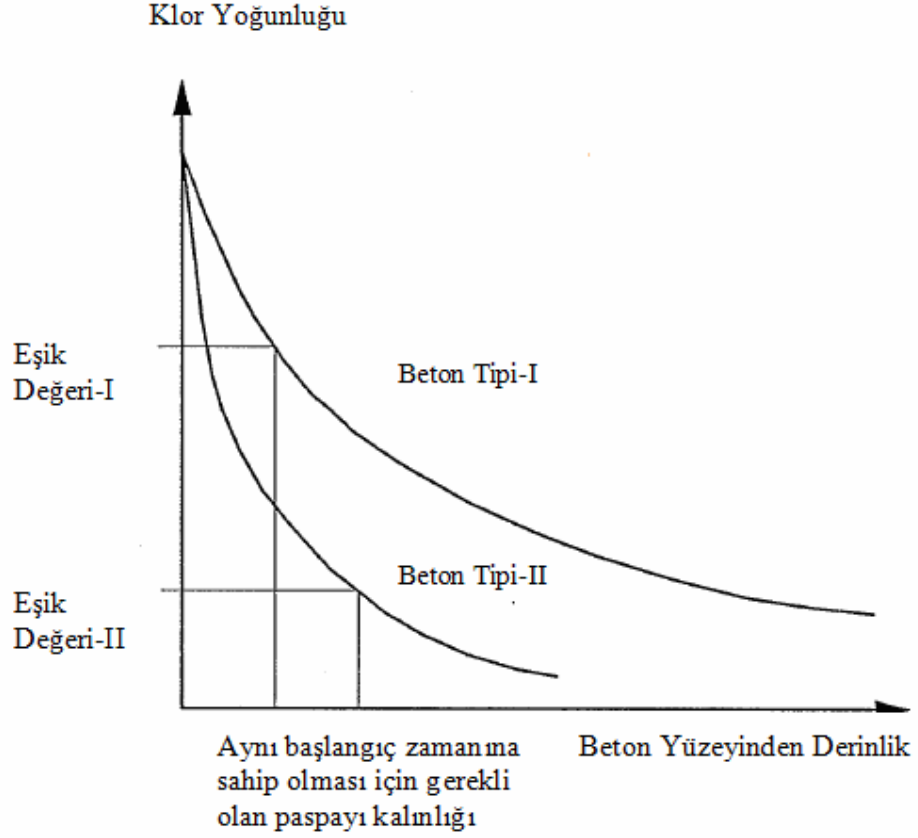
Hava olayları da klor dağılımı üzerinde etkilidir. Yağmur klor konsantrasyonunu artırırken, buharlaşma klor konsantrasyonunu yükseltir. Nem akışına ve iyon

difüzyonuna bağı olarak klor içeri veya dışarı doğru hareket edebilir. Suyun betondaki hareketinin etkileri suyun betondaki hareketinin büyüklüğüne, yani permabilitesine ve basınç derecesine, betonarme elemanın ters yüzeyindeki ve içindeki buharlaşma potansiyeline bağlıdır.

Klor difüzyonunda ölçtüğümüz klor miktarı betonun hidratasyonunda bağlanmış olan klor ve betonun içindeki sıvıda bulunan serbest olarak betonda hareket eden klor oranının toplamıdır. Beton için zararlı olan klor ise serbest olarak dolaşan klordur. Bundan dolayı klorun bağlanma kapasitesi serbest gezen klorun konsantrasyonunu etkiler. Betonarme elemandaki serbest gezen klor iyonlarının konsantrasyonu arttıkça beton içerisinde hareket eden iyon sayısı da artmaktadır.

Fazla detaya girmeden açıklamak gerekirse klorun bağlanma kapasitesi klorun betona giriş şekliyle ilgilidir. Eğer klor iyonları taze beton karışımında eklenirlerse serbest haldeki klor iyonundan değişik bir yapıya bürünürler.

Klor iyonlarının dağılımına baktığımız zaman yüzeye yakın bölgelerde yüksek değerler ölçülürken derine indikçe serbest gezen klor iyonlarının difüzyonu azalmakta ve değeri azalmaktadır. Şekil 2.3'teki klor-derinlik grafiğine bakıldığında da bu açıkça görülebilir.



Şekil 2.3: İki farklı Tipteki Betonda Klor Profili

Bu metotlar günümüzde betonarme elamanın klor eşiği ve klor difüzyonu belirlenerek servis ömrünün tahmininde önem kazanmıştır [7].

2.2.1. Klorun Beton İçerisindeki Hareketi

Klor iyonları beton içerisindeki suyun içerisinde elektriksel bir ortam olmadan 2 farklı şekilde hareket ederler; betonun içerisindeki hareket etmeyen suyun içerisinde saf olarak yayılarak ve beton içerisindeki hareketli suyun hareketiyle birlikte. Son yıllarda geliştirilmiş olan hızlandırılmış test metotlarında elektriksel bir ortam yaratılarak klor iyonlarının elektriksel hareketi sağlanmıştır.

Betonun içindeki bağlanmış klor iyonlarının miktar olarak tanımı çeşitli şekillerde yapılabilir. Çünkü bağlı olan klorların miktarı ortama göre değişiklik gösterebilir.

Sahadan alınan örnekler laboratuvara getirildiğinde numunede sıcaklık artışı olur buna bağlı olarak bağlı olan klor iyonlarının sayısı azalır yani bağlar zayıflar, kopar ve serbest iyon olarak beton içerisindeki suya katılırlar. Bundan dolayı da beton

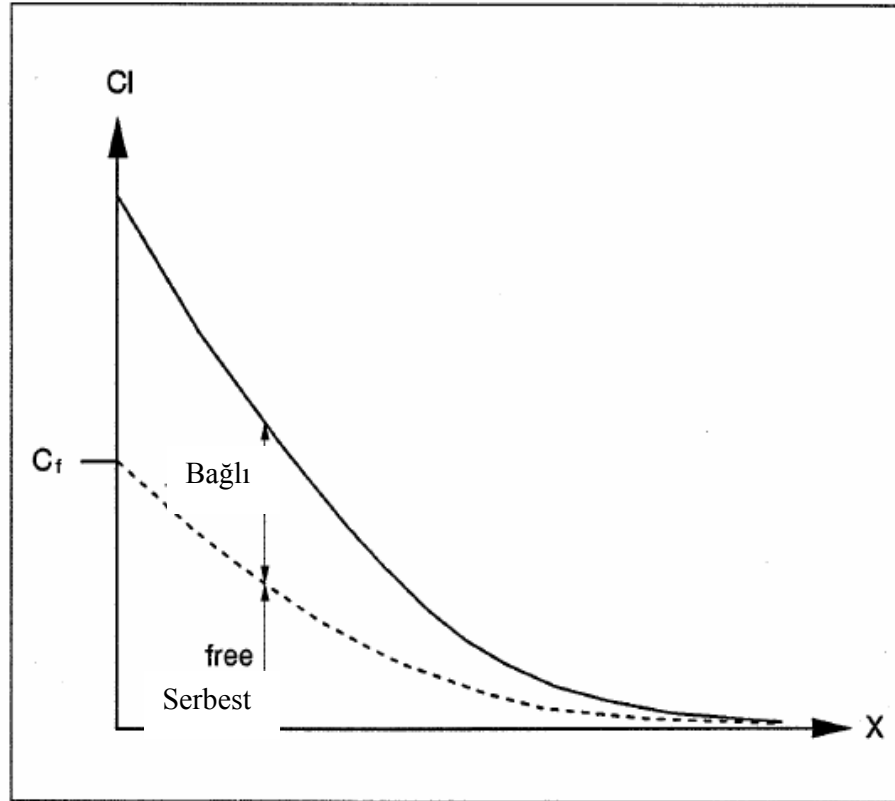
içerisinde ki boşluk suyunun konsantrasyonu artar. Betonun boşluk yapısı da bu ölçümleri etkiler [7].

2.2.2. Serbest ve Bağlı Klor İyonları

Klor iyonları beton içerisinde farklı formlarda yer alır. İyonlardan bazıları serbest olarak beton içindeki suda bulunanlar, kalanları ise kimyasal ve fiziksel olarak beton üretilirken oluşan reaksiyonlarda yüzeylere bağlanan iyonlar. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi bu iyonlar derinlikle değişirler.

$$C_{\text{toplam}} = C_{\text{serbest}} + C_{\text{bağlanmış}} \quad (2.1)$$

Bu denklemde “c” [kg/m³], [mol/hacim] veya [kg/kg] cinsinden klor konsantrasyonunu göstermektedir. Serbest klor iyonları genellikle [kg/m³ boşluk suyu] cinsinden belirtilmektedir [7].



Şekil 2.4: Beton İçerisindeki Serbest ve Bağlı Klor İyonlarının Derinlik İle Değişimini Gösteren Grafik

2.2.3. Klorun Bağlanma Kapasitesi

İyon konsantrasyonu değişirken malzemenin klor iyonları bağlanma yeteneğine bağlama kapasitesi olarak tanımlanır.

$$\text{Bağlama kapasitesi} = \partial c_b / \partial c_s \quad (2.2)$$

Klor bağlanma bağlama kapasitesi düşük klor konsantrasyonlarında çok yüksektir. Denkleme bakacak olursak klor bağlama kapasitesi yüksek konsantrasyonlar da sıfıra yaklaşır [7].

2.2.4. Belirleyici Özellikler

Bağlanmış klorlarla ilgili 3 tane kesin etkenden söz edilebilir:

- Klor konsantrasyonu
- Bağlayıcı içeriği
- Spesifik yüzey alanı veya toplam jel

Toplam bağlanmış klor iyonları toplam bağlayıcının lineer bir fonksiyonudur. Su-bağlayıcı oranı ve sertleşmekte olan betonun hidratasyon derecesi klor iyonlarının bağlanmasında önemli bir parametre oluşturmaktadır.

Diğer önemli parametreler ise

- Diğer iyonlar özellikle hidroksit ve alkaliler,
- Sıcaklık,
- Bağlayıcı tipi ve özellikleri,
- Agregat tipi,
- Karbonatlaşma,

şeklinde sıralanır [7].

2.3. Rötire ve Rötire Çatlakları

Rötire, sertleşmiş betonun, harcın ve çimento şerbetinin, buharlaşmadan oluşan su kaybı sonucu zamana bağlı hacim azalması olarak tanımlanmaktadır [1].

Beton, mineral agregâ ve sertleşmiş çimento hamurundan oluşmaktadır. Çimento hamuru, agregaların arasını dolduran ve onları kendine bağlayan sürekli bir faz olarak düşünülebilir [8]. Bu iki faz dışında beton içinde bazen kısmen su ile dolu bir boşluk yapısı vardır ve betonun fiziksel kararlılığı üzerinde oldukça önemli rol oynamaktadır. Portland çimentosunun hidratasyon oranı çimento taneciklerinin yüzey alanına bağlıdır ve çimentonun mukavemeti daha hızlı gelişmektedir. İnce çimento kullanımıyla artan rötre ve sünme genellikle erken yaşlarda hızlı hidratasyona bağlı olarak ortaya çıkmıştır. Rötre olayının meydana gelişini açıklamak için suyun sertleşmekte olan çimento hamuruna olan etkilerini, yani hidratasyon olayını incelemek gerekmektedir.

Hidratasyon, su ile çimentoyu oluşturan maddelerin yaptıkları reaksiyondur. Öğütülmemiş klinker su ile temas ettirilirse herhangi bir reaksiyona girmez. Çimentonun su ile reaksiyona için çok ince öğütülmesi gerekir. İnce öğütülmüş çimentoların hidratasyon hızları yüksektir [8]. İşlenebilirlik daha ince çimento kullanımıyla arttırılmış ve böylece eşit işlenebilirlikli karışımlar karşılaştırıldığı zaman bir miktar rötre ve sünme artışı olduğu görülmüştür. Düşük su/çimento oranına sahip karışımlarda çimento inceliğinin etkisi en az düzeydedir [9].

Rötre, suyun hareketi sonucu oluşur. Suyun hareketinin hızını etkileyen çeşitli etkenler vardır. Çimento hamuru içindeki boşlukların miktarı ve yapısı en önemli faktördür.

Hidratasyon sırasında çimento, içinde $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristalleri bulunan koloidal yapıli bir cisimdir. Bu yapıyı meydana getiren jelin özgül alanı 2 milyon cm^2/g mertebesinde bulunmaktadır [10]. Beton birbirinden çok farklı karakteristiklere sahip iki fazın bir araya gelmesiyle elde edilen bir cisimdir. Bu iki fazdan biri agregâ taneleridir. İkinci faz agregâ tanelerini birbirine bağlayan bağlayıcı madde veya çimento hamurudur. Agregâ tanelerini gelişmesini tamamlamış katı cisim olarak kabul etmek mümkündür. Çimento fazı, değişik elemanlardan oluşmaktadır. Çimentonun su ile temas ettiği andan itibaren belirli bir süre geçtikten sonra bu fazda şu cisimler yer almaktadır:

1. Hidratasyon yapan çimento, bunun büyük bir kısmını jeller meydana getirmiştir.
2. Hidratasyon yapmamış çimento taneleri veya anhidre elemanlar

3. Su; çimento hamurunda serbest su, kapiler su, jel suyu olmak üzere üç farklı şekilde bulunur [9].

Su ile temasa geçmemiş çimento özgül alanının ancak $500 \text{ cm}^2/\text{gr}$ olduğu hatırlanırsa hidratasyon sonunda bu karakteristik de çok büyük bir artış olduğu kolayca anlaşılır. Böyle bir bünyeye sahip olan cismin içinde üç türlü boşluk bulunmaktadır. Birincisi, jel taneleri arasında mevcut boşluklardır. Birbirleri ile bağlantı halinde bulunan bu boşlukların boyutları $15-35 \text{ A}^0$ mertebesinde, boşlukların toplam çimento hamurunun toplam hacminin (0,28)i kadardır [10]. İkinci grup boşluklar kılcal boşluklar olup boyutları $(10^6-10^4)\text{A}^0$ arasındadır. Bunlar jel boşluklarına göre bir hayli büyüktür. Genellikle birbirlerine bağlı bu boşlukları, karma suyunun hidratasyon tamamlanmış olmasına rağmen reaksiyona katılmamış kısımları olarak düşünmek

mümkündür. İslenebilir bir beton karışımı yapıldığında kılcal boşluklardan kaçınılması mümkün değildir. Önemli olan bu boşlukların miktarı, dağılımı ve sürekli bir ağ oluşturup oluşturmadığıdır. Su/çimento oranı düştükçe ve hidratasyon ilerledikçe kılcal boşluklarda önemli azalmalar görülür [11].

En son olarak da çimento hamuru içinde boyutları $0,1 \text{ mm}$ 'den büyük boşluklar mevcut bulunmaktadır.

Normal agregalı betonun rötresi üç temel parametreye bağlıdır. Bunlar çimento harcının rötresi, agreganın rötresi ve agreganın hacim konsantrasyonudur. Aynı su/çimento oranına sahip beton numuneleri için gözlenen rötrenin orijinal ağırlıkça su muhtevasına, betonun Young modülüne ve agreganın granülometrisine bağlılığı, beton rötresinin agreganın hacim konsantrasyonuna bağlılığına takip etmektedir.

Rötre, beton yapılarda bir dizi sebepten dolayı çatlamaya neden olabilir. Bu sebepler:

- Beton elemanı içindeki farklı rötre
- Beton elemanları arasındaki farklı rötre
- Agreganın sıkışması
- Çelik donatının sıkışması
- Beton kalıbın cidarlarındaki sıkışma [12].

Çimento bünyesinde bulunan suyu genel olarak buharlaşan ve buharlaşamayan olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür. Buharlaşamayan su hidratasyon olayları sonunda çimentonun karma oksitleri tarafından tespit edilen sudur.

Buharlaşabilen su ise çimento hamurunun çeşitli boşluklarına yerleşmiştir [10]. Bu boşluklar üç çeşit olduğundan buharlaşabilen su da üç çeşittir:

- a. Serbest Su: Bu çimento hamurunun veya betonun büyük boşluklarında bulunan sudur. Buharlaşma yolu ile betondan kolaylıkla ayrılabilir.
- b. Kapiler Su: Bu çimento hamurunun kapiler boşluklarında yerleşmiştir. Cismin kimyasal birleşimiyle ilgisi yoktur.
- c. Jel Suyu: Bu çimento hamurundaki jel boşluklarında yer alan veya jel elemanlarının adsorbsiyon yolu ile tespit ettikleri sudur [10].

Hidratasyonunu tamamlamış çimento hamuru rutubetin az olduğu bir ortamda bırakılırsa önce serbest su buharlaşmaya başlar. Daha sonra sırasıyla kılcal su ve jel suyu boşluklara doğru hareket eder ve buharlaşır. Böylece ağırlıkça bir azalma olur. İşte rötre olayı, çimento hamuru içinde bulunan kapilarite ve jel suyunun miktarının değişmesi sonunda meydana gelmektedir [10].

- a) Çimento hamurunda kapiler ve jel suyu miktarının değişmesi rötreye sebep olmaktadır.
- b) Rötreye çimentonun sebep olduğu bir olaydır. Bir betonun rötresi ihtiva ettiği çimento miktarı ile artmaktadır.
- c) Su miktarındaki değişmeler veya azalmalar zamana bağlı olduğundan rötreye zamanla birlikte artmaktadır.

2.3.1. Rötreyi Etkileyen Faktörler

Rötreye birçok faktöre bağlı bir oluşumdur. Bunlar sırasıyla çimento ile ilgili faktörler, ortam şartları, beton bileşimi, agrega cinsi, zaman ve eleman boyutlarıdır.

Taze betonun kolayca karılabilmesi, segregasyon yapmadan taşınabilmesi, yerleştirilmesi, sıkıştırılabilmesi ve yüzeyinin düzeltilebilmesi, işlenebilirliği ifade eder. İşlenebilme, taze betonun en önemli özelliğidir. İşlenebilirliği yüksek olan beton minimum enerjiyle karıştırılabilir ve kalıba yerleştirilebilir [13].

İşlenebilme özelliği, betonun yapısından kaynaklanan şu özellikler ile ilgilidir:

- Taze beton kütleinde akma başlatacak kuvvete karşı betonun göstereceği direnç (kayma dayanımı),
- Akma başladıktan sonraki hareketlilik (akıcılık),
- Betonu oluşturan malzemelerin birbirine ne ölçüde bağlanmış olduğu, böylece, segregasyona karşı göstereceği direnç
- Yerleştirilmeyi ve yüzeyinin düzeltilmesini etkileyen yapışkanlık

Beton karışımının sahip olduğu ıslaklık, taze betonun taşınabilirliği, pompalanabilirliği, yerleştirilebilirliği, segregasyonu, sıkıştırılabilirliği ve yüzeyinin düzeltililebilirliği gibi kavramların tümü, betonun işlenebilme özelliği içerisinde yer alan kavramlardır.

Kıvam, taze beton karışımının ıslaklık derecesi anlamına gelmektedir. Kıvamı çok yüksek olan bir taze beton, düşük kıvamdaki bir betona göre daha rahat karılabilmekte, daha rahat pompalanabilmekte daha rahat yerleştirilebilmektedir. Ancak, beton kıvamının çok yüksek olması, beton işlenebilirliğinin yeterli olduğu anlamına gelmemektedir. Çünkü aşırı derecede sulu bir beton karışımının kalıplara yerleştirilmesi ve sıkıştırılması işlemlerinde betondaki çimento harcı ile iri agregalar kolayca segregasyon gösterebilmektedir. Kıvamlarına göre taze betonlar, kuru, plastik ve akıcı olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırmada betondaki su miktarı önemli ölçüde rol almaktadır [14].

2.3.2. Kısıtlanmış Rötire

Betonun önemli dezavantajlarından biri olan rötire meyilli olması ve rötiresinin kısıtlanması durumunda ise bünyesinde çatlak veya çatlaklar ortaya çıkmasıdır [15].

Erken yaş rötire çatlakları betonarme binaların döşemesi, köprüleri tabanları ve kaplama betonlarında ciddi sorunlar yaratabilir. Betonda erken yaş çatlak oluşum potansiyelini belirleyebilmek çeşitli testler uygulanabilmektedir. Halka testi ekonomik oluşu ve uygulama basitliği dolayısıyla erken yaş çatlakları üzerine yapılan kalite kontrol testlerinde tercih sebebi olmuştur. Bu çalışmada halka testi kullanılarak iki farklı tür betonda; pompalanabilir ve prekast betonda agrega miktarı ağırlıkça sabit tutularak su/çimento oranını değiştirerek rötire çatlaklarının gelişimi izlenecek ve sonuçlar karşılaştırılacaktır.

Erken yaş rötre çatlakları betonarme yapıların durabilitesini düşüren etkenlerin başında gelir [16].

Betonda işlenebilirliği arttırmak için ince öğütülmüş  imento kullanılmıştır. İnce    t lm ş çimentoların hidratasyon hızları yüksektir, bundan dolayı eşit işlenebilirlikli karışımlar oluşturulduğu zaman bir miktar rötre ve s nme artışı olduğu görülmüştür. Düşük su/ imento oranına sahip karışımlarda  imento inceliğinin etkisi en az düzeydedir [8]. Kısıtlanmış durumlarda otojen rötre kuruma r tresiyle beraber betonda çatlaklara yol açar [16]. Bu çatlakların genişliğinin zamanla değişimini etkileyen serbest rötre, s nme, elastisite modülü, çekme gerilmesi ve kırılma dayanımı gibi birçok faktör mevcuttur.

Taze betonda erken yaşta hacim değişimleri gözlenir. Bu hacim değişimleri nem kaybı, sıcaklık değişimi ve kimyasal reaksiyonlar sonucu meydana gelir. Eğer taze betonu hacim değişimlerine karşı kısıtlarsak betonda çekme gerilmeleri oluşur ve bu çekme gerilmeleri sonucu çatlaklar meydana gelebilir [17]. Bu  ekme gerilmeleri betonun çekme dayanımını aşarsa bu görünmez çatlaklar oluşur [18].

Betonun erken yaş çatlak oluşum potansiyeline serbest rötre ve betonun çekme dayanımının yanı sıra rötrenin şiddeti ve hızı, kısıtlamanın derecesi, gerilme gevşemesi, zamana bağlı malzemenin özelliklerinin değişimi, yapının geometrisi ve kırılma dayanımı etki eder [18]. Halka testi gerilim altında betonun davranışının incelenmesinde önemli bilgiler verecektir.

Betonun  atlama eğilimi sadece rötre potansiyeline ve çekme gerilmesine bağlı değildir. Bunların yanında betonun çekme s nme karakteristiği de önemli bir rol oynar. Çekme gerilmesinin oluşumunun yanında çekme s nmesi de oluşmaktadır. Halka numunelerde meydana gelen s nme şekil değiştirmesi miktarı serbest rötre şekil değiştirmesi miktarından %50'lere varan ölçüde olabilir. Bundan dolayı çekme s nmesi, kısıtlama altındaki betonda mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Daha önce yapılan bir çalışmada kısıtlanmış r treden dolayı oluşan çekme s nmesi karakteristiğinin sabit gerilme altındaki bir betonda oluşan çekme s nmesi karakteristiğinden daha az olduğu belirlenmiştir.

Betonda kuruma boyunca artacak olan çekme gerilmelerinin yanında meydana gelecek olan çekme s nmesi bu gerilmeleri gevşeterek oluşumunu bu gerilmelerin

oluşumunu engellemekte veya geciktirmektedir. Bu nedenden ötürü çatlağın başlama zamanı sadece çekme gerilmesine değil çekme sümesine de bağlıdır [19].

Halka testini bu çalışmadaki rolü ise şu şekilde olacaktır: Çelik halka betonun rötresini kısıtlayacak bunun sonucunda çelik halkada deformasyon oluşacak bu deformasyonların düzenli ölçümüyle de betonun çatlama zamanı hakkında doğru bilgilere ulaşılabacaktır.

2.3.3. Plastik Rötire

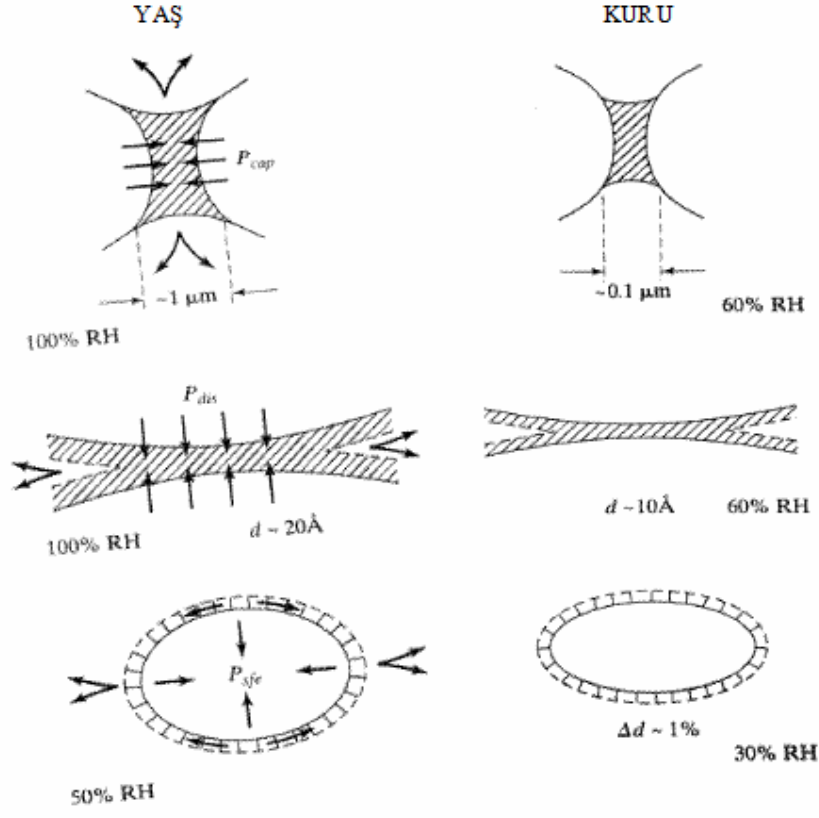
Bu tip rötire beton hala plastik fazdayken yani priz süresi devam ederken gerçekleşir. Beton karışım suyunu beton yüzeyinden buharlaşarak veya alt yüzey tarafından emilerek kaybeder [20]. Yüzeydeki su, rüzgâr veya güneşin etkisiyle buharlaşırken beton içerisinde hidrasyon bünyesindeki suyu kullanmaya devam eder. Bu aşamada yüzeydeki buharlaşma hızı, terleme hızından fazla olursa betonda “plastik rötire” meydana gelir [21]. Plastik rötire, buharlaşan su miktarı terleyen su miktarım aştığında belirginleşir. Plastik rötire nedeni ile donatıların ve iri agregaların alt yüzlerinde hava cepleri oluşur ve aderans yetenekleri azalır, yok olur.

Plastik rötrenin sonucu olarak beton yüzeyinde kapileriteden dolayı mikroskobik ölçekte hacim değişiklikleri olur. Bu hacim değişikliğinden dolayı beton yüzeyinde çatlaklar oluşması muhtemeldir. Çünkü, bu bölge yani yüzey, çoğunlukla çekme gerilmelerini karşılayacak elemanlardan yoksun bölgelerdir [21].

Beton içerisinde veya yüzeyinde kapileriteden dolayı oluşan menisk hali betonda bir basınç etkisi oluşturur. Üst kısım büzölmeye zorlanırken, alt kısım sıkışmaya başlar. Bu basınç etkisi beton içindeki suyun, kılcal boşluklardan yukarı doğru çıkışını hızlandırır. Basınç etkisiyle kendisine daha kolay ve kalıcı bir yol açan su, betonun ilerleyen zamanlarda donatısının korozyona uğramasına sebep olacak bu boşlukları da birleştirmiş ve betonun geçirimliliğini arttırmış olur.

2.3.4. Kuruma Rötresi

Kuruma rötresi prizini alıp sertleşmiş ve serbest halde bulunan suyunu kaybetmiş betonda meydana gelir. Ortamdaki bağıl nem oranının düşmesi, kuruma rötresinin gerçekleşme oranını artırır. Kuruma rötresine etki eden 3 temel etken vardır; kılcallık, basınç, açığa çıkan enerjideki değişim. Şekil 2.5'te kuruma rötresine sebep olan mekanizmalar şekillerle açıklanmıştır.



Şekil 2.5: Çimento Hamurundaki Kuruma Rötresine Sebep Olan Mekanizmalar

Beton dökümünden sonra çevre koşullarına göre ısı dengeleninceye kadar betonun çevresiyle ısı alışverişi devam eder. Eğer yüzeydeki ısı, iç ısıdan az ise beton içerisinde su, ısı dengeye ulaşınca kadar buharlaşır. Yine beton ve çevresi arasında nem farkı da su buharı transferine yol açar. Ortamın rutubeti, betonun kendi rutubetinden az ise, buharlaşma rutubetin fazla olduğu taraftan kuru tarafa devam edecektir. Bunun sonucunda betonda mikroskobik ölçekte büzülme meydana gelir, buna “kuruma rötresi” denir.

Betonda kuruma rötresinin miktarı suyun buharlaşma hızıyla değil, beton içerisindeki suyun difüzyon hızıyla ilgilidir. Çünkü betonun yüzeyine yakın kısımlardaki su, havadaki nemle çabucak dengeye ulaşırken iç bölgedeki nem dengesi, betonun difüzyona müsaade hızıyla alakalı olacaktır [20].

2.4. Pompalanabilir Beton

Bilgisayar kontrolüyle istenilen oranlarda bir araya getirilen malzemelerin, beton santralinde veya mikserde karıştırılmasıyla üretilen ve tüketiciye "taze beton" olarak teslim edilen betona "Hazır Beton" denir.

Hazır betonu, şantiyede elle ya da betonyerle karıştırılarak hazırlanan betondan ayıran temel unsur, hazır betonun modern tesislerde, bilgisayar kontrolüyle üretilmesidir. Hazır beton kullanıcısının hazır betonda arayacağı nitelikler TS EN 206-1 standardında yer almaktadır.

Hazır beton üretiminin su ölçme ve karıştırma işlemlerinin santralde veya transmikserde yapılmasına göre kuru ve yaş sistem olarak ikiye ayrılır.

Kuru karışımli hazır beton, agrega ve çimentosu beton santralinde ölçölüp santralde veya transmikserde karıştırılan, suyu ve varsa kimyasal katkısı ise teslim yerinde ölçölüp karıştırılarak ilave edilen hazır betondur. Kuru karışımli hazır betonda şantiyede karışma verilen su miktarına (formölde öngörölenden daha fazla olmamasına) karıştırma süresine (homojen bir karışım için yeterli süre) özel itina gösterilmesi gerekmektedir.

Yaş karışımli hazır beton, su dahil tüm bileşenleri beton santralinde ölçölün ve karıştırılan hazır betondur.

Önce, hazır betonun üretiminde kullanılacak, doğru seçilmiş malzemelerin (çimento, agrega, su, katkı) kalitelerini ve birbirlerine uyumunu incelemek için laboratuvar deneyleri yapılır.

Bu deneylerden geçen malzemelerde zamanla olumsuz değışiklikler meydana gelmesinin önlenmesi için sürekli kalite denetimi yapılmalıdır.

Hazır betonun üretim süreci, santral operatörünün üretilecek betonu tanımlayan formölün numarasını belirleyip, bilgisayar sistemini işletmesiyle başlar. İlk komuttan sonra, ayrı bölmelerde stoklanmış agrega, çimento ve su aynı anda tartılır. Daha sonra tartılmış agrega bant veya kovayla taşınarak mikser kazanına aktarılır. Bu sırada çimento, su ve formölde varsa kimyasal katkı maddesi de kazana aktarılır ve karıştırılır.

Bir harman betonun hacmi santralden santrale değışmekle birlikte, genellikle 1- 3 m³ tür. Santralde karışma süresi de harman hacmiyle orantılı olarak standartlar

tarafından belirlenmiştir. TS EN 206-1 Beton - Hazır Beton Standardı'na göre, 1 m³ ve altındaki harmanlar için karıştırma süresi en az 45 saniye, ek her 0,5 m³ için ek 15 saniyedir. (Ancak, yaş karışım türü üretimde taşıma sırasında, mikser içinde de karışım olduğu dikkate alınarak, bu süre yarıya kadar azaltılabilir.) Yeterince karıştırılmış olan harman, transmiklere boşaltılır, dolum tamamlanıncaya kadar aynı işlem devam eder. Pompalanabilir beton Şekil 2.6'da görüldüğü gibi mikserden pompaya oradan da istenilen noktaya pompa ve yetmezse ucuna eklenen borular ve boruların ucundaki dağıtıcı kol sayesinde dökülür.



Şekil 2.6: Pompalanabilir Beton

2.5. Prekast beton

Bu çalışmadaki iki beton bileşiminden biri olan prekast beton olarak adlandırılan beton dizaynında temel amaç prefabrike elemanlarda istenilen performansı alabilmektir. Prefabrike eleman kullanımında temel amaç kalıpların tekrar kullanılması, elemanların bitiş kalitesi, imalatın hızı, iş güvenliği ve ekonomidir. Prekast beton üretiminde beton yüzeyleri çelik kalıpların yüzeyinde ve kalıp vibratörleri kullanılarak brüt beton kalitesinde elde edilmektedir. Bu şekilde prekast üretim ile yüzey kalitesinde olumlu yönde büyük farklar oluşmaktadır. Montaj

alışmasında ise iyi bir ekiple önceden üretilen betonarme elemanlar yerine hızlı bir şekilde monte edilerek zamandan tasarruf sağlanır. Kalite ve inşaatın hızı artar, iş riski azalır, iklimsel faktörlerde göz önüne alındığında da yapı konvansiyonel yapım sistemine göre daha ekonomik hale gelir. Şekil 2.7'de fabrikada üretilmiş ve montaja hazır olan prekast yapı elemanı fotoğrafı gözükmemektedir.



Şekil 2.7: Prekast Beton Elemanı

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

3.1.1. Çimento

Deneyisel çalışmalardaki iki farklı karışımda kullanılan CEM I 42,5 N tipi çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentoların özgül ağırlıkları pompalanabilir beton ve prekast beton için 3,23 gr/cm³ olarak bulunmuştur. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri ile basınç dayanımları sırasıyla Tablo 3.1, Tablo 3.2, Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.1: CEM I 42,5 N Çimentosunun Fiziksel Özellikleri

	Pompalanabilir Beton	Prekast Beton
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,23	3,23
Blaine (cm ² /g)	3755	4175
Priz başlangıcı (dk)	245	155
Priz sonu (dk)	380	215
Hacim genleşmesi (mm)	2,0	0

Tablo 3.2: CEM I 42,5 N Çimentosunun Kimyasal Özellikleri

	Pompalanabilir Beton	Prekast Beton
Toplam SiO ₂ (%)	21,04	22,09
Çözünmeyen Kalıntı (%)	0,29	1,59
Al ₂ O ₃ (%)	4,62	4,53
Fe ₂ O ₃ (%)	5,98	5,17
CaO (%)	61,95	62,39
MgO (%)	1,04	1,13
SO ₃ (%)	2,93	2,64
Na ₂ O	0,19	0,19
K ₂ O (%)	0,58	0,47
Kızdırma Kaybı (%)	1,39	1,10
Toplam Katkı (%)	<0,1	4,05
Toplam Alkali(%)	0,57	0,50
Cl ⁻ (%)	0,0131	0,0095
7 Günlük Hidratasyon Isısı (Joul/g)	274,1	-

Tablo 3.3: CEM I 42,5 N Çimentosunun Basınç Dayanımı

Basınç Dayanımı (N/mm²)		
	Pompalanabilir Beton	Prekast Beton
2 Gün (MPa)	21,1	20,0
7 Gün (MPa)	32,3	33,2
28 Gün (MPa)	49,6	-

Çimentolar, hidrolik bağlayıcı maddeler olup gerek kendi başına gerekse yanı sıra katılan kum, çakıl, kırma taş gibi malzemelerle birlikte su ile karıştırılıp hamur haline getirildikten sonra hem havada hem de su içinde yavaş yavaş sertleşerek taş haline dönüşürler. Çimentonun ilk günlerindeki mukavemetini sıra ile C_3A ve C_3S bileşenleri temin eder. Bu bileşenlerin çimento içindeki oranı yaklaşık olarak %70-80 civarındadır. Bunların hidrasyon ısıları fazla olduğundan C_3A ve C_3S oranı fazla olan bir çimentonun kütle inşaatlarında kullanılması iç gerilmeler yapması dolayısıyla zararlıdır. Ancak çabuk mukavemet kazanılması istenilen yerlerde C_3A ve C_3S oranı fazla olan çimentolar kullanılır [23].

3.1.2. Mikrosilika

Çalışmalarda Mikrosilika sadece pompalanabilir beton dizaynında çamur halde %51 su/mikrosilika oranında kullanılmıştır. Mikrosilikanın özgül ağırlığı 2207 kg/m^3 olarak bulunmuş ve kimyasal özellikleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4: Mikrosilikanın Kimyasal Özellikleri

	Pompalanabilir Beton
Toplam SiO_2 (%)	91,00
SO_3 (%)	0,13
Cl^- (%)	0,047
Na_2O (%)	0,10
CaO (%)	0,007
MgO (%)	0,42
K_2O (%)	0,04
Si (%)	0,15

3.1.3. Katkı maddeleri

Beton katkı maddeleri, harç ve betonların taze veya sertleşmiş haldeki bazı özelliklerini değiştirmek amacıyla karıştırma işlemi sırasında veya hemen önce karışıma katılan agrega, su, hidrolik bağlayıcı gibi ana bileşenlerden farklı olan maddelerdir.

Katkı maddeleri genel olarak beton içinde %8’lik bir hacim işgal ederler. Katkı maddelerinin, temel üretim kurallarına aykırı hazırlanan bir betonun kötü niteliklerini iyileştirmeleri beklenemez. Katkı maddelerinin seçimi ve kullanılmasında bilinçli davranılması gerekir. Çünkü betonun bazı özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılan bir katkı maddesi, betonun bazı özellikleri üzerinde olumsuz etki gösterebilir veya beklenen olumlu etkiyi göstermeyebilir. Bu maddelerin yerinde ve özelliğine göre uygun miktarda kullanılmasıyla çimentoların mukavemet artışı sağlanır.

Pompalanabilir beton dizaynı için Glenium Sky 506 marka polikarboksilik eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı özelliğe sahip yeni ikinci nesil süper akışkanlaştırıcı beton katkısı kullanılmıştır. Teknik özellikleri Tablo 3.5’te verilmiştir.

Tablo 3.5: Glenium Sky 506 Marka Süperakışkanlaştırıcının Teknik Özellikleri

Malzemenin Yapısı	Polikarboksilik Eter esaslı
Renk	Kahverengi
Yoğunluk	1,05 – 1,09 kg/litre
Klor İçeriği % (EN 480-10)	< 0,1
Alkali İçeriği % (EN 480-12)	< 3

Bu çalışmada prekast beton dizaynında da Glenium Sky ACE 30 marka polikarboksilik eter esaslı, zero energy sistemi ile çalışan, yüksek oranda su azaltıcı, yeni nesil süper akışkanlaştırıcı beton katkısı kullanılmıştır. Prestak betonlar için amaç erkenj ve nihai yüksek dayanım ve dayanıklılığa gereksinim duyulduğu için bu dizayn için bu katkı seçilmiştir. Teknik özellikleri Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.6: Glenium Sky ACE 30 Marka Süperakışkanlaştırıcının Teknik Özellikleri

Malzemenin Yapısı	Polikarboksilik Eter esaslı
Renk	Kahverengi
Yoğunluk	1,06 – 1,07 kg/litre
Klor İçeriği % (EN 480-10)	< 0,1
Alkali İçeriği % (EN 480-12)	< 3

3.1.4. Uçucu Kül

Puzolan; tek başına bağlayıcılık özelliği olmayan ancak ince öğütülüp normal sıcaklıktaki nemli ortamda kalsiyum hidroksitle kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği gösteren malzeme olarak tanımlanır. En yaygın puzolan uçucu küldür. Bu malzeme, termik enerji santrallerinde içersinde öğütülmüş kömürün yanmasıyla ortaya çıkan bir üründür. Baca gazları atmosfere bırakılmadan önce bu gazlar içindeki ince tanelerin toz toplama sistemi tarafından toplanmasıyla elde edilir [24]. İnce ve küresel taneleri sayesinde taze betonda işlenebilmeyi artırır; ayrıca hidratasyon ısını azaltır. Çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturur ve bu sayede çimento hamurundaki boşlukları doldurarak betona dayanıklılık kazandırır [25].

3.1.5. Agregalar

Agrega deneyleri TS 706 EN 12620' ye uygun olarak yapılmıştır. Beton karışımlarında kullanılan agregaların tane yoğunluğu ve su emme oranı TS EN 1097-6 ya uygun olarak yapılmıştır [26]. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.7'de gösterilmiştir. Agregada karışımda maksimum dane çapı 22 mm'dir. Agregaların tane boyutları TS EN 933-1' e uygun olarak yapılmıştır. Elek analizi sonuçları pompalanabilir beton için Tablo 3.8'de prekast beton için Tablo 3.9'da ve her iki dizayn için agregaların tane boyutu granülometresi de Şekil 3.1'de belirtilmiştir.

Tablo 3.7: Agregaların Fiziksel Özellikleri

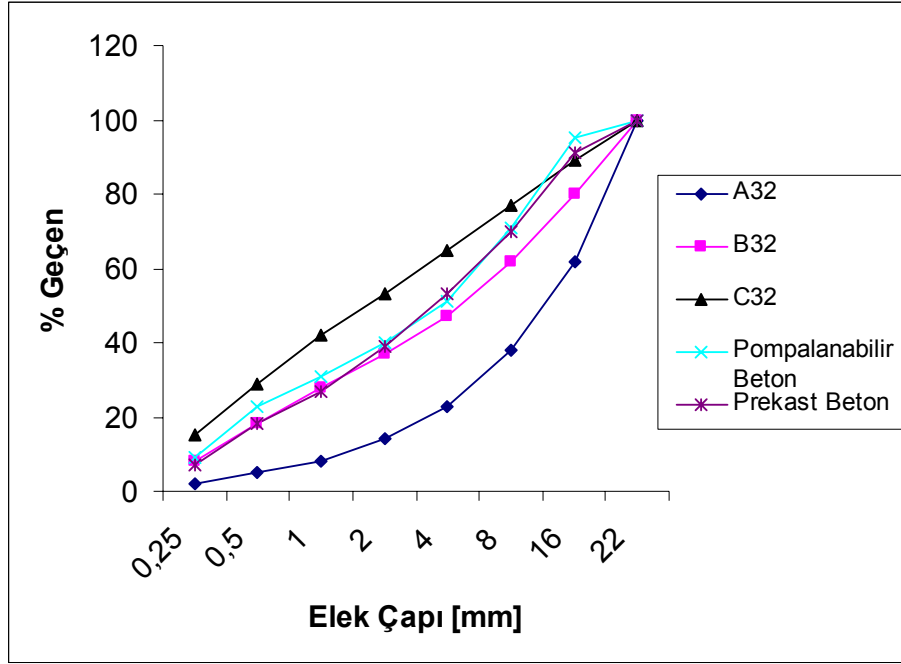
Agrega Türü	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)		Su Emme (%)	
	Pompalanabilir Beton	Prekast Beton	Pompalanabilir Beton	Prekast Beton
Kırmataş II	2,72	2,71	0,40	0,50
Kırmataş I	2,71	2,72	0,50	0,50
Doğal Kum	2,59	2,59	1,40	1,20
Kırma Kum	2,69	2,70	0,90	1,10

Tablo 3.8: Agregaların Tane Boyutu Dağılımı-Pompalanabilir Beton

Elek Göz Açıklığı (mm)	Elekten Geçen (%)				
	Kırmataş II	Kırmataş I	Kırmakum	Doğal Kum	Karışım
22	100	100	100	100	100
16	66	100	100	100	95
8	2	58	100	100	71
4	2	7	92	100	51
2	1	2	59	97	40
1	1	1	34	88	31
0,5	1	1	18	71	23
0,25	1	1	8	26	9
0,125	1	1	4	4	3
0,063	0,8	0,8	2,5	1,4	1
Karışım	%15	%35	%25	%25	%100

Tablo 3.9: Agregaların Tane Boyutu Dağılımı-Prekast Beton

Elek Göz Açıklığı (mm)	Elekten Geçen (%)				
	Kırmataş II	Kırmataş I	Kırmakum	Doğal Kum	Karışım
22	100	100	100	100	100
16	56	100	100	100	91
8	1	60	100	100	70
4	1	6	88	100	53
2	1	2	48	95	39
1	1	1	22	80	27
0,5	1	1	10	59	18
0,25	1	1	4	20	7
0,125	1	1	2	5	2
0,063	0,4	0,7	1,9	2,5	2
Karışım	%20	%25	%30	%25	%100



Şekil 3.1: Agregaların Tane Boyutu Dağılımı Granülometresi

3.2. Beton Karışımı

Bu çalışmada farklı iki dizayna sahip betonlar, çimento hamuru miktarı ve çökme değeri sabit tutularak, su/çimento oranları pompalanabilir beton için sırasıyla %30, %35, %38, %40, %45, %50, %55 ve prekast beton için sırasıyla %30, %31.5, %35, %40, %45, %50, %55 değiştirilerek 14 adet karışım hazırlanmıştır. Pompalanabilir beton dizaynı prekast beton dizaynına göre fazladan uçucu kül ve mikrosilika içermektedir. İlk aşamada üretilen on dört adet beton aşağıda tablolarda verilen dizaynlara göre üretildi, daha sonra halka testi ve RILEM kırılma enerjisi testi için üretilen numunelerin malzemelerinden kırma taş-2, 14 mm'lik elekten elenerek kullanıldı. Üretilen betonun karışım dizaynı 1 m³ için pompalanabilir beton için Tablo 3.10'da prekast beton için Tablo 3.11'de belirtilmiştir.

Tablo 3.10: Beton Karışım Dizaynı – Pompalanabilir Beton

Beton Kodu	PMP-0,30	PMP-0,35	PMP-0,38	PMP-0,40	PMP-0,45	PMP-0,50	PMP-0,55
Su/Çimento	0,30	0,35	0,38	0,40	0,45	0,50	0,55
Çimento	308	287	275	268	252	237	224
Su	100	111	117	120	128	135	141
Doğal Kum	625	628	628	628	628	628	628
Kırma Kum	278	278	278	278	278	278	278
Kırma Taş-1	472	471	471	471	471	471	471
Kırma Taş-2	473	472	471	472	471	472	471
Uçucu Kül	56	52	50	49	46	43	41
Mikro Silika	33	31	29	29	27	25	24
Super akışkanlaştırıcı	8,3	6,4	6,1	6,2	2,3	2,2	1,9

Tablo 3.11: Beton Karışım Dizaynı – Prekast Beton

Beton Kodu	PRK-0,30	PRK-0,315	PRK-0,35	PRK-0,40	PRK-0,45	PRK-0,50	PRK-0,55
Su/Çimento	0,30	0,315	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
Çimento	461	450	427	397	371	349	328
Su	149	139	147	157	165	173	179
Doğal Kum	541	543	543	543	543	543	543
Kırma Kum	468	474	474	474	474	474	474
Kırma Taş-1	454	480	480	480	480	480	480
Kırma Taş-2	382	384	384	384	384	384	384
Uçucu Kül	0	0	0	0	0	0	0
Mikro Silika	0	0	0	0	0	0	0
Super akışkanlaştırıcı	4,7	4,1	3,0	2,3	1,7	1,5	1,9

3.3. Üretimde İzlenen Sıra

- Çimento, agrega ve uçucu külden oluşan kuru karışımın 60 saniye süre ile karıştırılması
- Mikrosilikanın eklenmesi
- Karma suyunun yarısı eklenerek 60 saniye süre ile karıştırılması,
- Akışkanlaştırıcı katkının eklenmesi
- Karma suyunun kalan yarısının eklenmesi ve pompalanabilir beton için toplamda on dakikayı, prekast beton için üç dakikayı bulacak şekilde karıştırmaya devam edilmesi,
- Çökme deneyi,
- Birim ağırlık deneyi,

- Betonun kalıplara doldurulması

Numuneler üretimden bir gün sonra kalıptan çıkarılarak nem odasına alınmıştır. İkinci aşamada kısıtlanmış rötre testi üretilen beton halkalar ve RILEM kırılma enerjisi deneyi için üretilen kirişler ise sıcaklığı 40°C ve nemi %15 olarak sabitlenmiş bir odaya alınmıştır. Beton halkada çatlak oluştuğu gün RILEM kırılma enerjisi deneyinde şekil değiştirme kontrollü bir şekilde yüke maruz bırakılarak kırılmışlardır.

3.4. Numune Kodları

Bu çalışmada laboratuarda üretilen beton numunelerde pompalanabilir beton PMP, prekast beton PRK ve su/çimento oranı da rakam ile Tablo 3.12'de gösterilmektedir.

Tablo 3.12: Laboratuar Numune Kodları ve Açıklaması

Numune Kodlaması	Açıklaması
PMP-0,30	Pompalanabilir beton – su/çimento oranı 0,30
PMP-0,35	Pompalanabilir beton – su/çimento oranı 0,35
PMP-0,38	Pompalanabilir beton – su/çimento oranı 0,38
PMP-0,40	Pompalanabilir beton – su/çimento oranı 0,40
PMP-0,45	Pompalanabilir beton – su/çimento oranı 0,45
PMP-0,50	Pompalanabilir beton – su/çimento oranı 0,50
PMP-0,55	Pompalanabilir beton – su/çimento oranı 0,55
PRK-0,30	Prekast beton – su/çimento oranı 0,30
PRK-0,315	Prekast beton – su/çimento oranı 0,315
PRK-0,35	Prekast beton – su/çimento oranı 0,35
PRK-0,40	Prekast beton – su/çimento oranı 0,40
PRK-0,45	Prekast beton – su/çimento oranı 0,45
PRK-0,50	Prekast beton – su/çimento oranı 0,50
PRK-0,55	Prekast beton – su/çimento oranı 0,55

3.5. Taze Beton Deneyleri

Taze beton deneylerinden laboratuarda, çökme (slump) deneyi ve birim ağırlık deneyi, ölçülmesi testleri yapılmıştır.

3.5.1. Çökme deneyi

Bu deney TS EN 12350-22 de tanımlandığı şekilde yapılır. Çökme deneyi için üst çapı 10 cm, alt çapı 20 cm ve yüksekliği 30 cm olan bir kesik koni, Abrams konisi kullanılır. Koni, düz ve su emmeyen bir yüzeye oturtularak üç eşit yükseklikte

tabakalar halinde taze betonla doldurulur. Her tabaka, çapı 16mm olan özel deney çubuğu ile 25 kez şişlenerek sıkıştırılır. Kalıp tamamen doldurularak üzeri mala ile düzeltilir. Daha sonra kalıp bekletilmeden kulplarından tutularak yavaşça ve sarsılmadan kaldırıldığında taze betonun kendi ağırlığı etkisiyle yaptığı çökme gözlenir. Numunede yıkılma olmaksızın, koni çıkarıldıktan itibaren betonun çöktüğü miktar, karışım kıvamının ölçütü olarak değerlendirilir. Üretilen her betonun çökme değeri belirlenmiş ve akışkanlaştırıcı kullanarak bu değerin 18 cm ile 20 cm arasında kalması sağlanmıştır ve sonuçlar Tablo 3.13'de verilmiştir [27].

Tablo 3.13: Çökme Deneyi Sonuçları

Karışım No	Çökme Değeri (İlk Dökümler) mm	Çökme Değeri (İkinci Dökümler) mm
PMP-0,30	190	200
PMP-0,35	190	---
PMP-0,38	190	190
PMP-0,40	190	---
PMP-0,45	180	---
PMP-0,50	180	---
PMP-0,55	180	190
PRK-0,30	190	---
PRK-0,315	160	170
PRK-0,35	170	---
PRK-0,40	180	180
PRK-0,45	170	---
PRK-0,50	170	---
PRK-0,55	180	200

3.5.2. Birim Ağırlık Deneyi

Üretilen betonlar kalıplara yerleştirilmeden önce, silindir şeklinde hacmi bilinen bir kap içerisine yerleştirilerek taze beton birim ağırlığı bulunmuştur ve Tablo 3.14'te sonuçları sunulmuştur.

Tablo 3.14: Birim Ağırlık Deneyi Sonuçları

Karışım No	Birim Ağırlık Değerleri(İlk Dökümler) kg/m ³	Birim Ağırlık değerleri(İkinci Dökümler) kg/m ³
PMP-0,30	2468	2459
PMP-0,35	2443	---
PMP-0,38	2453	2428
PMP-0,40	2438	---
PMP-0,45	2521	---
PMP-0,50	2384	---
PMP-0,55	2377	2362
PRK-0,30	2460	---
PRK-0,315	2435	2427
PRK-0,35	2408	---
PRK-0,40	2370	2358
PRK-0,45	2332	---
PRK-0,50	2329	---
PRK-0,55	2327	2319

3.6. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Sertleşmiş beton deneyleri iki ana başlığa ayrılmıştır. Betonun mekanik özelliklerini belirleyebilmek için yapılan silindir basınç dayanım deneyi ve RILEM kırılma enerjisi deneyi ilk ana başlıkta, betonun durabilite özelliklerini belirleyebilmek için yapılan kılcal su emme, hızlı klor geçirimsizlik ve klor difüzyon deneyleri ikinci ana başlıkta toplanmıştır.

3.6.1. Silindir basınç deneyi

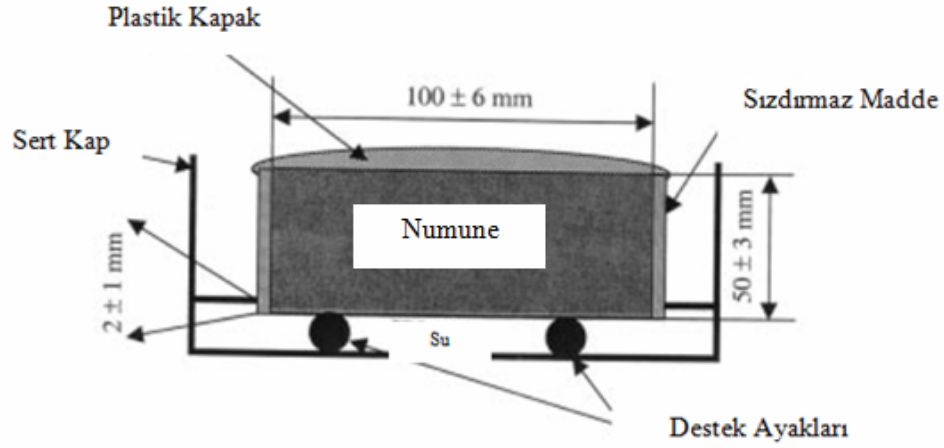
Basınç deneyinde 150x300 mm olan silindir numuneler kullanılmıştır. 28 gün boyunca %98 bağıl nemde 20±2 °C’ de rutubet odasında bekletilmiş, silindir numuneler rutubet odasından alınmış tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Basınç deneyi İ.T.Ü Marmaray Laboratuvarı’nda TS EN 12390-3 (2003) standardına göre gerçekleştirilmiş ve 3000 kN’ luk beton pres makinesi kullanılmıştır. Basınç deneyinden elde edilen sonuçlar Tablo 3.15’ te verilmiştir [28].

Tablo 3.15: Silindir Basınç Deneyi Sonuçları

Numune No	7 günlük Basınç Dayanımı(Mpa)	28 günlük Basınç Dayanımı(Mpa)
PMP-0,30	61,0	85,0
PMP-0,35	47,0	74,0
PMP-0,38	40,5	66,0
PMP-0,40	42,5	62,0
PMP-0,45	40,0	62,0
PMP-0,50	33,0	60,0
PMP-0,55	28,0	55,5
PRK-0,30	77,5	79,0
PRK-0,315	75,5	76,5
PRK-0,35	70,0	74,0
PRK-0,40	58,5	61,5
PRK-0,45	47,0	54,5
PRK-0,50	36,0	48,5
PRK-0,55	37,5	39,5

3.6.2. Kılcal Su Emme deneyi

Betonun kılcal su emmesinin tayini için prizma şeklindeki kalıplara yerleştirilen beton numuneler kullanılmıştır. 90 gün olarak belirlenen kür süresinin sonuna gelindiğinde, numuneler şekil 3.4’de görüldüğü gibi üç parça olacak şekilde kesici ile kesilmiş, ardından 70°C’lik etüvde 24 saat bekletilerek tamamen kuruması sağlanmıştır. Numunelerin su yüzüne değen yüzeyi haricindeki yüzeylerinden su emmesi önlenmek için parafinle kaplanır ve kuru ağırlığı belirlenir. Daha sonra Şekil 3.2’de görüldüğü gibi numunenin bir yüzü su ile temas edecek şekilde tepsiye yerleştirilmiş ve belirli aralıklarla ağırlıkları 0,1 gr hassasiyetinde elektronik terazi ile ölçülmüştür.

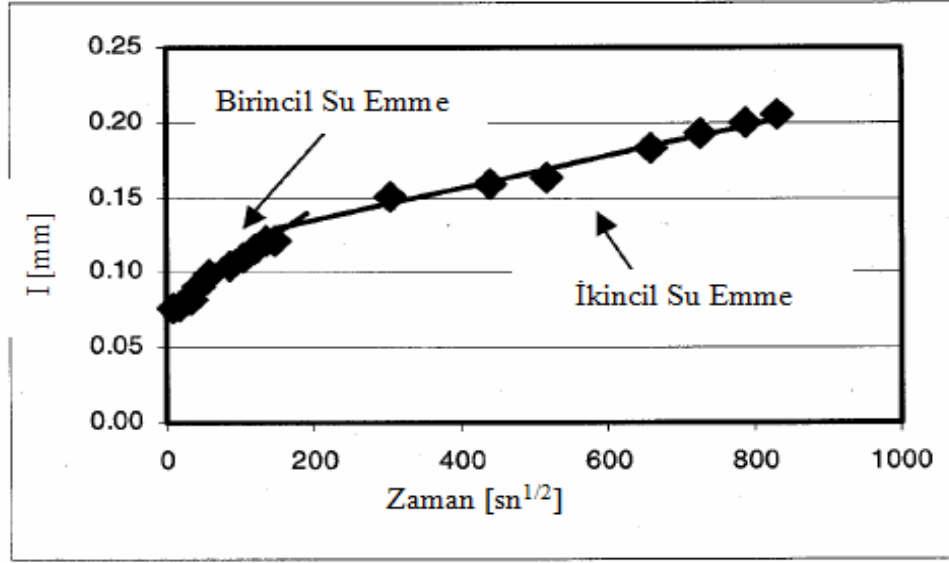


Şekil 3.2: Kılcal Su Emme Deneyi Düzeneği

Bu deney yönteminde numunenin sadece bir yüzü su ile temas ettirildiğinde betonun ağırlık artışından su emme oranının zamana bağlı verileri elde edilmektedir. Çok küçük çaplı boşluklar içerisinde emilen su kılcallık etkisi ile yükselir. Betonarme yapılarda olması istenmeyen bu durumun kontrolü için, betonda kılcal su emme deneyi yapılır. Amerikan standardı “ASTM C1585’e göre deney düzeneği kurulmuştur. Deneyde üretilen beton, silindir kalıplara yerleştirilir. Veriler toplandıktan sonra Şekil 3.3’deki gibi bir grafik çizilerek “Y” eksenine birim alanda emilen suyun ağırlıkça miktarı, “X” eksenine de geçen süre saniyenin karaköku cinsinden yazılarak 2 doğru çizilir. Bu doğruların eğimleri bize betonun kılcal su emme potansiyeli hakkında bilgi verir. Bu çalışmada da yer alan 2 farklı bileşime sahip ve su/çimento oranları değişik betonlarda kılcal su emme tayini yapılmış olup, son bölümde değerlendirmeye alınmıştır [29].

$$I = \Delta A \text{ğırlık} / \text{Alan} / \text{Suyun  zg l Ağırlığı}$$

(3.1)



Şekil 3.3: Kılcal Su Emme Deneyi  rnek Sonuç Grafiği

3.6.3. Hızlı Klor Geçirimliliği Deneyi

Hızlı klor geçirimliliği deneyi üretilen betonların silindir kalıplara dökülmesinden sonra silindir numunelerden kesilen disk şeklindeki parçalar üzerinde yapılmıştır. Parçanın yan yüzeyi Şekil 3.4'teki gibi epoksi ile geçirimsizliği ve elektrik iletkenliğini kesme amaçlı kapatılmıştır. Daha sonra vakum hücresine konularak x saat numune vakumlanmıştır. Daha sonra Şekil 3.5'te gösterildiği gibi düzeneğe yerleştirilip, 60 Voltluk doğru akıma maruz bırakılarak bir taraftan diğer tarafa geçen iyonlar hesaplanmaktadır.

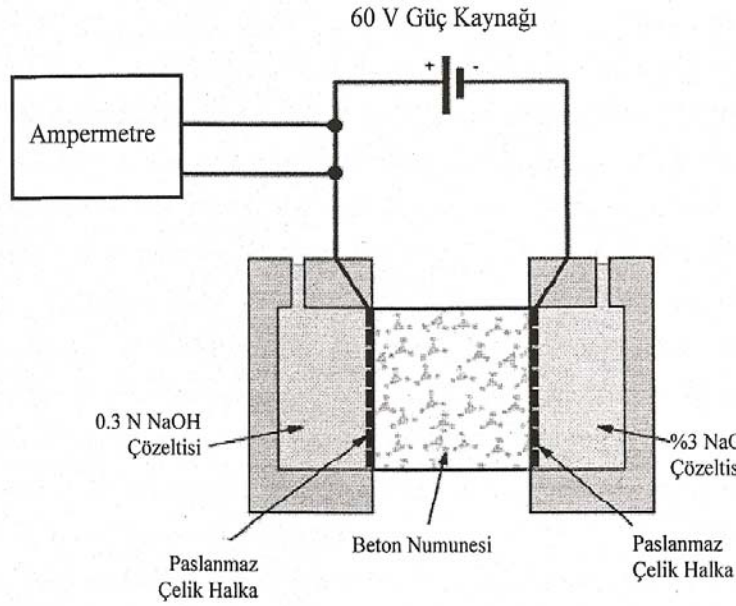
ASTM C 1202 standardında açıklanan bu hızlı klor geçirimliliği deneyi beton karışımalarının klor etkisine için karşılaştırılabilmesi için uygulanabilecek hızlı bir yöntemdir ve bu standartta deney sonuçlarının değerlendirilmesi için Tablo 3.16'da verilen değerler önerilmiştir [30].

Tablo 3.16: Hızlı Klor Geçirimlilik deney sonuçlarına göre betonun klor geçirimliliği yönünden değerlendirilmesi

Geçen elektriksel yük miktarı (Coulomb)	Klor İyonu Geçirimliliği Yönünden Değerlendirme
> 4000	Yüksek
2000-4000	Orta
1000-2000	Düşük
100-1000	ok Düşük
<100	İhmal Edilebilir



Şekil 3.4: Hızlı Klor Geçirimsiliği Deneyi Numunesi



Şekil 3.5: Hızlı Klor Geçirimsiliği Deneyi Düzenegi

3.6.4. Klor Difüzyon Deneyi

Suya doymun numunenin sadece bir yüzeyi sodyum klorür çözeltisi içeren suya maruz bırakılır.. Numune 35 gün boyunca çözeltiyle temas ettirildikten sonra, temas ettirilen yüzeye paralel katmanlar oluşur ve bu katmanlardaki klor oranı, C_x , potentimetrik titrasyon ile ölçülür. Bu katmanlar Şekil 3.6'da gösterilen kazıyıcı vasıtası ile toz halinde alınır. Numunenin başlangıçta içerdiği klor oranı C_i , çözeltiye maruz bırakılan yüzeyin altından uygun bir yükseklikte ölçülür. Efektif klor geçirimi katsayısı, D_e , temas ettirilen yüzeydeki bağlanma durumu, C_s , Matlab programındaki non-lineer dönüşüm formüllerinden hesaplanır. Geçirimsilik katsayısı, K_{Cr} , belirli bir klor konsantrasyonu göz önünde bulundurularak hesaplanır [31].

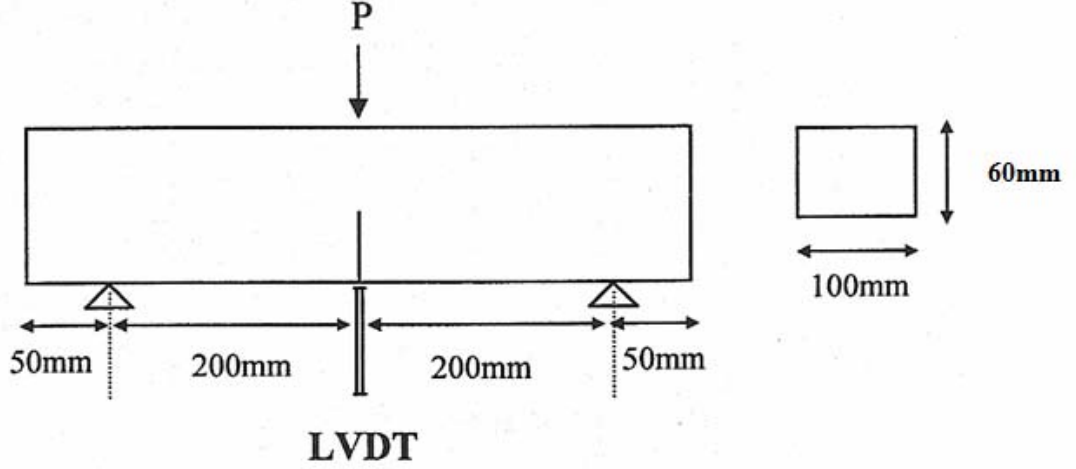


Şekil 3.6: Klor Difüzyon Deneyi Düzeneği

3.6.5. RILEM Kırılma Enerjisi Deneyi

Kırılma Enerjisi deneyleri İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi laboratuvarında INSTRON 5500R marka deplasman kontrollü yükleme makinesi kullanarak yapıldı. Bu deneylerde kiriş numunelerinin eğilme dayanımlarının ve kırılma enerjilerinin hesaplanması amaçlandı. Numuneler kısıtlanmış rötre deneyindeki halka numunenin çatladığı gün deneye alındı. Yapılan deneyler sonucunda yük-sehim eğrileri elde edilerek, su/çimento oranının değişiminin malzemenin eğilme dayanımında ve kırılma enerjisinde meydana getirdiği değişim incelendi.

Kiriş numunelerin ortasından tekil yük uygulanarak yapılan deneylerde, numunenin etkin kesit alanı 100 mm x 50 mm olarak seçildi. Oluşturulan 3 noktalı eğilme deney düzeneği Şekil 3.7’ de gösterilmektedir.



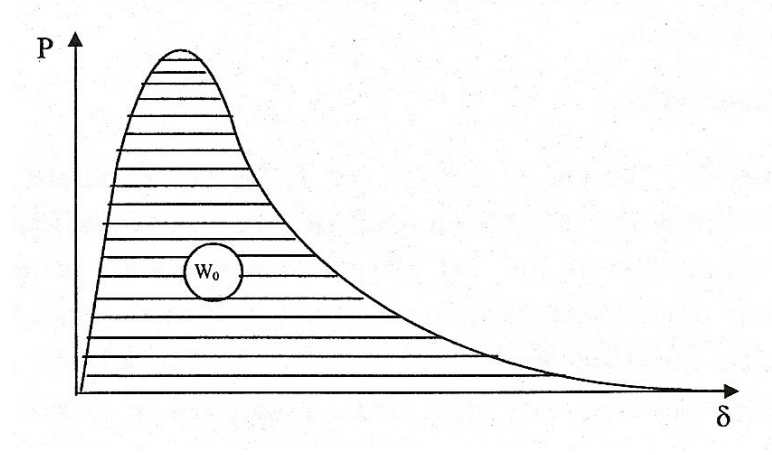
Şekil 3.7: RILEM Kırılma Enerjisi Deneyi Düzeneği

Deneyden önce numunenin yan yüzeyine yapıştırılan korniyere sehim ölçmek amacıyla 1 adet LVDT alıcı yerleştirildi. Bu deney düzeneği ile uygulanan yükler ve bu yüklerle karşılık gelen düşey deplasmanlar alıcılardan bilgisayara aktarılarak, yük-sehim grafiklerine geçildi. Her numuneye ait yük sehim grafikleri ekler bölümünde verilmektedir.

Halka testi deneyinde hazırlanan beton halkada çatlak oluştuğu gün o betona ait ve halka ile beraber dökülmüş olan kirişler RILEM kırılma enerjisi deneyinde şekil değiştirme hızı sabit tutularak kırıldı.

3.6.5.1 RILEM Kırılma Enerjisi Deneylerinden Kırılma Enerjisinin Hesaplanması

Bir numunenin yük-sehim eğrisi oluşturulduğunda, bu eğrinin altında kalan alan hesaplanarak kırılma süresince harcanan enerjiye geçilmektedir. Bu çalışmada numunelerin yük-sehim eğrileri elde edilerek kırılma enerjileri hesaplanmıştır. Şekil 3.8’de örnek bir yük-sehim eğrisi görülmekte ve kırılma enerjisinin nasıl hesaplandığı gösterilmektedir.



Şekil 3.8: Örnek Yük-Sehim Eğrisi

$$G_F = (W_o + mg\delta_o) / A_{lig} \quad (3.2)$$

W_o = Yük-Sehim eğrisi altında kalan alan (N/m)

m = Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı (kg)

g = Yer çekimi ivmesi ($9,81 \text{ m/sn}^2$)

δ_o = Kirişin göçme sırasında deformasyonu (m)

A_{lig} = Etkin kesit alanı (m^2)

3.6.5.2 RILEM Kırılma Enerjisi Deneylerinden Net Eğilme Dayanımlarının Hesaplanması

Numunelerin eğilme dayanımları aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$F_{net} = (3PL) / 2 BD^2 \quad (3.3)$$

F_{net} = Net eğilme dayanımı

P = Kırılma yükü (N)

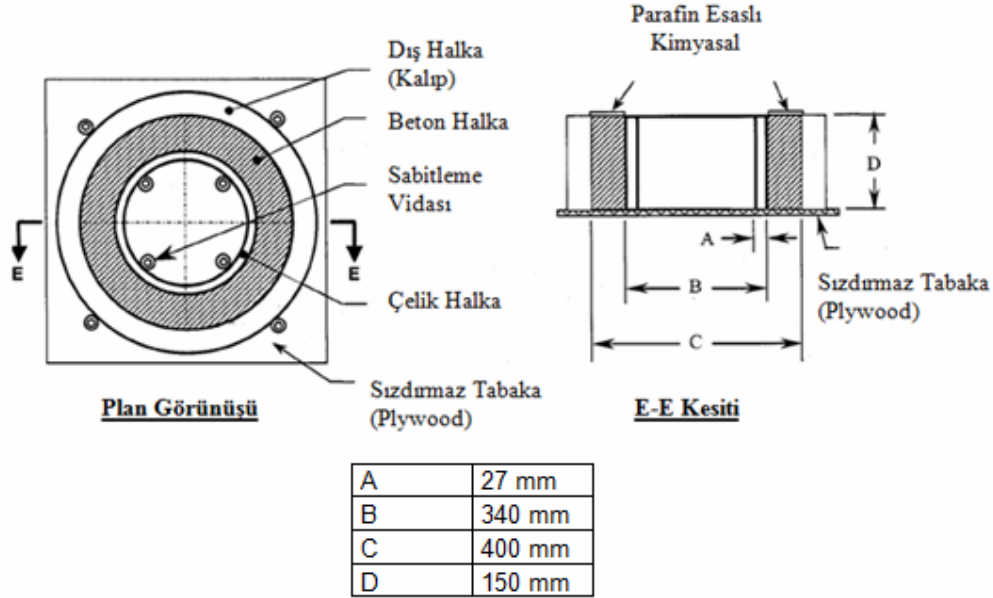
L = Mesnetler arası uzaklık (mm)

B = Numune kesitinin genişliği (mm)

D = Numune kesitinin yüksekliği (mm)

3.7. Kısıtlanmış Rötire Deneyi – Halka Testi

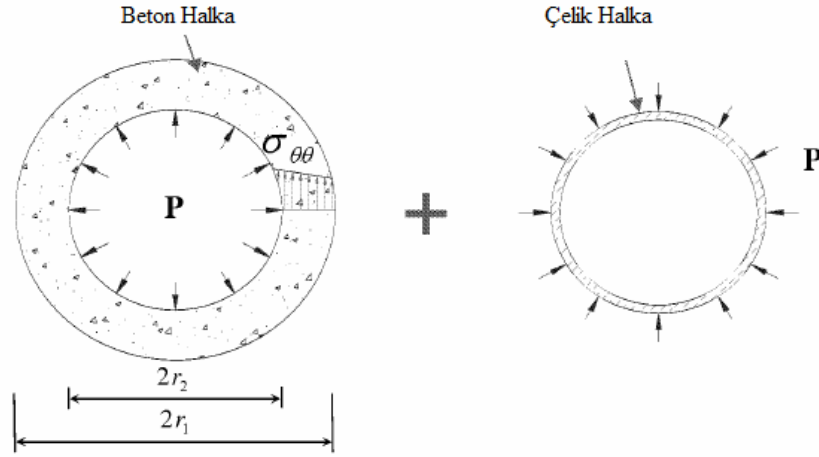
Bu deney ASTM C 1581-04 esaslarına göre yapılmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.9’da gösterildiği gibi sızdırmaz bir tabakanın üzerine önce çelik bir halka yerleştiriliyor ve daha sonra bu çelik halkanın dışına kalıp görevi görmesi için başka bir çelik halka merkezleri bir olacak şekilde yerleştiriliyor. İçten ve dıştan sabitleme vidaları yardımıyla sızdırmaz tabakaya monte ediliyor [32].



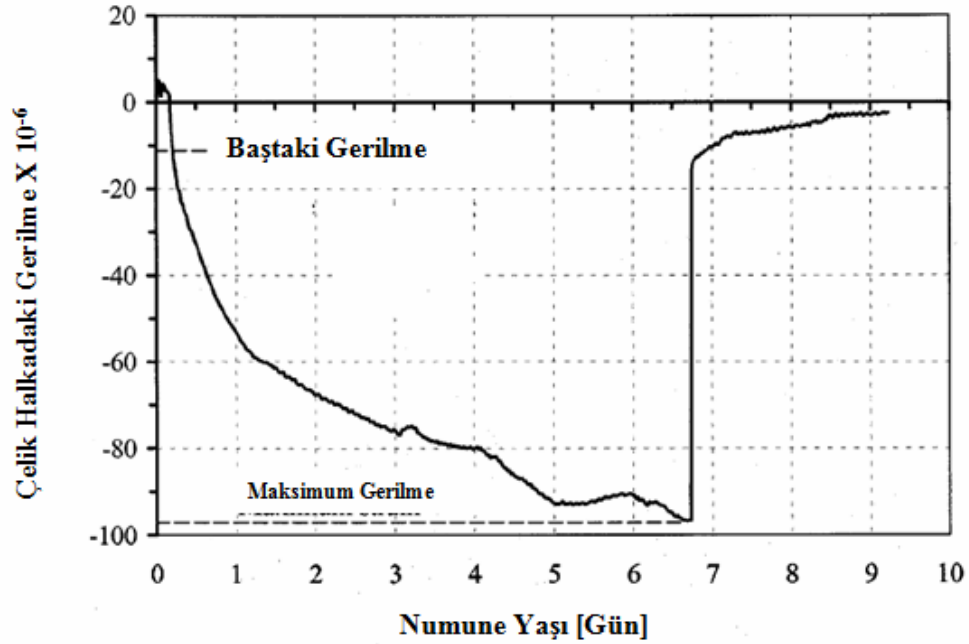
Şekil 3.9: Halka Testi Deney Düzeneği

Bu çalışmadaki pompalanabilir beton dizaynından %30, %38 ve %55 su/çimento oranına sahip betonlar ve prekast beton dizaynından %31.5, %40, %55 su/çimento oranına sahip betonlar bu deneyde incelemeye alındı. Standardın belirlediği özelliklerden biri olan en fazla dan çapı 14 mm olmalıdır şartını sağlayabilmek için dizaynlarda bulunan kırma taş -2 agregası 14 mm'lik elekten elenerek beton karışımına konuldu ve daha sonra kalıplara dolduruldu. Her karışım için ikişer tane halka kalıbı dolduruldu ve sıcaklığı 40°C' ye sabitlenmiş nemi %15 olan özel bir odaya konuldu ve betonun üst yüzden su kaybını engellemek için üst bölümü parafin esaslı bir kimyasal ile kapatıldı. Dökümden 24 saat sonra dıştaki çelik kalıp söküldü ve çatlak oluşumu gözlemlendi. Beton büzülme çalıştığı için Şekil 3.10'da görüldüğü çelik halkaya dıştan bir basınç uygulayacak, çelik halka ise çok az şekil değiştirmekte ve bunun sonucunda betonun şekil değiştirmesini engellemekte ve

betona içten basınç uygulamaktadır. Standartta belirtildiği gibi çelik halkanın iç yüzeyine gerinim pulları yapıştırılıp çelik halkanın gerilmesi okunduğın da Şekil 3.11'deki gibi bir grafik meydana gelmektedir ve çatlak oluşumu bu şekilde gözlenmektedir. Ancak bu çalışmada gerinim pulları yapıştırılmasına rağmen veri toplayıcısından sağlıklı veriler alınamamıştır.



Şekil 3.10: Beton Halka ile Çelik Halka Arasındaki Gerilmeler

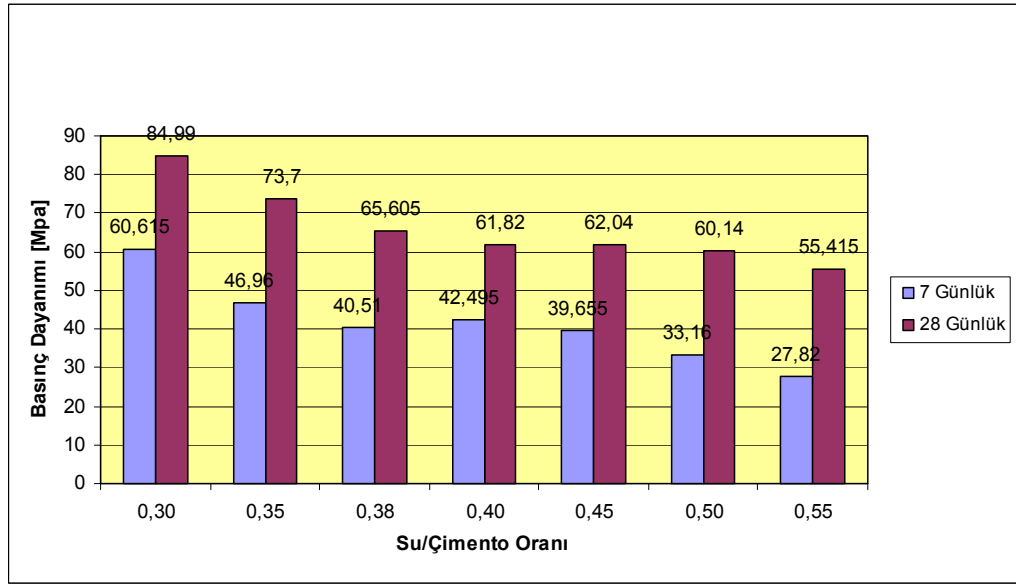


Şekil 3.11: Çelik Halkada Okunan Gerilme-Numune Yaşı Grafiği

4. DENEY SONUÇLARI ve DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Basınç dayanımına su/çimento oranı değişimi etkisi

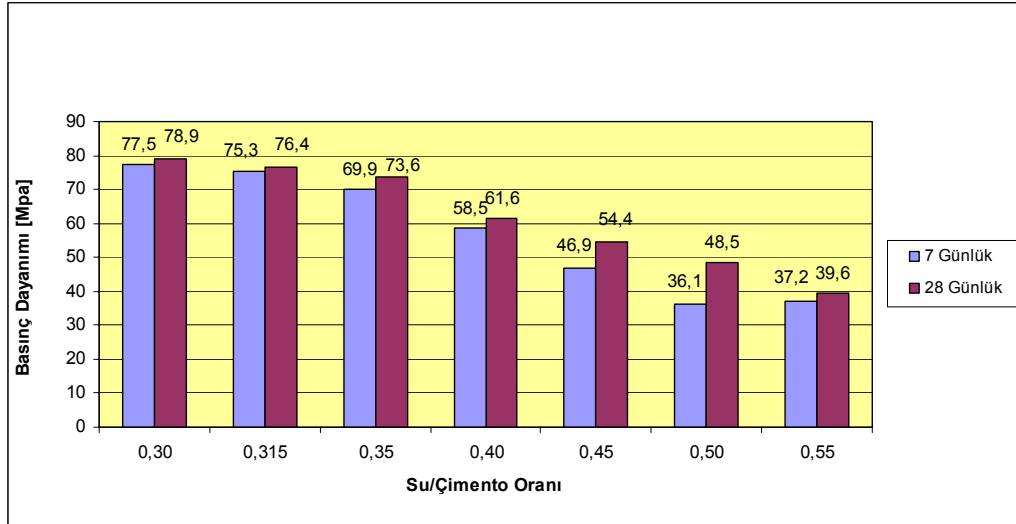
Şekil 4.1’de ortalama 25°C sıcaklığındaki betonlarda pompalanabilir beton için %30, %35, %38, %40, %45, %50 ve %55 su/çimento oranlarında yedi farklı numunelerde 7 günlük ve 28 günlük basınç mukavemetlerindeki değişim görülmektedir. Deneysel çalışmaya göre, pompalanabilir beton numunelerinde maksimum basınç dayanımı %30 su/çimento oranında gözlenmiştir. Su/çimento oranı %30’dan %55’ e düşürüldüğünde basınç dayanımının azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.1: Pompalanabilir Betonda Su/Çimento Oranının Değişimi ile Basınç Dayanımının Değişim Grafiği

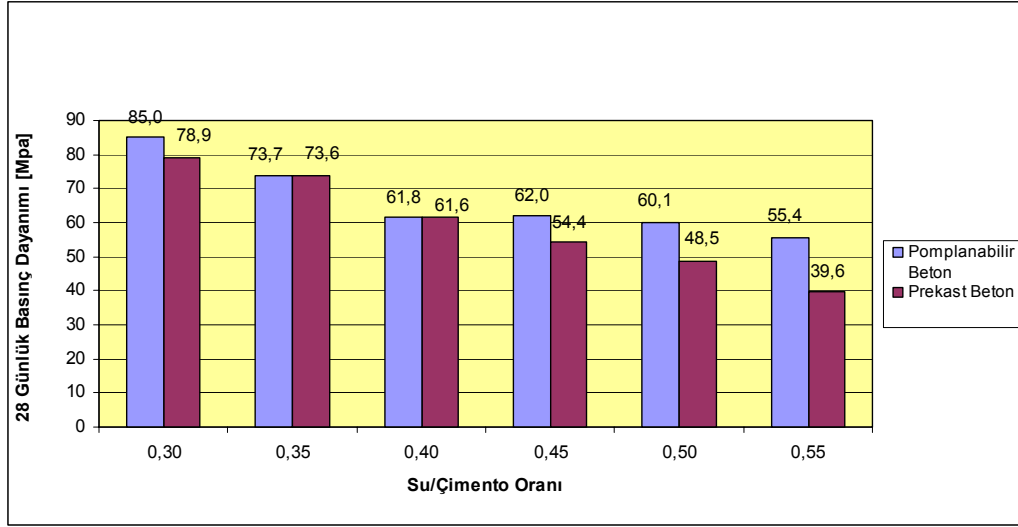
Şekil 4.2’de ortalama 22 °C sıcaklığındaki betonlarda prekast beton için %30, %31.5, %35, %40, %45, %50 ve %55 su/çimento oranlarında basınç dayanımlarındaki değişim görülmektedir. Deneysel çalışmaya göre, prekast beton numunelerinde de maksimum basınç dayanımı %30 su/çimento oranında gözlenmiştir. Su/çimento oranı %30’dan %55’ e düşürüldüğünde basınç dayanımının azaldığı görülmüştür.

Prekast beton numunelerinin 7. günlük basınç dayanımlarının yüksek olduğu ve 28. günlük basınç dayanımına neredeyse ulaştığı gözlenmektedir.



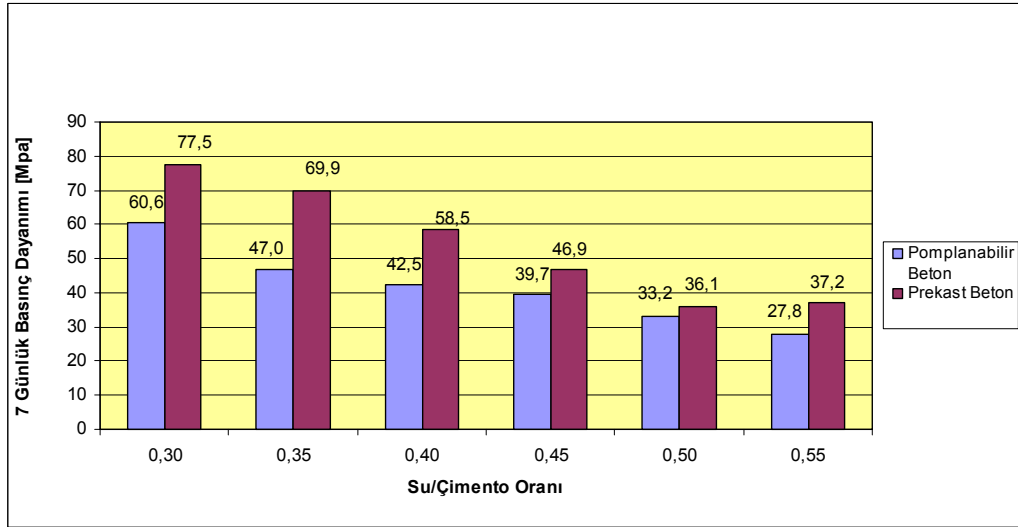
Şekil 4.2: Prekast Betonda Su/Çimento Oranının Değişimi ile Basınç Dayanımının Değişim Grafiği

Şekil 4.3'te ise pompalanabilir ve prekast beton dizaynına sahip numunelerin %30, %35, %40, %45, %50 ve %55 su/çimento oranlarında basınç dayanımlarındaki değişim karşılaştırılmalı olarak görülmektedir. Bu sıcaklık karşılaştırmada da maksimum basınç dayanımı pompalanabilir betonda %30 su/çimento oranında görülmüştür. Her oran için pompalanabilir beton dizaynı aynı su/çimento oranına sahip prekast betona göre daha yüksek basınç dayanımı göstermektedir. %35 ve %40 su/çimento oranlarında birbirlerine çok yakın basınç dayanımları gösterirlerken, %30, %45, %50 ve %55 su/çimento oranlarında pompalanabilir beton dizaynı, prekast beton dizaynına göre daha yüksek basınç dayanımı göstermektedir. Su/çimento oranı arttıkça aralarında fark ta yüzdece arttığı görülmüştür.



Şekil 4.3: Pompalanabilir ve Prekast Betonda 28 Günlük Basınç Dayanımlarının Karşılaştırılması

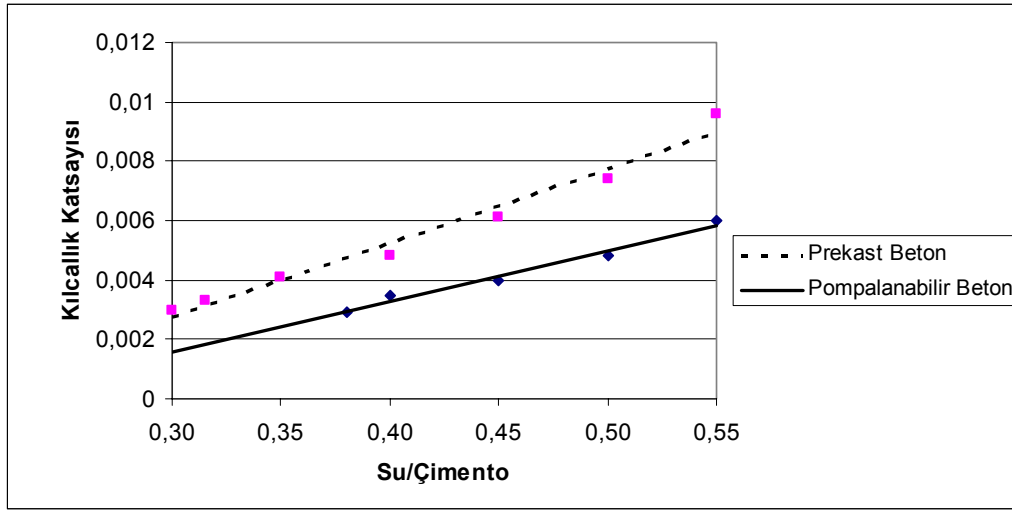
Pompalanabilir ve prekast betona ait numunelerin silindir basınç deneyi sonuçlarından elde edilen 7 günlük basınç dayanım analizleri karşılaştırılmalı olarak Şekil 4.4'te verilmiştir. Grafiği inceleyecek olursak prekast beton silindir numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları pompalanabilir beton silindir numunelerine göre her su/çimento oranı için daha yüksek çıkmıştır. Su/çimento oranının artışıyla birlikte her iki beton dizaynı içinde 7 günlük basınç dayanımlarının düştüğü gözlemlenmiştir.



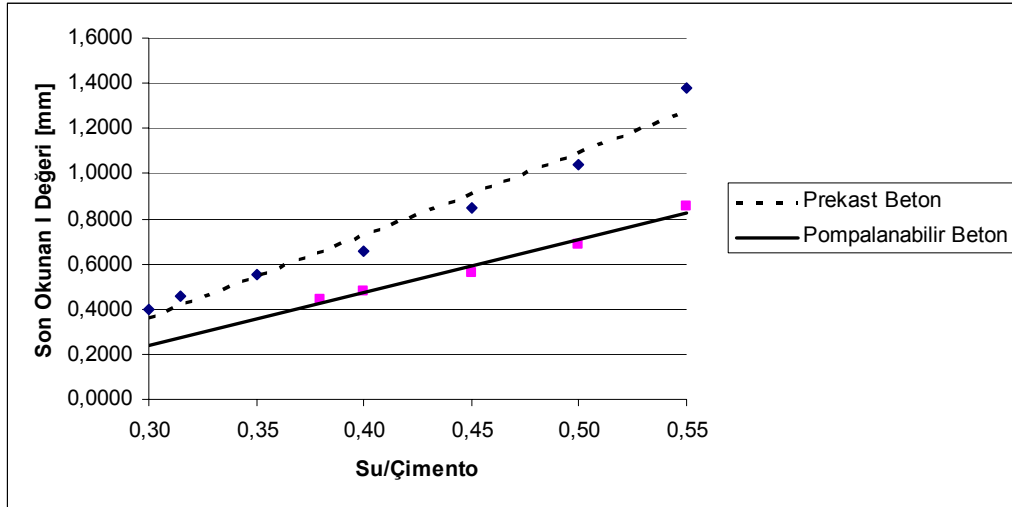
Şekil 4.4: Pompalanabilir ve Prekast Betonda 7 Günlük Basınç Dayanımlarının Karşılaştırılması

4.2. Kılcal su emme miktarına su/çimento oranı değişimi etkisi

Pompalanabilir beton ve prekast betona ait farklı su/çimento oranlarına sahip ikişer adet numuneler üzerinde yapılan kılcal su emme dizaynı sonucunda ASTM C 1585 standardına göre on dört adet I-zaman grafiği çizildi ve bu grafiklerden baştaki su emme doğrusu eğimi ve son okunan I değerleri alınarak Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'daki grafikler çizildi. Her numuneye ait I-zaman grafikleri ekler bölümünde verilmektedir. Şekil 4.5'te her iki dizaynda da su/çimento oranı arttıkça numunelerin başlangıçtaki su emme eğilimleri artmakta olduğu gözlemlendi. Pompalanabilir betonun bileşim özelliklerinden dolayı dizaynında uçucu kül barındırdığı için su emme oranının boşluk oranı daha yüksek olan prekast betona göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Boşluk oranı pompalanabilir betona göre daha yüksek olan prekast beton numunelerinin Şekil 4.6'da görüldüğü üzere son okunan I değerlerinin milimetre cinsinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Yine şekil 4.6'da su/çimento oranı arttığı zaman boşluk oranı artmakta ve su emme miktarı belirli bir eğimle artmaktadır.



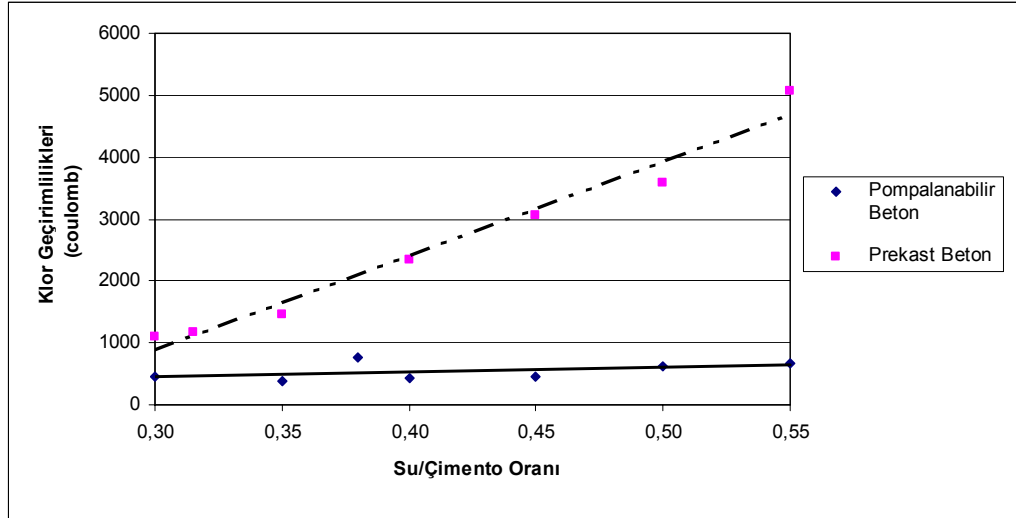
Şekil 4.5: Kılcallık Katsayısı-Su/Çimento Oranı Değişim Grafiği



Şekil 4.6: Kılcal Su Emme Deneyinde Son Okunan I Değeri-Su/Çimento Oranı Değişim Grafiği

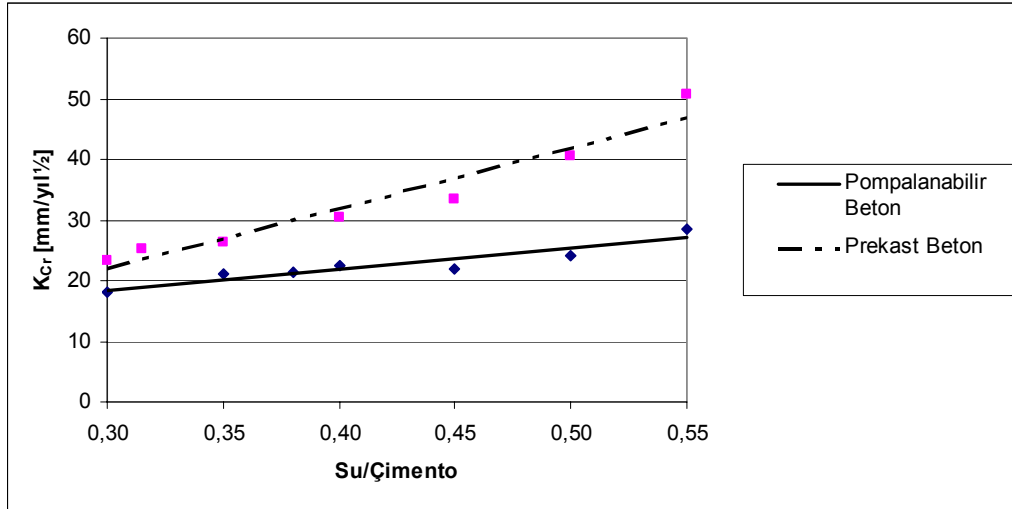
4.3. Klor geçirimliliğine su/çimento oranı değişimi etkisi

Şekil 4.7’de pompalanabilir beton dizaynı için hızlı klor geçirimliliği testi sonuçları 1000 Coulomb’un altında olduğundan klor geçirimliliği değerlendirmesinde ASTM C1202 standardına göre tüm su/çimento oranlarında çok düşük olarak ifade edilmektedir. Pompalanabilir beton numunelerinde su/çimento oranı arttıkça klor geçirimliliği coulomb cinsinden artmaktadır. Prekast beton numunelerine bakıldığında ise su/çimento oranındaki artış klor geçirimliliği miktarını daha yüksek oranda artırmakta ve ASTM C 1202 standardına göre sınıf değişikliğine yol açmaktadır. Prekast beton numunelerinde %30, %31,5 ve %35 su/çimento oranına sahip numuneler ASTM C 1202 standardında düşük sınıflandırmasına, %40, %45, %50 ve %55 su/çimento oranına sahip numuneler orta sınıflandırmasına girmektedir. İçinde uçucu kül ve silis dumanı içeren pompalanabilir beton numuneleri klor geçirimliliği bakımından uçucu kül ve silis dumanı içermeyen prekast beton numunelerine göre daha düşük klor geçirimliliğine sahiptir, çünkü uçucu kül tanecikleri çimento taneciklerinin boyut olarak yaklaşık 1/10 mertebesinde ve bu sayede çimento tanecikleri arasında kalan boşlukları doldurabilmektedir. İki dizayn için de su/çimento oranı arttıkça çimento tanecikleri arasında kalan boşluklar artmakta ve bu yüzden klor geçirimlilikleri yükselmektedir.

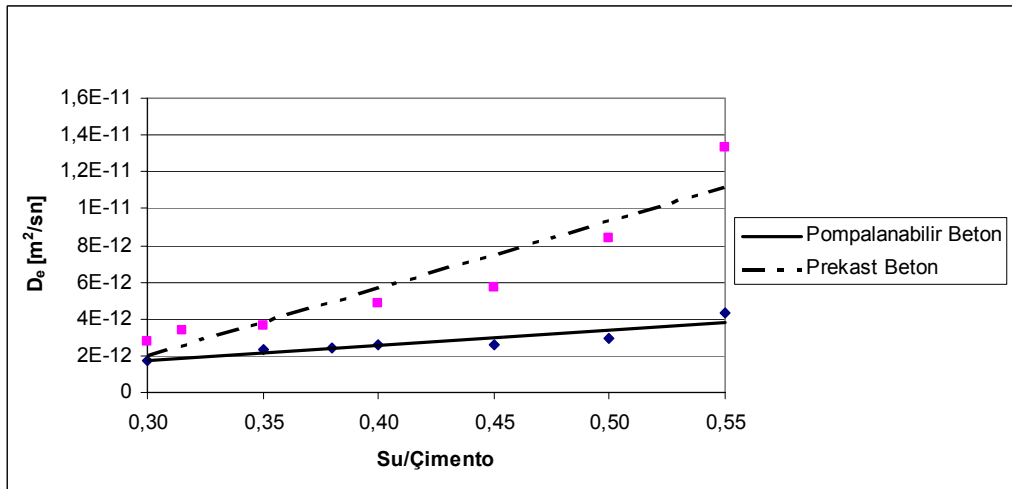


Şekil 4.7: Pompalanabilir ve Prekast Betonda Su/Çimento Oranının Değişimi İle Hızlı Klor Geçirirliği Değişimi Grafiği

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'daki klor difüzyon deney sonuçlarına göre de su/çimento oranı arttıkça prekast beton için klor geçirirlik katsayısı K_{cr} ve efektif klor geçirirlik katsayısı D_e artmakta ve klor geçirirliği yükselmektedir. Aynı durum pompalanabilir beton içinde gözlenmektedir ve su/çimento oranı arttıkça K_{cr} ve D_e yükselmektedir. Pompalanabilir betonu ve prekast betonu kendi aralarında kıyasladığımızda ise her su/çimento değeri için prekast beton, pompalanabilir betona göre daha yüksek klor geçirirlik ve efektif klor geçirirliği katsayısına sahiptir. Prekast beton için katsayı artışları su/çimento oranının artışıyla birlikte pompalanabilir betona göre daha yüksek bir eğimle artmaktadır.



Şekil 4.8: Pompalanabilir ve Prekast Betonda Su/Çimento Oranının Değişimi İle Klor Geçirimlik Katsayısı (K_{cr}) Değişimi Grafiği

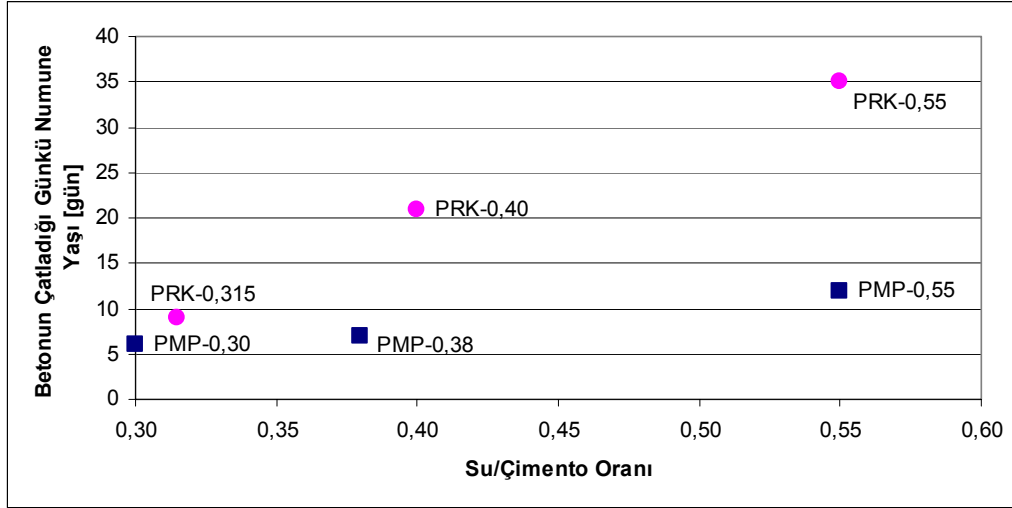


Şekil 4.9: Pompalanabilir ve Prekast Betonda Su/Çimento Oranının Değişimi İle Efektif Klor Geçirimlik Katsayısı (D_e) Değişimi Grafiği

4.4. Kısıtlanmış Rötire Çatlağı ile Su/Çimento Oranı Arasındaki İlişki

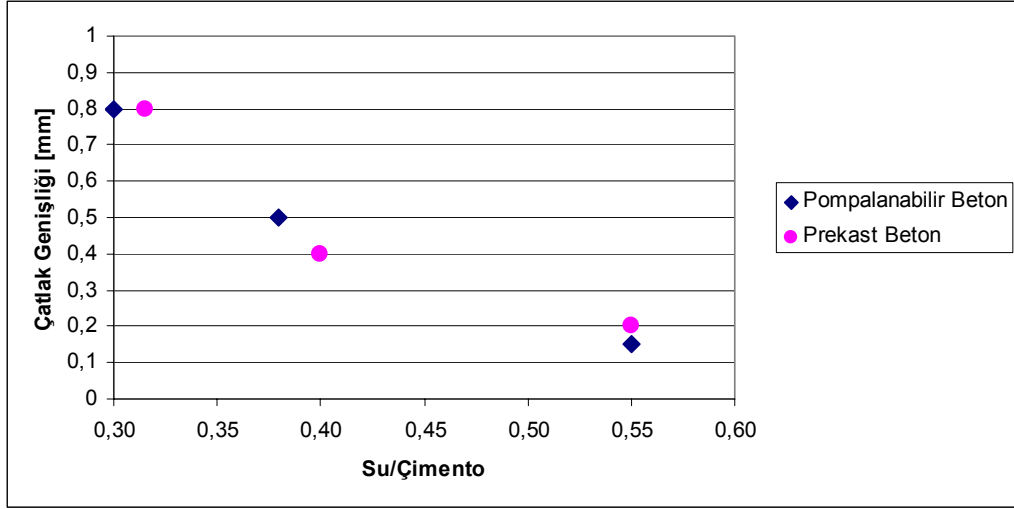
Şekil 4.10'da pompalanabilir ve prekast beton numunelerine ait beton halkaların çatlak oluştuğu gündeki numune yaşları ile numunelerin değişen su/çimento oranları arasındaki ilişki gösterilmektedir. Daha fazla çimento dozajına ve %30 su/çimento oranına sahip olan pompalanabilir beton numunesinde 6. günde çatlak oluşurken, ona yakın çimento dozajına ve %30 su/çimento oranına sahip olan pompalanabilir beton numunesinde 7. günde ve düşük çimento dozajına ve %55 su/çimento oranına sahip

olan pompalanabilir beton numunesinde 12. günde çatlak meydana gelmiştir. Bu sonuçtan yola çıkarak su/çimento oranı arttıkça betonun kısıtlanmış rötre çatlak potansiyeli azalmaktadır. Prekast beton numunesine ait halkalarda ise yine en erken çatlak 0,315 su/çimento oranına sahip numunede gözlenmiş ve su/çimento oranı arttıkça çatlak günü gecikmiş, yani çatlak potansiyeli azalmıştır. Prekast betonun çatlak potansiyelinin pompalanabilir betona göre daha düşük olduğu ve daha geç çatlak oluştuğu görülmüştür.



Şekil 4.10: Çatlak Oluştuğu Gündeki Numune Yaşı ile Su/Çimento İlişkisi

Şekil 4.11’de farklı su/çimento oranlarına sahip pompalanabilir ve prekast beton numunelerinde çatlak oluştuğu gündeki çatlak genişliğinin su/çimento oranının değişimi ile ilişkisi verilmektedir. Su/çimento oranı %30 olan pompalanabilir beton numunesinin çatlak oluştuğu gündeki çatlak genişliği 0,8 mm, su/çimento oranı 0,38 olan numunenin 0,5 mm ve %55 su/çimento oranına sahip numunenin çatlak genişliği 0,15 mm olarak ölçülmüştür. Grafiğe bakarak yorum yapıldığında ise su/çimento oranı arttıkça, çatlak genişliğinin buna ters orantı ile azaldığı görülmüştür. Yani çatlak potansiyeli azaldıkça çatlak genişliği azalmaktadır. Aynı durum prekast beton numuneler içinde geçerlidir ve iki beton dizaynı açısından çatlak genişliği farklı su/çimento oranlarında benzerlik göstermiştir. Şekil 4.12’de beton halkadaki çatlak örneği gözükmemektedir.



Şekil 4.11: Çatlak Oluştugu Günündeki Çatlak Genişliği ile Su/Çimento İlişkisi

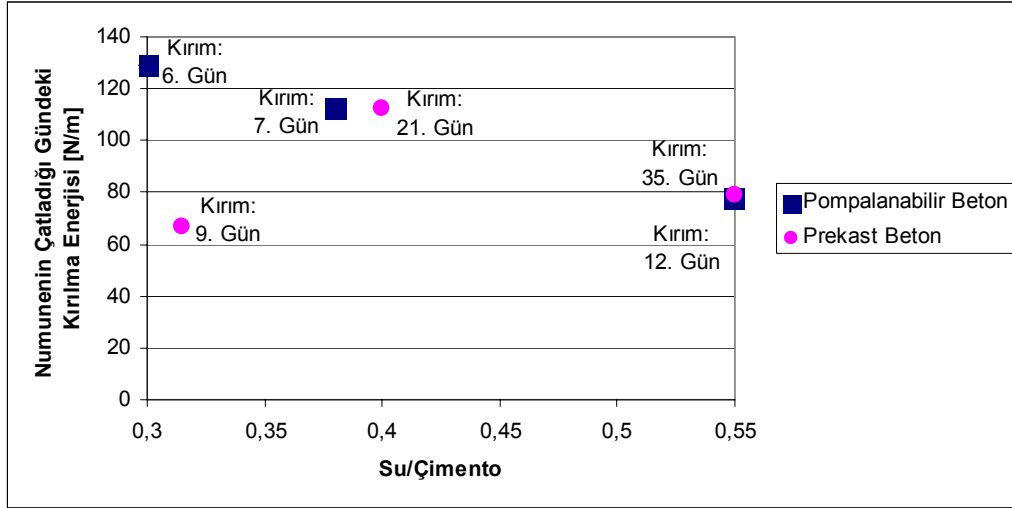


Şekil 4.12: Beton Halkadaki Çatlak

4.5. Kiriş Numunelerde RILEM Kırılma Enerjisi Deney Sonuçları

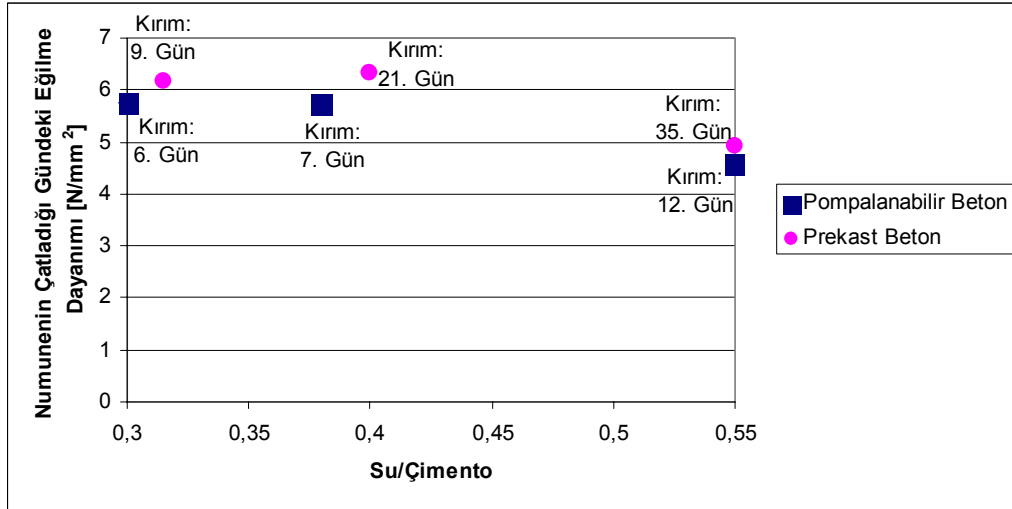
Şekil 4.13'de pompalanabilir ve prekast betonun halka testi için alınan numunelerinin çatladığı gün RILEM kırılma enerjisi deneyinde kırılan kiriş numunelerinin deney sonuçları gösterilmektedir. Pompalanabilir beton kiriş numunelerinin su/çimento oranı kırılma enerjilerinin düştüğü, prekast betonda ise 0,40 su/çimento oranına sahip

betonda en yüksek enerjiye ulaştığı gözlenmiştir, ancak numunelerin deneyde kırıldıkları günkü numune yaşları birbirlerinden farklı olduğundan sonuçlar sadece betonun numunede çatlak olduğu gündeki kırılma enerjilerini sunmaktadır. Numunelere ait yük-sehim grafikleri Ekler bölümünde verilmektedir.



Şekil 4.13: Kırılma Enerji ile Su/Çimento Oranı İlişkisi

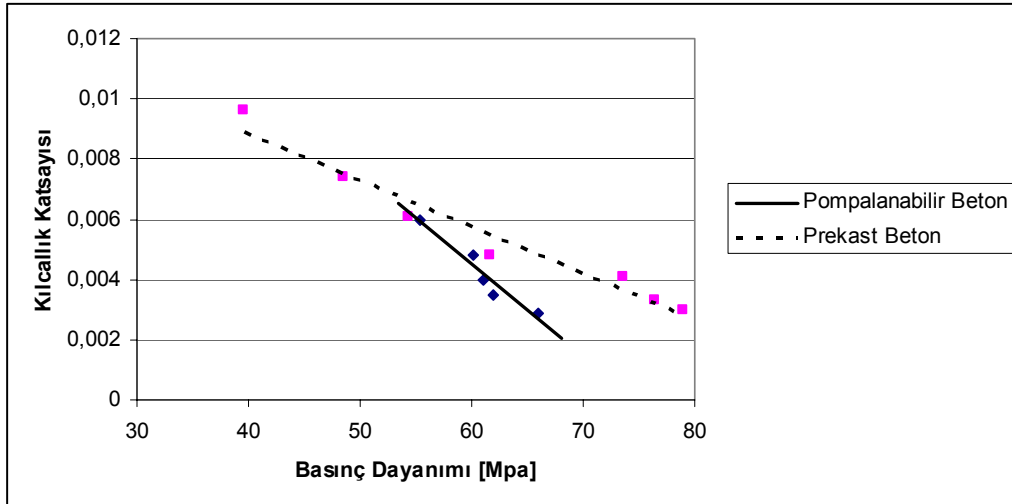
Şekil 4.14'de RILEM kırılma enerjisi deneyleri sonuçlarından elde edilen pompalanabilir ve prekast beton için numunenin çatladığı gündeki eğilme dayanımları farklı su/çimento oranlarındaki numuneler için gösterilmektedir. Kırılma enerjisi deneyi sonuçlarında olduğu gibi su/çimento oranı arttıkça pompalanabilir beton numunelerinin eğilme dayanımı düştüğü saptanmış ve prekast beton içinse en yüksek değere 0,40 su/çimento oranına sahip numune de ulaşmıştır ama numune yaşları arasındaki farktan dolayı kesin bir yargıda bulunulamamıştır. Grafikten sonuç olarak çatlak günündeki numunelerin eğilme dayanımları saptanmıştır.



Şekil 4.14: Eğilme Dayanımı ile Su/Çimento Oranı İlişkisi

4.6. Kılcallık Katsayısı ile Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

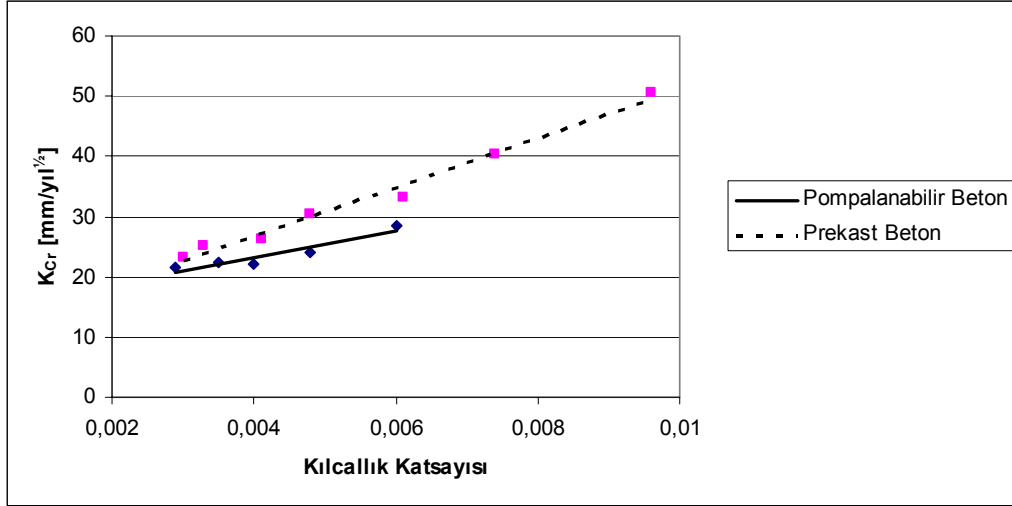
Pompalanabilir ve prekast beton numunelerine ait numunelerden elde edilen kılcal su emme deneyi ve silindir basınç deneyi sonuçlarına göre her iki betona ait kılcallık katsayısı ve basınç dayanımı ilişkisi grafiği şekil 4.15'te gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre pompalanabilir betonda basınç dayanımı arttıkça kılcallık katsayısı düşmektedir. Aynı durum prekast beton numuneleri için de geçerlidir. Grafikte eğimler karşılaştırıldığında pompalanabilir beton için çizilen doğrusal eğrinin eğimi prekast beton numunesine göre daha yüksek bir değere sahip oldu gözlenmiştir.



Şekil 4.15: Kılcallık Katsayısı ile Basınç Dayanımı İlişkisi

4.7. Kılcallık Katsayısı ile Klor Geçirirnilik Katsayısı Arasındaki İlişki

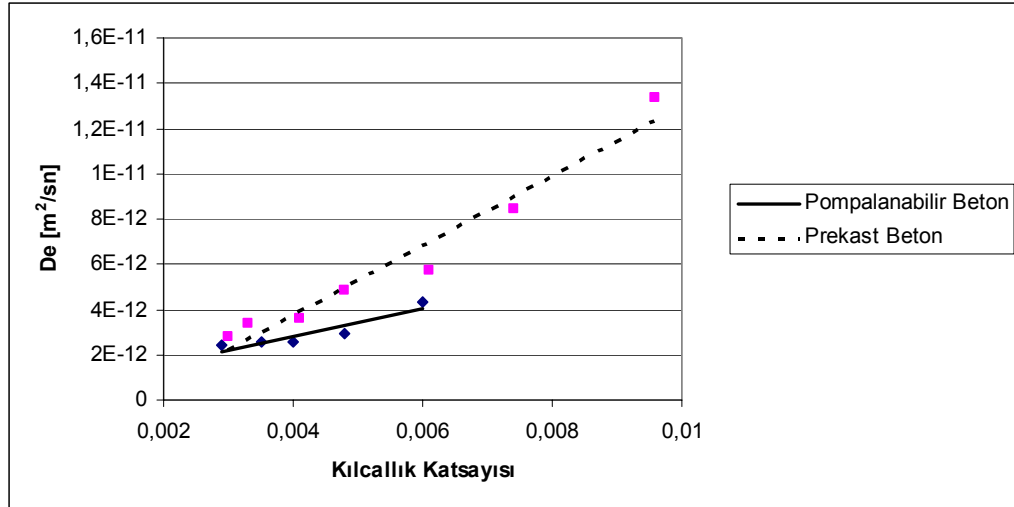
Klor difüzyon ve kılcal su emme deneylerinden pompalanabilir ve prekast beton numuneleri için elde edilen klor geçirirnilik katsayısı “ K_{cr} ” ve kılcallık katsayısı şekil 4.16’daki grafikte değerlendirmeye alındığında kılcallık katsayısının klor geçirirnilik katsayısı ile doğru orantılı bir şekilde arttığı gözlenmiştir.



Şekil 4.16: Kılcallık Katsayısı ile Klor Geçirirnilik Katsayısı Arasındaki İlişki

4.8. Kılcallık Katsayısı ile Efektif Klor Geçirirnilik Katsayısı Arasındaki İlişki

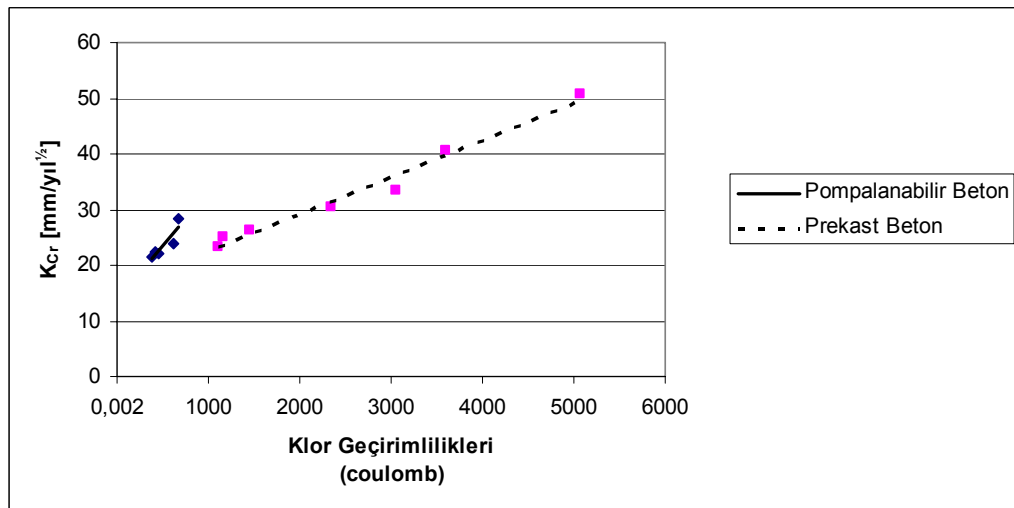
Numunelerin durabilite özelliklerini belirleyebilmek amacıyla yapılmış olan kılcal su emme deneyi ve bunun sonucunda elde edilen kılcallık katsayısı ve klor difüzyon deneyi sonucu elde edilen efektif klor geçirirnilik katsayısı D_e Şekil 4.18’de verilen grafikte karşılıklı değerlendirmeye tutulmuştur. Kılcallık katsayısının artışıyla beraber efektif klor geçirirnilik katsayısının arttığı sonucuna varılmıştır. Her iki beton numunesi için de aynı netice alınmıştır.



Şekil 4.17: Kılcallık Katsayısı ile Klor Geçirimlilik Katsayısı Arasındaki İlişki

4.9. Klor Geçirimlilik Katsayısı ile Klor Geçirimliliği Arasındaki İlişki

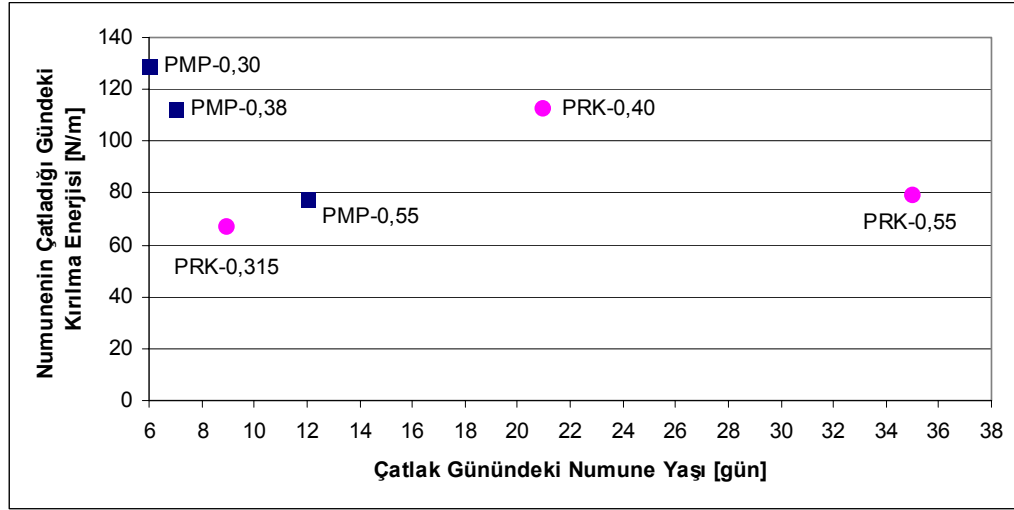
Çalışmalarda klor geçirimliliğini belirleyebilmek için yapılan iki farklı deneyden hızlı klor geçirimliliği deneyi sonuçlarından elde edilen “coulomb” cinsinden klor geçirimliliği ile klor difüzyon deneyi sonuçlarından analiz edilerek bulunan klor geçirimlilik katsayısı pompalanabilir ve prekast beton numuneleri için şekil 4.18’de verilmiştir. İki deney analizlerinden de istikrarlı sonuçlar alındığı tespiti yapılmıştır. Pompalanabilir beton numunelerinin klor geçirimliliklerinin, prekast beton numunelerine göre çok daha düşük olduğu net bir biçimde söylenebilmektedir.



Şekil 4.18: Klor Geçirimlilik Katsayısı ile Klor Geçirimliliği Arasındaki İlişki

4.10. Çatlak Günündeki Numune Yaşı ile Çatlak Oluşum Günündeki Kırılma Enerjisi Arasındaki İlişki

Pompalanabilir ve prekast beton numunesine ait halka testi sonucunda elde edilen çatlak günündeki numune yaşı ve RILEM kırılma enerjisi deneyi sonucunda elde edilen numunenin çatlادığı günde kırılma enerji arasındaki ilişki Şekil 4.19'daki grafikte verilmiştir. Pompalanabilir beton numunesinin çatlادığı günde numune yaşı arttıkça kırılma enerjisinde düşüş olduğu gözlemlendi. Prekast beton numunesinde ise erken yaşta düşük kırılma enerjisi 21 günlük numunede en yüksek kırılma enerjisi hesaplandı.

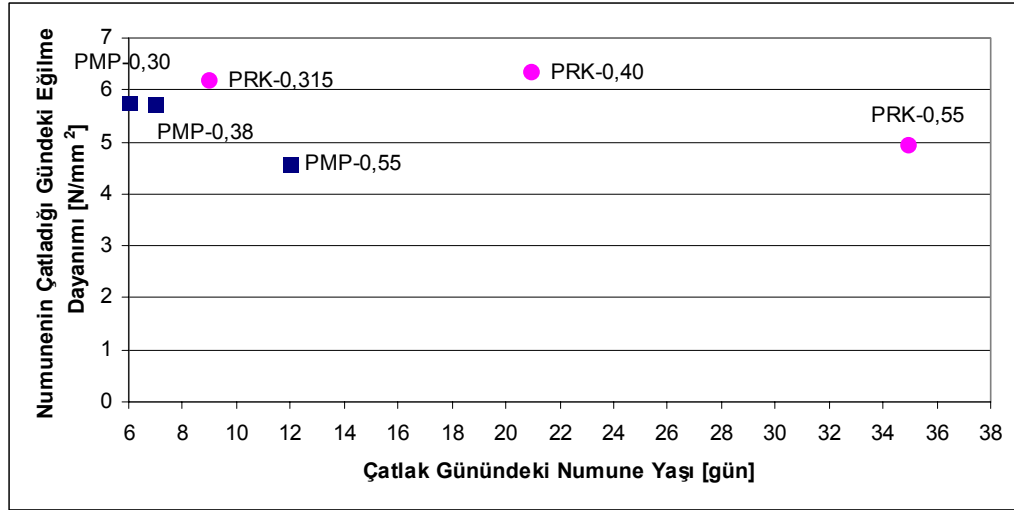


Şekil 4.19: Çatlak Günündeki Numune Yaşı ile Çatlak Oluşum Günündeki Kırılma Enerjisi Arasındaki İlişki

4.11. Çatlak Günündeki Numune Yaşı ile Çatlak Oluşum Günündeki Eğilme Dayanımı Arasındaki İlişki

Şekil 4.20'deki grafikte incelenen pompalanabilir ait çatlak günündeki numune yaşı ile çatlak oluşum günündeki eğilme dayanımı ilişkisi incelendiğinde; çatlak oluşum günündeki numune yaşı arttığında eğilme dayanımında bir düşüş olduğu görülmüştür. Su/çimento oranı 0,30 olan numune ile su/çimento oranı 0,38 olan numune arasında numune yaşı olarak bir gün geçmiş eğilme dayanımı da ona göre az oranda düşmüştür. Su/çimento oranı 0,55'e çıktığında ise çatlak günü 6 gün uzamış ve eğilme dayanımı da daha yüksek oranda düşmüştür. Prekast beton ise çok düşük

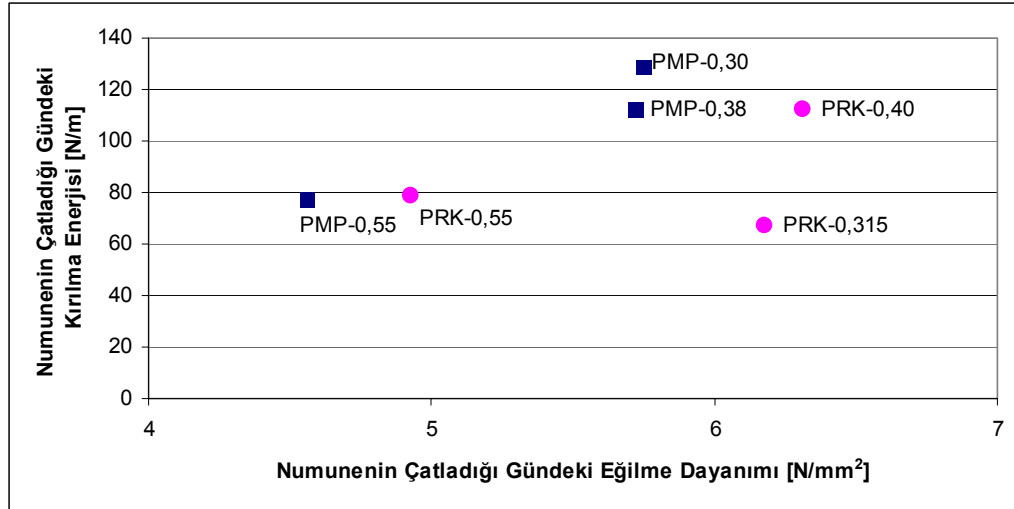
değişimler gözlenmiş olup en yüksek değere su/çimento oranı 0,40 olan ve numune yaşı 21 olan karışımda ulaşılmıştır.



Şekil 4.20: Çatlak Günündeki Numune Yaşı ile Çatlak Oluşum Günündeki Eğilme Dayanımı Arasındaki İlişki

4.12. Çatlak Oluşum Günündeki Eğilme Dayanımı ile Kırılma Enerjisi Arasındaki İlişki

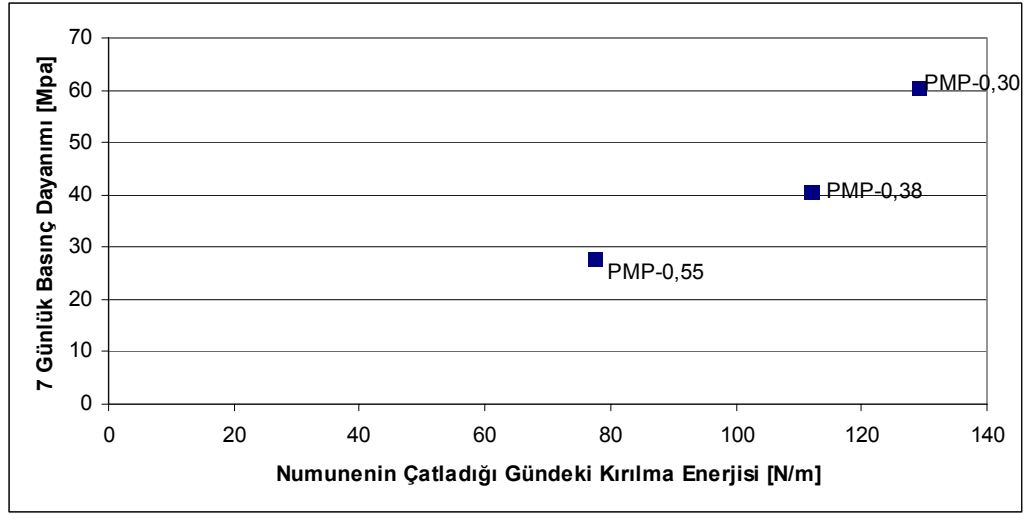
Pompalanabilir ve prekast betona ait numunelerin mekanik özelliklerini belirleyebilmek için yapılan RILEM kırılma enerjisi deneyi sonuçlarından elde edilen numunenin çatladığı günde kırılma enerjisi ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki Şekil 4.21’de verilen grafikte incelenmiştir. Sonuca bakıldığında pompalanabilir betonda eğilme dayanımındaki artış ile kırılma enerjisindeki artışın birbirleri ile doğru orantılı olduğu sonucuna varılmıştır. Prekast betonda ise su/çimento oranı 0,40 ile 0,50 olan numuneler arasında bir ters orantı gözlenmiş ve en düşük oran ise su/çimento oranı 0,315 olan numunede hesaplanmıştır.



Şekil 4.21: Numunenin Çatladığı Gündeki Kırılma Enerjisi ile Eğilme Dayanımı Arasındaki İlişki

4.13. Çatlak Oluşum Günündeki Kırılma Enerji ile 7 Günlük Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

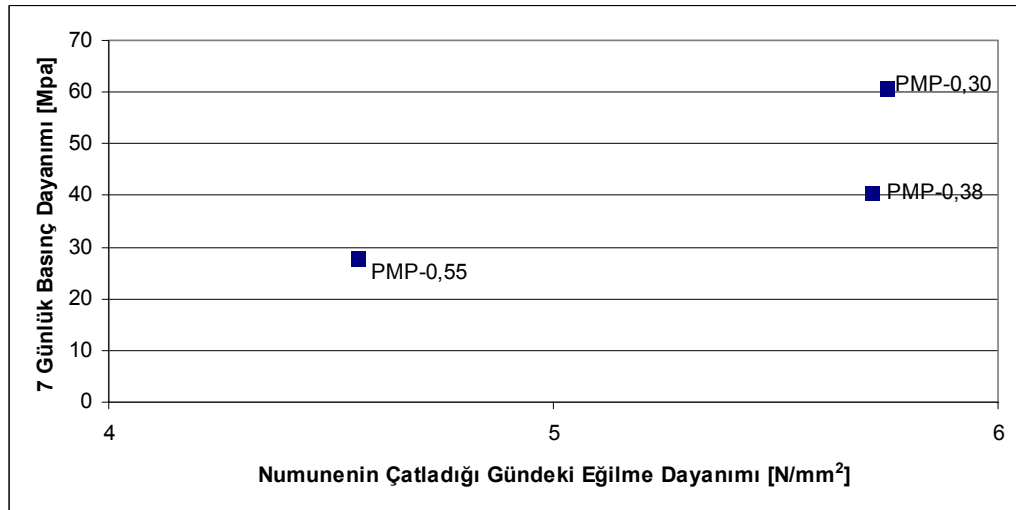
Şekil 4.22'deki grafikte düşey eksene 7 günlük basınç dayanımı ve yatay eksene numunenin çatladığı gündeki kırılma enerjisi girilmiştir. Silindir basınç dayanımı deney sonuçlarından alınan 7 günlük basınç dayanımı sonuçlarına denk gelen numunenin çatladığı gündeki kırılma enerjisi verileri karşılaştırıldığında 7 günlük basınç dayanımı arttıkça numunenin çatladığı gündeki kırılma enerjisinin yükseldiği gözlenmektedir.



Şekil 4.22: Numunenin Çatladığı Gündeki Kırılma Enerjisi ile 7 Günlük Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

4.14. Çatlak Oluşum Günüdeki Eğilme Dayanımı ile 7 Günlük Basınç Arasındaki İlişki

Numunenin çatladığı gündeki eğilme dayanımı şekil 4.23'deki grafikte 7 günlük basınç dayanımları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Aralarında doğrusal bir bağlantı kurulamamakla birlikte basınç dayanımının eğilme dayanımı ile arttığı gözlenmektedir.



Şekil 4.23: Numunenin Çatladığı Gündeki Eğilme Dayanımı ile 7 Günlük Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

5. GENEL SONUÇLAR

- İki farklı dizayna sahip betonlar üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda su/çimento oranının artışıyla betonun basınç dayanımını azalmaktadır.
- Mineral katkı içeren beton dizaynı içermeyen dizayna göre aynı su/çimento oranlarında daha yüksek basınç dayanımları göstermektedir.
- Farklı özelliklere sahip süperakışkanlaştırıcılardan erken yaşta mukavemet sağlayan katkı kullanıldığında 7 günlük basınç dayanımı, 28 günlük basınç dayanımının %98'ine kadar yaklaşmaktadır.
- Betonun durabilite özelliklerinden biri olan kılcallık katsayısı her iki dizayn için de su/çimento oranının artışıyla birlikte artmaktadır. İçinde mineral katkı içeren beton dizaynı, mineral katkı içermeyen beton dizaynına göre aynı su/çimento oranında daha düşük kılcallık katsayısına sahiptir. Uçucu kül ve mikrosilika içeren beton dizaynının boşluk yapısı ve oranı daha düşük olduğundan kılcallık katsayısı da daha düşük bulunmaktadır.
- Diğer bir durabilite özelliği olan ve hızlı klor geçirimliliği deneyi sonucu bulunan klor geçirimliliği içinde uçucu kül ve mikrosilika içeren beton dizaynlarında su/çimento oranının artışıyla çok düşük bir eğimle artmaktadır ama her su/çimento oranı için ASTM C 1202 standardındaki derecelendirmeye göre “çok düşük” derecesinde kalmaktadır. Mineral katkı içermeyen beton dizaynında ise klor geçirimliliği su/çimento oranının artışı ile birlikte daha yüksek bir eğimle artmaktadır. Mineral katkı içermeyen beton dizaynında su/çimento oranı %30, %31.5 ve %35 olan dizayna “düşük” derecelendirmesi, %40, %45 ve %50 olan dizayna “orta” ve %55 olan dizayna “yüksek” derecelendirmesi yapılmaktadır.
- Klor difüzyon deneyi sonuçlarına göre her iki dizayn içinde su/çimento oranının yükselmesiyle klor geçirimlilik katsayısı “ K_{cr} ” ve efektif klor geçirimlilik katsayısı “ D_e ” artmaktadır. Mineral katkı içeren beton dizaynında

klor difüzyon deneyi sonucunda da klor geçirirnililiği mineral katkısız beton dizaynına göre daha düşüktür.

- Kılcal su emme, hızlı klor geçirirnililiği ve klor difüzyon deneyi sonuçları analiz edildiğinde uçucu kül ve mikrosilika betonun içerisindeki boşlukları daha iyi doldurmakta ve geçirimsizliği düşürmektedir.
- Kılcallık katsayısı ile klor geçirirnililiği doğru orantılı bir şekilde artmaktadır.
- Kısıtlanmış rötre potansiyelinin su/çimento artışıyla birlikte düşmektedir. Su/çimento oranı %30 olan pompalanabilir beton dizaynına ait beton halkalarda 6. günde, su/çimento oranı %38 olan beton numunesinde 7. günde ve su/çimento oranı %55 olan beton numunesinde 12. günde çatlak oluşumu gerçekleşmiştir. Su/çimento oranı %31,5 olan prekast beton dizaynına ait beton halkalarda 9. günde, su/çimento oranı %40 olan beton numunesinde 21. günde ve su/çimento oranı %55 olan beton numunesinde 35. günde çatlak oluşumu gerçekleşmiştir.
- Kısıtlanmış rötre potansiyeli yüksek olan beton dizaynında çatlak genişliğinin kısıtlanmış rötre potansiyeli düşük olan beton dizaynında gerçekleşen çatlak genişliğine göre daha yüksek olduğu saptanmıştır.
- Pompalanabilir beton çatladığı gündeki RILEM kırılma enerjileri betonun çatladığı gündeki numune yaşı arttıkça düşmektedir. Daha erken çatlayan betonun kırılma enerjisi daha geç çatlayan betona göre düşük çıkmaktadır.
- Pompalanabilir betonda betonun çatladığı gündeki numune yaşı arttıkça eğilme dayanımı düşmektedir.
- Sonuç olarak beton karşım tasarımında agrega miktarı ağırlıkça sabit tutulup su/çimento oranı artırıldığında betonun mekanik özelliklerinin düşmesinin yanında geçirirnililiğinde olumsuz yönde etkilendiği görülmüştür. İstenilen basınç dayanımı yakalansa bile yapının servis ömrü açısında geçirirnililik özelliklerine ve bu bağlamda kür koşullarına da dikkat edilmelidir.

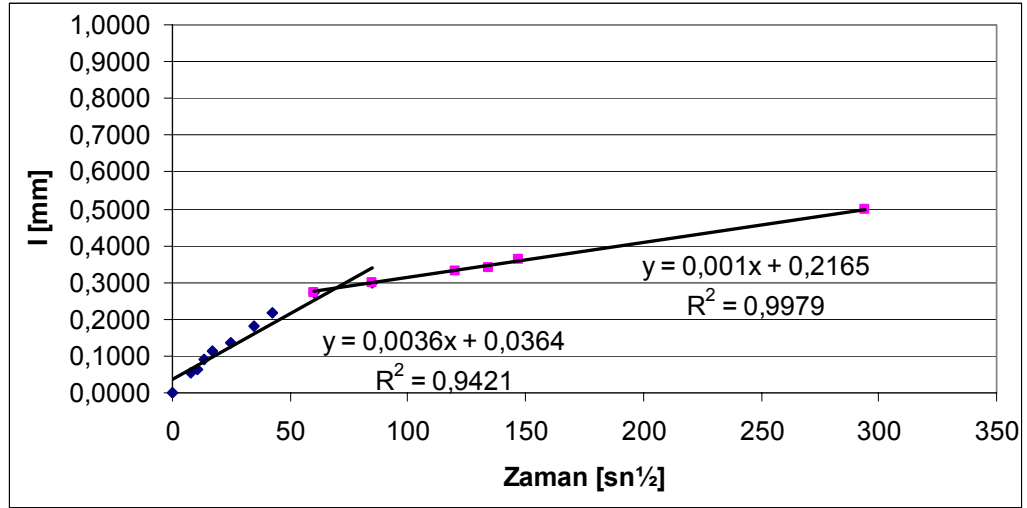
KAYNAKLAR

- [1] **Bazant, P.Z. and XI, Y.**, 1994. Drying Creep of Concrete Constitutive Model and New Experiments Separating its Mechanisms, *Materials and Structures*, **165**, 3-14. .
- [2] **Neville, A.M. and BROOKS, J.J.**, 1987. Concrete Technology, Longman Group Limited, pp. 237-261, U.K..
- [3] **Altoubat, S.A., and Lange, D.A.**, 2001. Creep, Shrinkage, and Cracking of Restrained Concrete at Early Age, *ACI Materials Journal*, **98**, 323-331, U.K..
- [4] **Tullmin, M.**, 2000. <http://www.corrosion-club.com/concreteintro4.htm/>
- [5] **Page, C.L. and Page M.M.**, 2007. Durability of Concrete and Cement Composites, Woodhead Publishing Ltd., U.K..
- [6] **Mays, G.**, 1991. Durability of Concrete Structures, Chapman and Hall, U.K..
- [7] **Nilsson, L.O, Poulsen, E., Sandberg P, Sorensen H.E and Klinghoffer O.**, 1996. Chloride peneration into concrete, State-of-the-Art, Transport processes, corrosion inititation, test methods and prediction models, *Danish Road Directorate, Report no.53*.
- [8] **Bennet, E.W. and Loat, D.R.**, 1970. Shrinkage and Creep of Concrete as Affected by the Fineness of Portland Cement, *Magazine of Concrete Research*, **22**, 69-78, United States.
- [9] **Postacıoğlu, B.**, 1981. Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri, İ.T.Ü. Matbaası, Cilt I, İstanbul.
- [10] **Postacıoğlu, B.**, 1981. Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton, Yapı Malzemesi Dersleri, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul.
- [11] **Young, J.F.**, 1988. A Review of the Pore Structure of Cement Paste and Concrete and It's Influence on Permeability, *Journal of the American Concrete Institute*, **108**, 59-65, United States.
- [12] **Hobbs, D.W.**, 1974. Influence of Aggregate Restraint on the Shrinkage of Concrete, *Journal of the American Concrete Institute*, **71**, 445-450, United States.

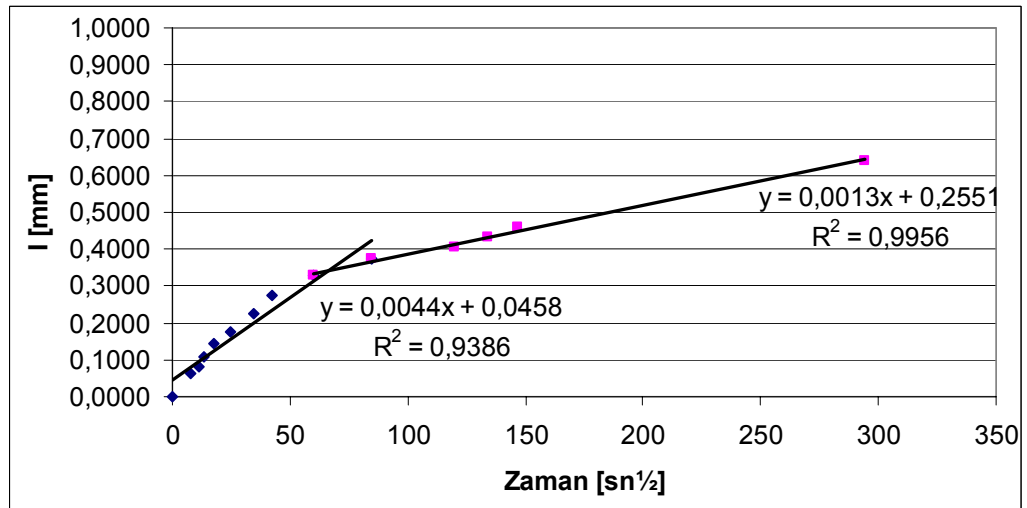
- [13] **Dias, W.P.S., Khoury, G.A. and Sullivan, P.J.E.**, Basic Creep of Unsealed Hardened Cement Paste at Temperatures Between 20°C and 725°C, *Magazine of Concrete Research* **39**, 93-101, United States.
- [14] **Neto, A.M., Cincotto M.A. and Repette W.**, 2007. Drying and Autogenous Shrinkage of Pastes and Mortars with Activated Slag Cement, *Cement and Concrete Research*, **38**, 565-574, Brazil.
- [15] **Shah, S.P., Sarigaphuti, M. And Karaguler M.E.**, Comparison of Shrinkage Cracking Performance of Different Types of Fibers and Wiremesh, United States
- [16] **Akkaya, Y., Ouyang, C. And Shah, S.**, 2007. Effect of supplementary cementitious materials on shrinkage and crack development in concrete, *Cement and Concrete Composites*, **29**, 117-123, United States.
- [17] **Akhter, B. And Weiss J.**, 2005. The Role of Specimen Geometry and Boundary Concitions on Stres Development and Cracking in the Restrained Ring Test, *Cement and Concrete Research*, **36**, 189-199, United States.
- [18] **Shah, S and Weiss, J.**, 2004. Quantifying shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using the ring test, *Materials and Structures*, **39**, 887-899, United States.
- [19] **See, H.T., Attiogbe E.K. and Miltenberger M.A.**, 2003. Shrinkage Cracking Characteristics of Concrete Using Ring Specimens, *ACI Materials Journal*, **100**, 239-245, United States.
- [20] **Gong, Z.**, 2006. Cracking Studies of High-Performance concrete for Bridge Decks, *PhD Thesis*, West Virginia University, Morgantown.
- [21] **Neville, A.M.**, 2000. Propriestes des betons, Editions Eyrolles, pp. 804, Paris
- [22] **Gonzalez, A.M.**, 2007. An Evaluation of the ASTM Standard Method For Measuring Chemical Shrinkage of Hydraulic Cementitious Pastes, *PhD Thesis*, University of Toronto, Toronto.
- [23] **Şimşek, O.**, 2004. Beton Bileşenleri ve Beton Deneyleri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.
- [24] **Şengül Ö., Taşdemir, M.A. ve Sönmez, R.**, 2001. Yüksek Oranda Uçucu Kül İçeren Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonların Klor Geçirirmliliği, İstanbul.

- [25] **TS EN 943-2**, 2002. Kimyasal Katkılar- Beton, Harç ve Şerbet için Bölüm:2 Beton Katkıları- Tarifler, Özellikler, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme.
- [26] **TS 706 EN 12620**, Nisan 2003. Beton Agregaları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [27] **Ağar, E. ve Öztaş, G. ve Süttaş, İ.**, 1998. Beton Yollar, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [28] **TS EN 12390-3**, 2003. Sertleşmiş Beton Deneyleri – Bölüm:3 Basınç Dayanımı Test Numuneleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [29] **ASTM C-1589**, 2004. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, ASTM, U.S.A.
- [30] **ASTM C-1202**, 1997. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM, U.S.A.
- [31] **NT BUILD 443**, 1995. Concrete Hardened: Accelerated chloride penetration, NORDTEST, Finland.
- [32] **ASTM C-1581**, 2004. Standard Test Method for Determining Age at Cracking And Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar And Concrete Under Restrained Shrinkage, ASTM, U.S.A.

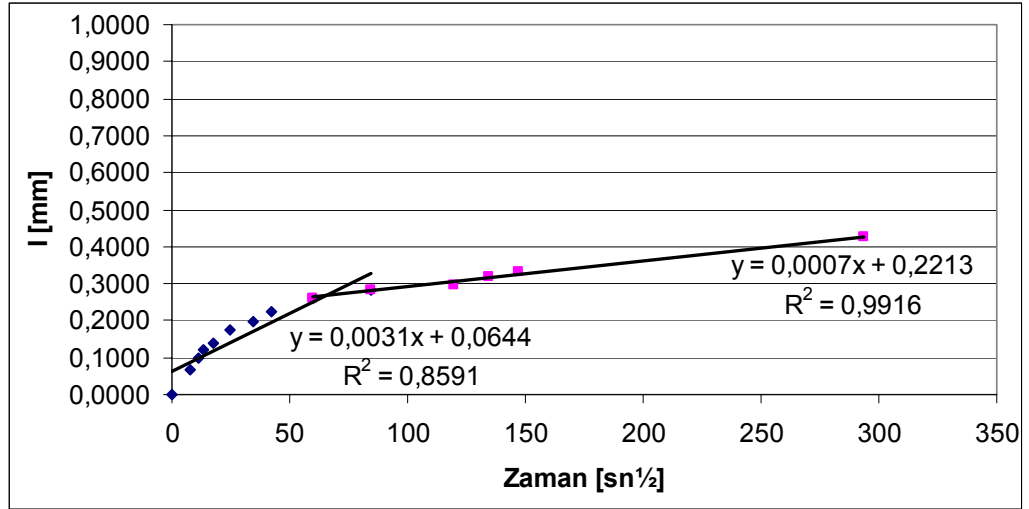
EKLER



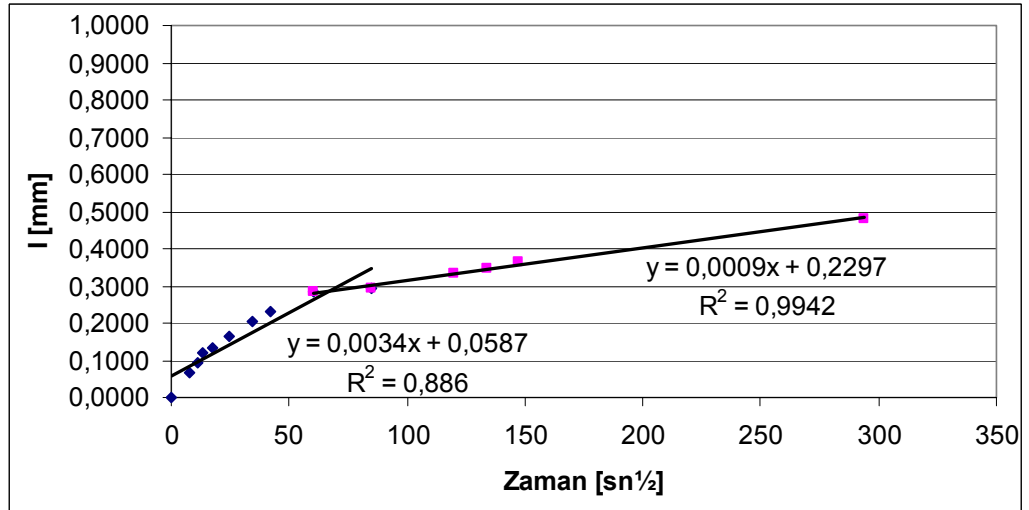
Şekil A.1: PMP-0,30 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği



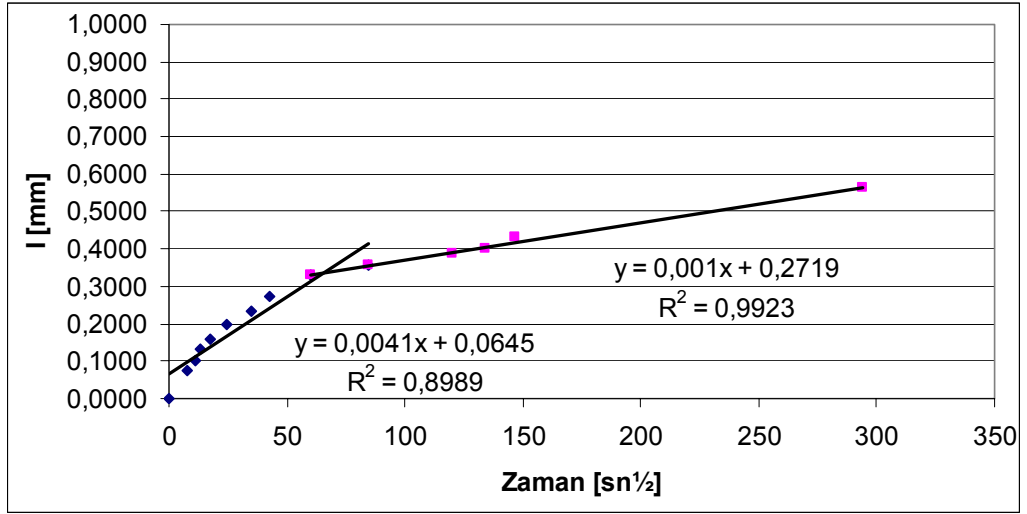
Şekil A.2: PMP-0,35 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği



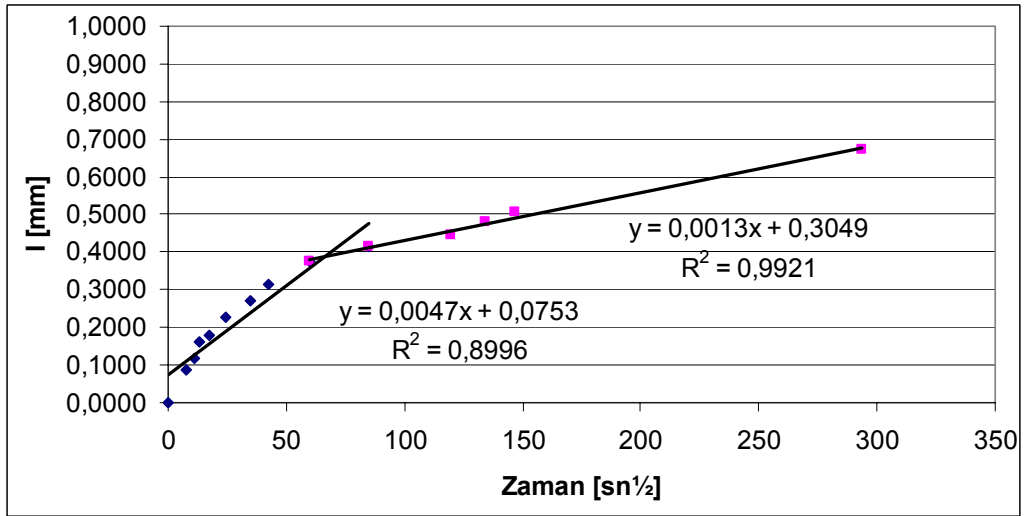
Şekil A.3: PMP-0,38 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği



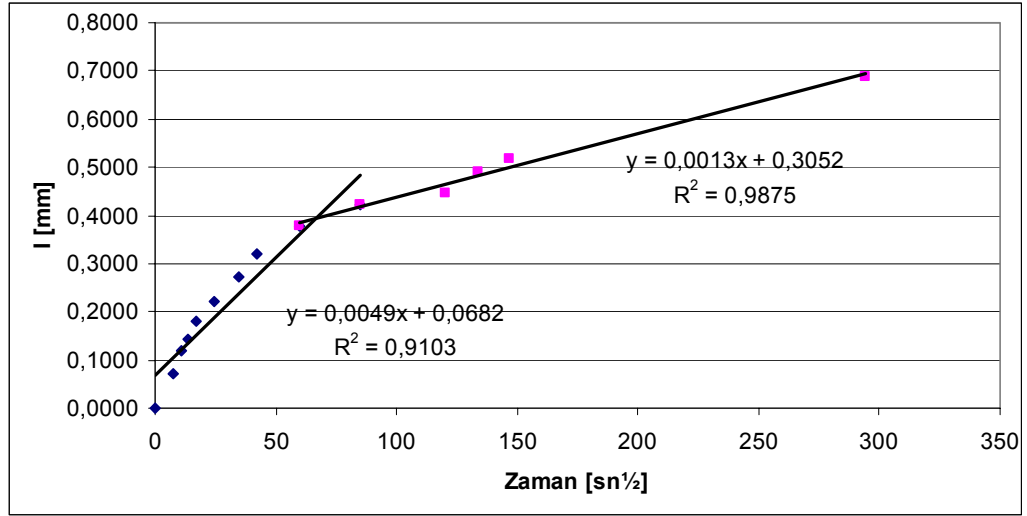
Şekil A.4: PMP-0,40 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği



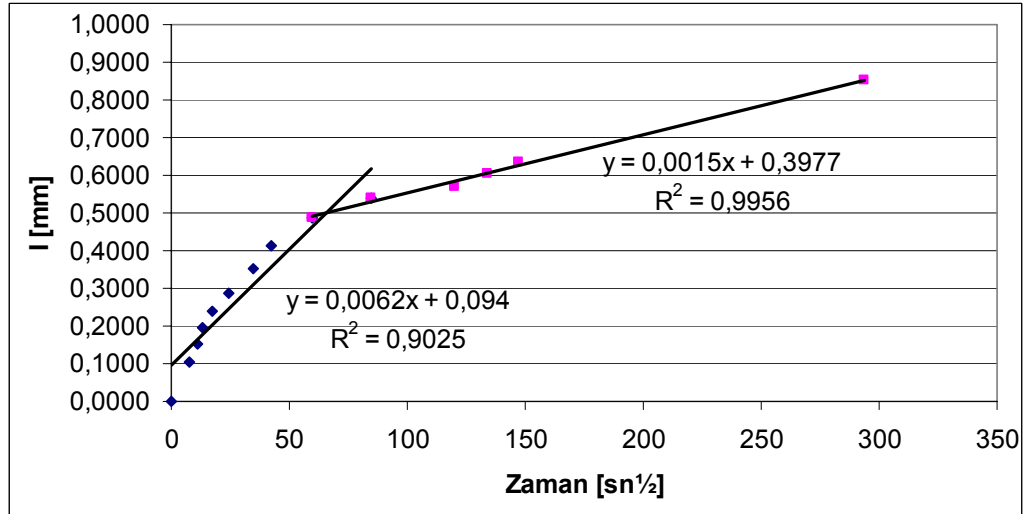
Şekil A.5: PMP-0,45 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği



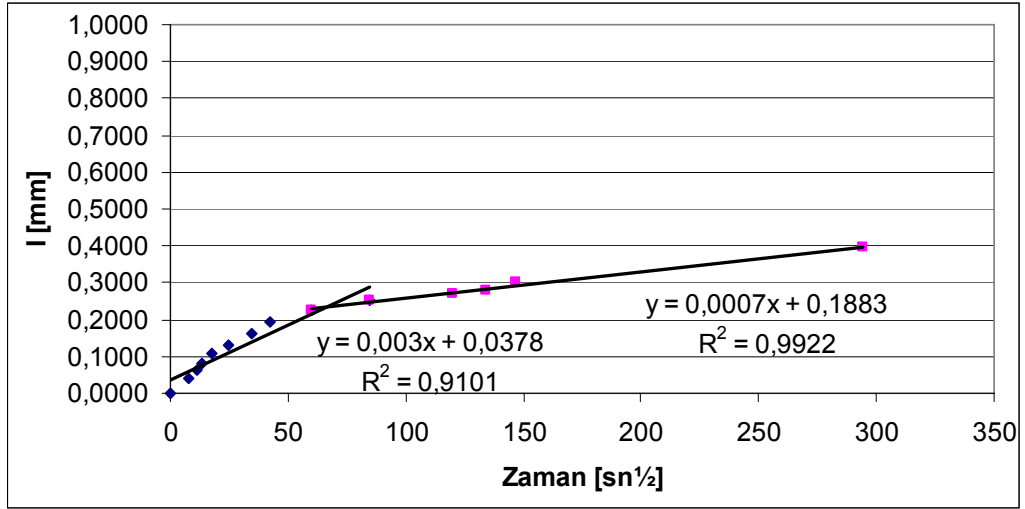
Şekil A.6: PMP-0,50 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği



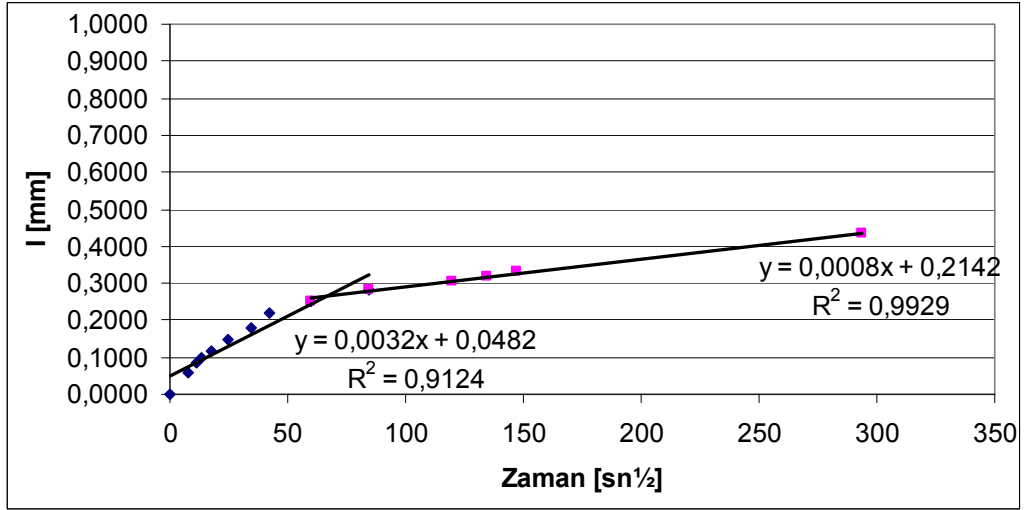
Şekil A.7: PMP-0,55 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği



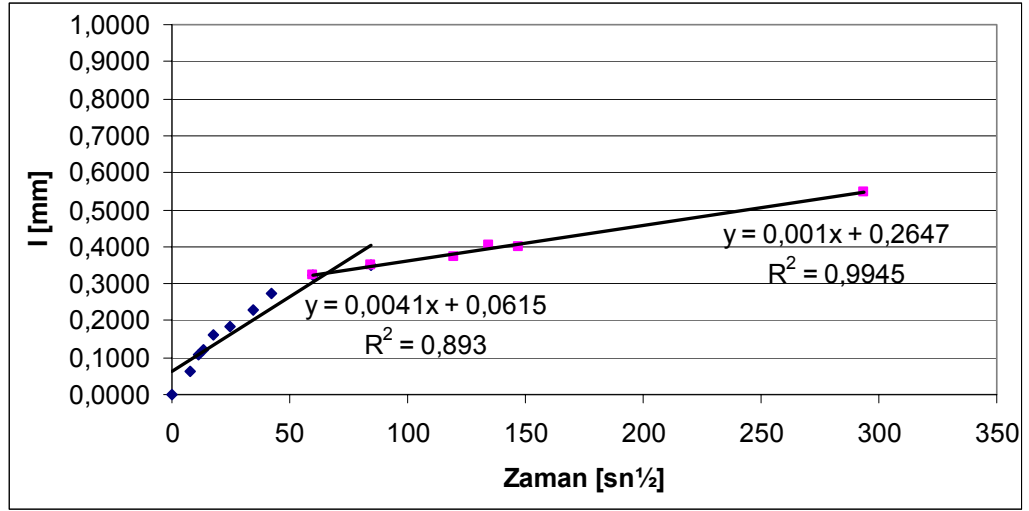
Şekil A.8: PRK-0,30 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği



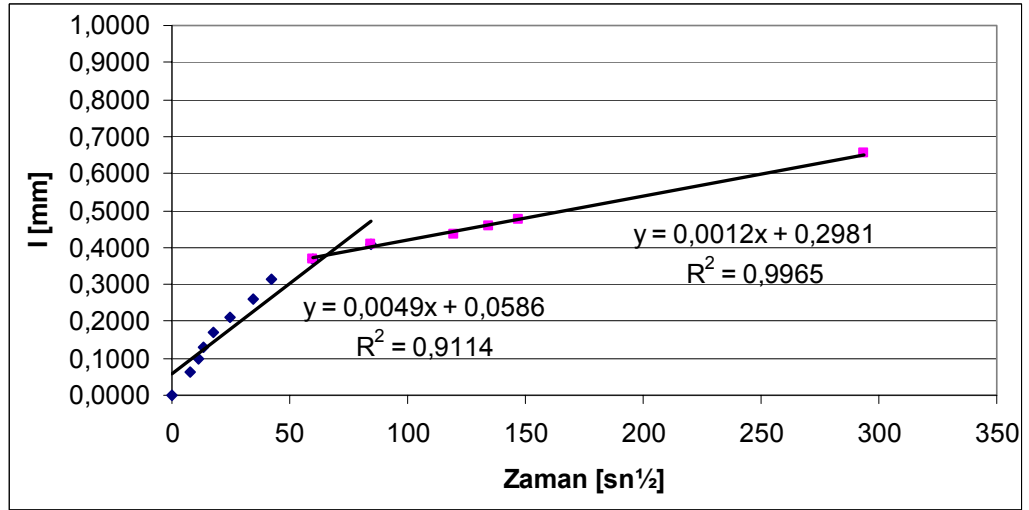
Şekil A.9: PRK-0,315 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği



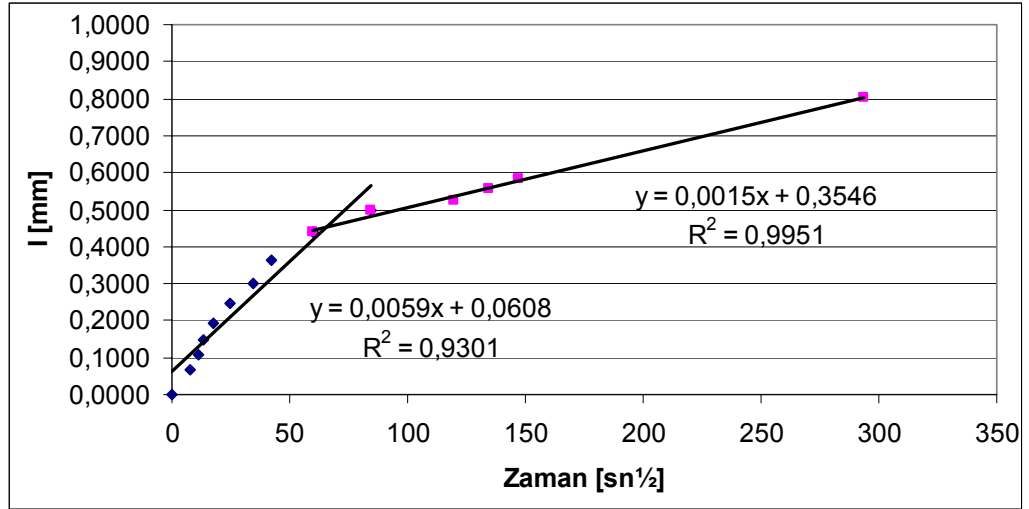
Şekil A.10: PRK-0,35 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği



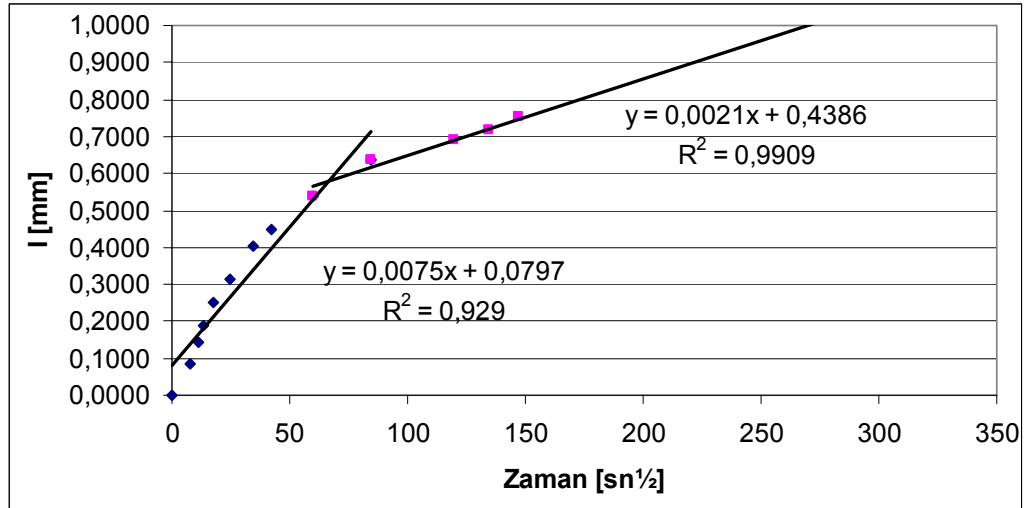
Şekil A.11: PRK-0,40 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği



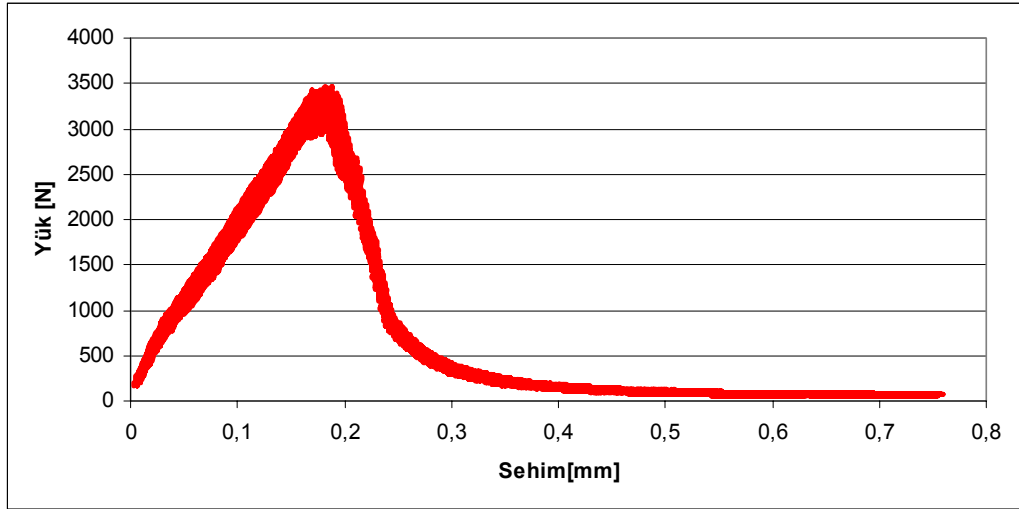
Şekil A.12: PRK-0,45 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği



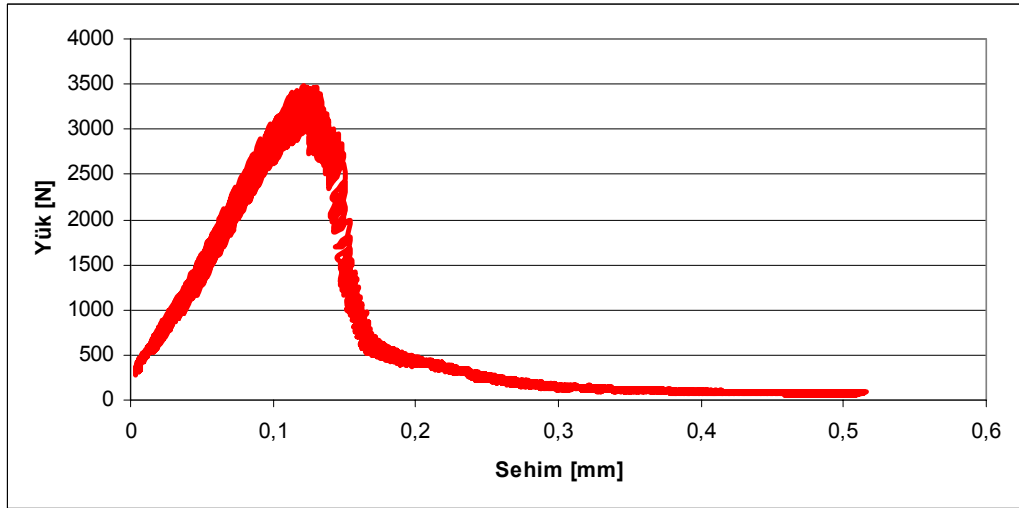
Şekil A.13: PRK-0,50 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği



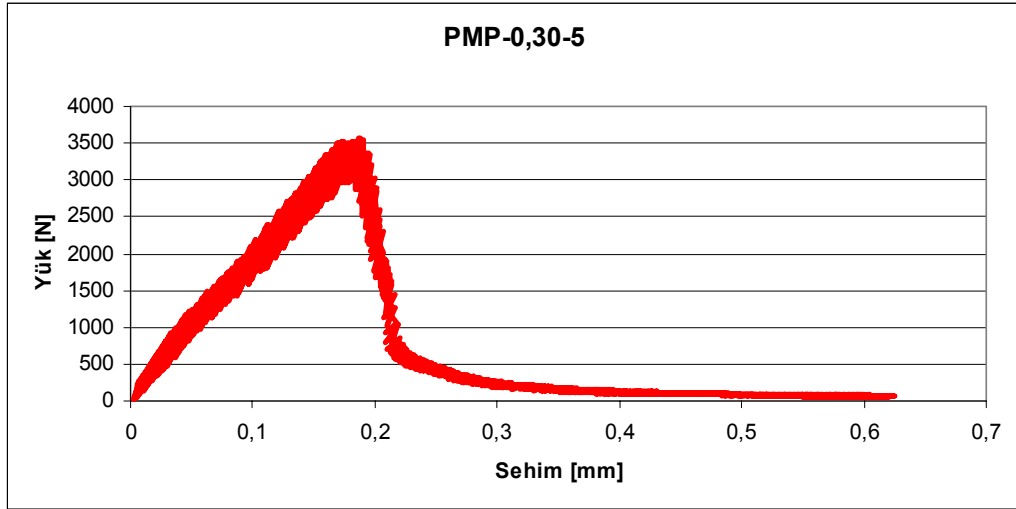
Şekil A.14: PRK-0,55 Betonda Kılcal Su Emme-Zaman Grafiği



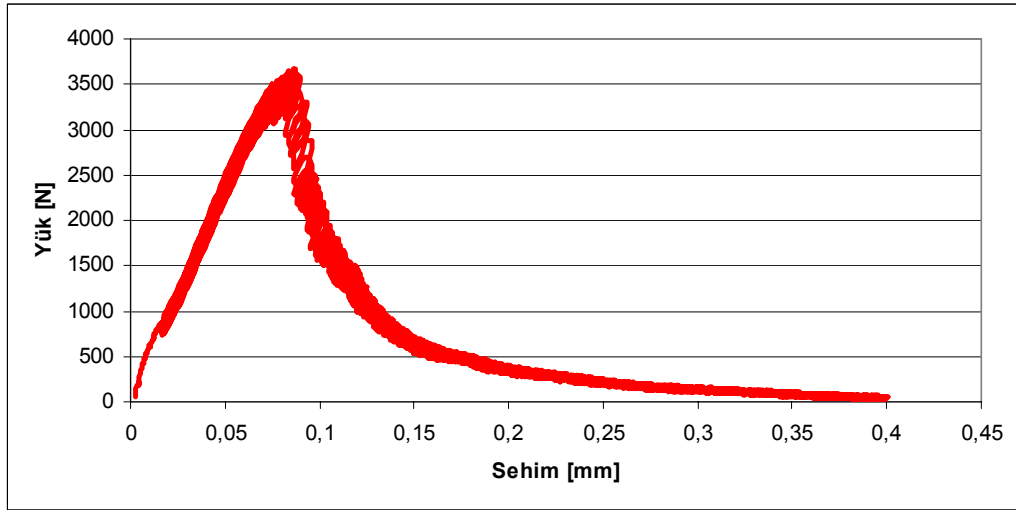
Şekil B.1: PMP-0,30 Betonda Yük-Sehim Grafiği



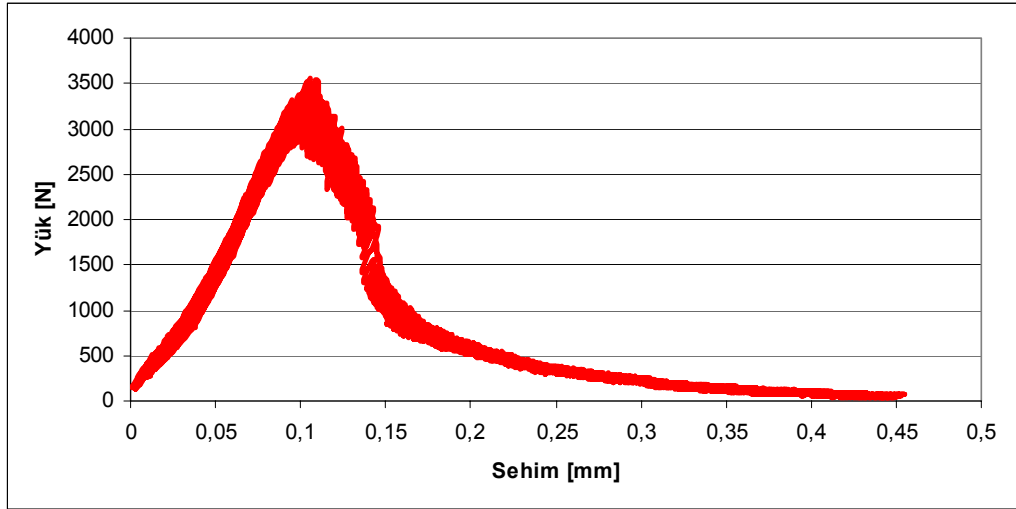
Şekil B.2: PMP-0,30 Betonda Yük-Sehim Grafiği



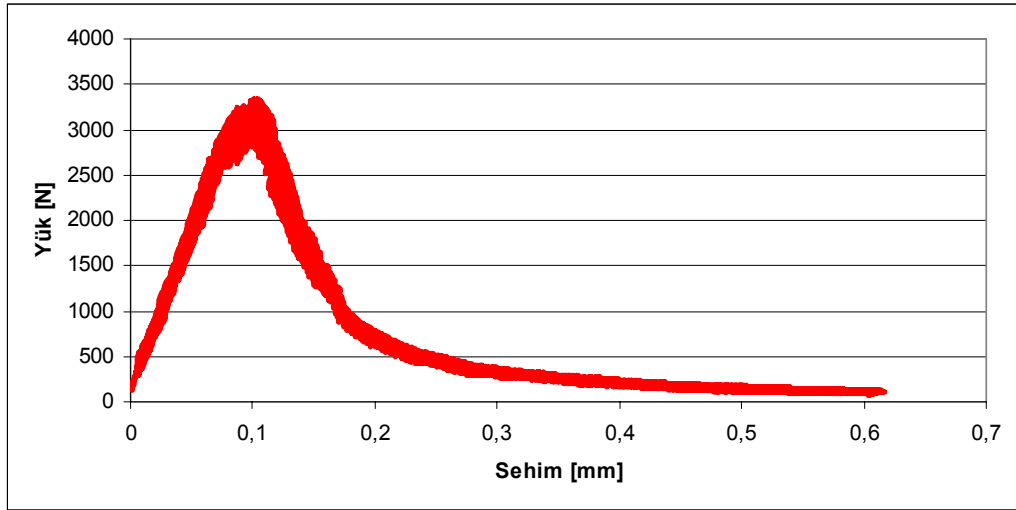
Şekil B.3: PMP-0,30 Betonda Yük-Sehim Grafiği



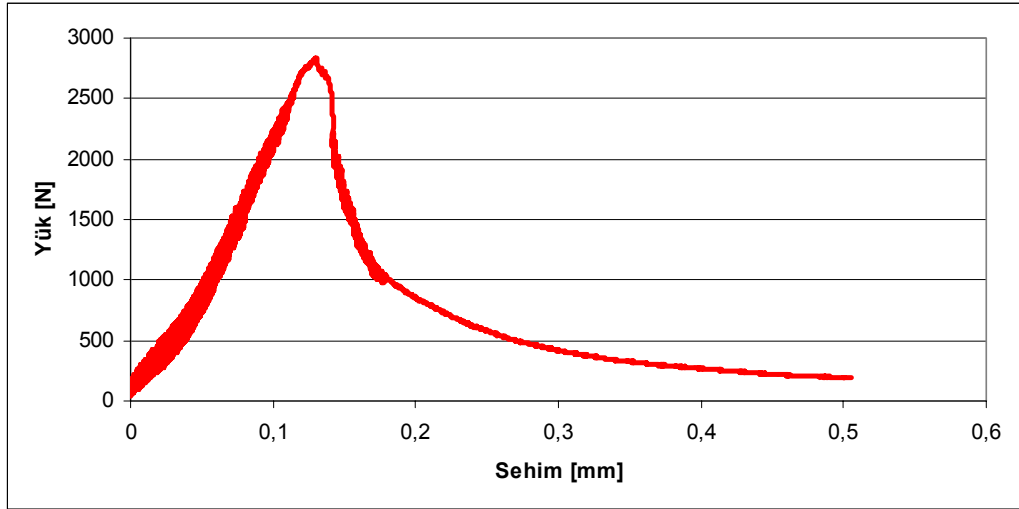
Şekil B.4: PMP-0,38 Betonda Yük-Sehim Grafiği



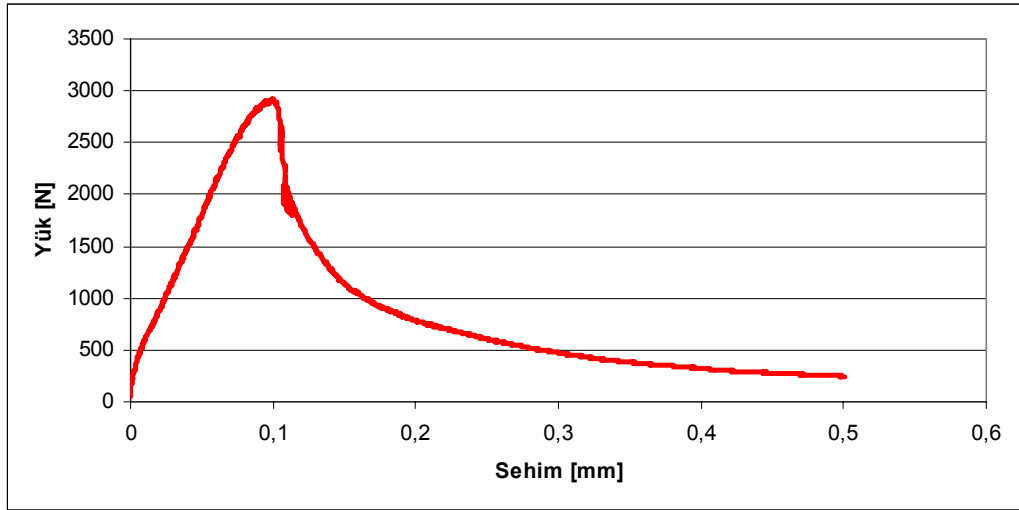
Şekil B.5: PMP-0,38 Betonda Yük-Sehim Grafiği



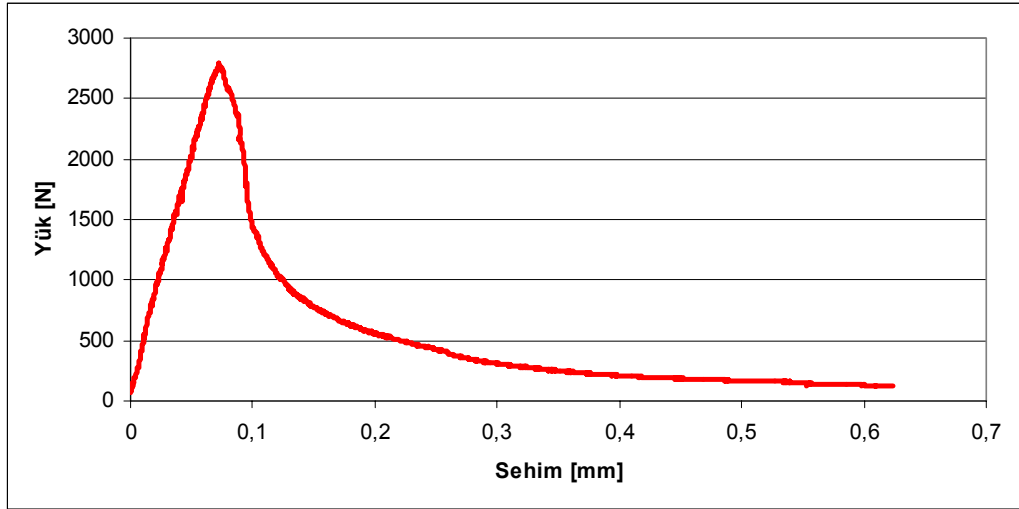
Şekil B.6: PMP-0,38 Betonda Yük-Sehim Grafiği



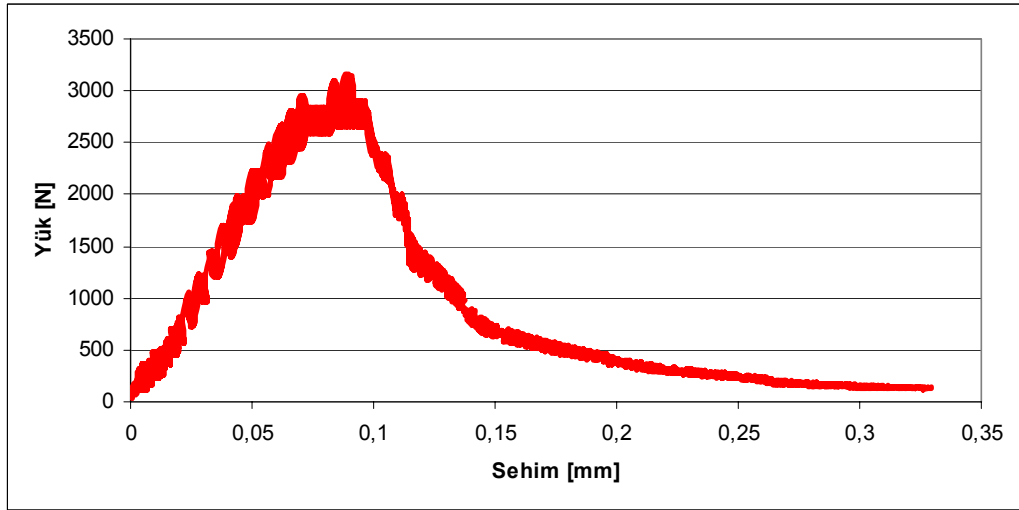
Şekil B.7: PMP-0,55 Betonda Yük-Sehim Grafiği



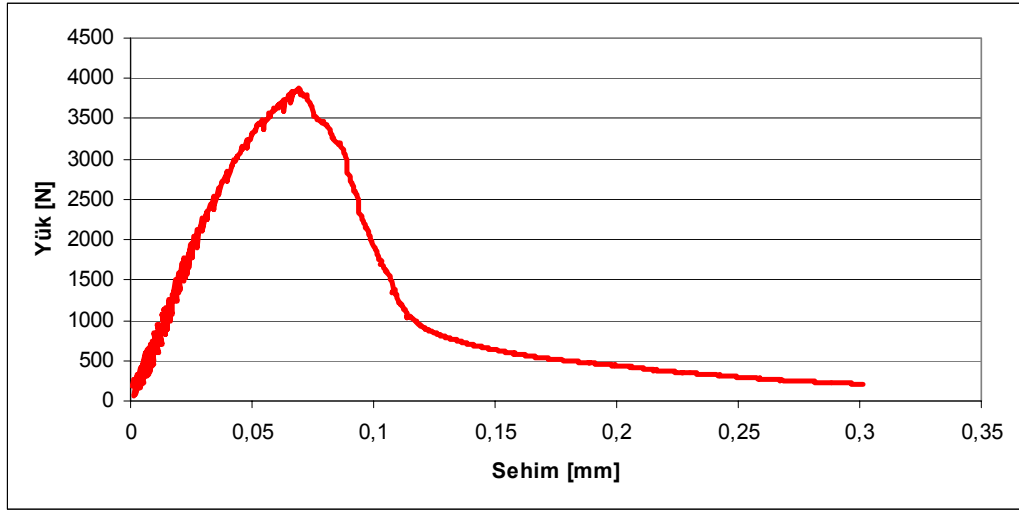
Şekil B.8: PMP-0,55 Betonda Yük-Sehim Grafiği



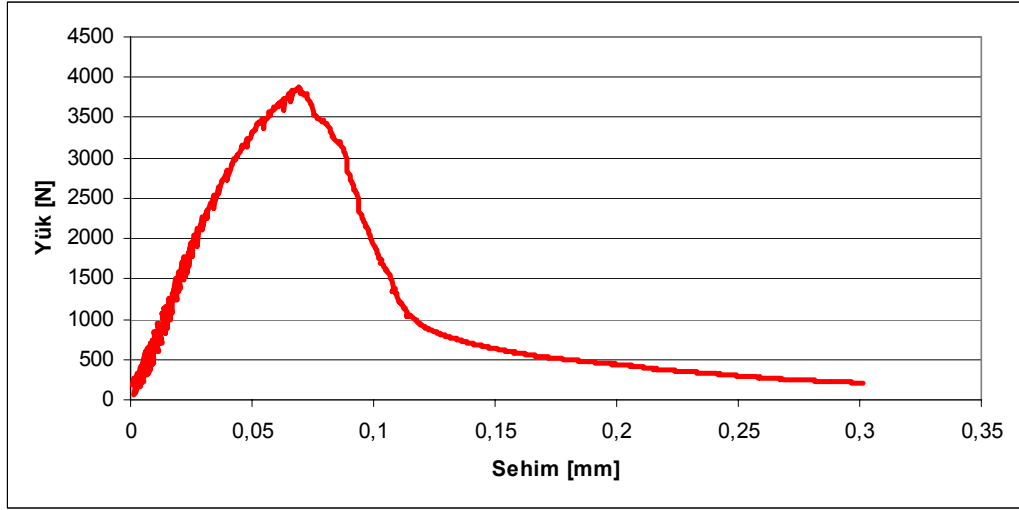
Şekil B.9: PMP-0,55 Betonda Yük-Sehim Grafiği



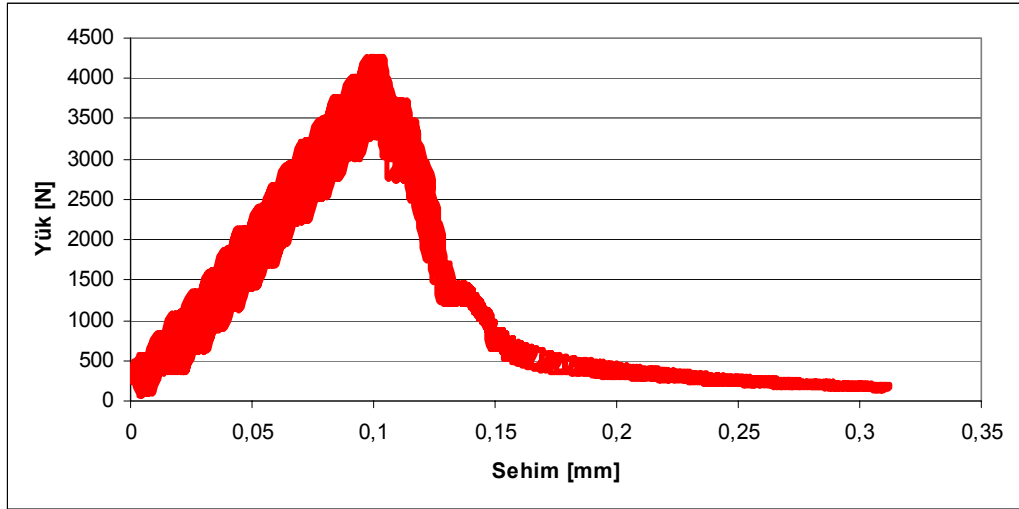
Şekil B.10: PRK-0,315 Betonda Yük-Sehim Grafiği



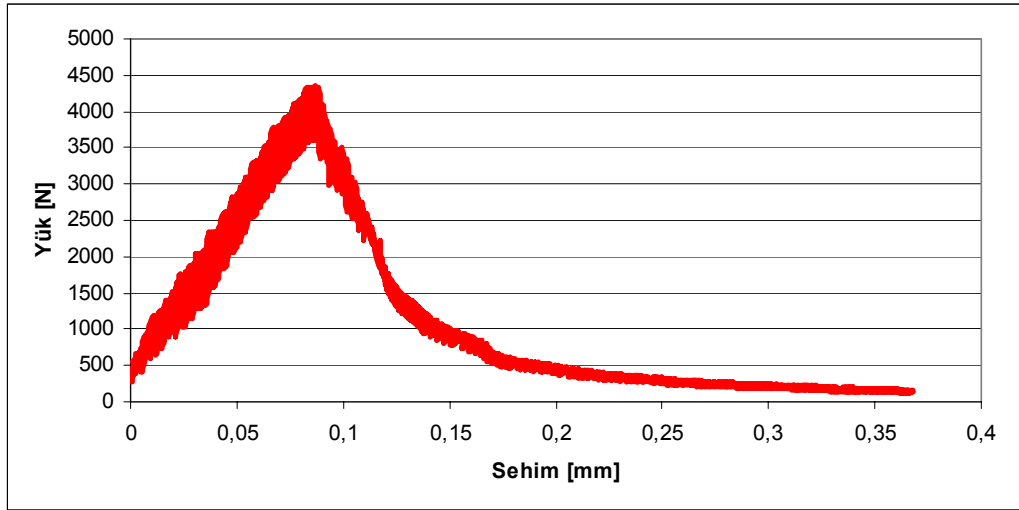
Şekil B.11: PRK-0,315 Betonda Yük-Sehim Grafiği



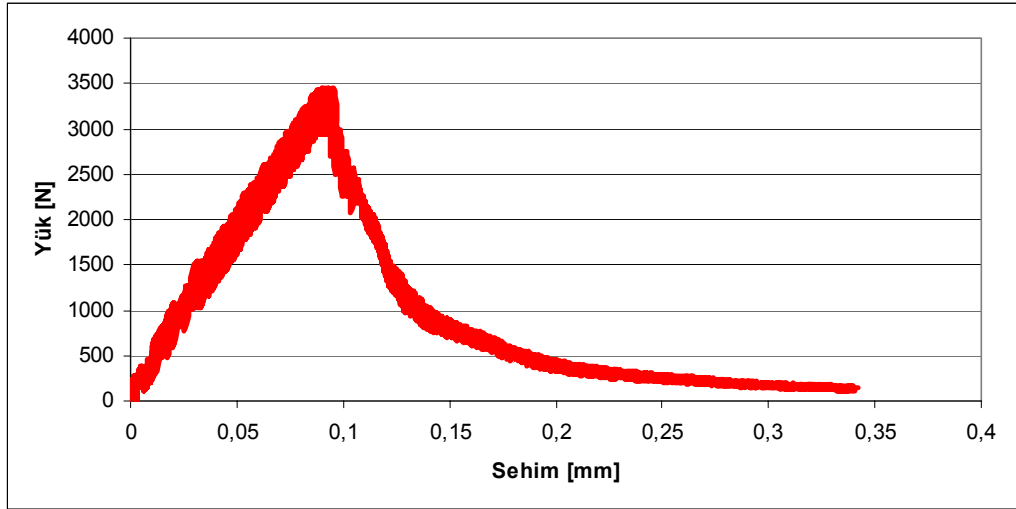
Şekil B.12: PRK-0,315 Betonda Yük-Sehim Grafiği



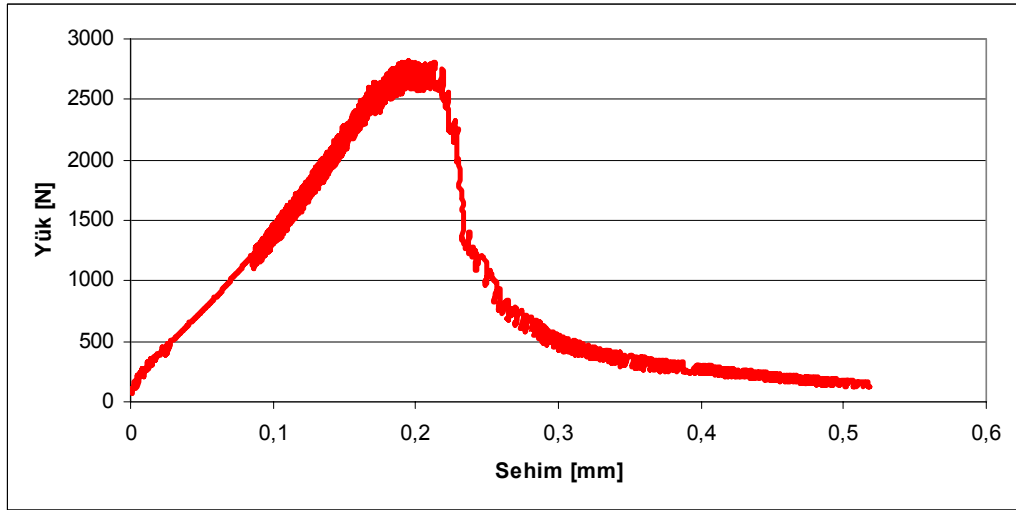
Şekil B.13: PRK-0,40 Betonda Yük-Sehim Grafiği



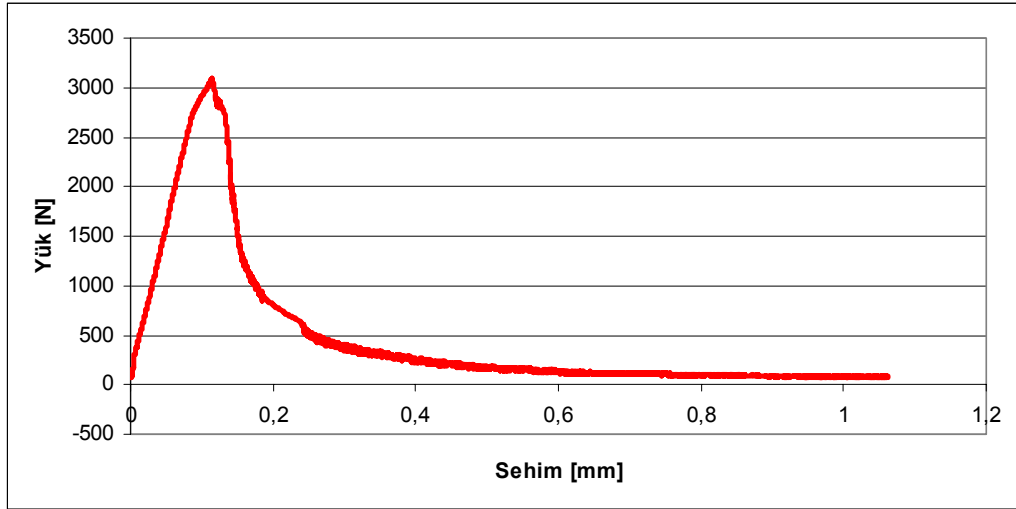
Şekil B.14: PRK-0,40 Betonda Yük-Sehim Grafiği



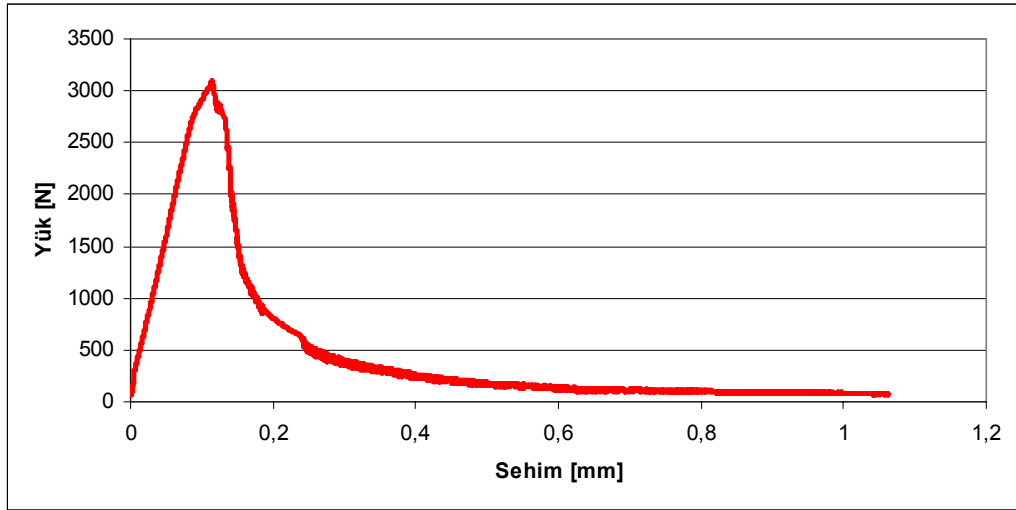
Şekil B.15: PRK-0,40 Betonda Yük-Sehim Grafiği



Şekil B.16: PRK-0,55 Betonda Yük-Sehim Grafiği



Şekil B.17: PRK-0,55 Betonda Yük-Sehim Grafiği



Şekil B.18: PRK-0,55 Betonda Yük-Sehim Grafiği

ÖZGEÇMİŞ

Cemil Utkan ÇORBACIOĞLU, 1983 yılında İstanbul’da doğdu. Lise öğrenimini İstanbul Cağaloğlu Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2001 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girdi. 2002–2003 Güz yarıyılında İstanbul Teknik Üniversitesi İngilizce Hazırlık Bölümünü bitirdikten sonra başladığı lisans öğrenimini 2006 yılında tamamladı. 2006 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Malzemesi Anabilim dalında yüksek lisans öğrenimine başladı ve 2007-2008 Bahar yarıyılında mezun oldu.