



**GEÇİRGENLİK AZALTICI KATKILARIN MİNERAL  
KATKI İÇEREN ÇİMENTOLU SİSTEMLERİN TAZE  
VE SERTLEŞMİŞ HAL ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**Ali NEMATZADEH**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GEÇİRGENLİK AZALTICI KATKILARIN MİNERAL KATKI İÇEREN  
ÇİMENTOLU SİSTEMLERİN TAZE VE SERTLEŞMİŞ HAL  
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**Ali NEMATZADEH**

Dr. Öğretim Üyesi Ali MARDANI AGHABAGLOU  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2018

## TEZ ONAYI

Ali NEMATZADEH tarafından hazırlanan "GEÇİRGENLİK AZALTICI KATKILARIN MİNERAL KATKI İÇEREN ÇİMENTOLU SİSTEMLERİN TAZE VE SERTLEŞMİŞ HAL ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Malzemesi Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Dr. Öğretim Üyesi Ali MARDANI AGHABAGLOU

**Başkan** : Dr. Öğretim Üyesi Ali MARDANI AGHABAGLOU  
Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Bölümü  
Yapı bilim Dalı

İmza



**Üye** : Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN  
Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Bölümü  
Yapı bilim Dalı

İmza



**Üye** : Doç. Dr. Mehmet UĞUR TOPRAK  
Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik  
Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü  
Yapı bilim Dalı

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım



Prof. Dr. Ali BAYRAM  
Enstitü Müdürü

3...1...2019

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

 24/12/2018  
**Ali NEMATZADEH**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### GEÇİRGENLİK AZALTICI KATKILARIN MİNERAL KATKI İÇEREN ÇİMENTOLU SİSTEMLERİN TAZE VE SERTLEŞMİŞ HAL ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

**Ali NEMATZADEH**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Dr. Öğretim Üyesi Ali MARDANI AGHABAGLOU

Bu çalışmada, farklı etki mekanizmalarına sahip geçirgenlik azaltıcı katkı (PRA) kullanımının mineral katkı içeren çimentolu sistemlerin taze ve sertleşmiş hal özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, 2 farklı firmadan temin edilen 3 adet ticari PRA kimyasal katkısı kullanılmıştır. Birinci ve üçüncü katkılardaki etkin parametreler, sırasıyla hava sürüklenme ve yüksek oranda hava sürüklenme özellikleri olarak üreticiler tarafından beyan edilmiştir. Üreticiye göre, ikinci kimyasal katkı çözünmeyen kalıntı içerir ve düşük oranda hava sürükleyici özelliğe sahiptir. İkili ve üçlü çimentolu sistemlere sahip olan çimento hamuru ve harç karışımları, çimentonun uçucu kül ve metakaolin ile kısmen yer değiştirmesiyle üretilmiştir. Hamur karışımların Marsh-hunisi akış süresi ve mini-çökme davranışı incelenmiştir. Harç karışımlarında, hava miktarı ve zamana bağlı akış değerleri gibi taze durum özellikleri ve basınç dayanımı, su emme, ultrases geçiş hızı, donma-çözülme direnci ve kuruma-büzülme davranışı gibi sertleşmiş durum özellikleri incelenmiştir. Uçucu kül ve metakaolin içeren üçlü çimentolu sisteme sahip karışım, sertleşmiş hal özellikleri açısından en başarılı mineral katkılı karışım olarak seçilmiştir. Bu bağlamda, PRA içeren karışımlar arasında, hem çözünmeyen kalıntıları içeren hem de az miktarda hava sürükleyici özelliklere sahip olan PRA katkısı içeren karışım en iyi performansı sergilemiştir. Mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkılarının bir arada kullanılması, karışımların özellikleri üzerinde daha olumlu bir etkiye sahip olmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Çimentolu Sistem, Mineral Katkı, Geçirgenlik Azaltıcı Katkı, Mekanik Özellikler, Durabilite Özellikler.

**2018, xi + 155 sayfa.**

## ABSTRACT

MSc Thesis

### EFFECT OF PERMEABILITY REDUCING ADMIXTURES ON FRESH AND HARDENED STATE PROPERTIES OF CEMENTITIOUS SYSTEMS CONTAINING MINERAL ADMIXTURE

**Ali NEMATZADEH**

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

**Supervisor:** Asst. Prof. Dr. Ali MARDANI AGHABAGLOU

In this study, the effect of utilization of the permeability reducing admixture (PRA) with different effect mechanisms on fresh and hardened state properties of cementitious systems containing mineral admixtures was investigated. For this purpose, 3 commercial PRA admixtures provided from 2 different companies were used. The effective parameters in 1th and 3th admixtures are declared by the manufacturers as air entraining and high-rate of air entraining properties, respectively. According to the manufacturer the second admixture contains the insoluble residue and have low-rate of air-entraining property. Cement paste and mortar mixtures having binary and ternary cementitious systems were produced by partially replacement of cement with fly ash and metakaolin. Marsh-funnel flow time and mini-slump behavior of the cement paste mixtures were investigated. In the mortar mixtures, fresh state properties such as air content and time-dependent flow values and hardened state properties such as compressive strength, water absorption, ultrasonic pulse velocity, freeze-thaw resistance and drying-shrinkage behavior were examined. The mixture having ternary cementitious system containing both fly ash and metakaolin was chosen as the most successful mineral admixture-bearing mixtures in terms of the hardened state properties. In this context, among the permeability reducing admixtures-bearing mixtures, the mixture containing PRA admixture both containing insoluble residues and having small amount of air-entraining properties exhibited the best performance. Combined using of mineral and permeability reducing admixtures had a more positive effect on the properties of the mixtures.

**Key words:** Cementitious System, Mineral Admixture, Permeability Reducing Admixture, Mechanical Properties, Durability Properties  
**2018, xi + 155 pages.**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışma Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans bitirme Tezi olarak hazırlanmıştır.

“geçirgenlik azaltıcı katkılarının mineral katkı içeren çimentolu sistemlerinin taze hal ve sertleşmiş hal özelliklerine etkisi” adı altında yaptığımız çalışma ile mineral katkı içeren çimentolu sistemlere, belli oranlarda geçirgenlik azaltıcı katkıları eklenerek kuruma büzülme, donma-çözülme, su emme, basınç dayanımı vb. Gibi deneyler yapılmıştır. Çalışmada uçucu kül ve metakaolin mineral katkılarının betonda çimento ile ikame edilerek kullanılması halinde betonun geçirimsizliği üzerine etkileri incelenmiştir.

Yüksek lisans danışmanlığımı üstlenerek derslerde, konu seçiminde, çalışmalarım için gerekli cihaz ve malzemelerin temininde yardımcı olan, çalışmalarımın yürütülmesi esnasında bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım ve manevi desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Dr. Öğretim Üyesi MARDANİ AGHABAGLOU'ya teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Gerek bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım gerekse çalışma süresi boyunca benden hiçbir yardımını esirgemeyen ve yol gösteren hocam Sayın Arş. Gör. Süleyman ÖZEN'e, İnşaat Mühendisleri Metin İlhan ve Ece Geven'e en içten şekilde teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım esnasında kullanılan katkı maddelerinin temininde yardımcı olan Polisan Kimya San. A.Ş.'a, BURSA BETON'a ve İnka Kimya San. Tic. A.Ş.'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bu süreçte desteklerini benden esirgemeyen aileme çok teşekkür ederim.

Ali NEMATZADEH  
24/12/2018

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	7
2.1. Çimentolu Sistemler.....	7
2.1.1. Hamur karışımı .....	13
2.1.2. Harç karışımı .....	15
2.2. Katkılar.....	16
2.2.1. Mineral katkıları .....	16
2.2.2. Kimyasal katkıları .....	21
2.3. Konu İle İlgili Daha Önce Yapılan Çalışmalar.....	33
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	50
3.1. Malzemeler.....	50
3.1.1. Çimento .....	50
3.1.2. Agregası .....	50
3.1.3. Katkı maddeleri .....	51
3.1.4. Su .....	56
3.2. Karışımların Hazırlanması .....	56
3.2.1. Çimento hamuru karışımlarının hazırlanması .....	57
3.2.2. Harç karışımlarının hazırlanması .....	60
3.3. Çalışmada Uygulanan Deneyler.....	63
3.3.1. Hamur karışımları deneyleri .....	63
3.3.2. Harç karışımları deneyleri.....	64
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	73
4.1. Çalışmanın Birinci Aşamasında Elde Edilen Bulgular .....	73
4.1.1. Geçirgenlik ve mineral katkı kullanımının hamur karışımlarının taze hal özelliğine etkisi.....	73
4.1.2. Geçirgenlik ve mineral katkı kullanımının harç karışımlarının taze hal özelliğine etkisi.....	88
4.2. Çalışmanın İkinci Aşamasında Elde Edilen Bulgular.....	98
4.3. Çalışmanın Üçüncü Aşamasında Elde Edilen Bulgular.....	130
5. SONUÇ .....	141
KAYNAKLAR .....	148
ÖZGEÇMİŞ .....	155



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
%	Yüzde
$D_f$	Durabilite Faktörü
$\mu\text{m}$	Mikrometre
$a$	Etüv Kuru Ağırlığı
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Alüminyum Oksit
$b$	Kuru Doymun Yüzey Ağırlığı (Saturated Surface Dry)
$\text{C}_2\text{AH}_8$	Kalsiyum Alüminat Çimentolu Sistemler
$\text{C}_2\text{S}$	Dikalsiyum Silikat
$\text{C}_3\text{A}$	Trikalsiyum Alüminat
$\text{C}_3\text{S}$	Trikalsiyum Silikat
$\text{C}_4\text{AF}$	Tetrakalsiyum Alümin Ferrit
$\text{CaO}$	Kalsiyum Oksit
$\text{Cl}^-$	Klorür
cm	Santimetre
$\text{COO}^-$	Karboksilat Bazlı
$D_\zeta$	Çevresel Fraktal Boyut
dk	Dakika
$D_k$	Kütlesel Fraktal Boyut
$D_y$	Yüzeysel Fraktal Boyut
$E_{d0}$	Numunenin Donma-Çözölmeye Maruz Kalmadan Önceki Dinamik Elastisite Modülü
$E_{dn}$	Betonun Dinamik Elastisite Modülü (MPa),
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Demir Iı Oksit
$\text{K}_2\text{O}$	Potasyum Oksit
$L$	Numune Boyutu (mm),
$L_0$	Efektif Ölçüm Boyunu
$L_1$	Kür Havuzundan Çıkarıldıktan Sonra Başlangıç Ölçüm Değerini
m	Metre
$\text{MgO}$	Magnezyum Oksit
mm	Milimetre
$\text{Na}_2\text{O}$	Sodyum Oksit
$\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$	Alkaliler
nm	Nanometre
$S$	Numunenin Büzölme Yüzdesini
$\text{SiO}_2$	Silisyum Dioksit
sn	Saniye
$\text{SO}_3$	Kükürt Trioksit
$\text{SO}_3^-$	Sülfonat Bazlı
$t$	Ses Dalgasının Geçiş Süresi (m.sn)
$V$	Ses Hızı (km/sn)
$W$	Donma-Çözölme Direnci Hesabi
$c$	Ultrases Geçiş Hızı (km/sn)
$v$	Poisson Oranı
$\rho$	Sertleşmiş Betonun Yoğunluğu ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
ABD	Amerikan Birleşik Devleti
ACI	Amerikan Beton Enstitüsüne
ASTM	American Society for Testing Materials (Amerika Test Materyalleri Topluluğu)
BHA	Birim Hacim Ağırlık
BS	Brithish Standart
CEM	Çimento (Cement)
CEN	Standart Kum
CH	Kalsiyum Hidroksit
C-S-H	Kalsiyum Silikat Hidrat
GK	Geçirimsizlik Sağlayan Kimyasal Katkısı
ITZ	Agrega-Hamur Ara Yüzeyi
K	Kontrol Karışım
K/B	Kum/Bağlayıcı
KM	Metakaolin İçeren Karışım
KU	Uçucu Kül İçeren Karışım
KUM	Uçucu Kül ve Metakaolin Beraber İçeren Karışım
KYB	Kendiliğinden Yerleşen Beton
LS	Modifiye Lignosülfonat Kökenli
MA	Mineral Admixture (Mineral Katkı)
MIP	Mercury Intrusion Porosimetry
MK	Metakaolin
MPa	Metrik Sistemin Basınç Birimi
MS	Melamin Sülfonat Polimeri Esaslı Sıvı
NS	Naftalin Sülfonat Esaslı Sıvı
OPC	Ordinary Portland Cement
PC	Modifiye Polikarboksilat Esaslı Polimer
PÇ	Portland Çimento
PKK	Pirinç Kabuğu Külü
PMS	Polimelamin Sülfonat
PNS	Polinaftalin Sülfonat
PRA	Permeability Reducing Admixture (Geçirgenlik Azaltıcı Katkı)
S/B	Su/Bağlayıcı
S/Ç	Su/Çimento Oranı
SA	Su Azaltıcı (Süper Akışkanlaştırıcı) Katkı
SD	Silis Dumanı
SEM	Scanning Electron Microscope
SEO	Su Emme Oranı
SG	Su Geçirimsizlik
TS EN	Türk Standartları, EN: Avrupa Normu
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
UK	Uçucu Kül
UPV	Ultrases Geçiş Hızı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Taramalı elektron mikroskop kullanılarak metakaolinin parçacık boyutu dağılımı .....	20
Şekil 2.2. Polimelamin sülfonatın kimyasal yapısı .....	24
Şekil 2.3. Polinaftalin sülfonatın kimyasal yapısı.....	25
Şekil 2.4. Elektrostatik ve fiziksel itki modelleri.....	27
Şekil 2.5. WRC katkılı çimento harçlarının kılcal ve toplam su emme değerleri.....	34
Şekil 2.6. LS katkılı çimento harçlarının kılcal ve toplam su emme değerleri .....	34
Şekil 2.7. WRC katkısının çimento harcının mekanik özelliklerine etkisi .....	35
Şekil 2.8. WRC katkısının beton bünyesine basınçlı yolla penetre olan su hacmine ve basınç dayanımına etkisi.....	36
Şekil 2.9. 14 günlük basınç dayanım sonuçları.....	37
Şekil 2.10. 14 günlük su emme oranları.....	38
Şekil 2.11. Geopolimer harç karışımlarının su emme oranı sonucu (%).....	40
Şekil 2.12. Geopolimer harç karışımlarının basınç dayanım oranı sonucu (%).....	40
Şekil 2.13. Beton karışımlarının farklı yaşlarda basınç dayanımları: (a) :0,5 S/Ç oranına sahip karışımlar, (b): 0,6 S/Ç oranına sahip karışımlar.....	42
Şekil 2.14. Karışımların su emme deney sonuçları.....	43
Şekil 2.15. %0,3 Kitin ve farklı dozajda PCM tipi katkı ilavesi ile elde edilen eğilme sonrası basınç dayanımı kaybı oranları .....	46
Şekil 2.16. %0,3 Kitin ve farklı dozajda MSM tipi katkı ilavesi ile elde edilen eğilme sonrası basınç dayanımı kaybı oranları .....	46
Şekil 2.17. %0,3 Kitin ve farklı dozajda NSM tipi katkı ilavesi ile elde edilen eğilme sonrası basınç dayanımı kaybı oranları .....	47
Şekil 3.1. Hamur karışımların üretiminde kullanılan mikser cihazı .....	59
Şekil 3.2. Harç karışımların mikser cihazında üretimi ile ilgili görünüm.....	61
Şekil 3.3. Hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süresi deneyi görünümü.....	63
Şekil 3.4. Taze betonda hava miktarı .....	64
Şekil 3.5. Hava ölçer cihazı ile ilgili görünüm .....	65
Şekil 3.6. Harç karışımlarının yayılma deneyi görünümü .....	66
Şekil 3.7. Basınç dayanımı ölçümü ile ilgili görünüm.....	67
Şekil 3.8. Ultrasonik ses geçiş hızı ile ilgili görünüm .....	69
Şekil 3.9. Donma-çözülme kabinine yerleştirilmiş numuneler görünümü .....	70
Şekil 3.10. Donma-çözülme cihazının ekran sayfasında görülen aşama ayarları .....	71
Şekil 3.11. Harç karışımlarının kuruma-büzülme rötresi ölçümü.....	72
Şekil 4.1. Hamur karışımlarının mineral katkı içeren Marsh-hunisi akış süreleri .....	75
Şekil 4.2. Hamur karışımlarının "PRA-A" isimli %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı ve mineral katkı içeren Marsh-hunisi akış süreleri.....	77
Şekil 4.3. Hamur karışımlarının "PRA-B" isimi %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı ve mineral katkı içeren Marsh-hunisi akış süreleri.....	79
Şekil 4.4. Hamur karışımlarının "PRA-C" isimli %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı ve mineral katkı içeren Marsh-hunisi akış süreleri.....	81
Şekil 4.5. Hamur karışımlarının mineral katkı içeren mini-çökme değerleri .....	82
Şekil 4.6. Hamur karışımlarının "PRA-A" isimli %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı ve mineral katkı içeren mini çökme değerleri .....	84

Şekil 4.7. Hamur karışımlarının "PRA-B" %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı ve mineral katkı içeren mini çökme değerleri.....	86
Şekil 4.8. Hamur karışımlarının "PRA-C" %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı ve mineral katkı içeren mini-çökme değerleri.....	87
Şekil 4.9. Harç karışımların hava içeriği miktarının yüzdesi.....	88
Şekil 4.10. Mineral katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı bağlı yayılma değişimi .....	91
Şekil 4.11. Kontrol ve %1 oranında "PRA-A" isimli geçirgenlik azaltıcı katkıyı içeren karışımların bağlı yayılma değeri.....	92
Şekil 4.12. Kontrol ve %1 oranında "PRA-B" isimli geçirgenlik azaltıcı katkıyı içeren karışımların bağlı yayılma değeri.....	93
Şekil 4.13. Kontrol ve %1 oranında "PRA-C" isimli geçirgenlik azaltıcı katkıyı içeren karışımların bağlı yayılma değeri.....	93
Şekil 4.14. Kontrol ve %2 oranında "PRA-A" isimli geçirgenlik azaltıcı katkıyı içeren karışımların bağlı yayılma değeri.....	96
Şekil 4.15. Kontrol ve %2 oranında "PRA-B" isimli geçirgenlik azaltıcı katkıyı içeren karışımların bağlı yayılma değeri.....	96
Şekil 4.16. Kontrol ve %2 oranında "PRA-C" isimli geçirgenlik azaltıcı katkıyı içeren karışımların bağlı yayılma değeri.....	97
Şekil 4.17. Harç karışımlarının 1, 3, 7, 28 ve 90-günlük basınç dayanım grafiği .....	101
Şekil 4.18. Harç karışımlarının 28 ve 90-günlük su emme oranları .....	105
Şekil 4.19. Harç karışımlarının kontrol ve mineral katkı içeren su emme oranı-basınç dayanımı arasındaki ilişki .....	106
Şekil 4.20. Harç karışımlarının kontrol ve geçirgenlik azaltıcı katkı içeren su emme oranı-basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	106
Şekil 4.21. Tüm numunelerin ultrases geçiş hızları ile basınç dayanımları arasındaki ilişki.....	109
Şekil 4.22. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 28 günlük kontrol, mineral katkılı ve geçirgenlik azaltıcı katkı içeren harç numunelerin ağırlık kaybı değişimi .....	110
Şekil 4.23. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol, mineral katkılı ve geçirgenlik azaltıcı katkı içeren harç numunelerin ağırlık kaybı değişimi .....	111
Şekil 4.24. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 28 günlük kontrol, mineral katkılı ve geçirgenlik azaltıcı katkı içeren harç numunelerin bağlı ağırlık kaybı değişimi .....	111
Şekil 4.25. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol, mineral katkılı ve geçirgenlik azaltıcı katkı içeren harç numunelerin bağlı ağırlık kaybı değişimi .....	112
Şekil 4.26. Mineral katkı içeren numunelerin donma-çözülme kaynaklı ağırlık kaybı ile su emme oranı arasında ilişki .....	114
Şekil 4.27. Geçirgenlik azaltıcı katkı içeren numunelerin donma-çözülme kaynaklı ağırlık kaybı ile su emme oranı arasında ilişki.....	114
Şekil 4.28. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 28 günlük kontrol ve mineral katkılı harç numunelerin ultrases geçiş hızı değişimi .....	115
Şekil 4.29. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol ve mineral katkılı harç numunelerin ultrases geçiş hızı değişimi .....	116

Şekil 4.30. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol ve geçirgenlik azaltıcı katkıli harç numunelerin ultrases geçiş hızı değişimi.....	118
Şekil 4.31. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 28 günlük kontrol ve mineral katkıli harç numunelerin dinamik elastisite modülün değişimi .....	120
Şekil 4.32. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol ve mineral katkıli harç numunelerin dinamik elastisite modülün değişimi .....	121
Şekil 4.33. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol ve geçirgenlik azaltıcı katkıli harç numunelerin dinamik elastisite modülün değişimi.....	121
Şekil 4.34. Mineral katkıli harç numunelerinin 28-günlük durabilite faktörü değerleri .....	123
Şekil 4.35. Mineral katkıli harç numunelerinin 90-günlük durabilite faktörü değerleri .....	123
Şekil 4.36. Geçirgenlik azaltıcı katkıli harç numunelerinin 90-günlük durabilite faktörü değerleri.....	124
Şekil 4.37. 28 günlük harç karışımlarının kuruma-büzülme değişimi .....	125
Şekil 4.38. 90 günlük harç karışımlarının kuruma-büzülme değişimi .....	126
Şekil 4.39. 28 günlük harç karışımlarının bağıl kuruma-büzülme değerleri.....	127
Şekil 4.40. 90 günlük harç karışımlarının bağıl kuruma-büzülme değerleri.....	127
Şekil 4.41. Harç karışımlarının 1, 3, 7, 28 ve 90-günlük basınç dayanım grafiği .....	131
Şekil 4.42. Harç karışımlarının 28 ve 90-günlük su emme oranları .....	132
Şekil 4.43. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 28 günlük kontrol, mineral katkıli ve geçirgenlik azaltıcı katkı içeren harç numunelerin ağırlık kaybı değişimi .....	134
Şekil 4.44. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol, mineral katkıli ve geçirgenlik azaltıcı katkı içeren harç numunelerin ağırlık kaybı değişimi .....	134
Şekil 4.45. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 28 günlük kontrol, mineral katkıli ve geçirgenlik azaltıcı katkı içeren harç numunelerin bağıl ağırlık kaybı değişimi .....	135
Şekil 4.46. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol, mineral katkıli ve geçirgenlik azaltıcı katkı içeren harç numunelerin bağıl ağırlık kaybı değişimi .....	135
Şekil 4.47. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkıli harç numunelerin ultrases geçiş hızı değişimi. 137	
Şekil 4.48. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkıli harç numunelerin dinamik elastisite modülün değişimi .....	137
Şekil 4.49. Mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkıli harç numunelerinin 90-günlük durabilite faktörü değerleri.....	138
Şekil 4.50. 28 günlük harç karışımlarının kuruma-büzülme değişimi .....	139
Şekil 4.51. 90 günlük harç karışımlarının kuruma-büzülme değişimi .....	140

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Portland çimentosunu oluşturan oksitler ve miktarları .....	7
Çizelge 2.2. Çimento türleri .....	8
Çizelge 2.3. Su geçirimsizlik katkıları için ek özellikler (eşit kıvamda veya eşit S/Ç oranında) .....	28
Çizelge 2.4. Su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkıları için ek özellikler(eşit kıvamda) .....	29
Çizelge 2.5. Yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı katkıları için ek özellikler (eşit kıvamda) .....	30
Çizelge 2.6. Yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı katkıları için ek özellikler (eşit su/çimento oranında).....	30
Çizelge 2.7. Harç karışımları ve özellikleri .....	33
Çizelge 2.8. WRC katkılı betonların karışım oranları ve taze beton özellikleri .....	33
Çizelge 2.9. Üretilen kontrol ve katkılı betonların, 1 m <sup>3</sup> içindeki malzeme miktarları ve taze beton özellikleri .....	37
Çizelge 2.10. Çalışmada üretilen geopolimer harçların karışım oranı.....	39
Çizelge 2.11. 1 m <sup>3</sup> beton üretiminde kullanılan gerçek malzeme miktarları ve çökme değerleri .....	41
Çizelge 2.12. Üretilen harçların karışım oranları.....	45
Çizelge 3.1. Çimentonun kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	50
Çizelge 3.2. Standart kumun tane boyu dağılımı .....	51
Çizelge 3.3. Uçucu kül ve Metakaolin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri.....	51
Çizelge 3.4. Su azaltıcı katkıya ait özellikler .....	52
Çizelge 3.5. "PRA-A" isimli geçirgenlik azaltıcı katkıya ait kimyasal özellikler .....	53
Çizelge 3.6. "PRA-B" isimli geçirgenlik azaltıcı katkıya ait kimyasal özellikler.....	54
Çizelge 3.7. "PRA-C" isimli geçirgenlik azaltıcı katkıya ait kimyasal özellikler.....	55
Çizelge 3.8. Hamur karışımlarının üretiminde kullanılan kütlece malzeme miktarları (g) ve yayılma değerleri (mm).....	58
Çizelge 3.9. Harç karışımlarının üretimde kullanılan ağırlıkça malzeme oranı .....	62
Çizelge 3.10. Harç karışımlarının üretiminde kullanılan kütlece malzeme miktarları (g) ve yayılma değerleri (mm).....	62
Çizelge 4.1. Hamur karışımlarının mineral katkı içeren Marsh-hunisi akış süresi ve sıcaklık değerleri.....	75
Çizelge 4.2. Hamur karışımlarının "PRA-A" isimli %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı ve mineral katkı içeren Marsh-hunisi akış süresi ve sıcaklık değerleri .....	77
Çizelge 4.3. Hamur karışımlarının "PRA-B" isimli %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı ve mineral katkı içeren Marsh-hunisi akış süresi ve sıcaklık değerleri .....	78
Çizelge 4.4. Hamur karışımlarının "PRA-C" isimli %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı ve mineral katkı içeren Marsh-hunisi akış süresi ve sıcaklık değerleri .....	80
Çizelge 4.5. Hamur karışımlarının mineral katkı içeren mini-çökmesi ve sıcaklık değerleri .....	82
Çizelge 4.6. Hamur karışımlarının "PRA-A" isimli %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı ve mineral katkı içeren Mini-Çökmesi ve Sıcaklık değerleri .....	84
Çizelge 4.7. Hamur karışımlarının "PRA-B" %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı ve mineral katkı içeren mini-çökmesi ve sıcaklık değerleri.....	85

Çizelge 4.8. Hamur karışımlarının "PRA-C" %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı ve mineral katkı içeren Mini-Çökmesi ve Sıcaklık değerleri .....	87
Çizelge 4.9. Harç karışımlarının üretiminde kullanılan kütlece malzeme miktarları (g) ve yayılma miktarı (cm).....	89
Çizelge 4.10. Mineral katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma değerleri	90
Çizelge 4.11. %1 oranında farklı geçirgenlik azaltıcı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma değerleri ve 60 dk sonunda yayılma kaybının yüzdesi .....	95
Çizelge 4.12. %2 oranında farklı geçirgenlik azaltıcı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma değerleri ve 60 dk sonunda yayılma kaybının yüzdesi .....	95
Çizelge 4.13. Harç küp numunelerin basınç dayanımları (S/Ç:0,45) (50x50x50 mm <sup>3</sup> )	101
Çizelge 4.14. Harç karışımlarının su emme oranı.....	104
Çizelge 4.15. 28 günlük kontrol ve mineral katkılı numunelerin ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı sonuçları .....	107
Çizelge 4.16. 90 günlük kontrol, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkıları içeren numunelerin ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı sonuçları.....	107
Çizelge 4.17. Ultrases değerleri ile beton kalitesinin değerlendirilme kriterleri .....	108
Çizelge 4.18. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 28 günlük kontrol ve mineral katkılı harç numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri .....	115
Çizelge 4.19. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol ve mineral katkılı harç numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri .....	116
Çizelge 4.20. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol ve geçirgenlik azaltıcı katkılı harç numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri.....	117
Çizelge 4.21. Harç küp numunelerin basınç dayanımları (S/Ç:0,45) (50x50x50 mm <sup>3</sup> )	131
Çizelge 4.22. Harç karışımlarının su emme oranı.....	132
Çizelge 4.23. 90 günlük kontrol, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkıları içeren numunelerin ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı sonuçları.....	133
Çizelge 4.24. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkılı harç numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri.....	136

## 1. GİRİŞ

Bilindiği gibi, yapı alanında en çok kullanılan malzemelerin başında beton gelmektedir. Betonarme yapıların ana malzemesi betondur. Beton çimento, iri agregata, ince agregata ve suyun belli oranlarda karıştırılması ile elde edilen ve ihtiyaç halinde kimyasal veya mineral katkı eklenmesiyle yeni özellikler kazandırılabilen yapı malzemesidir. Diğer yapı malzemelerine göre betonun yapılarda daha çok tercih edilmesinin ana nedenleri arasında bileşenlerinin ucuz, temininin kolay olması, bakım ve onarım maliyetlerinin diğer malzemelere oranla daha düşük olması, plastik formda imal edilebilmesi, dış çevre etkileri altında veya zararlı bir ortamda mekanik ve fiziksel performansının daha yüksek olması olarak gösterebilir.

Son yıllarda beton teknolojisindeki ilerleme ile üretilen betonların kalitesi ve performansı artmaktadır. Yüksek dayanımlı beton üretiminde kimyasal katkının kullanımı kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu sebeple günümüzde araştırmacılar beton karışımlarının hem taze hal, hem de sertleşmiş hal özelliklerini iyileştirmek amacıyla değişik çalışmalar yapmaktadır. Beton üreticileri ise çimento-katkı uyumsuzluğuna sebebiyet vermemek adına piyasada kullanılan çimentolarla en uyumlu olan katkıyı üretmek için birbirleri ile yarışmaktadır.

Beton karışımlarının geçirgenliğini azaltmak için değişik mekanizmalara sahip sıvı veya toz halinde su geçirimsizlik katkıları kullanılmaktadır. Söz konusu katkıların bazıları (geçirgenlik azaltıcı katkılar) beton bünyesine taze halde iken ilave edilir ve kapiler boşlukları doldurarak geçirimsizlik sağlar. Diğer bir kısmı ise (rutubet önleyici katkılar) beton bünyesine eklenebileceği gibi numune yüzeyine de sürülebilir. Bu katkıların çalışma prensibi betona su itici özellik kazandırmak suretiyle geçirimsizlik sağlamaktır (Roger Rixom 1999).

Betonun uzun seneler boyunca kimyasal ve fiziksel etkenlere karşı boyutsal kararlılığını, dayanımını ve sahip olduğu özelliklerini korumasına “durabilite” denir. Bu etkiler aşınma, kristalleşme, tuz etkisi, asit, alkali-agregata reaksiyonu gibi kimyasal etkiler ya da donma-çözülme gibi fiziksel etkiler de olabilir (Akman 1992 ve Uyan 2003).

Servis ömrü yüksek bir beton üretiminde ihtiyaç duyulan en önemli parametre betonun boşluk oranının az olmasıdır (Uyan 2003). Betonun boşluk yapısı ve oranı doğrudan



olarak betonun geçirimliliğiyle alakalıdır. Beton geçirgenliğinin fazla olması sebebiyle beton bünyesine zararlı maddeler girebilir. Örneğin sülfat saldırısında, sülfatlı sular beton boşluklarında betona nüfuz ederek zarar verici birtakım kimyasal reaksiyonlara sebep olur (Akman 1989 ve Young 1998).

Beton bünyesindeki rutubet hareketinin çalışma mekanizmasını iyi anlamak gerekir. Betonda akışkan hareketi üç şekilde oluşur. Bunlar;

- (i) Boşlukların tamamen suyla dolu olduğu durumdur. Bu durumda su basıncı etkisiyle doymuş akım oluşur,
- (ii) Boşlukların kısmen suyla dolu olduğu durumda ise, yüzey gerilim kuvvetleri oluşur ve doymamış akım (kılcallık) ortaya çıkar.
- (iii) Son durum ise buhar basıncı farkından ötürü ortaya çıkan su buharı akımıdır (Uyan 1975, Kocataşkın 1995, Uyan 1988, Nevill 1995 ve Kocataşkın 1957).

Beton katkı maddeleri, beton üretiminde karıştırma işlemi öncesi belirli oranlarda karışıma eklenen organik veya inorganik esaslı malzemelerdir (Topçu ve ark 2004). Bilindiği gibi beton katkı maddeleri, mineral ve kimyasal katkı maddeleri olarak ikiye ayrılmaktadır.

Betonun sülfata, asite, karbonatlaşmaya, donatı korozyonuna, donma-çözölmeye ve alkali silika reaksiyonu direnci, önemli derecede geçirgenliğine bağlıdır. (Mehta 2006 ve Cem Concr Compos 2013). Bu yüzden betonun geçirgenlik ve difüzivite katsayısı, beton yapısının servis ömrünü etkileyen en önemli etkenlerdir. (Mehta 2006 ve Cem Concr Compos 2001). Difüzivite, betondaki iyonların rutubetin yüksek yoğunluklu bölgesinden düşük yoğunluklu bölgesine geçişi olarak ifade edilmektedir. (Mehta 2006, Li 2011 ve Neville 2010).

Beton geçirgenliği, kapiler boşluk oranı ve söz konusu bu boşlukların birbirinden bağımsız olup olmamasına göre değişmektedir (Mehta 2006). Karışım oranı, agrega-hamur ara yüzeyi (ITZ), agrega geçirgenliği, kür koşulları gibi parametreler beton geçirgenliğini etkilemektedir. Ayrıca ortam sıcaklığı ve nem farklılıklarından ötürü oluşan rötre çatlakları da betonun geçirgenliğini büyük oranda etkilemektedir. (Mehta 2006, Shi 2004, Choinska 2007 ve Gardner 2005).

Mineral ve kimyasal katkı kullanmak beton geçirgenliğini azaltmak için tercih edilebilir. Mineral katkıları daha ince olduklarından ve puzolanik reaksiyon gösterdiklerinden dolayı betonda çimento yerine veya filler olarak kullanıldığında, kapiler boşlukları azaltarak ve agrega-hamur ara yüzeyini (ITZ) iyileştirerek, beton geçirgenliğini iyileştirmektedir (Asbridge 2001, Valipour 2013 ve Gruber 2001).

Kimyasal ve mineral katkıların, betonun geçirgenlik özellikleri üzerindeki etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Yapılan bir çalışmada (Uysal 2012),  $550 \text{ kg/m}^3$  çimento içeren ve mineral katkı içermeyen kontrol karışımına ilaveten, farklı oranlarda uçucu kül, cüruf, kireçtaşı tozu, bazalt tozu ve mermer tozu çimento yerine kullanılarak kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımları hazırlanmıştır. Yazarlar, %60 cüruf ve %40 portland çimentosu içeren karışımın geçirimsizlik açısından en iyi performansa sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

### ***Amaç, konu ve kapsam***

İnşaat sektörü ihtiyaçlar bakımından sürekli olarak yenilenme ve değişme sürecindedir. Kısıtlı kaynaklar ve artan maliyetler karşısında ihtiyaçların karşılanabilmesi için yeni yöntem ve kaynakların araştırılması gerekmektedir. Bu nedenle mevcut hammaddelerin rasyonel bir şekilde kullanımı önem taşımaktadır.

Yapılarda beklenen en önemli özellikler; dayanım, dayanıklılık, ekonomi, işlevsellik ve estetikdir. Bu faktörler birbirleriyle ilişkili olup bu hususların sağlanması ile mühendislik açısından eksiksiz bir çözümden bahsedilebilir. Fakat yakın tarihe kadar dünyada da olduğu gibi ülkemizde de dayanıklılık (durabilite) kavramına yeterince önem verilmemiştir. Ülkemizde yaşanan depremler, doğal afetler, çevresel etkilerden dolayı betonda oluşan büyük zararlar gibi hususlar sonrasında ancak dayanıklılık veya performans kavramı hatırlanmıştır.

Yapıda performans için gerekli olan yüksek dayanım tek faktör olarak görülemez. Dayanımın yanında dayanıklılık da önem arz etmektedir. Dayanıklılığı iyileştirmede çoğunlukla başvurulan yöntemlerden biri uçucu kül (UK), silis dumanı (SD), yüksek fırın cürufu (YFC) gibi endüstriyel mineral atıklar veya puzolan gibi doğal malzemeleri çimento ile ikame veya çimentoya ek olarak beton üretiminde kullanmaktır. Bu tür mineral katkıları çimentoya nazaran ince öğütüldükleri için betonun geçirimsizliğini oldukça düşürmektedir. Dış ortamda mevcut sülfat, klorür gibi zararlı maddelerin geçirimsiz betona girişi zorlaşacağı için betonarme yapıların performansları/dayanıklılıkları iyileşmiş olur. Betonda bu anlamda sağlanacak iyileşme yapıların ömrünü uzatır.

Günümüzde beton geçirgenliğini azaltmak ve durabilite performansını iyileştirmek için mineral katkı kullanımının yanında bazı çeşitli kimyasal katkılarda kullanılmaktadır. Bunlara geçirgenlik azaltıcı, korozyon engelleyici, kuruma-büzülme engelleyici ve yüzeyi sertleştirici gibi katkıları örnek verilebilir.

Bu çalışmada, farklı mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkı kullanımının çimentolu sistemlerin taze ve sertleşmiş hal özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, farklı çimento hamuru ve harç karışımları hazırlanmıştır. Tüm karışımlarda CEM I 42.5R tipi çimentosu kullanılmıştır. Çalışma 3 farklı aşamadan oluşmaktadır;

**Birinci** aşamada, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkı kullanımının çimento-su azaltıcı katkı uyumuna etkisini araştırmak amacı ile iki farklı seri hamur ve harç karışımı üretilmiştir. Birinci seride, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkı içermeyen kontrol (K) karışımına ilaveten çimento ağırlığının belli bir yüzdesi yerine uçucu kül (UK) ve metakaolin (MK) ikame edilerek tekli, ikili ve üçlü bağlayıcı sistemine sahip toplamda dörder adet hamur ve harç karışımı üretilmiştir. İkinci seride ise birinci seride üretilen toplamda dört adet kontrol ve mineral katkılı karışıma çimento ağırlığının %1 ve %2'si oranında değişik etki mekanizmasına sahip iki farklı fabrika ürünü olan üç adet geçirgenlik azaltıcı katkı ilave edilecek toplamda 24 adet harç karışımı üretilmiştir. Ancak, bu seri kapsamında üretilen hamur karışımlarında geçirgenlik azaltıcı katkı çimento ağırlığının %2'si olarak tek oranda karışıma ilave edilerek toplamda 12 adet hamur karışımı hazırlanmıştır. Bu aşamada üretilen hamur karışımlarında Marsh-hunisi akış süresi ve mini çökme davranışları irdelenmiştir. Harç karışımlarında ise hava içeriği ve zamana bağlı yayılma performansı kıyaslanmıştır.

Çalışmanın **ikinci** aşamasında mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkı kullanımının harç karışımlarının sertleşmiş hal özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, iki farklı seri harç karışımı üretilmiştir. Birinci seride kontrol (K) karışımına ilaveten çimento ağırlığının belli bir yüzdesi yerine uçucu kül (UK) ve metakaolin (MK) ikame edilerek tekli, ikili ve üçlü bağlayıcı sistemine sahip toplamda dört adet harç karışımı hazırlanmıştır. İkinci seride ise kontrol karışımına çimento ağırlığının %1 ve %2'si oranında değişik etki mekanizmasına sahip üç adet geçirgenlik azaltıcı katkı ilave edilerek toplamda altı farklı geçirgenlik azaltıcı katkı içeren mineral katkı içermeyen harç karışımı üretilmiştir. Üretilen harç karışımlarının 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı, 28 ve 90 günlük su emme, 28 ve 90 günlük donma-çözülme direnci ile ultrases geçiş hızı deneyi ve 28 ve 90 günlük kuruma-büzülme davranışı incelenmiştir. İkinci aşamanın sonunda sertleşmiş hal özellikleri açısından en iyi performansa sahip birer adet mineral katkı ve geçirgenlik azaltıcı katkı içeren toplamda 2 adet harç karışımı tespit edilmiştir.

Çalışmanın **üçüncü** aşamasında ise ikinci aşamada performans açısından en iyi olarak seçilen mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkı beraber kullanılarak hem mineral ve hem de geçirgenlik azaltıcı içeren üçlü bağlayıcı sisteme sahip harç karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan karışım üzerinde ikinci aşamada gerçekleşen tüm sertleşmiş hal özellikleri deneyleri tekrarlanmıştır. Böylece hem taze hal hem de sertleşmiş hal özellikleri açısından en üstün performansa sahip karışım tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen tüm hamur karışımlarında s/ç oranı 0,35 olarak sabit tutulmuştur. Harç karışımlarında ise s/ç oranı, kum/bağlayıcı oranı ve yayılma değerleri sırasıyla, 0,485, 2,75 ve  $270 \pm 20$  mm olarak sabit tutulmuştur. İstenilen yayılma değerini sağlamak için değişik oranda tek tip polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılmıştır.



## 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Çimentolu Sistemler

Portland çimentosu, kil ve kalkerin pişirilmeleriyle oluşan ve klinker dediğimiz malzemenin alçıtaşıyla öğütülmesiyle oluşmuş bir üründür. Portland çimentosu suyla reaksiyona girdiğinde bağlayıcılık özelliği elde etmekte ve sonrasında ise priz almaktadır. Toz halinde bulunan Portland çimentosunun tane boyutları 1– 200 mikron özgül ağırlığı ise 3,10–3,15 arasındadır. Portland çimentosu oksitleri, sembol ve içeriği Çizelge 2.1’de gösterilmiştir (Özkul ve ark. 1999).

**Çizelge 2.1.** Portland çimentosunu oluşturan oksitler ve miktarları (Özkul ve ark. 1999)

Oksit	Sembol	Çimento Kimyasına Göre Sembolü	Miktar (%)
Kireç	CaO	C	60-67
Silis	SiO <sub>2</sub>	S	17-25
Alümin	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	3-8
Demir Oksit	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	0,5-6
Kükürt Trioksit	SO <sub>3</sub>	S	1-3
Magnezyum Oksit	MgO	M	0,1-4
Alkaliler	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	N+K	0,2-1,3

Değişik amaçlara hizmet etmek üzere farklı oranlarda tras, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı vb. gibi mineral katkıları kullanılarak üretilen değişik çimento türleri mevcuttur. Üretilen beton karışımlarının hacim olarak en küçük bileşeni olan çimento; etken olarak ise en önemlisidir. Günümüzde en çok tercih edilen çimento tipleri, katkılı çimento, cürufu çimento, portland kompoze çimento ve sülfata dayanıklı çimento’dur. Çimentolar mukavemetlerine, kullanım alanlarına ve sahip oldukları minerallere göre sınıflandırılmaktadır. Çizelge 2.2’de Türkiye’de üretilen çimento türleri verilmiştir (Özkul ve ark. 1999).

**Çizelge 2.2.** Çimento türleri (Özkul ve ark. 1999)

1	Portland Çimentoları (PÇ 32.5, PÇ 42.5, PÇ 52.5)	TS 19
2	Beyaz Portland Çimentosu (BPCÇ 32.5 ve BPCÇ 42.5)	TS 21
3	Uçucu Küllü Çimento (UKÇ 32.5)	TS 640
4	Portland Cürüflu Çimento (PCCÇ/A, PCCÇ/B)	TS12139
5	Katkılı Çimento (KÇ 32.5)	TS10156
6	Traslı Çimento (TC 32.5)	TS 26
7	Kompoze Çimento (KZC/A, KZC/B)	TS12142
8	Portland Kompoze Çimento (PKÇ32.5,PKÇ42.5,PKÇ 52.5)	TS12143
9	Sülfata Dayanıklı Çimento (SDÇ 32.5)	TS10157
10	Yüksek Fırın Cürüflu Çimento (CÇ 32.5, CÇ 42.5)	TS 20
11	Harç Çimentosu (HC 16)	TS 22
12	Süper Sülfat Çimentosu (SSÇ 32.5)	TS 809
13	Erken Dayanımı Yüksek Çimento (EYÇ 52.5)	TS3646
14	Portland Kalkerli Çimento (PLÇ/A, PLÇ/B)	TS12140
15	Portland Silika Füme Çimento (PSFC)	TS12141
16	Puzolanik Çimento (PZÇ/A, PZÇ/B)	TS12144

Üretimi takiben ilk birkaç saatte plastik bir yapıda bulunan beton daha sonra prizini alıp sertleşmektedir. Bilindiği gibi betonun dayanımı zamanla artmaktadır. Bunun sebebi ise çimentonun hidrasyonudur. Sertleşmiş betonda meydana gelen rötne ve sünme deformasyonları, çimento hamurunun hacimsel değişikliğiyle alakalı olduğundan beton bünyesinde kullanılan çimento miktarı aynı zamanda betonun durabilitesini de önemli ölçüde değiştirecektir (Yavuz 2011).

#### *Uçucu küllü çimento*

Uçucu Küllü Çimento, klinker yerine bir miktar UK eklenerek daha, sonra belli miktarda alçı taşıyla beraber öğütülme işlemiyle elde edilir. TS 640 Standardına göre bu tip çimentonun ağırlıkça %10-%30'luk kısmını UK, kalan kısmını ise klinker oluşturmaktadır.

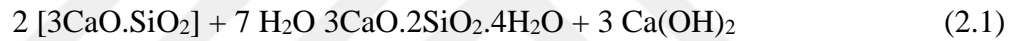
Çimentoyla su karıştırıldığında “hidratasyon” başlar ve devam eden kimyasal reaksiyonlar sonucu çimento hamurunda “priz” diye adlandırılan katılaşma meydana gelir. Belli bir süre geçtikten sonra çimento hamuru tamamen sertleşmiş olur. Priz tamamlanıncaya kadar çimentolu sistemler taze haldedir ve istenilen kalıbın şeklini alabilirler. Çimentonun hidratasyonu, kalsiyum silikatların hidratasyonu (C<sub>2</sub>S ve C<sub>3</sub>S), trikalsiyum aluminatın hidratasyonu (C<sub>3</sub>A) ve tetrakalsiyum alumino ferritin hidratasyonu (C<sub>4</sub>AF) olmak üzere farklı gruplarda incelenmektedir.

### *Hidratasyon reaksiyonları*

Çimentoyu oluşturan bileşenlerin hidratasyon reaksiyonları 4 ana başlıkta incelenmiştir.

#### 1) Trikalsiyum silikat

Trikalsiyum silikat (C<sub>3</sub>S) ve dikalsiyum silikat (C<sub>2</sub>S) toplamda portland çimentosunun %75 - %80'ini oluşturur. C<sub>3</sub>S'in su ile reaksiyonu Denklem 2.1'de gösterilmektedir.



Denklem 1.1'deki kimyasal denklik çoğu zaman yaklaşık alınmaktadır, bunun sebebi olarak oluşan C-S-H (3CaO.2SiO<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O) miktarının zor tayin edilmesi gösterilmektedir. Yine benzer problemler Ca(OH)<sub>2</sub>'in (CH) miktar tayininde de yaşanmaktadır. C<sub>3</sub>S hidratasyonunda, C<sub>3</sub>S ve CH yapıları X Işını Diffraktometresiyle – XRD (X-Ray Diffraction) analiz edilmektedir. Ayrıca, CH için kimyasal ve termal metodlar da mevcuttur. Ancak, her bir metodun kısıtlamaları vardır (Ramachandran ve Beaudoin 2001).

### *Hidratasyon mekanizması*

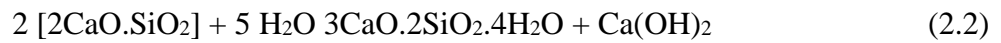
Çimento bileşenlerinin ayrı ayrı veya çimentonun bir bütün olarak hidratasyonu incelenirken, birçok tartışma ve görüş ayrılığı da beraberinde gelmiştir. İlk teoride, hidratasyon mekanizması Le Chatelier tarafından anhidrat bileşenlerin çözünmemesine bağlı çökmesi ile kristallenmiş hidrat bileşenlere kilitlenmesi olarak açıklanmıştır. Michaelis, kimyasal reaksiyonlar sonucu jel oluşumu ile kohezyon (birbirini tutma) mekanizmasını açıklamıştır (Taylor 1966). Son yıllarda ise topokimyasal veya katı faz mekanizması önerilmektedir (Ramachandran ve Beaudoin 2001).



Çimentonun en önemli bileşeni olan trikalsiyum silikatın hidrasyon mekanizması, yapılan birçok çalışmaya rağmen hala tam olarak açık değildir. İzotermal İletimli Kalorimetrik çalışmalarda mekanizmayla ilişkin beş basamak öne çıkmaktadır. C<sub>3</sub>S'in su ile karşılaştığı ilk basamakta 15-20 dakika içinde hızlı bir ısı yayılması olmaktadır. Bu basamak “ön indüksiyon basamağı (preinduction period)” olarak adlandırılmaktadır. Birkaç saat süren ikinci basamakta ise, reaksiyon hızı çok yavaştır ve “indüksiyon basamağı” olarak adlandırılmaktadır. Bu aşamaya gelen malzeme plastik ve işlenebilirdir. Daha sonra reaksiyonlar aktifleşerek zamanla hızlanan bir yapıya bürünür. Malzemenin ulaştığı maksimum hız, üçüncü basamak olan “hızlandırma basamağı (accelerating period)”nın sonlarına denk gelmektedir. Reaksiyon hızı güçlüyse başlangıç priz (initial set) oluşur. Bitiş priz ise, üçüncü basamağın tamamlanmasından önce meydana gelir. Dördüncü basamak yavaşlama basamağıdır. Reaksiyonların ilk iki basamağını anlamak, hidrasyonun ileriki aşamaları hakkında görüş vermesi açısından oldukça önemlidir. Kullanılan kimyasal ve mineral katkıları bu basamakların seyrini değiştirmektedir. Priz geciktirici katkıların (şeker, kalsiyum glukonat, sodyum heptonat vb.) indüksiyon basamağının süresini arttırdığı ve en yüksek hızın meydana geldiği tepe noktasını azalttığı ifade edilmektedir (Ramachandran 1995).

## 2) Dikalsiyum silikat

C<sub>2</sub>S hidrasyonu, C<sub>3</sub>S hidrasyonuna benziyor ancak henüz yavaştır. Netice çıkan reaksiyonlar verilen ısı trikalsiyum silikat karşılaştırıldığında çok azdır. Priz hızlandırıcı katkıları, C<sub>2</sub>S'in reaksiyon hızını çoğaltıyorlar.

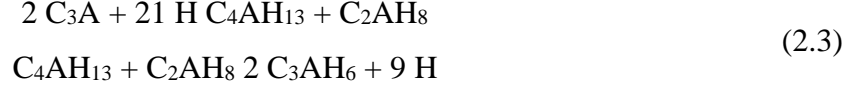


Denklemin 2.2'de gösterildiği gibi, trikalsiyum silikat, dikalsiyum silikata göre daha reaktiftir ve oluşan CH miktarı C<sub>3</sub>S'in hidrasyonunda ortaya çıkan ölçüden daha azdır (Ramachandran ve Beaudoin 2001).

## 3) Trikalsiyum alüminat

Portland çimentosu yaklaşık %4 - %11 aralığında trikalsiyum (C<sub>3</sub>A) içermektedir. Söz konusu bileşen çimentolu sistemlerin çok erken yaş davranışlarına oldukça etkilidir.

C<sub>3</sub>A'nın tepkimeleri sonucu oluşan kalsiyum aluminat hidratlar ile kalsiyum karbo- ve sülfo-aluminatlar çimento hamurunda ani priz oluşumuna sebebiyet vermektedir. Portland çimentosundaki C<sub>3</sub>A miktarının yüksek olması çimentolu sistemlerde kalıcılık açısından sorun oluşturabilmektedir.



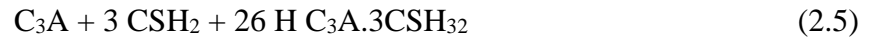
Denklem 2.3'te gösterildiği gibi, trikalsiyum aluminatın su ile reaksiyonu sonucu oluşan 4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.13H<sub>2</sub>O (C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub>) ve 2CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.8H<sub>2</sub>O (C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub>) bileşenleri hekzagonal fazdadır, bu komponentler termodinamik açıdan düzensiz olmalarından dolayı kübik fazlı C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> yapısına geçmektedir.

Doygun CH çözeltilerinde, C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub> ile CH reaksiyona girerek C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub> veya C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> komponentlerini meydana getirmektedir. Ayrıca, 80 °C ve üzeri sıcaklıklarda da C<sub>3</sub>A'nın hidratasyonu ile kübik formulu Denklem 2.4'te gösterildiği gibi C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> teşekkül ettirmektedir.



Bilindiği gibi çimentolu sistemlerin dayanımı üzerinde C<sub>3</sub>A fazının etkisi silikat fazlara göre daha azdır. C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> ürününün ortaya çıkması ile parçacıklar arasında bağlanma olması ile dayanım kazanımı sağlanmaktadır.

Portland çimentosuna C<sub>3</sub>A bileşeninden kaynaklanan ani çökmeyi engellemek için ortama alçıtaşı-CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O (CSH<sub>2</sub>) Denklem 2.5'te gösterildiği gibi eklenmektedir.



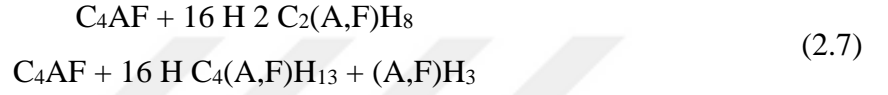
Ortamda bulunan tüm alçıtaşının etrinjite (C<sub>3</sub>A.3CSH<sub>32</sub>) dönüşmesinden sonra, artan C<sub>3</sub>A ile etrinjitin tepkimesiyle sülfo-aluminat hidratlar (C<sub>3</sub>A.CSH<sub>12</sub>) Denklem 2.6'da gösterildiği gibi oluşmaktadır. Çimentodaki bu ekzotermik dönüşüm 12-36 saat sürmektedir (Ramachandran ve Beaudoin 2001).



Etrinjit, AFt ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-tri}$ ; Alumina, Ferric oxide, tri-sulfate) fazı olarak bilinen grubun bir üyesidir. Monosülfat ( $\text{C}_3\text{A.CSH}_{12}$ ) ise, AFm ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-mono}$ ; Alumina, Ferric oxide, mono-sulfate) olarak adlandırılan mineral grubundan birini temsil etmektedir.

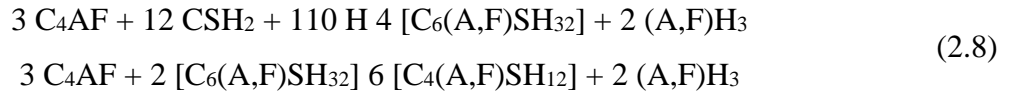
#### 4) Ferrit fazı

Ferrit faz ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) bileşenleri, portland çimentosunda % 8-13 oranında bulunmaktadır. Söz konusu bu faz hidrasyon ve fiziko-mekanik davranış açısından etkin bir rol oynamamaktadır.



Tetrakalsiyum alumino ferritin ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) hidrasyon reaksiyonları yavaştır. Demir ve alüminyum amorf hidroksitleri,  $\text{C}_4\text{AF}$ 'in reaksiyonları sonucu Denklem 2.7'de görüldüğü gibi oluşmaktadır (Ramachandran ve Beaudoin 2001).

Alçıtaşının varlığında  $\text{C}_4\text{AF}$  reaksiyonları  $\text{C}_3\text{A}$ 'a göre daha yavaştır ve hidrasyon daha etkin gecikmektedir. Alçıtaşının tetrakalsiyum alumino ferrit ile reaksiyonları Denklem 2.8'de belirtilmektedir (Young 1981).



Düşük sülfat-alüminat faz ile tetrakalsiyum alumino ferritin reaksiyonu sonucu, yüksek sülfat-alüminat faz oluşmaktadır. Düşük su/çimento oranlarında ve yüksek sıcaklıklarda düşük sülfat-alüminatlar doğrudan meydana gelmektedir (Ramachandran ve Beaudoin 1980).

### 2.1.1. Hamur karışımı

Çimento hamurunun mikro yapısal özelliklerinin incelenmesi reolojik özellikleri ve mekanik özellikleri kadar önemlidir. Katılaşmış çimento hamuru mikro yapısı, çeşitli katı bileşenleri, farklı boyut ve şekillerdeki gözenekleri ile sulu heterojen bir sistemdir. Zayıf bir kristal yapıya sahip, bileşim ve şekil açısından farklılıklar gösteren C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) jelleri çimento hamurundaki katı hacmin büyük bir çoğunluğunu oluşturmaktadır. Diğer bir hidratasyon ürünü olan kalsiyum hidroksit (CH) ise kristal yapıda ve hamur bileşiminde diğer hidratasyon ürünlerine nispeten saf olarak yer almaktadır. Bilindiği gibi çimento hamuru ürünlerinde Aft ( $Al_2O_3-Fe_2O_3$ -tri) ve AFm ( $Al_2O_3-Fe_2O_3$ -mono) fazları (etrijit ve monosülfat) gibi bileşikler de az miktarda bulunmaktadır.

Çimento hamurunun gözenek yapısı malzeme özelliklerini önemli oranda etkileyen bir faktördür. Gözenek yapısı, “Civa Giriş Porozimetresi - Mercury Intrusion Porosimetry (MIP)” gibi dolaylı yöntemlerle belirleneceği gibi, “Taramalı Elektron Mikroskopu – Scanning Electron Microscope (SEM)” ile direkt olarak tespit edilebilmektedir. Gözenek yapısının direkt olarak incelendiği mikroskopik yöntemin dolaylı yöntemlere göre belirgin avantajları bulunmaktadır. Mikroskop ile alınan fotoğraflar, mikro yapıdaki farklı fazların şekil ve boyutları hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır.

Katılaşmış çimento hamurunda gözenekler boyut açısından iki farklı grupta incelenebilmektedir. İlki, C-S-H jel yapısındaki karakteristik çapı 10 nm’den küçük olan jel gözeneklerdir. Diğeri ise, 10 nm ile 10  $\mu$ m aralığındaki geniş kapiler gözenekleri içermektedir. Bu gözeneklerin, yapıdaki hidratasyon ürünlerinin dolduramadığı ancak su ile dolan boşluklardan veya başlangıçta çimento taneciklerinin yer aldığı alanlarda hidratasyonun ardından oluşan oyuklu kabuklardan meydana geldiği düşünülmektedir. Ayrıca, tesadüfen veya tasarlanarak hapsolan hava boşlukları ve çimento hamurunun iyi yerleştirilmemesinden meydana gelen büyük boşluklar da olabilmektedir (Wang 1995). Çimento hamurundaki gözenekleri oluşturan jel yapısı klasik Euclide geometrisi ile açıklanamamaktadır. Literatürde bu yapıların fraktal boyut kavramı ile yorumlanması gerekliliği birçok yayında bahsedilmiştir. Fraktal boyutlar “çevresel fraktal boyut- $D_c$ ”, “yüzeysel fraktal boyut- $D_y$ ” ve “kütleli fraktal boyut- $D_k$ ” olmak üzere çeşitli başlıklarda incelenmektedir.

### *Agrega-hamur arayüzeyi (ITZ)*

Literatüre göre, çimento hamuru dayanımı, iri agrega dayanımı ve Agreg-Hamur Arayüzeyi (ITZ) ile açıklanmaktadır. Betonun kalitesi gibi parametreler beton dayanımını etkileyen başlıca faktörlerdir. Bilindiği gibi, tüm araştırmacıların ortak fikri ise betonun mekanik davranışında büyük pay sahibi olan ITZ'nin zayıf ve hassas bir bağ olduğudur (Shah 1994).

Çimento hamuru-agrega arayüzeyi, agrega şekli, yüzey dokusu ya da s/ç oranı gibi faktörlerden doğrudan olarak etkilenmektedir. Betonun dayanımını doğrudan etkileyen bu faktörler, 2 başlıkta aşağıdaki sıralama açıklanmıştır.

### *Agrega şekli ve yüzey dokusu*

Son yıllara dek, agrega şekli ve yüzey dokusu, arayüzey dayanımını en çok etkileyen faktör olarak bilinirdi. Günümüzde ise mikroskobik analizler ile agrega-hamur arayüzeyinin incelenmesi sonucu söz konusu bu etkinin tek başına çok etkili olmadığı ve beton dayanımını etkileyen diğer parametrelerle beraber değerlendirilmesi gerektiği anlaşılmıştır.

Agrega özelliklerinin beton dayanımında en etkili parametre olan su/çimento oranı kadar etkili olduğunu ifade etmiştir. Agreg yüzey dokusu ve şeklinin ITZ'yi büyük oranda arttırdığı, pürüzsüz agregalı betonlara göre yüzeyi pürüzlü agrega kullanılması halinde betonun eğilme ve çekme dayanımlarında yaklaşık %30 artış olabileceği ifade edilmektedir (Mindess 1986).

Agrega-hamur aderansını olumlu etkileyen tane şekli ve yüzey dokusu betonun bazı özelliklerini ise olumsuz yönde etkileyebilir. Su/çimento oranı, çimento dozajı, işlenebilirlik, geçirgenlik, durabilite gibi bazı beton özellikleri olumsuz etkilenebilir. Beton boşluk yapısının donma-çözülme, geçirgenlik, düşük dayanım vs. gibi özellikleri etkilediği bilindiğinden agrega seçimi yapılırken tane şekli ve yüzey dokusuna dikkat edilmelidir. Agreg yüzey pürüzlülüğü aderansı artırırken işlenebilirlik için ihtiyaç duyulan su miktarını da arttırarak su/çimento oranını yükseltecektir.

### *Su/çimento oranının etkisi*

Su/çimento oranı çimentolu sistemlerin tüm özelliklerini etkileyen en önemli faktördür. Betonun dayanımı ve durabilitesi söz konusu bu orandan en çok etkilenen özellikleridir. Su/Çimento oranının artması ile betonda boşluk hacmi artacağında zayıf bir yapıya sahip olacaktır. Betonda terleme olayı'nda betonun boşluk yapısını değiştirerek dış boşluklu agrega-hamur ara yüzeyinin oluşmasına neden olur. Böylece dayanıma olumsuz yönde etkiler (Uchikawa 1989).

Betonun su/çimento oranı ITZ bağ kuvvetini basınç dayanımından daha çok etkilediği ve su/çimento oranının çok yüksek olması durumunda betonda daha köşeli veya pürüzlü agrega kullanılsa bile ITZ bağ kuvvetinde herhangi bir artış meydana gelmeyeceği Oktar (1977) ve Mindess (1986) tarafından bildirilmiştir.

Bilindiği gibi, su/çimento oranının artması sonucu agregayı çevreleyen çimento hamurunun boşluk oranı da artar. Bunun sonucunda ise ITZ dayanımı dolayısıyla beton dayanımı azalır.

Su/çimento oranı düşük oldan durumda ise hamur fazının elastisite modülü artar. Meydana gelen söz konusu bu değişim ITZ'de oluşan gerilmeleri azaltır.

### **2.1.2. Harç karışımı**

Çimento hamuruna ince agrega ilave edilmesiyle oluşan malzemeye ya da başka bir ifadeyle iri agrega içermeyen betona “harç” denilmektedir. Duvar örülmesi esnasında tuğla, gaz beton gibi malzemelerin birbirine bağlanmasında veyahut sıva işlerinde kullanılır. Bünyesinde bulunan kalsiyum hidroksitin hava ile temas etmesi sonucu sert bir katman olan kalsiyum karbonat ortaya çıkar. Harcın ana görevleri, yapıda oluşan yüklerin düzgün dağılmasını sağlamak ve yapı cephesini oluşturan duvar parçaları arasındaki boşluğu kapatarak kötü hava şartlarına karşı yaşanılabilir alanlar oluşturmaktır.

## **2.2. Katkılar**

Betona daha üstün özellikler katmak amacıyla karışıma eklenen maddelere katkı denilmektedir. Beton katkı maddeleri kimyasal ve mineral katkılar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Kimyasal katkılar; su azaltıcı, priz geciktirici ve hızlandırıcı, antifriz, hava sürükleyici ve su geçirimsizlik gibi katkılarıdır. Kimyasal katkılar genelde betonun mekanik ve durabilite özelliklerini olumlu yönde etkilediğinden dolayı betonarma yapılarda betonun ana bileşeni gibi olmuştur. Mineral katkılar ise metakoalin (MK), uçucu kül (UK) ve silis dumanı (SD) gibi değişik boyutlarda tane yapısına sahip ve betonda farklı etkiler meydana getiren katkılarıdır.

### **2.2.1. Mineral katkılar**

Genel anlamda, mineral katkıların betonda durabiliteyi arttırıcı işlevlerinin en başında, betonun boşluk yapısını düzenlemeleri ve dolayısı ile kılcal geçirimliliği azaltmaları gelmektedir. Betonun bir fiziksel özelliği olarak bahsedilebilen kılcallık veya geçirimlilik, dayanıklılığının önemli bir belirleyicisidir. Betonda geçirimlilik, bağlayıcı oranı, su muhtevası, agrega gradasyonu ve kür koşulları gibi etkenlere bağlıdır (Uyan vd 1998).

Yüksek dayanım veya yüksek dayanıklılığı ile yüksek performanslı beton sınıfına giren betonlar gün geçtikçe normal beton ile yer değiştirmektedir (Chan 2000). Ekonomik, teknik ve çevresel nedenlerden dolayı betonda kullanılan mineral katkı maddeleri modern beton yapılarında çok sık kullanılır hale gelmiştir. Betonun dayanımını iyileştirmede, basınç dayanımı, boşluk büyüklüğü ve dağılımı ile betonun dayanıklılığı üzerine standart kür koşulları dikkate alınarak birçok çalışma ortaya konulmuştur (Haque 1989). Ayrıca 20. yy. boyunca çimento ve beton endüstrisinde mineral katkı kullanımı artış göstermiştir. Bu artışın devam etmesi beklenmektedir. Çimento ve betona olan ihtiyaç fazlalığı nedeniyle betonda farklı malzemelerin çimento ile ikame edilerek kullanımı gitgide artış göstermektedir (Türkmen 2003).

ASTM C 615 (1991) standardına göre kendi başına bağlayıcı özelliği çok az olan ya da hiç olmayan fakat sonradan bağlayıcı özelliği kazanabilen silisli ve alüminli malzemelere puzolan denir. Puzolanların betonda kullanılması ile betonun boşluk yapısı ve geçirimsizliğinde azalma olmaktadır. Bu da betonun dayanıklılık özelliklerini geliştirmektedir. Geçirimsizlik için önemli parametrelerden biri olan agrega-çimento ara yüzeyini iyileştirmek ve çimento hamurunda bulunan boşluk oranını azaltmak için UK, SD ve YFC gibi puzolanlar kullanılmaktadır (ASTM C 618, 1991).

Geleneksel beton içinde kullanılan malzemelerin en maliyetlisi Portland çimentosudur. Buna rağmen mineral katkıların çoğu daha az enerji gerektiren endüstriyel ve doğal ürünlerdir. Portland çimentosunun bu katkılarla yer değiştirmesi ile önemli bir tasarruf elde edilir. Ayrıca Portland çimentosu üretimi sırasında çevreye büyük miktarda zararlı gazlar salınmaktadır. Puzolanların yaygın olarak kullanımına gerekçe oluşturan ikinci faktör budur (Vu 2002).

İyi bir işlenebilirlik yüksek kalitede beton üretmek için önemli bir özelliktir. Çünkü işlenebilirliği kötü olan bir betonun dayanım ve dayanıklılık özellikleri de kötü olmaktadır. Buna rağmen uygulamada genellikle beton sevkiyatı uzun mesafede olduğu durumlarda çökme kaybı göz ardı edilmektedir. Betonda mineral katkı kullanım oranının artmasıyla çökme kaybında azalma görülebilir (Erdoğan 2011).

Puzolanik malzemelerin yeterli bağlayıcılık özelliği göstermesi için aşağıda verilen şartları sağlamış olması gerekmektedir (Yavuz 2011):

- Çimentolu sistemlerde kullanılacak puzolanlarda  $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$  miktarının en az %70 olması gerekmektedir.
- Mevcut haliyle çok ince taneli olmalı veya öğütülerek çimento İnceliği elde edilmiş olmalıdır.
- Amorf bir yapıya sahip olmalıdır. Puzolanlar oluşum şekillerine göre doğal ve yapay olmak üzere 2 şekilde sınıflandırılırlar (Mehta 1983, Massaza 1997, Erdoğan 2004):
- Doğal puzolanlar: Kalsine kil ve şist, volkanik cam, opalin ve silika, volkanik tüf
- Yapay puzolanlar: Uçucu kül, pirinç kabuğu külü, silis dumanı, yüksek fırın cürufu.



## *Uçucu kül*

Dünyada enerji ihtiyacının artmasıyla beraber hidroelektrik ve termik santral sayısı da artmıştır. Kömüre dayalı termik santraller kül üretiminin de artmasına neden olmuştur. Bu küllerin çevre kirliliğine neden olmaması için elektrostatik ya da filtre torbaları yardımı ile toplanması gerekmektedir. Uçucu kül (UK), söz konusu bu güç santrallerindeki bacadan uçup gitmeye çalışan küllere denir. Endüstriyel atık ya da yan ürün olarak da bilinirler (Tokyay ve ark. 1998, Atış 2000).

UK'ün ana bileşenleri  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  ve  $FeO_3$ 'tür. UK'ler ayrıca belli miktarda  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $SO_3$  ve yanmamış karbon içerirler (Özturan 1991; Türker ve ark 2003). Beton karışımlara ilave edilen mineral katkıları her ne kadar portland çimentosuyla benzerlik gösterse de birçoğu kendi başlarına bağlayıcılık özelliğine sahip değildirler. Mineral katkıları puzolanik aktiviteye sahip olması nedeniyle hamur yapısını değiştirirler. Sahip oldukları yüksek puzolanik özellik ve incelik sayesinde betonun boşluk yapısını iyileştirerek çimento hamurunun daha yoğun olmasını, ITZ'ndeki bağ dayanımının artmasını ve betonun daha yüksek dayanımlara sahip olmasını sağlarlar (Özturan 1991).

Beton üretiminde çimento yerine kısmen uçucu kül kullanılabilen ve böylece UK katkılı beton elde edilebilmektedir. Bazı durumlarda ise betondaki ince agrega yerine de UK kullanılabilir (Alataş 1996).

Son yıllarda, silindire sıkıştırılabilen beton karışımlarında UK kullanımıyla yol kaplaması yapılmaktadır. Yol kaplaması yapımında UK kullanımı ekonomiklik sağlamak ve betonun bazı özelliklerini iyileştirmektedir. Örneğin ülkemizde UK kullanılarak Afyon'daki şehirlerarası 15 km uzunluğundaki beton yol inşa edilmiştir. UK'ün daha yaygın kullanımı aynı zamanda böyle bir atık malzemenin depolanması gibi bir zorunluluğu da ortadan kaldırmaktadır (Atış 2000).

Ayrıca, dayanıklı hafif agrega üretiminde de UK kullanılmaktadır. UK'ün kullanım alanları arasında; beton ve asfalt yollar, yol temel tabakaları, zemin stabilizasyonu, endüstriyel seramik ve refrakterlerin, boyaların üretimi gibi alanlar sayılabilir. Dünyada UK kullanım miktarının artması, özellikle baraj inşaatları esnasında kütle beton dökümünde ortaya çıkan hidratasyon ısısını azaltmak için olmuştur. ABD'de Hoover ve

Hungry Horse, ülkemizde ise Gökçekaya ve Porsuk barajları bunlara örnek verilebilir (Türker ve ark. 2003).

### ***Metakaolin***

Metakaolin (MK), puzolanik bir malzemedir ve kullanımı, Brezilya'daki Jupia Barajı için betona ilave edildiği tarih olan 1962'ye kadar uzanmaktadır. MK işlenmiş bir çeşit silika materyalidir ve 600 ile 850°C arasında değişen sıcaklıkta gerçekleşen kaolin kalsinasyonundan elde edilir (Shvarzman 2003, Bich 2009, Badogiannis 2005 ve Güneysi 2012). Çimento yerine kısmen kullanılabilen metakaolin, kaolinin kontrollü ısıl işlemi ile üretilen ve puzolanik özelliklere sahip olduğu bilinen bir mineral katkı maddesidir (Dunster 1993). MK, beton için faydalı bir katkı olarak önemli bir potansiyele sahiptir. Metakaolin çok reaktif bir puzolan olduğu için, betonun kalsiyum hidroksit içeriğini neredeyse tamamen ortadan kaldırılabılır. MK, klorürlerin penetrasyonuna, donma-çözülme, rötre, sülfat, asit ve aşınma direncine ve ASR genişmesinin baskılanmasına karşı bazı olumlu özellikler göstermektedir (Sims ve Bev Brown 2003).

(Batis ve ark. 2004), yaptığı bir çalışmaya göre, metakaolin'in basınç dayanımını arttırmış ve en iyi katkının karışımlarda %10 oranında metakaolin kullanılmasıyla elde edilmiştir. Metakaolin (MK) kullanımı %20'ye kadar harç numunelerinin korozyon davranışını iyileştirmiş ve %20'den daha yüksek oranlarda metakaolin kullanımı ise korozyon direncini azaltmıştır. Doğal bir malzeme olan kaolinin; kimyasal ve mineralojik bileşimleri, olduğu kayaya büyük ölçüde bağımlıdır (Baoumy and Ibrahim).

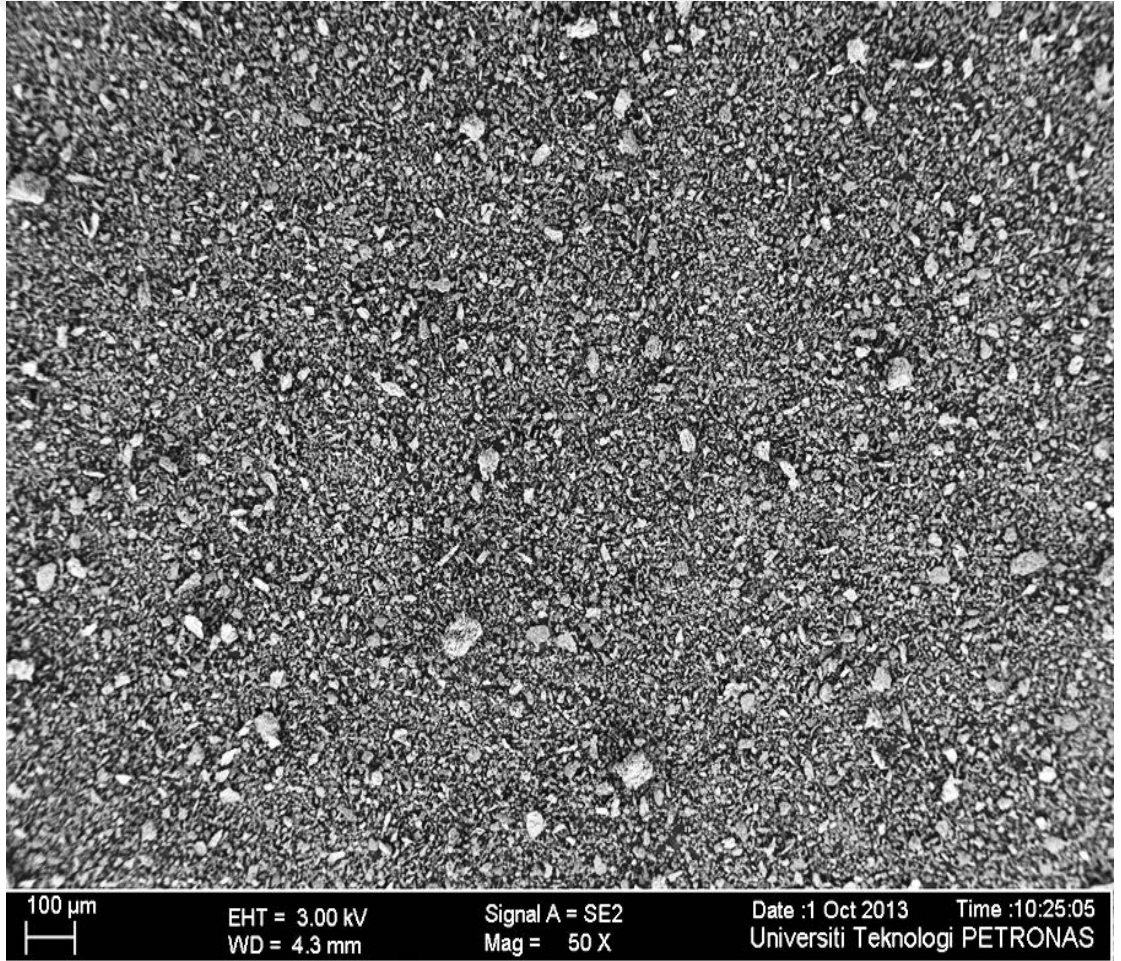
Kaolin, feldspatın doğal olarak ayrışmasıyla meydana gelen beyaz kilden oluşur ve esas olarak porselen üretiminde, kağıt ve tekstilde dolgu maddesi olarak ve ilaçlarda emici olarak kullanılır (Newman 2003).

Saad ve arkadaşları (1982), Larbi (1991), Halliwell (1992), ve Hewlett (2004) betonda MK kullanımının hiçbir dezavantajı olmadığını iddia etmişlerdir. 1996 yılında, (Wild ve ark) yaptığı bir çalışmada, MK ile uygun değer OPC değişiminin, ağırlıkça %20, olduğunu bulmuşlardır. Duan ve arkadaşları (2013), ise yüksek fırın cüruf, silis dumanı ve metakaolin kullanarak betonun gözenek yapısını ve arayüzey geçiş bölgesini (ITZ) incelemiş ve MK'nin betonun gözenek yapısı ve ITZ'ni güçlendirme üzerinde olumlu

etkileri olduğunu tespit etmişlerdir (Duan 2013).

Newman (2003) ve Ramlochan (2000) göre MK betonun yapışma gücünü artırır. Ancak, sabit birleşlenebilirlik için betonun su ihtiyacını arttırmaktadır. Artan su gereksinimi su azaltıcı katkı kullanılarak dengelenebilir (Newman 2003). SD ve MK kullanılması durumunda su ihtiyacının artmasının nedeni, inceliklerinin çok yüksek olmasına ilaveten her iki mineral katkı maddesinin de yüksek reaktiviteye sahip olması ve suyu çok erken tüketmesidir.

Taramalı elektron mikroskop kullanılarak Ullah-Khan (2014) tarafından elde edilen MK'nin parçacık boyutu dağılımı analiz sonucu Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.1.** Taramalı elektron mikroskop kullanılarak metakaolinin parçacık boyutu dağılımı (Ullah-Khan 2014)

### 2.2.2. Kimyasal katkılar

Günümüzde, artan nüfusun ve gelişen teknolojinin sonucu olarak sınırları zorlayan yapılar ve yapı elemanları için geleneksel yapı malzemeleri gerek maliyet gerekse performans özellikleri bakımından yetersiz kalmış ve araştırmacıları yeni nesil malzeme arayışlarına itmiştir. Bu araştırmalar yeni nesil bir malzeme olan katkıları öne çıkarmıştır.

Yapı elemanlarının durabilite ve dayanım özelliklerini iyileştiren bu katkı malzemelerinin önemli bir kısmını kimyasal katkılar oluşturmaktadır. Kimyasal katkıların çimentolu sistemlerin priz kontrolü, işlenebilirlik, dayanım ve durabilite gibi erken yaştaki ve nihai özellikleri üzerinde etkileri vardır (Mindess 2002). Kimyasal katkıların, çimentolu sistemlerin söz konusu bu özelliklerini geliştirebilmesi için çimento-katkı uyumuna dikkat edilmelidir. Aksi takdirde kullanılan kimyasal katkılar çimento esaslı yapı malzemelerini olumsuz etkileyecektir.

#### *Kimyasal katkıların tanımı*

Kimyasal katkılar genel olarak “çimentolu sistemlerin performansını arttırmak için beton ve harç bileşeni olarak karışıma eklenen bir madde” olarak tanımlanır. Günümüzde en çok tercih edilen kimyasal katkı ise süper akışkanlaştırıcılardır (Ramachandran 1995).

Beton karışımlarında agregalar beton hacminin %70–75’ini oluşturmasına rağmen, betonun en etkin fazını çimento hamuru olduğu bilinmektedir. Çimento hamuru beton özellikleri ve performansı üzerinde çok etkilidir. Bu yüzden, beton karışımlarında kullanılan kimyasal katkı malzemelerinin priz süresini düzenlemek, hava sürüklenme, su ihtiyacını azaltma, işlenebilmeyi artırma gibi yararlı etkileri, söz konusu katkıların çimento hamuru üzerindeki etkileri sonucunda ortaya çıkar (Ramachandran 1995).

#### *Kimyasal katkı tipleri*

Amerikan Beton Enstitüsüne (ACI) göre kimyasal katkılar 5 sınıfa ayrılır;

- hava sürükleyici katkılar
- hızlandırıcı katkılar
- akışkanlaştırıcı katkılar
- su azaltıcı, priz kontrol katkıları ve diğer katkılar.

Hava sürükleyici katkılar, çimento hamurunda mikroskobik ölçekte kabarcıklar oluşturarak işlenebilirliği ve donma direncini arttıran katkılardır. Söz konusu bu kabarcık sistemi birbirinden bağımsız boşluklardan oluşur ve betonda fiziksel olarak hapsolan hava boşluklarından farklıdır. Bağımsız hava boşluğu oluşturma işlemine, çimentolu sistemlerin donma ve çözülme döngüsüne maruz kaldığı durumlarda ihtiyaç duyulmaktadır (Ozturk 2009).

Kötü hava koşullarında priz süresini kısaltmak amacıyla, priz hızlandırıcıların kullanılması gereklidir. Priz ayarlayıcı katkılar, çimento hamuruna az miktarda katılır ve hidrasyon ürünleri üzerinde bir etkisi yoktur (Ramachandran 1995).

Priz hızlandırıcılar priz süresini kısaltmak ve erken yaş dayanımı arttırmak amacıyla kullanılır. Kloritler, flüoritler, karbonatlar, silikatlar, alüminatlar, boratlar, nitratlar gibi inorganik bileşenler priz hızlandırıcı katkılarda kullanılır. En çok tercih edilen hızlandırıcı katkılardan biri kalsiyum klorittir fakat prefabrike beton ya da nemli ortamlarda kullanılması uygun değildir (Ramachandran 1995).

Akışkanlaştırıcı katkılar ise su/çimento oranını azaltmak ve çimentolu sistemlerin işlenebilirliğini arttırmak amacıyla kullanılır (Collepari 1998). Günümüzdeki en yaygın akışkanlaştırıcı türü ise süper akışkanlaştırıcılardır.

Sülfonat melamin formaldehit ve sülfonat naftalin formaldehit türevleri en çok kullanılan süper akışkanlaştırıcılardır. Süper akışkanlaştırıcıların çimento hamuruna etkileri birçok araştırmacı için araştırma konusu olmuştur (Aitcin 1994 ve Hanehara 1999).

Bilindiği gibi, çimento inceliği betonda su ihtiyacını arttırmakta ve doğal olarak işlenebilirliği olumsuz yönde etkilemektedir. Beton karışımlarının ihtiyaç duyduğu süper akışkanlaştırıcı miktarı ise bu sebeple çimento inceliğine bağlıdır. Çimento inceliği arttıkça hedeflenen işlenebilirliği elde etmek için gerekli olan süper akışkanlaştırıcı dozajı da artacaktır (Hana 1989).

Çimento-katkı bileşen tipinin incelendiği bir çalışma sonucu, polikarboksilik tipi akışkanlaştırıcıların çimento ile daha uyumlu olacağı düşünülse de, uyumun çimentodaki alkali ve sülfat miktarı ile alakalı olduğu tespit edilmiştir (Hanehara 1999).

Priz geciktirici katkılar ise hızlandırıcıların tersine priz süresini uzatıp işlenebilirliği artırır. Daha yavaş ve düzenli priz sonucu, boşluk oranın daha az olan bir yapı oluşur. Söz konusu bu etki sonucu çimentolu sistemlerin permeabilite ve dayanım gibi durabilite ve mekanik özellikleri iyileşir ve performansı artar (Mindess 2002).

Yukarıda özellikleri açıklanan katkılar haricinde bazı değişik tip katkılar da bulunmaktadır. Beton karışımlarında gaz kabarcıkları oluşturarak oturmaya ve terlemeyi önleyen katkılar, çimentolu sistemlerin kuruma-büzülmesi azaltmak için kullanılan genişletici katkılar, betonun aderansını arttıran aderans artırıcı katkılar veya betonun pompalanabilirliğini arttıran katkılar buna örnek verilebilir (ACI 212.R-04, 2004 ve Ozturk 2009).

#### *Kimyasal katkıların etkileri*

Kimyasal katkılar, genel olarak işlenebilirliğini arttırmaya, karışım suyu miktarının azaltılmasına, işlenebilirlik kayıp oranının ayarlanmasına, priz başlangıcının geciktirilmesine veya hızlandırılmasına, segregasyonun ve terlemenin azaltılmasına, pompalanabilirliğin arttırılmasına, dayanım artış oranının yükseltilmesine ciddi oranda etki etmektedir (Ozturk 2009).

Bu taze hal etkilerinin dışında prizini almış beton ve harç karışımlarının özelliklerinin iyileştirilmesi için de kimyasal katkılar kullanılmaktadır. Bunlara;

- Erken çimento hidrasyonu esnasında meydana gelen ısının azaltılması
- Erken yaş dayanımının hızlandırılması
- Dayanım artışı
- Donma-çözülme direncinin arttırılması
- Permeabilitenin (geçirimsizlik) azaltılması
- Alkali-agrega reaksiyonu sonucu oluşan genleşmelerin azaltılması
- Çelik donatı ve beton aderansının arttırılması
- Darbe dayanımı ve aşınma direncinin arttırılması
- Kuruma rötresinin azaltılması gibi özellikler örnek verilebilir.

Bilindiği gibi kimyasal katkıların birçok olumlu özelliği yanında bazı olumsuz özellikleri de vardır (Mardani-Aghabaglou 2016). Bu istenmeyen olumsuz etkiler erken priz alma, ani katılma, priz süresini uzatma, ayrışma, terleme veya dayanımda azalma gibi olumsuzluk olarak ortaya çıkabilir (Ramachandran 1995).

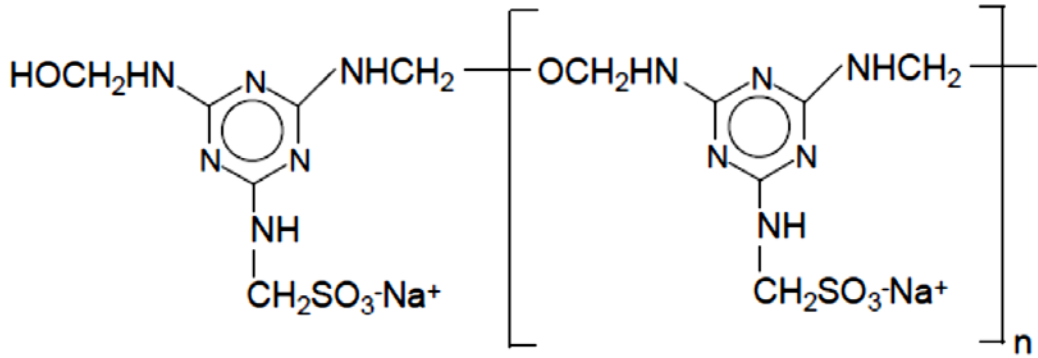
### *Süper akışkanlaştırıcı katkı maddeleri*

Beton üretiminde ihtiyaç duyulan çimento miktarında bir azaltmaya gitmeden su/çimento oranını düşürerek akıcı, kolay işlenebilir ve yüksek dayanımlı bir malzeme elde edebilmek amacıyla süper akışkanlaştırıcı katkılar tercih edilmektedir.

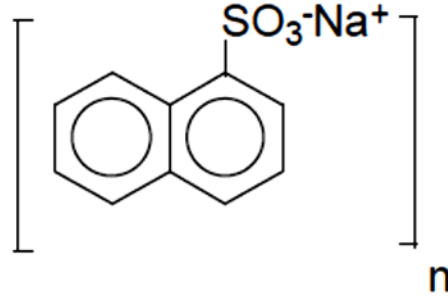
Süperakışkanlaştırıcı katkılar, sülfone melamin formaldehit polikondensesi, sülfone naftalin formaldehit polikondensesi, modifiye linyosülfonatlar, poliakrilatlar, polikarboksilatlar, amino aromatik sülfoneik asit, fenol formaldehit kondensesi esaslı vb. kimyasal yapılara sahiptir. Bu katkılar, betona sabit işlenebilirlikte %12-16'dan fazla su azaltma, basınç dayanımında %15'in üzerinde artış, korozif ortam direncinde ve geçirimsizlikte artış ve işlenebilme kolaylığı kazandırmaktadır (Akman 2010).

Su azaltıcı katkılardan süper akışkanlaştırıcılar, sülfonat bazlı ( $\text{SO}_3^-$ ) ve karboksilat ( $\text{COO}^-$ ) bazlı olmak üzere ikiye ayrılır. Polinaftalin sülfonat (PNS) ve polimelamin sülfonat (PMS) başlıca sülfonat bazlı süper akışkanlaştırıcılardandır (Spiratos vd. 2003).

Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te açıkça görüleceği üzere, PMS ve PNS'nin içeriklerini suda çözünebilen sentetik sülfone edilmiş melamin formaldehit polikondensesi ve sülfone edilmiş naftalin formaldehit polikondensesi oluşturmaktadır.



**Şekil 2.2.** Polimelamin sülfonatın kimyasal yapısı (Spiratos 2003)



**Şekil 2.3.** Polinaftalin sülfonatın kimyasal yapısı (Spiratos 2003)

Süperakışkanlaştırıcı içeren çimento hamurunda, çimento taneciklerinin dağılma özelliği genel olarak “elektrostatik” ve “sterik” etki mekanizmasıyla açıklanmaktadır (Ramyar 2007).

Betonda süper akışkanlaştırıcı katkı (SA) kullanılması; karışımdaki w/c oranını azaltarak daha yüksek dayanımlı beton elde edilmesini sağlar ve böylece boşlukları ve geçirimsizliği daha az; dolayısıyla dayanıklılığın daha yüksek olduğu bir beton elde edilmesine olanak tanır. SA kullanma ihtiyacının duyulmasının asıl nedeni, betonu daha işlenebilir yapmak ve donatının sık olduğu kısımlarda kolay bir yerleşme ve iyi bir kompasite sağlamaktır. Bu etki, çok miktarda oluşan hidrasyonun sonucudur. SA kullanımı, çimento hamurunda toplam boşlukları biraz artırırken, büyük boşlukları azalttığı görülmektedir (Balta 1991).

#### *Su azaltıcı katkı*

Günümüzde beton sektörünün her alanında kullanılan su azaltıcı katkıları ilk olarak 1981 yılında üretilmiştir (Plank 2015).

Su azaltıcılar; su ihtiyacını azaltarak daha boşluksuz bir beton üretimine ve dolayısıyla yüksek dayanımlı betonların imal edilmesini, kalıp alma süresini azaltarak inşaa hızının artmasını, daha işlenebilir ve servis ömrü daha yüksek betonların daha az maliyetle üretilmesini sağlar. Son yıllarda değişik özelliklere sahip çeşitli su azaltıcı katkıları üretilmektedir. Su azaltıcı katkıları, olumlu etkilerinin yanısıra çimentolu sistemler üzerinde olumsuz etkiler de meydana getirebilir (Bedard 2005, Bonen 1995 ve Ramachandran 1995).

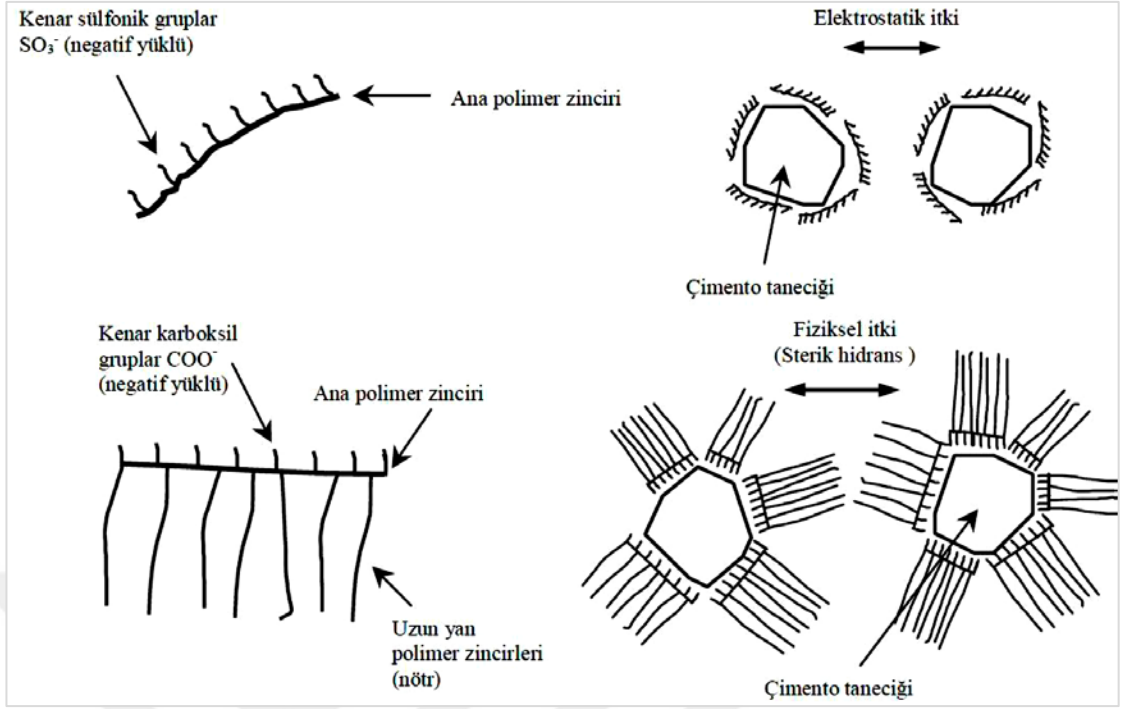


Su azaltıcı katkıların çimentolu sistemlerde oluşturdukları etkiler ana zincir uzunluğu, yan zincir sayısı ve uzunluğu, molekül ağırlığı, moleküller arası bağ yapısı, kimyasal bileşimi, yoğunluğu, adsorpsiyon özelliği, beton karışımına katılış şekli ve sırası gibi parametrelerden etkilenmektedir (Bedard 2005, Bonen 1995, Flatt 2001, Mardani-Aghabaglou 2013, 2016, 2017a ve 2017b).

Su azaltıcı katkıların su ihtiyacını azaltması sonucu sağladığı bazı avantajlar vardır. Bunlardan biri hedeflenen çökme değerinin daha düşük su/çimento oranıyla elde edilmesini sağlamaktır. Bu, nihai dayanımlarda ve durabilite özelliklerinde performansın artması olarak sonuçlanır. Ya da, hedeflenen işlenebilirlik değerine çimento dozajının azaltılmasıyla, su/çimento oranı değiştirilmeden ulaşılmasını sağlar. Bu sayede, karışımlarda en maliyetli bileşen olan çimento miktarının azalmasına ve maliyetin düşmesine imkan tanır (Mindess 2002).

Su azaltıcı katkıların ana mekanizmasını, moleküllerinin yüzey yüklerini nötrleştirmesi ve bunun sonucunda her yüzeyin aynı yük taşıyarak birbirini itmesi oluşturur. Bu sayede topaklanma engellenir ve suyun önemli bir kısmı karışım reaksiyonu için kullanılır (Annual Book of ASTM Standarts).

Şekil 2.4'te su azaltıcı kimyasal katkıların etki mekanizmasını açıklayan elektrostatik ve fiziksel itki modelleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Elektrostatik ve fiziksel itki modelleri (ACI 212, 2004 ve Bürge 1999)

### Geçirgenlik azaltıcı katkı

TS EN 13515 standardına göre, su nüfuzuna karşı direnç şu şekilde tarif edilmiştir: Düşük su geçirgenlik özelliğine sahip beton aşağıdaki şartları sağlamalıdır;

- 40 cm'den daha fazla kalınlıktaki elemanlar için su/çimento oranı  $\leq 0,70$  olmalıdır.
- 40 cm ve daha az kalınlıktaki elemanlar için su/çimento oranı  $\leq 0,60$  ve en az çimento dozajı  $280 \text{ kg/m}^3$  (Tip II mineral katkı kullanıldığında en az  $270 \text{ kg/m}^3$  çimento) olmalıdır. Beton sınıfı en az C25/30 olmalıdır.
- TS EN 12390-8'e göre deneye tabi tutulduğunda, su işleme derinliği en fazla 50 mm olmalıdır. Zararlı kimyasal etkileri olan suya maruz kalacak beton yapılarda ise bu değer en fazla 30 mm olarak yapılmalıdır.

Su geçirimsizlik katkıları (SG), TS EN 934-2 Kimyasal Katkılar Standardında; "Sertleşmiş betonun kılcal su emmesini azaltan kimyasal katkı" olarak tarif edilmiştir. Genel olarak betonun suya karşı direncini arttırmak için geçirimsizliği (permeabilite) düşüren katkıları olarak tanımlanmaktadır. SG katkıları, beton yüzeyinden içerisine su geçişini azaltarak ve/veya sertleşmiş beton içerisindeki kapiler boşlukları azaltarak veya tıkayarak geçirimsizliği sağlar.

*SG katkılarının çalışma mekanizması;*

- Kapiler boşluk miktarını, hacmini ve sürekliliğini (boşlukların birbirleriyle bağlantısını) azaltarak,
- Sertleşmiş beton içerisindeki kapiler boşlukları tıkayarak,
- Katkı içerisinde yer alan hidrofobik malzemelerin su ile reaksiyona girerek genleşmesi sonucu su geçişini azaltarak gerçekleşmektedir.

SG katkıları çimento hamurunda yer alan kapiler boşluklar üzerinde etkisini göstererek absorpsiyonu ve permeabiliteyi azaltır. Ancak, SG katkıları beton yüzeyinde oluşmuş büyük çatlaklar veya segregasyon nedeniyle bozulmuş yapısal hasardan su geçişini engelleyemez. SG katkıları beton yüzeyinde oluşan ve çiçeklenme adı verilen kimyasal reaksiyonu engellemek için de kullanılabilir.

SG katkıları ile ilgili standart “TS EN 934-2: Kimyasal Katkılar- Beton, Harç ve Şerbet için Bölüm 2: Beton Katkıları-Tarifler ve Özellikler, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme” Çizelge 2.3’te yer almaktadır.

**Çizelge 2.3.** Su geçirimsizlik katkıları için ek özellikler (eşit kıvamda veya eşit S/Ç oranında (TS EN 934-2 2002))

No	Özellik	Şahit harç/beton	Deney metodu	İstenen değerler
1	Kılcal su emme	EN 480-1'e uygun harç	EN 480-5	7 günlük külden sonra, 7 günlük deney için; Deneme betonu, şahit betonun en çok % 50'si; 90 günlük külden sonra, 28 günlük deney için; deneme betonu, şahit betonun en çok % 60'ı
2	Basınç dayanımı	EN 480-1 Şahit beton 1	prEN 12390-3:1999	28 günde, deneme betonu, şahit betonun en az % 85'i
3	Taze betondaki hava miktarı	EN 480-1 Şahit beton 1	EN 12350-7	Üretici tarafından aksi belirtilmedikçe, deneme betonu, şahit betonun hacimce en çok % 2 üzerinde
a Bütün deneyler eşit kıvam veya eşit S/Ç oranında yapılmalıdır.				

Betonun geçirgenliği, beton içerisindeki kapiler boşluk hacmi, sayısı ve bu boşlukların birbirleri ile bağlantılı olup olmaması durumuna göre değişmektedir (Mardani-Aghabaglou 2013, Hoseini 2009 ve Kearsley 2001). Hidratasyon ürünlerinin dolduramadığı bağlantılı bu kılcal boşluklar sayesinde su ve diğer maddeler beton içerisinde ilerleyebilir. Beton karışımlarında kullanılan agregaların geçirgenliği, karışım oranları, ince malzeme miktarı, agrega-hamur ara yüzeyi, yerleştirme, sıkıştırma ve kür koşulları gibi değişkenler beton geçirgenliğini etkilemektedir. Aynı zamanda ortam sıcaklığı ve nem döngülerinden kaynaklanan mikro-çatlaklar da betonun geçiş özeliğini önemli ölçüde artırabilir (Shi 2004 ve Asbridge 2001).

Kılcal boşlukları azaltmak için alınabilecek ilk önlem betondaki su/çimento oranının azaltılmasıdır. Ayrıca betonun geçirgenliğini azaltmak için mineral ve kimyasal katkılar kullanılmaktadır. Su/çimento oranını düşürmek ve kapiler boşluğu azaltmak amacıyla genellikle beton içerisinde;

- TS EN 934-2 standardı Çizelge 2.4'te yer alan "Su azaltıcı / akışkanlaştırıcı katkılar" ve/veya
- TS EN 934-2 standardı Çizelge 2.5 ve Çizelge 2.6'da yer alan "Yüksek oranda su azaltıcı / süper akışkanlaştırıcı" katkılar kullanılmaktadır.

**Çizelge 2.4.** Su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkılar için ek özellikler (eşit kıvamda)

No	Özellik	şahit beton	Deney metodu	İstenen değerler
1	Su azaltma	EN 480-1 şahit beton 1	EN 12350-2'ye göre çökme veya EN12350-5'e göre yayılma	Deneme betonunda şahit betona kıyasla en az % 5
2	Basınç dayanımı	EN 480-1 şahit beton 1	prEN 12390-3:1999	7 ve 28 günde, deneme betonu, şahit betonun en az % 110'u
3	Taze betondaki hava miktarı	EN 480-1 şahit beton 1	EN 12350-7	Üretici tarafından aksi belirtilmedikçe, deneme betonu, şahit betonun en çok % 2 (hacimce) üzerinde

**Çizelge 2.5.** Yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı katkılar için ek özellikler (eşit kıvamda)

No	Özellik	Şahit beton	Deney metodu	İstenen değerler
1	Su azaltma	EN 480-1 Şahit beton 1	EN 12350-2'ye göre çökme veya EN12350-5'e göre yayılma	Deneme betonunda şahit betona kıyasla en az % 12
2	Basınç dayanımı	EN 480-1 Şahit beton 1	prEN 12390-3:1999	1 günde, deneme betonu, şahit betonun en az % 140'ı; 28 günde, deneme betonu, şahit betonun en az % 115'i
3	Taze betondaki hava miktarı	EN 480-1 Şahit beton 1	EN 12350-7	Üretici tarafından aksi belirtilmedikçe, deneme betonu, şahit betonun hacimce en çok % 2 üzerinde

**Çizelge 2.6.** Yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı katkılar için ek özellikler (eşit su/çimento oranında)

No	Özellik	Şahit beton	Deney metodu	İstenen değerler
1	Kıvamdaki artış	EN 480-1 Şahit beton iv	EN 12350-2'ye göre çökme veya EN12350-5'e göre yayılma	Başlangıç (30±10) mm olmak üzere, çökme artışı en az 120 mm, başlangıç (350±20) mm olmak üzere, yayılma artışı en az 160 mm,
2	Kıvam koruma	EN 480-1 Şahit beton iv	EN 12350-2'ye göre çökme veya EN12350-5'e göre yayılma	Deneme betonunun katkı katıldıktan 30 dakika sonraki kıvamı, şahit betonun ilk kıvamının altına düşmemelidir.
3	Basınç dayanımı	EN 480-1 Şahit beton iv	prEN 12390-3:1999	28 günde, deneme betonu, şahit betonun en az % 90'i
4	Taze betondaki hava miktarı	EN 480-1 Şahit beton iv	EN 12350-7	Üretici tarafından aksi belirtilmedikçe, deneme betonu, şahit betonun en çok % 2 (hacimce) üzerinde

Bu katkılar ile serbest su miktarı azaltılarak kapiler boşluk oranı düşürülür ve betonun geçirimsizliği iyileştirilebilir. Mineral katkılar (uçucu kül, yüksek fırın cürufu vs.) ise daha ince olduklarından ve puzolanik reaksiyon gösterdiklerinden dolayı betonda çimento yerine veya filler olarak kullanıldığında, kapiler boşlukları azaltarak ve agrega-hamur ara yüzeyini iyileştirerek, betonun geçiş özelliklerini iyileştirmektedir.

SG katkıları kullanımı ile boşlukların tıkanması ise katkı içerisinde yeralan;

- Suda çözünen veya çözünmeyen, aktif ve reaktif filler malzemeler (kireçtaşı, silis dumanı vb.gibi)
- Suda çözünebilen organik polimerler yardımı ile yapılabilir.

Hidroforik (su itici) kimyasal katkılar ise genellikle uzun zincire sahip yağ asidi esteri türevleri olan kimyasallardır. SG katkıları, su azaltıcı veya yüksek oranda su azaltıcı katkılar, hidroforik kimyasallar ve boşluk tıkayan filler malzemelerin kombinasyonları ile üretilmektedirler.

Betonun su emme oranı, içerisinde yer alan boşluk miktarına bağlıdır. Boşluk hacmi, çimento ile hidrasyona girmeyen serbest su oranı ile değişmektedir. Beton içerisindeki bu fazla su, betonun üretimi, taşınması, işlenebilirliği, doğru biçimde yerleştirilebilmesi ve sıkıştırılabilmesi için gereklidir.

Örneğin; içeriğinde 350-400 kg/m<sup>3</sup> çimento, 175-200 kg/m<sup>3</sup> su bulunan yüksek dayanıma sahip bir betonda, reçetede yeralan suyun 98-112 kg/m<sup>3</sup>'lük kısmı hidrasyon için kullanılır. Geriye kalan 77-88 kg/m<sup>3</sup>'lük fazla su (beton hacminin %7,7-%8,8'i) beton yüzeyinden terleme ve doğal buharlaşma yolu ile çıkarken betondaki kapiler boşluğu oluşturur. Oluşan bu boşluklar, sertleşmiş beton içerisine zamanla su, hava ve zararlı kimyasalların girişine neden olur.

Beton reçetesindeki su miktarı azaltılarak (su/çimento oranı 0,45 için yukarıda verilen örnekte su miktarı 157-180 kg/m<sup>3</sup>'e düşer) kapiler boşluk miktarı azaltılabilir. Bunun için en iyi yöntem beton içerisinde su azaltıcı ve/veya yüksek oranda su azaltıcı katkıların kullanılmasıdır. Böylece betonun hem işlenebilirliği artar ve yerleştirilmesi kolaylaşır hem de rötre (büzülme) oranı azalır.

Boşluk tıkayan katkıları, büyüklüğü 0,1 mikronu geçmeyen, aktif ve reaktif filler malzemeler veya suda çözünmez polimerlerden oluşur. Bu materyaller hidrasyon sonucu ortaya çıkan boşlukları fiziksel olarak tıkayarak geçirimsizliğe yardımcı olur. Hidrofobik kimyasallar suda çözünüp çimentonun kalsiyum komponentleri ile reaksiyona girerek kapiler boşlukların yüzeylerinde çözünmez kristaller oluşturur. Oluşan bu kristal yapı kurduktan sonra beton içerisine su girişini engeller. Su geçirimsizliğin sağlanması, kullanılan katkıların etkinliği, suyun basıncı ve betonun kalitesine de bağlıdır.

#### *Kullanım dozajı*

SG katkıları için kullanım dozajı katkı tipine ve çeşidine göre değişmektedir. Su azaltıcı katkıları için dozaj çimento ağırlığının %0,2'si ile %2'si arası oranlarda kullanılabilir. Hidrofobik katkıları için bu oran %1-2, boşluk tıkayıcı katkıları için ise %5-10 arasında değişebilir. Sonuç olarak SG katkıları için kullanım oranı üretici beyanına uygun olarak belirlenmelidir.

SG katkıları, TS EN 197-1'de yer alan tüm çimento tipleriyle ve sülfata dayanıklı çimentolar ile birlikte kullanılabilir.

#### *Aşırı dozda kullanım (overdose)*

İnorganik filler içeren SG katkılarının fazla kullanımı işlenebilirliği azaltır. Organik materyal içeren katkıların aşırı dozda kullanımı ile beton içerisine fazla hava sürüklenebilir ve/veya çimento yüzeyini kaplayan materyaller nedeniyle hidrasyon yavaşlayabilir/durabilir. Üretici beyanını aşan her iki durum için de betonda basınç dayanımının düşmesi beklenir.

### 2.3. Konu İle İlgili Daha Önce Yapılan Çalışmalar

Bu bölümde, geçirgenlik azaltıcı katkıları (PRA) ve mineral katkı içeren çimentolu sistemler (MA) hakkında daha önce yapılmış çalışmaların kısa özetleri verilmiştir.

Baradan ve ark. (2007) yaptığı bir çalışmada su geçirimsizlik katkısını beton karışımlarda kullanımı incelenmiştir. Bu amaçla aynı firmanın ürünü olan modifiye lignosülfonat kökenli (LS) ve modifiye lignosülfonat artı organik yağ asidi esteri karışımından oluşan (WRC), iki farklı katkı kullanılmıştır. Çalışmanın birinci aşamasında farklı oranlarda su geçirimsizlik katkı içeren harç karışımlarının geçirgenlik ve dayanım parametreleri incelenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise %0, %3 ve %5 oranında WRC katkısı kullanılarak üretilen beton karışımlarında basınçlı su işleme derinliği ölçülmüştür. Harç karışımlarının karışım oranları ve isimlendirilmesi Çizelge 2.7’de verilmiştir.

**Çizelge 2.7.** Harç karışımları ve özellikleri (Baradan ve ark. 2007)

Karışım	Katkı Oranı	Çimento (g)	Kum (g)	Su (g)	Katkı (g)
K	%0	675	2025	338	0
WRC %1	%1	675	2025	331	7
WRC %3	%3	675	2025	318	20
WRC %5	%5	675	2025	300	38
LS %0,4	%0,4	675	2025	331	3
LS %0,6	%0,6	675	2025	318	4,5
LS %0,8	%0,8	675	2025	300	6

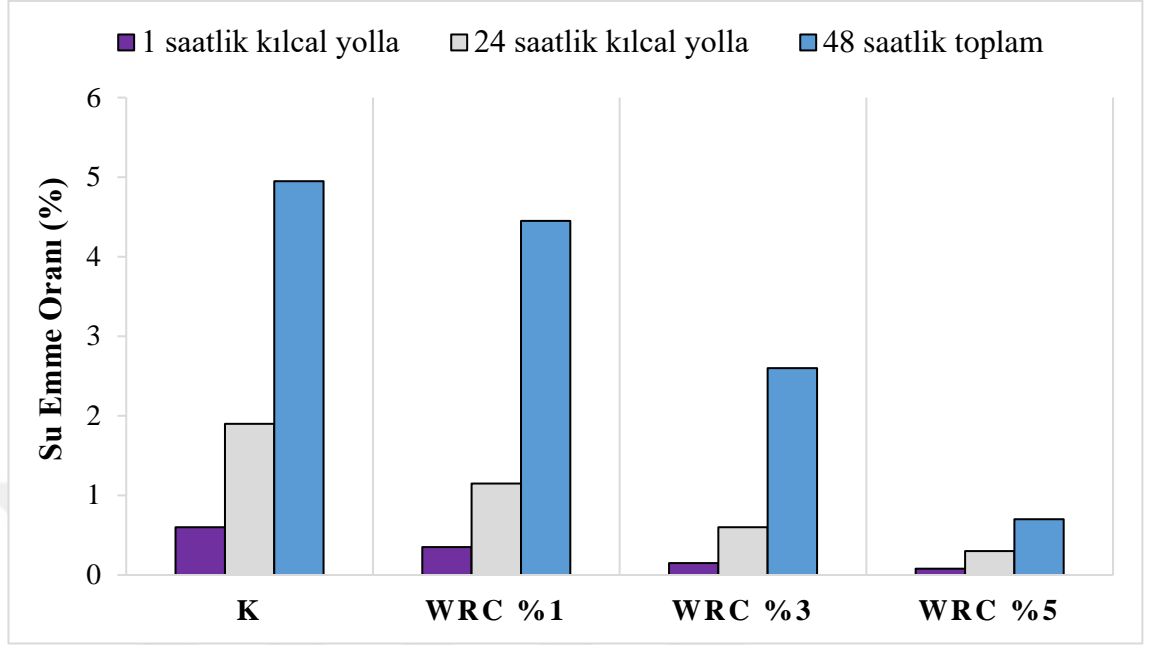
1 m<sup>3</sup> beton üretimi için gereken malzeme miktarı ve beton karışımlarının bazı taze hal özellikleri Çizelge 2.8’de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.8.** WRC katkılı betonların karışım oranları ve taze beton özellikleri (Baradan ve ark. 2007)

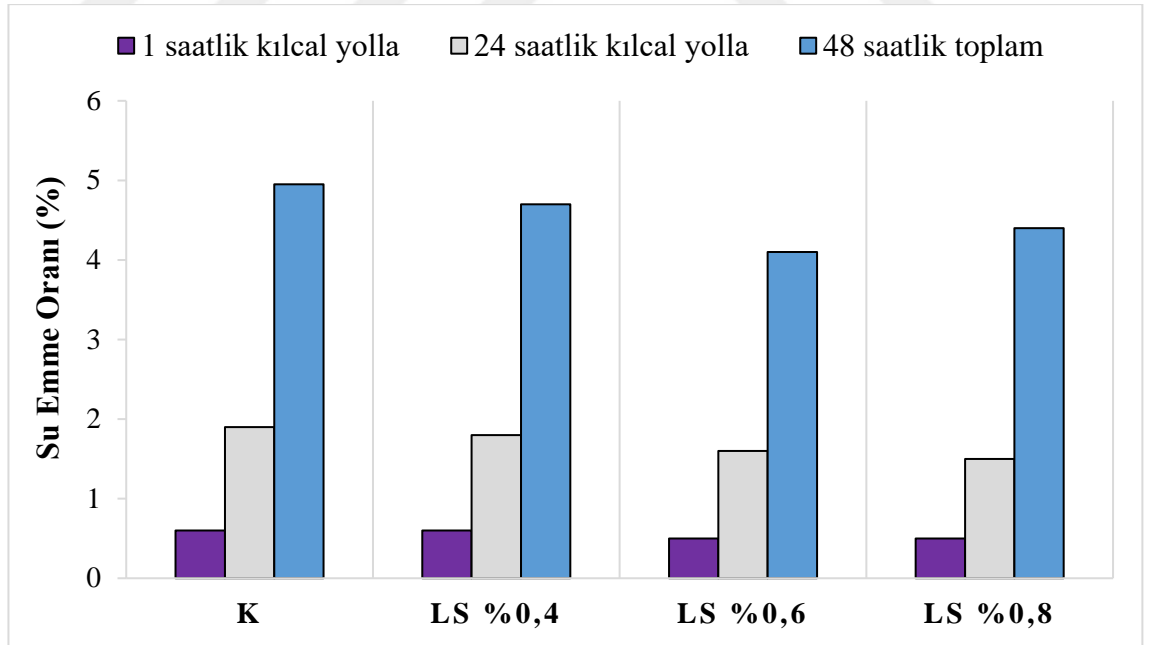
Karışım	Karışım Bileşenleri (kg/m <sup>3</sup> )							
	Çimento	Su	Kum	5-15 iri agrega	15-25 iri agrega	WRC katkısı	Çökme (cm)	Hava içeriği (%)
Kontrol	300	200	892	469	467	0	15	1,1
WRC %3	300	195	892	469	467	9	17	2,8
WRC %5	300	190	892	469	467	15	17	4,5



Harç karışımlarının su emme oranı sonuçları, Şekil 2.5 ve 2.6’da gösterilmiştir.

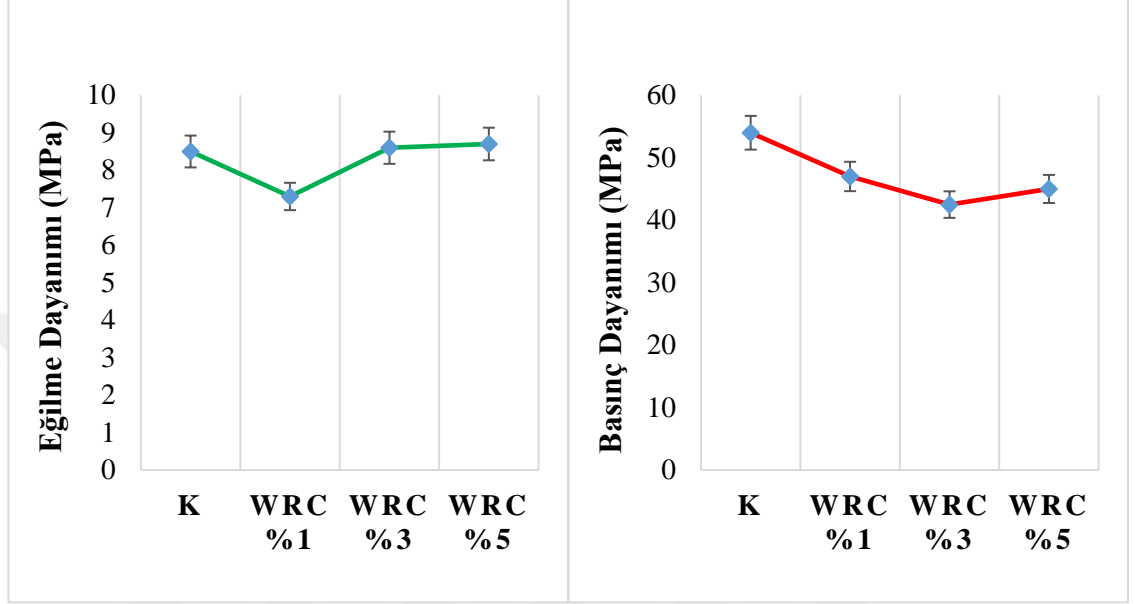


Şekil 2.5. WRC katkılı çimento harçlarının kılcal ve toplam su emme değerleri (Baradan ve ark. 2007)



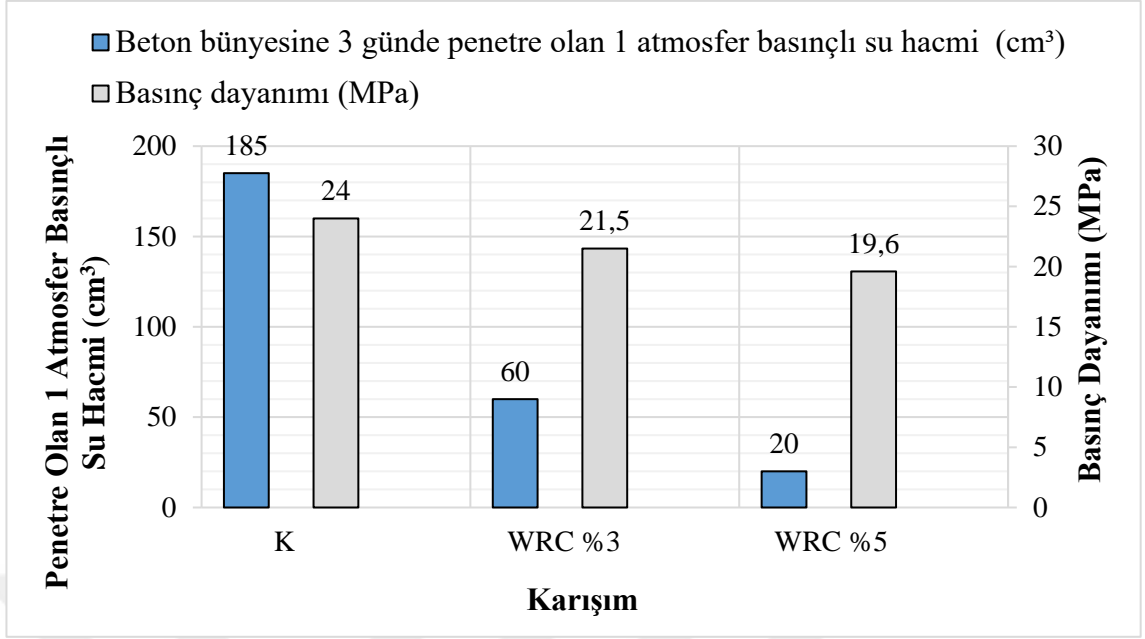
Şekil 2.6. LS katkılı çimento harçlarının kılcal ve toplam su emme değerleri (Baradan ve ark. 2007)

Sonuçlara göre WRC tipi katkı beton karışımlarının geçirgenliğini azaltma açısından LS katkısına göre daha üstün performans göstermiştir. Bu bağlamda, diğer karışımla kıyasla WRC %5 karışımı en düşük se emme oranına sahip olmuştur. Harç karışımlarının basınç ve eğilme dayanım sonuçları Şekil 2.7’de verilmiştir.



**Şekil 2.7.** WRC katkısının çimento harcının mekanik özelliklerine etkisi (35 günlük) (Baradan ve ark. 2007)

Şekil 2.7’den görüldüğü gibi WRC katkı kullanımıyla harç karışımlarının eğilme dayanımında kayda değer etki gözlemlenmezken basınç dayanımı bir miktar artmıştır. Beton karışımlarının basınç dayanımı ve beton bünyesine 3 günde penetre olan 1 atmosfer basınçlı su hacmi Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



**Şekil 2.8.** WRC katkısının beton bünyesine basınçlı yolla penetre olan su hacmine ve basınç dayanımına etkisi (Baradan ve ark. 2007)

Şekil 2.8’den de anlaşıldığı gibi WRC katkısının %5 oranında beton karışımında kullanılmasıyla geçirimsizlik özelliklerinde ciddi mertebede azalmalar gözlemlenmiştir. Yazarlara göre, organik yağ asidi esteri beton bünyesinde oluşan boşlukların çeperlerinde hidrofobik bir tabaka oluşturmakta ve suyun iç kısımlara ilerlemesini engellemektedir. WRC katkısının betonda kullanımı harç karışımlarında’da olduğu gibi basınç dayanımının azalmasına sebep olmuştur

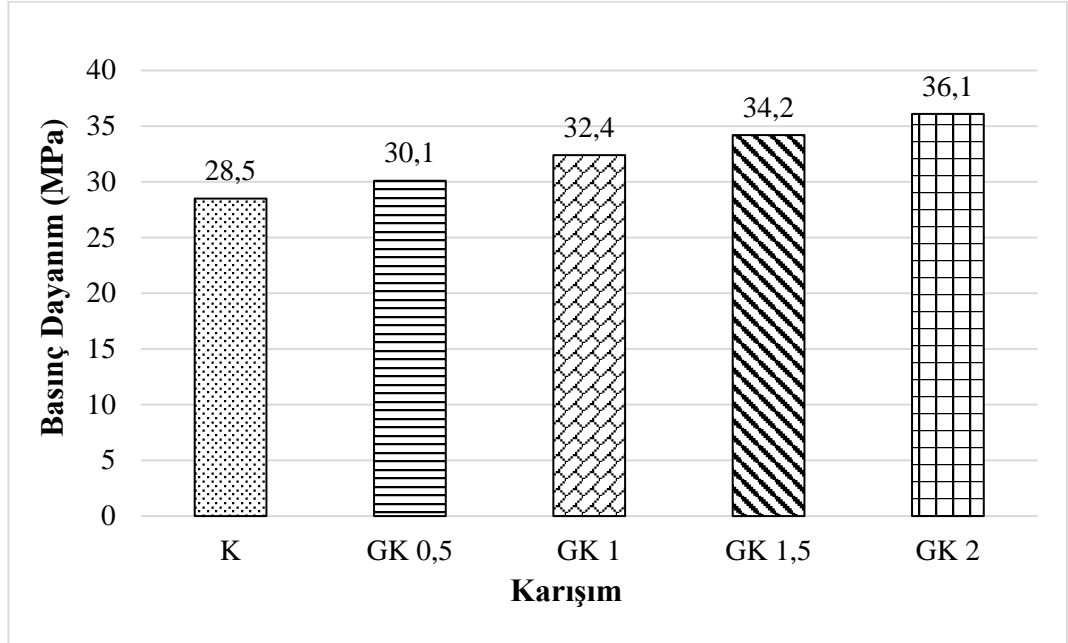
Akyol (2008) çalışmasında “su yalıtımı ve su geçirimsizlik katkı kullanım oranlarının beton karışımların su emmesine ve basınç dayanımına etkisini” yüksek lisans tezi kapsamında araştırmıştır. Çalışmada beton karışımlarının geçirgenliğini etkileyen parametrelerin belirlenmesi ve etkin mekanizmanın araştırılması amaçlanmıştır. Üretilen betonlarda karışım gronülometrisi B32 ye uygun seçilmiştir. Karışımlarda özgül ağırlığı 3150 olan PÇ 42,5 çimentosu kullanılmıştır. Karışımlarda çimento miktarı 320 kg/m<sup>3</sup> olarak sabit tutulmuştur. Çalışmada kontrol karışıma ilaveten çimento ağırlığının %0,5, %1, %1,5 ve %2’e kadar geçirimsizlik katkı kullanılarak toplamda 5 farklı beton karışımı üretilmiştir. 1 m<sup>3</sup> beton üretimi için gereken malzeme miktarı ve karışımların bazı taze hal özellikleri Çizelge 2.9’da verilmiştir.

**Çizelge 2.9.** Üretilen kontrol ve katkıli betonların, 1 m<sup>3</sup> içindeki malzeme miktarları ve taze beton özellikleri (Akyol 2008)

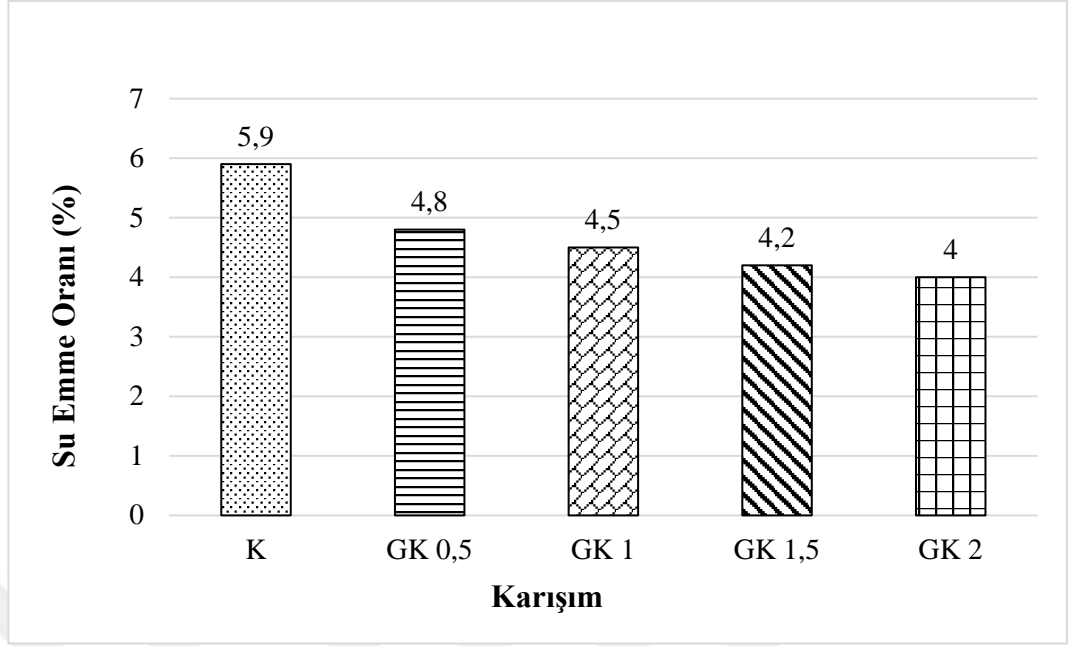
Beton Kodu	K	GK* 0,5	GK 1	GK 1,5	GK 2
Çimento (kg)	320	320	320	320	320
Su (kg)	205	190	185	180	175
Doğal Kum (kg)	455	471	475	478	484
Kırma Kum (kg)	429	445	450	452	457
No 1 kırmataş (Mıdır) (kg)	472	489	491	495	503
No 2 kırmataş (Mıdır) (kg)	435	452	455	460	465
Katkı Miktarı (%)	0	%0,5	%1	%1,5	%2
Su / Çimento	0,64	0,58	0,58	0,58	0,5
Çökme (cm)	14	14	14	14	14,5
Hava Miktarı (%)	1,1	2,4	3,2	3,5	3,8

GK\*: Geçirimsizlik sağlayan kimyasal katkıdır.

Karışımlarda taze hal özelliği olarak çökme ve hava miktarı belirlenmiştir. Sertleşmiş hal özelliği olarak beton karışımlarının 14-günlük basınç dayanım ve su emme oranı belirlenmiştir. Sonuçlar Şekil 2.9 ve 2.10'da özetlenmiştir



**Şekil 2.9.** 14-günlük basınç dayanım sonuçları (Akyol 2008)



**Şekil 2.10.** 14-günlük su emme oranları (Akyol 2008)

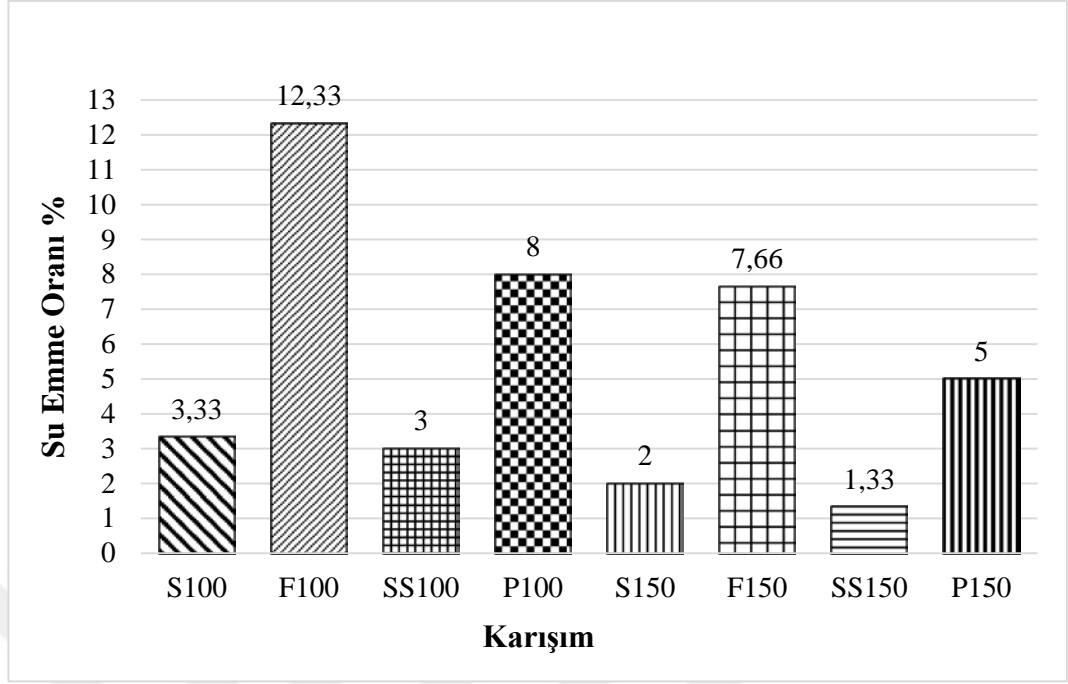
Sonuçlara göre farklı dozajlarda geçirimsizlik katkı içeren betonlarda, aynı işlenebilirliği sağlamak için su gereksinimi olmuştur. Bu sonuçlara göre en az su gereksinimi, %2 oranında kullanılan geçirimsizlik katkısıyla elde edilmiştir. Basınç dayanımlarına bakıldığında ise, en büyük basınç dayanımı değerini %2 oranında kullanılan geçirimsizlik katkısı kullanılarak elde edilmiştir. Bu sonuç, %2 katkı içeren karışımda, su gereksiniminin daha düşük olmasından dolayı su/çimento oranının diğer karışımlara göre daha düşük olması ile açıklanabilir. Betonların birim hacim ağırlıklarına bakıldığında ise, en yüksek birim hacim ağırlığı kontrol betonunda elde edilmiştir. Geçirimsizlik sağlayan katkı içeren beton karışımlarının birim hacim ağırlığının düşük olmasının sebebi ise katkının hava sürüklenme özelliğine sahip olması olarak vurgulanmıştır. Sonuç olarak su geçirimsizlik katkısı kullanımı ile beton karışımlarının geçirimsizliği azaltmıştır. Bu olay, su geçirimsizlik katkısı kullanımı ile aynı çökme değerini sağlamak için su gereksiniminin azalmasına bağlı olarak karışımların su/ç oranının azalması ile açıklanmıştır.

Binici ve arkadaşları (2012) yaptığı bir çalışmada, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis kumu ve pomzanın NaOH ile aktive edilerek geopolimer harç karışımların üretiminde kullanılması araştırmıştır. Bu amaçla 4x4x16 cm ve 10x10x10 cm boyutlarında geopolimer beton numuneler üretilmiştir. Çizelge 2.10’da çalışmada üretilen geopolimerler karışımlarının oranı gösterilmiştir. Şekil 2.11’den anlaşılacağı üzere, yüksek fırın cürufu ile elde edilen geopolimerin su emme oranı diğer numunelere göre daha yüksek olmuştur. Ayrıca, Şekil 2.12’de görüldüğü gibi bu numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarının diğer karışımlara göre daha düşük olduğu yazarlar tarafından ifade edilmiştir. Elde edilen su emme ve basınç dayanım oranları Şekil 2.11 ve 2.12’de verilmiştir. Bu bağlamda, söz konusu özellikler açısından S150 ( UK esaslı geopolimer 150 °C de aktive edilen) en üstün performansı göstermiştir.

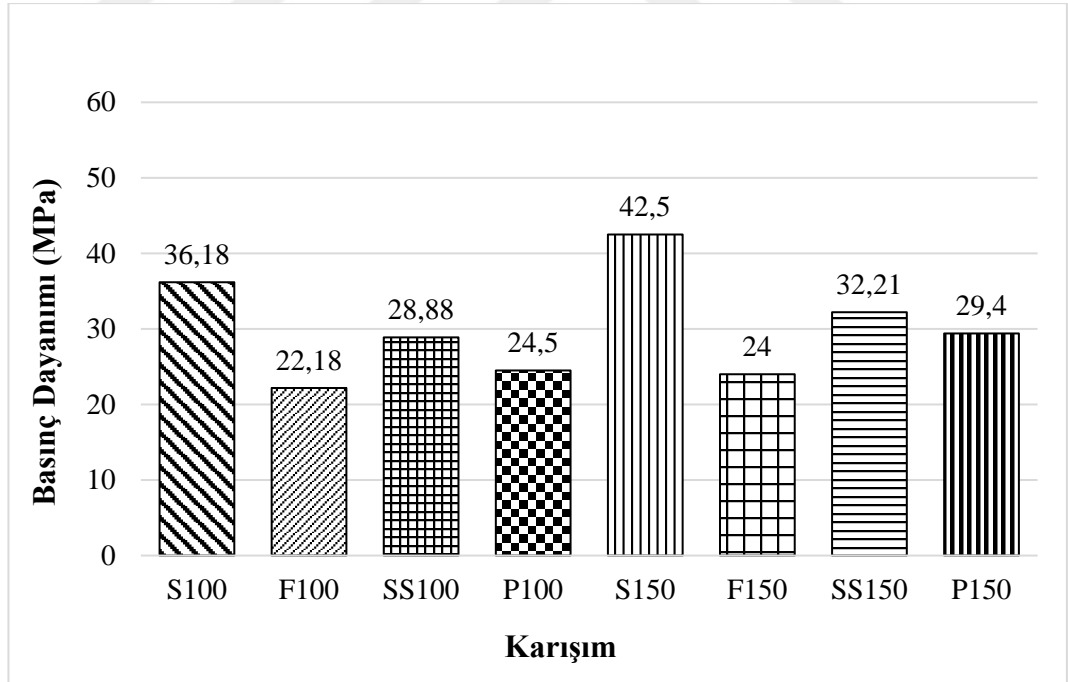
**Çizelge 2.10.** Çalışmada üretilen geopolimer harçların karışım oranı  
(Binici ve ard. 2012)

Karışım	Bileşenler ve miktarları (g)	
	Kum	NaOH
S1(Uçucu kül esaslı geopolimer)	800	100
S2(Uçucu kül esaslı geopolimer)	900	100
S3 (Uçucu kül esaslı geopolimer)	1000	100
F1(Yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer)	800	100
F2(Yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer)	900	100
F3(Yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer)	1000	100
SS1(Silis kumu esaslı geopolimer)	800	100
SS2(Silis kumu esaslı geopolimer)	900	100
SS3(Silis kumuesaslı geopolimer)	1000	100
P1(pomza esaslı geopolimer)	800	100
P2(pomza esaslı geopolimer)	900	100
P3 (pomza sashlı geopolimer)	1000	100

Değer birimi tüm malzemelerde gramdır.



**Şekil 2.11.** Geopolimer harç karışımlarının su emme oranı sonucu (%) (Binici ve ard. 2012)



**Şekil 2.12.** Geopolimer harç karışımlarının basınç dayanım oranı sonucu (%) (Binici ve ard. 2012)

Mardani-Aghabaglou ve arkadaşları (2013) yaptığı bir çalışmada, farklı tipteki geçirgenlik azaltıcı katkıların betonun basınç dayanımına ve geçirgenlik özelliklerine etkisini incelemiştir. Bu amaçla, 0,50 ve 0,60 olmak üzere iki farklı su/çimento oranına sahip beton karışımları hazırlamıştır. Çalışmada üretilen beton karışımların 1 m<sup>3</sup> beton üretiminde kullanılan malzemelerin düzeltilmiş miktarlar çizelge 2.11’de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.11.** 1 m<sup>3</sup> beton üretiminde kullanılan gerçek malzeme miktarları ve çökme değerleri (Mardani-Aghabaglou ve ark. 2013)

Karışım Adı	S/Ç oranı	Çimento (kg)	Su (kg)	Agrega (SSD, kg)			**	***	Hava (%)	Çökme (mm)	BHA (kg/m <sup>3</sup> )
				0-3	5-15	15-25	SA	SG			
				(mm)	(mm)	(mm)	(kg)	(kg)			
K-0,5*		356	178	943	381	574	5	0,0	3,0	190	2360
A-0,5*		353	177	930	376	566	3	7,1	2,6	200	2369
B-0,5		359	179	945	382	576	3	7,2	2,8	200	2334
C-0,5	0,5	355	177	934	378	568	3	7,1	2,9	200	2360
D-0,5		356	178	941	381	573	4	7,1	2,3	190	2361
E-0,5		355	178	937	379	571	4	7,1	2,6	190	2362
F-0,5		355	177	937	379	571	4	7,1	2,7	200	2364
K-0,6		293	177	965	390	588	4	0,0	3,5	180	2363
A-0,6		292	176	954	386	581	2	5,8	3,2	190	2371
B-0,6		292	176	955	386	582	2	5,8	3,3	180	2369
C-0,6	0,6	292	176	956	387	582	2	5,8	3,4	180	2367
D-0,6		293	177	964	390	586	3	5,9	3,1	190	2366
E-0,6		293	177	961	389	586	3	5,9	3,2	190	2367
F-0,6		293	177	961	388	585	3	5,9	3,0	190	2369

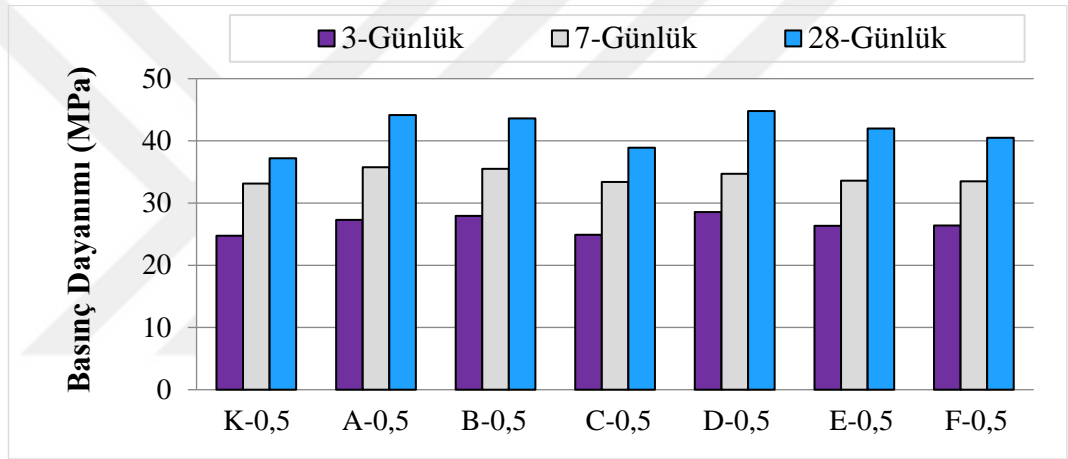
\*: SG katkısı içermeyen ve 0,5 su/çimento oranına sahip beton k-0,5 olarak ve A tipi SG katkısı içeren, 0,5 su çimento oranına sahip beton A-0,5 olarak adlandırılmaktadır.

SA\*\*: Naftalin esaslı süper akışkanlaştırıcı. SG\*\*\*: Farklı SG katkıları.

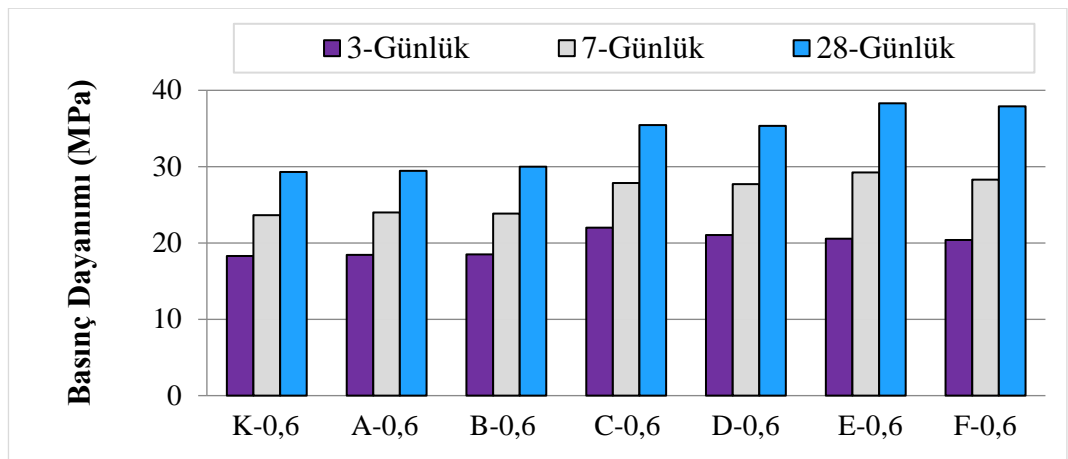


Çalışmada numunelerin isimlendirmesi için geçirgenlik azaltıcı katkı kullanımına ve karışımların s/ç oranına yapılmıştır. K ile gösterilen karışım geçirgenlik azaltıcı içermeyen karışımları ve A, B, C, D, E ve F farklı geçirgenlik azaltıcı katkı içeren karışımları simgelemektedir. Örneğin geçirgenlik azaltıcı katkı içermeyen ve 0,6 s/ç oranına sahip karışım K-0,6 olarak gösterilmiştir. Deney sonuçlarına dayanarak aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

- PRA katkısı kullanımı beton karışımlarının basınç dayanımını artırmıştır.
- PRA katkısı kullanımı beton karışımlarının geçirgenlik değerini azaltmıştır. Bu azalma daha düşük S/Ç oranına sahip karışımlarda daha belirgin olmuştur. Deney sonuçları Şekil 2.13 ve 2.14'te özetlenmiştir.

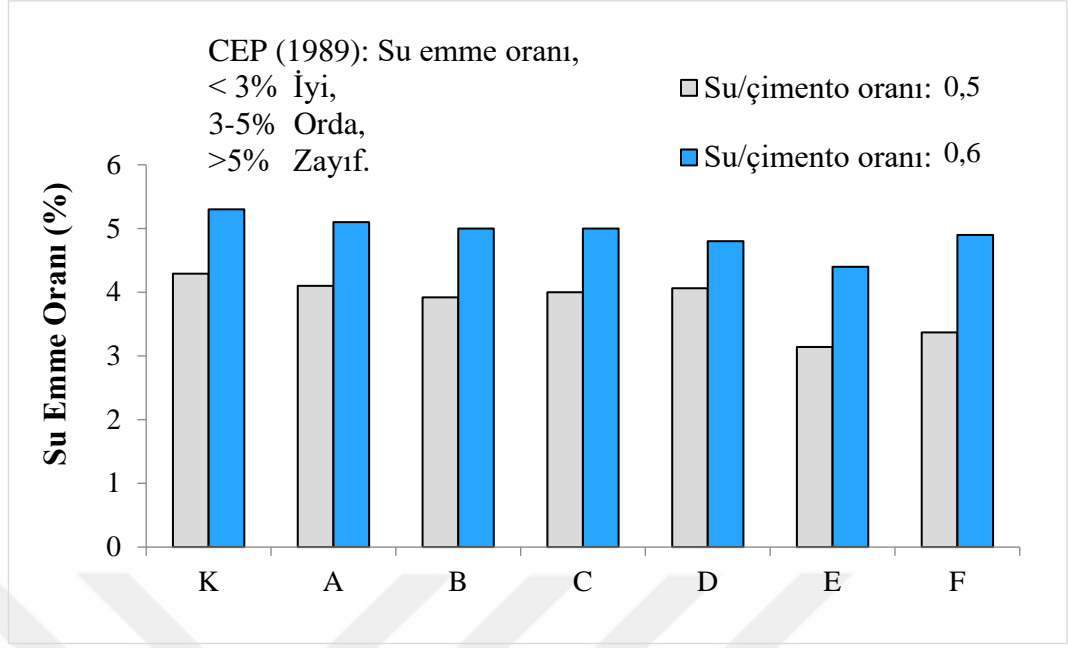


(a)



(b)

**Şekil 2.13.** Beton karışımlarının farklı yaşlarda basınç dayanımları: (a) :0,5 S/Ç oranına sahip karışımlar, (b): 0,6 S/Ç oranına sahip karışımlar (Mardani-Aghabaglou ve ark. 2013)



Şekil 2.14. Karışımların su emme deney sonuçları (Mardani-Aghabaglou ve ark. 2013)

Diğer bir çalışmada su azaltıcı içeren harç karışımlarında kitin biyopolimerinin, mekanik ve durabilite özelliklerine etkisini Moralıoğlu (2015) tarafından incelenmiştir. Bu amaçla, farklı oranlarda su azaltıcı ve biyopolimer içeren karışımlar hazırlanmıştır. Çizelge 2.12’de hazırlanan karışımların malzeme miktarları gösterilmektedir. Çizelge 2.12’de; CM: Yalın çimento harcı karışımının, CTN 0,3: Çimento ağırlığının %0,3’ü kadar sadece kitin ilave edilmiş harç karışımının, RPCM-0,4: Çimento ağırlığının %0,4’ü kadar sadece polikarboksilat kökenli akışkanlaştırıcı kimyasal katkı ilave edilmiş harç karışımının, RMSM-0,4: Çimento ağırlığının %0,4’ü kadar sadece melamin sülfonat kökenli akışkanlaştırıcı kimyasal katkı ilave edilmiş harç karışımının, RNSM-0,4: Çimento ağırlığının %0,4’ü kadar sadece naftalin sülfonat kökenli akışkanlaştırıcı kimyasal katkı ilave edilmiş harç karışımının, PCM 0,3 1,0: Çimento ağırlığının %0,3’ü kadar kitin ve %1,0’i kadar polikarboksilat kökenli akışkanlaştırıcı kimyasal katkı ilave edilmiş harç karışımının, MSM 0,3 1,0: Çimento ağırlığının %0,3’ü kadar kitin ve %1,0’i kadar melamin sülfonat kökenli akışkanlaştırıcı kimyasal katkı ilave edilmiş harç karışımının ve NSM 0,3 1,0: Çimento ağırlığının %0,3’ü kadar kitin ve %1,0’i kadar naftalin sülfonat kökenli akışkanlaştırıcı kimyasal katkı ilave edilmiş harç karışımının simgelenmektedir.

Üretilen karışımlarda her kimyasal katkı tipinin karışımının donma-çözülme kaynaklığı dayanım kaybına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla numunelerin eğilme deneyi sonrası basınç dayanımı belirlenmiştir. 50 ve 100 donma-çözülme çevrimine maruz kalan numunelerin eğilme sonrası basınç dayanım kaybı ölçülmüştür. Sonuçlar Şekil 2.15-2.17’de özetlenmiştir. Sonuçlara göre, su azaltıcı olarak polikarboksilat esaslı katkı içeren karışımlarda 50 ve 100 donma-çözülme çevrimine maruz kalan karışımlarda, çimento ağırlığının %0,3 kadar kitin içeren CTN 0,3 karışımı dayanım kaybı açısından en kötü performansı sergilemiştir. CM olarak gösterilen yalın çimento harcı karışımı donma-çözülme dayanım kaybı açısından en iyi performansı sergilemiştir. Biyopolimer katkı kullanımıyla harç karışımlarının viskozitesinin arttığını işlenebilirliğinin olumsuz etkilediğini göstermiştir, ancak kitin biyopolimer içeren harç karışımlarında su azaltıcı katkı kullanımıyla çimento katkı uyumu açısından herhangi bir uyumsuzluk olmamıştır ve karışımların basınç dayanımında artışlar gözlemlenmiştir. Ayrıca karışımlarda aşırı miktarda su azaltıcı katkı kullanımından dolayı oluşan dayanım kaybı, kitin oluşan dayanım kaybı kitin kullanılmasıyla engellenmiştir. Kitin içeren karışımlarda donma-çözülme kaynaklı aşınma kaybı diğer karışımlara kıyasla daha az olmuştur.

**Çizelge 2.12.** Üretilen harçların karışım oranları (Moralıoğlu 2015)

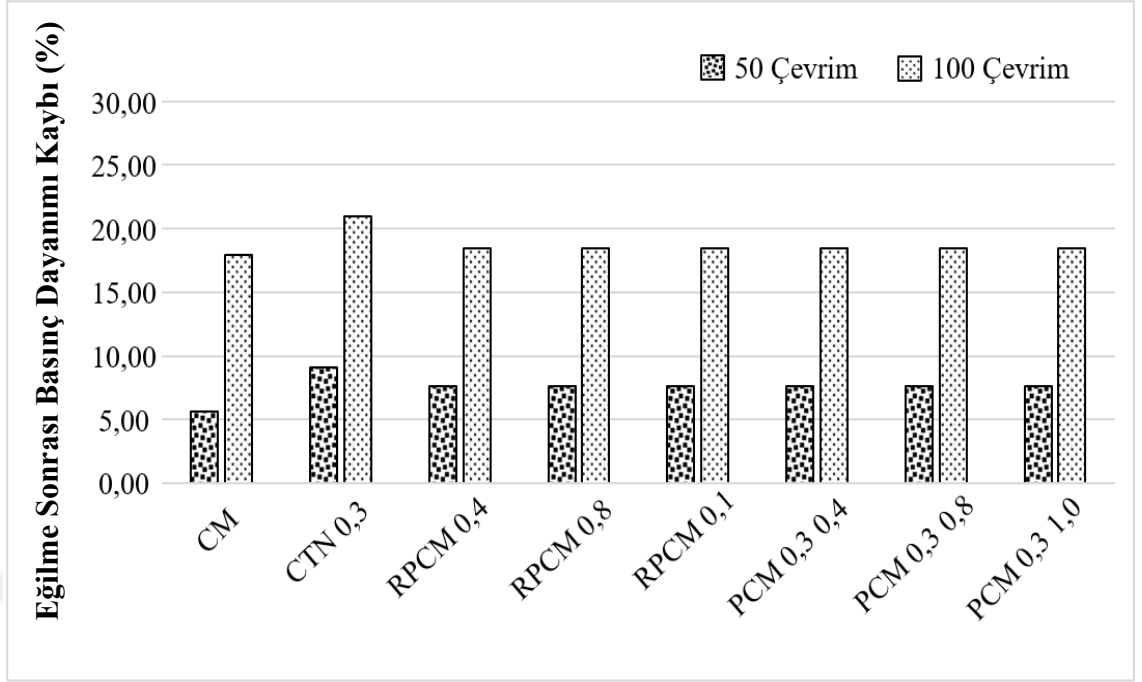
Seri adı	Su	Çimento	Standart Kum	Kimyasal Katkı			Biyopolimer Katkı
				PC*	MS**	NS***	Kitin
CM	225	450	1350	-	-	-	-
CTN 0,3	225	450	1350	-	-	-	1,35
CTN 1,0	225	450	1350	-	-	-	4,50
RPCM 0,4	225	450	1350	1,80	-	-	-
RPCM 0,8	225	450	1350	3,60	-	-	-
RPCM 1,0	225	450	1350	4,50	-	-	-
RMSM 0,4	225	450	1350	-	1,80	-	-
RMSM 0,8	225	450	1350	-	3,60	-	-
RMSM 1,0	225	450	1350	-	4,50	-	-
RNSM 0,4	225	450	1350	-	-	1,80	-
RNSM 0,8	225	450	1350	-	-	3,60	-
RNSM 1,0	225	450	1350	-	-	4,50	-
PCM 0,3 0,4	225	450	1350	1,80	-	-	1,35
PCM 1,0 0,4	225	450	1350	1,80	-	-	4,50
PCM 0,3 0,8	225	450	1350	3,60	-	-	1,35
PCM 1,0 0,8	225	450	1350	3,60	-	-	4,50
PCM 0,3 1,0	225	450	1350	4,50	-	-	1,35
PCM 1,0 1,0	225	450	1350	4,50	-	-	4,50
MSM 0,3 0,4	225	450	1350	-	1,80	-	1,35
MSM 1,0 0,4	225	450	1350	-	1,80	-	4,50
MSM 0,3 0,8	225	450	1350	-	3,60	-	1,35
MSM 1,0 0,8	225	450	1350	-	3,60	-	4,50
MSM 0,3 1,0	225	450	1350	-	4,50	-	1,35
MSM 1,0 1,0	225	450	1350	-	4,50	-	4,50
NSM 0,3 0,4	225	450	1350	-	-	1,80	1,35
NSM 1,0 0,4	225	450	1350	-	-	1,80	4,50
NSM 0,3 0,8	225	450	1350	-	-	3,60	1,35
NSM 1,0 0,8	225	450	1350	-	-	3,60	4,50
NSM 0,3 1,0	225	450	1350	-	-	4,50	1,35
NSM 1,0 1,0	225	450	1350	-	-	4,50	4,50

PC\*: Modifiye polikarboksilat esaslı polimer.

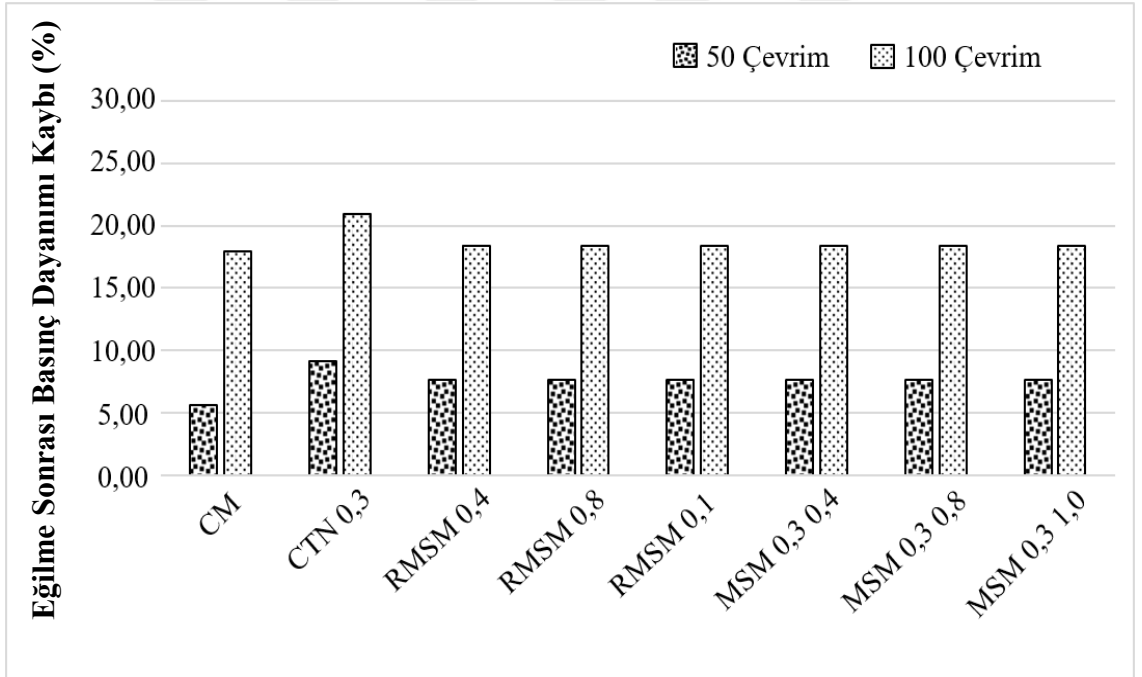
MS\*\*: Melamin sülfonat polimeri esaslı sıvı.

NS\*\*\*: Naftalin sülfonat esaslı sıvı.

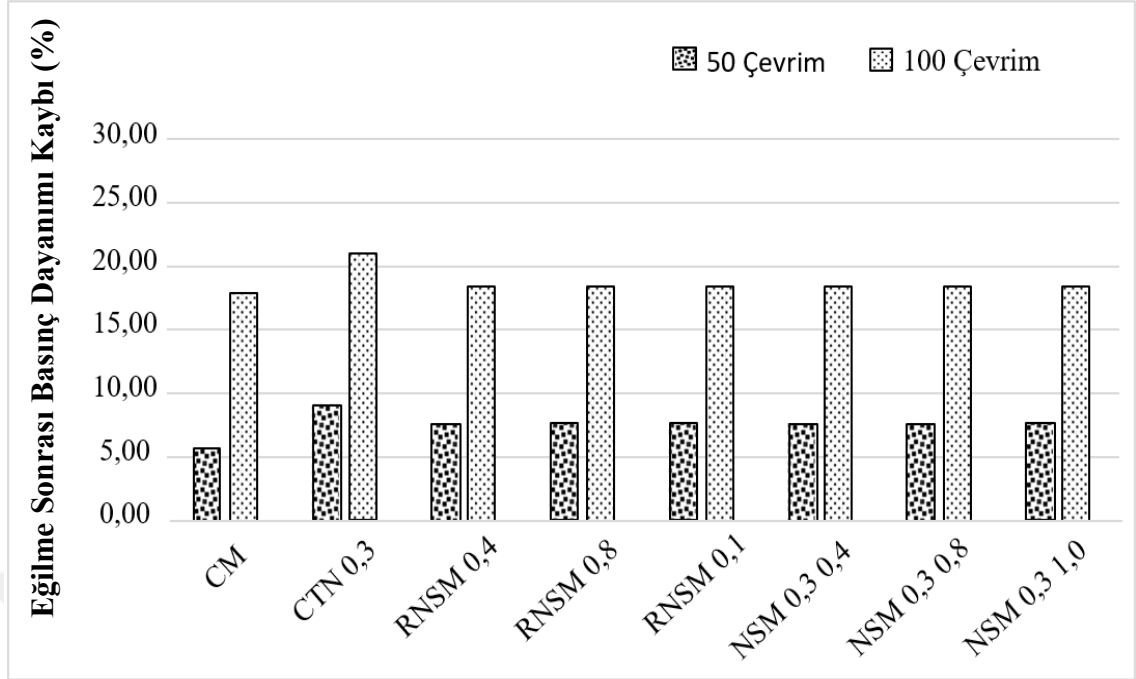
Değer birimi tüm malzemelerde gramdır.



**Şekil 2.15.** %0,3 Kitin ve farklı dozajda PCM tipi katkı ilavesi ile elde edilen eğilme sonrası basınç dayanımı kaybı oranları (Moralioğlu 2015)



**Şekil 2.16.** %0,3 Kitin ve farklı dozajda MSM tipi katkı ilavesi ile elde edilen eğilme sonrası basınç dayanımı kaybı oranları (Moralioğlu 2015)



**Şekil 2.17.** %0,3 Kitin ve farklı dozajda NSM tipi katkı ilavesi ile elde edilen eğilme sonrası basınç dayanımı kaybı oranları (Moralıoğlu 2015)

Dhir ve Jones (1999) tarafından yapılan araştırmada, betonda uçucu kül, silis dumanı, metakaolin kullanımının klorür geçirimsizliği üzerine etkisini incelenmiştir. Sonuçlara göre, mineral katkı içermeyen kontrol karışımının klor iyon geçirgenliği UK içeren karışıma kıyasla 2-4 kat daha fazla olmuştur. SD veya MK içeren karışım bu bölümde en başarılı karışım olmuştur.

Jamal vd. (2003), tarafından yapılan bir çalışmada, metakaolin kullanımının beton numunelerin mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, farklı oranlarda metakaolin içeren beton numuneleri üretilmiştir. Deney sonuçlarına göre, metakaolin kullanımının betonun durabilite ve mekanik özelliklerini olumlu etkilediği ifade edilmiştir.

Taşdemir (2003), tarafından yapılan diğer bir çalışmada mineral katkıların ve kür şartlarının betonun kılcallık katsayısına etkisini araştırmıştır. Sonuç olarak; betonun basınç dayanımının artmasıyla kılcallık katsayısının azaldığını ve kür şartlarının çok duyarlı olduğunu tespit etmiştir.

Uyan vd (2003), akışkanlaştırıcı katkı ve kür koşullarının betonun geçirimsizlik özellikleri üzerine etkileri başlıklı makalesine göre; dayanıklı bir beton üretiminde dikkate alınan en önemli faktörlerden betonun geçirimsiz olmasından bahsedilmiştir. Akışkanlaştırıcı katkıların ve değişik kür koşullarının betonun su emmesi, kılcal geçirimsizliği ve basınç dayanımına etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla 260, 280, 300 ve 340 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajlı katkısız ve katkılı betonlar havada ve su içinde tutulmuştur. Deneysel çalışma sonunda havada kür edilmiş betonların su emme ve kılcallık miktarının suda kür edilmiş betonların su emme ve kılcallık miktarının suda kür edilenlere göre daha da arttığı belirtilmiştir. Akışkanlaştırıcı kullanılarak w/c oranı düşürülen betonların basınç dayanımı ve dayanıklılığının büyük oranda arttığı tespit edilmiştir.

Wenzhong ve Peter (2003) tarafından yapılan bir araştırmaya göre, normal beton ve KYB betonlarda kılcallık geçirimsizlik katsayısı karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, C40 ve C60 sınıflı normal beton ve KYB beton numuneleri üretilmiştir. Deney sonuçlarına göre, KYB numunelerin su emme ve kılcallık katsayısının normal beton numunelerinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Yıldırım ve arkadaşları (2003) yaptığı bir çalışmada, çimento dozajı ve su azaltıcı katkı kullanımının beton karışımlarının geçirgenliğine etkisini araştırmıştır. Bu amaçla, iki farklı PRA katkılı dozajda çimento kullanılmıştır. Üretilen numunelerin basınç dayanımı ve su emme değerleri tespit edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, PRA katkı kullanımının geçirgenliği olumlu ancak, çimento dozajının artmasının karışımların geçirgenlik özelliğini olumsuz etkilediği tespit edilmiştir.

Özger (2011) tez çalışmasında, kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımlarında çimento yerine kısmen uçucu kül, kireçtaşı tozu ve kumtaşı tozu kullanımının karışımların durabilite özelliklerine etkisini incelemiştir. Bu amaçla, kontrol karışımına ilaveten 3 seri karışım daha üretilmiştir. Birinci seride çimentonun yerine ağırlıkça %20, 30 ve 40 oranında UK, ikinci seride %24, 36 ve 48 oranlarında filler kireçtaşı tozu ve üçüncü seride ise aynı oranda filler kum taşı tozu kullanılmıştır. Böylece, 10 farklı beton karışımı hazırlanmıştır. Deney sonuçlarına göre, mineral katkı kullanımının beton geçirgenliğini olumlu etkilediği ve KYB betonların sülfat saldırısından etkilenmediği tespit edilmiştir.

Uluöz (2011) tarafından yapılan başka bir çalışmada, mineral katkı kullanımının basınç dayanımına etkisi incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, UK ikameli betonların basınç dayanımlarının azalmasına karşın SD ikamelilerde belirgin bir artış görüldüğü ifade edilmiştir.

Başka bir çalışmada Dinakar (2013) ise, uçucu kül kullanımının KYB'lerin durabilite performansına etkisini incelemiştir. Bu amaçla, %10, %30, %50 ve %70 oranlarında çimento yerine UK ikameli kendiliğinden yerleşen betonlar üretilmiştir. Deney sonuçlarına göre, dayanım ve dayanıklılık açısından %30 UK içeren karışım en iyi performansı sergilemiştir.

Kandil (2014) yaptığı bir çalışmada, beton karışımlarında çimento yerine kısmen ikame edilen UK ve SD'nin karışımların klorür geçirimsizliğine etkisini incelemiştir. Deney sonuçlarına göre, UK ve SD'nin kullanım oranının artmasıyla beton numunelerinin klor geçirgenliğinin arttığı tespit edilmiştir.

Ullah-Khan ve arkadaşları (2014) yaptığı bir çalışmada, farklı tür mineral katkı kullanımının normal ve yüksek dayanımlı betonların bazı özelliklerine etkisini incelemiştir. Bu amaçla, uçucu kül (UK), silis dumanı (SD), öğütülmüş granül fırın cürufu (YFC), metakaolin (MK) ve pirinç kabuğu külü (PKK) gibi mineral katkıları betonda çimento yerine kısmen kullanmıştır. Yazarlar, mineral katkı maddelerini kimyasal olarak aktif mineral katkı ve mikro dolgu mineral katkı olmak üzere 2 farklı kategoride ayırmışlardır. Deney sonuçlarına göre, kimyasal olarak aktif mineral katkı maddeleri işlenebilirliği ve beton zamanını azaltmış, ancak hidrasyon ve reaktivite ıslısını arttırmıştır. Diğer taraftan, mikro-dolgu mineral katkıları ise tam tersi bir etki göstermiştir.



### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde deneysel çalışmanın gerçekleştirilmesinde kullanılan malzemeler ve uygulanan metotlar hakkında bilgi verilmiştir.

#### 3.1. Malzemeler

Burada, hamur ve harç karışımlarında kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi, fiziksel özellikleri, malzeme oranı ve yayılma değerleri verilmiştir.

##### 3.1.1. Çimento

Çalışma kapsamında Bursa Çimento Fabrikasından temin edilen CEM I 42.5 R tipi portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentoya ilişkin fabrikadan temin edilen kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmektedir.

**Çizelge 3.1.** Çimentonun kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri

Oksit (%)	Çimento	Fiziksel özellikleri		
SiO <sub>2</sub>	18,86	Özgül ağırlık	3,15	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,71	<b>Mekanik özellikleri</b>		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,09			
CaO	62,70	1 günlük	14,7	
MgO	1,16	2 günlük	26,80	
SO <sub>3</sub>	2,39	Basınç dayanımı (MPa)	7 günlük	49,80
Na <sub>2</sub> O	0,29		28 günlük	58,5
Na <sub>2</sub> O+0.658 K <sub>2</sub> O	0,92	<b>İncelik</b>		
Cl <sup>-</sup>	0,01			
Çözünmeyen kalıntı	0,32	Özgül yüzey (Blaine, cm <sup>2</sup> /g)	3530	
Kızdırma kaybı	3,20	0,045 mm elekte kalıntı (%)	7,6	
Serbest CaO	1,26			

##### 3.1.2. Agrega

Harç karışımlarında, agrega olarak CEN standart kum kullanılmıştır. Standart kumun özgül ağırlığı ve su emme kapasitesi, TS EN 1097-6 “Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 6: Tane Yoğunluğunun ve Su Emme Oranının Tayini” standardına uygun olarak sırasıyla, 2,72 ve % 0,7 olarak elde edilmiştir. TS EN 196-1 “Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım tayini” standardına uygun tane boyut dağılımı ise Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Standart kumun tane boyu dağılımı (CEN, TS EN 1097-6)

Kare Göz Açıklığı	Kalan (%)	Kümülatif Elekte Kalan (%)
2,00	0	0
1,60	4,32	7±5
1,00	33,98	33±5
0,50	67,11	67±5
0,16	86,85	87±5
0,08	99,83	99±5

### 3.1.3. Katkı maddeler

#### *Mineral katkıları*

Karışımlarda mineral katkı olarak farklı oranlarda uçucu kül ve metakaolin çimento yerine kullanılmıştır. Üretici firma tarafından verilen uçucu kül ve metakaolin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri, Çizelge 3.3'te verilmiştir.

**Çizelge 3.3.** Uçucu kül ve Metakaolin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri

İçerik	UK	MK	Fiziksel Özellikleri	UK	MK
	(Yüzde)			Puzolanik Aktivite İndeksi	
SiO <sub>2</sub>	59,22	56,10	Özgül Ağırlık	2,31	2,52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,86	40,23	Blaine yüzeyi (cm <sup>2</sup> /g)	4300	14600
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,31	0,85			
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	88,39	0,00			
MgO	1,31	0,16	7 günlük (%)	70,9	98,03
Na <sub>2</sub> O	0,41	0,24	28 günlük (%)	77,7	104,50
K <sub>2</sub> O	1,51	0,51	90 günlük (%)	91,2	110,21
SO <sub>3</sub>	0,17	0,00			
CaO	3,09	0,19			
Serbest CaO	1,26	0,00			

## ***Kimyasal katkılar***

### *Su azaltıcı katkı*

Karışımlarda istenilen yayılma değerini sağlamak için farklı oranlarda tek tip polikarboksilat-eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Kullanılan su azaltıcı katkının üretici fabrika tarafından verilen bazı özellikleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

**Çizelge 3.4.** Su azaltıcı katkıya ait özellikler

<b>Tip</b>	<b>Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Katı Madde Miktarı (%)</b>	<b>pH Değeri</b>	<b>Klorür İçeriği (%)</b>	<b>Alkali İçeriği (Na<sub>2</sub>O) (%)</b>
<b>Su azaltıcı Katkı</b>	1,097	36,35	3,82	<0,1	<10

### *Geçirgenlik azaltıcı katkı (PRA)*

Harç ve hamur karışımlarında, geçirgenlik azaltıcı katkıların (PRA) etkisini incelemek amacı ile 2 farklı firmanın ticari ürünü olan 3 adet "PRA" temin edilmiştir. Daha öncede vurgulandığı gibi "PRA" içeren karışımlarda, söz konusu katkının kullanım oranı çimento ağırlığının %1 ve %2'si olarak sabit tutulmuştur ve toplam 6 adet geçirgenlik azaltıcı katkı kullanılmıştır. Kullanılan katkılar "PRA-A", "PRA-B" ve "PRA-C" olarak isimlendirilmiştir. Geçirgenlik azaltıcı katkılar ile ilgili üretici firma tarafından verilen detaylı bilgiler aşağıda açıklanmıştır.

#### *PRA-A*

Üretici firma bayanına göre, söz konusu katkı karışımlarda hava sürükleyerek kapiler boşlukları tıkayarak geçirimsizlik sağlamaktadır. Bu katkının üretici firma tarafından temin edildiğinde kimyasal özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

**Çizelge 3.5.** "PRA-A" isimli geçirgenlik azaltıcı katkıya ait kimyasal özellikler

<b>Özellikler</b>	<b>Analiz Sonuçları</b>
Görünüm	Ayrışma yok
Renk	Kahverengi
Bağlı yoğunluk, (g/cm <sup>3</sup> )	1,115
Katı madde miktarı %	21,85
pH değeri	9,02
Klorür içeriği	0,015
Alkali miktarı (Na <sub>2</sub> O) %	0,320

Üretici firma tarafından tavsiye edilen kullanım miktarı

Karışım dizaynı içerisinde bulunan toplam bağlayıcının ağırlıkça % 0,4 ila % 0,7'si aralığında kullanılması üretici firma tarafından tavsiye edilmiştir. Bu oran harç karışım dizaynında kullanılan çimento, mineral katkı, kum, su bileşenleri ve ayrıca istenilen taze ve sertleşmiş harç özelliklerine göre değişim göstermektedir. Bu nedenle, kullanım oranı istenilen özelliklere göre laboratuvar denemeleri yapılmalı ve karışım oranı belirlenmelidir. Yüksek dozda kullanılması durumunda priz gecikmesi ve hava sürüklenme etkisinde artış olabilir. Bilindiği gibi beton karışımındaki hava miktarının artışı dayanımı olumsuz etkilemektedir. Söz konusu bu katkıının üretici firma tarafından bayan edilen avantajları aşağıda sıralanmıştır. Çimentolu sistemlerde uygun oranlarda kullanıldığı takdirde karışımların;

- Agresif kimyasallara karşı dayanıklılığını arttırır,
- Donma-çözölmeye karşı dayanıklılığı iyileştirir,
- Kloriyon geçirgenliği azaltır,
- Su geçirgenliğini azaltır,
- Pozitif ve negatif yönden gelen su basıncına karşı direnci arttırır ve
- Yüzeyinin boşluksuz ve pürüzsüz olmasını sağlar.

### PRA-B

Üretici firma bayanına göre, söz konusu bu katkı karışımlardaki gözenekleri ve kapiler boşlukları çözünmeyen kalıntı içerdiğinden dolayı doldurarak yapısal su geçirimsizliği sağlamaktadır. Ayrıca, söz konusu katkının az miktarda hava sürükleyici özelliğine sahip olduğu üretici tarafından iddia edilmiştir. Bu özellik sayesinde de karışımların kapiler boşluklarının tıkanmasına sebebiyet vermektedir. Bu katkının kimyasal özellikleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

**Çizelge 3.6.** "PRA-B" isimli geçirgenlik azaltıcı katkıya ait kimyasal özellikler

Özellikler	Analiz sonuçları
Görünüm	Ayrışma yok
Renk	Kahverengi
Bağıl yoğunluk, (g/cm <sup>3</sup> )	1,095
Katı madde miktarı %	12,45
pH değeri	10,30
Klorür içeriği	0,025
Alkali miktarı (Na <sub>2</sub> O) %	0,250

Söz konusu bu katkının üretici firma tarafından bayan edilen avantajları aşağıda verilmiştir. Çimentolu sistemlerde uygun oranlarda kullanıldığı takdirde karışımların;

- Agresif kimyasallara karşı dayanıklılığı artar,
- Sülfata karşı direncini artırır,
- Donma-çözölmeye karşı dayanımını artırır,
- Kloriyon geçirgenliğini azaltarak, donatı korozyon riskini azaltır,
- Kalıcı ve yapısal su geçirimsizlik etkisi yaratır,
- Pozitif ve negatif yönden gelen su basıncına karşı direnci artırır ve
- Erken ve nihai dayanıma olumlu yönde etkisi vardır.

### PRA-C

Üretici firma bayanına göre "PRA-C" katkısı su izolasyonu gerektiren, harç, sıva ve şaplarda geçirimsiz bir tabaka teşkili için kullanılan üniversal bir katkı türüdür. Üretici firma iddiasına dayanarak söz konusu "PRA-C" katkı yüksek oranda hava sürükleyici etkisine sahip olduğundan uygun oranda karışımda kullanıldığında kapiler boşlukları tıkayarak geçirgenliğinin azalmasına sebep olmaktadır, Bu katkının üretici firma tarafından temin edildiğinde kimyasal özellikleri çizelge 3.7'de verilmiştir.

**Çizelge 3.7.** "PRA-C" isimli geçirgenlik azaltıcı katkıya ait kimyasal özellikler

Özellikler	Analiz sonuçları
Görünüm	Ayrışma yok
Renk	Açık sarı
Bağıl yoğunluk, (g/cm <sup>3</sup> )	1,04
Katı madde miktarı %	8
pH değeri	Alkali 9,72
Klorür içeriği	< 0,1
Alkali miktarı (Na <sub>2</sub> O) %	< 0,5

Söz konusu bu katkının üretici firma tarafından bayan edilen avantajları aşağıda verilmiştir. Çimentolu sistemlerde uygun oranlarda kullanıldığı takdirde karışımların;

- İşlenebilirliğini arttırarak yerleşme ve sıkışmasını kolaylaştırır,
- Dayanım ve kalıcılığını arttırır,
- Büzülme davranışlarını olumlu etkiler,
- Kloriyon geçirgenliğini azaltarak, donatı korozyon riskini azaltır ve
- Kalıcı ve yapısal su geçirimsizlik etki yaratır.

### 3.2.4. Su

Karışım suyu, çimento ve agrega ile birlikte betonu oluşturan temel malzemelerden birisidir. Su, beton üretiminde üç farklı amaç için kullanılmaktadır. Bunlar; (1) Çimento ve agrega ile betonun karılmasında, “karışım suyu olarak”, (2) yerleştirilen prizini almış taze betonun yüzeyine uygulanan “bakım ya da kür suyu” olarak, (3) betonda kullanılacak agregaların temizlenmesi ve karıştırıcının temizlenmesi adına, “yıkama suyu” olarak kullanılmaktadır. Bilindiği gibi, beton mukavemeti su/çimento oranına bağlıdır. Genel olarak içilebilir nitelik taşıyan bütün sular betonda kullanıma uygundur. Ancak, betonda kullanılacak suyun içilebilir özellikte olması şart değildir. Bir takım ön deneyler yapılmak kaydıyla, içilmeyen sularla bile gayet kaliteli beton üretilmektedir (Özkul ve ark. 1999). Bununla birlikte karışım suyu içinde bulunabilecek tuz, asit, yağ, şeker, lağım ve endüstriyel atıklar gibi bazı maddeler betonda istenmeyen etkiler yaratabilir. Karışım suyun analizlerle belirlenmesi ve kalitesinin belli aralıklarla denetlenmesi şarttır. Bu çalışmada, karma suyu olarak Uludağ Üniversitesi içme suyu kullanılmıştır.

### 3.3. Karışımların Hazırlanması

Bu başlıkta üretilen hamur ve harç karışımlarının özellikleri detaylı olarak açıklanmıştır. Daha önce de vurgulandığı gibi çalışma kapsamında, metakaolin (MK) ve uçucu külün (UK) farklı oranlarda çimento yerine kullanılmasının hamur ve harç karışımları üzerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, mineral katkı içermeyen kontrol karışımına ilaveten, ikili ve üçlü bağlayıcı sisteme sahip üç farklı seri hamur ve harç karışımları hazırlanmıştır. İkili bağlayıcı sisteme sahip birinci ve ikinci serilerde, çimentonun yerine ağırlıkça sırasıyla, %20 ve %10 oranında uçucu kül ve metakaolin kullanılmıştır. Üçlü bağlayıcı sisteme sahip hamur ve harç karışımlarında ise, çimento ağırlığının %20’si ve %10’i oranında sırasıyla, uçucu kül ve metakaolin çimento ile ikame edilmiştir. Tekli bağlayıcı sisteme sahip kontrol karışımında ise bağlayıcı olarak portland çimentosu kullanılmıştır. Karışımların isimlendirilmesi içerdiği mineral katkı türüne göre yapılmıştır. Örneğin mineral katkı içermeyen tekli bağlayıcı sisteme sahip kontrol karışımı (K) ile gösterilmiştir. Hem uçucu kül ve hem metakaolin içeren üçlü bağlayıcı sisteme sahip karışım (KUM) olarak adlandırılmıştır. Geçirgenlik azaltıcı katkı (PRA) içeren karışımlar

kullanılan geçirgenlik azaltıcı katkı ismine ve kullanım oranına göre isimlendirilmiştir. Örneğin %1 oranında "PRA-A" içeren harç karışımı "PRA-A1" ile simgelenmiştir. Ancak, çimento ağırlığının %2'si kadar "PRA-A" içeren karışım "PRA-A2" isim ile gösterilmiştir.

### **3.3.1. Çimento hamuru karışımlarının hazırlanması**

Çalışmanın birinci aşamasında, çimento hamuru karışımları hazırlanarak çimento-katkı uyumunu araştırmak amacıyla Marsh-hunisi akış süresi ve mini-çökme deneyleri yapılmıştır. Önceki çalışmalarda önerilen 0,35-0,40 su/çimento oranı referans alınarak bu çalışmada tüm hamur karışımlarında su/çimento oranı 0,35 olarak seçilmiş, çimento ve su miktarları sabit tutulmuştur (Aitecin 2004). Bu amaçla, hem geçirgenlik azaltıcı katkı ve hem de mineral katkı içermeyen kontrol karışımına ilaveten 3 farklı mineral katkılı karışım (K-KU-KM-KUM) üretilmiştir. Daha sonra üretilen söz konusu bu 4 karışımda çimento ağırlığının %2'si kadar 3 farklı geçirgenlik azaltıcı katkı kullanılarak 12 farklı karışım hazırlanmıştır.

Geçirgenlik azaltıcı katkı (PRA) içeren karışımlar kullanılan geçirgenlik azaltıcı katkı ismine göre isimlendirilmiştir. Örneğin %2 oranında "PRA-A" içeren kontrol hamur karışımı "K-PRA-A2" ile simgelenmiştir. Hem mineral ve hem de geçirgenlik içeren karışımların adlandırılması örnek olarak uçucu kül ve çimentonun %2'si kadar "PRA-A" geçirgenlik azaltıcı katkısı içeren karışımı "KU-PRA-A2" ile simgelenmiştir. Karışımların içerdiği malzeme miktarı ve isimlendirilmesi Çizelge 3.8'de verilmiştir.



**Çizelge 3.8.** Hamur karışımlarının üretiminde kullanılan kütlece malzeme miktarları (g) ve yayılma değerleri (mm)

Hamur Karışımı	Çimento	Uçucu Kül	Metakaolin	Su	Su/ç	PRA*	SA**	Mini Çökme (mm)
<b>K</b>	700	0	0	245	0,35	0	3,5	167,5
<b>KU</b>	560	140	0	245	0,35	0	3,5	205
<b>KM</b>	630	0	70	245	0,35	0	3,5	157,5
<b>KUM</b>	490	140	70	245	0,35	0	3,5	100
<b>K-PRA-A2</b>	700	0	0	245	0,35	14	3,5	110
<b>KU-PRA-A2</b>	560	140	0	245	0,35	14	3,5	120
<b>KM-PRA-A2</b>	630	0	70	245	0,35	14	3,5	130
<b>KUM-PRA-A2</b>	490	140	70	245	0,35	14	3,5	107,5
<b>K-PRA-B2</b>	700	0	0	245	0,35	14	3,5	125
<b>KU-PRA-B2</b>	560	140	0	245	0,35	14	3,5	120
<b>KM-PRA-B2</b>	630	0	70	245	0,35	14	3,5	90
<b>KUM-PRA-B2</b>	490	140	70	245	0,35	14	3,5	100
<b>K-PRA-C2</b>	700	0	0	245	0,35	14	3,5	157,5
<b>KU-PRA-C2</b>	560	140	0	245	0,35	14	3,5	90
<b>KM-PRA-C2</b>	630	0	70	245	0,35	14	3,5	80
<b>KUM-PRA-C2</b>	490	140	70	245	0,35	14	3,5	95

PRA\*: Geçirgenlik azaltıcı katkı

SA\*\*: Su azaltıcı katkı

Yukarıda açıklanan her 16 seri hamur karışımı için su azaltıcı katkı içermeyen karışıma ilaveten çimento ağırlığının %0,5-%2 arasında değişen 7 farklı oranda su azaltıcı kullanılmıştır. Hamur karışımların hazırlaması mikser cihazında Şekil 3.1’de görüldüğü gibi aşağıdaki yöntemle yapılmıştır.

1. Su azaltıcı katkıyla suyu 30 saniye boyunca 62 çevrim/dakika hızla karıştırılmıştır.
2. Mikser durdurulup, çimento ekledikten sonra 30 saniye boyunca 62 çevrim/dakika hızla karıştırılmıştır.
3. Tekrar mikser durdurulup, spatula ile mikser kabının içindeki kenarlara yapışan ve karışmayan çimento hamuru temizlenmiştir.
4. Son olarak 2 dakika boyunca 125 devir/dakika hızla karıştırılmıştır.

Hazırlanan hamur karışımların üzerinde Marsh-hunisi akış süresi ve mini çökme deneyi yapılmıştır.



Şekil 3.1. Hamur karışımların üretiminde kullanılan mikser cihazı

### 3.3.2. Harç karışımlarının hazırlanması

Harç karışımlar, ASTM C109 “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars” standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Tüm karışımlarda su/bağlayıcı (s/b) ve kum/bağlayıcı (k/b) oranları ile yayılma değerleri sırasıyla, 0,485, 2,75 ve 270±20 mm olarak sabit tutulmuştur. Daha öncede vurgulandığı gibi bu amaçla mineral katkı ve geçirgenlik azaltıcı katkı içermeyen kontrol karışımına ilaveten (K), geçirgenlik azaltıcı katkı içermeyen mineral katkı içeren 3 seri harç karışımı daha üretilmiştir. Mineral katkılı karışımlarda birinci seride çimento yerine %20 uçucu kül (KU), ikinci seride çimento yerine %10 metakaolin (KM) kullanılmıştır. Üçüncü seride ise çimento ağırlığının %20 ve %10 oranında sırasıyla uçucu kül ve metakaolin ikame edilerek üçlü bağlayıcı sisteme sahip KUM isimli harç karışımları hazırlanmıştır. Daha sonra geçirgenlik azaltıcı ve mineral katkı içermeyen (K) karışımlarına çimento ağırlığının %1 ve %2 oranında 3 farklı geçirgenlik azaltıcı katkı ilave edilerek 6 adet geçirgenlik azaltıcı katkılı karışımlar üretilmiştir. Geçirgenlik azaltıcı katkı (PRA) içeren karışımlar, kullanılan geçirgenlik azaltıcı katkı ismine ve kullanım oranına göre isimlendirilmiştir. Örneğin %1 oranında "PRA-A" içeren harç karışımı "PRA-A1" ile simgelenmiştir. Ancak, çimento ağırlığının %2'si kadar "PRA-A" içeren karışım "PRA-A2" ile gösterilmiştir. Tüm karışımlar homojen bir şekilde otomatik programlanabilir çimento mikserinde Şekil 3.2'de görüldüğü gibi hazırlanmıştır. Karışımların hazırlama prosesi aşağıda özetlenmiştir:

1. Su çimentoyla 30 saniye boyunca 62 devir/dakika (yavaş) hızla karıştırılmıştır.
2. Mikser durdurulup, ıspatula ile mikser kabının içindeki kenarlara yapışan ve karışmayan çimento hamuru varsa sıyrılmıştır.
3. Karışım, 2 dakika boyunca 125 devir/dakika (hızlı) hızla karıştırılmıştır. Dolayısıyla katkı içermeyen karışımlarda toplam 2,5 dk olarak karıştırılmıştır.
4. Katkı içeren karışımlarda, yukarıda anlatılan 3 adet yönteme uygun olacak şekilde her farklı katkı ilave edilip 2 dk boyunca 125 devir/dakika (hızlı) hızla karıştırılmıştır.



**Şekil 3.2.** Harç karışımların mikser cihazında üretimi ile ilgili görünüm

Harç karışımlarının isimlendirilmesi ağırlıkça malzeme oranı ve kütlece malzeme miktarları Çizelge 3.9 ve 3.10’da verilmiştir. İstenilen yayılma değerini sağlamak için değişik oranlarda tek tip polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılmıştır.

**Çizelge 3.9.** Harç karışımlarının üretimde kullanılan ağırlıkça malzeme oranı

Numune Adı	Çimento	Su/ç	Kum/bağlayıcı	PRA*	SA**
K	1	0,485	2,75	0	0,0050
KU	1	0,485	2,75	0	0,0030
KM	1	0,485	2,75	0	0,0057
KUM	1	0,485	2,75	0	0,0055
PRA-A1	1	0,485	2,75	0,01	0,0030
PRA-A2	1	0,485	2,75	0,02	0,0020
PRA-B1	1	0,485	2,75	0,01	0,0029
PRA-B2	1	0,485	2,75	0,02	0,0030
PRA-C1	1	0,485	2,75	0,01	0,0040
PRA-C2	1	0,485	2,75	0,02	0,0050

PRA\*: Geçirgenlik azaltıcı katkı

SA\*\*: Su azaltıcı katkı

**Çizelge 3.10.** Harç karışımlarının üretiminde kullanılan kütlece malzeme miktarları (g) ve yayılma değerleri (mm)

Numune Adı	Çimento	Uçucu Kül	Metakaolin	Su	Kum	PRA*	SA**	Yayılma Miktarı (mm)
K	500	0	0	242,5	1375	0	2,50	265
KU	400	100	0	242,5	1375	0	1,50	257
KM	450	0	50	242,5	1375	0	2,85	257
KUM	350	100	50	242,5	1375	0	2,75	265
PRA-A1	500	0	0	242,5	1375	5	1,50	275
PRA-A2	500	0	0	242,5	1375	10	1,00	280
PRA-B1	500	0	0	242,5	1375	5	1,45	252
PRA-B2	500	0	0	242,5	1375	10	1,50	262
PRA-C1	500	0	0	242,5	1375	5	2,00	250
PRA-C2	500	0	0	242,5	1375	10	2,50	250

PRA\*: Geçirgenlik azaltıcı katkı

SA\*\*: Su azaltıcı katkı

### 3.4. Çalışmada Uygulanan Deneyler

#### 3.4.1. Hamur karışımların deneyleri

##### *Marsh-hunisi akış süresi*

Hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süresi ve mini-çökme değerleri sırasıyla, Aitcin (Aitcin 2004) ve Kantro'nun (Kantro 1980) önerdiği yöntemlere göre yapılmıştır. Hazırlanan hamur karışımları standart bir Marsh-hunisi içine Şekil 3.3'te gösterdiği gibi dökülmüştür. 700 mm'lik hamur karışımının huniden aktığı süre ölçülmüştür. Elde edilen süre o karışımın Marsh-hunisi akış süresi olarak kaydedilmiştir. Marsh-hunisi akış süresi için hazırlanan hamur karışımı mini-çökme deneyi için de kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süresi deneyi görünümü

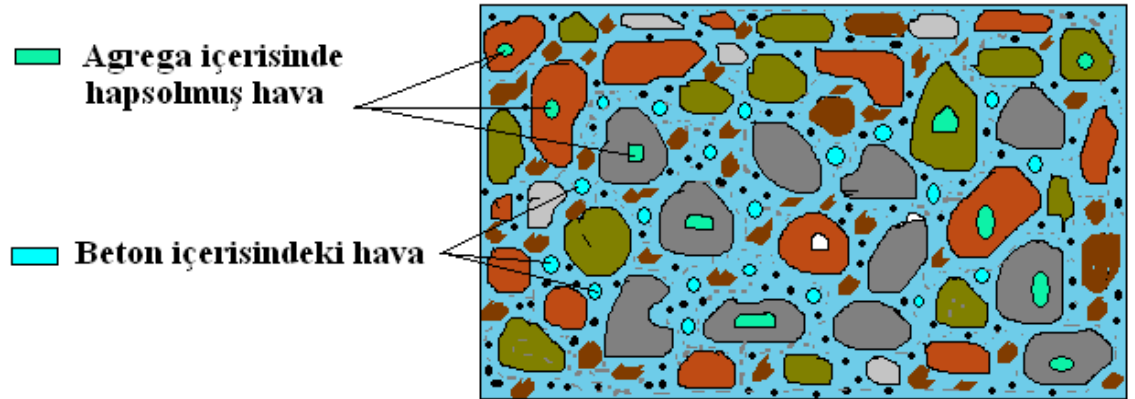
### ***Mini-çökme***

Bu deneyde, hamur karışımı düzgün bir yüzeyin merkezine konulan, alt iç çapı 38,1 mm, üst iç çapı 19 mm ve yüksekliği 57,2 mm olan kesik koni biçimli bir kalıbın içine doldurulur (Kantro 1980). Çökme kalıbı düşey olarak yavaşça kaldırılır ve yayılmanın tamamlanması için bir süre (10-20 sn) beklenir. Daha sonra cetvel yardımıyla birbirine dik iki doğrultuda yayılma çapı ölçülerek ortalaması alınır ve kaydedilir.

### **3.4.2. Harç karışımların deneyleri**

#### ***Hava yüzdesi***

Taze beton hava miktarı: beton içerisinde kapalı agrega boşlukları dışındaki var olan havanın hacminin beton hacmine oranının % olarak ifadesidir (Şekil 3.4). Beton içerisindeki havanın miktarının bilinmesi ne kadar önemli ise, havanın beton üzerindeki etkilerinin bilinmesi de bir o kadar önemlidir.



**Şekil 3.4.** Taze betonda hava miktarı (beton deneyleri 2006)

Taze beton içerisinde bulunan havanın belirlenmesinde amaç; taze betonun işlenebilirliğini, sertleşmiş betonun yoğunluğu, dayanımı, su geçirimsizliği, ısı ve ses yalıtımı gibi özelliklerini etkileyen beton içindeki havanın miktarının hacim metodu ile belirlenmesidir.

### *Hava içeriği miktarının ölçer yöntemi*

Harç karışımların hava içeriği miktarı, TS EN 12350-7 “Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 7: Hava muhtevasının tayini - Basınç yöntemleri” standardına, uygun olarak tayin edilmiştir. Harç karışımlarının hava yüzdesini ölçmek için Şekil 3.5’te gösterilen hava ölçer cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Hava ölçer cihazı ile ilgili görünüm



### ***Yayılma***

Harç karışımlarının yayılma değerleri ASTM C1437 “Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar” standardına uygun olacak şekilde ölçülmüştür. Daha öncede vurgulandığı gibi, istenilen yayılma değerini sağlamak için tek tip polikarboksilat-eter esaslı su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Bu aşamada kullanılacak olan yayılma tablasının görünümü şekil 3.6’da verilmiştir.



**Şekil 3.6.** Harç karışımlarının yayılma deneyi görünümü

Yayılma tablası, üzerine çimento harcının konulabileceği hareketli, düzgün yüzeyli bir üst plakadan ve bu plakanın üzerine çevirmeli kol ile belirli yükseklikten düşürülüp sarsmaya sebep olan üstteki plakanın menteşeyle bağlı olduğu destekli alt plakadan oluşmaktadır. Ayrıca üst plaka üzerine gelecek betonun yerleştirilmesi amacıyla metalden yapılmış kesik huni biçiminde kalıp kullanılmaktadır.

Deney esnasında yayılma tablası eğimi olmayan, düz ve yatay bir zemine yerleştirilir. Tabla ve kalıp temizlendikten sonra kalıp plakanın tam ortasına yerleştirilir. Hazırlanan

çimento harcı kalıba sıkıştırma çubuğu ile 10 kez şişlenerek doldurulur ve kalıptan taşan fazla harç sıyrılarak kalıp ile harç seviyesi eşitlenir. Kalıp yüzeyinin sıyrılmasından sonra kenarlarından tutularak yavaşça düşey olarak yukarı doğru çekilir. Bir süre bekledikten sonra alt plakadaki kol çevrilerek üst plaka üzerine sarsma etkisi uygulanır. Son olarak üst plaka üzerinde yayılan harç tabakasının genişliği en büyük olan 3 boyutu plaka kenarlarına paralel doğrultuda cetvelle ölçülür ve elde edilen değerlerin matematiksel ortalaması hesaplanarak yayılma değerleri tayin edilir. Bu işlem hazırlanan bütün çimento harcı serileri için ayrı ayrı uygulanır.

### ***Basınç dayanımı***

Harç karışımlarının, 1, 3, 7, 28 ve 90-günlük basınç dayanımı 50 mm'lik küp numuneler üzerinde ASTM C109 "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars" standardına göre belirlenmiştir. Her seri karışım için 3 adet küp numune üretilmiştir. Üretilen numuneleri, deney gününe kadar standart koşulda havuzda kürlenmiştir. Şekil 3.7'de harç karışımlarının basınç dayanımı deneyi gösterilmiştir.



**Şekil 3.7.** Basınç dayanımı ölçümü ile ilgili görünüm

### *Su emme deneyi*

Harç karışımlarının 28 ve 90-günlük su emme kapasitesi 50 mm'lik küp numuneler üzerinde ASTM C642-13 “Standard Test Method for Density, Absorption and Voids in Hardened Concrete” standardına göre elde edilmiştir. Bu deneyde 28 ve 90 gün boyunca suda bekletilen numuneler sudan çıkartılıp yüzeyi havlu ile kurutulup kuru doygun yüzey (saturated surface dry) ağırlığı ( $b$ ) ölçülmüştür. Daha sonra 105°C bir etüvde değişmeyen ağırlığa kadar kurutulup, ağırlığı ( $a$ ) ölçülmüştür. Harç karışımlarının su emme kapasitesi Denklem 3.1'e göre hesaplanmıştır.

$$SE = \frac{b-a}{a} \times 100 \quad (3.1)$$

### *Ultrases geçiş hızı (UPV)*

Numunelerin donma-çözülme çevrim öncesi TS EN 12504-4 “Beton Deneyleri -Bölüm 4: Ultrases Geçiş Hızının Tayini” standardına göre ultrases geçiş hızı ölçülmüştür. Daha sonra her 50 çevrimde bir numunelerin ultrases geçiş hızı değeri ölçülmüştür. Böylece, 300 çevrime kadar donma-çözülme kaynaklı numunelerde ultrases geçiş hızı değişim grafiği çizilmiştir. Bu deneyde 250 khz ayarladığımız frekansla numunelerin saf ve pürüzsüz olan yüzeylerine özel jel sürdükten sonra küçük prablarla Şekil 3.8'de görüldüğü gibi ölçülmüştür. Malzemenin içerisinden geçen P dalgasının hızı ile malzeme dayanımı arasında doğrudan bir ilişki yoktur (Binici 2009). Ancak, P dalgasının hızı ile geopolimerin yoğunluğu arasında belirli bir ilişki bulunmaktadır. Yoğunluğu az olan geopolimerde, yani içerisinde daha çok boşluk bulunan bir geopolimerde, P dalgasının geopolimerin bir yüzeyinden diğerine ulaşabilme süresi daha uzundur. Ya da geopolimer içerisindeki boşluk miktarı arttıkça P dalgasının hızı daha küçük olmaktadır. Numunelerin 28 ve 90 günlük suda kürlenmişten sonra ultrases geçiş hızı aşağıdaki Denklem 3.2'ye göre hesaplanmıştır.

$$V = \frac{L}{t} \quad (3.2)$$

Burada:

$L$ : Numune boyutu (mm),  $t$ : ses dalgasının geçiş süresi ( $\mu$ .sn),  $V$ : ses hızıdır (km/sn).

### *Ultrases değerleri kullanılarak dinamik elastik modülü tayini*

Dinamik elastik modülü, öncelikle dayanıklılık testlerinde veya yerinde değerlendirmelerde betonun sağlamlığını değerlendirmek için kullanılır. Ancak, betonun dinamik yüklere (yani deprem veya darbe) maruz kalacak yapılarda kullanılması daha uygun bir değer olabilir. Numunelerin dinamik elastik modülü Denklem 3.3'te elde edilmiştir.

$$E_{dn} = \rho c^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (3.3)$$

Burada,

$E_{dn}$  = Betonun dinamik elastisite modülü (MPa),

$\rho$  = Sertleşmiş betonun yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>),

$c$  = Ultrases geçiş hızı (km/sn) ve

$\nu$  = Poisson oranıdır. Tüm karışımlarda betonun Poisson oranı 0,22 olarak alınmıştır.



**Şekil 3.8.** Ultrasonik ses geçiş hızı ile ilgili görünüm

### *Donma-çözülme direnci*

Karışımların 28 ve 90-günlük donma-çözülme direncini ölçmek için 60 adet 50 mm'lik küp numuneler hazırlanmıştır. Deney günü geldiğinde standart koşulda kürlenmiş numuneler sudan çıkartılmış Şekil 3.9'da gösterilen donma-çözülme kabineye yerleştirilmiştir. Karışımlara uygulanan donma-çözülme çevrimi, ASTM C666 "Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing" standardına uygun olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada havada donma, suda çözülme olarak hızlı yöntem uygulanmıştır. Deneyde donma sıcaklığı,  $-18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  ve çözülme sıcaklığı ise,  $5^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  aralığındadır. Donma süresi (maksimum sıcaklıktan minimum sıcaklığa varma süresi) 200 dakika, minimum sıcaklıktan maksimum ortam sıcaklığına varma süresi ise 60 dakika olarak 9 aşamada Şekil 3.10'da gösterildiği gibi ayarlanmıştır. 260 dakika süren bu işlem bir donma-çözülme çevrimi olarak kabul edilmiştir. Numunelerin donma-çözülme çevrim öncesi ağırlığı ölçülür ve donma-çözülme cihazına bırakılarak deney başlatılır. Daha sonra her 50 çevrimde bir, numunelerin ağırlığı ölçülür. Böylece, 300 çevrime kadar donma-çözülme kaynaklı numunelerde ağırlık değişim Denklem 3.4'ile hesaplanıp ve grafiği çizilmiştir.

$$W = [(W2 - W1) / W1] \times 100 \quad (3.4)$$



Şekil 3.9. Donma-çözülme kabineye yerleştirilmiş numuneler görünümü

ANA SAYFA		STEP PROGRAMI-1			---
STEP	SICAKLIK (°C)	RAMPA(dk)	TEST(dk)	ÇÖZME(dk)	
1	+20.00	10	10	0	
2	+15.00	5	5	0	
3	+10.00	5	5	0	
4	+5.00	5	5	0	
5	+0.00	5	5	0	
6	-5.00	10	5	0	
7	-10.00	20	20	0	
8	-15.00	30	30	0	
9	-20.00	40	45	60	
10	+0.00	0	0	0	

**Şekil 3.10.** Donma-çözülme cihazının ekran sayfasında görülen aşama ayarları

Karışımların donma-çözülme karşı direnci 2 farklı metotta kıyaslanmıştır. Birinci metotta karışımların her 50 donma-çözülme çevrim sonrası ağırlık kaybı ölçülmüştür. Bu işlem 300 donma-çözülme çevrimine kadar tekrarlanmıştır. İkinci metotta ise karışımların her 50 donma-çözülme çevrim sonrası 300 çevrime kadar ultrases geçiş hızı ölçülmüştür. Böylece karışımların durabilite faktörü değerleri irdelenmiştir. Karışımların ultrases geçiş hızı ölçümü aşağıda özetlenmiştir. Karışımların durabilite faktörü Denklem 3.5'te gösterildiği gibi elde edilmiştir.

$$D_f = \frac{n}{3} \left[ \frac{E_{dn}}{E_{d0}} \right] \quad (3.5)$$

Burada,  $n$ :300 çevrim,  $E_{dn}$  numunenin 300 donma-çözülme çevrim sonrası dinamik elastisite modülü,  $E_{d0}$  numunenin donma-çözülme maruz kalmadan önceki dinamik elastisite modülü. Durabilite faktörü değerinin öncelikle farklı beton karışımlarının karşılaştırılmasında, tercihen sadece bir değişkenin (agrega gibi) değiştiği zamanki ilgisi vardır. 40'tan küçük durabilite faktörü değeri, betonun muhtemelen tatmin edici olmadığını, 40 ile 60 arası değerlerin şüpheli olduğunu, 60'ın üzerindeki değerlerin ise betonun tatmin edici olduğunu gösterdiğini göstermektedir.

### ***Kuruma-büzülme***

Karışımların kuruma-büzülme rötresini incelemek amacı ile 25×25×285 mm prizmatik numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak 28 ve 90 gün boyunca sıcaklığı 20°C suda kürlenmiştir. Daha sonra kür havuzundan çıkarılıp sıcaklığı 20°C ve bağıl nemi %55 olan bir odada bekletilmiştir. Bu ortamda prizmatik numunelerin boy değişimi Denklem 3.6’da gösterildiği gibi ASTM C596-01 “Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement” Standardına göre hesaplanmıştır.

$$S = \frac{L_1 - L}{L_0} \times 100 \quad (3.6)$$

Burada,  $S$  numunenin büzülme yüzdesini,  $L_1$  kür havuzundan çıkarıldıktan sonra başlangıç ölçüm değerini,  $L$  geçen günlere göre periyodik ölçüm değerini,  $L_0$  efektif ölçüm boyunu 250 mm ifade etmektedir. Harç karışımlarının kuruma-büzülme rötresi ölçümüne ait görsel Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.11.** Harç karışımlarının kuruma-büzülme rötresi ölçümü

## **4. BULGULAR ve TARTIŞMA**

Daha öncede vurgulandığı gibi, bu çalışma üç farklı aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama; mineral ve geçirgenlik azaltıcı kullanımının hamur ve harç karışımlarının taze hal özelliklerin etkisine incelenmesi. İkinci aşama; mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkı kullanımının harç karışımlarının sertleşmiş hal özelliklerine etkisini incelenmesi. 3'üncü aşama; ikinci aşamada performans açısından seçilen en iyi mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkıların beraber kullanılmasının harç karışımlarının sertleşmiş hal özelliklerine etkisini incelenmesi.

### **4.1. Çalışmanın Birinci Aşamasında Elde Edilen Bulgular**

Daha öncede vurgulandığı gibi çalışmanın birinci aşamasında, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkı kullanımının çimento-su azaltıcı katkı uyumuna etkisini araştırmak amacı ile iki farklı seri hamur ve harç karışımı üretilmiştir. Birinci seride, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkı içermeyen kontrol (K) karışımına ilaveten çimento ağırlığının belli bir yüzdesi yerine uçucu kül (UK) ve metakaolin (MK) ikame edilerek tekli, ikili ve üçlü bağlayıcı sistemine sahip toplamda dörder adet hamur ve harç karışımı üretilmiştir. İkinci seride ise birinci seride üretilen toplamda dört adet kontrol ve mineral katkılı karışım çimento ağırlığının %1 ve %2'si oranında değişik etki mekanizmasına sahip iki farklı fabrika ürünü olan üç adet geçirgenlik azaltıcı katkı ilave edilecek toplamda 24 adet harç karışımı üretilmiştir. Ancak, bu seri kapsamında üretilen hamur karışımlarında geçirgenlik azaltıcı katkı çimento ağırlığının %2'si olarak tek oranda karışım ilave edilerek toplamda 12 adet hamur karışımı hazırlanmıştır.

#### **4.1.1. Geçirgenlik ve mineral katkı kullanımının hamur karışımlarının taze hal özelliğine etkisi**

Bu aşamada üretilen hamur karışımlarında Marsh-hunisi akış süresi ve mini çökme davranışları irdelenmiştir.



### ***Marsh-hunisi akış süresi***

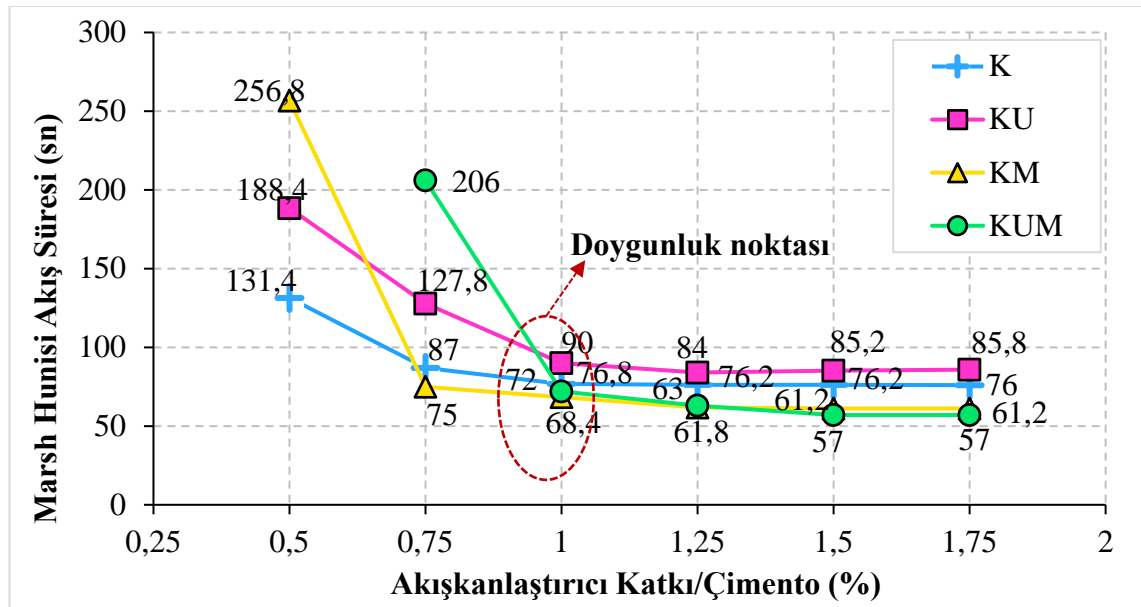
Hamur karışımlarının kontrol ve mineral katkı içeren serilerde Marsh-hunisi akış sürelerinin sonuçları Çizelge 4.1'de ve Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Çimento ağırlığının %0,5' inden daha az miktarda su azaltıcı katkı içeren hamur karışımları Marsh-hunisinden akmadığından bu karışımların akış süreleri ölçülememiştir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi, mineral katkı tipinden bağımsız olarak su azaltıcı katkı kullanım oranının artmasıyla hamur karışımlarının akış süreleri beklenildiği gibi azalmıştır.

Şekil 4.1'den anlaşıldığı gibi mineral katkı içeren hamur karışımlarında çimento ağırlığının %0,5'i kadar su azaltıcı katkı kullanıldığı zaman kontrol karışımına kıyasla Marsh-hunisi akış sürelerinde artış gözlenmiştir. "KU" ve "KM" karışımlarının başlangıç akış süreleri kontrol karışımına göre sırasıyla %43 ve %95 oranında fazla olmuştur. "KUM" karışımında ise %0,5 oranında su azaltıcı katkı kullanıldığında Marsh-hunisinden akış sağlanmamıştır. Genel olarak, "K" karışımı Marsh-hunisi akış süresi açısından diğer karışımlara göre en düşük performansı sergilemiştir. "KUM" ve "KM" karışımları Marsh-hunisi akış süresi açısından, %1 katkı oranından itibaren benzer davranışlar göstermiştir. Mardani-Aghabaglou ve ark. (2017b) göre, çimentolu sistemlerde yeterli miktarda su azaltıcı katkı bulunduğu takdirde bağlayıcı inceliğinin artışıyla beklenen tersine karışımların akış performansı olumlu etkilenmektedir. Yazarlar bunun nedenini su azaltıcı katkının daha ince taneler üzerine daha kolay adsorbe olduğu gerekçesi ile açıklamışlardır. Bu çalışmada da benzer sonuçlar gözlemlenmiştir. İncelik değeri kullanılan çimentoya kıyasla yaklaşık 4 kat daha fazla olan metakaolin içeren karışımlar %1 oranında su azaltıcı katkı içeriğine kadar akış performansı açısından kontrol karışımına kıyasla daha düşük performans göstermiştir. Ancak, bu oranın üstünde su azaltıcı katkı ilave edildiğinde metakaolin içeren karışımlar %1 oranında su azaltıcı katkı içeriğine kadar akış performansı açısından kontrol karışımına kıyasla daha düşük performans göstermiştir. Ancak, bu oranın üstünde su azaltıcı katkı ilave edildiğinde metakaolin içeren karışımlar kontrol karışımına kıyasla daha üstün akış performansı sergilemiştir. Mineral katkı tipinden ve içeriğinden bağımsız olarak tüm çimento-katkı ikilisi için doyunluk noktası, su azaltıcı katkı/çimento oranının %1 olduğu durumda tespit edilmiştir. Doyunluk noktasındaki akış süreleri dikkate alındığında "KM" ve "KUM" karışımları kontrol karışımına kıyasla Marsh-hunisinden sırasıyla yaklaşık %11

ve %7 daha hızlı aktığı anlaşılmıştır. Ancak, mineral katkı olarak sadece uçucu kül içeren "KU" karışımı ise kontrol karışımından %17 daha yavaş akış performansı göstermiştir. %1 ve daha yüksek oranlarda su azaltıcı katkı içeren hamur karışımlarına, sadece metakaolin veya uçucu kül ve metakaolinin beraber ilave edilmesiyle karışımların viskozitesinin azaldığı, sadece uçucu kül ilave edilmesiyle ise viskozitesinin arttığı düşünülmektedir. Bu bağlamda viskozitenin artması Marsh-hunisi akış sürelerini artırırken, viskozitesinin azalması akış süresini azaltmıştır.

**Çizelge 4.1.** Hamur karışımlarının mineral katkı içeren Marsh-hunisi akış süresi ve sıcaklık değerleri

Katkı/çimento oranı (kütlece %)		0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75
Akış süresi, sn	K	131,4	87	76,8	76,2	76,2	76
	KU	188,4	127,8	90	84	85,2	85,8
	KM	256,8	75	68,4	61,8	61,2	61,2
	KUM	-	206	72	63	57	57
Sıcaklık, °C	K	27	26,8	25,6	25	23	24
	KU	25,5	25,2	25	25	24,5	23,5
	KM	25,5	25,2	25	25	24,5	23,5
	KUM	30	30,7	28,4	28,1	28	27,7



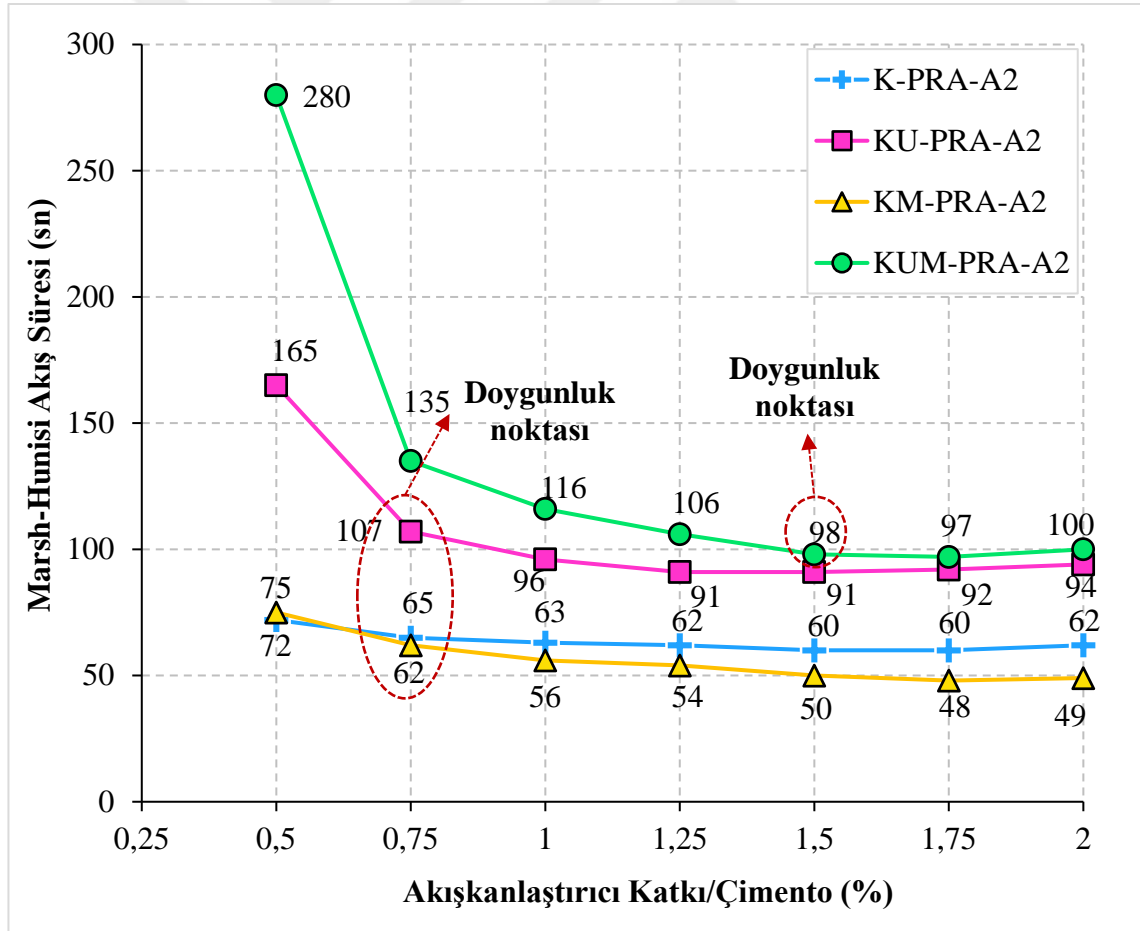
**Şekil 4.1.** Hamur karışımlarının mineral katkı içeren Marsh-hunisi akış süreleri

Kontrol, mineral katkı ve "PRA-A2" geçirgenlik azaltıcı katkı içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süreleri ve sıcaklık değerleri Çizelge 4.2'de ve Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

Şekil 4.2'den anlaşıldığı gibi hamur karışımlara "PRA-A2" katkısı ilave edildiğinde geçirgenlik azaltıcı katkı içermeyen karışımlara göre genel olarak başlangıç Marsh-hunisi akış sürelerinde ciddi mertebelerde azalmalar meydana gelmiştir. Ayrıca, "K-PRA-A2", "KU-PRA-A2" ve "KM-PRA-A2" karışımlarının doygunluk noktası, "PRA-A2" katkısı içermeyen "K", "KU" ve "KM" karışımlarına kıyasla daha düşük su azaltıcı katkı/çimento oranında (%0,75) gerçekleşmiştir. "PRA-A2" katkısı söz konusu karışımlarda bir miktar akışkanlaştırıcı etkide göstererek su azaltıcı katkı doygunluk noktasını %0,25 kadar düşürmüştür. Bu olumlu etkinin, karışımlara "PRA-A2" katkısının ilave edilmesiyle karışımların viskozitesinin azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Daha öncede vurgulandığı gibi, üretici firma beyanına göre "PRA-A2" katkı hava sürüklemek suretiyle geçirgenliği azaltmaktadır. Bu bağlamda "PRA-A2" katkısı karışıma hava kabarcıkları sürükleyip viskoziteyi azaltıcı etki sergilemiştir. Ancak "KUM-PRA-A2" karışımına %0,75 üzerinde su azaltıcı katkı ilave edilmesi durumunda karışımın akış performansı aynı miktarda su azaltıcı katkı içeren "KUM" karışımına göre olumsuz etkilenmiştir. Ayrıca söz konusu "KUM" karışımının doygunluk noktası su azaltıcı katkı/çimento oranının %1,5 olduğu durumda tespit edilmiştir. "KUM-PRA-A2" karışımının %1,5 oranında su azaltıcı katkı içermesi durumunda, "KUM" karışımına göre Marsh-hunisi akış performansında %72 kadar azalma meydana gelmiştir. Bu olumsuz etki uçucu kül ve metakaolinin birlikte kullanıldığı karışımda "PRA-A2" katkının kullanımı uyumsuzluğa sebebiyet vermesi sonucu viskozite değerlerindeki artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir.

**Çizelge 4.2.** Hamur karışımlarının "PRA-A" isimli %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı ve mineral katkı içeren Marsh-hunisi akış süresi ve sıcaklık değerleri

Katkı/çimento oranı (kütlece %)		0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2
Akış süresi, sn	<b>K-PRA-A2</b>	72	65	63	62	60	60	62
	<b>KU-PRA-A2</b>	165	107	96	91	91	92	94
	<b>KM-PRA-A2</b>	75	62	56	54	50	48	49
	<b>KUM-PRA-A2</b>	280	135	116	106	98	97	100
Sıcaklık, °C	<b>K-PRA-A2</b>	32,7	32,1	32	32,4	32,2	32,2	32
	<b>KU-PRA-A2</b>	32,2	32,8	31,3	30,3	30	30,5	30
	<b>KM-PRA-A2</b>	31	27,8	27,5	27,3	29,2	30,2	29,5
	<b>KUM-PRA-A2</b>	30,6	31,2	30,3	32,2	31,8	32,2	31



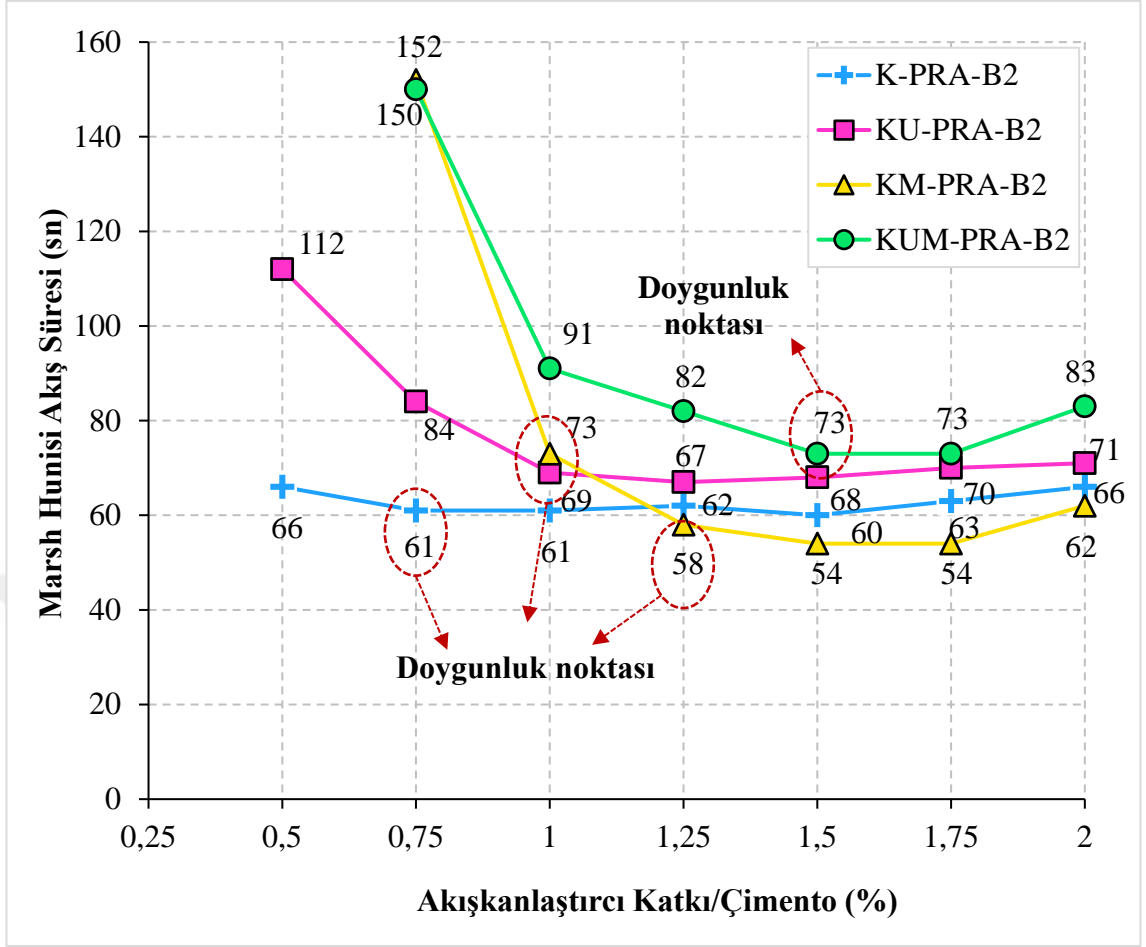
**Şekil 4.2.** Hamur karışımlarının "PRA-A" isimli %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı ve mineral katkı içeren Marsh-hunisi akış süreleri

Kontrol, mineral katkı ve "PRA-B2" geçirgenlik azaltıcı katkı içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süreleri ve sıcaklık değerleri Çizelge 4.3'te ve Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

Şekil 4.3'ten anlaşıldığı gibi kontrol karışımına ve mineral katkı içeren hamur karışımlara "PRA-B2" katkısı ilave edilmesi "KM-PRA-B2" karışımı hariç diğer karışımların başlangıç Marsh-hunisi akış süreleri olumlu etkilenmiştir. "PRA-B2" katkısı içeren tüm karışımların doygunluk noktaları farklı oranlarda görülmüştür. "K-PRA-B2" karışımının su azaltıcı katkı doygunluk noktası kontrol karışımına göre %0,25 kadar düşük olurken, "KM-PRA-B2" ve "KUM-PRA-B2" karışımlarında sırasıyla %0,25 ve %0,5 daha yüksek olmuştur. Doygunluk noktalarında "K-PRA-B2" ve "KU-PRA-B2" karışımları "PRA-B2" katkısı içermeyen "K" ve "KU" karışımlarına göre sırasıyla %29 ve %23 daha yüksek Marsh-hunisi akış performansı göstermiştir. Ancak "KUM-PRA-B2" karışımının doygunluk noktasında "KUM" karışımına göre Marsh-hunisi akış süresi %28 kadar yüksek olmuştur. "KUM-PRA-A2" karışımında olduğu gibi "PRA-B2" katkısı içeren "KUM-PRA-B2" karışımında da bağlayıcı-katkı uyumsuzluğundan dolayı akış süreleri genel olarak olumsuz olarak etkilenmiştir. Bu bağlamda karışımının viskozite değerlerinde artış olduğu düşünülmektedir.

**Çizelge 4.3.** Hamur karışımlarının "PRA-B" isimi %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı ve mineral katkı içeren Marsh-hunisi akış süresi ve sıcaklık değerleri

Katkı/çimento oranı (kütlece %)		0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2
		Akış süresi, sn	<b>K-PRA-B2</b>	66	61	61	62	60
<b>KU-PRA-B2</b>	112		84	69	67	68	70	71
<b>KM-PRA-B2</b>	-		152	73	58	54	54	62
<b>KUM-PRA-B2</b>	-		150	91	82	73	73	83
Sıcaklık, °C	<b>K-PRA-B2</b>	35,2	33,5	32,1	32,1	32,1	31,2	30,8
	<b>KU-PRA-B2</b>	30,3	30,5	32,5	33	32,8	32,1	32,3
	<b>KM-PRA-B2</b>	-	35	37	38	37,8	34	32,3
	<b>KUM-PRA-B2</b>	-	35	35,1	32,8	37,2	32,5	32



**Şekil 4.3.** Hamur karışımlarının "PRA-B" isimi %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı ve mineral katkı içeren Marsh-hunisi akış süreleri

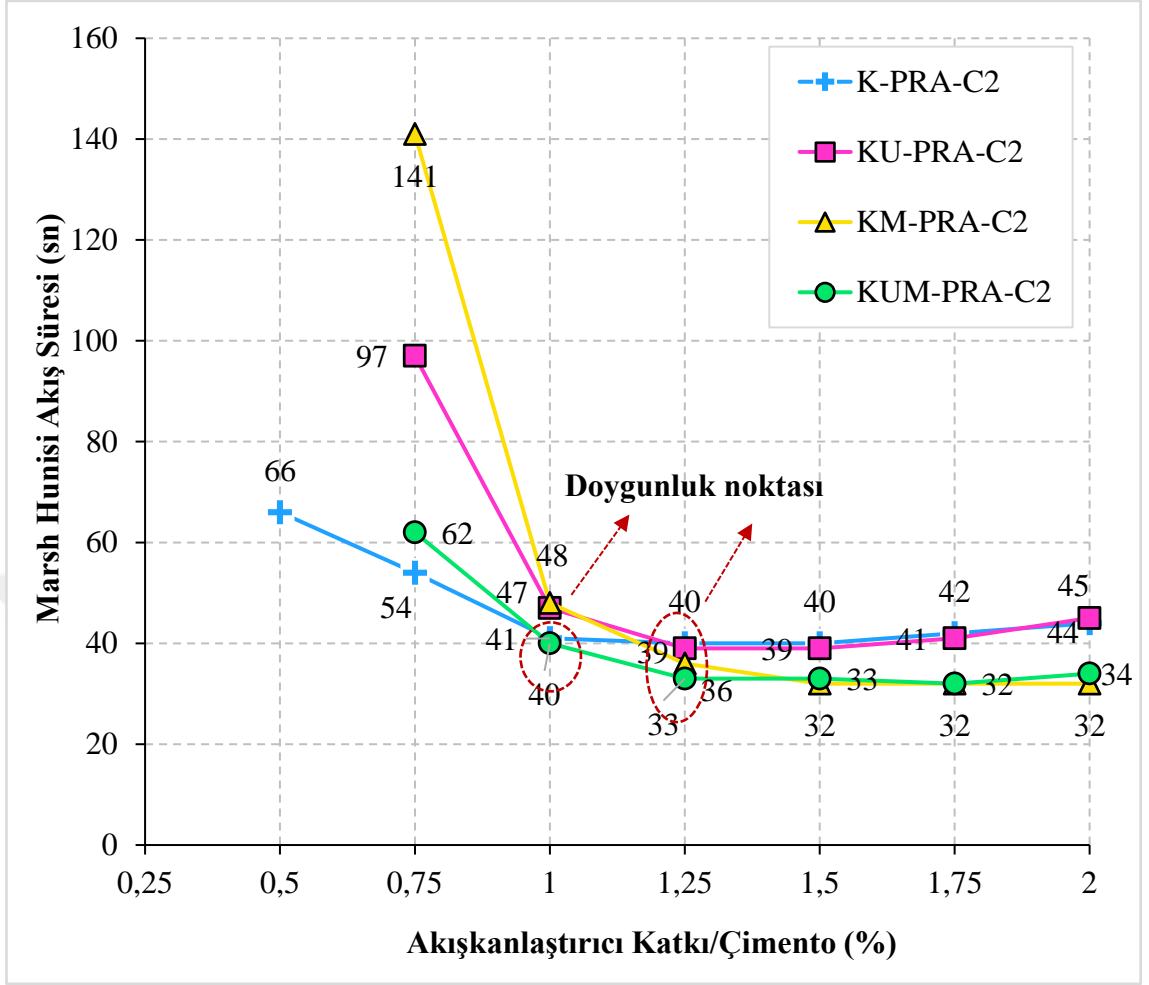
Kontrol, mineral katkı ve "PRA-C2" geçirgenlik azaltıcı katkı içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süreleri ve sıcaklık değerleri Çizelge 4.4'te ve Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

Şekil 4.4'ten anlaşıldığı gibi hamur karışımlara "PRA-C2" katkısı ilave edilmesi kontrol karışımı hariç mineral katkı içeren karışımların başlangıç Marsh-hunisi akışına olumsuz etkisi olmuştur. %0,75 oranında su azaltıcı katkı içeren karışımlara "PRA-C2" katkısı ilave edilmesi "KM-PRA-C2" karışımı hariç diğer tüm karışımların Marsh-hunisi akışında olumlu etki oluşturmuştur. Ancak karışımların akışkanlaştırıcı doygunluk noktasını düşürmede geçirgenlik azaltıcı katkı içermeyenlere göre olumlu bir etkisi olmamıştır. "K-PRA-C2" karışımı %1 oranında su azaltıcı katkı ilavesiyle doygunluk noktasına ulaşırken, diğer "KU-PRA-C2", "KM-PRA-C2", "KUM-PRA-C2" karışımlarına %1,25 oranında su azaltıcı katkı ilave edilmesiyle katkı doygunluk

noktasına ulaşmıştır. "KU-PRA-C2", "KM-PRA-C2" ve "KUM-PRA-C2" karışımlarının doygunluk noktası geçirgenlik azaltıcı katkı içermeyen karışımlara göre %0,25 daha fazla akışkanlaştırıcı katkı ilave edilmesiyle doygunluk noktasına ulaşmışlardır. "PRA-C2" içeren tüm karışımların doygunluk noktasındaki Marsh-hunisi akış süresi geçirgenlik azaltıcı katkı içermeyen karışımlardan yaklaşık % 41-54 arasında daha düşük olmuştur. Ayrıca bu karışımlara %1 veya daha fazla oranda su azaltıcı katkı ilave edilmesiyle Marsh-hunisi akış performansı, geçirgenlik azaltıcı içermeyen karışımlardan daha iyi bir akış performansı göstermiştir. Karışımların doygunluk noktalarında Şekil 4.4'ten de görüldüğü gibi çimento-katkı uyumu bakımından "KUM-PRA-C2" karışımı daha iyi akış özelliği göstermiştir.

**Çizelge 4.4.** Hamur karışımlarının "PRA-C" isimli %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı ve mineral katkı içeren Marsh-hunisi akış süresi ve sıcaklık değerleri

Katkı/çimento oranı (kütlece %)		0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2
		Akış süresi, sn	<b>K-PRA-C2</b>	66	54	41	40	40
	<b>KU-PRA-C2</b>	-	97	47	39	39	41	45
	<b>KM-PRA-C2</b>	-	141	48	36	32	32	32
	<b>KUM-PRA-C2</b>	-	62	40	33	33	32	34
Sıcaklık, °C	<b>K-PRA-C2</b>	29,1	27,4	27,8	27,2	26,9	27,2	27,1
	<b>KU-PRA-C2</b>	-	38	38	35,8	32,9	32,2	31,8
	<b>KM-PRA-C2</b>	-	34,3	33,1	31,7	32,5	31,3	31
	<b>KUM-PRA-C2</b>	-	33,3	34,4	32,6	32,6	32	32,1



**Şekil 4.4.** Hamur karışımlarının "PRA-C" isimli %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı ve mineral katkı içeren Marsh-hunisi akış süreleri



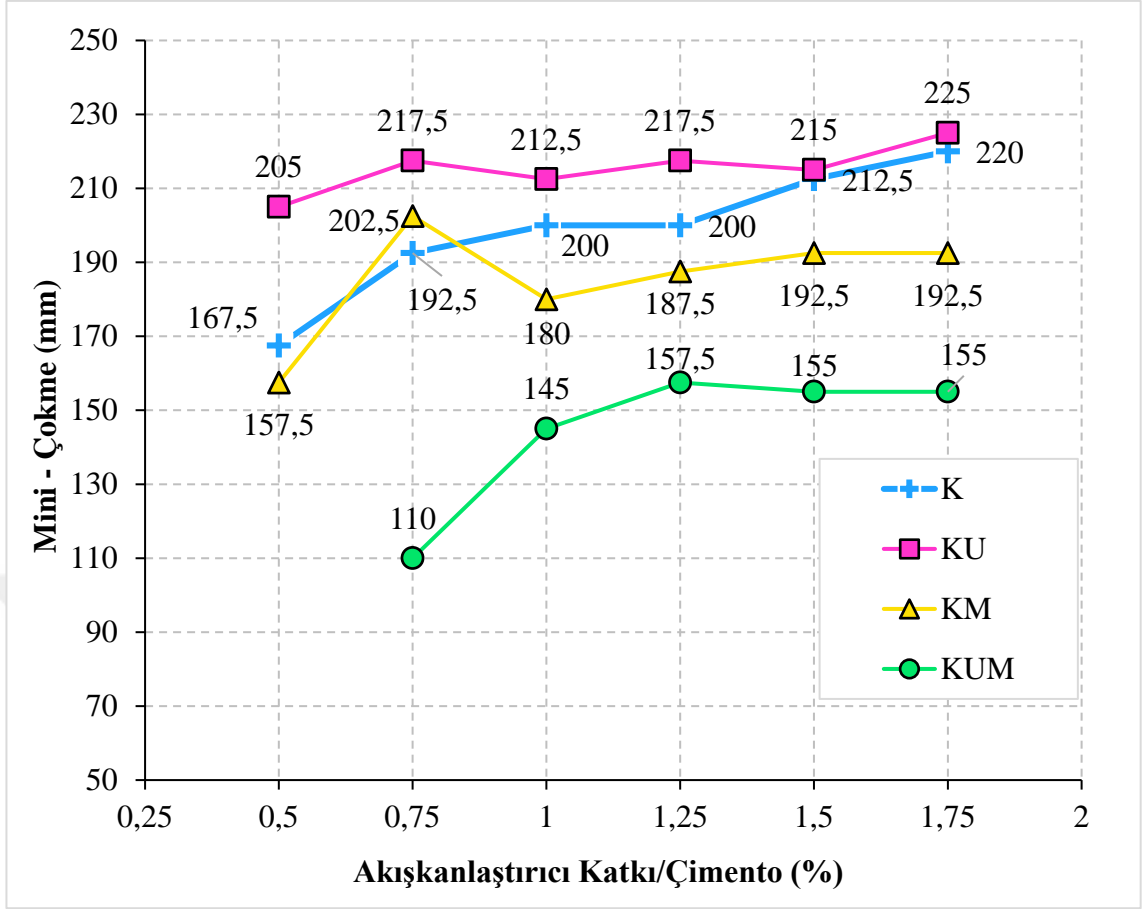
#### 4.1.2. Mini-çökme

Hamur karışımlarının mini-çökme değerleri Çizelge 4.5-4.8'de ve Şekil 4.5-4.8'de gösterilmiştir.

Şekil 4.5'ten anlaşıldığı gibi mineral katkı tipinden bağımsız olarak su azaltıcı katkı kullanım oranının artışıyla hamur karışımlarının mini-çökme değerlerinde beklenildiği gibi bir artış gözlemlenmiştir. Ancak belli bir katkı kullanım oranının üstünde hamur karışımlarının mini-çökme değerlerinde bir sabitlenme veya azalma olmuştur. Bu olayın, çok akıcı olan söz konusu karışımlarda ayrışma oluşumundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca tüm çimento hamurlarında su azaltıcı katkı içeriğinin artışıyla karışımların sıcaklığı 2-3°C arasında düşüş göstermiştir. Bu durumun, kullanılan su azaltıcı katkının priz geciktirici etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

**Çizelge 4.5.** Hamur karışımlarının mineral katkı içeren mini-çökmesi ve sıcaklık değerleri

<b>Katkı/çimento oranı</b>		<b>0,50</b>	<b>0,75</b>	<b>1,00</b>	<b>1,25</b>	<b>1,50</b>	<b>1,75</b>
<b>(kütlece %)</b>							
Mini-çökme, mm	<b>K</b>	167,5	192,5	200	200	212,5	220
	<b>KU</b>	205	217,5	212,5	217,5	215	225
	<b>KM</b>	157,5	202,5	180	187,5	192,5	192,5
	<b>KUM</b>	-	110	145	157,5	155	155
Sıcaklık, °C	<b>K</b>	27	26,8	25,6	25	23	24
	<b>KU</b>	25,5	25,2	25	25	24,5	23,5
	<b>KM</b>	25,5	25,2	25	25	24,5	23,5
	<b>KUM</b>	30	30,7	28,4	28,1	28	27,7

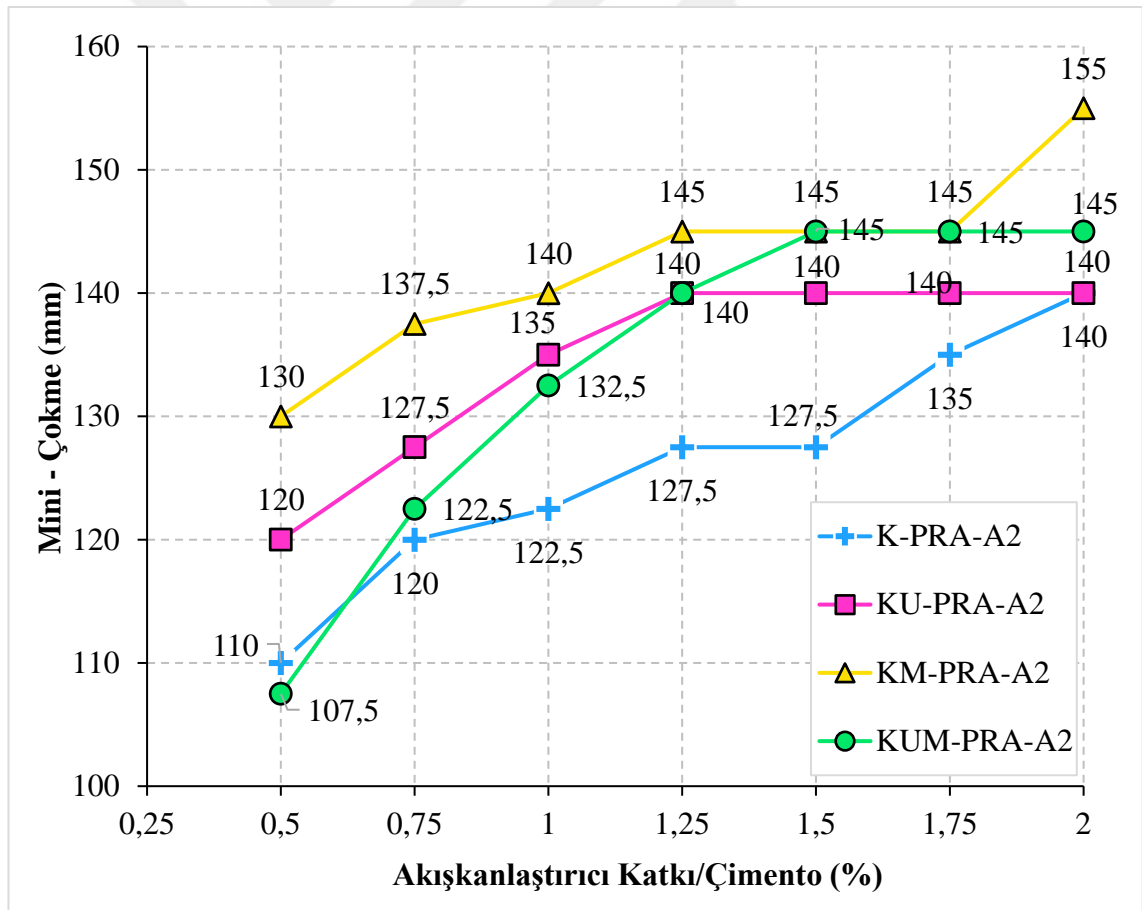


Şekil 4.5. Hamur karışımlarının mineral katkı içeren mini-çökme değerleri

Şekil 4.6'dan anlaşıldığı gibi mineral katkı tipinden bağımsız olarak "PRA-A2" katkısı içeren karışımlarda su azaltıcı katkı kullanım oranının artışıyla hamur karışımlarının mini-çökme değerlerinde beklenildiği gibi bir artış gözlemlenmiştir. Ancak "K", "KU", "KM" ve "KUM" karışımlarına "PRA-A2" katkısı ilave edilmesi karışımların mini-çökme değerlerini olumsuz etkilemiştir. Su azaltıcı katkı miktarına bağlı olarak "K-PRA-A2" ve "KU-PRA-A2" karışımlarının mini çökme değerleri %35-40 arasında, "KM-PRA-A2" karışımının %20-30 arasında ve "KUM-PRA-A2" karışımının yaklaşık %10 civarında azalma gözlenmiştir. Söz konusu bu olumsuz etki "PRA-A2" katkısı içeren karışımların eşik kayma gerilmesinin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

**Çizelge 4.6.** Hamur karışımlarının "PRA-A" isimli %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı ve mineral katkı içeren Mini-Çökmesi ve Sıcaklık değerleri

Katkı/çimento oranı (kütlece %)		0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2
Mini-çökme, mm	<b>K-PRA-A2</b>	110	120	122,5	127,5	127,5	135	140
	<b>KU-PRA-A2</b>	120	127,5	135	140	140	140	140
	<b>KM-PRA-A2</b>	130	137,5	140	145	145	145	155
	<b>KUM-PRA-A2</b>	107,5	122,5	132,5	140	145	145	145
Sıcaklık, °C	<b>K-PRA-A2</b>	32,7	32,1	32	32,4	32,2	32,2	32
	<b>KU-PRA-A2</b>	32,2	32,8	31,3	30,3	30	30,5	30
	<b>KM-PRA-A2</b>	31	27,8	27,5	27,3	29,2	30,2	29,5
	<b>KUM-PRA-A2</b>	30,6	31,2	30,3	32,2	31,8	32,2	31

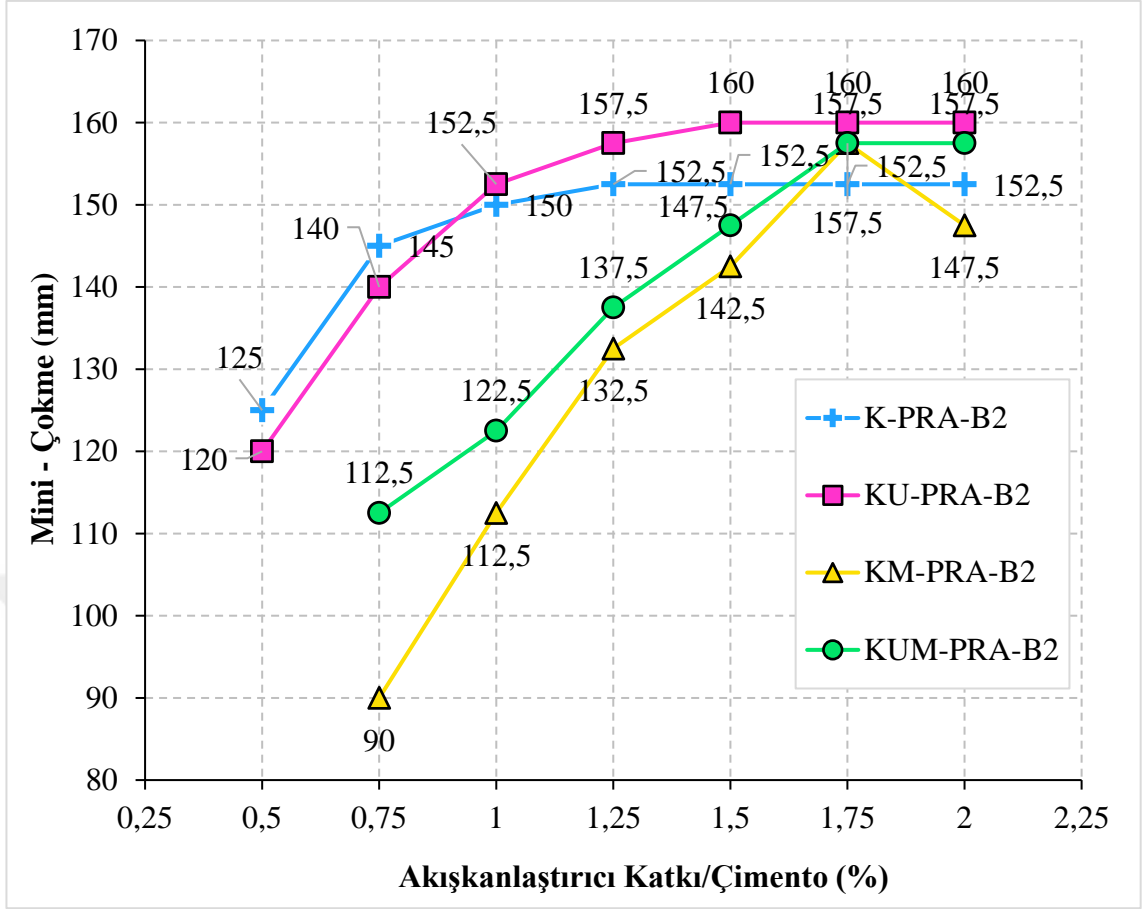


**Şekil 4.6.** Hamur karışımlarının "PRA-A" isimli %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı ve mineral katkı içeren mini çökme değerleri

Şekil 4.7'den anlaştığı gibi mineral katkı tipinden bağımsız olarak "PRA-B2" katkısı içeren karışımlarda su azaltıcı katkı kullanım oranının artmasıyla hamur karışımlarının mini-çökme değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Ancak "K-PRA-B2", "KU-PRA-B2", "KM-PRA-B2" ve "KUM-PRA-B2" karışımlarının mini çökme değerleri "PRA-A2" katkılı karışımlarda olduğu gibi geçirgenlik azaltıcı katkı içermeyen karışımlara göre olumsuz etkilenmiştir. Bu olumsuz etki "PRA-B2" katkısının hamur karışımların eşik kayma gerilmesini artırmış olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

**Çizelge 4.7.** Hamur karışımlarının "PRA-B" %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı ve mineral katkı içeren mini-çökmesi ve sıcaklık değerleri

Katkı/çimento oranı (kütlece %)		0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2
		Mini-çökme, mm	<b>K-PRA-B2</b>	125	145	150	152,5	152,5
	<b>KU-PRA-B2</b>	120	140	152,5	157,5	160	160	160
	<b>KM-PRA-B2</b>	-	90	112,5	132,5	142,5	157,5	147,5
	<b>KUM-PRA-B2</b>	-	112,5	122,5	137,5	147,5	157,5	157,5
Sıcaklık, °C	<b>K-PRA-B2</b>	35.2	33.5	32.1	32.1	32.1	31.2	30.8
	<b>KU-PRA-B2</b>	30.3	30.5	32.5	33	32.8	32.1	32.3
	<b>KM-PRA-B2</b>	-	35	37	38	37.8	34	32.3
	<b>KUM-PRA-B2</b>	-	35	35.1	32.8	37.2	32.5	32

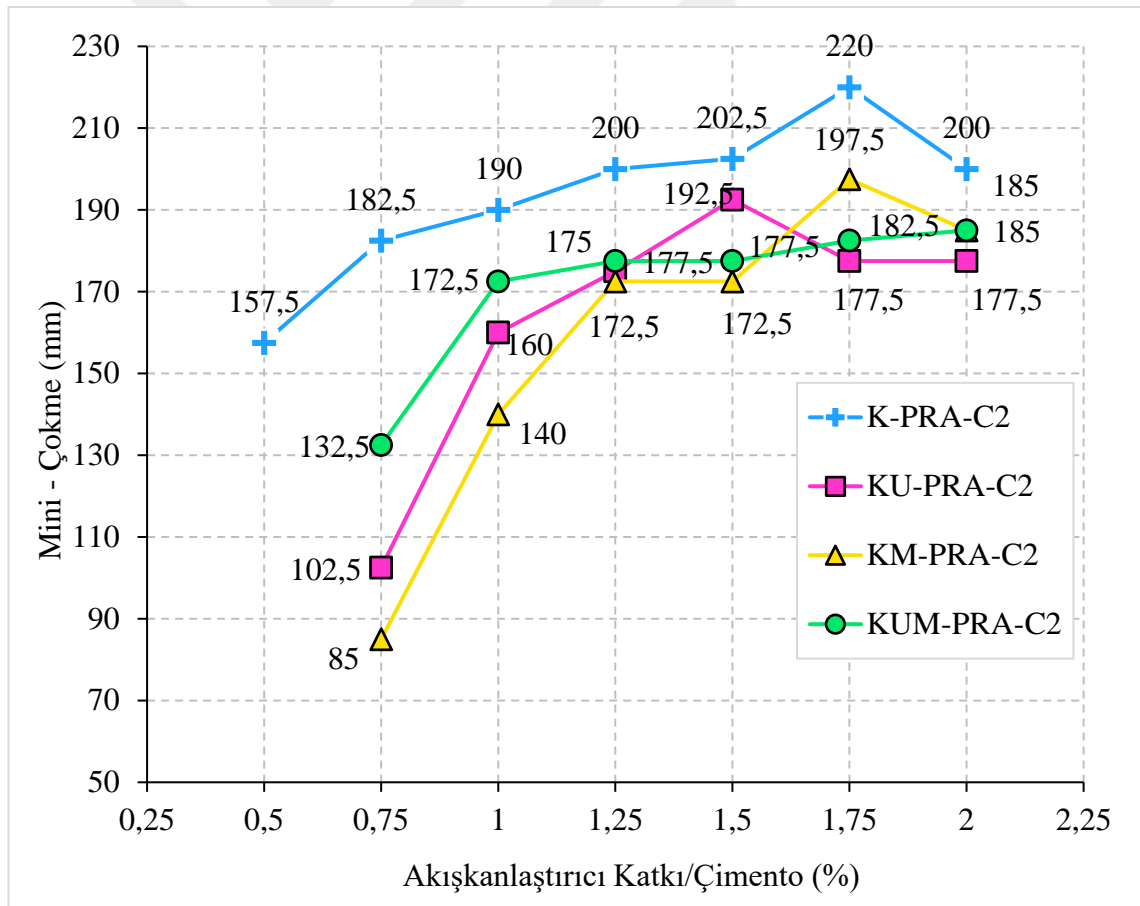


**Şekil 4.7.** Hamur karışımlarının "PRA-B" %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı ve mineral katkı içeren mini çökme değerleri

Şekil 4.8'den anlaşıldığı gibi mineral katkı tipinden bağımsız olarak "PRA-C2" katkısı içeren karışımlarda su azaltıcı katkı kullanım oranının artmasıyla hamur karışımlarının mini-çökme değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Ancak bazı karışımlarda akışkanlaştırıcı katkı kullanıldığı zaman hamur karışımlarının mini-çökme değerlerinde bir sabitleme veya azalma olmuştur. Bu durum karışımların akıcı olmasına bağlı olarak ayrılmaya meyilli olduğunu göstermektedir. "K-PRA-C2", "KU-PRA-C2" ve "KM-PRA-C2" karışımlarının mini çökme değerleri PRA katkılı karışımlarda olduğu gibi geçirgenlik azaltıcı katkı içermeyen karışımlara göre olumsuz etkilenmiştir. Bu olumsuz etki "K-PRA-C2" karışımında %5, "KU-PRA-C2" karışımında %20 ve "KM-PRA-C2" karışımlarında %8 mertebelerinde olmuştur.

**Çizelge 4.8.** Hamur karışımlarının "PRA-C" %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı ve mineral katkı içeren mini-çökmesi ve sıcaklık değerleri

Katkı/çimento oranı (kütlece %)		0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2
Mini-çökme, mm	<b>K-PRA-C2</b>	157,5	182,5	190	200	202,5	220	200
	<b>KU-PRA-C2</b>	-	102,5	160	175	192,5	177,5	177,5
	<b>KM-PRA-C2</b>	-	85	140	172,5	172,5	197,5	185
	<b>KUM-PRA-C2</b>	-	132,5	172,5	177,5	177,5	182,5	185
Sıcaklık, °C	<b>K-PRA-C2</b>	29,1	27,4	27,8	27,2	26,9	27,2	27,1
	<b>KU-PRA-C2</b>	-	38	38	35,8	32,9	32,2	31,8
	<b>KM-PRA-C2</b>	-	34,3	33,1	31,7	32,5	31,3	31
	<b>KUM-PRA-C2</b>	-	33,3	34,4	32,6	32,6	32	32,1



**Şekil 4.8.** Hamur karışımlarının "PRA-C" %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı ve mineral katkı içeren mini-çökme değerleri

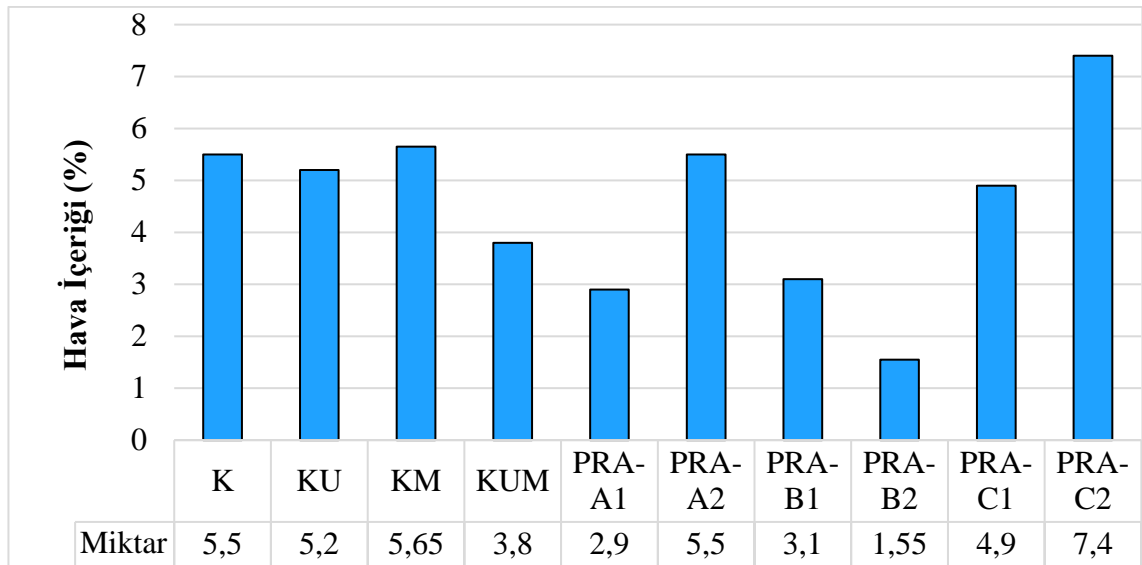
#### 4.1.2. Geçirgenlik ve mineral katkı kullanımının harç karışımlarının taze hal özelliğine etkisi

Bu aşamada üretilen harç karışımlarında hava içeriği ve zamana bağlı yayılma performansı kıyaslanmıştır.

##### *Hava yüzdesi*

Harç karışımlarının Şekil 4.9'dan da görüldüğü gibi, mineral katkı kullanımı ile kontrol karışımına kıyasla genel olarak harç karışımlarının hava içeriği azalmıştır. Mineral katkılı karışımlar içerisinde hem uçucu kül hem de metakaolin içeren üçlü bağlayıcı sistemine sahip "KUM" karışımı en düşük hava içeriğine sahip olmuştur. Bu karışım kontrol karışımına kıyasla %30 daha düşük hava içeriğine sahip olmuştur. Mineral katkılı karışımlarının hava içeriğinin kontrol karışımına kıyasla daha düşük olması mineral katkı kullanımı ile ince malzeme oranının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kullanılan çimento, uçucu kül ve metakaolin incelik değerlerinin sırasıyla, 3530, 4300 ve 14600 cm<sup>2</sup>/g olduğu bolum üçte Çizelge 3.3'te görülmektedir.

Geçirgenlik azaltıcı katkı kullanımı ile "PRA-C" katkısı hariç karışımların hava yüzdesi değerleri azalmıştır. Mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkı kullanımından bağımsız olarak çimento ağırlığının %2'si kadar "PRA-B" isimli katkı içeren "PRA-B2" karışımı en düşük hava içeriğine sahip olmuştur. Söz konusu karışımın hava yüzdesi kontrol karışımına kıyasla %70 daha düşük olmuştur.



Şekil 4.9. Harç karışımların hava içeriği miktarının yüzdesi

#### 4.2.2. Yayılma

Harç karışımlarının üretiminde kullanılan kütlece malzeme miktarları ve yayılma değerleri Çizelge 4.9'da gösterilmiştir. Tüm harç karışımlarının yayılma değeri  $270 \pm 20$  mm olarak sabit tutulmuştur. Söz konusu yayılma değerini sağlamak için, kontrol karışımında çimento ağırlığının %0,5'i, mineral katkı içeren (MA) karışımlarda %0,3-%6'sı aralığında ve geçirgenlik azaltıcı katkı (PRA) içeren karışımlarda %0,2-%6'sı arasında değişen miktarlarda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, istenilen yayılma değerini sağlamak için mineral katkı içeren karışımlarda "KU" karışımı hariç, diğer karışımlarda kontrol karışımına kıyasla su azaltıcı katkı gereksinimi artmıştır. Bilindiği gibi karışımlarda mineral katkı kullanımıyla toplam ince malzeme miktarının artışına bağlı olarak karışımların işlenebilirliği olumsuz etkilenmiştir. Geçirgenlik azaltıcı katkı içeren karışımlarda "PRA-C" katkısını içeren karışım hariç, diğer karışımlarda istenilen yayılma değerini sağlamak için kontrol karışımına kıyasla su azaltıcı katkı gereksinimi azalmıştır. Üretici firma beyanına göre "PRA-A" ve "PRA-B" katkıları hava sürükleyerek karışımların geçirgenliğinin azalmasına sebebiyet vermektedir. Katkıların hava sürükleyici özelliğinden dolayı karışımların işlenebilirliğinin olumlu etkilenmesi beklenmiştir. Deney sonuçlarında da benzer etki gözlemlenmiştir.

**Çizelge 4.9.** Harç karışımlarının üretiminde kullanılan kütlece malzeme miktarları (g) ve yayılma miktarı (cm)

Numune Adı	Çimento	Uçucu Kül	Metakaolin	Su	Kum	PRA*	SA**	Yayılma Miktarı (mm)
K	500	0	0	242,5	1375	0	2,50	265
KU	400	100	0	242,5	1375	0	1,50	257
KM	450	0	50	242,5	1375	0	2,85	257
KUM	350	100	50	242,5	1375	0	2,75	265
PRA-A1	500	0	0	242,5	1375	5	1,50	275
PRA-A2	500	0	0	242,5	1375	10	1,00	280
PRA-B1	500	0	0	242,5	1375	5	1,45	252
PRA-B2	500	0	0	242,5	1375	10	1,50	262
PRA-C1	500	0	0	242,5	1375	5	2,00	250
PRA-C2	500	0	0	242,5	1375	10	2,50	250

PRA\*: Geçirgenlik azaltıcı katkı.

SA\*\*: Su azaltıcı katkı.



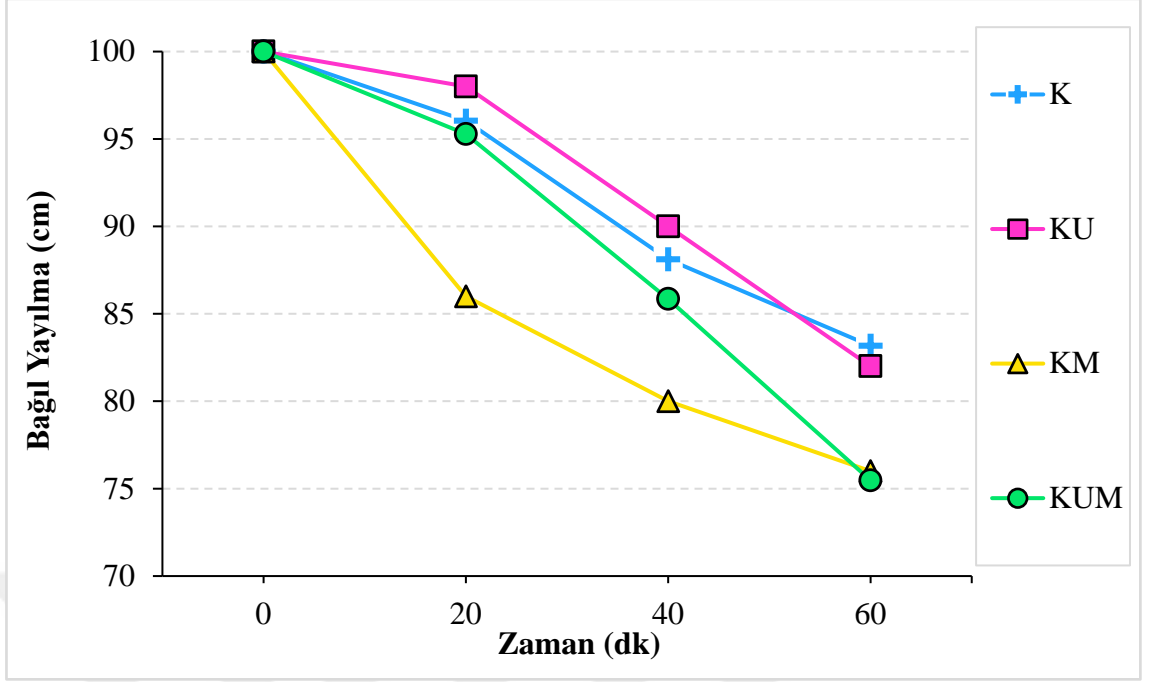
### **Zamana bağı yayılma**

Harç karışımlarının zamana bağı yayılma davranışlarını gözlemlemek amacıyla kontrol karışımına ilaveten  $270 \pm 20$  mm yayılma değerine sahip çimento ağırlığının %1 ve %2'si kadar geçirgenlik azaltıcı katkı içeren değışik oranlarda mineral katkı ihtiva eden toplamda 28 adet harç karışımı hazırlanmıştır. Kontrol ve sadece mineral katkı içeren harç karışımların 0, 20, 40 ve 60 dk döküm sonrası yayılma ve bağı yayılma sonuçları sırasıyla Çizelge 4.10'da ve Şekil 4.10'da gösterilmektedir. Hem mineral ve hem geçirgenlik azaltıcı katkı içeren karışımların, zamana bağı yayılma miktarı ve bağı yayılma değerleri ise sırayla Çizelge 4.11-4.12'de ve Şekil 4.10-4.16'da verilmiştir. Beklenildiğı gibi mineral katkı ve geçirgenlik azaltıcı katkı kullanımından bağımsız olarak tüm harç karışımların yayılma değerleri zamanla azalmıştır.

Çizelge 4.10'dan da anlaşıldığı gibi, dökümden sonra 60 dakika bekletilen numunelerde kontrol karışımına kıyasla mineral katkılı karışımlarda daha fazla yayılma kaybı ölçülmüştür. Bu bağlamda tüm mineral katkılı karışımlarda, %10 oranında metakaolin mineral katkısını içeren "KM" karışımı %24 oranında yayılma kaybı ile en yüksek sonucu göstermiştir. Kullanılan metakaolin  $14600 \text{ cm}^2/\text{g}$  incelik değeri ile çalışma kapsamında en ince kullanılan en ince mineral katkı olduğu Çizelge 3.3'ten de anlaşılmaktadır. Mineral katkılı karışımlar arasında %20 oranında uçucu kül içeren "KU" karışımında %19 oranında yayılma kaybı ölçülerek, yayılma kaybı oranının %17 olan kontrol karışımına göre benzer bir sonuç elde edilmiştir.

**Çizelge 4.10.** Mineral katkı içeren harç karışımlarının zamana bağı yayılma değerleri

<b>Zamana Bağı Yayılma (cm)</b>					
<b>Numune Adı</b>	<b>0 dk</b>	<b>20 dk</b>	<b>40 dk</b>	<b>60 dk</b>	<b>60 dk Sonunda</b>
					<b>Yayılma Kaybı (%)</b>
<b>K</b>	25,25	24,25	22,25	21	17
<b>KU</b>	25	24,5	22,5	20,25	19
<b>KM</b>	25	21,5	20	19	24
<b>KUM</b>	26,25	25,25	22,75	20	23

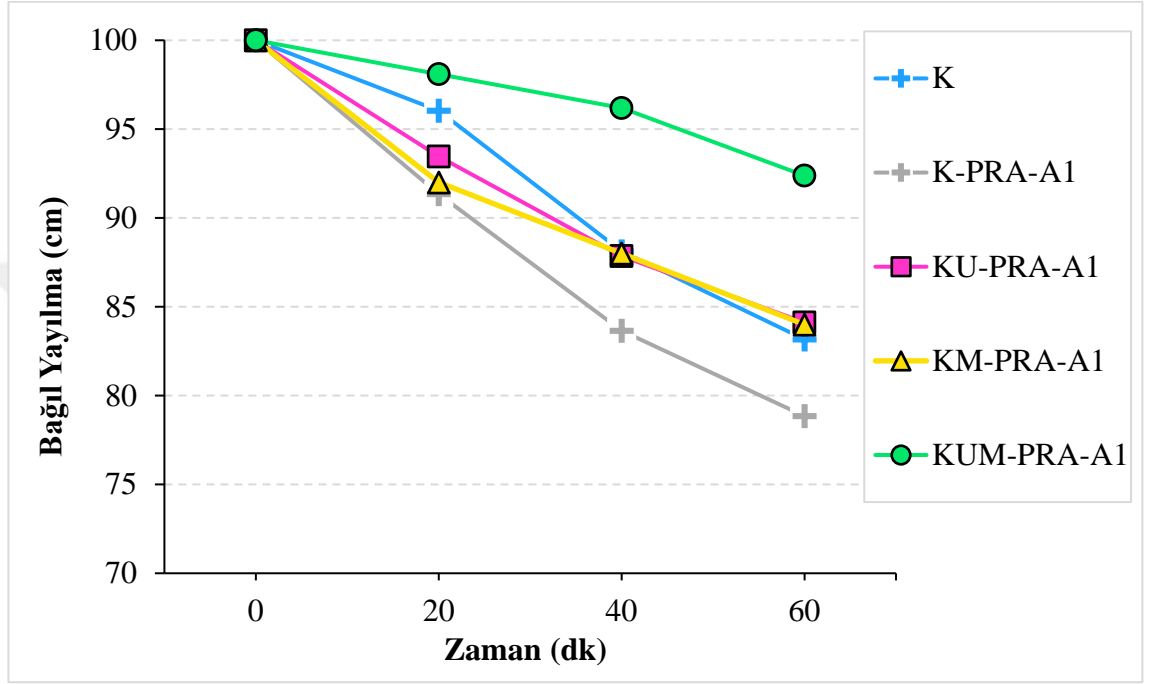


**Şekil 4.10.** Mineral katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı bağlı yayılma değişimi

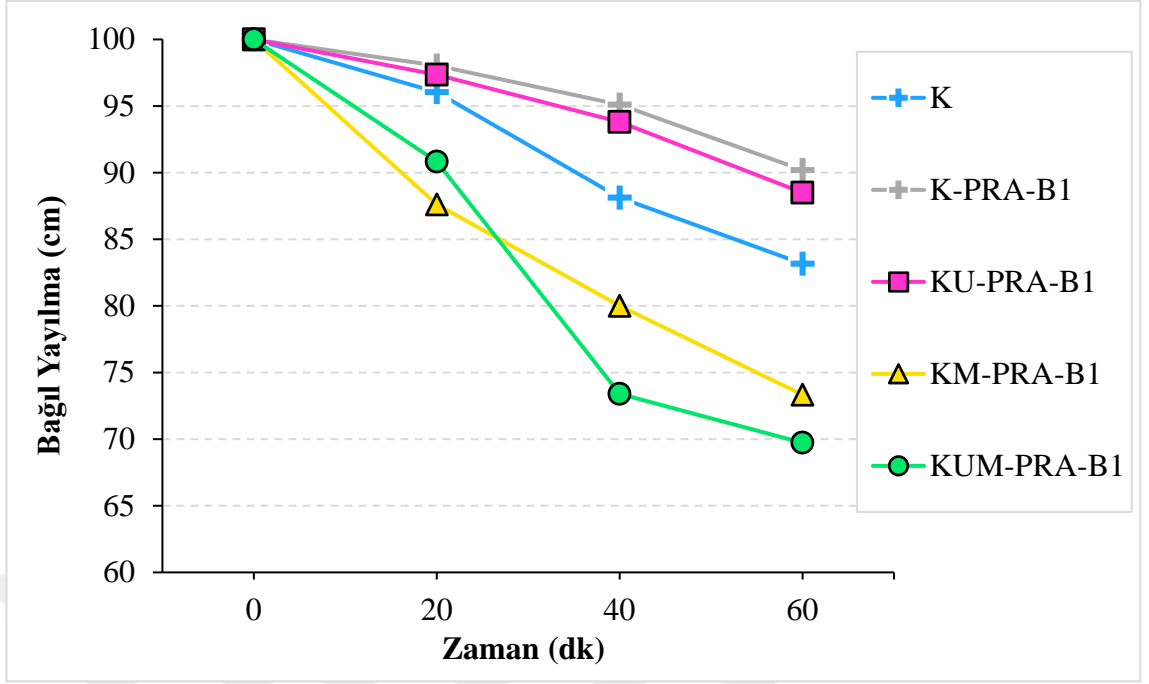
Çizelge 4.11'den de anlaşıldığı gibi, %1 oranında PRA-A isimli geçirgenlik azaltıcı katkı içeren ve değişik oranda mineral katkı ihtiva eden karışımlarda, mineral katkı içermeyen "K-PRA-A1" karışımı 60 dakika sonunda %21 yayılma kaybı göstererek en yüksek kıvam kaybına sahip olan karışım olarak seçilmiştir. Söz konusu bu seri karışımlarda 60 dakika sonunda %10 oranında metakaolin ve %20 oranında uçucu kül içeren "KUM-PRA-A1" isimli karışım %8 yayılma kaybı ile kıvam kaybı açısından en başarılı karışım olmuştur. Bu arada "KM-PRA-A1" ve "KU-PRA-A1" karışımlarında %16 yayılma kaybı ölçülerek kontrol karışımına benzer sonuçlar Şekil 4.11'de de görüldüğü gibi elde edilmiştir.

Çizelge 4.11'den anlaşıldığı gibi %1 oranında "PRA-B" isimli geçirgenlik azaltıcı katkı içeren karışımlar incelendiğinde "PRA-A" kodlu karışımlarında elde edilen sonuçların tam tersi bir davranış rastlanmıştır. Zamana bağlı yayılmanın 60 dakika sonunda "K-PRA-B1" karışımı %10 oranı ile en az yayılma kaybına sahipken, hem uçucu kül hem de metakaolin içeren "KUM-PRA-B1" karışımı %30 oranı ile en yüksek yayılma kaybı gösteren karışım olmuştur. Diğer taraftan "KU-PRA-B1" ve "KM-PRA-B1" karışımları sırasıyla %11.5 ve %27 oranında yayılma kaybı göstermiştir. "PRA-B" kodlu karışımlarda "K-PRA-B1" ve "KU-PRA-B1" isimli karışımların yayılma kaybı açısından kontrol karışımına en yakın davranış sergilediği Şekil 4.12'den anlaşılmaktadır.

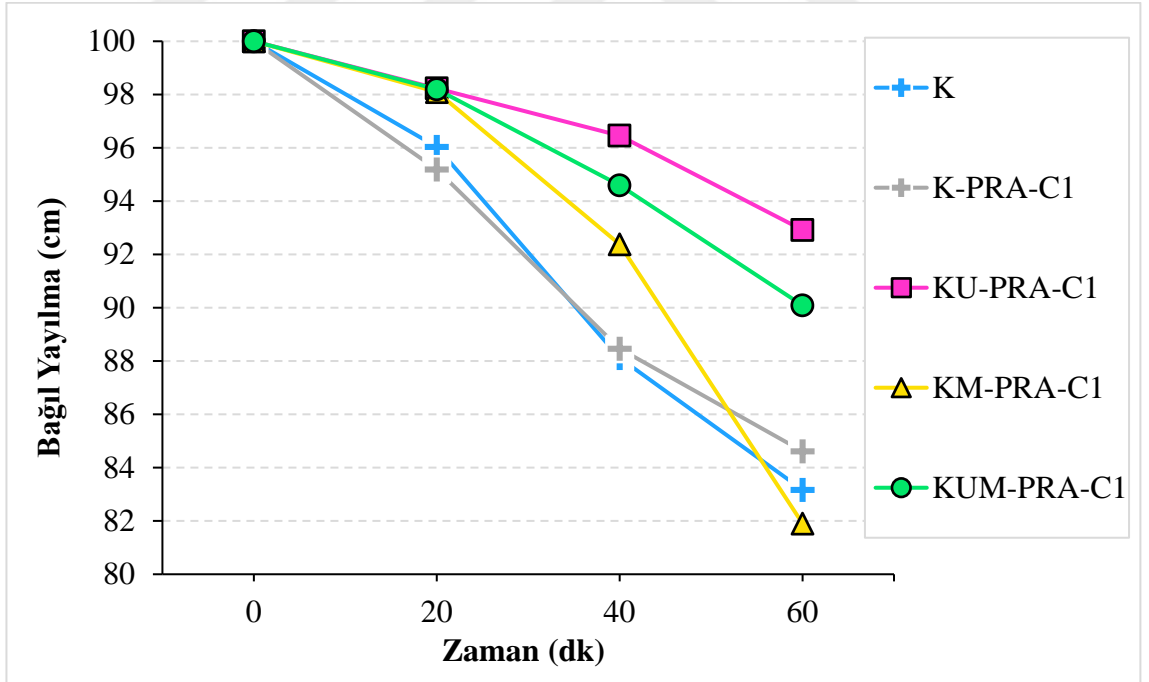
"PRA-C1" kodlu karışımlarda "KM-PRA-C1" karışımı %18 yayılma kaybı ile en yüksek kıvam kaybına sahipken, "KUM-PRA-C1" ve "KU-PRA-C1" karışımları %7 oranında yayılma kaybı göstererek en düşük kıvam kaybına sahip olmuştur. Şekil 4.13'ten de görüldüğü gibi "K-PRA-C1" ve "KM-PRA-C1" karışımları yayılma kaybı açısından diğer karışımlara göre, kontrol karışımına daha yakın davranış sergilemiştir.



Şekil 4.11. Kontrol ve %1 oranında "PRA-A" isimli geçirgenlik azaltıcı katkıyı içeren karışımların bağıl yayılma değeri



Şekil 4.12. Kontrol ve %1 oranında "PRA-B" isimli geçirgenlik azaltıcı katkıyı içeren karışımların bağıl yayılma değeri



Şekil 4.13. Kontrol ve %1 oranında "PRA-C" isimli geçirgenlik azaltıcı katkıyı içeren karışımların bağıl yayılma değeri

Şekil 4.14'ten anlaşıldığı gibi çimento ağırlığının %2'si oranında "PRA-A" isimli geçirgenlik azaltıcı katkı kullanılarak hazırlanan karışımlarda, 60 dakika sonunda benzer yayılma değerleri ölçülmüştür. Çizelge 4.12'den de görüldüğü gibi "K-PRA-A2", "KU-PRA-A2", "KM-PRA-A2" ve "KUM-PRA-A2" karışımlarında 60 dakika dökümden sonra ölçülen yayılma kaybı sırasıyla %16, %17, %16 ve %18 oranında olmuştur. Üretici firma beyanına göre söz konusu geçirgenlik azaltıcı katkı hava sürüklenme özelliğine sahip olmaktadır. Bu sayede katkı, karışımların akış performansını etkileyip yayılma kaybını belli bir seviyede sabit tutmuştur.

Şekil 4.15'ten de görüldüğü gibi, %2 oranında "PRA-B" isimli geçirgenlik azaltıcı katkısı içeren karışımların zamana bağlı yayılma grafiğinde en az yayılma kaybına sahip olan karışım "KUM-PRA-B2" karışımı olmuştur. Söz konusu karışım dökümden 60 dakika sonra %10 yayılma kaybı göstererek, çalışma kapsamında kullanılan geçirgenlik azaltıcı katkılar arasında kıvam koruma açısından en iyi performansa sahip katkı olarak seçilmiştir. Daha öncede vurgulandığı gibi üretici firma beyanına göre, "PRA-B" kimyasal katkısı karışımlardaki gözenekleri ve kapiler boşlukları yapısındaki hidrofobik kimyasallar ile doldurarak yapısal su geçirimsizliği sağlamaktadır. Çizelge 4.12'den de görüldüğü gibi 60 dakika sonunda "K-PRA-B2" ve "KM-PRA-B2" karışımları sırasıyla %18 ve %19 oranında yayılma kaybı ile katkısız kontrol karışımına benzer sonuçlar göstermişlerdir.

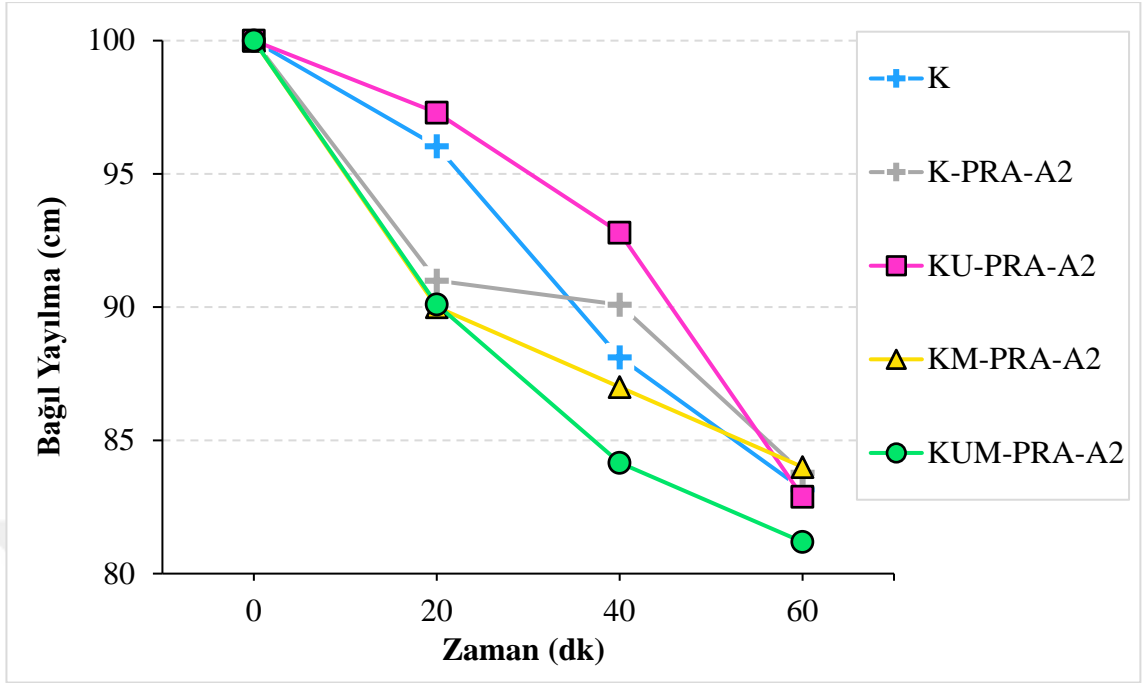
Çizelge 4.12'den ve Şekil 4.16'dan da anlaşıldığı gibi %2 oranında "PRA-C" isimli geçirgenlik azaltıcı katkı içeren karışımlarda "KUM-PRA-C2" karışımı 60 dakika döküm sonrası %11 yayılma kaybı göstererek kıvam koruma açısından en başarılı karışım olmuştur. Diğer taraftan 60 dakika sonunda "KU-PRA-C2" ve "K-PRA-C2" karışımları sırasıyla %23 ve %20 oranında yayılma kaybı gösterirken, %15 oranında yayılma kaybı göstererek kıvam koruma özelliği açısından kontrol karışımına en yakın davranış gösteren karışım olarak tespit edilmiştir.

**Çizelge 4.11.** %1 oranında farklı geçirgenlik azaltıcı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma değerleri ve 60 dk sonunda yayılma kaybının yüzdesi

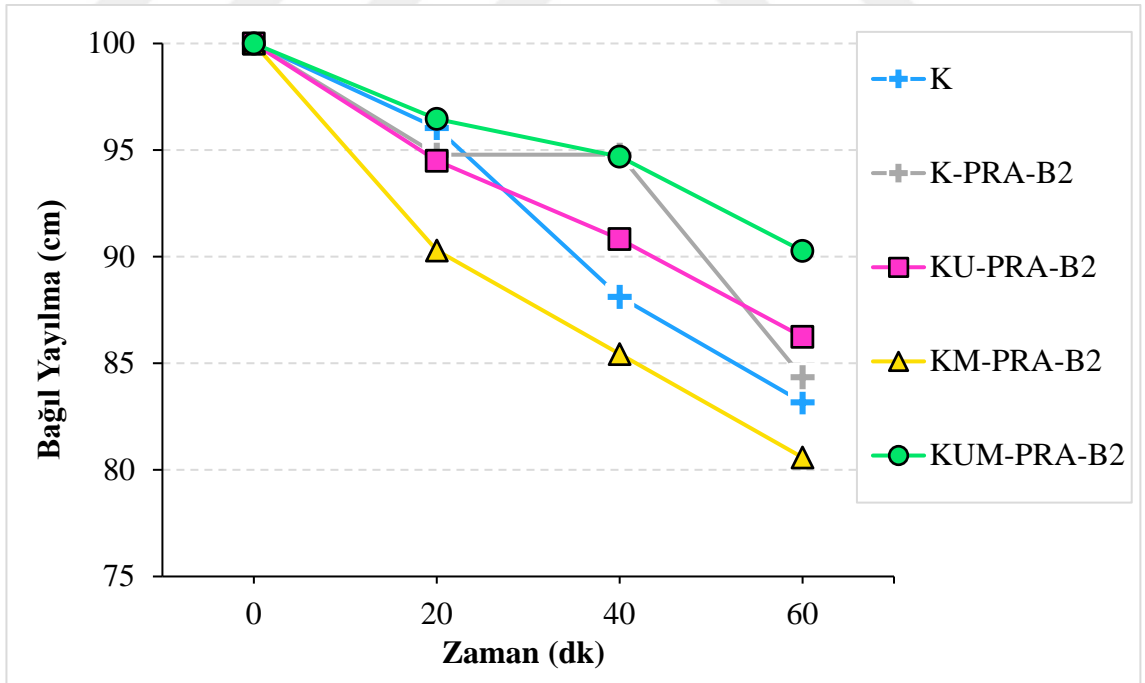
<b>Zamana Bağlı Yayılma (cm)</b>					
<b>Numune Adı</b>	<b>0 dk</b>	<b>20 dk</b>	<b>40 dk</b>	<b>60 dk</b>	<b>60 dk Sonunda Yayılma Kaybı (%)</b>
<b>K</b>	25,25	24,25	22,25	21	17
<b>K-PRA-A1</b>	26	23,75	21,75	20,5	21
<b>KU-PRA-A1</b>	26,75	25	23,5	22,5	16
<b>KM-PRA-A1</b>	25	23	22	21	16
<b>KUM-PRA-A1</b>	26,25	25,75	25,25	24,25	8
<b>K-PRA-B1</b>	25,5	25	24,25	23	10
<b>KU-PRA-B1</b>	28,25	27,5	26,5	25	11,5
<b>KM-PRA-B1</b>	26,25	23	21	19,25	27
<b>KUM-PRA-B1</b>	27,25	24,75	20	19	30
<b>K-PRA-C1</b>	26	24,75	23	22	15
<b>KU-PRA-C1</b>	28,25	27,75	27,25	26,25	7
<b>KM-PRA-C1</b>	26,25	25,75	24,25	21,5	18
<b>KUM-PRA-C1</b>	27,75	27,25	26,75	25,75	7

**Çizelge 4.12.** %2 oranında farklı geçirgenlik azaltıcı katkı içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma değerleri ve 60 dk sonunda yayılma kaybının yüzdesi

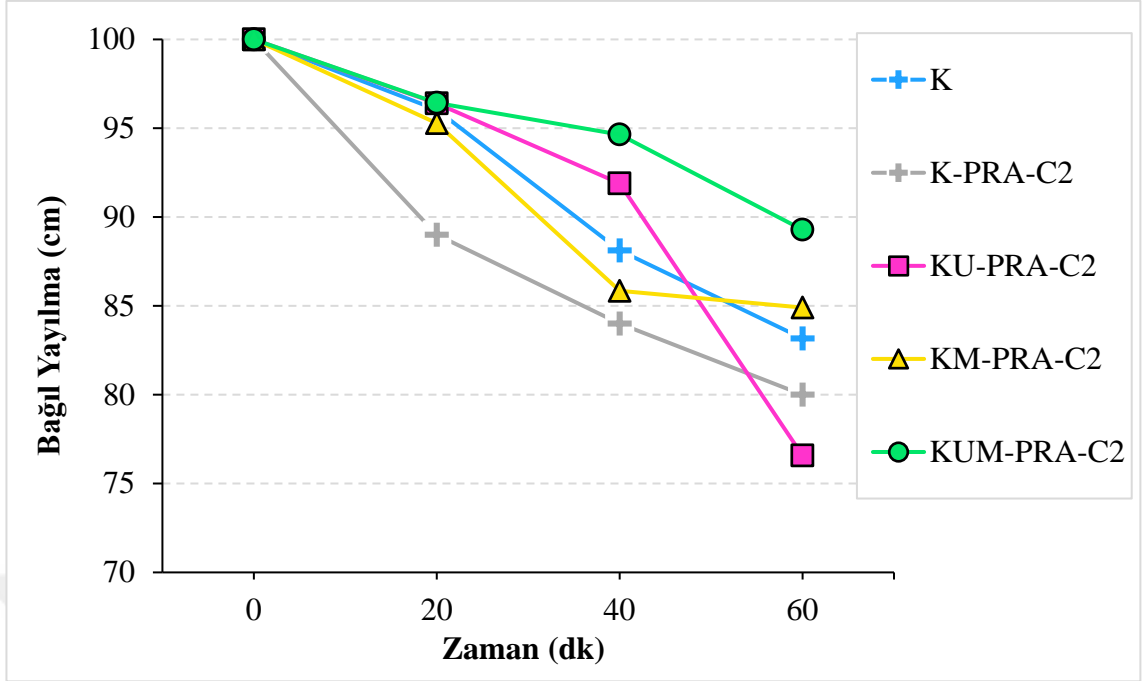
<b>Zamana Bağlı Yayılma (cm)</b>					
<b>Numune Adı</b>	<b>0 dk</b>	<b>20 dk</b>	<b>40 dk</b>	<b>60 dk</b>	<b>60 dk Sonunda Yayılma Kaybı (%)</b>
<b>K</b>	25,25	24,25	22,25	21	17
<b>K-PRA-A2</b>	27,75	25,25	25	23,25	16
<b>KU-PRA-A2</b>	27,75	27	25,75	23	17
<b>KM-PRA-A2</b>	25	22,5	21,75	21	16
<b>KUM-PRA-A2</b>	25,25	22,75	21,25	20,5	18
<b>K-PRA-B2</b>	28,75	27,25	27,25	24,25	16
<b>KU-PRA-B2</b>	27,25	25,75	24,75	23,5	14
<b>KM-PRA-B2</b>	25,75	23,25	22	20,75	19
<b>KUM-PRA-B2</b>	28,25	27,25	26,75	25,5	10
<b>K-PRA-C2</b>	25	22,25	21	20	20
<b>KU-PRA-C2</b>	27,75	26,75	25,5	21,25	23
<b>KM-PRA-C2</b>	26,5	25,25	22,75	22,5	15
<b>KUM-PRA-C2</b>	28	27	26,5	25	11



Şekil 4.14. Kontrol ve %2 oranında "PRA-A" isimli geçirgenlik azaltıcı katkıyı içeren karışımların bağıl yayılma değeri



Şekil 4.15. Kontrol ve %2 oranında "PRA-B" isimli geçirgenlik azaltıcı katkıyı içeren karışımların bağıl yayılma değeri



**Şekil 4.16.** Kontrol ve %2 oranında "PRA-C" isimli geçirgenlik azaltıcı katkıyı içeren karışımların bağıl yayılma değeri

Sonuç olarak, mineral katkı içeren karışımlar arasında kıvam koruma açısından en başarılı performansı "KU" karışımı göstermiştir. Diğer yandan başlangıç yayılma değeri açısından "KUM" karışımı fazla yayılmaya sahip olmuştur. %1 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı içeren karışımlar arasında 60 dakika sonunda kıvam koruma özelliği açısından "PRA-B" isimli katkıyı içeren karışım daha başarılı olmuştur. Diğer taraftan mineral katkısız %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı kullanılarak hazırlanan karışımlar arasında "PRA-B" isimli karışım kıvam koruma özelliği açısından en başarılı karışım olmuştur. %2 oranında "PRA-B" isimli geçirgenlik azaltıcı katkıyı içeren mineral katkılı "KUM-PRA-B2" karışımı yayılma performansı ve kıvam koruma özelliği açısından en başarılı karışım olarak tespit edilmiştir. Daha öncede vurgulandığı gibi söz konusu karışımda çimento yerine ağırlıkça %20 ve %10 oranında sırasıyla, uçucu kül ve metakaolin kullanılmıştır.



## 4.2. Çalışmanın İkinci Aşamasında Elde Edilen Bulgular

Daha öncede vurgulandığı gibi Çalışmanın ikinci aşamasında mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkı kullanımının harç karışımlarının sertleşmiş hal özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, iki farklı seri harç karışımı üretilmiştir. Birinci seride kontrol (K) karışımına ilaveten çimento ağırlığının belli bir yüzdesi yerine uçucu kül (UK) ve metakaolin (MK) ikame edilerek tekli, ikili ve üçlü bağlayıcı sistemine sahip toplamda dört adet harç karışımı hazırlanmıştır. İkinci seride ise kontrol karışımına çimento ağırlığının %1 ve %2'si oranında değişik etki mekanizmasına sahip üç adet geçirgenlik azaltıcı katkı ilave edilerek toplamda 6 farklı geçirgenlik azaltıcı katkı içeren mineral katkı içermeyen harç karışımı üretilmiştir.

### 4.2.1. Geçirgenlik ve mineral katkı kullanımının harç karışımlarının sertleşmiş hal özelliklerine etkisi

#### *Basınç dayanımı*

Çalışma kapsamında üretilen harç Karışımların 1, 3, 7, 28 ve 90-günlük basınç dayanımı sonucu Çizelge 4.13 ve Şekil 4.17' de verilmiştir. Her değer 3 ölçümün ortalamasını ifade etmektedir. Mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkı kullanımı ve türünden bağımsız olarak, harç numunelerin basınç dayanımı beklendiği gibi zamanla artmıştır. Mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkı kullanımının harç karışımlarının basınç dayanımına etkisi ayrı ayrı incelenmiştir.

Mineral katkılı karışımlar incelendiğinde, kontrol karışımına kıyasla çimento yerine %20 uçucu kül ve %10 metakaolin ikamesi karışımların 1-günlük basınç dayanımını ciddi mertebede etkilememiştir. Ancak, uçucu kül ve metakaolin beraber kullandığı üçlü bağlayıcı sisteme sahip "KUM" karışımının 1-günlük basınç dayanımı kontrol karışımına kıyasla yaklaşık %40 daha düşük olmuştur. "KUM" karışımının 1-günlük dayanımının bu kadar düşük olması karışımda toplam bağlayıcının %30'ü yerine mineral katkı ikame edilmesinden ve puzolanik reaksiyonun çok erken yaşlarda etkili olmamasından kaynaklanmaktadır.

%10 metakaolin içeren ikili bağlayıcı sistemine sahip "KM" karışımı 1'inci günden itibaren kontrol karışımına kıyasla daha yüksek dayanım göstermiştir. Bilindiği gibi,

puzolanik reaksiyonun şiddetli kullanılan mineral katkıının inceliği ve içerdiği reaktif silis miktarına oldukça bağlıdır. Puzolanik reaksiyon şiddeti çok erken yaşlarda kullanılan mineral katkıının inceliği parametresi ileri yaşlarda ise içerdiği reaktif silis parametresi tarafından kontrol edilmektedir (Mehta 1986).

Çizelge 3.3'ten de anlaşıldığı gibi kullanılan metakaolinin inceliği diğer bağlayıcılara kıyasla yaklaşık 4 kat daha fazla olmaktadır. Bu sebepten puzolanik etki çok erken yaşlarda itibaren etkili olmuştur. Kontrol ve "KM" karışımlarının dayanım arasındaki fark zamanla daha bariz olmuştur. "KM" karışımı 1, 3, 7, 28 ve 90-günlük basınç dayanımı açısından kontrol karışımına kıyasla, yaklaşık %1, %14, %23, %57 ve %51 kadar daha fazla dayanım göstermiştir.

Dayanım performansı açısından %20 uçucu kül içeren "KU" isimli karışım kontrol karışımına kıyasla 28 güne kadar daha düşük performans göstermesine rağmen 90 günün sonunda yaklaşık %10 daha yüksek dayanım göstermiştir. Çimentoya incelikte daha yakın olan mineral katkıların puzolanik etkisi ileri yaşlarda daha etkili olmaktadır. Üçlü bağlayıcı sistemine sahip "KUM" karışımı 7 güne kadar kontrol karışımına kıyasla daha düşük dayanım göstermiştir. Ancak, bu yaştan sonra dayanım performansı açısından kontrol karışımına kıyasla daha başarılı olmuştur. Bu pozitif etki zamanla daha bariz hale gelmiştir.

Daha öncede vurgulandığı gibi, çalışma kapsamında farklı etki mekanizmasına sahip 3 adet geçirgenlik azaltıcı (PRA) katkı kullanılmıştır. Birinci ve üçüncü katkıda sırasıyla, "PRA-A" ve "PRA-C" geçirgenlik azaltma özelliği açısından etkili mekanizma katkıının karışımında birbirinden bağımsız uygun mesafede kalıcı hava baloncukları oluşturması olarak üretici firma tarafından bildirilmiştir. İkinci katkıda "PRA-B" ise etkili mekanizma katkıının çözülme mikrosilisyen kalıntısı içermesi ve çok az miktarda hava sürüklenme özelliğine sahip olması olarak üretici firma tarafından bildirilmiştir. Hava sürüklenme özelliğine sahip katkı kullanılması ile karışımlarda boşluk miktarının artmasına sebep olacağından basınç dayanımının azalması beklenmektedir. Benzer olay hava sürüklenme özelliğine sahip "PRA-A" ve "PRA-C" katkılı karışımlarda da gözlenmiştir. "PRA-A" katkı içeren harç karışımı başlangıçtan itibaren kontrol karışımına kıyasla yaklaşık %12 daha düşük dayanım göstermiştir. "PRA-A" katkı kullanım oranının %1'den %2'ye

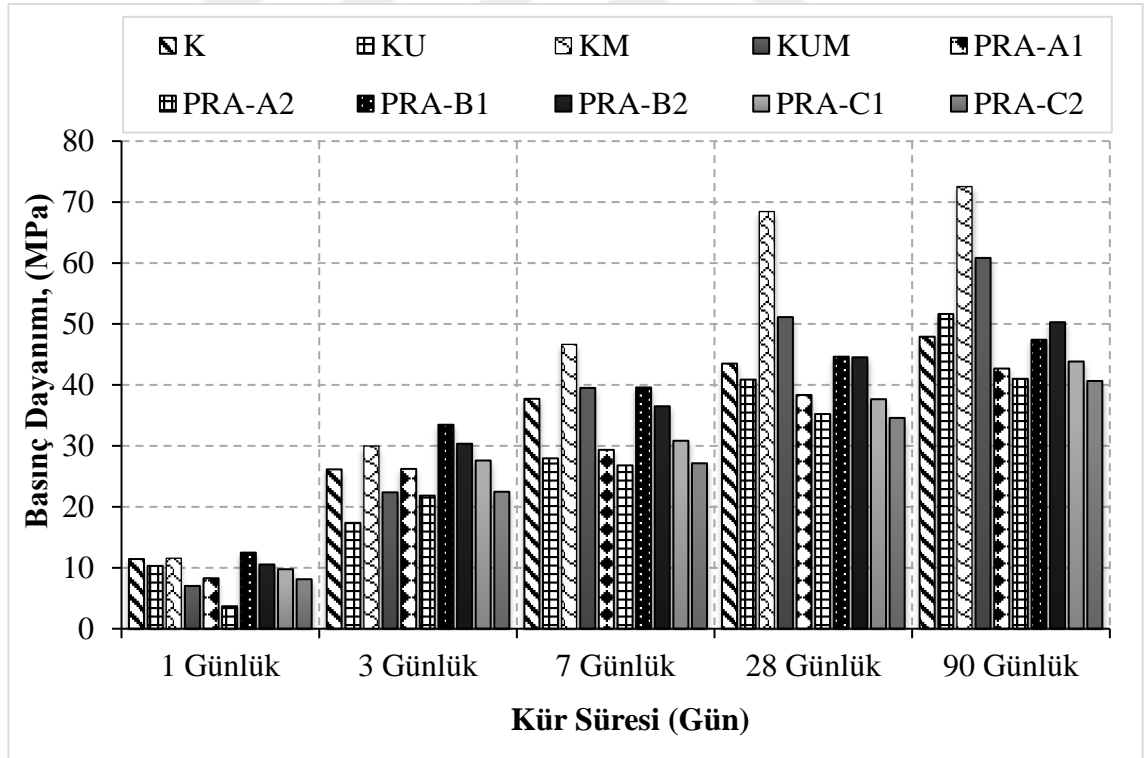
artışıyla basınç dayanımlarındaki azalma daha belirgin olmuştur. "PRA-C" katkının çimento ağırlığının %1 oranında karışıma eklenmesiyle kontrol karışımına kıyasla dayanım değerlerinde %10'lük bir azalma gözlemlenmiştir. Katkı kullanım oranı %1'den %2'ye arttırdığında, boşluk oranının artışına bağlı olarak kontrol karışımına kıyasla basınç dayanımlarındaki azalma oranı %10 artış göstererek daha belirgin hale gelmiştir. %2 oranında "PRA-C" isimli katkıyı içeren "PRA-C2" karışımının 90-günlük basınç dayanımı kontrol karışımına kıyasla %20 daha düşük olmuştur.

Hem hava sürüklenme özelliğine sahip hem de çözünmeyen kalıntı içeren "PRA-B" isimli katkının %1 oranında karışıma ilave edilmesiyle beraber kontrol karışımına kıyasla karışımların basınç dayanımı ciddi mertebede etkilenmemiştir. Ancak, söz konusu katkının çimento ağırlığının %2'si oranında karışıma eklenmesiyle basınç dayanımı değerlerinde azda olsa bir miktar artış gözlemlenmiştir. "PRA-B2" karışımının 90-günlük basınç dayanım kontrol karışımına göre yaklaşık %5 daha fazla olmuştur. Söz konusu katkı basınç dayanımı açısından iki zıt etkiye sahip olmaktadır. 1'incisi hava sürüklediğinden karışımın boşluk oranının artışına sebebiyet verdiği için dayanım özelliğini olumsuz etkilemesidir. 2'nci si ve olumlu etki ise çözünmeyen kalıntı içerdiğinden fiziksel olarak karışımdaki mikro-boşlukları tıkayarak basınç dayanım özelliklerini olumlu etkilemesidir. "PRA-B" isimli katkı kullanımı ile dayanım değerlerinin olumsuz etkilenmemesi 2'nci etkinin daha baskın olduğunun bir göstergesidir. Deney sonuçlarına göre, dayanım özelliği açısından söz konusu katkının çimento ağırlığının %2'si oranında kullanımı daha uygun olmuştur.

Sonuçlardan da görüldüğü gibi, harç karışımlarında 3 farklı mekanizmaya sahip geçirgenlik azaltıcı katkı kullanımı, karışımların basınç dayanım özelliklerinde ciddi mertebede bir artışa sebebiyet vermemiştir. Bu bağlamda, en başarılı katkı "PRA-B" isimli katkı olmuştur. Mineral katkılı karışımlarda ise basınç dayanımı açısından en başarılı karışımın %10 oranında metakaolin içeren ikili bağlayıcı sistemine sahip "KM" isimli karışım olduğu gözlemlenmiştir.

**Çizelge 4.13.** Harç küp numunelerin basınç dayanımları (S/Ç:0,45) (50x50x50 mm<sup>3</sup>)

<b>Basınç Dayanımı</b>					
Numune Adı	1 günlük	3 günlük	7 günlük	28 günlük	90 günlük
<b>K</b>	11,43	26,14	37,71	43,49	47,92
<b>KU</b>	10,31	17,37	27,97	40,88	51,64
<b>KM</b>	11,56	29,96	46,64	68,45	72,55
<b>KUM</b>	7,02	22,38	39,51	51,13	60,84
<b>PRA-A1</b>	8,28	26,22	29,34	38,34	42,69
<b>PRA-A2</b>	3,68	21,84	26,79	35,22	41,01
<b>PRA-B1</b>	12,48	33,47	39,58	44,64	47,42
<b>PRA-B2</b>	10,54	30,35	36,5	44,54	50,29
<b>PRA-C1</b>	9,76	27,6	30,84	37,66	43,84
<b>PRA-C2</b>	8,12	22,47	27,14	34,59	40,77



**Şekil 4.17.** Harç karışımlarının 1, 3, 7, 28 ve 90-günlük basınç dayanım grafiği

### *Su emme deneyi*

Harç karışımlarının 28 ve 90-günlük su emme oranı Çizelge 4.14 ve Şekil 4.18'de gösterilmektedir. Her değer 3 numune ölçümünün ortalamasını ifade etmektedir.

Mineral katkıli karışımlar dikkate alındığında, %20 uçucu kül içeren "KU" karışımı hariç tüm mineral katkıli karışımların 28-günlük su emme oranları kontrol karışımına kıyasla daha düşük olmuştur. "KU" karışımın 28-günlük su emme oranı kontrol karışımına kıyasla çok azda olsa %4 daha yüksek olmuştur.

Tüm mineral katkıli karışımların 90-günlük su emme oranları kontrol karışımına kıyasla daha düşük olmuştur. Kontrol karışımına kıyasla, "KU", "KM" ve "KUM" karışımların 90-günlük su emme oranları sırasıyla, %16, %28 ve %34 daha düşük ölçülmüştür. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, su emme davranışı açısından %20 uçucu kül ve %10 metakaolin içeren "KUM" karışım en üstün performansı sergilemiştir. Söz konusu karışımın daha başarılı olması toplamda çimento ağırlığının %30'ü oranında mineral katkı içermesine bağlı olarak mineral katkının fiziko-kimyasal etkisinden kaynaklanmaktadır. Fiziksel olarak çimentoya nazaran daha ince olduklarından boşlukları tıkayarak geçirgenliğinin azalmasına sebebiyet vermiştir. Bu mekanizma erken yaşlardan itibaren etkili olmuştur. Kimyasal olarak da mineral katkının puzolanik reaksiyonundan dolayı CH'ler C-S-H'e dönüşerek daha dolu bir yapı oluşmuştur. Böylece, karışımın geçirgenliği azalmıştır. Söz konusu mekanizma erken yaşlardan itibaren etkili olmasına rağmen ileri yaşlarda daha baskın olmuştur. Bu bağlamda metakaolin kullanımı uçucu kül'e göre daha etkili olmuştur. Çizelge 3.3'ten de görüldüğü gibi, uçucu külün 28 ve 90-günlük puzolanik aktivite indeksi sırasıyla, %78 ve % 91 olarak ölçülmüştür. Bu değer metakaolin için sırasıyla %105 ve %110 olarak elde edilmiştir.

Geçirgenlik azaltıcı katkıli karışımlar incelediğinde, genel olarak söz konusu katkıların kullanımı ile harç karışımlarının su emme oranlarında azalmalar gözlemlenmiştir. Geçirgenlik azaltma mekanizması olarak hava sürüklenme özelliğine sahip "PRA-A" isimli katkı çimento ağırlığının %1'i oranında karışıma eklenmesiyle, kontrol karışımına kıyasla, 28 ve 90-günlük su emme oranlarında sırasıyla, %10 ve %24'lük bir düşüş sağlanmıştır. Söz konusu katkının %2'si oranında kullanımı ile kontrol karışımına göre

28 ve 90-günlük su emme oranlarında sırasıyla %4 ve %15'lik bir azalma gerçekleşmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi, söz konusu katkı kullanım oranı %1'den %2'ye artmasıyla geçirgenlik azaltma performans olumsuz etkilenmiştir. Bu olumsuz etkinin, "PRA-A" katkı kullanım oranının artışına bağlı olarak karışımda aşırı hava sürüklenme sonucu uniform bir şekilde olmayan boşlukların oluşumundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Söz konusu katkı kullanım oranının %1'den %2'ye artmasıyla, karışım hava içeriğinin %2,9'dan %5,5'e arttığı Şekil 4.9'dan da görülmektedir.

Geçirgenlik azaltma mekanizması olarak hem çözünmeyen kalıntı hem de bir miktar hava sürüklenme özelliğine sahip "PRA-B" isimli katkının, çimentonun %1'i oranında karışıma eklenmesiyle kontrol karışımına kıyasla 28 ve 90-günlük su emme oranlarında sırasıyla %7 ve %17'lik bir azalma kaydedilmiştir. Söz konusu katkının çimento ağırlığının %2'si oranında karışıma eklenmesi sonucu kontrol karışımına nazaran 28 ve 90-günlük su emme oranlarında sırasıyla, %13 ve %30'lük bir düşüş ölçülmüştür. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, söz konusu katkının kullanım oranının %1'den %2'ye artmasıyla beraber karışımların geçirgenlik özellikleri olumlu etkilenmiştir. Bu olumlu etkinin, katkı kullanım oranının artmasına bağlı olarak katkının içerdiği çözünmeyen kalıntı miktarının artması sonucu fiziksel olarak boşlukların çözünmeyen kalıntı tarafından tıkandığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, söz konusu katkının kullanım oranının %1'den %2'ye artmasıyla karışım hava içeriğinin %3,10'dan %1,55'e düştüğü Şekil 4.9'da görülmektedir.

Geçirgenlik azaltıcı mekanizması olarak aşırı miktarda hava sürüklenme özelliğine sahip "PRA-C" isimli katkının çimento ağırlığının %1'i oranında karışıma eklenmesiyle kontrol karışımına kıyasla, 28 ve 90-günlük su emme oranlarında %7'lik bir azalma ölçülmüştür. Söz konusu katkı çimento ağırlığının %2'si oranında karışıma ilave edildiğinde kontrol karışımına kıyasla 28-günlük su emme oranlarında %8'lik bir artış ve 90-günlük su emme oranlarında %3'lük bir azalma tespit edilmiştir. "PRA-C" isimli katkının kullanım oranının %1'den %2'ye artması sonucu harç karışımlarının su emme performansı olumsuz etkilenmiştir. Daha öncede vurgulandığı gibi söz konusu bu olumsuz etkinin, katkı kullanım oranının artışına bağlı olarak karışımda aşırı hava sürüklenme sonucu uniform bir şekilde dağılmayan boşlukların oluşumundan kaynaklandığı düşünülmektedir. "PRA-C" isimli katkının kullanım

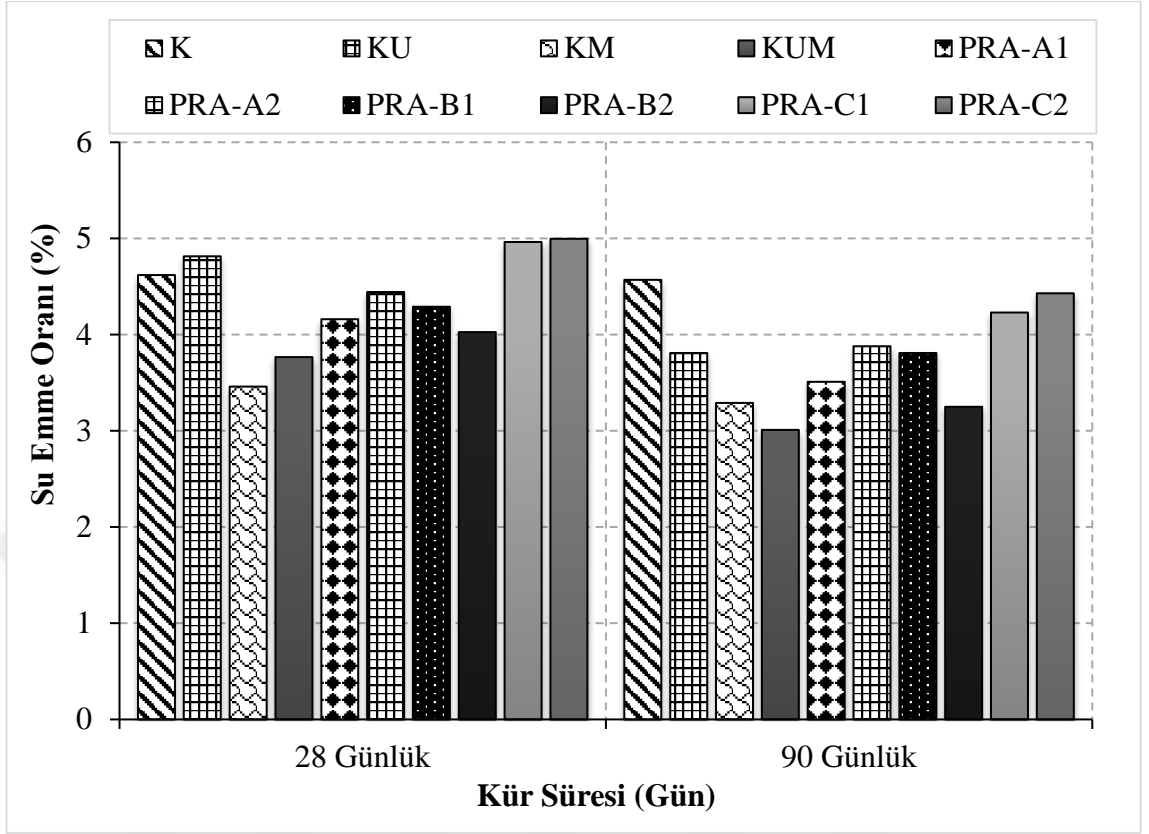
oranının %1'den %2'ye artmasıyla, karışım hava içeriğinin %4,9'dan %7,4'e arttığı Şekil 4.9'dan da anlaşılmaktadır.

Hem "PRA-A" hem de "PRA-C" isimli katkılar geçirgenlik azaltıcı mekanizması olarak hava sürüklenme özelliğine sahiptir. Geçirgenlik azaltma davranışı açısından "PRA-C" isimli katkının "PRA-A" katkıya kıyasla daha düşük performansla sahip olduğu deney sonuçlarından anlaşılmıştır. "PRA-C" isimli katkının kullanımı ile "PRA-A" isimli katkıyı içeren karışımına kıyasla karışım hava içerdiğinin yaklaşık 1,5 kat daha fazla olduğu Şekil 4.9'dan da anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak geçirgenlik azaltıcı katkıli karışımlar içinde hem çözünmeyen kalıntı içeren hem de az miktarda hava sürüklenme özelliğine sahip "PRA-B" katkı geçirgenlik azaltıcı davranışı açısından en başarılı karışım olduğu anlaşılmıştır. Mineral katkı içeren karışımlarda ise hem uçucu kül hem de metakaolin içeren üçlü bağlayıcı sisteme sahip "KUM" karışımı geçirgenliği en düşük olan karışım olarak tespit edilmiştir. Geçirgenlik azaltma özelliği açısından mineral katkının kimyasal katkıya kıyasla daha başarılı olduğu tespit edilmiştir.

**Çizelge 4.14.** Harç karışımlarının su emme oranı

<b>Su Emme Oranı (%)</b>		
<b>Numune Adı</b>	<b>28 günlük</b>	<b>90 günlük</b>
<b>K</b>	4,620	4,570
<b>KU</b>	4,815	3,810
<b>KM</b>	3,460	3,290
<b>KUM</b>	3,767	3,010
<b>PRA-A1</b>	4,160	3,510
<b>PRA-A2</b>	4,443	3,880
<b>PRA-B1</b>	4,290	3,810
<b>PRA-B2</b>	4,027	3,250
<b>PRA-C1</b>	4,963	4,230
<b>PRA-C2</b>	4,997	4,430

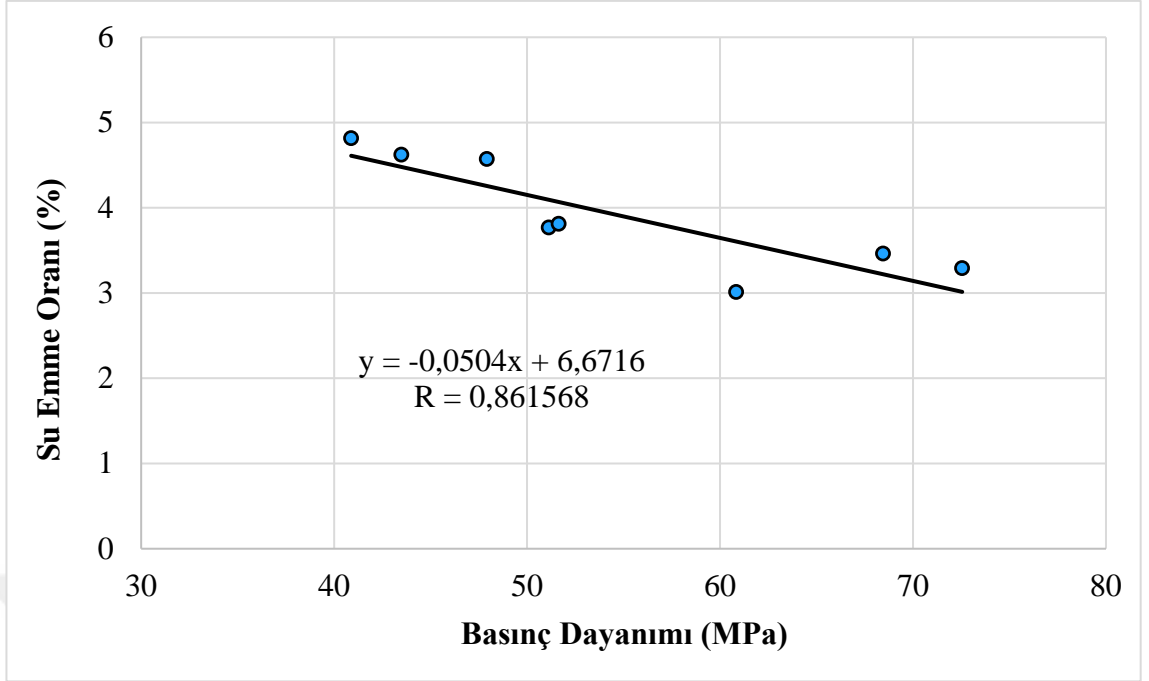


Şekil 4.18. Harç karışımlarının 28 ve 90-günlük su emme oranları

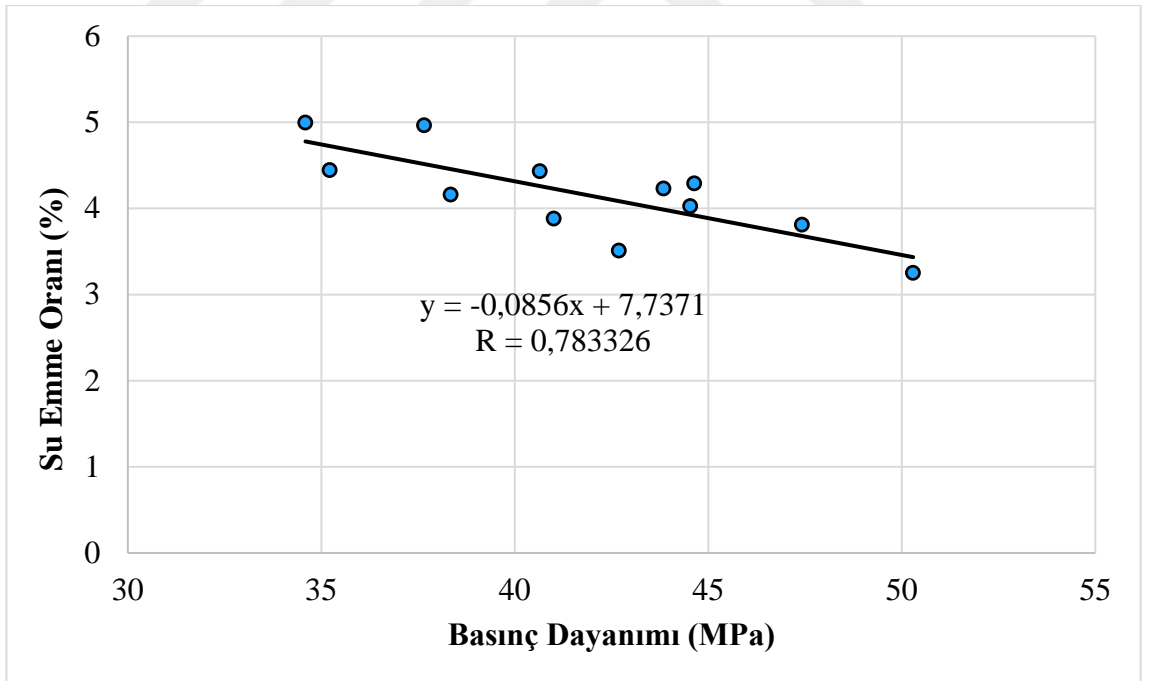
Numune yaşından ve mineral katkı türünden bağımsız olarak harç karışımlarının 28 ve 90-günlük su emme oranı-basınç dayanımı ilişkisi Şekil 4.19’da gösterilmiştir. Mineral katkıli karışımlarının su emme oranı ve basınç dayanımı arasında nispeten güçlü bir doğrusal ilişkinin mevcut olduğu Şekil 4.19’dan da anlaşılmaktadır.

Geçirgenlik azaltıcı katkı etki mekanizmasından ve katkı kullanım miktarından bağımsız olarak geçirgenlik azaltıcı katkıli harç karışımlarının 28 ve 90-günlük su emme oranı-basınç dayanımı ilişkisi Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi, geçirgenlik azaltıcı katkı karışımların su emme oranı-basınç dayanımı arasında nispeten zayıf bir doğrusal ilişki mevcuttur.





Şekil 4.19. Harç karışımlarının kontrol ve mineral katkı içeren su emme oranı-basınç dayanımı arasındaki ilişki



Şekil 4.20. Harç karışımlarının kontrol ve geçirgenlik azaltıcı katkı içeren su emme oranı-basınç dayanımı arasındaki ilişki

### *Ultrases geçiş hızı (UPV)*

Numunelerin 28 ve 90 günlük suda krlenmesinden sonraki ultrases geçiş hızları, ultrases geçiş süreleri ve basınç dayanım sonuçları izelge 4.15 ve 4.16’da verilmiştir. Ancak, geçirgenlik azaltıcı katkılı karışımların sadece 90-günlük ultrases geçiş hızı ölçümü yapıldığından söz konusu karışımların 28-günlük ölçümleri verilmemiştir. Ayrıca, Erdoğan (2003) tarafından beton karışımlarının ultrases geçiş hızı beton kalitesi ile ilgili önerilen değerlendirme izelge 4.17’de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.15.** 28 günlük kontrol ve mineral katkılı numunelerin ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı sonuçları

Numune Adı	28 Gün Basınç Dayanım (MPa)	Ultrases Geçiş Süresi (µ.sn)	Ultrases Geçiş Hızı (km/sn)	Beton Kalitesi*
<b>K</b>	43,49	11,89	4,202	İyi
<b>KU</b>	40,88	11,20	4,464	İyi
<b>KM</b>	68,45	11,00	4,545	Mkemmell
<b>KUM</b>	51,13	11,09	4,510	Mkemmell

\* izelge 4.17’de gösterilen değerlendirme dikkate alınarak yorumlanmıştır.

**Çizelge 4.16.** 90 günlük kontrol, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkılar içeren numunelerin ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı sonuçları

Numune Adı	90 Gün Basınç Dayanım (MPa)	Ultrases Geçiş Süresi (µ.sn)	Ultrases Geçiş Hızı (km/sn)	Beton Kalitesi*
<b>K</b>	47,92	11,77	4,249	İyi
<b>KU</b>	51,64	10,68	4,684	Mkemmell
<b>KM</b>	72,55	10,24	4,883	Mkemmell
<b>KUM</b>	60,84	10,63	4,705	Mkemmell
<b>PRA-A1</b>	42,69	11,67	4,283	İyi
<b>PRA-A2</b>	41,01	11,79	4,240	İyi
<b>PRA-B1</b>	47,42	11,49	4,350	İyi
<b>PRA-B2</b>	50,29	11,07	4,416	İyi
<b>PRA-C1</b>	43,84	11,94	4,187	İyi
<b>PRA-C2</b>	40,65	12,44	4,020	İyi

\* izelge 4.17’de gösterilen değerlendirme dikkate alınarak yorumlanmıştır.

**Çizelge 4.17.** Ultrases değerleri ile beton kalitesinin değerlendirilme kriterleri (Erdoğan, 2003)

<b>Dalga hızı(km/sn)</b>	<b>Beton kalitesi</b>
> 4,50	Mükemmel
3,50 – 4,50	İyi
3,00 – 3,50	Şüpheli
2,00 – 3,00	Zayıf
< 2,00	Çok zayıf

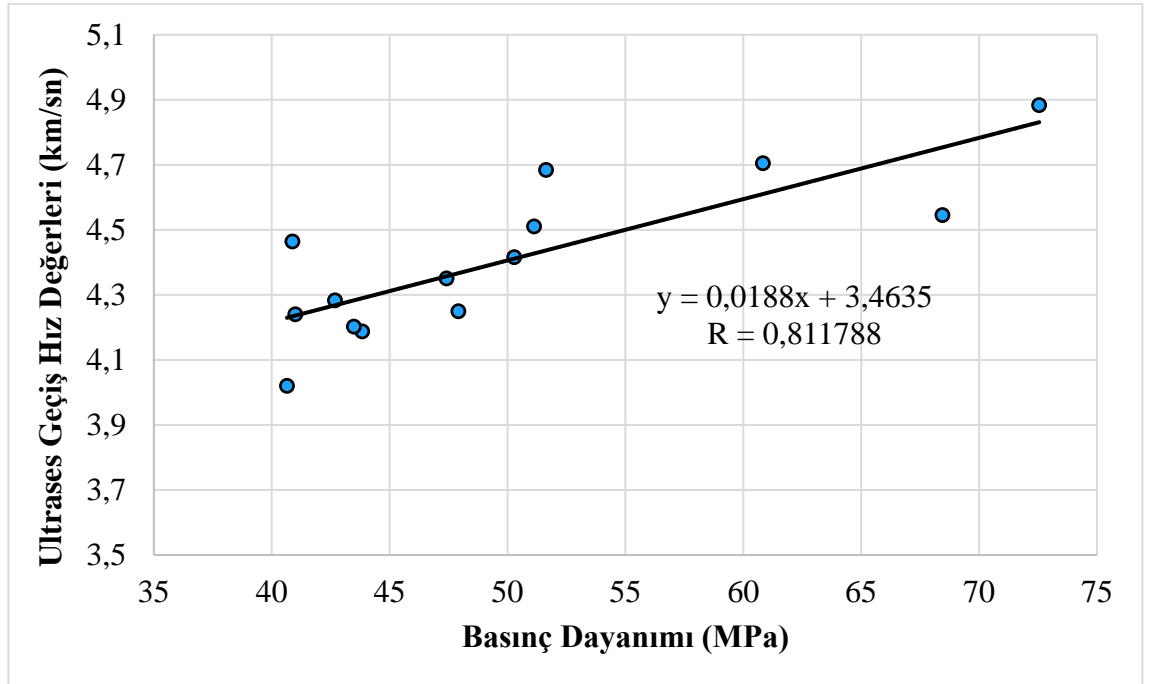
Deney sonuçlarından da anlaşıldığı gibi mineral katkılı karışımların 28-günlük ultrases geçiş hızı 4,46-4,54 km/sn arasında değişmektedir. Çizelge 4.15'ten de görüldüğü gibi mineral katkı türünden ve miktarından bağımsız olarak tüm mineral katkılı karışımların 28-günlük ultrases geçiş hızı değerleri kontrol karışımına kıyasla daha yüksek olmuştur. Kontrol ve mineral katkılı karışımların arasındaki söz konusu bu fark zamanla daha da belirgin hale gelmiştir. Kontrol karışımının 28-günlük ultrases geçiş hızı 4,20 km/sn ölçülerek Çizelge 4.17'de gösterilen değerlendirmeye göre iyi beton kalitesinde yer almıştır. Kontrol karışımının 28 ve 90-günlük ultrases geçiş hızı arasında kayda değer bir değişiklik gözlemlenmemiştir.

%20 uçucu kül içeren "KU" karışımının 28 ve 90-günlük ultrases geçiş hızı değerleri kontrol karışımla kıyasla sırasıyla, %6 ve %11 daha fazla olmuştur. %10 metakaolin içeren "KM" karışımında 28 ve 90-günlük ultrases geçiş hızları kontrol karışımına kıyasla sırasıyla, %8 ve %12 daha yüksek bir değer ölçülmüştür. Hem uçucu kül ve hem metakaolin içeren "KUM" karışımının 28 ve 90-günlük ultrases geçiş hızı değerleri için bu oran %7 ve %15 olarak belirlenmiştir. 28 ve 90-günlük ultrases geçiş hızı ölçümleri açısından "KM" karışımı en başarılı karışım olarak seçilmiştir. Daha önce de vurgulandığı gibi, çalışma kapsamında kullanılan diğer bağlayıcılara kıyasla metakaolinin fiziksel olarak en yüksek blaine inceliğine ve kimyasal olarak en yüksek dayanım aktivite değerine sahip olduğundan harç karışımlardaki mevcut mikro boşlukları azaltarak ultrases geçiş hızı davranışını olumlu etkilemiştir.

Geçirgenlik azaltıcı içeren harç numunelerde "PRA-B" isimli katkıyı içeren karışımlar kontrol karışımına göre, ultrases geçiş hızı açısından daha üstün performans göstermiştir. Söz konusu katkı çözünmeyen kalıntı içerdiğinden fiziksel olarak karışımdaki mikro-boşlukları tıkayarak ultrases geçiş hızını olumlu etkilemesidir. Ancak "PRA-A" ve "PRA-C" isimli katkıları hava sürüklenme özelliğine sahip olduğundan boşluk oranının artışına sebebiyet vererek harç numunelerin ultrases geçiş hızını olumsuz etkilemiştir.

Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, numunelerin ultrases geçiş hızı davranışı açısından mineral katkı kullanımı geçirgenlik azaltıcı katkı kullanıma kıyasla daha başarılı olmuştur.

28 ve 90 günlük numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri ile 28 ve 90-günlük basınç dayanımları arasındaki doğrusal bir güçlü ilişki görülmektedir. Değerlerinin artışıyla, basınç dayanımlarının arttığı görülmektedir. Numune yaşından, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkı türünden ve kullanım miktarından bağımsız olarak tüm harç karışımların basınç dayanımının ultrases geçiş hızı ilişkisi harç karışımlarının basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı değerleri arasında doğrusal bir ilişkinin mevcut olduğu Şekil 4.21'den anlaşılmıştır.



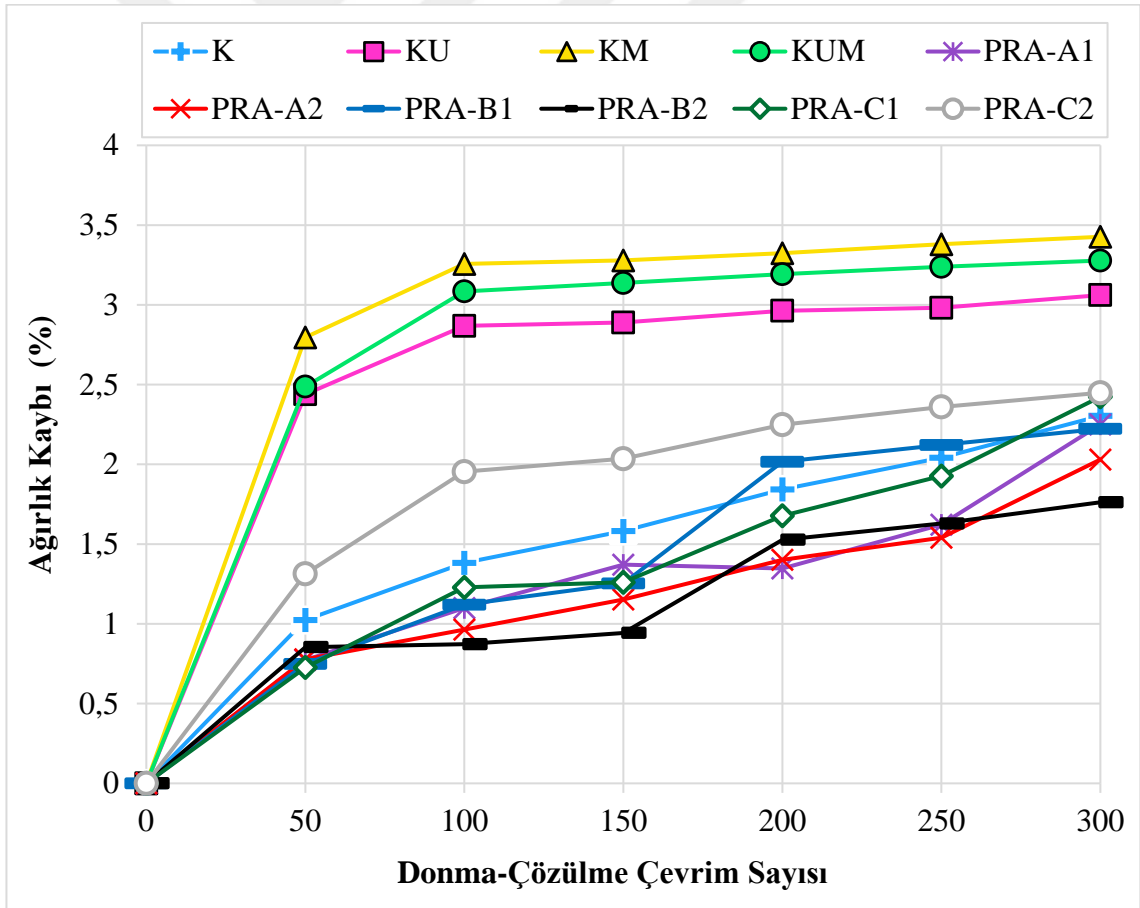
Şekil 4.21. Tüm numunelerin ultrases geçiş hızları ile basınç dayanımları arasındaki ilişki

### *Donma-çözülme direnci*

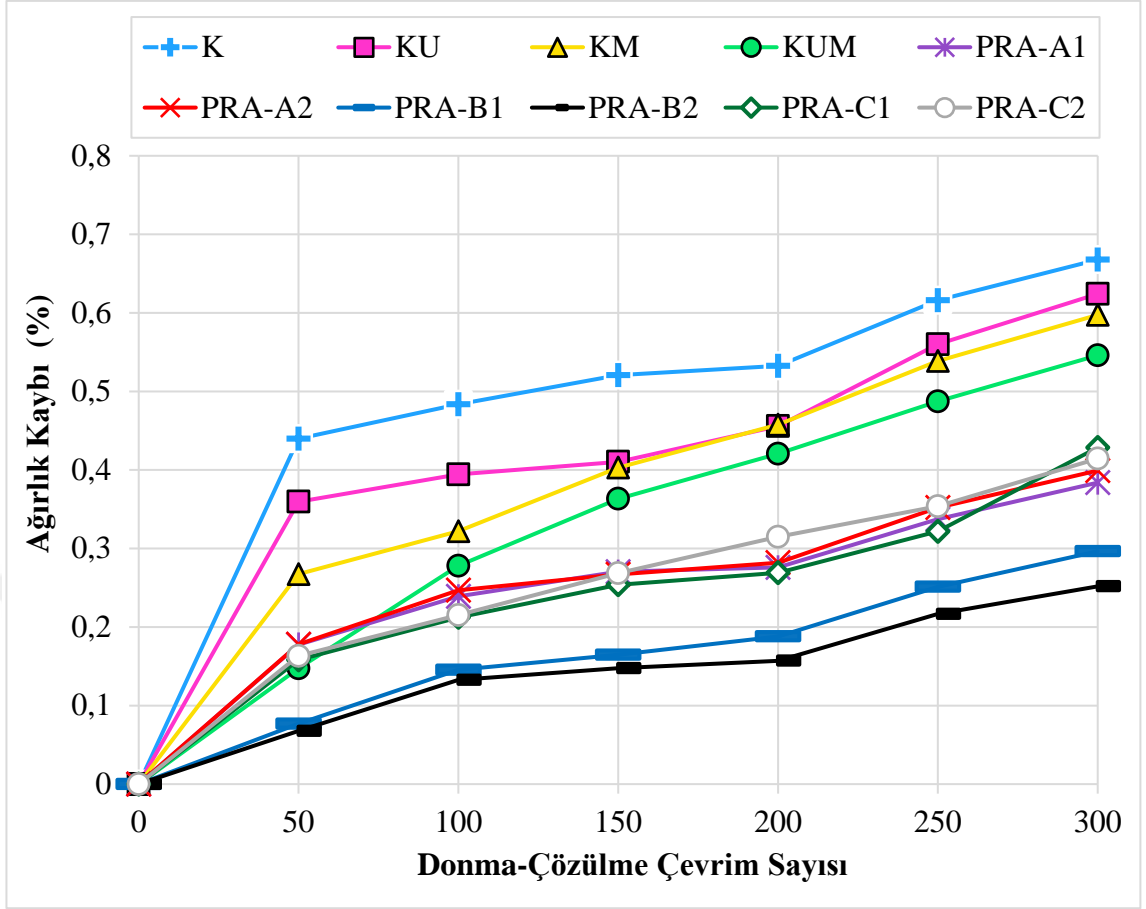
Daha önce de vurgulandığı gibi, harç karışımlarının donma-çözülme direncinin incelenmesi 300 donma-çözülme çevrimi sırasında her 50 çevrimde bir ağırlık kaybı, ultrases geçiş hızı ve dinamik elastisite modülü değişimi ile 300 çevrim sonunda durabilite faktörünün elde edilmiş olarak 4 farklı yöntemle incelenmiştir. Her değer 3 ölçümün ortalaması olarak hesaplanmıştır.

### *Donma-çözülme çevrimine maruz kalan harç karışımların ağırlık kaybı*

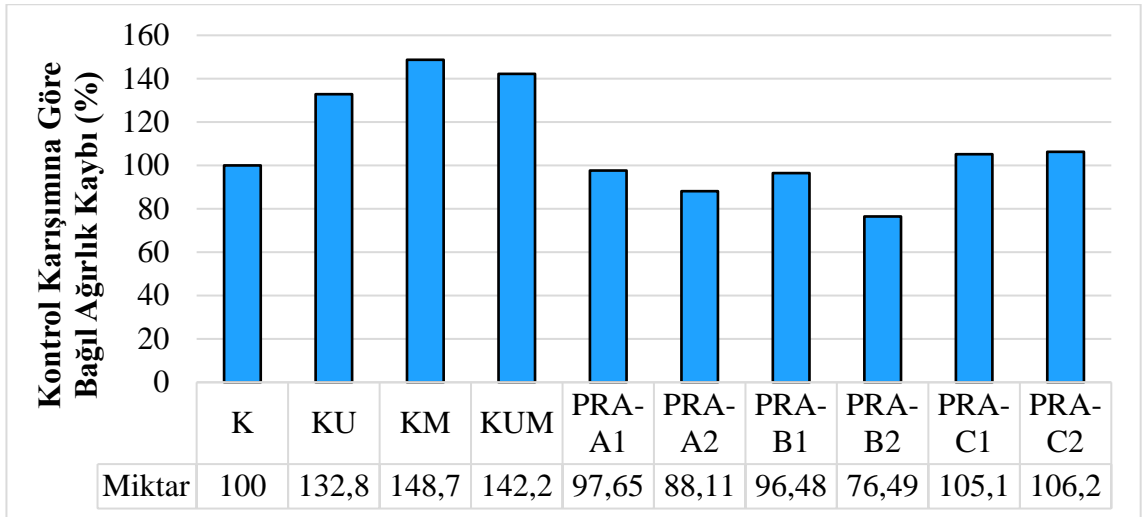
28 ve 90 günlük harç numunelerinin 0, 50, 150, 200, 250 ve 300 donma-çözülme döngüsü sırasında ağırlık kaybının yüzdesel sonuçları sırayla, Şekil 4.22 ve 4.23'te gösterilmiştir. Ayrıca 28 ve 90 günlük harç numunelerinin 300 donma-çözülme çevrimi sonunda kontrol karışımına kıyasla bağıl ağırlık kaybı sırasıyla Şekil 4.24 ve 4.25'te verilmiştir.



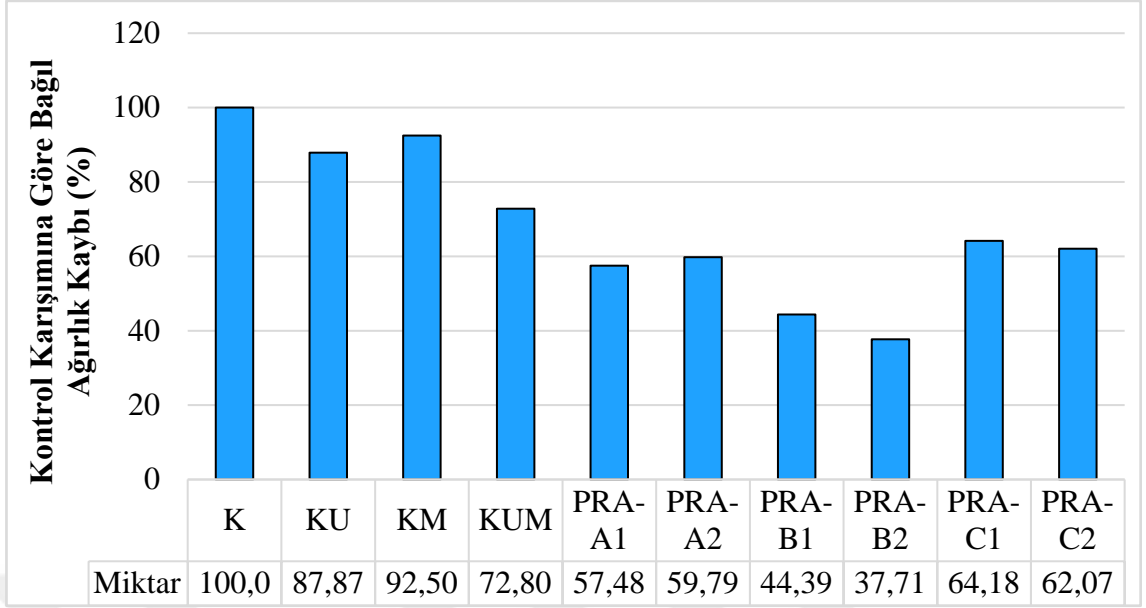
Şekil 4.22. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 28 günlük kontrol, mineral katkılı ve geçirgenlik azaltıcı katkı içeren harç numunelerin ağırlık kaybı değişimi



Şekil 4.23. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol, mineral katkı ve geçirgenlik azaltıcı katkı içeren harç numunelerinin ağırlık kaybı değişimi



Şekil 4.24. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 28 günlük kontrol, mineral katkı ve geçirgenlik azaltıcı katkı içeren harç numunelerinin bağıl ağırlık kaybı değişimi



**Şekil 4.25.** 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol, mineral katkı ve geçirgenlik azaltıcı katkı içeren harç numunelerin bağlı ağırlık kaybı değişimi

Şekil 4.22'den de görüldüğü gibi, 28 günlük numunelerde tüm donma-çözülme çevrimi sonunda en fazla ağırlık kaybı genelde mineral katkıli karışımlarda olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.24'ten de görüldüğü gibi 28 günlük numunelerde 300 donma-çözülme çevrim sonunda kontrol karışımına kıyasla "KU", "KM" ve "KUM" karışımları sırasıyla yaklaşık %24, %39 ve %33 daha fazla ağırlık kaybetmiştir. Bilindiği gibi mineral katkının kullanımı karışımlarda oluşturduğu fiziko-kimyasal etkiden dolayı çimentolu sistemlerin davranışını etkilemektedir. Çalışma kapsamında çimento yerine karışıma ilave edilen mineral katkının inceliğinin çimentoya kıyasla daha yüksek olduğu Çizelge 3.3'te de anlaşılmaktadır. Harç karışımlarında ince malzeme miktarının artışıyla boşluk hacminin azalmasına bağlı olarak donma-çözülme davranışının olumlu etkilenmesi beklenilmektedir. Ancak minerallerin karışıma eklenmesiyle beraber ilk 28 günlük süreçte donma-çözülme davranışı açısından harç karışımlarının performansını olumsuz etkilenmesinin bu süre zarfında kimyasal olarak puzolanik reaksiyonun tam olarak gerçekleşmemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

90 günlük mineral katkıli numuneler incelendiğinde mineral katkı türü ve kullanım miktarından bağımsız olarak kontrol karışımına kıyasla 300 donma-çözülme çevrim sırasında mineral katkıli karışımlarda ağırlık kaybı daha az olduğu Şekil 4.23'ten anlaşılmaktadır.

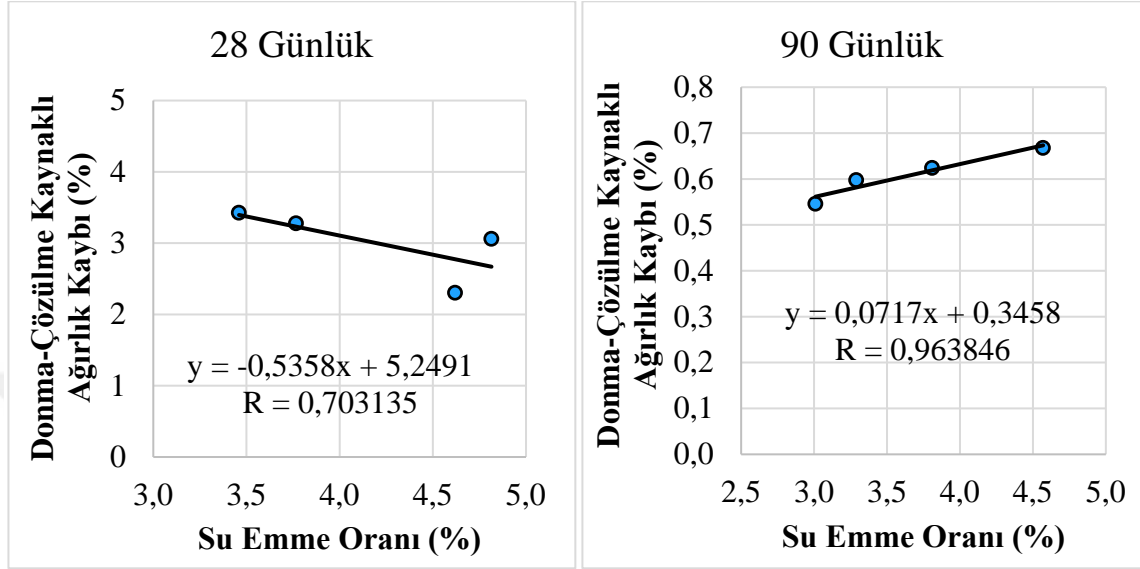
Şekil 4.25'ten anlaşıldığı gibi 300 donma-çözülme çevrimi sonunda kontrol karışımına kıyasla "KU", "KM" ve "KUM" karışımlarında sırasıyla yaklaşık %13, %8 ve %28 daha az ağırlık kaybı gözlemlenmiştir. Mineral katkı kullanımıyla 90 günlük numunelerde donma-çözülme kaynaklı ağırlık kaybının azalması mineral katkıların fiziksel olarak daha ince olmasına ilaveten 90 günlük süreçte puzolanik reaksiyonunun büyük bir kısmının gerçekleştiğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Donma-çözülme kaynaklı ağırlık kaybı davranışı açısından hem uçucu kül hem de metakaolin içeren üçlü bağlayıcı sistemine sahip "KUM" karışımı en iyi geçirimsizliğe sahip olduğu tespit edilmiştir.

Geçirgenlik azaltıcı katkı içeren karışımlar incelendiğinde numune yaşından bağımsız olarak tüm geçirgenlik azaltıcı katkılı karışımlar donma-çözülme kaynaklı ağırlık kaybı açısından kontrol karışımına göre daha yüksek performans göstermiştir. Söz konusu bu olumlu etki zamanla daha bariz hale gelmiştir. Daha öncede vurgulandığı gibi çalışma kapsamında kullanılan her 3 geçirgenlik azaltıcı katkıda hava sürüklenme özelliğine sahiptir. Bu sebepten donma esnasında hasar şiddeti azalmıştır. "PRA-A" ve "PRA-C" isimli geçirgenlik azaltıcı katkı içeren 90 günlük numuneler ağırlık kayıp oranları kontrol karışımına göre, ortalama yaklaşık %40 daha düşük olarak sonuçlanmıştır. Söz konusu bu karışımlar "PRA-B" isimli katkı içeren karışıma göre de, donma-çözülme direnci açısından yaklaşık %20 daha düşük performans göstermiştir. Geçirgenlik azaltıcı katkı kullanım oranının %1'den %2'ye artmasıyla, karışımların donma-çözülme kaynaklı ağırlık kaybı performansı ciddi mertebede etkilenmiştir. Çimento ağırlığının %2'si oranında "PRA-B" isimli geçirgenlik azaltıcı katkı içeren numune 300 donma-çözülme sonunda kontrol karışımına kıyasla %62 daha az ağırlık kaybı göstererek donma-çözülme direnci açısından en iyi performansa sahip olan karışım olarak seçilmiştir.

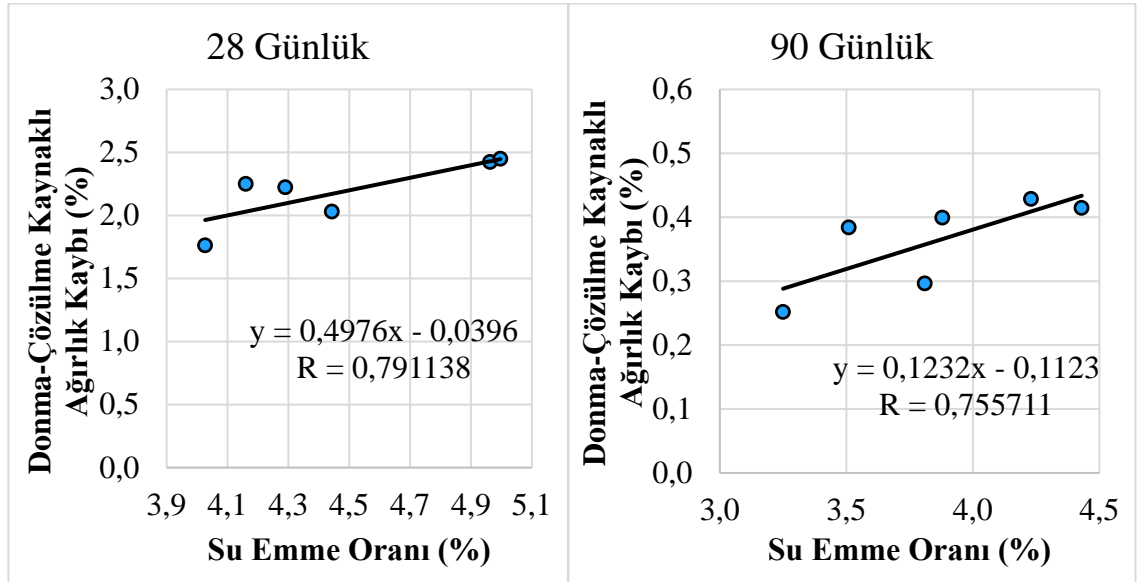
Harç karışımlarının 28 ve 90-günlük su emme oranı-donma çözülme kaynaklı ağırlık kaybı ilişkisi sırasıyla, Şekil 4.26 ve 4.27'de gösterilmiştir. Mineral katkılı karışımlarda su emme oranı ve ağırlık kaybı arasında 28 günlük numunelerde doğrusal ters bir ilişkinin ancak 90 günlük numunelerde çok güçlü doğrusal bir ilişkinin mevcut olduğu şekil 4.26'dan görülmektedir. 28 günlük numunelerde söz konusu ters ilişkinin nedeni puzolanik reaksiyonun 28 gün kısa bir sürede tam olarak gerçekleşmediğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Geçirgenlik azaltıcı karışımlarda ise hem 28 ve hem de 90 günlük numunelerde su emme oranı ve ağırlık kaybı arasında doğrusal bir ilişkinin mevcut olduğu Şekil 4.27'den anlaşılmaktadır.



Şekil 4.26. Mineral katkı içeren numunelerin donma-çözülme kaynaklı ağırlık kaybı ile su emme oranı arasındaki ilişki



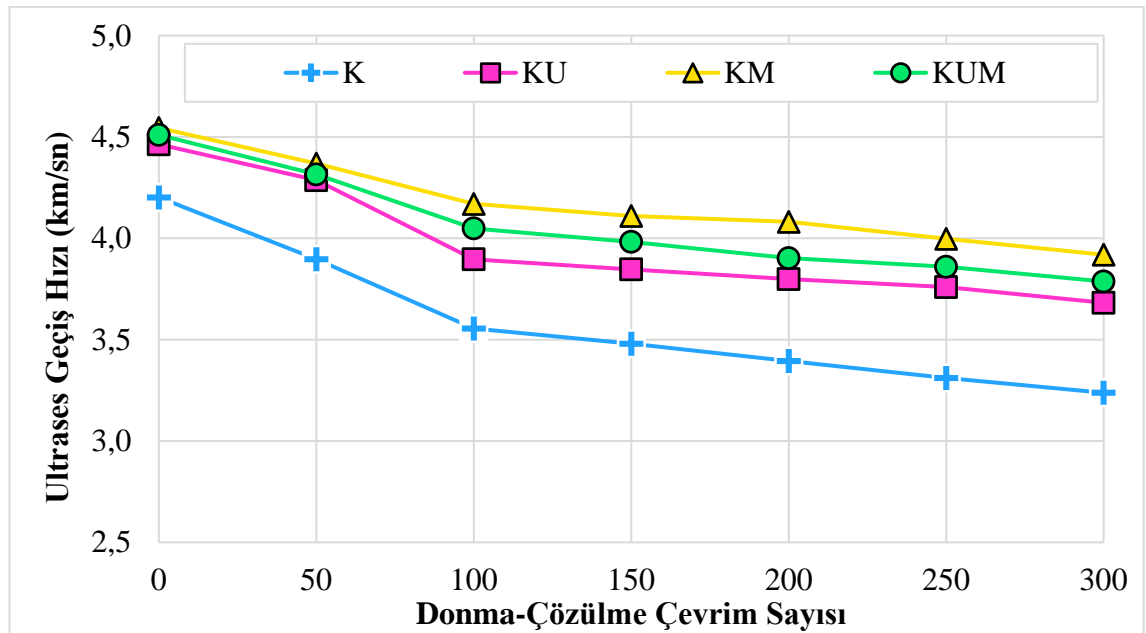
Şekil 4.27. Geçirgenlik azaltıcı katkı içeren numunelerin donma-çözülme kaynaklı ağırlık kaybı ile su emme oranı arasındaki ilişki

### *Donma-çözülme çevrimine maruz kalan harç karışımların ultrases geçiş hızı değişimi*

Donma-çözülme çevrimine maruz kalan 28 ve 90 günlük mineral katkıli karışımların her 50 çevrimde bir ölçülen ultrases geçiş hız değerleri sırasıyla, Çizelge 4.18 ve 4.19 ile Şekil 4.28 ve 4.29'da gösterilmiştir.

**Çizelge 4.18.** 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 28 günlük kontrol ve mineral katkıli harç numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri

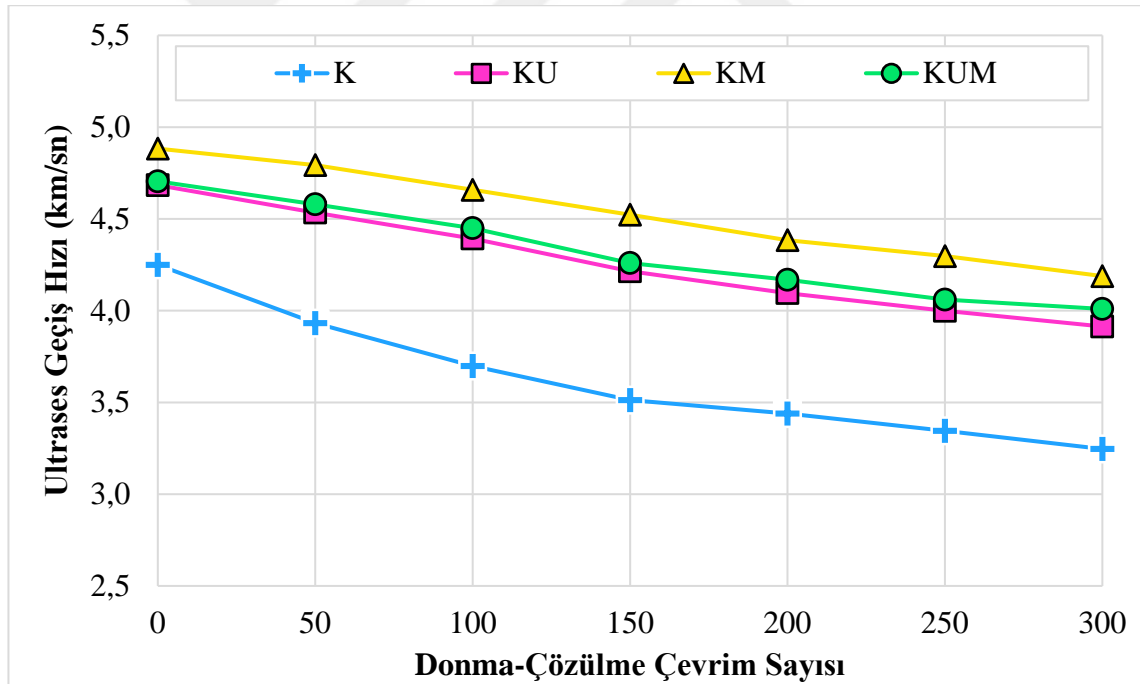
Çevrim	UPV	Numuneler			
		K	KU	KM	KUM
0	V (km/sn)	4,202	4,464	4,545	4,510
	t (μ.sn)	11,90	11,20	11,00	11,09
50	V (km/sn)	3,897	4,287	4,369	4,315
	t (μ.sn)	12,83	11,66	11,45	11,59
100	V (km/sn)	3,555	3,896	4,170	4,049
	t (μ.sn)	14,06	12,83	11,99	12,35
150	V (km/sn)	3,480	3,846	4,110	3,982
	t (μ.sn)	14,37	13,00	12,16	12,56
200	V (km/sn)	3,395	3,799	4,081	3,902
	t (μ.sn)	14,73	13,16	12,25	12,81
250	V (km/sn)	3,311	3,759	3,998	3,860
	t (μ.sn)	15,10	13,30	12,51	12,95
300	V (km/sn)	3,238	3,682	3,919	3,787
	t (μ.sn)	15,44	13,58	12,76	13,20



**Şekil 4.28.** 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 28 günlük kontrol ve mineral katkıli harç numunelerin ultrases geçiş hızı değişimi

**Çizelge 4.19.** 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol ve mineral katkıli harç numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri

Çevrim	UPV	Numuneler			
		K	KU	KM	KUM
0	V (km/sn)	4,249	4,684	4,883	4,705
	t (μ.sn)	11,77	10,68	10,24	10,63
50	V (km/sn)	3,932	4,534	4,793	4,580
	t (μ.sn)	12,72	11,03	10,43	10,92
100	V (km/sn)	3,698	4,393	4,658	4,450
	t (μ.sn)	13,52	11,38	10,73	11,24
150	V (km/sn)	3,513	4,214	4,523	4,259
	t (μ.sn)	14,23	11,86	11,06	11,74
200	V (km/sn)	3,439	4,096	4,384	4,168
	t (μ.sn)	14,54	12,21	11,40	12,00
250	V (km/sn)	3,345	3,999	4,297	4,060
	t (μ.sn)	14,95	12,50	11,64	12,31
300	V (km/sn)	3,246	3,914	4,188	4,009
	t (μ.sn)	15,40	12,78	11,94	12,47



**Şekil 4.29.** 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol ve mineral katkıli harç numunelerin ultrases geçiş hızı değişimi

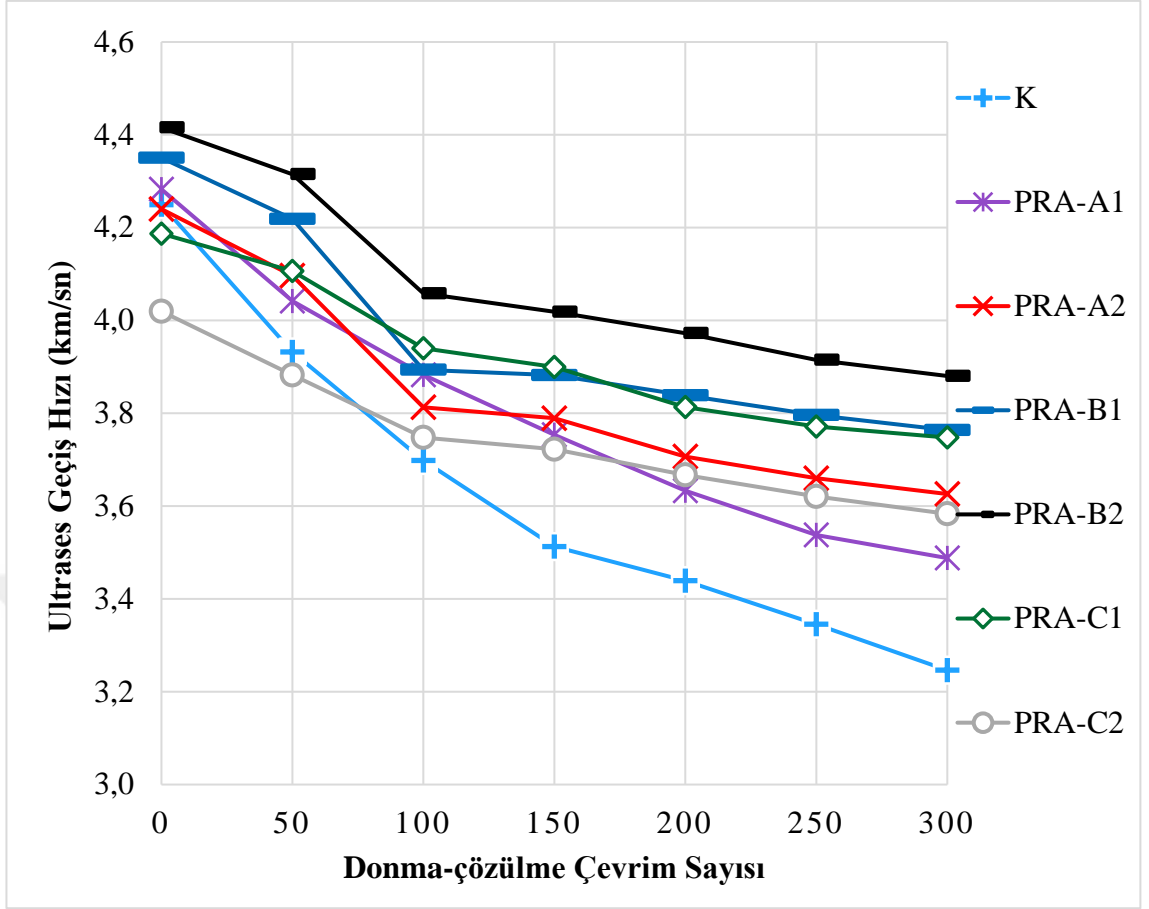
Deney sonuçlarına dayanarak, numune yaşından bağımsız olarak mineral katkı içeren numuneler kontrol numunesine göre daha yüksek ultrases geçiş hızı göstermiştir. Söz konusu bu davranış zamanla daha bariz hale gelmiştir.

28 günlük numuneler incelendiğinde 300 donma-çözülme çevrimine maruz kaldıktan sonra kontrol karışımına kıyasla "KU", "KM" ve "KUM" karışımlarının ultrases geçiş hızları sırasıyla, %14, %21 ve %17 daha fazla olmuştur. Söz konusu bu sıralama 90 günlük numunelerde kontrol karışımına göre sırasıyla %20, %26 ve % 23 olduğu Çizelge 4.19'dan anlaşılmıştır. 90 günlük numunelerin 28 günlük numunelerle kıyasla daha üstün performans göstermesi daha öncede vurgulandığı gibi 90 günlük süre içerisinde puzolanik reaksiyonun büyük bir kısmının gerçekleştiğinden kaynaklanmaktadır. %10 oranında metakaolin içeren "KM" karışımı başlangıçtan itibaren 300 donma-çözülme çevrimi sonrası en yüksek ultrases geçiş hızına sahip olduğu Şekil 4.28 ve 4.29'dan anlaşılmıştır.

Geçirgenlik azaltıcı katkı içeren karışımlarda sadece 90-günlük ultrases geçiş hızı ölümü gerçekleşmiştir. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük geçirgenlik azaltıcı katkılı karışımların her 50 çevrimde bir ölçülen ultrases geçiş hızı değerleri sırasıyla, Çizelge 4.20 ve Şekil 4.30'da gösterilmiştir.

**Çizelge 4.20.** 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol ve geçirgenlik azaltıcı katkılı harç numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri

Çevrim	UPV	Numuneler						
		K	PRA-A1	PRA-A2	PRA-B1	PRA-B2	PRA-C1	PRA-C2
0	V (km/sn)	4,249	4,283	4,240	4,350	4,416	4,187	4,020
	t (µ.sn)	11,77	11,67	11,79	11,493	11,32	11,94	12,44
50	V (km/sn)	3,932	4,042	4,096	4,219	4,315	4,106	3,882
	t (µ.sn)	12,72	12,37	12,21	11,852	11,59	12,18	12,88
100	V (km/sn)	3,698	3,883	3,813	3,894	4,058	3,940	3,748
	t (µ.sn)	13,52	12,88	13,11	12,841	12,32	12,69	13,34
150	V (km/sn)	3,513	3,754	3,789	3,882	4,019	3,900	3,722
	t (µ.sn)	14,23	13,32	13,19	12,880	12,44	12,82	13,43
200	V (km/sn)	3,439	3,633	3,707	3,839	3,973	3,813	3,667
	t (µ.sn)	14,54	13,76	13,49	13,025	12,59	13,11	13,64
250	V (km/sn)	3,345	3,538	3,660	3,796	3,915	3,771	3,621
	t (µ.sn)	14,95	14,13	13,66	13,172	12,77	13,26	13,81
300	V (km/sn)	3,246	3,488	3,626	3,764	3,880	3,748	3,583
	t (µ.sn)	15,40	14,33	13,79	13,285	12,89	13,34	13,95



**Şekil 4.30.** 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol ve geçirgenlik azaltıcı katkılı harç numunelerin ultrases geçiş hızı değişimi

Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi düşük miktarda hava sürüklenme özelliğine sahip ve çözülme kalıntı içeren "PRA-B" isimli geçirgenlik azaltıcı katkıyı içeren başlangıçtan itibaren 300 donma-çözülme sonrası en yüksek ultrases geçiş hızına sahip olan karışım olarak seçilmiştir. Hava sürüklenme özelliğine sahip olan diğer iki geçirgenlik azaltıcı katkılı karışımların ultrases geçiş hızları başlangıçta kontrol karışımına yakın bir değer olmasına rağmen 300 donma-çözülme çevrim sonrası azda olsa daha yüksek bir değer olmuştur. Bu davranış geçirgenlik azaltıcı katkı kullanım oranının artışıyla daha belirgin hale gelmiştir. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkılı karışımları kıyasladığında mineral katkılı karışımların ultrases geçiş hızı değişim açısından daha başarılı olduğu sonuçlardan da anlaşılmıştır.

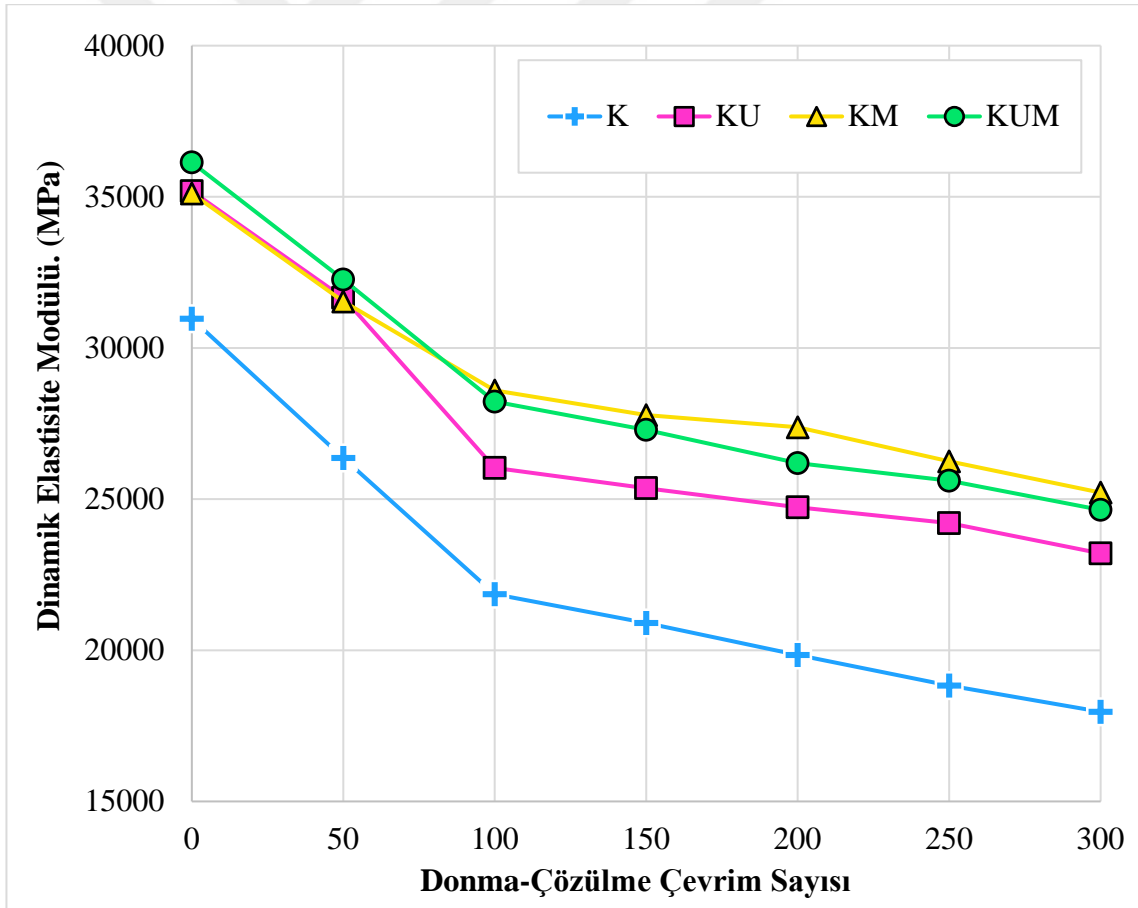
### ***Donma-çözülme çevrimine maruz kalan harç karışımların dinamik elastisite modülü değişimi***

Değişik oranlarda farklı mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkı içeren harç karışımlarının 28 ve 90-günlük dinamik elastisite modülü sonuçları Şekil 4.31-4.32'de gösterilmiştir. Geçirgenlik azaltıcı katkılı karışımların 28-günlük ultrases geçiş hızı değerleri ölçülmediğinden söz konusu karışımların 28-günlük dinamik elastisite modülü ölçülememiştir.

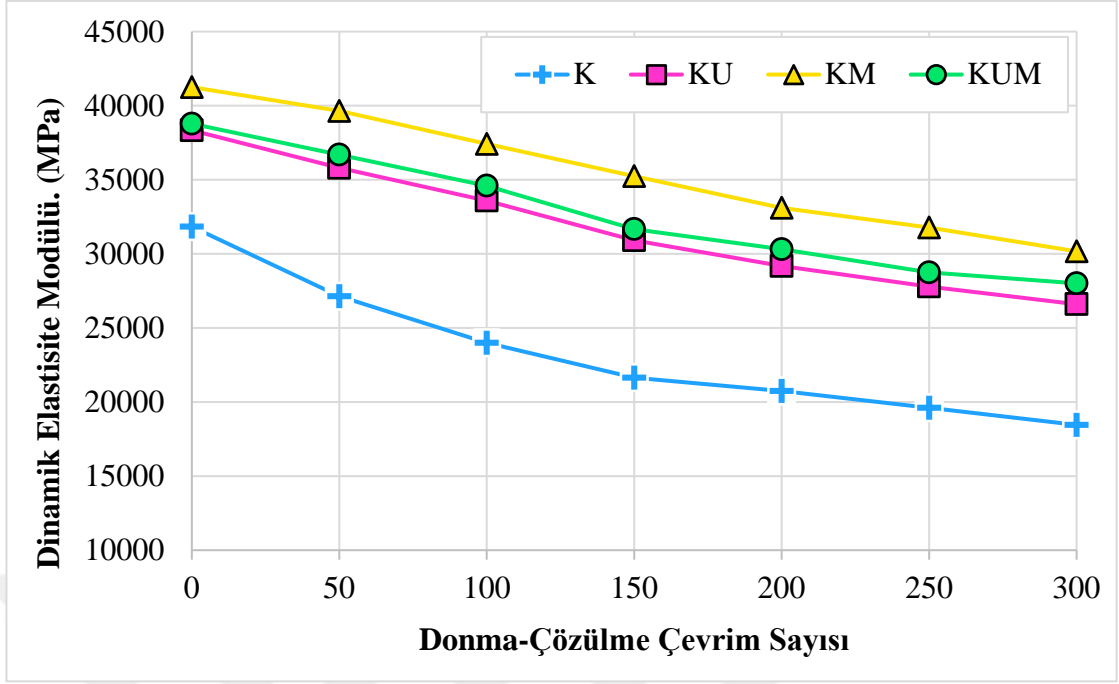
Deney sonuçlarından da anlaşıldığı gibi mineral katkı türü ve miktarından bağımsız olarak tüm yaşlarda mineral katkılı karışımların dinamik elastisite modülü kontrol karışımına kıyasla daha yüksek olmuştur. Mineral katkılı ve kontrol karışımının dinamik elastisite modülü değerleri arasındaki söz konusu bu fark zamanla daha bariz hale gelmiştir. 28 günlük numuneler incelendiğinde "KU", "KM" ve "KUM" karışımlarının donma-çözülme çevrimine maruz kalmadan (0 çevrim) önceki dinamik elastisite değerleri kontrol karışımına kıyasla sırasıyla, yaklaşık %14, %13 ve %17 daha fazla olmuştur. 300 donma-çözülme çevrimi sonrası söz konusu artış oranı sırasıyla, yaklaşık %29, %40 ve %37 olarak tespit edilmiştir.

90 günlük numuneler incelendiğinde "KU", "KM" ve "KUM" karışımlarının dinamik elastisite modülün değerlerini donma-çözülme çevrimine maruz kalmadan önce ve 300 donma-çözülme çevrimi sonrası kontrol karışımıyla kıyasla sırasıyla, yaklaşık %20, %29, %22 ve %44, %56, %52 daha fazla olmuştur. Numunelerin dinamik elastisite modülünü etkileyen faktörler agrega, çimento hamuru ve agrega-hamur-arayüzey (ITZ) özelliklerinin etkisidir (Mehta 2006). Bilindiği gibi mineral katkı kullanımı, karışımlarda oluşturduğu fiziko-kimyasal etkisinden dolayı agrega hamur arayüzeyini iyileştirerek karışımların daha boşluksuz olmasını sağlamaktadır. Söz konusu kimyasal etkinin büyük bir kısmının 90 günlük süreçte gerçekleştiğinden dolayı 90 günlük numuneler donma-çözülme direnci açısından 28 günlük numunelere daha yüksek performans sergilemiştir. Numune yaşından bağımsız olarak başlangıçtan itibaren %10 mineral katkı içeren "KM" karışımının dinamik elastisite modülü açısından diğer mineral katkı içeren karışımlara kıyasla daha üstün performans gösterdiği sonuçlardan da anlaşılmaktadır.

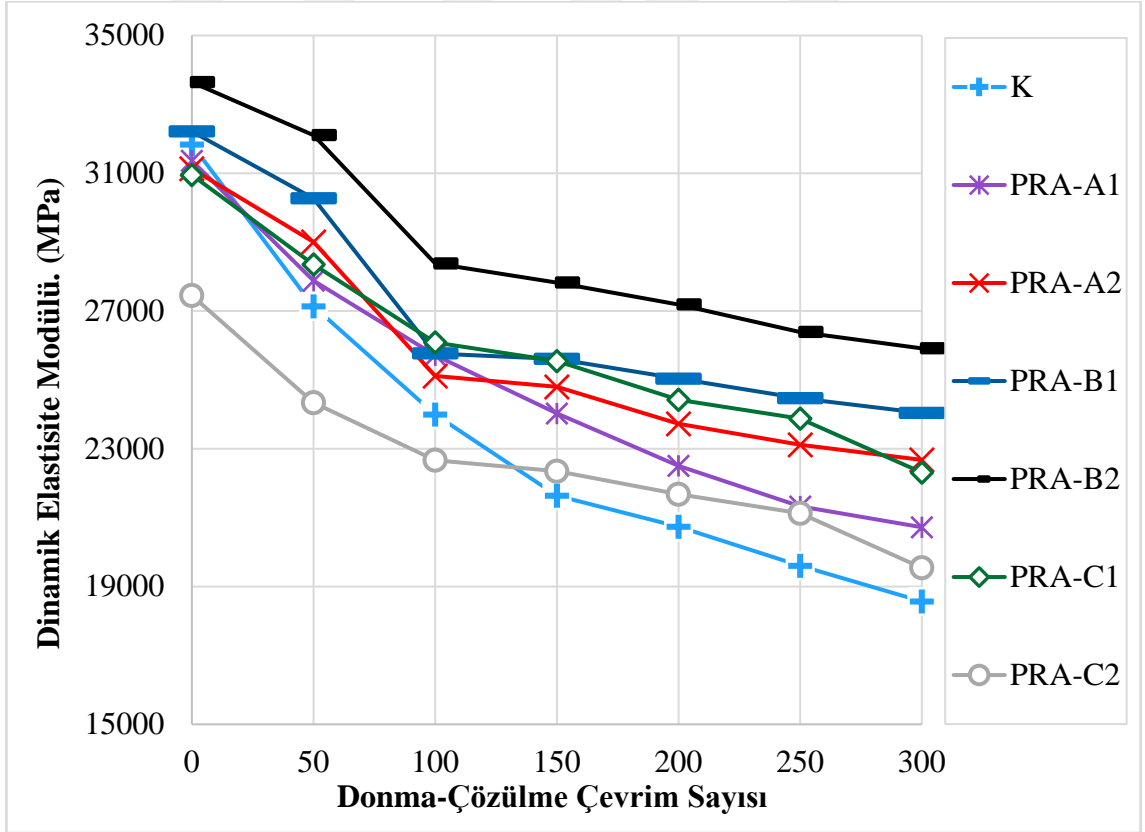
Geçirgenlik azaltıcı katkı (PRA) içeren karışımlar incelendiğinde katkı türünden ve kullanım oranından bağımsız olarak dinamik elastisite modülü davranışı açısından "PRA" içeren karışımların kontrol karışımına kıyasla daha üstün performans gösterdiği Şekil 4.33'ten anlaşılmıştır. Hava sürüklemeye özelliğine sahip olan "PRA-A" ve "PRA-C" isimli katkıların kullanım oranlarının %1'den %2'ye artırılmasıyla karışımların dinamik elastisite modülü değerleri azalmıştır. Ancak hem çözünmeyen kalıntı içeren hem de az miktarda hava sürüklemeye özelliğine sahip olan "PRA-B" isimli katkının kullanım oranının %1'den %2'ye artırılmasıyla karışımların dinamik elastisite modülü artmıştır. Söz konusu bu katkıyı içeren karışımlar diğer "PRA" katkılı karışımlara göre hem başlangıçta ve hem de 300 donma-çözülme çevrim sonrası daha üstün performans göstermiştir. "PRA-B2" isimli karışım kontrol karışımına göre yaklaşık %33 daha yüksek dinamik elastisite modülüne sahip olmuştur.



**Şekil 4.31.** 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 28 günlük kontrol ve mineral katkılı harç numunelerin dinamik elastisite modülün değişimi



Şekil 4.32. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol ve mineral katkıli harç numunelerin dinamik elastisite modülün değişimi



Şekil 4.33. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol ve geçirgenlik azaltıcı katkıli harç numunelerin dinamik elastisite modülün değişimi

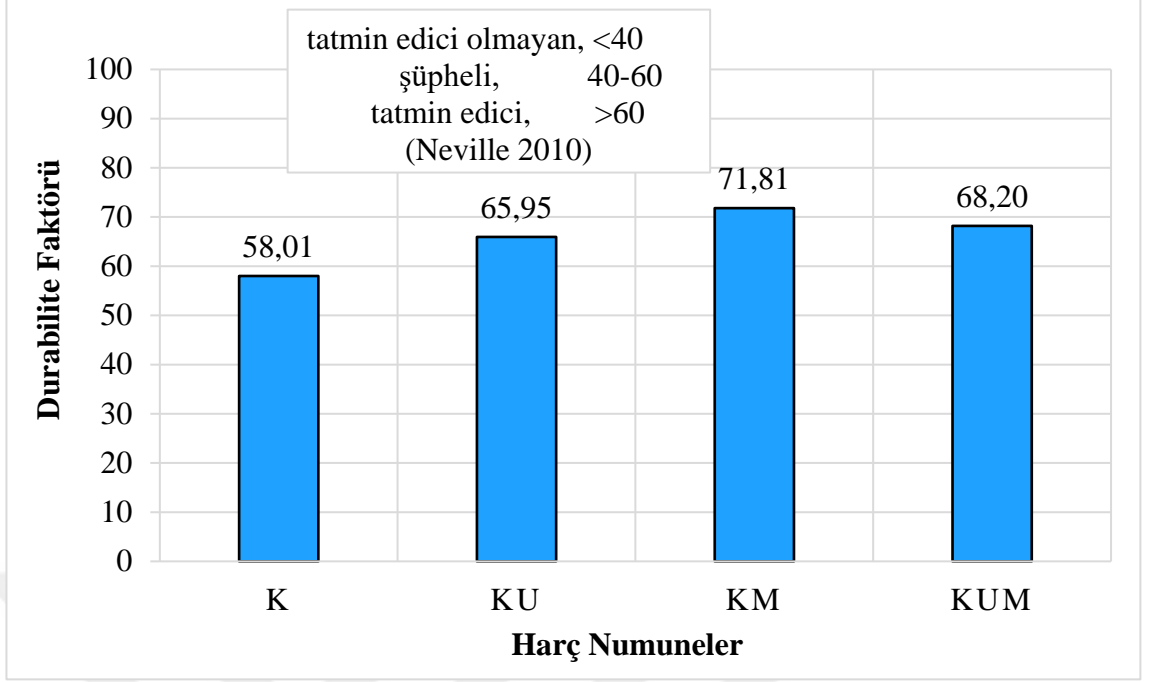


### ***Donma-çözülme çevrimine maruz kalan harç karışımların dinamik elastisite modülü değişimi ile durabilite faktörü tayini***

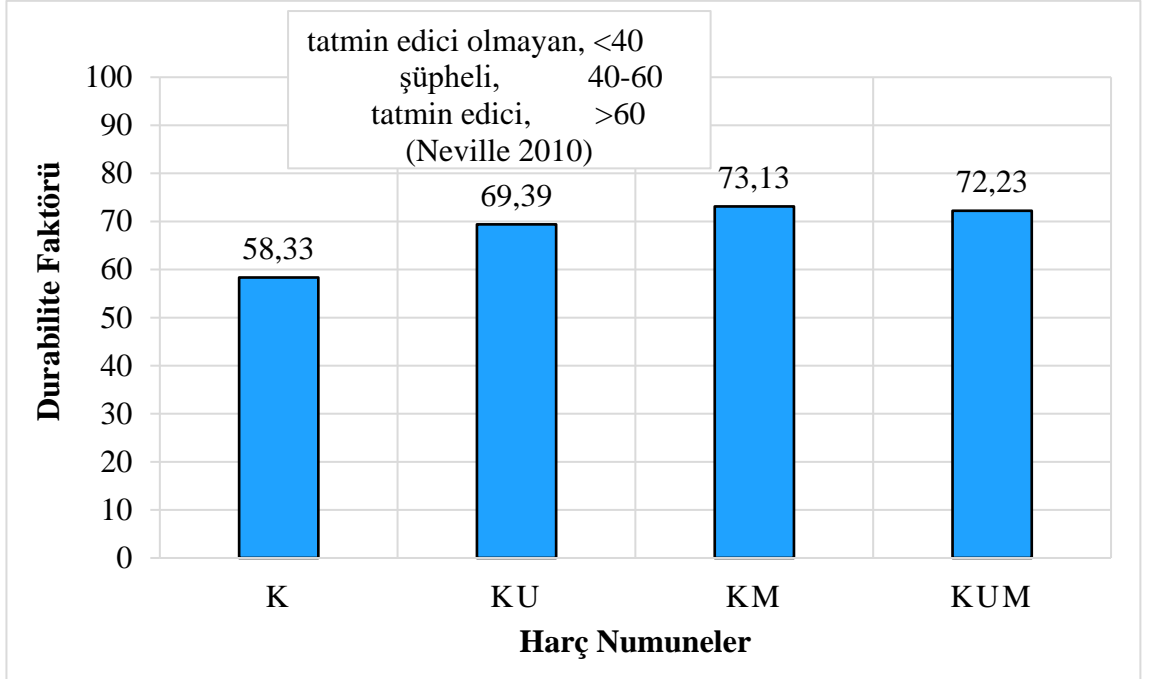
Mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkı içeren harç karışımlarının 28 ve 90-günlük dinamik elastisite modülü değişimi ile 300 çevrim sonunda durabilite faktörün sonuçları Şekil 4.34-4.36'da gösterilmiştir. Geçirgenlik azaltıcı katkılı karışımların 28-günlük ultrases geçiş hızı değerleri ölçülmediğinden söz konusu karışımların 28-günlük durabilite faktörü tayini edilmemiştir. Neville'e (2010) göre durabilite faktörü değerinin 40'ın altında olduğu zaman, betonun donma-çözülme karşı direnci açısından muhtemelen tatmin edici olmadığını, 40 ile 60 arası değerlerin şüpheli olduğunu düşünürken, 60'ın üzerindeki değerler betonun tatmin edici olduğunu göstermektedir.

Sonuçlara göre Kontrol karışımı hariç tüm mineral katkılı 28 ve 90 günlük numunelerin durabilite faktörü değerlerinin donma-çözülme direnci açısından tatmin edici olduğu Şekil 4.34 ve 4.35'ten anlaşılmaktadır. Numune yaşından bağımsız olarak metakaolin içeren mineral katkılı "KM" isimli karışım durabilite faktörü değeri açısından diğer mineral katkılı karışımlara göre en başarılı karışım olmuştur. "KU", "KM" ve "KUM" isimli mineral katkılı karışımların 28-günlük durabilite faktörü değeri kontrol karışımla kıyasla sırasıyla, %14, %24, %18 daha fazla olmuştur. Söz konusu artış oranı 90 günlük numunelerde sırasıyla, %19, %26, %24 ölçülmüştür.

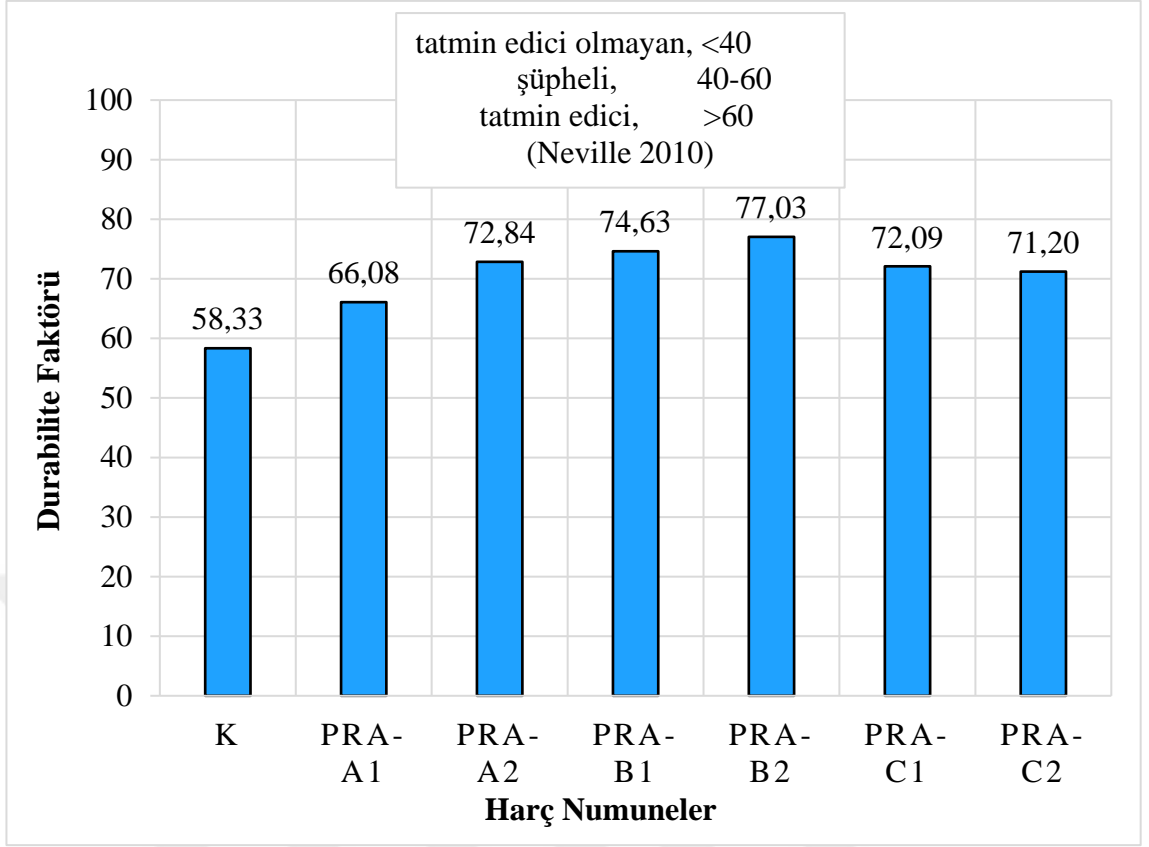
Geçirgenlik azaltıcı katkı (PRA) içeren karışımlar incelendiğinde katkı türünden ve kullanım oranından bağımsız olarak durabilite faktörü performansı açısından "PRA" içeren karışımların kontrol karışımına kıyasla daha üstün performans gösterdiği Şekil 4.36'dan anlaşılmıştır. Hava sürüklenme özelliğine sahip olan "PRA-A" ve "PRA-C" isimli katkıların %1 ve %2 oranında kullanımıyla karışımların durabilite faktörü değerleri kontrol karışımına göre, sırasıyla yaklaşık %14, %25 ve %23, %22 artmıştır. Ayrıca hem çözünmeyen kalıntı içeren hem de az miktarda hava sürüklenme özelliğine sahip olan "PRA-B" isimli katkının kullanım oranının %1'den %2'ye artırılmasıyla karışımların durabilite faktörü değeri kontrol karışımına kıyasla, %28'den %32'ye artmıştır.



Şekil 4.34. Mineral katkıli harç numunelerinin 28-günlük durabilite faktörü değerleri



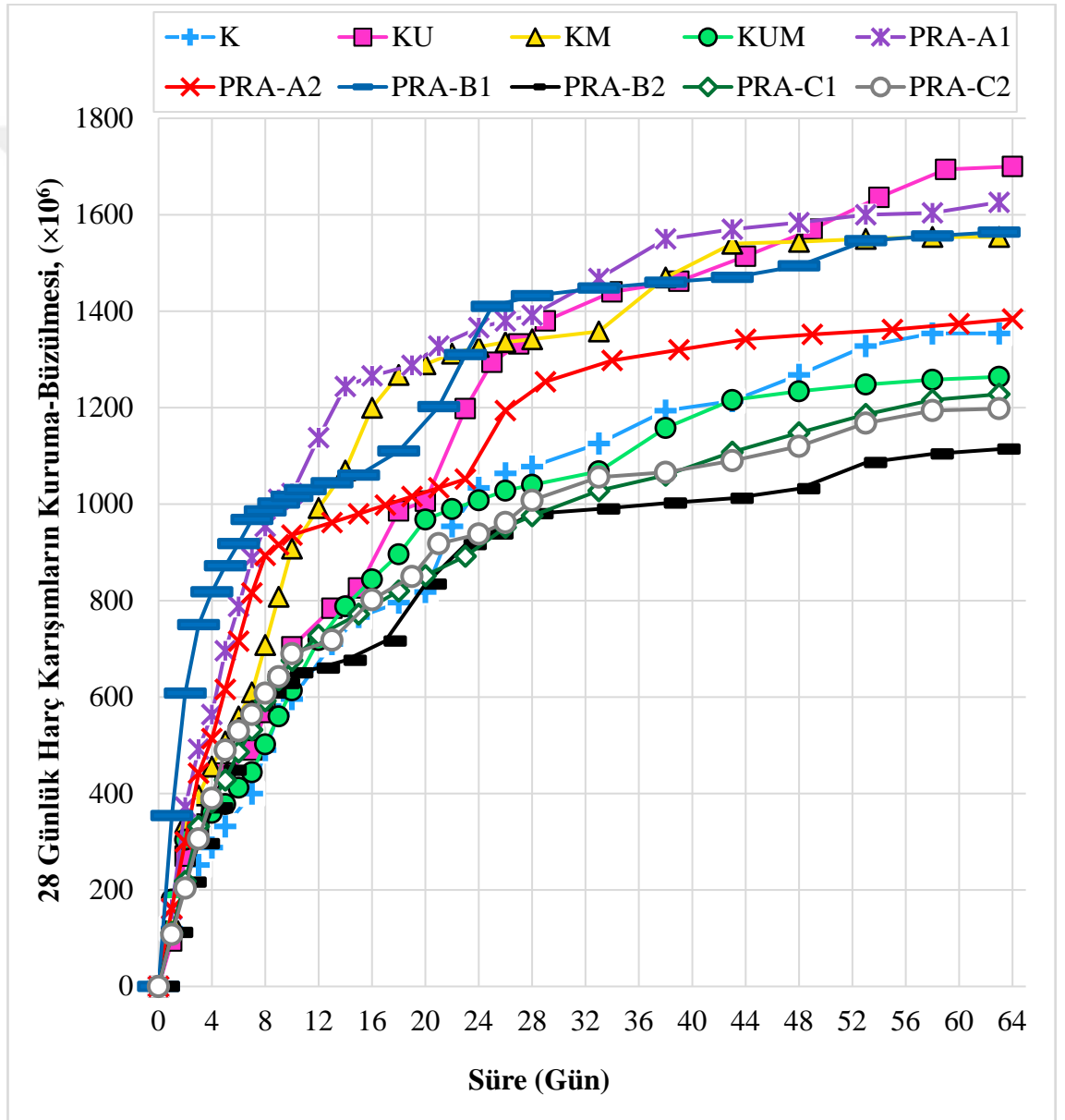
Şekil 4.35. Mineral katkıli harç numunelerinin 90-günlük durabilite faktörü değerleri



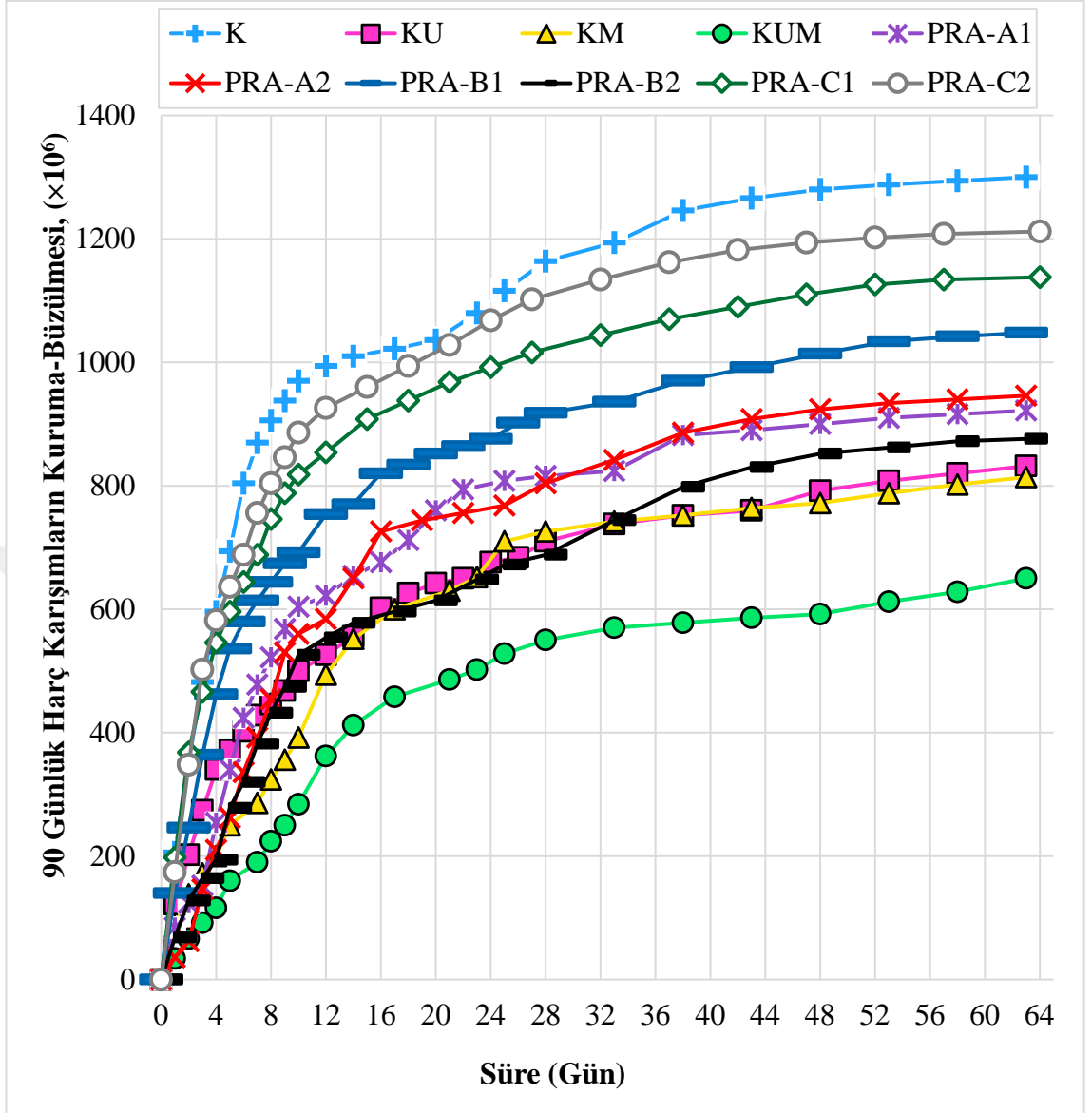
**Şekil 4.36.** Geçirgenlik azaltıcı katkıli harç numunelerinin 90-günlük durabilite faktörü değerleri

### Kuruma-büzülme

28 ve 90 günlük çubuk harç numunelerinin kuruma-büzülme ölçüm sonuçları Şekil 4.37 ve 4.38’de gösterilmiştir. Ayrıca söz konusu numunelerin 64 gün sonunda ölçülen bağlı büzülme oranları Şekil 4.39 ve 4.40’ta verilmiştir. Beklendiği gibi, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkı türünden ve miktarından bağımsız olarak tüm karışımlar başlangıçta şiddetli bir şekilde büzülme gösterirken zamanla numunelerin kuruma-büzülme kaynaklığı boy değişimi azalmıştır.



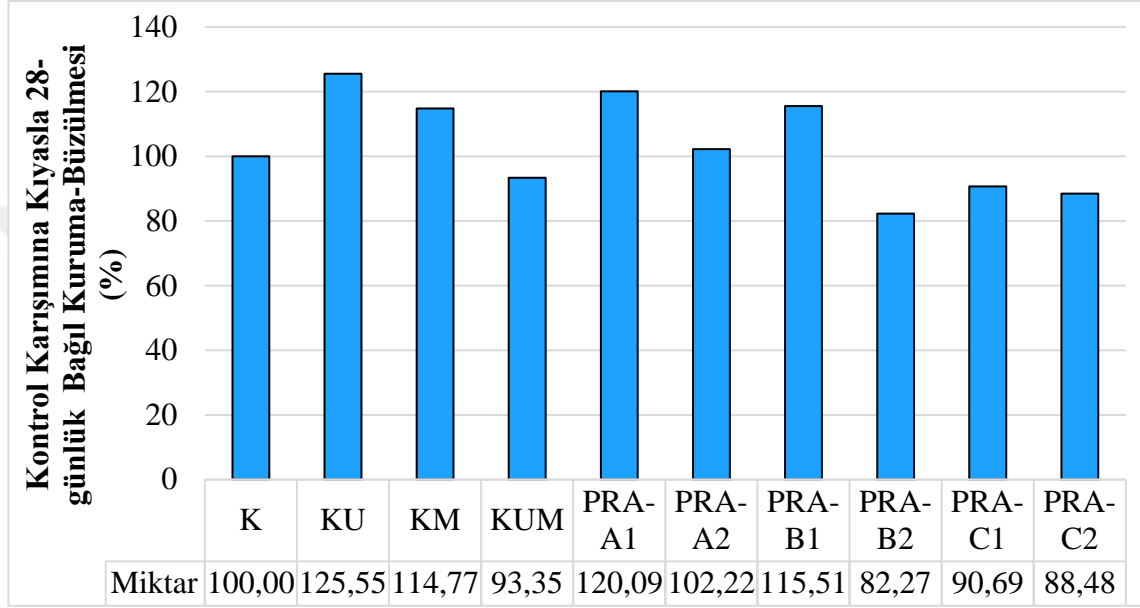
Şekil 4.37. 28 günlük harç karışımlarının kuruma-büzülme değişimi



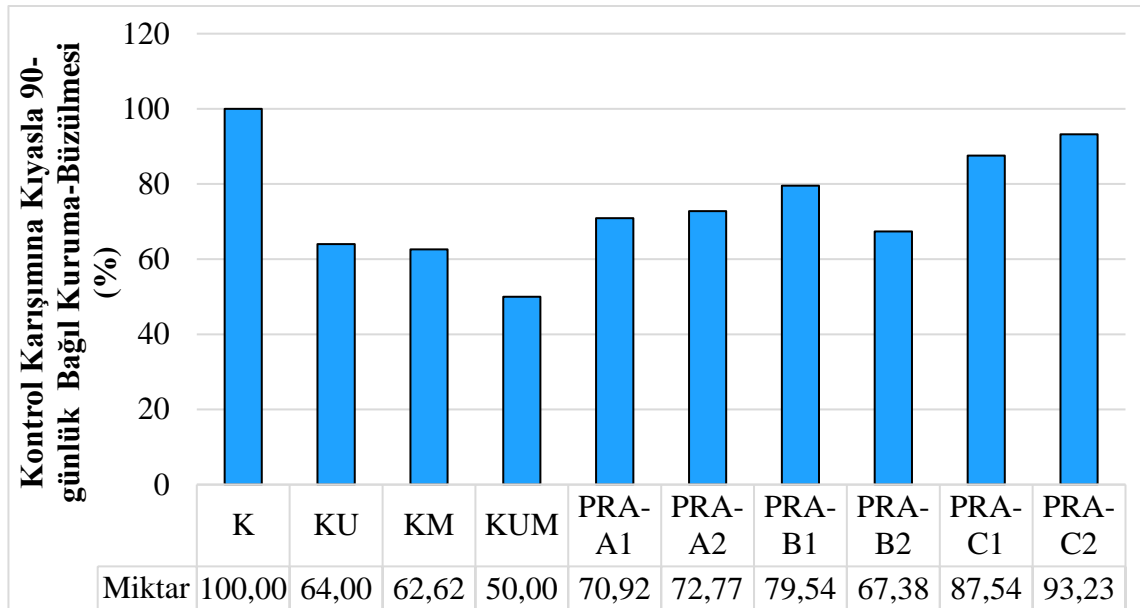
Şekil 4.38. 90 günlük harç karışımlarının kuruma-büzülme değişimi

64'üncü günün sonunda 28 günlük kontrol karışımının kuruma-büzülmesi  $0,001354 \times 10^6$  ölçülmüştür. İkili bağlayıcı sistemine sahip olan 28 günlük "KU" ve "KM" karışımları başlangıçtan itibaren kontrol karışımına kıyasla daha fazla büzülme göstermiştir. Söz konusu karışımların 64'üncü günün sonunda ölçülen büzülme değerlerinin kontrol karışımına kıyasla, yaklaşık %26 ve %15 daha fazla olduğu Şekil 4.39'dan da görülmektedir. Üçlü bağlayıcı sistemine sahip 28 günlük "KUM" karışımı ilk 40 günlük ölçüm süresinde kuruma-büzülme davranış açısından kontrol karışımına benzer sonuç göstermesine rağmen 64-günün sonunda kontrol karışımına kıyasla %7 daha az büzülmüştür.

Bilindiği gibi, çimentolu sistemlerde kuruma-büzülme olayı numunenin kurumaya maruz kalması sonucu mikro boşluklardaki suyun makro boşluğa doğru hareket ederek numune yüzeyinden buharlaşarak kaybolmasından kaynaklanmaktadır (Methta 2010). 28 günlük numunelerde mineral katkıli karışımlarının kuruma-büzülme davranışı açısından kontrol karışımına kıyasla daha düşük performans göstermesinin sebebi 28 günlük süreçte puzolanik reaksiyonun tam olarak gerçekleşmediğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.39. 28 günlük harç karışımlarının bağıl kuruma-büzülme değerleri



Şekil 4.40. 90 günlük harç karışımlarının bağıl kuruma-büzülme değerleri

90 günlük numuneler incelendiğinde mineral katkı türünden ve miktarından bağımsız olarak tüm mineral katkılı karışımların başlangıçtan itibaren kontrol karışımına kıyasla daha az büzülme gösterdiği Şekil 4.38'den anlaşılmaktadır. "KU", "KM" ve "KUM" karışımlarının 64'üncü günün sonundaki kuruma-büzülme değerinin kontrol karışımına kıyasla sırasıyla %36, %38 ve %50 daha az olduğu Şekil 4.40'tan anlaşılmaktadır. 90 günlük mineral katkılı karışımlarının büzülme davranışının kontrol karışımına kıyasla daha başarılı olması mineral katkıların daha öncede anlatılan fiziko-kimyasal etkisinden kaynaklanmaktadır. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi üçlü bağlayıcı sistemine sahip 90 günlük "KUM" karışımı büzülme davranışı açısından en başarılı karışım olarak seçilmiştir. Bu sebepten geçirgenliği daha az olan numunenin daha az miktarda büzülme göstermesi beklenmektedir.

Geçirgenlik azaltıcı katkılı karışımlar incelendiğinde %1 ve %2 oranında "PRA-A" ve %1 oranında "PRA-B" isimli katkıları içeren 28 günlük karışımlar kontrol karışımına göre daha fazla kuruma-büzülme göstermiştir. Ancak, aynı yaştaki numunelerde %1 ve %2 oranında "PRA-C" ve %2 oranında "PRA-B" isimli katkıları içeren karışımların kontrol karışımına göre, daha az miktarda kuruma-büzülme gösterdiği Şekil 4.37'den anlaşılmaktadır. Bu bağlamda tüm geçirgenlik azaltıcı katkı içeren karışımlarda katkı kullanım oranı %1'den %2'ye arttığı zaman büzülme değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. "PRA-A", "PRA-B" ve "PRA-C" isimli katkıların kullanım oranının %1'den %2'ye artmasıyla karışımların kuruma-büzülmesi değerlerinde sırasıyla %18, %33 ve %2 oranında azalma ölçülmüştür. 90 günlük numuneler incelendiğinde geçirgenlik azaltıcı katkı türü ve miktarından bağımsız olarak tüm "PRA" içeren numuneler kuruma-büzülme davranışı açısından kontrol karışımına kıyasla daha üstün performans sergilediği Şekil 4.38'den de anlaşılmaktadır. %1 oranında "PRA-A", "PRA-B" ve "PRA-C" isimli katkıları içeren 90 günlük numunelerin kontrol karışımına kıyasla bağıl kuruma-büzülme değerleri sırasıyla, %71, %80 ve %88 olarak ölçülmüştür. Söz konusu katkıları %2 oranında kullandığında kontrol karışımla kıyasla karışımların kuruma-büzülme değeri sırasıyla %20, %33 ve %7 oranında azalmıştır. Deney sonuçlarından da anlaşıldığı gibi, hem 28 ve hem 90 günlük geçirgenlik azaltıcı katkı içeren karışımlarda %2 oranında "PRA-B" isimli karışım kuruma-büzülme açısından en üstün performansı sergilemiştir. Söz konusu katkının hem çözünmeyen kalıntı hem de az miktarda hava sürüklemeye özelliğine sahip olduğu daha öncede vurgulanmıştır.

Genel olarak kuruma-büzülme davranışı açısından mineral katkıli karışımların geçirgenlik azaltıcı içeren karışımlara kıyasla daha başarılı olduğu deney sonuçlarından da anlaşılmaktadır.

Basınç dayanımı, su emme kapasitesi, kuruma-büzülme davranışı, ultrases geçiş hızı ve donma-çözülme direnci sonuçları dikkate alınarak, sertleşmiş hal performansı açısından en iyi mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkı seçimi yapılmıştır. Söz konusu bu değerlendirmeye göre mineral katkıli karışım olarak çimento yerine %20 ve %10 sırasıyla, uçucu kül ve metakaolin ikame edilen üçlü bağlayıcı sistemine sahip olan "KUM" karışımı seçilmiştir. Geçirgenlik azaltıcı katkıli karışım olarak çimento ağırlığının %2'si oranında hem çözünmeyen kalıntı içeren hem de az miktarda hava sürüklemeye özelliğine sahip olan "PRA-B" isimli katkıyı içeren karışım tüm sertleşmiş hal özellikleri açısından en üstün performansı sergileyen karışım seçilmiştir.



### 4.3. Çalışmanın Üçüncü Aşamasında Elde Edilen Bulgular

Bu aşamada ikinci aşamada performans açısından en iyi olarak seçilen mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkı beraber kullanılarak hem mineral ve hem de geçirgenlik azaltıcı içeren üçlü bağlayıcı sisteme sahip harç karışımı hazırlanmıştır. Şöyle ki performans açısından en iyi mineral katkılı karışım olarak seçilen "KUM" karışımına çimento ağırlığının %2'si oranında performans açısından en iyi katkı olarak seçilen "PRA-B" isimli geçirgenlik azaltıcı katkı ilave edilerek yeni harç karışımı üretilmiştir. Üretilen karışım üzerinde ikinci aşamada gerçekleşen tüm sertleşmiş hal özellikleri deneyleri tekrarlanmıştır. Böylece hem taze hal hem de sertleşmiş hal özellikleri açısından en üstün performansa sahip karışım tespit edilmiştir.

#### 4.3.1. Çalışmanın ikinci aşamasında performans açısından seçilen en iyi mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkıların beraber kullanılmasının harç karışımlarının sertleşmiş hal özelliklerine etkisi incelenmesi

##### *Basınç dayanımı*

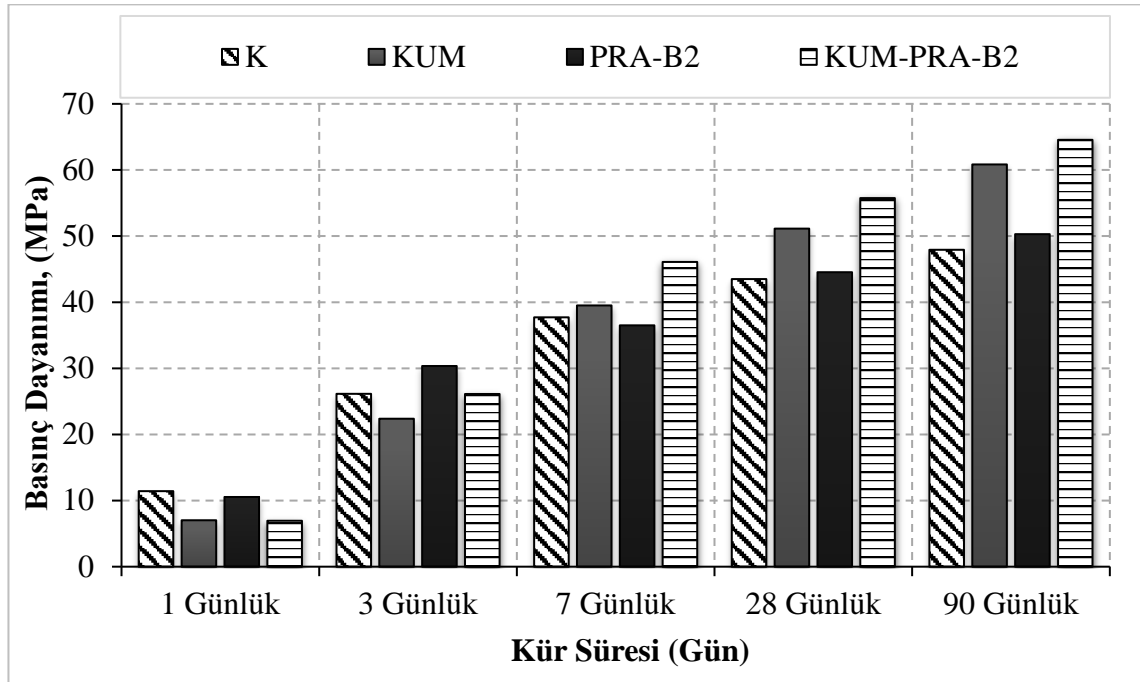
Tüm taze ve sertleşmiş hal özellikleri sonuçları dikkate alınarak seçilen, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkıyı beraber içeren "KUM-PRA-B2" isimli karışımın 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük sonuçları Çizelge 4.21 ve Şekil 4.41'de verilmiştir. Ayrıca, kıyaslamalı amaçlı olarak daha öncede tartışılan "K", "KUM" ve "PRA-B2" karışımlarının 1-90 günlük basınç dayanımı sonuçları Çizelge 4.21 ve Şekil 4.41'de gösterilmiştir.

Hem mineral katkı ve hem de %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı içeren üçlü bağlayıcı sistemine sahip olan "KUM-PRA-B2" isimli karışımın 1-günlük basınç dayanımı kontrol karışımına göre, yaklaşık %40 daha az olmuştur. Söz konusu katkı yüksek miktarda (toplamda %30) mineral katkı içerdiğinden 1 günlük süreçte puzolanik reaksiyonun tam olarak gerçekleşmemesinden basınç dayanımı değerlerinde düşüş gerçekleşmiştir. Ancak 3'üncü günlük sonuçlar dikkate alındığında "KUM-PRA-B2" isimli karışım basınç dayanımı açısından kontrol karışımına benzer davranış sergilemiştir. Söz konusu karışımın 7, 28 ve 90-günlük basınç dayanımı %22, %28 ve %35 daha fazla olmuştur. "KUM-PRA-B2" isimli karışımın 1, 3, 7, 28 ve 90-günlük bağıl basınç dayanımı "KUM" isimli karışımına kıyasla sırasıyla, %99, %117, %117, %109 ve %106 ölçülmüştür. Söz konusu bağıl basınç dayanımı "PRA-B2" isimli karışımına göre sırasıyla, %66, %86, %126, %125 ve %128 olarak daha fazla ölçülmüştür.

Sonuç olarak mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkıları beraber içeren "KUM-PRA-B2" isimli karışım basınç dayanım açısından mineral katkılı ve geçirgenlik azaltıcı katkılı karışımlara kıyasla daha üstün performans sergilemiştir. Daha öncede vurgulandığı gibi, "PRA-B2" isimli katkı karışımındaki boşluk oranı azaltarak geçirgenliğin azalmasına sebep olmaktadır. Mineral katkıları ise daha öncede açıklandığı gibi, fiziko-kimyasal etkisinden dolayı karışımın boşluk miktarını azalmaktadır. Her iki katkının da karışımın boşluk yapısı üzerinde olumlu etkisi anlaşılmaktadır. Mineral ve kimyasal katkıların beraber kullanıldığı durumda söz konusu bu iki olumlu etki dayanım değerlerinin artışına sebep olmuştur.

**Çizelge 4.21.** Harç küp numunelerin basınç dayanımları (S/Ç:0,45) (50x50x50 mm<sup>3</sup>)

Basınç Dayanımı					
Numune Adı	1 günlük	3 günlük	7 günlük	28 günlük	90 günlük
<b>K</b>	11,43	26,14	37,71	43,49	47,92
<b>KUM</b>	7,02	22,38	39,51	51,13	60,84
<b>PRA-B2</b>	10,54	30,35	36,50	44,54	50,29
<b>KUM-PRA-B2</b>	6,95	26,12	46,10	55,75	64,57



**Şekil 4.41.** Harç karışımlarının 1, 3, 7, 28 ve 90-günlük basınç dayanım grafiği

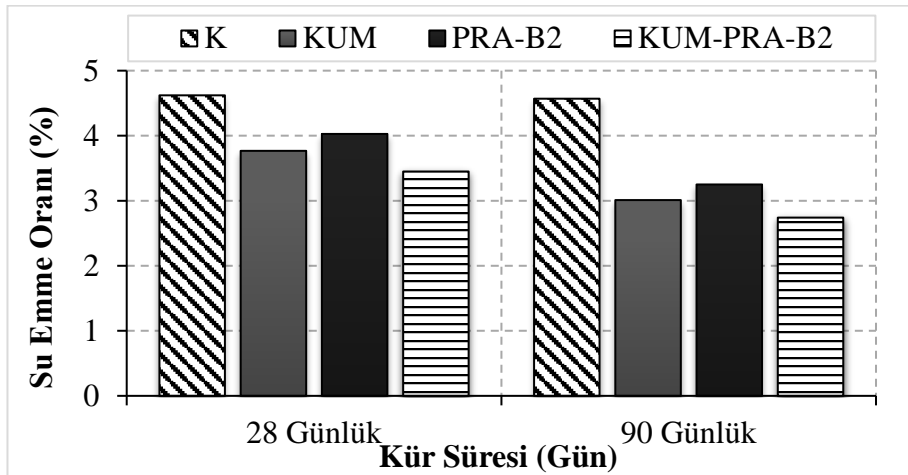
### *Su emme deneyi*

Tüm taze ve sertleşmiş hal özellikleri sonuçları dikkate alınarak seçilen, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkıyı beraber içeren "KUM-PRA-B2" isimli karışımın 28 ve 90 günlük sonuçları Çizelge 4.22 ve Şekil 4.42'de verilmiştir. Ayrıca, kıyaslamalı amaçlı olarak daha öncede tartışılan "K", "KUM" ve "PRA-B2" karışımlarının 28 ve 90-günlük su emme oranı sonuçları Çizelge 4.22 ve Şekil 4.42'de gösterilmiştir.

Sonuçlara göre mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkıyı beraber içeren "KUM-PRA-B2" isimli karışımın 28-günlük su emme oranı "K", "KUM" ve "PRA-B2" karışımına kıyasla sırasıyla, yaklaşık %25, %8 ve %14 olarak azalmıştır. Söz konusu bu azalma oranı 90 günlük numuneler için sırasıyla, yaklaşık %40, %9 ve %16 olarak ölçülmüştür. Sonuçlardan da görüldüğü gibi, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkıları beraber içeren karışım diğer karışımlara kıyasla su emme davranışı açısından en üstün performansı sergilemiştir.

**Çizelge 4.22.** Harç karışımlarının su emme oranı

Su Emme Oranı (%)		
Numune Adı	28 günlük	90 günlük
<b>K</b>	4,620	4,570
<b>KUM</b>	3,767	3,010
<b>PRA-B2</b>	4,027	3,250
<b>KUM-PRA-B2</b>	3,450	2,740



**Şekil 4.42.** Harç karışımlarının 28 ve 90-günlük su emme oranları

### *Ultrases geçiş hızı (UPV)*

Tüm taze ve sertleşmiş hal özellikleri sonuçları dikkate alınarak seçilen, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkıyı beraber içeren "KUM-PRA-B2" isimli karışımın 28 ve 90 günlük sonuçları Çizelge 4.23'te verilmiştir. Ayrıca, kıyaslamalı amaçlı olarak daha öncede tartışılan "K", "KUM" ve "PRA-B2" karışımlarının 90-günlük ultrases geçiş hızı sonuçları Çizelge 4.23'te gösterilmiştir.

"KUM-PRA-B2" karışımının 90-günlük ultrases geçiş hızı "K", "KUM" ve "PRA-B2" karışımlarına kıyasla, yaklaşık %13, %2 ve %8 daha fazla ölçülmüştür. Mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkıları beraber içeren karışım, basınç dayanım ve su emme deneylerinde de olduğu gibi diğer karışımlara kıyasla ultrases geçiş hızı davranışı açısından en üstün davranış sergilemiştir.

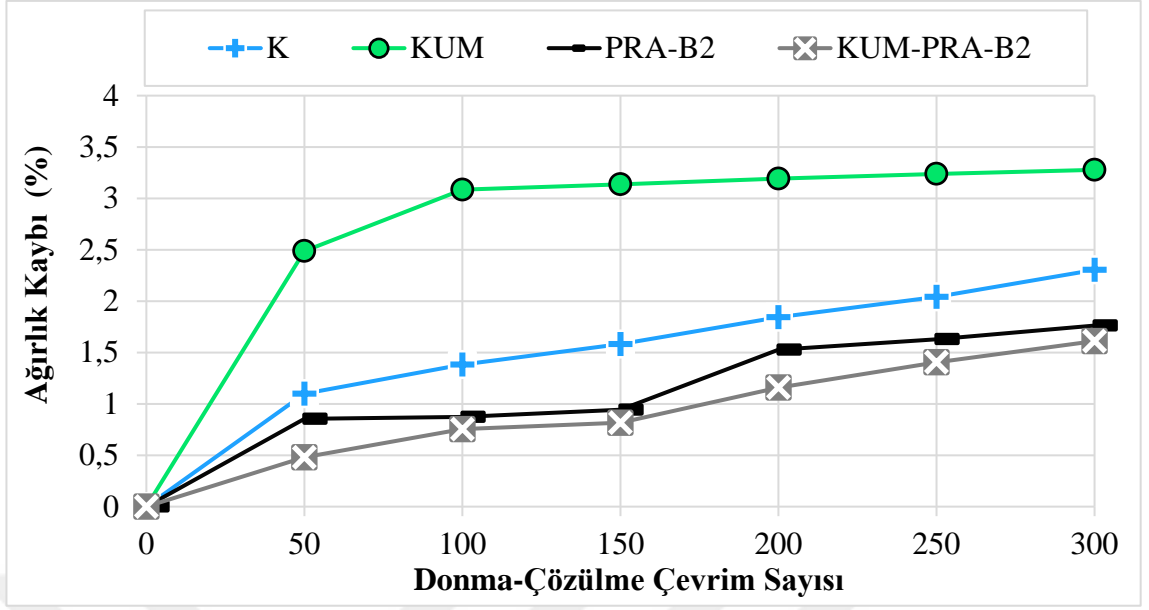
**Çizelge 4.23.** 90 günlük kontrol, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkıları içeren numunelerin ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı sonuçları

Numune Adı	90 Gün Basınç Dayanım (MPa)	Ultrases Geçiş Süresi (µ.sn)	Ultrases Geçiş Hızı (km/sn)	Beton Kalitesi*
K	47,92	11,77	4,249	İyi
KUM	60,84	10,63	4,705	Mükemmel
PRA-B2	50,29	11,07	4,416	İyi
<b>KUM-PRA-B2</b>	64,57	10,45	4,783	Mükemmel

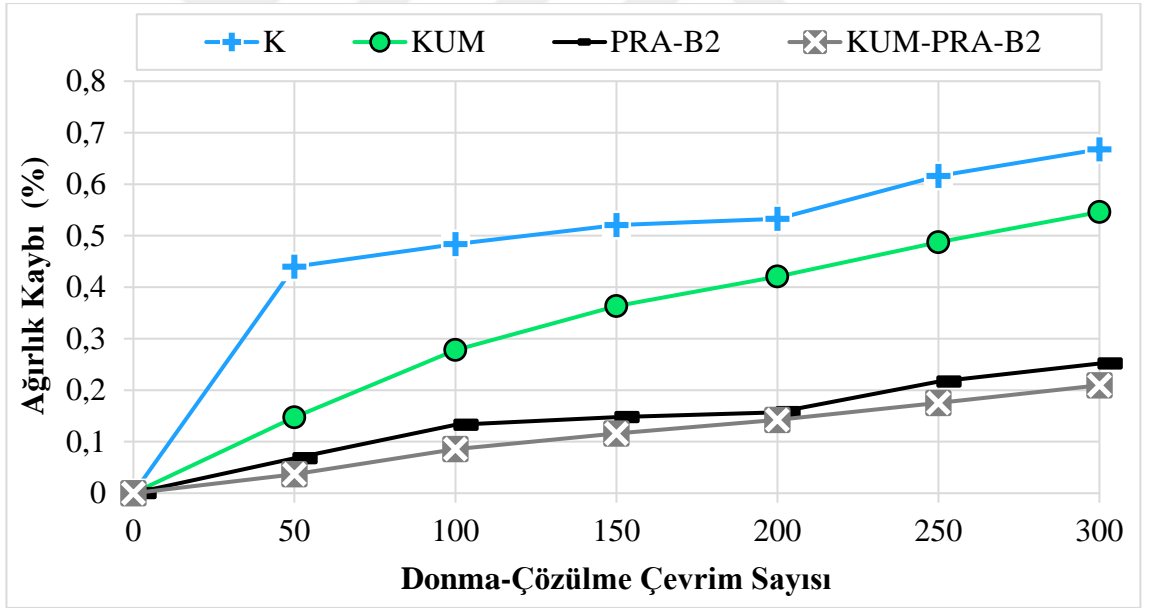
\* Çizelge 4.17'de gösterilen değerlendirme dikkate alınarak yorumlanmıştır.

### *Donma-çözülme direnci*

Tüm taze ve sertleşmiş hal özellikleri sonuçları dikkate alınarak seçilen, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkıyı beraber içeren "KUM-PRA-B2" isimli karışımın 28 ve 90 günlük sonuçları Şekil 4.43 ve 4.44'te verilmiştir. Ayrıca, kıyaslamalı amaçlı olarak daha öncede tartışılan "K", "KUM" ve "PRA-B2" karışımlarının 28 ve 90-günlük ağırlık kaybı değişimi sonuçları Şekil 4.43 ve 4.44'te gösterilmiştir.



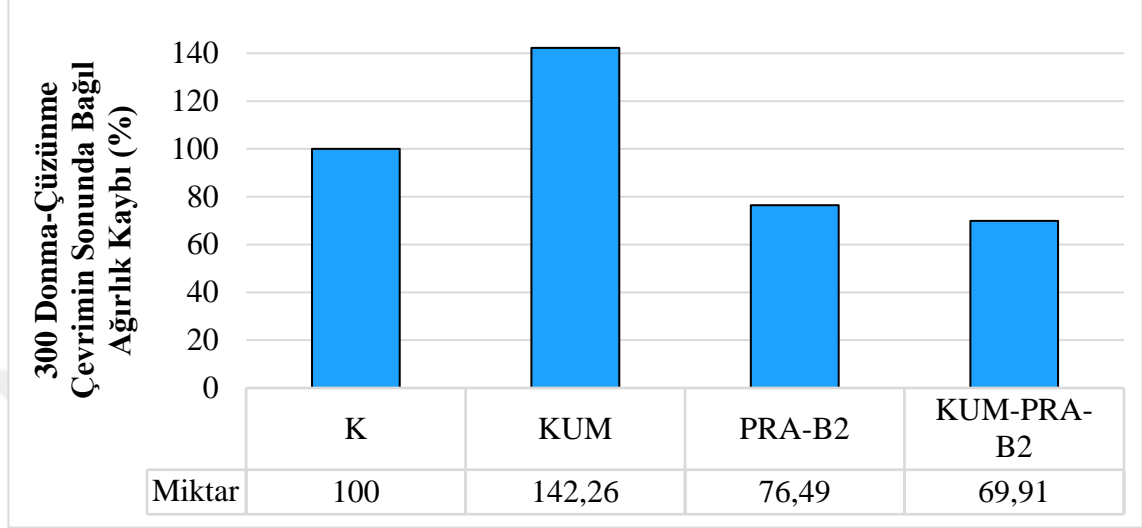
**Şekil 4.43.** 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 28 günlük kontrol, mineral katkılı ve geçirgenlik azaltıcı katkı içeren harç numunelerin ağırlık kaybı değişimi



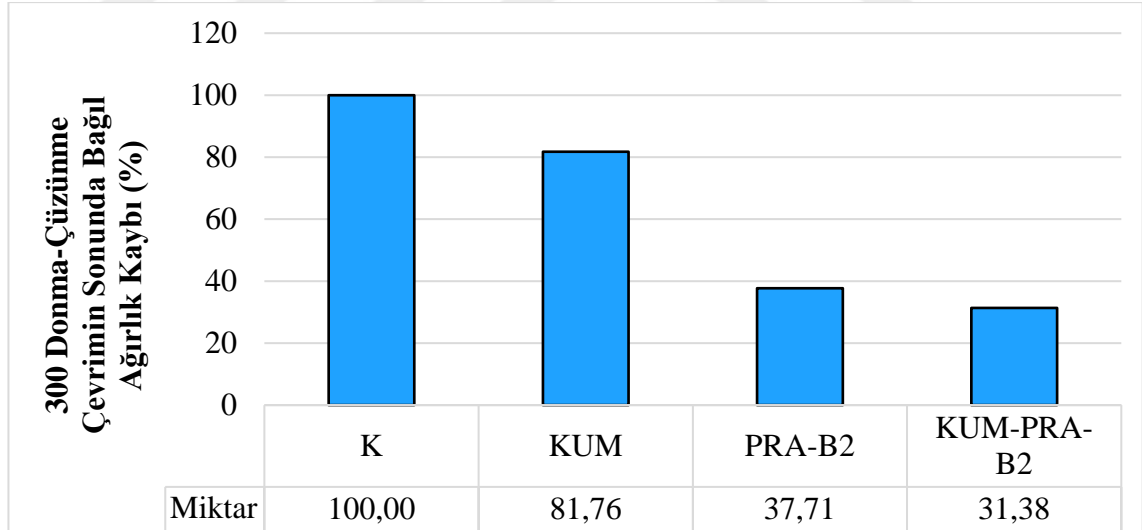
**Şekil 4.44.** 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol, mineral katkılı ve geçirgenlik azaltıcı katkı içeren harç numunelerin ağırlık kaybı değişimi

Karışımların donma-çözülme kaynaklı ağırlık kaybı sonuçları dikkate alınarak mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkıyı beraber içeren "KUM-PRA-B2" isimli karışım diğer karışımlara kıyasla 300 donma-çözülme çevrim sonunda en az ağırlık kaybı gösteren karışım olarak seçilmiştir.

300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 28 ve 90 günlük "K", "KUM" ve "PRA-B2" karışımların, "KUM-PRA-B2" karışımına göre bağıl ağırlık kaybı sonuçları Şekil 4.45 ve 4.46'da gösterilmiştir.



**Şekil 4.45.** 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 28 günlük kontrol, mineral katkı ve geçirgenlik azaltıcı katkı içeren harç numunelerin bağıl ağırlık kaybı değişimi



**Şekil 4.46.** 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol, mineral katkı ve geçirgenlik azaltıcı katkı içeren harç numunelerin bağıl ağırlık kaybı değişimi

Şekil 4.45'ten de görüldüğü gibi 28 günlük "K", "KUM" ve "PRA-B2" karışımlarının 300 donma-çözülme çevrim sonunda "KUM-PRA-B2" karışımına kıyasla bağıl ağırlık kaybı sırasıyla, yaklaşık %30, %51 ve %9 olarak ölçülmüştür. Söz konusu oran 90 günlük örneklerde sırasıyla, yaklaşık %69, %62 ve %10 olarak tespit edilmiştir.

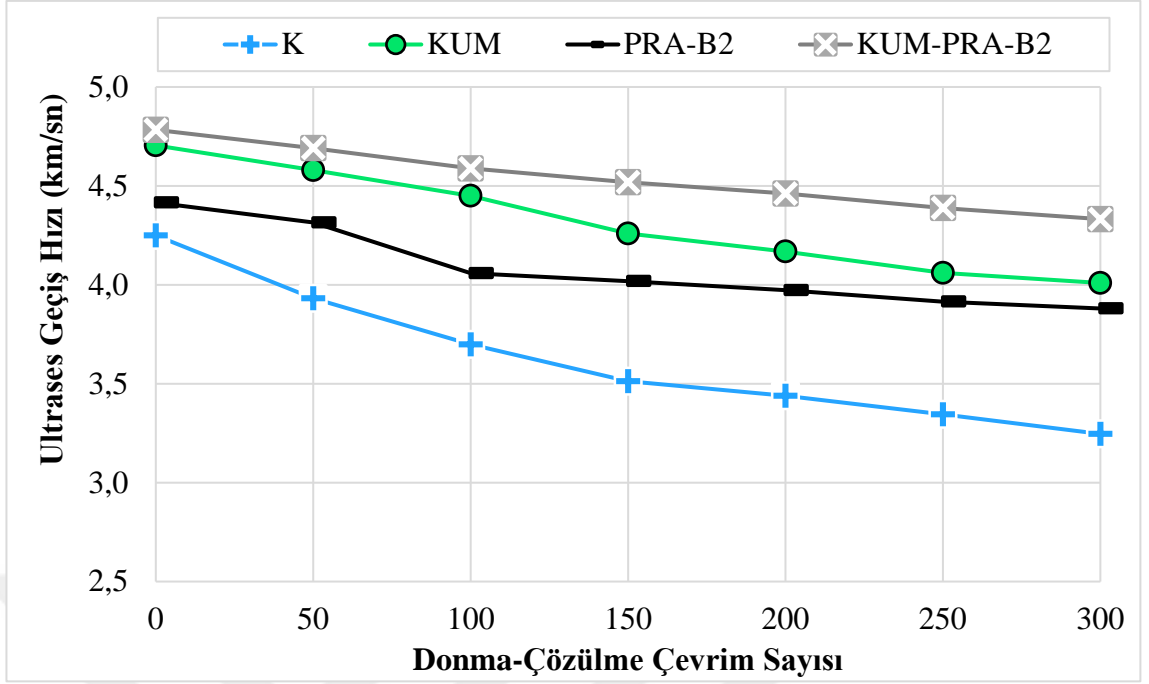
***Donma-çözülme çevrimine maruz kalan harç karışımların ultrases geçiş hızı ve dinamik elastisite modülü değişimi***

Tüm taze ve sertleşmiş hal özellikleri dikkate alınarak seçilen, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkıyı beraber içeren 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük "KUM-PRA-B2" isimli karışımın ultrases geçiş hızı ve dinamik elastisite modülü değişimi sırasıyla, Çizelge 4.24 ve Şekil 4.47 ile Şekil 4.48'de verilmiştir. Ayrıca, kıyaslamalı amaçlı olarak daha öncede tartışılan "K", "KU" ve "PRA-B2" karışımlarına ait sonuçlar aynı Çizelge ve Şekilde gösterilmiştir.

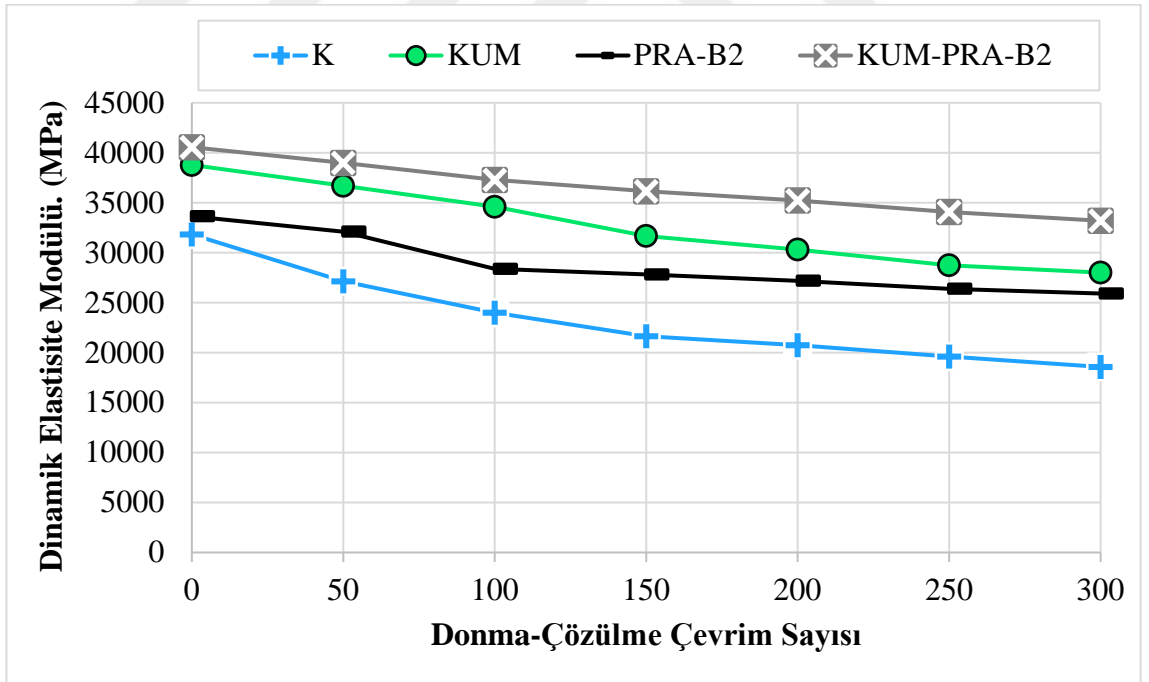
Sonuçlardan da görüldüğü gibi, 300 donma-çözülme çevrimin sonunda ölçülen ultrases geçiş hızı değerleri "KUM-PRA-B2" isimli karışım için "K", "KUM" ve "PRA-B2" karışımlarına kıyasla sırasıyla, %33, %8 ve %12 oranında daha fazla olmuştur. Söz konusu bu oran dinamik elastisite modülü içinde %79, %19 ve %28 ölçülmüştür.

**Çizelge 4.24.** 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkılı harç numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri

Çevrim	UPV	Numuneler			
		K	KUM	PRA-B2	KUM-PRA-B2
0	V (km/sn)	4,249	4,705	4,416	4,783
	t (μ.sn)	11,77	10,63	11,32	10,45
50	V (km/sn)	3,932	4,580	4,315	4,691
	t (μ.sn)	12,72	10,92	11,59	10,66
100	V (km/sn)	3,698	4,450	4,058	4,588
	t (μ.sn)	13,52	11,24	12,32	10,90
150	V (km/sn)	3,513	4,259	4,019	4,519
	t (μ.sn)	14,23	11,74	12,44	11,07
200	V (km/sn)	3,439	4,168	3,973	4,461
	t (μ.sn)	14,54	12,00	12,59	11,21
250	V (km/sn)	3,345	4,060	3,915	4,388
	t (μ.sn)	14,95	12,31	12,77	11,39
300	V (km/sn)	3,246	4,009	3,880	4,332
	t (μ.sn)	15,40	12,47	12,89	11,54



Şekil 4.47. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkılı harç numunelerin ultrasres geçiş hızı değişimi



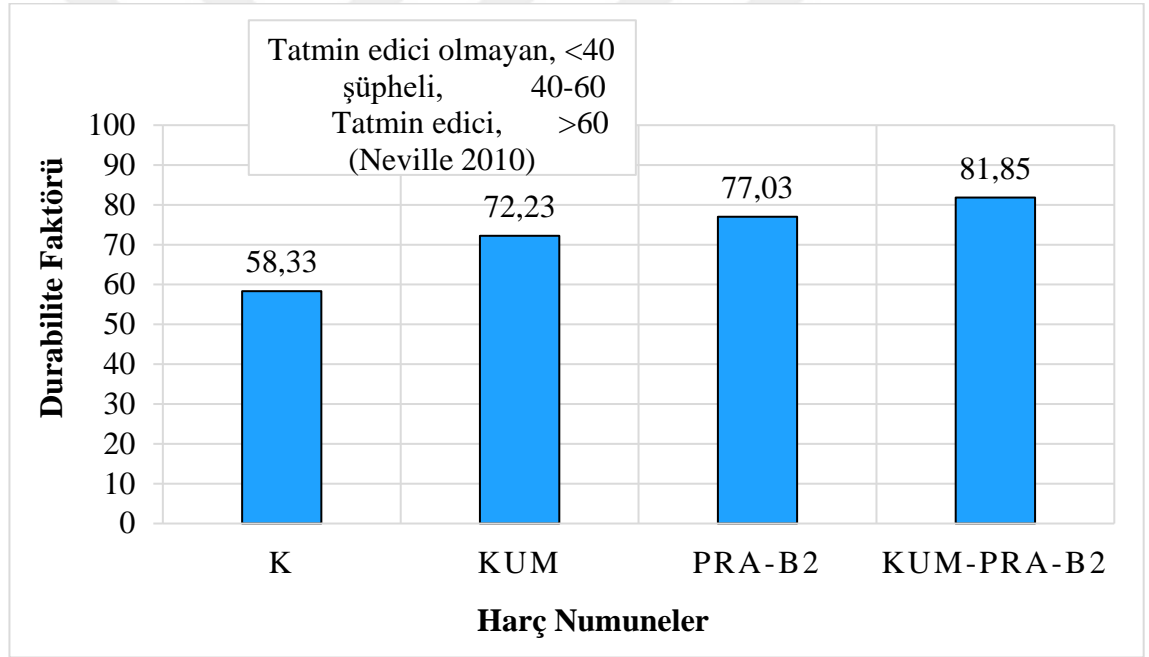
Şekil 4.48. 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük kontrol, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkılı harç numunelerin dinamik elastisite modülün değişimi



***Donma-çözülme çevrimine maruz kalan harç karışımların dinamik elastisite modülü değişimi ile durabilite faktörü tayini***

Tüm taze ve sertleşmiş hal özellikleri dikkate alınarak seçilen, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkıyı beraber içeren 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan 90 günlük "KUM-PRA-B2" isimli, Şekil 4.49'da verilmiştir. Ayrıca, kıyaslamalı amaçlı olarak daha öncede tartışılan "K", "KU" ve "PRA-B2" karışımlarına ait sonuçlar aynı şekilde gösterilmiştir.

Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkıyı beraber içeren "KUM-PRA-B2" karışım donma-çözülme direnci açısından diğer karışımlara kıyasla en üstün performansı göstermiştir.

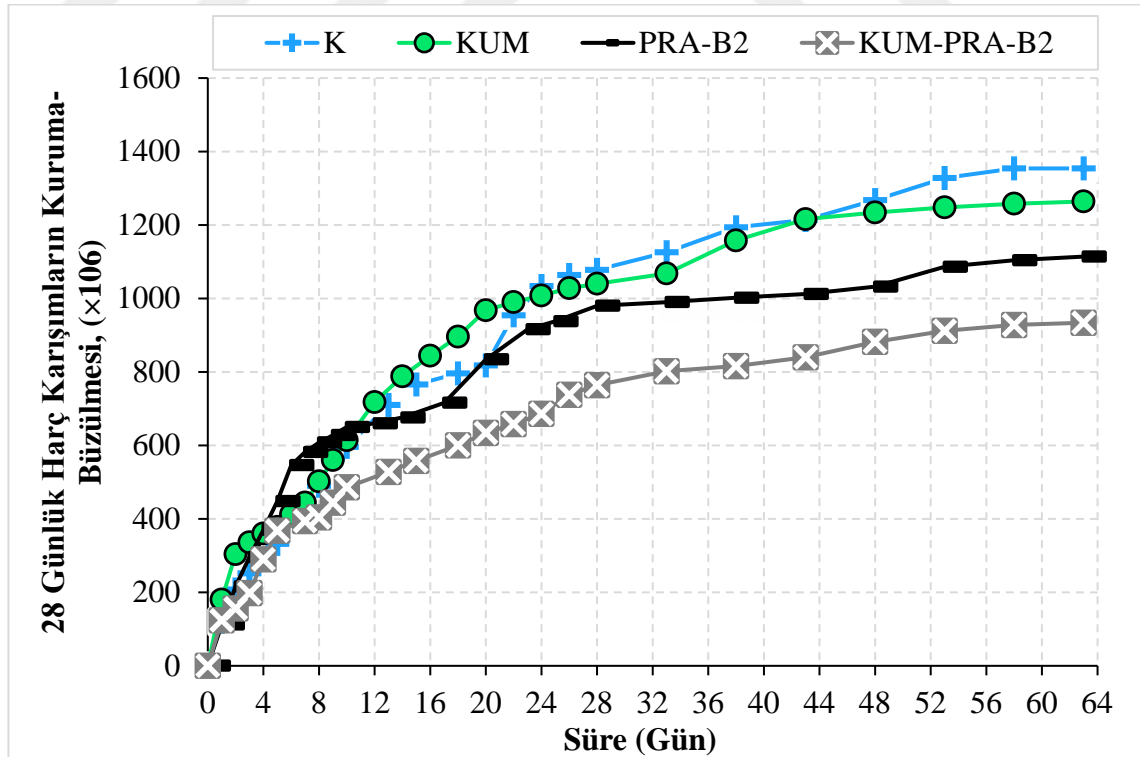


**Şekil 4.49.** Mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkıli harç numunelerinin 90-günlük durabilite faktörü değerleri

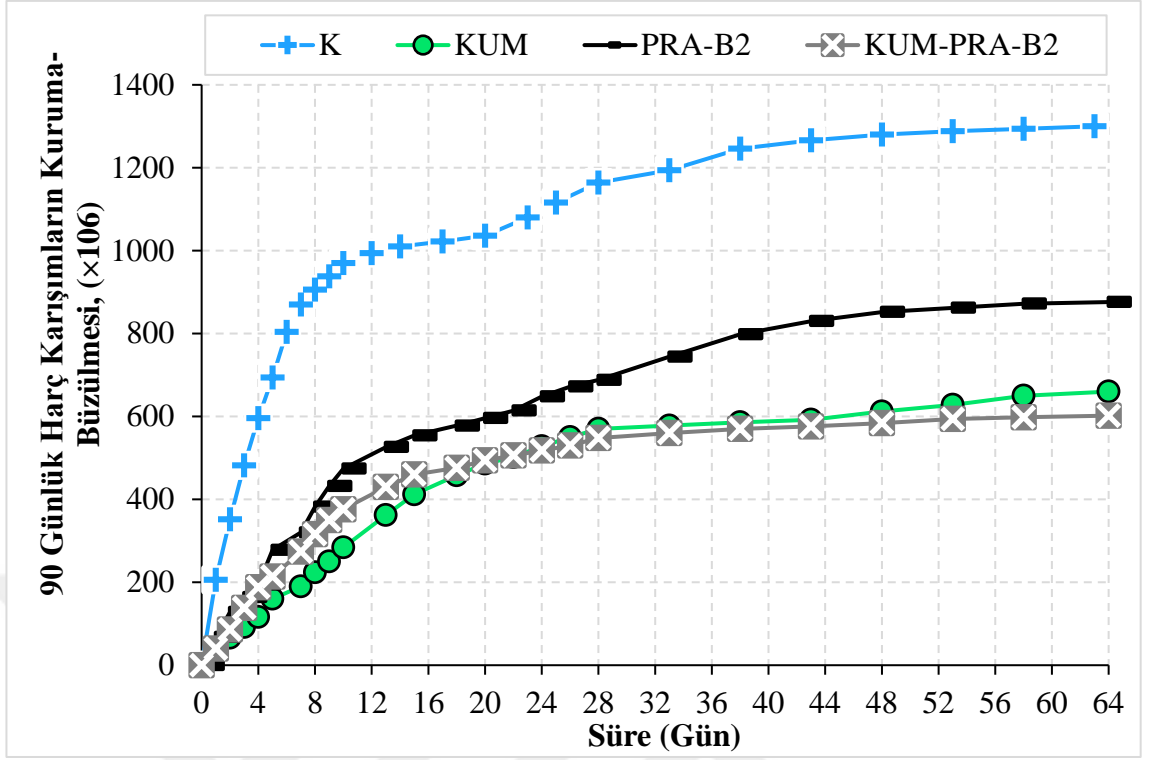
### ***Kuruma-büzülme***

Tüm taze ve sertleşmiş hal özellikleri sonuçları dikkate alınarak seçilen, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkıyı beraber içeren "KUM-PRA-B2" isimli karışımın 28 ve 90 günlük sonuçları Şekil 4.50 ve 4.51’de verilmiştir. Ayrıca, kıyaslam amaçlı olarak daha öncede tartışılan "K", "KUM" ve "PRA-B2" karışımlarının 28 ve 90-günlük kuruma-büzülme sonuçları Şekil 4.50 ve 4.51’de gösterilmiştir.

"KUM-PRA-B2" isimli karışım için 64’üncü günün sonunda ölçülen büzülme değeri "K","KUM" ve "PRA-B2" karışımlarına kıyasla sırasıyla, %31, %26 ve %16 daha az olmuştur. Bu oran 90 günlük numunelerde sırasıyla %54, %9 ve %54 ölçülmüştür. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkıyı beraber içeren "KUM-PRA-B2" isimli karışım kuruma-büzülme davranışı açısından diğer karışımlara kıyasla en üstün performansı sergilemiştir. Daha önce de vurgulandığı gibi, hem mineral hem de geçirgenlik azaltıcı katkı kullanımı karışımın boşluk oranının azaltarak geçirgenliğin azalmasına sebep olmaktadır. Söz konusu bu olumlu etkiyi içeren iki katkının beraber kullanımı büzülme değerlerinin azalmasına sebep olmuştur.



Şekil 4.50. 28 günlük harç karışımlarının kuruma-büzülme değişimi



Şekil 4.51. 90 günlük harç karışımlarının kuruma-büzülme değişimi

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada kullanılan malzemeler ve yöntemler doğrultusunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1) Çimento ağırlığının %0,5'i kadar su azaltıcı katkı içeren tüm mineral katkıli karışımlar Marsh-hunisi akış performansı açısından kontrol karışımına kıyasla düşük performans sergilemiştir. Bu bağlamda, çimentoya kıyasla yaklaşık 4 kat daha ince olan metakaolin içeren karışım akış davranışı açısından düşük performans yeterli miktarda su azaltıcı katkı bulunduğu durumlarda metakaolin kullanımı ile karışımda toplam ince malzeme miktarının artmasına rağmen beklenenin tersine karışımların akış performansı olumlu etkilenmiştir. Bu etkinin su azaltıcı katkının daha ince taneler üzerinde daha kolay adsorbe olduğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Benzer sonuçlar diğer araştırmacılar tarafından da vurgulanmıştır.

2) Mineral katkı kullanımı ve tipinden bağımsız olarak, tüm karışımların Marsh-hunisi katkı doygunluk noktası çimento/katkı oranının %1 olduğu durumlarda tespit edilmiştir. Doygunluk noktasındaki Marsh-hunisi akış süreleri dikkate alındığında, kontrol karışımına kıyasla akış performansı açısından en üstün ve en kötü davranışı sergileyen karışımların sırasıyla, metakaolin ve uçucu kül içeren ikili bağlayıcı sistemine sahip karışımlar olduğu sonuçlardan anlaşılmıştır.

3) Mineral katkı içeren karışımlarda su azaltıcı katkının artmasıyla hamur karışımların mini çökme değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Belirli bir katkı oranının üstünde mini çökme değerlerinde sabitlenme veya azalma olmuştur.

4) Daha öncede vurgulandığı gibi, çalışma kapsamında farklı etki mekanizmasına sahip 3 adet geçirgenlik azaltıcı (PRA) katkı kullanılmıştır. 1'inci ve 3'üncü katkıda sırasıyla, "PRA-A" ve "PRA-C" geçirgenlik azaltma özelliği açısından etkili mekanizma katkının karışımda birbirinden bağımsız uygun mesafede kalıcı hava baloncukları oluşturması olarak üretici firma tarafından bildirilmiştir. 2'nci katkıda "PRA-B" ise etkili mekanizma katkının çözünmeyen mikro silis kalıntısı içermesi ve çok az miktarda hava sürüklenme özelliğine sahip olması olarak üretici firma tarafından bildirilmiştir. Karışımda hava sürükleyerek geçirimsizliği sağlayan "PRA-A" isimli katkının kullanımı ile

geçirgenlik azaltıcı katkı içermeyen karışımlara kıyasla karışımların başlangıç Marsh-hunisi akış performansı önemli mertebede etkilenmemiştir. Ancak, bu karışımda katkı doygunluk noktası kontrol karışımına kıyasla daha düşük katkı/çimento oranında gerçekleşmiştir. Mineral katkılı karışımlarda "PRA-A" isimli geçirgenlik azaltıcı katkı kullanımı ile karışımların katkı doygunluk noktası daha düşük su azaltıcı katkı oranlarında sağlanmıştır. Bu olumlu etkinin "PRA-A" katkısının karışıma hava kabarcıklarını sürükleyip viskoziteyi azaltmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Mineral katkı içeren ve içermeyen hamur karışımlara "PRA-A" geçirgenlik azaltıcı katkının ilave edilmesi karışımların mini-çökme performanslarını olumsuz etkilemiştir. Bu olumsuz etkinin "PRA-A" isimli katkı kullanımıyla karışımların eşik kayma gerilmesinin artırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

5) Üretici firma iddiasında dayanarak hem çözünmeyen kalıntı içerdiğinden hem de az miktarda hava sürükleyici etkisine sahip olduğundan hamur karışımlardaki kapiler boşlukları tıkayarak karışımların geçirimsizliğini sağlayan "PRA-B" isimli geçirgenlik azaltıcı katkı ilave edilmesiyle karışımların başlangıç Marsh-hunisi akış performansları genel olarak olumlu etkilenmiştir. Söz konusu katkı kullanımı ile mineral katkı içermeyen kontrol karışımında su azaltıcı doygunluk noktası daha düşük katkı/çimento oranında sağlanmıştır. Ancak, mineral katkı içeren karışımlarda su azaltıcı katkı doygunluk noktasının daha yüksek katkı/çimento oranında sağlanmasına sebebiyet vermiştir.

6) "PRA-C" isimli katkının hamur karışımlarına ilave edilmesiyle mineral katkılı karışımların başlangıç Marsh-hunisi akış süresi olumsuz etkilenmiştir. Söz konusu katkının kullanımıyla su azaltıcı katkı doygunluk noktası ciddi mertebede etkilenmemiştir. Ancak, "PRA-C" katkılı karışımların doygunluk noktasındaki Marsh-hunisi akış süresi değerleri geçirgenlik azaltıcı katkı içermeyen kontrol karışımına kıyasla daha düşük olmuştur.

7) Harç karışımlarında, genel olarak mineral katkı kullanımı ile, kontrol karışımına kıyasla harç karışımlarının hava içeriği azalmıştır. Mineral katkılı karışımlar içerisinde hem uçucu kül hem de metakaolin içeren üçlü bağlayıcı sistemine sahip "KUM" isimli karışımı en düşük hava içeriğine sahip olmuştur. Bu karışımın içerdiği hava miktarı kontrol karışımına kıyasla %30 daha düşük ölçülmüştür. Mineral katkılı karışımlarının

hava içeriğinin kontrol karışımına kıyasla daha düşük olmasının, mineral katkı kullanımı ile ince malzeme oranının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

8) Geçirgenlik azaltıcı katkı kullanımı ile "PRA-C" katkısı hariç karışımların hava yüzdesi değerleri azalmıştır. Mineral ve geçirgenlik azaltıcı katkı kullanımından bağımsız olarak çimento ağırlığının %2'si kadar "PRA-B" isimli katkı içeren "PRA-B2" karışımı en düşük hava içeriğine sahip olmuştur. Söz konusu karışımın hava yüzdesi kontrol karışımına kıyasla %70 daha düşük olmuştur.

9) Mineral katkı içeren karışımlar arasında kıvam koruma açısından en başarılı performansı %20 oranında uçucu kül içeren "KU" isimli karışım göstermiştir. Diğer yandan başlangıç yayılma değeri açısından "KUM" karışımı fazla yayılmaya sahip olmuştur. %1 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı içeren karışımlar arasında 60 dakika sonunda kıvam koruma özelliği açısından "PRA-B" isimli katkıyı içeren karışım daha başarılı olmuştur. Diğer taraftan mineral katkısız %2 oranında geçirgenlik azaltıcı katkı kullanılarak hazırlanan karışımlar arasında "PRA-B" isimli karışım, kıvam koruma özelliği açısından en başarılı karışım olarak seçilmiştir. %2 oranında "PRA-B" isimli geçirgenlik azaltıcı katkıyı içeren mineral katkılı "KUM-PRA-B2" karışımı yayılma performansı ve kıvam koruma özelliği açısından en başarılı karışım olarak tespit edilmiştir.

10) Mineral katkılı karışımlar incelendiğinde, kontrol karışımına kıyasla çimento yerine %20 uçucu kül ve %10 metakaolin ikamesi yapılan karışımların 1-günlük basınç dayanımını ciddi mertebede etkilememiştir. Ancak, uçucu kül ve metakaolinin beraber kullandığı üçlü bağlayıcı sisteme sahip "KUM" karışımının 1-günlük basınç dayanımı kontrol karışımına kıyasla yaklaşık %40 daha düşük olmuştur. "KUM" karışımının 1-günlük dayanımının bu kadar düşük olması karışımda toplam bağlayıcının %30'ü yerine mineral katkı ikame edilmesinden ve puzolanik reaksiyonun çok erken yaşlarda etkili olmamasından kaynaklanmaktadır. %10 metakaolin içeren ikili bağlayıcı sistemine sahip "KM" karışımı 1'inci günden itibaren kontrol karışımına kıyasla daha yüksek dayanım göstermiştir. Ancak, %20 uçucu kül içeren "KU" 28 güne kadar kontrol karışımına kıyasla daha düşük performans göstermesine rağmen 90 günün sonunda yaklaşık %10 daha yüksek dayanım göstermiştir. Çimentoya incelikte daha yakın olan mineral

katkıların puzolanik etkisi ileri yaşlarda daha etkili olmaktadır. Üçlü bağlayıcı sistemine sahip "KUM" karışımı 7 güne kadar kontrol karışımına kıyasla daha düşük dayanım göstermiştir. Ancak, bu yaştan sonra dayanım performansı açısından kontrol karışımına kıyasla daha başarılı olmuştur. Bu pozitif etki zamanla daha bariz hale gelmiştir.

11) Sonuçlardan da görüldüğü gibi, harç karışımlarında 3 farklı mekanizmaya sahip geçirgenlik azaltıcı katkı kullanımı, karışımların basınç dayanım özelliklerinde ciddi mertebede bir artışa sebebiyet vermemiştir. Bu bağlamda, en başarılı katkı "PRA-B" isimli katkı olmuştur. Mineral katkılı karışımlarda ise basınç dayanımı açısından en başarılı karışımın %10 oranında metakaolin içeren ikili bağlayıcı sistemine sahip "KM" isimli karışım olduğu gözlemlenmiştir.

12) Tüm mineral katkılı karışımların 90-günlük su emme oranları, kontrol karışımına kıyasla daha düşük olmuştur. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, su emme davranışı açısından %20 uçucu kül ve %10 metakaolin içeren "KUM" karışım en üstün performansı sergilemiştir. Geçirgenlik azaltıcı katkılı karışımlar incelediğinde, genel olarak söz konusu katkıların kullanımı ile harç karışımlarının su emme oranlarında azalmalar gözlemlenmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi, söz konusu katkının kullanım oranı %1'den %2'ye artmasıyla geçirgenlik azaltma performans olumsuz etkilenmiştir. Bu olumsuz etkinin, "PRA-A" katkı kullanım oranının artışına bağlı olarak karışımda aşırı hava sürüklenme sonucu uniform olmayan boşlukların oluşumundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Geçirgenlik azaltma davranışı açısından "PRA-C" isimli katkının "PRA-A" katkıya kıyasla daha düşük performansa sahip olduğu deney sonuçlarından anlaşılmıştır. "PRA-C" isimli katkının kullanımı ile "PRA-A" isimli katkıyı içeren karışıma kıyasla karışım hava içerdiğinin yaklaşık 1,5 kat daha fazla olduğu anlaşılmaktadır.

13) Mineral katkılı karışımlarının su emme oranı ve basınç dayanımı arasında nispeten güçlü bir doğrusal ilişkinin mevcut olduğu anlaşılmaktadır. Geçirgenlik azaltıcı katkı karışımların su emme oranı - basınç dayanımı arasında nispeten zayıf bir doğrusal ilişki mevcuttur.

14) Numunelerin ultrases geçiş hızı davranışı açısından mineral katkı kullanımı geçirgenlik azaltıcı katkı kullanıma kıyasla daha başarılı olmuştur. 90 günlük mineral

katkılı numuneler incelendiğinde mineral katkı türü ve kullanım miktarından bağımsız olarak kontrol karışımına kıyasla 300 donma-çözülme çevrim sırasında mineral katkı karışımlarda ağırlık kaybı daha az olduğu anlaşılmaktadır. Geçirgenlik azaltıcı katkı içeren karışımlar incelendiğinde numune yaşından bağımsız olarak tüm geçirgenlik azaltıcı katkıli karışımlar donma-çözülme kaynaklı ağırlık kaybının açısından kontrol karışımına göre daha yüksek performans göstermiştir. Söz konusu bu olumlu etki zamanla daha bariz hale gelmiştir. Geçirgenlik azaltıcı katkı kullanım oranının %1'den %2'ye artmasıyla, karışımların donma-çözülme kaynaklı ağırlık kaybı performansı ciddi mertebede etkilenmiştir. Çimento ağırlığın %2'si oranında "PRA-B" isimli geçirgenlik azaltıcı katkı içeren numune 300 donma-çözülme sonunda kontrol karışımına kıyasla %62 daha az ağırlık kaybı göstererek donma-çözülme direnci açısından en iyi performansa sahip olan karışım olarak seçilmiştir.

15) Mineral katkıli karışımlarda su emme oranı ve ağırlık kaybı arasında 28 günlük numunelerde doğrusal ters bir ilişkinin ancak 90 günlük numunelerde çok güçlü doğrusal bir ilişkinin mevcut olduğu görülmektedir. 28 günlük numunelerde söz konusu ters ilişkinin nedeni puzolanik reaksiyonun 28 gün kısa bir sürede tam olarak gerçekleşmediğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Geçirgenlik azaltıcı karışımlarda ise hem 28 ve hem de 90 günlük numunelerde su emme oranı ve ağırlık kaybı arasında doğrusal bir ilişkinin mevcut olduğu anlaşılmaktadır.

16) Mineral katkı türü ve miktarından bağımsız olarak tüm yaşlarda mineral katkıli karışımların dinamik elastisite modülü kontrol karışımına kıyasla daha yüksek olmuştur. Mineral katkıli ve kontrol karışımının dinamik elastisite modülü değerleri arasındaki söz konusu bu fark zamanla daha bariz hale gelmiştir.

17) Geçirgenlik azaltıcı katkı (PRA) içeren karışımlar incelendiğinde katkı türünden ve kullanım oranından bağımsız olarak dinamik elastisite modülü davranışı açısından "PRA" içeren karışımların kontrol karışımına kıyasla daha üstün performans gösterdiği anlaşılmıştır. "PRA-A" ve "PRA-C" isimli katkıların kullanım oranlarının %1'den %2'ye artırılmasıyla karışımların dinamik elastisite modülü değerleri azalmıştır. Ancak "PRA-B" isimli katkının kullanım oranının %1'den %2'ye artırılmasıyla karışımların dinamik elastisite modülü artmıştır. Söz konusu bu katkıyı içeren karışımlar diğer "PRA" katkıli



karışımlara göre hem başlangıçta ve hem de 300 donma-çözülme çevrim sonrası daha üstün performans göstermiştir. "PRA-B2" isimli karışım kontrol karışımına göre yaklaşık %33 daha yüksek dinamik elastisite modülüne sahip olmuştur.

18) Kontrol karışımı hariç tüm mineral katkılı 28 ve 90 günlük numunelerin durabilite faktörü değerlerinin donma-çözülme direnci açısından tatmin edici olduğu anlaşılmaktadır. Numune yaşından bağımsız olarak metakaolin içeren mineral katkılı "KM" isimli karışım durabilite faktörü değeri açısından diğer mineral katkılı karışımlara göre en başarılı karışım olmuştur.

19) Geçirgenlik azaltıcı katkı (PRA) içeren karışımlar incelendiğinde katkı türünden ve kullanım oranından bağımsız olarak durabilite faktörü performansı açısından "PRA" içeren karışımların kontrol karışımına kıyasla daha üstün performans gösterdiği anlaşılmıştır. "PRA-A" ve "PRA-C" isimli katkıların %1 ve %2 oranında kullanımıyla karışımların durabilite faktörü değerleri kontrol karışımına göre artmıştır. Ayrıca hem "PRA-B" isimli katkının kullanım oranının %1'den %2'ye artırılmasıyla karışımların durabilite faktörü değeri kontrol karışımına kıyasla, artmıştır.

20) 28 günlük numunelerde mineral katkılı karışımlar kuruma-büzülme davranışı açısından kontrol karışımına kıyasla daha düşük performans göstermiştir. 90 günlük numuneler incelendiğinde mineral katkı türünden ve miktarından bağımsız olarak tüm mineral katkılı karışımların başlangıçtan itibaren kontrol karışımına kıyasla daha az büzülme gösterdiği anlaşılmaktadır. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, "KUM" karışımı büzülme davranışı açısından en başarılı karışım olarak seçilmiştir. Geçirgenlik azaltıcı katkılı karışımlar incelendiğinde %1 ve %2 oranında "PRA-A" ve %1 oranında "PRA-B" isimli katkıları içeren 28 günlük karışımlar kontrol karışımına göre daha fazla kuruma-büzülme göstermiştir. Ancak, aynı yaştaki numunelerde %1 ve %2 oranında "PRA-C" ve %2 oranında "PRA-B" isimli katkıları içeren karışımların kontrol karışımına göre, daha az miktarda kuruma-büzülme gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu bağlamda tüm geçirgenlik azaltıcı katkı içeren karışımlarda katkı kullanım oranı %1'den %2'ye arttığı zaman büzülme değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. 90 günlük numuneler incelendiğinde geçirgenlik azaltıcı katkı türü ve miktarından bağımsız olarak tüm "PRA" içeren numuneler kuruma-büzülme davranışı açısından kontrol karışımına kıyasla daha üstün

performans sergilediği anlaşılmaktadır. Deney sonuçlarından da anlaşıldığı gibi, hem 28 ve hem 90 günlük geçirgenlik azaltıcı katkı içeren karışımlarda %2 oranında "PRA-B" isimli karışım kuruma-büzülme açısından en üstün performansı sergilemiştir. Genel olarak kuruma-büzülme davranışı açısından mineral katkılı karışımların geçirgenlik azaltıcı içeren karışımlara kıyasla daha başarılı olduğu deney sonuçlarından da anlaşılmaktadır.



## KAYNAKLAR

- ACI 212, 2004.** American Concrete Institute ACI.
- ACI 212.R-04, 2004.** Chemical Admixtures for Concrete, American Concrete Institute, ACI.
- Aitcin, P.C., Jolicoeur, C. and Macgregor, J.G. 1994.** Superplasticizers: how they work and why they occasionally dont. *Concrete International*, 16(5): 45-52 s.
- Aitcin P.C. 2004.** High Performance Concrete, E&FN SPON, New York.
- Akman, M.S. 1989.** Beton dayanıklılık özelliği ve önemi, I. Ulusal beton kongresi. Kongre Sempozyum Bildiriler Kitabı, 24 Mayıs 1989, İstanbul.
- Akman, M.S. 1992.** Deniz yapılarında beton teknolojisi, İTÜ, Matbaası, İstanbul.
- Akman, M.S. 2010.** Kimyasal Katkıların Betona Uygulanması, Ulusal Beton Kongresi, Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar. Sayfa:1-12. [http://www.imo.org.tr/ekutuphane/index.php?yayinkod=602-\(Erişim tarihi: 10.05.2018\).](http://www.imo.org.tr/ekutuphane/index.php?yayinkod=602-(Erişim tarihi: 10.05.2018).)
- Akyol, K. 2008.** Su yalıtımı ve su geçirimsizlik katkı oranlarının beton su emmesine ve basınç dayanımına etkilerinin araştırılması, *yüksek lisans tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı adı, Sakarya.
- Alataş, T. 1996.** Afşin-Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Çeşitli Malzemelerle Birlikte Kullanımı Üzerine Bir Araştırma, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Asbridge A.H., Chadbourn G.A., Page C.L. 2001.** Effects of metakaolin and the interfacial transition zone on the diffusion of chloride ions through cement mortars. *Cem Concr Res*, 31: 1567–1572.
- ASTM C 597.** Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, Annual Book of ASTM Standards
- ASTM C 615, 1991.** Standard Specification for Granite Dimension Stone.
- ASTM C 618, 1991.** Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Pozzolan for Use As a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete.
- ASTM C109-16, 2017.** Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C596-01, 2017.** Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C642–13, 2013.** Standard Test Method for Density, Absorption and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C666-97, 1998,** Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, Annual Book of ASTM standards.
- Atiş, C.D. 2000.** Yüksek Oranda Uçucu Kül Kullanımı ile Betonun Aşınması. *İMO Teknik Dergi*, Yazı 154: 11(4): 2217-2230.
- Badogiannis, E., Kakali, G. And Tsivilis, S. 2005.** Metakaolin as supplementary cementitious material: optimization of kaolin to metakaolin conversion. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 81(2): 457–462.
- Baioumy, H. And Ibrahim A.R. 2012.** Mineralogical Variations Among the Kaolin Deposits in Malaysia, (Geos), 1–2. <https://doi.org/10.5176/2251-3361>.
- Balta, İ. 1991.** Yüksek mukavemetli betonlar ve bileşenleri. 2. Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Dayanımlı Beton, Kongre Sempozyum Bildiriler Kitabı, Yayın Bilgisi: 27 Mayıs 1991, 246-255, İstanbul.
- Baradan, B. ve Felekoğlu, B. 2007.** 2.Yapılarda Kimyasal Katkılar Kongre Sempozyum Bildiriler Kitabı, Sayfa: 53 – 64, 12-13 Nisan 2007, Ankara.

- Batis, G., Pantazopoulou, P., Tsvivilis, S., and Badogiannis, E. 2004.** The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars. *Cement & Concrete Composites*, Department of Materials Science and Engineering, University of Athens, Greece, February.
- Bedard, C. & Mailvaganam, N.P. 2005.** The use of chemical admixtures in concrete. Part I: Admixture-cement compatibility. *Journal of performance of constructed facilities*, 19(4): 263-266.
- Beton deneyleri -1 2006.** İnşaat Teknolojisi, Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi, Ankara.
- Bich, C., Ambroise, J. and P'era, J. 2009.** Influence of degree of dehydroxylation on the pozzolanic activity of metakaolin, *Applied Clay Science*, 44(3-4): 194–200.
- Binici, H., Eken, M. ve Aksoğan, O. 2012.** Cüruf, uçucu kül, silis kumu ve pomza esaslı geopolimerlerin fiziksel, mekanik ve radyasyon geçirgenlik özellikleri. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*. 8(2): 12-25, (www.teknolojikarastirmalar.com) e-ISSN:1305-631X
- Bogue, R.H. and Lerch, W. 1934.** Hydration of Portland Cement Compounds. *Ind. Eng. Chem*, 26 (8): 837–847, August 1934, Washington, DC.
- Bonen, D. & Sarkar, S.L. 1995.** The superplasticizer adsorption capacity of cement pastes, pore solution composition, and parameters affecting flow loss. *Cement and Concrete Research*, 25(7): 1423-1434.
- Bürge T.A. 1999.** Multi component polymer concrete. First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. *Rilem Publications S.A.R.L.*, September 13-14, 411-424 ss, Stockholm, Sweden.
- CEB-FIP 1989.** Diagnosis and assessment of concrete structures – state of art report. CEB Bull 192: 83–85, Lausanne, Switzerland.
- Chan, S.Y.N., Luo, X. and Sun, W. 2000.** Effect of High Temperature and Cooling Regimes on the Compressive Strength and Pore Properties of High Performance Concrete, *Construction and Building Materials*, 14(5): 261-266.
- Choinska M., Khelidj A., Chatzigeorgiou G., Pijaudier-Cabot G. 2007.** Effects and interactions of temperature and stress-level related damage on permeability of concrete. *Cement and Concrete Research, Elsevier*, 37 (1): 79-88.
- Colleparidi, M. 1998.** Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 20(2-3): 103-12 s.
- Dhir, R.K. ve Jones, M.R. 1999.** Development of Chloride-Resisting Concrete Using Fly Ash, *Fuel*, 78(2): 137-142.
- Dinakar, P., Reddy, M.K., Sharma, M. 2013.** Behaviour of self compacting concrete using portland pozzolana cement with different levels of fly ash, *Materials & Design*, 46: 609-616.
- BS EN 206-12, 2000.** Concrete - Specification, performance, production and conformity.
- Duan, P., Shui, Z., Chen, W. and Shen, C. 2013.** Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, 44: 1–6.
- Dunster, AM., Parsonage, JR., and Thomas, MJK. 1993.** Pozzolanic reaction of metakaolin and its effects on Portland cement hydration. *Journal Material of Science*, 28: 1345–51.
- Erdoğan, T.Y. 2004.** Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri, 1. Baskı, THBB, *Hazır Beton Dergisi*, 975-92122, İstanbul.
- Erdoğan, Ş., Arslantürk, C. and Kurbetci, Ş. 2011.** Influence of Fly Ash and Silica Fume on the Consistency Retention and Compressive Strength of Concrete Subjected to

- Prolonged Agitating. *Construction and Building Materials*, 25: 1277-1281.
- Flatt, R.J. & Houst, Y.F. 2001.** A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers. *Cement and concrete research*, 31(8): 1169-1176.
- Gardner D.R., Lark R.J., Barr B. 2005.** Effect of conditioning temperature on the strength and permeability of normal- and high-strength concrete. *Cement and concrete research*. 37: 1400–1406.
- Gartner, E.M. and Gaidis, W.R. 1989.** Hydration Mechanisms in Materials Science of Concrete I.J.Skalny ed., *American Ceramic Society*, 1: 95-125, Westerville, OH.
- Gruber K.A., Ramlochan T., Boddy A., Hooton R.D., Thomas M.D.A. 2001.** Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin. *Cement and Concrete Composites*, 23(6): 479–484.
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Özturan, T. And Mermerdas K. 2012.** Microstructural properties and pozzolanic activity of calcined kaolins as supplementary cementing materials. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(12): 1274–1284.
- Halliwell, M.A. 1992.** Preliminary assessment of the performance of portland cement concrete containing metakaolin, Tech Rep, TCR48/92, BRE.
- Hana, E., Luke, K., Perraton, D., ve Aitcin, P.C. 1989.** Rheological behavior of portland cement in the presence of a superplasticizer. Proceedings of the Third International Conference on Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete, 171–88, Detroit.
- Hanehara, S., and Yamada, K. 1999.** Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, absorption behavior of admixture, and paste rheology. *Cement and Concrete Research*, 29: 1159-1165.
- Haque, M.N. and Kayyali, O.A. 1989.** Strength and Porosity of Hardened Cement-Fly Ash Pastes in Hot Environment, *ACI Materials Journal*, 86(2): 128-134.
- Hewlett, P.H., ED 2004.** Lea's Chemistry of Cement and Concrete. *Elsevier Science & Technology*.
- Hoseini M., Bindiganavile V., Banthia N. 2009.** The effect of mechanical stress on permeability of concrete. *Cement and Concrete Composites Journal*, 31(4): 213–220.
- Jamal, M.K and Roger, M.C. 2003.** Absorption characteristics of metakaolin concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1): 19-29.
- Kandil, U. 2014.** Uçucu kül ve silis dumanı içeren betonların geçirimsizlik özelliklerinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.
- Kearsley E.P., Wainwright P.J. 2001.** Porosity and permeability of foamed concrete. *Cement and Concrete Research*, 31: 805–812.
- Kocataşkın, F. 1957.** Vapour Permeability of Concrete. *Bul of the Technical University of Istanbul*. 10(1): 53-59.
- Kocataşkın, F. 1995.** Permeability of Concrete. *Bul. of the Technical University of Istanbul*, 8: 50-56.
- Larbi, J.A. 1991.** The cement paste-aggregate interfacial zone in concrete. *Ph.D. dissertation*, Technische Universiteit Delft, Netherlands.
- Li Z. 2011.** Advanced Concrete Technology. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 506 pp
- Mardani-Aghabaglou, A., Tuyan, M., Yılmaz, G., Ariöz, Ö. & Ramyar, K. 2013.** Effect of different types of superplasticizer on fresh, rheological and strength properties of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 47: 1020-1025.

- Mardani-Aghabaglou, A., Yılmaz, G., Hosseinezhad, H., Ramyar, K. 2013.** Farklı geçirgenlik azaltıcı katkıların betonun basınç dayanımı ve geçirimsizlik özeliğine etkisi. Yapılarda Kimyasal Katkılar 4. Sempozyum ve Sergisi, 24-25 Ekim, Ankara, s. 111-128.
- Mardani-Aghabaglou, A. 2016.** Portland çimentosu ve süper akışkanlaştırıcı katkı uyumunun incelenmesi. *Doktora Tezi*, EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Mardani-Aghabaglou, A., Boyaci, O.C., Hosseinezhad, H., Felekoğlu, B. & Ramyar, K. 2016.** Effect of gypsum type on cement-high range water reducing admixture compatibility. *Cement and Concrete Composites*, 68:15-26.
- Mardani-Aghabaglou, A., Felekoğlu, B. & Ramyar, K. 2017a.** Effect of cement c3a content on properties of cementitious systems containing high-range water-reducing admixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(8): 04017066.
- Mardani-Aghabaglou, A., Son, A. E., Felekoğlu, B., Ramyar, K. 2017b.** Effect of cement fineness on properties of cementitious materials containing high range water reducing admixture, *Journal of Green Building*, 12(1): 142-167.
- Massaza, F. 1997.** Pozzolans and Durability of Concrete. 1. International Symposium on Mineral Admixtures in Cement, Turkish Cement Manufactures Association, İstanbul, 1-22.
- Mehta, P.K. 1983.** Pozzolanic and Cementitious by-Products as Mineral Admixtures for Concrete: A Critical Review, The Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral by-Products in Concrete, ACI Special Publication SP-79, Detroit, 1-46.
- Mehta, P.K. 1986.** Standard Specifications for Mineral Admixtures an Overview. Proceedings of ACI/CANMET Second International Conference On Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, SP-91, Spain, Madrid. pp.637-658.
- Mehta PK, Monteiro PJM, 2006.** Concrete: microstructure, properties and materials. 3rd ed. McGraw- Hill.
- Mindess, S., Young, J.F. 1986.** Concrete, Prentice-Hall,İne, New Jersey.
- Mindess, S., Young J.F., and Darwin, D. 2002.** Concrete (second edition). Prentice Hall, New York.
- Morahoğlu, M. 2015.** Kimyasal katkı-biyopolimer uyumunun çimento harcı özelliklerine etkisinin kitin özelinde incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Bilim Dalı, Manisa.
- Neville A. 2010.** Concrete technology, 2nd ed., Longman, UK.
- Newman, J.B. 2003.** Advanced Concrete Technology: Constituent Materials, Butterworth-Heinemann.
- Oktar, O.N. 1977.** Bağlayıcı Hamurun Yapısının Betonun Kısa Süreli İnelastik Davranışındaki İşlevi, *Doktora Tezi*, İTÜ İnşaat Fakültesi.
- Ozturk, A.U. 2009.** Çimento Harçlarının Mikroyapı-Basınç Dayanım İlişkisinin İncelenmesi. *Doktora Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı, İzmir, 9-30 s.
- Özger, O.B. 2011.** Effect of using different kind of mineral admixtures to permeability and durability properties of self compacting concrete. *M.Sc. Thesis*, İstanbul Technical University.
- Özkul, H., Taşdemir, M.A., Tokyay, M., Uyan, M. 1999.** Meslek Liseleri İçin Her Yönüyle Beton. Aralık, TÇMB, Ankara.
- Özturan, T. 1991.** Beton Üretimimde Uçucu Kül Kullanımının İrdelenmesi. Türkiye İnşaat Mühendisliği XI. Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 149-158s., İstanbul.

- Plank, J., Sakai, E., Miao, C.W., Yu, C. & Hong, J.X. 2015.** Chemical admixtures-Chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability. *cement and concrete research*, 78: 81-99.
- Pratt, P.L. and Jennings, H.M. 1981.** The Microchemistry and Microstructure of Portland Cement. *Annual Review of Materials Research*, 11: 123-149.
- Ramachandran, V.S. and Beaudoin, J.J. 1980.** Hydration of C4AF + Gypsum: Study of Various Factors. Proc. VII Intern. Cong. Cements, 25-30, Paris.
- Ramachandran, V.S. 1995.** Concrete Admixtures Handbook. Noyes Publications, New Jersey.
- Ramachandran, V.S. and Beaudoin, J.J. 2001.** Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology. William Andrew Publishing, New York, USA.
- Ramlochan, T., Thomas, M. and Gruber, K.A. 2000.** Effect of metakaolin on alkali-silica reaction in concrete, *Cement and Concrete Research*, 30(3): 339-344.
- Ramyar, K. 2007.** Portland Çimentosu - Süperakışkanlaştırıcı Katkı Uyumunu Etkileyen Faktörler. 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, 197-211, Ankara.
- Roger Rixom R., Mailvaganam N. 1999.** Chemical admixtures for concrete. 3th ed., E & FN Spon, London, England.
- Saad, M.N.A., De Andrade, W.P. and Paulon, V.A. 1982.** Properties of mass concrete containing an active pozzolanmade fromclay, *Concrete International*, 4: 59-65.
- Shah, P.S., Lange A.D., Li, Z., Mitsui, K. 1994.** Relationship between Microstructure and Mechanical Properties of the Paste-Agregate Interface, *ACI Materials Journal*, 91(1) 30-39, January-February.
- Shi C. 2004.** Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results, *Cement and Concrete Research*, 34: 537-545.
- Shvarzman, A., Kovler, K., Grader, G.S. and Shter, G.E. 2003.** The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite, *Cement and Concrete Research*, 33(3), 405-416.
- Sims, I., and Bev Brown, B. 2003.** Concrete Aggregates, Leas Chemistry of Cement and Concrete, Fourth edition.
- Spiratos, N., Page, M., Mailvaganam, N., Malhotra, V.M. and Jolicoeur, C. 2003.** Superplasticizers for Concrete - Fundamentals, Technology, and Practice. *Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc.*, 28-34, Ottawa, Canada.
- Taşdemir, C. 2003.** Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete. *cement and concrete research*, 33: 1637-1642.
- Taylor, H.F.W. 1966.** The Chemistry of Cements. Royal Inst. Chem., Series 2, 27.
- Tokyay, M., Erdoğan, K. 1998.** Uçucu Küllerin Karakterizasyonu, TÇMB, Ankara.
- Topçu, İ.B., Demir, A. ve Boğa, A.R. 2004.** Akışkanlaştırıcı ve süper akışkanlaştırıcı katkı kullanımının taze beton özelliklerine etkisi. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 434 38-40.
- TS 13515, 2014.** TS EN 206'nın uygulamasına yönelik tamamlayıcı standard.
- TS 640 1992.** Çimento-Uçucu küllü çimento, Türk Standardı.
- TS EN 1097-6, 2013.** Agregaların Mekanik Ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 6: Tane Yoğunluğunun ve Su Emme Oranının Tayini, *TSE*, Ankara.
- TS EN 12350-7, 2010.** Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 7: Hava muhtevasının tayini - Basınç yöntemleri
- TS EN 12390-3, 2002.** Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TS EN 12390-8, 2010.** Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 8: Basınç altında su işleme derinliğinin tayini.
- TS EN 12504-4, 2004,** Beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrases geçiğ hızının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-1, 2016.** Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım tayini, TSE, Ankara.
- TS EN 934-2, 2002.** Kimyasal Katkılar-Beton Harç ve Şerbeti İçin-Bölüm 2: Beton Katkıları, T.S.E., Ankara.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A. 2003.** Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, *TÇMB Yayınları*, Ankara.
- Türkmen, İ., Gül, R., Çelik, C., Demirboğ, R. 2003.** Determination by the Taguchi Method of Optimum Conditions for Mechanical Properties of High Strength Concrete with Admixtures of Silica Fume and Blast Furnace Slag. *Civil Engineering and Enviromental Systems*, 20(2): 105-118.
- Uchikawa, H. 1989.** Similarities and Discrepancies of Hardened Cement Paste, Mortar and Concrete from the standpoints of Composition and Structure, *Journal of Cement and Concrete, Cement Association of Japan* No.507.
- Ullah-Khan, S., Nuruddin, M.F., Ayub, T. and Shafiq, N. 2014.** Effects of Different Mineral Admixtures on the Properties of Fresh Concrete. *Scientific World Journal*, Feb 18 Malaysia. Article ID 986567, 11 pages
- Uluöz, N., Özbek, H., Arslan, M., Açık, H. 2011.** Farklı çimento tipleri ve mineral katkıları ile üretilen betonların mekanik ve geçirimsizlik özellikleri, *Hazır Beton Kongresi*, Ekim, İstanbul, Bildiriler Kitabı: 376-387.
- Uyan, M. 1975.** Betonda Kılcallık Olayı. *Doktora Tezi*. İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Uyan, M. 1988.** Boşluklu Ortam Olarak Betonda Rutubet Hareketleri. Kent Yönetimi İnsan ve Çevre Sorunları Sempozyumu. İ.B.B. s.266-273.
- Uyan, M., Özcan M. ve Yıldırım H. 1998.** Tunçbilek ve seyitömer uçucu küllerinin betonun kılcallık ve su emme özelliklerine etkisi. Beton Çimento ve Boya Semineri, DSİ-TAKK Dairesinin Kuruluşunun 40. Yılı Anısına 24-26 Haziran, Ankara.
- Uyan, M., Pekmezci B.V. ve Yıldırım H. 2003.** Akışkanlaştırıcı katkı ve kür koşullarının betonun geçirimsizlik özellikleri üzerindeki etkileri 10-12, İstanbul.
- Uysal M., Yılmaz K., İpek M. 2012.** The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 27: 263–270.
- Valipour M., Pargar F., Shekarchi M., Khani S. 2013.** Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study, *Construction and Building Materials*, 41: 879–888.
- Vu, D.D. 2002.** Strength Properties of Metakaolin-Blended Paste, Mortar and Concrete, Delft University Press, Netherlands.
- Wang, Y. 1995.** Microstructural Study of Hardened Cement Paste By Backscatter Scanning Electron Microscopy and Image Analysis. *Ph.D.Thesis*, Purdue University.
- Wenzhong, Z. and Peter J. 2003.** Permeation properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 33: 921-926.
- Wild, S., Khatib, J.M. and Jones, A. 1996.** Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete, *Cement and Concrete Research*, 26(10): 1537–1544.



**Yavuz, H. 2011.** Su Geçirimsiz Beton Tasarımı ve Örnek Uygulamalar, *Yüksek Lisans Tezi*, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

**Yıldırım H., Gülseren H., Uyan M., Kemerli K. 2003.** 5. Ulusal Beton Kongresi Yayın Bilgisi : 1-3 Ekim 2003 Yayın Türü : Kongre Sempozyum Bildiriler Kitabı Basım Tarihi : 01.10.2003. İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Yapı Malzemesi A.B.D, 34469, İstanbul.

**Young, J.F. 1998.** A Review of The Pore Structure of Cement Paste and Concrete and Its Influence On Permeability. S.P.108, Permeability of Concrete. ACI.



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ali NEMATZADEH  
Doğum Yeri ve Tarihi : Ardebil/İRAN  
Yabancı Dili : İngilizce-Farsça-Azerice-Türkçe-Almanca  
Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)  
Lise : Nokhbegan (Tarbiat) Lisesi  
Fizik-Matematik Alanı (İRAN)  
Ön Lisans : Bilimsel-Uygulamalı üniversitesi – Elektrik Güç  
Lisans : Bilimsel-Uygulamalı üniversitesi – İnşaat Müh  
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği  
Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Özel Şirket (APH.CO) 2010-2014  
İletişim (e-posta) : ali.nz@aol.com

### Yayınlar

**Mardani-Aghabaglou, A., Geven, E., Nematzadeh, A., 2018.** Effect of utilization of different type of mineral admixture on fresh and hardened properties of cementitious systems. *Sakarya University Journal of Science*, Doi10.16984/saufenbilder.461646, e-ISSN: 2147-835X.

**Mardani-Aghabaglou, A., Nematzadeh, A., Özen, S., Ramyar, K., Yilmaz, G., 2018.** Effect of Permeability Reducing Admixture on Some Fresh Properties of Cement Paste Containing High Range Water Reducing Admixture. European Conference on Science, Art & Culture, April 19-22, Antalya, Turkey.

**Mardani-Aghabaglou, A., Kapti, T., Özen, S., Altun, M.G., Geven, E., Nematzadeh, A., Ramyar, K., Öztürk, U.B., 2017.** Effect of Polycarboxylate Based Water Reducing Admixture Anionic Monomer Change on The Fresh State Properties of Cement Paste and Mortar Mixtures. Chemical Admixtures on Structures 5th International Symposium and Exhibition, 19-20 Ekim/October 2017, Ankara.