

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİRDEN FAZLA MİNERAL KATKI İÇEREN, KENDİLİĞİNDEN
YERLEŞEN HARCIN DAYANIM, DAYANIKLILIK VE VİSKOZİTE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ
Yük. Müh. Fethi İŞSEVER
(05115203)

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği
Programı: Yapı

Danışman: Prof. Dr. Zülfü Çınar ULUCAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 24 Nisan 2013

MAYIS 2013

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİRDEN FAZLA MİNERAL KATKI İÇEREN, KENDİLİĞİNDEN
YERLEŞEN HARCIN DAYANIM, DAYANIKLILIK VE VİSKOZİTE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ
Yük. Müh. Fethi İŞSEVER
(05115203)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Nisan 2013

Tezin Savunulduğu Tarih : 24 Mayıs 2013

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Zülfü Çınar ULUCAN (F.Ü)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Yusuf CALAYIR (F.Ü)
Prof. Dr. Ragıp İNCE (F.Ü)
Doç.Dr.Salih YAZICIOĞLU (Gazi Ü.)
Y.Doç. Dr.Kazım TÜRK (Harran Ü.)



24 MAYIS 2013

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım sırasında, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşarak bana rehber olup yol gösteren Danışman Hocam; Sn. Prof. Dr. Zülfü Çınar ULUCAN'a, Hocalarım; Sn. Prof. Dr. Yusuf CALAYIR'a, Sn. Prof. Dr. Ahmet BAYLAR'a, Sn. Prof. Dr. Ragıp İNCE'ye, tez projesi ile ilgili yardımları için Sn. Yrd. Doç. Dr. Kazım TÜRK'e, Sn. Yrd. Doç. Dr. Mehmet KARATAŞ'a, İnş. Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarı teknisyeni Sn. Seyfettin ÇİÇEK'e, Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü Laboratuvarında deney yapma imkânı sağlayan Sn. Prof. Dr. Halis ÇELİK'e, kimyasal katkıların temini için Sn. Dr. İnş. Müh. Ali Raif SAĞLAM'a, ve SİKA Yapı Kimyasalları A.Ş. personeline, Orhaneli Termik Santrali Uçucu Külü teminindeki yardımları için Ares Çimento İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş. personeline, Çimento temininde ve laboratuvarlarında basınç deneylerinin yapılmasındaki yardımlardan dolayı Elazığ Altınova Çimento Sanayi Ticaret A.Ş. personeline, Kireç Taşı Tozu temini için Elkisan Kireç San. Ltd. Şti.'ye, aşınma deneylerinin yapılabilmesi için beton numunelerinin kesilmesindeki yardımları nedeniyle Gürsel Mermercilik A.Ş. personeline, F.Ü. İnş. Müh. Bölüm Sekreteri Sn. Mehmet CİPLİ'ye, DSİ 9. Bölge Müdür Yardımcısı Sn. Latif AKSOY'a, DSİ 9. Bölge Müdürlüğü Barajlar ve HES Şube Müdürü Sn. Ferda EYÜBOĞLU'na, Elektrik Elektronik Müh. Sn. Güngör YILDIRIM'a, doktora eğitimimin her aşamasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen Aileme, deneyleri yaparken yardımlarını eksik etmeyen Eşime, teşekkürlerimi sunarım.

Fethi İŞSEVER

ELAZIĞ-2013

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET.....	V
SUMMARY.....	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	IX
TABLolar LİSTESİ.....	XIII
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XIV
KISALTMALAR LİSTESİ.....	XV
1. GİRİŞ.....	1
2. BETON.....	5
2.1. Tanım.....	5
2.2. Betonun Tarihçesi.....	6
2.3. Betonun Bileşenleri.....	8
2.3.1. Çimento.....	8
2.3.2. Agrega.....	9
2.3.3. Karışım Suyu.....	11
2.3.4. Katkı Maddeleri.....	14
2.3.4.1. Mineral Katkıları.....	14
2.3.4.1.1. Uçucu Kül.....	16
2.3.4.1.2. Kireçtaşı Tozu.....	18
2.3.4.2. Kimyasal Katkıları.....	20
2.3.4.2.1. Akışkanlaştırıcı Katkıları.....	22
2.4. Beton Sınıfları.....	25
2.4.1. Kıvam Sınıfları.....	25
2.4.2. Basınç Dayanım Sınıfları.....	25
2.5. Özel Betonlar.....	26
2.6. Kendiliğinden Yerleşen Beton-Harç, (KYB-KYH).....	27
2.6.1. KYB’de Aranan Malzeme Miktarları.....	29
2.6.2. Taze KYH Özellikleri.....	34
2.6.2.1. İşlenebilirlik ve Kıvam.....	34
2.6.2.2. Hareketlilik ve Pompalanabilirlik.....	34
2.6.2.3. Kararlılık, Ayırışma, Terleme.....	38
2.6.2.4. Yerleşebilirlik.....	40
2.6.2.5. Perdahlanabilirlik.....	41
2.6.2.6. Akış Modelleri.....	43
2.6.3. Sertleşmiş KYB-KYH Özellikleri.....	53
2.6.3.1. Dayanım Özellikleri.....	53
2.6.3.1.1. Basınç Dayanımı.....	54
2.6.3.1.2. Eğilmede Çekme Dayanımı.....	55
2.6.3.1.3. Rölatif Ultrases Geçiş Hızı.....	57
2.6.3.1.4. Elastisite Modülü.....	58
2.6.3.2. Dayanıklılık Özellikleri.....	63
2.6.3.2.1. Su Emme Kapasitesi.....	65
2.6.3.2.2. Aderans.....	68
2.6.3.2.3. Aşınma Direnci.....	73

	Sayfa No
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	75
3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler.....	75
3.1.1. Çimento.....	75
3.1.2. Agregası (Kum).....	76
3.1.3. Karışım Suyu.....	76
3.1.4. Katkı Maddeleri.....	76
3.1.4.1. Mineral Katkıları.....	76
3.1.4.1.1. Uçucu Kül.....	76
3.1.4.1.2. Kireçtaşı Tozu.....	78
3.1.4.2. Kimyasal (Akışkanlaştırıcı) Katkıları.....	78
3.2. Yapılan Deneyler Hakkında Genel Bilgiler.....	78
3.2.1. Taze Harç Deneyleri.....	80
3.2.1.1. Yayılma Deneyleri.....	81
3.2.1.2. V-Hunisi Deneyleri.....	84
3.2.1.3. Viskozite Deneyleri.....	86
3.2.1.4. Taze Birim Hacim Ağırlık Deneyleri.....	89
3.2.1.5. Komposite Deneyleri.....	88
3.2.2. Sertleşmiş Harç Deneyleri.....	89
3.2.2.1. Dayanım Deneyleri.....	89
3.2.2.1.1. Basınç Deneyleri.....	89
3.2.2.1.2. Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyleri.....	92
3.2.2.1.3. Rölatif Ultrases Geçiş Hızı Deneyleri.....	92
3.2.2.1.4. Dinamik Elastisite Modülü Değerlerinin Tespiti.....	94
3.2.2.2. Dayanıklılık Deneyleri.....	94
3.2.2.2.1. Su Emme Deneyleri.....	95
3.2.2.2.2. Aderans Deneyleri.....	98
3.2.2.2.3. Aşınma Deneyleri.....	102
4. BULGULAR.....	105
4.1. Taze Harç Deney Bulguları.....	105
4.1.1. Çökme-Yayılma Deneyi.....	106
4.1.2. V-Hunisi Deneyi.....	108
4.1.3. Taze Harç Birim Hacim Ağırlığı.....	108
4.1.4. Komposite.....	109
4.1.5. TBHA, Komposite ve DEM Özellikleri Arasındaki İlişkilerin Analizi.....	110
4.1.6. Viskozite Özellikleri.....	112
4.2. Sertleşmiş Harç Deney Bulguları.....	120
4.2.1. Dayanım Deney Bulguları.....	120
4.2.1.1. Basınç Dayanımı.....	121
4.2.1.2. Eğilmede Çekme Dayanımı.....	129
4.2.1.3. Rölatif Ultrases Geçiş Hızı.....	139
4.2.1.4. Dinamik Elastisite Modülü.....	141
4.2.2. Dayanıklılık Deneyler Bulguları.....	143
4.2.2.1. Su Emme Özellikleri ve Özgül Ağırlık.....	143
4.2.2.2. Aderans Deneyi.....	156
4.2.2.3. Aşınma Deneyi.....	159
4.3. Harçta Dayanım-Dayanıklılık Korelasyonları ve Regresyon Analizleri.....	161
4.3.1. Basınç Dayanımı - Eğilmede Çekme Dayanımı.....	161

	<u>Sayfa No</u>
4.3.2. Basınç Dayanımı - Rölatif Ultrases Geçiş Hızı.....	167
4.3.3. Basınç Dayanımı - Kapiler Su Emme Katsayısı.....	169
4.3.4. Basınç Dayanımı - Aderans Gerilmesi.....	171
4.3.5. Basınç Dayanımı - Böhme Aşınması.....	173
4.3.6. Basınç Dayanımı - Dinamik Elastisite Modülü.....	175
4.3.7. Eğilmede Çekme Dayanımı - Rölatif Ultrases Geçiş Hızı.....	177
4.3.8. Eğilmede Çekme Dayanımı - Kapiler Su Emme Katsayısı.....	179
4.3.9. Eğilmede Çekme Dayanımı - Aderans Gerilmesi.....	181
4.3.10. Eğilmede Çekme Dayanımı - Dinamik Elastisite Modülü.....	183
4.3.11. Rölatif Ultrases Geçiş Hızı - Kapiler Su Emme Katsayısı.....	185
4.3.12. Rölatif Ultrases Geçiş Hızı - Aderans Gerilmesi.....	187
4.3.13. Rölatif Ultrases Geçiş Hızı - Böhme Aşınması.....	189
4.3.14. Rölatif Ultrases Geçiş Hızı - Dinamik Elastisite Modülü.....	191
4.3.15. Kapiler Su Emme Katsayısı - Dinamik Elastisite Modülü.....	193
4.3.16. Kapiler Su Emme Katsayısı - Aderans Gerilmesi.....	195
4.3.17. Aderans Gerilmesi - Böhme Aşınması.....	197
4.3.18. Aderans Gerilmesi - Dinamik Elastisite Modülü.....	199
4.3.19. Dinamik Elastisite Modülü – Böhme Aşınması.....	201
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	203
6. KAYNAKLAR.....	208
ÖZGEÇMİŞ.....	217

ÖZET

Doktora Tezi

BİRDEN FAZLA MİNERAL KATKI İÇEREN, KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARCIN DAYANIM, DAYANIKLILIK VE VİSKOZİTE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Fethi İŞSEVER

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

2013, Sayfa: 217

Beton yüzyılı aşkın süredir tüm dünyada yapı malzemesi olarak kullanılmakta ve her geçen gün kullanım alanları artmakta ve yaygınlaşmaktadır. Bununla birlikte betondan kullanım alanı veya kullanılan yapıya göre farklı performanslar beklenmektedir. Bu beklentilerin bir kısmı ancak özel betonlarla karşılanabilmektedir. Günümüzde en çok kullanılan özel beton çeşitlerinden biri kendiliğinden yerleşen betondur. Kendiliğinden yerleşen betonun davranış özelliklerini bilmek için öncelikle kendiliğinden yerleşen harcın (KYH) yapısının iyi analiz edilmesi gerekir. Bu nedenle de KYH'nın fiziksel ve kimyasal yapısının, onu oluşturan yapı malzemelerinin ve bu malzemelerin birbirleriyle uyumlu çalışmalarının bilinmesi gerekir.

Bu tezde, süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı ilavesiyle elde edilen harcın, EFNARC standartlarına uygun reolojik, TS-EN standartlarına uygun dayanım ve dayanıklılık özellikleri araştırılmıştır. Deneylerde CEM I 42.5 çimento, uçucu kül ve kireçtaşı tozunun bağlayıcı olarak kullanıldığı karışımlar elde edilmiştir. Bu bağlayıcılar karışımlarda ikili ve üçlü şekilde kullanılmıştır. Bağlayıcı malzemeler olarak ağırlıkça değişen oranlarda %20-%100 arası çimento, %10-%40 arası uçucu kül ve %30-%60 arası kireçtaşı tozu kullanılmıştır.

Sertleşmiş harcın dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin iyi olabilmesinin temel koşulu taze harç özelliklerinin iyi olmasıdır. Bunu sağlayabilmek için çökme-yayılma, V-hunisi akma süresi, viskozite ve taze birim hacim ağırlığı özellikleri incelenmiştir. Bu özelliklerin geçerli olan standartlara uygun olmasına dikkat edilmiştir.

Dayanım özelliklerinden basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, rölatif ultrases geçiş hızı ve dinamik elastisite modülü, dayanıklılık özelliklerinden ise toplam su emme kapasitesi, kapiler su emme hızı, özgül ağırlık ölçümleri, görünür boşluk oranı tespiti, ağırlık kaybı ve ortalama boy kısalmasına göre Böhme aşınma miktarı ile beton-donatı aderansı özellikleri incelenmiş daha sonra tüm bu özellikler arasındaki korelasyonlar analiz edilmiştir. Sertleşmiş harç incelenirken kullanılan bağlayıcı malzeme türü ve karışım

oranları aynı seçilmiştir. Buradaki amaç incelenen bütün harç özellikleri arasındaki korelasyonları başka değişkenlerin etkilemesine engel olmaktır.

Basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı için 4x4x16 cm dikdörtgen prizma numuneler, su emme, yoğunluk ve rölatif ultrases geçiş hızı deneyleri için 10x10x10 cm küp numuneler, aderans deneyleri için 15x15x15 cm küp numuneler, Böhme aşınma deneyleri için 7.1x7.1x7.1 cm küp numuneler kullanılmıştır. Numuneler her bir deney için 28 gün boyunca 23 ± 2 °C standart kür ortamında bekletilmiştir. Basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı için 28 güne ek olarak 7 ve 90 gün kür uygulanan numuneler de kullanılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda uçucu külün kireçtaşı tozuna göre harcın bütün özelliklerinde daha etkili olduğu görülmüştür. Bununla birlikte belirli dozajlarda kullanılan uçucu kül+kireçtaşı tozu bileşiminin mineral bağlayıcıların ayrı ayrı kullanımına göre daha iyi davranış gösterdiği belirlenmiştir. Çalışmalardan çıkarılan sonuçlara göre maliyetleri de düşürmek amacıyla çimento için en az %50, uçucu kül için yaklaşık %20, Kireçtaşı tozu için yaklaşık %30 karışım oranlarının uygun bağlayıcı dozajları olduğu anlaşılmıştır. Bu dozajlarda üçlü bağlayıcı kullanılmasının, hem taze ve hem de sertleşmiş harç özelliklerinde oldukça iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Belirtilen dozajların üstünde mineral katkı kullanımı ve %50'nin altında çimento kullanımı özellikle sertleşmiş harç deneylerinde iyi sonuç vermemiştir.

SUMMARY

PhD Thesis

ANALYSIS OF STRENGTH, DURABILITY, AND VISCOSITY PROPERTIES OF SELF-COMPACTING MORTARS WHICH HAVE MULTI-MINERAL ADDITIVES

Fethi İSSEVER

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

2013, Page: 217

More than a century, concrete has been used as a construction material all over the world, and its application areas have increased and become widespread each day. Moreover, concrete is expected to have distinct performances according to application areas or the construction used. These expectations could be met only by special concretes. Today, one of the most special concrete types used is self-compacting concrete (SCC). In order to know well of SCC, at first the structure of SCM has to be examined very well. It is important to be known that the physical and chemical structure of SCM and that building materials comply with each other.

In this thesis, strength and durability properties of the mortar obtained by chemical additive, superplasticers, have been increased according to appropriate rheological, TS-EN and EFNARC standards. The mixtures in which PC 42.5 cement, fly ash, and limestone powder have been used as binders have been attained. These binders are used in the mixtures as binary and ternary binders. The weight rate of cement is between 20%-100%, the weight rate of fly ash is 10%-40% and the weight rate of limestone powder is 30%-60%.

For the good strength and durability features, main requirement is that fresh mortar has qualified properties. For this reason, spread, flow time of V-funnel, viscosity, and unit volume weight of fresh mortar have been analysed. Besides it has been considered that these features are according to the current standards.

Of strength features; compressive strength, flexural-tensile strength, relative ultrasonic velocity, dynamic modulus of elasticity, and of durability features; total water absorption capacity, capillary water absorption rate, measurement of the specific gravity, determination of the ratio of visible vacancy rate, Bohme abrasion (weight loss, length reduction), adhesion between mortar and reinforcement have been researched. Thereafter the correlations all of these feature have been analysed. Thus, with the non-destructive experiments methods, the control of the systems of static and reinforced concrete will be

able to be done. Besides, by the correlations put forward, the learning of such construction features as durability, which these take a long time, is going to be possible with 90 % accuracy for less time. While the hardened mortar has been examined, the rate and the type of binder materials have been chosen similarly. The aim of this study is to keep the correlation among all features of mortar from the effects of other parameters.

The test samples used in this study; 4x4x16 cm³, which is for compressive strength and flexural tensile strength; 10x10x10 cm cube, which is for relative ultrasonic velocity; 15x15x15 cm cube, which is for adhesion; 7.1x7.1x7.1 cm cube, which is for experiments of Bohme abrasion. During 28 days and at 23±2 °C, the tests samples have been held in the water cure. In addition, other tests samples which have been held in water cure additional 7 and 90 days have been used for compressive strength and flexural tensile strength.

In the consequence of experiments, the fly ash has been more effective on the all features of the mortar than limestone powder. On the other hand, the specific rates of the combination fly ash and limestone powder have more succeeded than the use of these minerals separately. According to results, for the purpose of bringing down the costs, the use of at least 50% for cement, about 20% for fly ash, about 30% for limestone powder, have been proved to be suitable for binder rates. As a result, in the same time, the use of ternary binders above has given more successive outputs on both fresh and hardened mortar features. The use of more minerals than being specified the rates above and the use of cement 50% have not given good results, especially in the hardened mortar experiments.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. : Tarihte beton yapılara örnekler.....	7
Şekil 2.2. : Beton bileşenlerinin EKG ve viskozite üzerindeki etkileri.....	16
Şekil 2.3. : Süperakışkanlaştırıcıların etki mekanizması.....	24
Şekil 2.4. : Boru içinde taze beton akışı.....	35
Şekil 2.5. : Basınç altında boru içinde hareket eden newton sıvısında hız dağılımı ve bir süspansiyon lamine akımın hız dağılımı.....	37
Şekil 2.6. : Bağlayıcı (Ç, UK, KT) malzeme miktarı ve boşluk içeriğinin pompalanabilirlik üzerindeki etkisi.....	37
Şekil 2.7. : Terleme ile beton suyunun ayrışması ve agregada altında birikmesi.....	40
Şekil 2.8. : A alanı üzerinde etkiyen F kayma kuvveti ve kayma şekil değiştirmesi.....	43
Şekil 2.9. : İdeal katılarda G kayma modülü.....	44
Şekil 2.10. : Newton sıvısı.....	44
Şekil 2.11. : Newton sıvısının viskoz akışı	45
Şekil 2.12. : Bingham sıvısı.....	47
Şekil 2.13. : Normal ve kendiliğinden yerleşen, taze harç ve betonlar için kabul edilen Bingham ve Newton modellerinin birlikte gösterimi.....	49
Şekil 2.14. : Newton olmayan değişik sıvılar için kayma gerilmesi ve kayma oranı.....	49
Şekil 2.15. : Tikotropik sıvının akış eğrileri.....	51
Şekil 2.16. : Boru içinden akan ideal Newton ve Bingham sıvılarındaki gerilme dağılımının düzgün akım olduğu kabul edilmiştir.....	51
Şekil 2.17. : Betonun tipik σ - ϵ eğrisi	60
Şekil 2.18. : Betonun ve betonu oluşturan malzemelerin σ - ϵ eğrileri	61
Şekil 2.19. : Betonun E-modülünü etkileyen faktörlerin sınıflandırılması.....	62
Şekil 2.20. : Merkezi çekme etkisindeki bir donatı çubuğunda çekme ve aderans gerilmelerinin şematik dağılımı.....	71
Şekil 3.1. : Harç karışım oranları için Faktoriyel Tasarım Metodu (FTM).....	79
Şekil 3.2. : Taze harç mini çökme (yayılma) konisi boyutları.....	82
Şekil 3.3. : 50C20UK30KT karışimli harcın efnarc sınırlarına göre mini çökme ölçümü.....	84
Şekil 3.4. : Mini V-hunisi deney aleti boyutları.....	85
Şekil 3.5. : Harcın EFNARC 2002 standartlarına uygun v-hunisi ölçümü.....	86
Şekil 3.6. : BROOKFIELD DV-E viskozimetre deney aleti.....	87
Şekil 3.7. : Harcın viskozite özelliklerinin ölçümü.....	88
Şekil 3.8. : Basınç ve çekme dayanımı deneyleri için harcın kalıblara dökümü.....	90
Şekil 3.9. : Basınç ve çekme dayanımı deneyleri için hazırlanan numunelerin uygun kür şartlarında saklanması.....	91
Şekil 3.10. : Tek eksenli basınç dayanımı deneyi.....	91
Şekil 3.11. : Eğilmede çekme dayanımı deneyi.....	92
Şekil 3.12. : Rölatif ultrases geçiş hızı deneyi.....	93
Şekil 3.13. : Kapiler su emme deney düzeneği.....	97
Şekil 3.14. : Kapiler su emme deney uygulaması.....	97
Şekil 3.15. : Sertleşmiş harcın özgül ağırlığı deneyi.....	98
Şekil 3.16. : Aderans deney düzeneği.....	99
Şekil 3.17. : Aderans deneyi için donatılı harç dökümü.....	99
Şekil 3.18. : Aderans deneyi numunelerinin uygun kür şartlarında saklanması.....	100
Şekil 3.19. : Aderans deney düzeneğinde çekip-çıkarma (pull-out) deneyi uygulaması.....	101

Şekil 3.20. : Harcın aderans deneyi sonunda deforme olması.....	101
Şekil 3.21. : Böhme aşınma deneyinde aşındırma uygulanacak yüzeyler.....	103
Şekil 3.22. : Böhme aşınma deneyi uygulaması.....	103
Şekil 4.1. : Mini çökme-yayılma değerleri.....	107
Şekil 4.2. : V-Hunisinden akma süreleri.....	107
Şekil 4.3. : Taze birim hacim ağırlığı değerleri.....	109
Şekil 4.4. : Harçta kompasite değerleri.....	110
Şekil 4.5. : Taze birim hacim ağırlığı - dinamik elastisite modülü değerleri.....	111
Şekil 4.6. : Taze birim hacim ağırlığı - dinamik elastisite modülü regresyon analizi...	111
Şekil 4.7. : Kompasite-dinamik elastisite modülü değerleri.....	113
Şekil 4.8. : Kompasite-dinamik elastisite modülü regresyon analizi.....	113
Şekil 4.9. : Taze harç UK1 grubu viskozite değerleri.....	117
Şekil 4.10. : Taze harç KT1 grubu viskozite değerleri.....	117
Şekil 4.11. : Taze harç 10UK grubu viskozite değerleri.....	118
Şekil 4.12. : Taze harç 20UK grubu viskozite değerleri.....	118
Şekil 4.13. : Taze harç 30UK ve 40UK grupları viskozite değerleri.....	119
Şekil 4.14. : Basınç dayanımı değerlerine mineral katkı miktarı ve yaş etkisi.....	122
Şekil 4.15. : Basınç dayanımı değerlerinde yüzdelik değişim oranları.....	123
Şekil 4.16. : 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının ilerleme oranları.....	125
Şekil 4.17. : Basınç dayanımı değerleri UK1 grubu logaritmik grafiği.....	127
Şekil 4.18. : Basınç dayanımı değerleri KT1 grubu logaritmik grafiği.....	127
Şekil 4.19. : Basınç dayanımı değerleri 10UK grubu logaritmik grafiği.....	128
Şekil 4.20. : Basınç dayanımı değerleri 20UK grubu logaritmik grafiği.....	128
Şekil 4.21. : Basınç dayanımı değerleri 30UK ve 40UK grupları logaritmik grafiği.....	129
Şekil 4.22. : Eğilmede çekme dayanımı değerlerine mineral katkı miktarı ve yaş etkisi	131
Şekil 4.23. : Eğilmede çekme dayanımı değerlerinde yüzdelik değişim oranları.....	132
Şekil 4.24. : 7, 28 ve 90 Günlük eğilmede çekme dayanımı ilerlemesi oranları	136
Şekil 4.25. : Eğilmede çekme dayanımı değerleri UK1 grubu logaritmik grafiği.....	136
Şekil 4.26. : Eğilmede çekme dayanımı değerleri KT1 grubu logaritmik grafiği.....	137
Şekil 4.27. : Eğilmede çekme dayanımı değerleri 10UK grubu logaritmik grafiği.....	137
Şekil 4.28. : Eğilmede çekme dayanımı değerleri 20UK grubu logaritmik grafiği.....	138
Şekil 4.29. : Eğilmede çekme dayanımı değerleri 30UK ve 40UK grupları logaritmik grafiği.....	138
Şekil 4.30. : 7., 28. ve 90. Günlerde, eğilmede çekme dayanımlarının basınç dayanımlarına oranları	139
Şekil 4.31. : Rölatif ultrases geçiş hızı değerleri.....	140
Şekil 4.32. : Rölatif ultrases geçiş hızı değerlerinde yüzdelik değişim oranları.....	141
Şekil 4.33. : Dinamik elastisite modülü değerleri.....	142
Şekil 4.34. : Dinamik elastisite modülü değerlerinde yüzdelik değişim.....	142
Şekil 4.35. : Ağırlıkça toplam su emme oranları.....	145
Şekil 4.36. : Kapiler su emme katsayısı değerleri.....	147
Şekil 4.37. : Kapiler su emme katsayısı değerlerinde yüzdelik değişim.....	147
Şekil 4.38. : UK1 grubunda kapiler su emme oranlarının kümülatif artışı.....	149
Şekil 4.39. : KT1 grubunda kapiler su emme oranlarının kümülatif artışı.....	149
Şekil 4.40. : 10UK grubunda kapiler su emme oranlarının kümülatif artışı.....	150
Şekil 4.41. : 20UK grubunda kapiler su emme oranlarının kümülatif artışı.....	150
Şekil 4.42. : 30UK ve 40UK gruplarında kapiler su emme oranlarının kümülatif artışı..	151

Şekil 4.43. : Harçların özgül ağırlık değerlerine mineral katkı etkisi.....	153
Şekil 4.44. : Harçların özgül ağırlık değerlerinde yüzdelik değişim	154
Şekil 4.45. : Harçta görünür boşluk oranları.....	155
Şekil 4.46. : Harçta görünür boşluk oranlarında yüzdelik değişim.....	156
Şekil 4.47. : Harç donatı aderansı dayanım değerleri.....	158
Şekil 4.48. : Harç donatı aderansı değerlerinde yüzdelik değişim.....	158
Şekil 4.49. : Böhme aşınma deneyinde ortalama boy kısalması oranları.....	160
Şekil 4.50. : Böhme aşınma deneyinde ağırlık kaybı oranları.....	160
Şekil 4.51. : Basınç dayanımı - eğilme çekme dayanımı korelasyonu (7 günlük).....	162
Şekil 4.52. : Basınç dayanımı - eğilme çekme dayanımı regresyon analizi (7 günlük)...	162
Şekil 4.53. : Basınç dayanımı - eğilme çekme dayanımı korelasyonu (28 günlük).....	164
Şekil 4.54. : Basınç dayanımı - eğilme çekme dayanımı regresyon analizi (28 günlük).	164
Şekil 4.55. : Basınç dayanımı - eğilme çekme dayanımı korelasyonu (90 günlük).....	166
Şekil 4.56. : Basınç dayanımı - eğilme çekme dayanımı regresyon analizi (90 günlük).	166
Şekil 4.57. : Basınç dayanımı - rölatif ultrases geçiş hızı değerleri korelasyonu.....	168
Şekil 4.58. : Basınç dayanımı - rölatif ultrases geçiş hızı regresyon analizi	168
Şekil 4.59. : Basınç dayanımı - kapiler su emme katsayısı değerleri korelasyonu.....	170
Şekil 4.60. : Basınç dayanımı - kapiler su emme katsayısı regresyon analizi	170
Şekil 4.61. : Basınç dayanımı - aderans gerilmesi değerleri korelasyonu.....	172
Şekil 4.62. : Basınç dayanımı - aderans gerilmesi regresyon analizi	172
Şekil 4.63. : Basınç dayanımı - Böhme aşınması ağırlık kaybı oranları korelasyonu....	174
Şekil 4.64. : Basınç dayanımı - Böhme aşınması ağırlık kaybı oranları regresyon analizi.....	174
Şekil 4.65. : Basınç dayanımı - dinamik elastisite modülü değerleri korelasyonu.....	176
Şekil 4.66. : Basınç dayanımı - dinamik elastisite modülü regresyon analizi	176
Şekil 4.67. : Eğilme çekme dayanımı - rölatif ultrases geçiş hızı değerleri korelasyonu	178
Şekil 4.68. : Eğilmede çekme dayanımı - rölatif ultrases geçiş hızı regresyon analizi....	178
Şekil 4.69. : Eğilmede çekme dayanımı - kapiler su emme katsayısı değerleri korelasyonu.....	180
Şekil 4.70. : Eğilmede çekme dayanımı - kapiler su emme katsayısı regresyon analizi..	180
Şekil 4.71. : Eğilmede çekme dayanımı - aderans gerilmesi değerleri korelasyonu.....	182
Şekil 4.72. : Eğilmede çekme dayanımı - aderans gerilmesi regresyon analizi.....	182
Şekil 4.73. : Eğilmede çekme dayanımı - dinamik elastisite modülü değerleri korelasyonu.....	184
Şekil 4.74. : Eğilmede çekme dayanımı - dinamik elastisite modülü regresyon analizi..	184
Şekil 4.75. : Rölatif ultrases geçiş hızı - kapiler su emme katsayısı değerleri korelasyonu.....	186
Şekil 4.76. : Rölatif ultrases geçiş hızı - kapiler su emme katsayısı regresyon analizi....	186
Şekil 4.77. : Rölatif ultrases geçiş hızı - aderans gerilmesi değerleri korelasyonu.....	188
Şekil 4.78. : Rölatif ultrases geçiş hızı - aderans gerilmesi regresyon analizi	188
Şekil 4.79. : Rölatif ultrases geçiş hızı - Böhme aşınması ağırlık kaybı oranları korelasyonu.....	190
Şekil 4.80. : Rölatif ultrases geçiş hızı - Böhme aşınması ağırlık kaybı oranları regresyon analizi.....	190
Şekil 4.81. : Rölatif ultrases geçiş hızı - dinamik elastisite modülü değerleri korelasyonu.....	192
Şekil 4.82. : Rölatif ultrases geçiş hızı - dinamik elastisite modülü regresyon analizi....	192

Şekil 4.83. : Kapiler su emme katsayısı - dinamik elastisite modülü değerleri korelasyonu.....	194
Şekil 4.84. : Kapiler su emme katsayısı - dinamik elastisite modülü regresyon analizi..	194
Şekil 4.85. : Kapiler su emme katsayısı - aderans gerilmesi değerleri korelasyonu.....	196
Şekil 4.86. : Kapiler su emme katsayısı - aderans gerilmesi regresyon analizi.....	196
Şekil 4.87. : Aderans gerilmesi - Böhme aşınması ağırlık kaybı oranları korelasyonu..	198
Şekil 4.88. : Aderans gerilmesi - Böhme aşınması ağırlık kaybı oranları regresyon analizi.....	198
Şekil 4.89. : Aderans gerilmesi - dinamik elastisite modülü değerleri korelasyonu.....	200
Şekil 4.90. : Aderans gerilmesi -dinamik elastisite modülü değerleri regresyon analizi.	200
Şekil 4.91. : Dinamik elastisite modülü - Böhme aşınması ağırlık kaybı oranları korelasyonu.....	202
Şekil 4.92. : Dinamik elastisite modülü - Böhme aşınması ağırlık kaybı oranları regresyon analizi.....	202

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. : Beton karışım suyu içinde bulunabilecek yabancı maddelerin sınır değerleri.....	13
Tablo 2.2. : Optimum su miktarının az/fazla olması durumunda betonda meydana gelebilecek olumsuzluklar.....	13
Tablo 2.3. : Uçucu küllerin fiziksel özellikleri.....	18
Tablo 2.4. : Betonda basınç dayanımı sınıfları.....	25
Tablo 2.5. : EFNARC (2005) standartlarına göre tavsiye edilen KYB deneyleri sınır değerleri.....	30
Tablo 2.6. : KYB’de sınır değerlerin altındaki değerler için sorunun belirlenmesi ve etki takip tablosu.....	30
Tablo 2.7. : Sınır değerlerin üstündeki değerler için sorunun belirlenmesi ve etki takip tablosu.....	31
Tablo 2.8. : Problemlerin çözümüne yönelik yapılması gerekenler.....	31
Tablo 2.9. : Ultrasonik test yöntemiyle beton kalitesinin değerlendirilmesi.....	57
Tablo 3.1. : CEM I 42.5 N çimentonun özellikleri	75
Tablo 3.2. : Orhaneli UK’ne ait kimyasal bileşenlerin özellikleri.....	77
Tablo 3.3. : Orhaneli UK’ne ait kimyasal bileşenlerin standartlara uygunluğu.....	77
Tablo 3.4. : Orhaneli UK’ne ait fiziksel özellikler.....	77
Tablo 3.5. : Karayazı kireçtaşı tozunun özgül ağırlığı.....	78
Tablo 3.6. : Kendiliğinden yerleşen taze harç için EFNARC 2002’ye uygun, kullanışlı deney limit sınıfları.....	80
Tablo 3.7. : Harç karışım oranları.....	83
Tablo 4.1. : Taze harç deney değerleri	105
Tablo 4.2. : Viskozite deneyleri değer okumaları	115
Tablo 4.3. : Dayanım deneyleri toplu sonuçları	120
Tablo 4.4. : Dayanıklılık deneyleri toplu sonuçları	144

SEMBOLLER LİSTESİ

A	: Alan
T_v	: Taze betonun V-hunisinden akma süresi (s)
T_y	: Taze betonun yayılma miktarı (mm)
w/c, s/c	: Su/çimento oranı
w/b, s/b	: Su/bağlayıcı oranı
γ	: Kayma şekil değiştirme hızı
γ	: d γ/dt Açısal şekil değiştirme hızı (1/san)
τ	: Kayma gerilmesi
τ₀	: Başlangıç kayma gerilmesi
η, η₀	: Viskozite katsayısı
C₃A	: (CaO) ₄ AlO ₃ Trikalsiyum Alüminat
C₄AF	: (CaO) ₄ AlO ₃ Fe ₂ O ₃ Tetra Kalsiyum Alimino Ferrit
N	: Viskozite Ölçümünde Dönme Hızı
g	: Viskozite Ölçümünde Tork
CaO	: Kalsiyum Oksit
SiO₂	: Silisyum Oksit
Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
Fe₂O₃	: Demir Oksit
SO₃	: Sülfat
CaCO₃	: Kalsiyum Karbonat
MgCO₃	: Magnezyum Karbonat
mm	: Milimetre
cm	: Santimetre
dm	: Desimetre
m	: Metre
s	: Saniye
G	: Kayma modülü
V	: Hız
D	: Newton sıvısı için hız değişkeni
B	: Kıvam Değeri
C_v	: Newton Sıvısı İçin Parçacıkların Hacimsel Oranı Konsantrasyonu
kHz	: Frekans Değeri
C-S-H	: Puzolanik Kalsiyum, Silika, Hidrate Jel
Ca(OH)₂	: Kalsiyum Hidroksit
f_c	: Betonun/harcın basınç dayanımı
f_{ct}	: Betonun/harcın eğilmede çekme dayanımı
d_{max}	: En büyük agrega dane çapı
E_f	: Etkinlik faktörü
W	: Ağırlık
H	: Hacim
cP	: Viskozite ölçüm birimi centi poise (santipois)
q	: Kapiler Su Emme Katsayısı
R²	: Eğilim Eğrisine Ait Belirlilik Katsayısı
R	: Korelasyon Katsayısı
E_d	: Dinamik Elastisite Modülü

KISALTMALAR LİSTESİ

ACI	: Amerika Beton Standartları Enstitüsü
EFNARC	: Avrupa Yapı Kimyasalları ve Beton Sistemleri Uzmanları Federasyonu
C, CEM	: Çimento
M.Ö.	: Milattan Önce
St.	: Saint (Aziz)
KYB, SCC	: Kendiliğinden Yerleşen Beton
KYH, SCM	: Kendiliğinden Yerleşen Harç
H	: Harç
UK	: Uçucu Kül
KT	: Kireçtaşı Tozu
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu
SD	: Silis Dumanı
SA	: Süper Akışkanlaştırıcı
UK	: Uçucu Kül
KT	: Kireçtaşı Tozu
EKG	: Eşik Kayma Gerilmesi
TBHA	: Taze Birim Hacim Ağırlığı
DEM	: Dinamik Elastisite Modülü
UGH	: Ultrases Geçiş Hızı
KSEK	: Kapiler Su Emme Katsayısı
ASTM	: American Society for Testing and Materials
U.S.S.	: United States Navy Ships (ABD Deniz Kuvvetleri Komutanlığı Gemileri)
TS EN	: Avrupa Normlarına Uygun Türk Standartları
SCC	: Self Compacting/Consolidating Concrete
SLC	: Self Levelling Concrete
S/Ç, W/C	: Su/Çimento Oranı
KOA	: Kuru Özgöl Ağırlık
YKSDOA	: Yüzey Kuru Suya Doygun Özgöl ağırlık
GOA	: Görünür Özgöl Ağırlık
GBÖ	: Görünür Boşluk Oranı
V-E3	: Viscocrete E3 süperakışkanlaştırıcı
DIN	: Deutsches Institut für Normung
DEF	: Gecikmiş Etanjit Oluşumu
FTM	: Faktoriyel Tasarım Metodu
YKSD	: Yüzey Kuru Suya Doygun
İnc. Mod.	: İncelik Modülü
Vis. Ok.	: Viskozite Okumaları
Dev/Dak.	: Devir/Dakika
RILEM	: Reunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions

1. GİRİŞ

Beton, dünyanın en eski yapı malzemelerindendir. Günümüzde yapı teknolojisinin vazgeçilmez parçası olmaya devam eden betonun tarihi uygarlık tarihi kadar eskidir. Betonun, en ilkel ve kaba şekliyle 5000 yıl kadar önce, Mısır Piramitlerinin yapımı sırasında kullanıldığı bilinmektedir.

Beton, özellikle son yüzyıl boyunca inşaat mühendisliği açısından en önemli yapı malzemesi olmuştur. Beton en basit şekilde; önceden şekil verilebilen bir yapay taş olarak tanımlanabilir. Doğal taşların birbirleriyle birleştirilerek yapı elemanlarını oluşturmalarına karşılık beton sürekli bir biçimde, birleştirme işlemine ihtiyaç duyulmadan üretilir ve yapı elemanlarını oluşturur. Beton, daha detaylı olarak; agregada adı verilen kum, çakıl, mıcır gibi taneli mineral malzemenin onları birbirine yapıştıran çimento ve su ile karıştırılması sonucu meydana gelir [1]. Buna göre; agregada ve çimento hamurundan meydana gelen beton, kompozit bir malzemedir.

Kullanım alanı veya kullanılan yapıya göre betondan farklı performanslar beklenir. Bu beklentiler de ancak özel betonlarla karşılanabilir. Özel betonlar, farklı ihtiyaçlardan dolayı farklı yöntemlerle üretilirler. Örneğin yüksek dayanımlı çimentolar kullanılarak, agregada çeşidi, miktarı ve cinsi değiştirilerek, uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, kireçtaşı tozu gibi mineral katkıları kullanılarak yüksek dayanım ve dayanıklılığa sahip betonlar üretilir. Ayrıca günümüzde özel beton çeşitlerini ihtiyaca göre hazırlamak, teknolojinin de desteğiyle daha kolay ve daha hızlıdır.

Özel beton çeşitlerinden olup, düşük su/çimento oranına bağlı olarak yüksek dayanıklılığa sahip beton şeklinde tanımlanan Yüksek Performanslı Betonların bir çeşidi de Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB)'lerdir. İlk olarak 1986 yılında Japonya'da Tokyo Üniversitesi'nde geliştirilen ve o zamandan beri birçok büyük projede başarıyla uygulanan KYB için şöyle bir tanım yapılmaktadır: “KYB, kendi ağırlığının etkisiyle akabilen, içinde sık ve yoğun donatı ağı bulunan bir kalıba dahi, hiçbir vibrasyona ihtiyaç duymadan yayılan ve kalıbı tamamen dolduran bu esnada homojen yapısı bozulmayan betondur”[2].

Bu çalışmanın amacı, süper akışkanlaştırıcı kullanılarak elde edilen, kendiliğinden yerleşen harçta birden fazla mineral katkı kullanılmasının harcın dayanım, dayanıklılık ve

viskozite-reolojik (taze harç) özelliklerine etkisinin ve bu özellikler arasındaki korelasyonların araştırılmasıdır.

Beton, agrega ve harçtan oluşan heterojen bir yapı malzemesi olduğundan betonun özelliklerinin en önemli bileşeni harçtır. Bu nedenle harcın hem taze hem de sertleşmiş haldeki özelliklerinin araştırılmasını kapsayan bir çalışma yürütülmüştür. Çünkü harcın yüksek mukavemet, dayanıklılık ve uygun işlenebilirlik gibi özelliklere sahip olması betonun da bu özelliklere sahip olmasına neden olmaktadır. Bu özelliklerin sağlanmasında mineral katkı maddelerinin gerekliliği ve belirli bir ince malzeme miktarının olması da önemlidir. Bu malzemelerin, KYH’da işlenebilirlik ve kıvam açısından da şart olduğu yapılan birçok çalışmada ortaya konulmuştur. Bunun yanında, bu mineral katkıların (mermer tozu, silis dumanı, uçucu kül, kireçtaşı tozu, yüksek fırın cürufu gibi) çimento yerine karışıma birden fazla katılmaları ve ideal oranlarının belirlenmesi KYH’ın taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerine etkisi bakımından büyük öneme sahiptir. Mineral katkıların temininde mümkün olduğunca yöresel kaynaklardan faydalanmak bu çalışmanın temel amaçlarından biridir. Elazığ yöresinde yeterince mevcut olan kireçtaşı tozunun KYH’da mineral katkı olarak kullanılması ile ilgili henüz yeterli ve detaylı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmayla birlikte kireçtaşı tozu ve uçucu kül KYH’da ikili ve/veya üçlü sistem halinde çimento ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Kendiliğinden yerleşen beton ve harçların en önemli dezavantajlarından biri maliyettir. Bu ise kimyasal katkıların ve yüksek miktarda çimento kullanımından kaynaklanmaktadır. KYH’nın maliyetini azaltmanın bir alternatifi de karışım esnasında veya öncesinde ayrı bir bileşen olarak betona ilave edilen çok ince öğütülmüş (<0.125 mm) kireçtaşı tozu (KT), doğal puzolan, yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı gibi mineral katkıların kullanımıdır [3]. Bu mineral katkılar, karışıma çimento yerine katıldığında, (özellikle endüstriyel yan ürün veya atık ise) KYH’nın maliyetini azaltacaktır. Sonuçta, yapılacak bu çalışmayla literatürdeki mevcut verilere katkı sağlayabilmek araştırmanın diğer bir amacını oluşturmaktadır. Düzensiz bir şekilde çevreye bırakılan uçucu kül ve kireç taşı tozunun çevre sağlığını tehdit etmesini önlemek ve KYH’da kullanılacak toz maddelere özellikle yerel bir malzeme olan KT eklenerek üçlü sistem amaçlanmıştır.

Harç, kendiliğinden yerleşen betonun işlenebilirlik özellikleri için esas teşkil eder ve bu işlenebilirlik özellikleri kendiliğinden yerleşen harçların özelliklerinin araştırılmasıyla değerlendirilebilir. Bundan dolayı, bu çalışmayı teşkil eden parametreler dikkate alınarak

laboratuvarında kendiliğinden yerleşen harç karışımlarına ait dayanım, dayanıklılık ve reolojik özellikler ile ilgili deneyler yapılmıştır.

Deneyler, F.Ü. Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarında, Elazığ Altınova Çimento A.Ş. beton laboratuvarında ve F.Ü. Teknoloji Fak. Metal Eğitimleri Laboratuvarlarında mevcut olan deney aparatları yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bütün harç karışımlarında CEM I 42.5 N portland çimentosu ve Elazığ İli Murat Nehrinden alınan Palu kumu kullanılmıştır. Çimento yerine karışıma katılan KT, Elazığ yöresi Karayazı bölgesinden temin edilmiş, uçucu kül ise Bursa-Orhaneli Termik Santralinden temin edilmiştir. Deneylerde mineral katkı maddeleri çimento dâhil ikili ve üçlü sistem halinde kullanılmıştır.

Mineral katkıların karışımında çimento yerine kullanılmasının uygunluğu ve çimento ile yer değiştirme oranları yapılan deneme karışımlarıyla belirlenmiş, süper akışkanlaştırıcı miktarı, maksimum tane çapı, su/bağlayıcı oranı sabit tutulurken, ince agrega miktarları, çimento+mineral katkı miktarı sabit olacak şekilde çimento, uçucukül ve kireçtaşı tozu kendi aralarında değişken parametreler olarak alınmıştır.

Kendiliğinden yerleşen betonların reolojik özelliklerinin ölçülmesi için değişik yöntemler mevcuttur. Bunlar, betonun kendi ağırlığı ile kalıptaki bütün boşluklara akabilme yeteneğinin, karıştırma, taşıma ve döküm işlemleri sırasında betonun homojenliğini koruyarak ince taneli askıda madde (süspansiyon) olarak kalabilme yeteneğinin ve betonun, kalıpta sık donatılar vb. dar kesitlerin oluşturduğu engeller arasından, agrega tanelerinin tıkanma yapmaksızın geçebilme yeteneğinin ölçülmesi için geliştirilmiş yöntemlerdir. Bunların tespitinde kullanılan deney metotları, çökme-yayılma, T₅₀, L-kutusu ve V-hunisi gibi EFNARC tarafından da önerilen yöntemlerdir. Ayrıca, viskozite ve kayma eşiği gibi reolojik özellikler Bingham modeli kullanılarak çimento hamuru, harç ve betonda viskozimetre aleti ile ölçülebilmektedir (Denklem 1.1). Bu yöntemde farklı dönme hızlarında (γ) oluşan kayma dirençleri (τ) dönme momenti ile ölçülmekte ve kayma direnci ile dönme hızı arasında elde edilen doğrusal ilişkiden kayma eşiği (τ_0) ve viskozite (η) parametreleri hesaplanmaktadır:

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \gamma \quad (1.1)$$

Bu çalışmada, öncelikle EFNARC'a uygun olarak taze betona ait üç özellik (yayılma, V-hunisi ve viskozite) incelenmiştir. Taze beton için geliştirilen viskozimetre

aletinde, farklı dönme hızlarına karşılık gelen dönme momenti dirençleri ölçülmüştür. Dönme momentinin dönme hızı ile değişimi çizilerek elde edilen doğrusal ilişkinin eğiminden viskozite değerleri elde edilmiştir.

Viskozite deneyleri esas alınarak elde edilen, kendiliğinden yerleşen harç karışımlarından, reolojik özellikleri EFNARC'a en uygun olanların dayanımına ait dört özellik (basınç dayanımı, eğilme-çekme dayanımı, dinamik elastisite katsayısı ve rölatif ultrases hızı) ve dayanıklılığına ait üç özellik (aderans, kapiler su emme katsayısı ve aşınma yüzdesi) ile ilgili araştırmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda bu tezde diğer çalışmalardan farklı olarak mineral katkı kullanımının taze beton ve sertleşmiş betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisi ile tüm bu özellikler arasındaki etkileşim-regresyon özellikleri arasındaki bağıntılar toplu halde ve sayısal olarak elde edilmiştir.

2. BETON

2.1. Tanım

Beton; çimento, agrega (kum, çakıl ve/veya kırmataş), su, gerektiğinde (mineral ve/veya kimyasal) katkı maddelerinin belirli oranlarla karıştırılmasıyla elde edilen, plastik kıvamda olan, zamanla çimentonun hidrasyonu nedeniyle katılaşp istenilen şekli alarak dayanım kazanan kompozit bir malzemedir. Beton katkı maddeleri; beton içerisine karışım öncesi veya karışım sırasında çok düşük miktarlarda ilave edilen organik veya inorganik maddelerden oluşur.

Beton diğer yapı malzemelerine göre; daha kolay şekil verilebilir olması, dayanıklı olması, ekonomik olması, her yerde üretilebilir olması, üretiminde daha az enerji tüketilmesi ve estetik özellikleriyle günümüzde en çok kullanılan yapı malzemesidir.

Betonun karılmasından sertleşmeye başladığı ana kadar geçen süre içerisindeki, şekil verilebilir haline taze beton, sertleştikten sonraki katı haline ise sertleşmiş beton denilmektedir. Beton; taze halde iken istenilen şeklin verilebilmesi, sertleşmiş halde ise dayanımı ve dayanıklılığı yüksek bir malzeme olmasından dolayı yapı mühendisliğinde önemli bir yere sahiptir.

İyi bir betonda tüm ince agrega tanelerinin çimento hamuruyla; tüm kaba agrega tanelerinin de harçla bütünüyle kaplanmış olması gerekir. Betonlardan, en genel anlamda beklenen üç ana nitelik; işlenebilme, mukavemet (dayanım) ve durabilite (dayanıklılık)'tır [4].

Beton mekanik açıdan, basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı düşük olan gevrek bir malzemedir. Farklı yapılarda farklı amaçlar için kullanılan beton, zaman zaman çekme gerilmelerine maruz kalmaktadır. Betonun çekme gerilmeleri karşındaki zayıflığını ortadan kaldırmak için beton ile çelik birlikte kullanılarak, betonarme elemanlar geliştirilmiştir. Betonun yüksek basınç dayanımı özelliği ve çeliğin yüksek çekme dayanımı özellikleri birleşerek dayanım yönünden kusursuz olan betonarme malzemelerin en önemli sorunu ise dayanıklılık ve özellikle korozyon sürecidir.

Betonun yapı malzemesi olarak kullanılmasının yararları ve sakıncaları vardır. Betonun önemli yararları şu şekilde sıralanabilir:

- Beton harcına istenilen şekil verilebilir.

- Beton iskeletini oluşturan agrega kolayca bulunabilir.
- Beton işçiliği için her işçinin ihtisaslaşmasına gerek olmayıp bir uzmanın bulunması beton üretimi için yeterlidir, yani yapımı kolaydır.
- Betondan istenilen boyutta yekpare yapı kısımları yapılabilir.
- Betonun dayanımı taş, tuğla, briket ve kerpice oranla yüksek olduğundan yapı elemanlarının boyutları küçültülebilir ve böylece yapı alanından ekonomi sağlanmış olur.
- Gerekli önlem alındığında su içinde yapı elemanlarının yapımına olanak verir.
- Beton yapı elemanları çıplak olarak bırakılabilir veya çeşitli yapı malzemeleriyle kaplanabilir.

Betonun sakıncaları ise şunlardır:

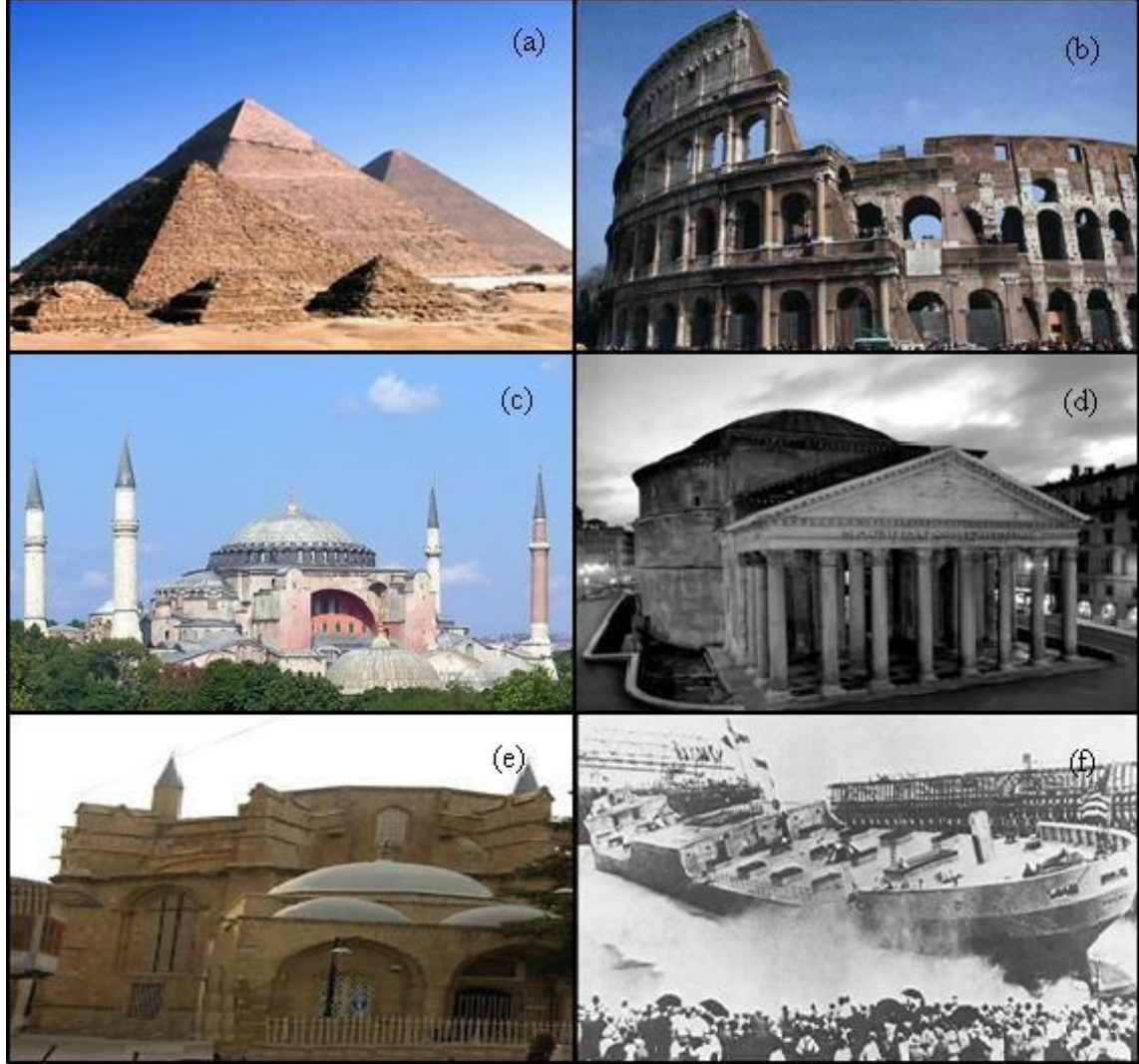
- Beton çok yüksek sıcaklığa dayanamaz ve gerekli önlemler alınmazsa sesi, ısıyı ve nemi iletir.
- Sökülüp tekrar kullanılma özelliği yoktur.
- Onarılması zor ve bazen olanaksızdır.
- Betonarme yapı elemanları diğer yapı malzemeleriyle yapılanlara kıyasla daha ağır olur [5].

Beton, insanların yaşadıkları evlerin, işyerlerinin, okullarının, spor tesislerinin, arabalarını park ettikleri yerlerin ve garajların büyük bir bölümünün yapımında kullanılmaktadır. Üzerinde yürünen kaldırımlarda, seyahat edilen ve insan gereksinimi olan malların getirilip götürüldüğü karayollarının, demiryollarının, havaalanlarının ve limanların yapımında, içme suyu veya atık suların depolandığı tanklar ve bu suların taşındığı boruların, enerji üretimi için kurulan barajların ve atom reaktörlerinin bir bölümünde enerji nakli için kullanılan direklerin yapımında ve tarımsal yapıların yapımında beton kullanılmaktadır.

2.2. Betonun Tarihçesi

Betonun, en ilkel ve kaba şekliyle 5000 yıl kadar önce, Mısır Piramitlerinin yapımı sırasında kullanıldığı bilinmektedir. Beton, eski Roma'da da inşaat mühendisliği için hayati bir öneme sahip olmuştur. Romalılar ve Sümerler betonu M.Ö. 3. yüzyılda bina inşaatlarında kullanmışlardır. Şekil 2.1'de gösterilen; (a) Mısır Piramitleri, (b) Roma Kolezyumu, (c) Ayasofya Camii, (d) Panteon Tapınağı, (e) St. Sofia Katedrali ve (f) Hafif

beton kullanılarak üretilen USS Selma Savaş Gemisi betonla inşa edilmiş ve halen varlığını sürdüren yapılara örnek teşkil etmektedir [6].



Şekil 2.1. Tarihte Beton Yapılara Örnekler

Beton, 1. Dünya Savaşı sırasında gemi yapımında da kullanılmıştır. Birleşmiş Milletler Donanma Şirketi ve Amerika Birleşik Devletleri Federal Hükümet Ordusu gemi inşaatında çelikten farklı, daha hafif bir malzemenin kullanılması fikrini ortaya atmışlar ve İskandinav ülkelerinde küçük gemilerin inşaatında kullanılan hafif betonarme elemanlar kullanılmasına karar vermişlerdir. Gerçekleştirilen araştırmalar sonunda 1919 yılının Haziran ayında U.S.S. Selma adlı gemi üretilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 2.1.f). Kullanımından 34 yıl sonra, 1953 yılında, hurdaya çıkan gemiden, özellikle deniz suyuna

maruz kalmış olan bölgelerinden alınan donatı ve beton örnekleri üzerinde gerçekleştirilen araştırmaların sonucunda beton ve donatının çok iyi durumda olduğu, betonda ufalanma olmadığı, donatılarda da aderansı olumsuz etkileyecek kadar korozyon oluşmadığı rapor edilmiştir.

Günümüzde beton teknolojisi ve yapı endüstrisinde büyük gelişmeler kat edilmiştir. Ülkemizin deprem kuşağında yer alması ve yapı alanlarındaki zeminlerin büyük kısmının sorunlu olması ya da doğal yapı olaylarına maruz kalması dikkate alındığında üretilen betonların dayanım ve dayanıklılık kriterlerini bir arada içermesi gerekliliği zorunlu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu da ancak yüksek performanslı betonların üretilmesi ile mümkün hale gelebilecektir. Üretilen betonlardan; işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin iyi olması beklenmektedir. Bu özelliklerin sağlanması için, mineral ve kimyasal katkı maddelerinin kullanılması kaçınılmaz olmaktadır.

Beton, günümüz yapı endüstrisinde ucuz maliyeti ve imalat üstünlükleri sayesinde tercih edilen bir yapı malzemesi olmuştur. Bu nedenle son yıllarda, sürekli araştırma geliştirme çalışmaları sonucunda beton üretim yöntemleri ve malzeme bileşenlerinde önemli gelişmeler kaydedilmiştir [7]. Günümüzde taşıyıcı yapı malzemelerinin dayanımı, sünekliği ve uzun süreli performansları yüksek, üretimi kolay, çevre ile uyumlu ve ekonomik olmaları beklenir. Bu bakımından sürdürülebilirlik, kullanılabilirlik ve çok işlevsellik yapı malzemelerinin araştırma konularının başında gelmektedir [8].

2.3. Betonun Bileşenleri

2.3.1. Çimento

Çimento, köken olarak Latince “Caementum” kelimesinden gelir. Taş, çakıl ve kum gibi taneli malzemeleri birleştiren bunları sert bir kütle halinde bir arada tutan bağlayıcı maddelerin genel adıdır. Beton içerisinde bağlayıcı olarak birçok malzeme kullanılmaktadır. Geçmişte yağlı kireç, muhtelif tür doğal çimentolar, alçı, muhtelif puzolanlar kullanılmıştır. Günümüzde ise bağlayıcı olarak en çok kullanılan malzeme Portland çimentosudur.

Betonun oluşturulmasında çimento hamurunun işlevi, agrega tanelerinin yüzeylerini kaplamak, agrega taneleri arasındaki boşlukları doldurmak ve agrega tanelerini bir arada tutacak tarzda bağlayıcılık sağlamaktır [9].

Çimento, ana hammaddeleri kalkerle kil olan ve mineral parçalarını (kum, çakıl, tuğla, briket vs.) yapıştırma için kullanılan bir yapı malzemesidir. Çimentonun bu yapıştırma özelliğini yerine getirebilmesi için mutlaka suya ihtiyaç vardır. Çimento, su ile reaksiyona girerek sertleşen bir bağlayıcıdır. Kırılmış kalker, kil ve gerekiyorsa demir cevheri ve/veya kum katılarak öğütölüp toz haline getirilir. Bu malzeme 1400-1500°C'de döner fırınlarda pişirilir. Meydana gelen ürüne "klinker" denir. Daha sonra klinkere bir miktar (%4-5 oranında) alçı taşı eklenip, çok ince toz halinde öğütölerek Portland Çimentosu elde edilir.

Çimentolar TS EN 197-1/A3 standardına göre şu şekilde gruplandırılabilir.

- Portland Çimentoları (CEM I)
- Portland Kompoze Çimentoları (CEM II)
- Portland Yüksek Fırın Cürufu Çimento (CEM III)
- Puzolanik Çimento (CEM IV)
- Kompoze Çimento (CEM V)

2.3.2. Agrega

Beton agregaları minerallerden oluşmuş taneli malzemelerdir. Normal ağırlıklı betonlar agregası, kum, çakıl ve kırma taştan meydana gelmektedir. TS 706 EN 12620+A1'e göre 4,0 mm göz açıklıklı kare delikli elekten geçebilen boyuttaki agregası ince agregası; bu elek üzerinde kalan agregası iri agregası olarak tanımlanmaktadır. Agregası hacim olarak betonun yaklaşık olarak %70-%80'ini oluşturmaktadır. Genellikle 0-4 mm arasında olan agregası kum, 7-31.5 mm arasında olan ise çakıl olarak adlandırılmaktadır. Agregası, esas olarak bir dolgu malzemesidir ve en önemli fonksiyonu betondaki hacim değişikliklerini azaltmaktır. Su ve çimentodan oluşan hamur, büyük hacim değişiklikleri gösterir. Agregasının betona girmesi, hem bu hacim değişikliğini azaltır hem de agregası çimentodan daha ucuz olduğundan ekonomi sağlar [10].

Agregası, çimento hamurunun beton içinde zamanla kuruyarak serbestçe büzülmesini engeller ve böylece betonun büzülme nedeniyle çatlamasını azaltır. Agregası ayrıca hem beton dayanımına hem de dayanıklılığına katkıda bulunan betonun temel bileşenlerindendir [11].

Agregalar betonun taşıyıcı iskeletini temsil ettiklerinden dolayı oldukça önemlidirler. Bunun yanında betona girecek olan agregasının tane dağılımının da düzgün olması beton karışım hesapları ve kaliteli beton için bir zorunluluktur. Beton agregası hem

şartnamelerde gösterilen sınırlara uygun hem de mevcut agrega ile elde edilebilecek en iyi derecelenmeyi temsil etmelidir. Beton karışım hesaplarında agrega karışımının granülometrisi daima sınırlandırılır. Bu sınırlandırma en sıkı doluluktaki agrega granülometrisi ile elde edilebilecek daha ekonomik ve daha nitelikli beton üretimine yöneliktir. Agrega karışımının granülometrisi, ultrases hızı ve basınç dayanımını etkileyen en önemli faktördür [12].

Agregaların beton içerisinde kullanılmasıyla, çimento hamurunun zamanla göstereceği büzölme (rötre) sınırlandırılıp, betonun hacim sabitliği korunmaktadır [13]. Ayrıca beton içerisinde kullanılan agregaların dayanımının yüksek olması, beton dayanımının yüksek olmasına katkıda bulunmaktadır. Beton içerisinde kullanılacak agregaların çeşitli özelliklere sahip olması istenmektedir. Bu özellikleri tane boyu dağılımı, maksimum tane büyüklüğü, su emme kapasitesi, birim hacim ağırlık, özgül ağırlık, tane şekli, agrega içindeki yabancı ve zararlı maddelerin türü ve miktarı, dona dayanıklılık, aşınmaya dayanıklılık, dayanım, elastiklik modülü, ısısal özellikler vb. şeklinde sıralayabiliriz [11].

Agregalarda aranan en önemli özellikler şunlardır:

- Sert, dayanıklı ve boşluksuz olmaları,
- Zayıf taneler içermemeleri (deniz kabuğu, odun, kömür... gibi)
- Basınca ve aşınmaya mukavemetli olmaları,
- Toz, toprak ve betona zarar verebilecek maddeler içermemeleri,
- Yassı ve uzun taneler içermemeleri,
- Çimentoyla zararlı reaksiyona girmemeleridir.

Agreganın kirli (kil, silt, mil, toz vs.) olması aderansı olumsuz etkilemekte, ayrıca bu küçük taneler su ihtiyacını da arttırmaktadır. Agregaların özellikleri, beton yapımındaki malzemelerin karışım oranlarını, taze betonun işlenebilmesini, terlemesini, pompalanabilmesini ve beton yüzeyinin mastarlanıp düzeltilebilmesini önemli ölçüde etkilemektedir. Sertleşmiş betonun dayanıklılığı, dayanımı, büzölmesi, birim ağırlığı, termik özellikleri ve ekonomisi gibi özellikleri de bileşimindeki agreganın özelliklerine göre değişmektedir. Agregaların fiziksel özellikleri şunlardır: özgül ağırlık, birim ağırlık, komposite, porozite (gözeneklilik), donma-çözölme dayanımı, nem durumu ve diğer fiziksel etkenlere karşı dayanıklılık. Agreganın kullanım yeri ve amacına göre, tane

dağılımı (granülometrik bileşim), tane şekli, tane dayanımı, dona dayanıklılık, zararlı madde içeriği açısından belli özelliklerde olması istenir.

Doğal kum, kırma kuma göre işlenebilirlik açısından avantajlıdır. Aynı şekilde dere kumu/agregası kullanılması iç sürtünmeyi azalttığı için akışkanlığı arttırır [14]. Geleneksel betona göre daha çok kum ve daha az iri agrega kullanımı donatılar arasında geçiş yeteneğini de arttırır [15].

Kendiliğinden yerleşen betonda en büyük agrega çapı 5-20 mm arasında değişir ama V-hunisinde bloke olma tehlikesini engellemek için 15 mm seçilmesi en uygundur [16].

Agrega oranına bağlı olarak KYB'nin döküm sırasında kalıplara yaptığı basınç değişmektedir. Bu hidrostatik basınç, karışımda uygun agrega oranı kullanılarak en alt düzeyde tutulabilir. Ayrıca, bu uygun agrega oranına sahip KYB, kalıplara daha hızlı ve uygun yerleşmektedir [17].

Granülometri, KYB'de daha fazla önem kazanmaktadır. Çünkü sertleşmiş betondan çok, taze beton özelliklerini etkilemektedir. Ayrıca agrega tane dağılımının, betonun doluluğu ile direk ilgisi olmasından dolayı, uygun dağılım gereksiz dayanım kayıplarını da önleyecektir. Uygun oranlar tespit edildiğinde kesikli granülometrinin de KYB de kullanılabileceği bilinmektedir [18-20]. Agregatı de KYB özellikleri ve ekonomisi üzerinde direk etkilidir. Nehir agregası, kırmataş agregasına göre daha az suya ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca kırmataş yüzey özelliklerinden dolayı taze betonun viskozite özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Nehir agregasına üretim için herhangi bir işlem uygulanmadığı için bu agregat ile üretilen KYB'ler daha ekonomik olabilirler. Kalker, bazalt ve nehir agregalarının dayanımları farklı olduğundan, karışım özellikleri aynı agregaları farklı betonların özellikle basınç dayanımları da farklı özellikler gösterecektir [21].

2.3.3. Karışım Suyu

Basınç mukavemetini etkileyen en önemli etmen karma suyu miktarıdır. Diğer bileşenler en uygun kalite ve miktarda olsa bile karma suyu gereğince iyi ayarlanmamışsa basınç mukavemeti düşer. Çimentonun hidratasyonu için gerekli su, çimento ağırlığının yaklaşık %25'i kadardır. İşlenebilirliği sağlamak için katılan toplam su miktarı çimento ağırlığının %40-65'i kadardır. %25'in üzerindeki su buharlaşarak, sertleşmiş betonda çoğunluğu kılcal olan boşluklar bırakır ve mukavemetin düşmesine yol açar.

Su, her ne kadar beton bileşenlerinin en ucuzu ise de önemi büyüktür. Kullanılan suyun miktarı betonun nihai mukavemetini büyük ölçüde etkiler. Su miktarında gereksiz artış kaliteyi düşürür. Fazla su, çimento hamurunu fazla inceltir ve çimento tanelerinin birbirine kenetlenmesini zayıflatır. Beton karışımının hazırlanmasında kullanılacak olan suyun uygun kalitede olması, beton özelliklerini olumsuz olarak etkileyecek yabancı maddeleri içermemesi gerekmektedir. Beton teknolojisinde suyun önemli görevleri vardır:

- Kuru haldeki çimento ve agregayı plastik, işlenebilir bir kütle haline getirmek,
- Çimento ile kimyasal reaksiyon yaparak plastik kütlede sertleşmesini sağlamak,
- Karışım suyu olarak, çimento ve agregayla birlikte karılarak beton üretimini sağlamak,
- Kür suyu olarak, yerine yerleştirilmiş betonun yüzeyini ıslak tutarak içerisinde suyun buharlaşmasını önlemek, böylece, betonun içerisinde kimyasal reaksiyonların gelişebilmesi için yeterli suyun bulunmasını sağlamak,
- Yıkama suyu olarak, beton karışımına girecek agregaların yıkanmasını ve betonun karılma işlemi tamamlandıktan sonra betoniye ve/veya beton pompasının temizlenmesini sağlamak,
- Agregada danelerini ıslatmak,
- Çimento hidratasyonunu sağlamak,

Genel olarak hazır beton dışında inşaatlarda betoniyele yapılan beton karışımlarında gereğinden daha fazla su kullanılması betonun dayanımını azaltmaktadır.

Karışım suyu denilince dane nemlerinin dikkate alınmayacağı bilinmelidir. Bunun yanında betonda optimum su miktarı vardır. Bu da betonda ihtiyaç duyulan ve mukavemetinin maksimum hale geldiği su miktarı şeklinde ifade edilebilir.

Beton karışım suyu içerisinde beton özelliklerini etkileyecek çok sayıda yabancı madde bulunmaktadır ve saf su elde etmek oldukça güçtür. Bunun yerine kullanılacak suyun içerisinde bulunabilecek yabancı maddelerin miktarlarının sınırlandırılmasına gidilmiştir. Tablo 2.1’de TS EN 1008’de belirtilen; beton karma suyu - numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dâhil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kurallarındaki standartlara göre yabancı maddelerin izin verilen miktarları yer almaktadır.

Tablo 2.1. Beton karışım suyu içinde bulunabilecek yabancı maddelerin sınır değerleri [22]

Yabancı Madde	Bulunabilecek Maksimum Konsantrasyon
Kil ve Silt gibi katı maddeler (suyun bulanıklılığı)	%0.2
Yağ	Çimento Ağırlığının %2'si
Yosunlu Maddeler	%0.05 – 0.1
Şeker	%0.05
Kalsiyum ve Magnezyum karbonatlar	%0.04
Alkali Karbonatlar ve Bikarbonatlar	%0.10
Kalsiyum Klorür	Çimento Ağırlığının %2'si
Sodyum Klorür	%2.00
Magnezyum Klorür	%4.00
Sodyum Sülfat	%1.00
Magnezyum Sülfat	%4.00
Fosfat, Arsenat, Borat	%0.05
Demir Tuzları	%4.00
Hidroklorik ve Sülfirik Asitler	%1.00
Sodyum Hidroksit	Çimento Ağırlığının %0.5'i
Potasyum Hidroksit	Çimento Ağırlığının %1.2'si

Uygulamada şantiyelerde betonun işlenebilmesinin kolay olması için betona fazladan su verilmesi genelde istenilmeyen bir durumdur. Çoğu kez fazla su verilmesiyle karşı karşıya kalınmaktadır. Karışım içerisine konulan su miktarının az ya da fazla olması durumunda karşılaşılabilecek olumsuzluklar Tablo 2.2'de verilmektedir.

Tablo 2.2. Optimum su miktarının az/fazla olması durumunda betonda meydana gelebilecek olumsuzluklar

Suyun azlığı	Basınç	Suyun fazlalığı	Basınç
%10	%10 azalır	%20	%30 azalır
%20	%60 azalır	%30	%50 azalır
		%100	%80 azalır

Optimum su miktarının fazla olması halinde işlenebilme kolay olurken, betonun kalıp içine yerleştirilmesi de kolay olmaktadır. Daneler arasındaki boşlukların su ile doldurulduğu, sudan dolayı betonun yeterince sıkıştırılmadığı, bu yüzden hidrasyon sonucunda bir kısım suyun açığa çıktığı düşünülürse, beton kapasitesi düşerken, geçirimsizliği artacaktır. Az su kullanılması durumunda ise taze betonun yerleştirme

zorluğundan dolayı boşlukların boyutu artar. Bu da mekanik mukavemet değerinin düşmesi demektir.

2.3.4. Katkı Maddeleri

Yüksek performans; dayanım, dayanıklılık ve hacimsel stabilite olmak üzere betonun olmazsa olmaz en önemli karakteristiğidir. Bu karakteristiğin, betonun geleneksel bileşenleri ile sağlanması ve daha önemlisi sürdürülebilir kılınması ancak belli bir dereceye kadar mümkündür. Dayanımı yüksek ve aynı zamanda dayanıklı bir beton üretebilmenin yolu, beton ile uğraşanların öncelikle alışlagelmiş düşünce yapılarını güncelleştirmeleri ve devamında beton teknolojisinin gereklerini yerine getirmeleriyle mümkündür. Bu noktada, betonun geleneksel bileşenlerine ilave olarak katkı maddelerinin kullanımı gereği doğmaktadır.

2.3.4.1. Mineral Katkılar

İnşaat sektöründe çimento kullanımının fazla olması nedeniyle çimento hammaddeleri hızla tükenmektedir. Bu hammaddelerin yerine daha ucuz ve benzer kompozisyona sahip malzemelerin kullanılmasıyla beton kalitesi düşürülmeden, üretim maliyetleri azaltılabilmektedir [23]. Bu nedenle inşaat sektöründe kaynakların tükenmesini azaltmak için geri dönüştürülmüş ikincil malzemelerin kullanımı son yıllarda üzerinde yoğun araştırmaların yapıldığı bir konudur [24]. Çimento ve betonda kullanılan ikincil malzemeler arasında puzolanik özellik gösteren malzemeler önemli bir yer tutmaktadır. Puzolan, tek başına bağlayıcılık özelliği olmayan ancak ince öğütülüp normal sıcaklıktaki nemli ortamda kalsiyum hidroksitle kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği gösteren malzeme olarak tanımlanmaktadır. Puzolanlara örnek olarak uçucu kül, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, tras ve silis dumanı gösterilebilir [25].

Uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu gibi puzolanik maddeler ve kireç taşı tozu gibi ince taneli mineral katkı maddeleri beton teknolojisinde giderek artan oranda kullanılmakta ve çok sayıda araştırmaya konu olmaktadır.

Bu yapı malzemeleri sadece ekonomik yararlarının yanı sıra betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini de iyileştirmektedir. Günümüz standartlarında bunlar için artık mineral katkı terimi terkedilip “bağlayıcı maddeler” adı kullanılmaktadır. Bu mineral katkıların beton üretiminde değerlendirildiklerinde, işlenebilirlik ve kıvam sorunlarının aşılması için kimyasal katkılarla beraber kullanılmaları kaçınılmaz olmuştur.

Son yıllarda vibrasyonsuz ve herhangi bir sıkıştırma işlemi istemeyen kendiğinden yerleşebilen akıcı beton üretme çabaları gündeme getirilmekte, fakat bunlarla beraber çökme kaybı ve ayrışma problemleri yani işlenebilirlik ve kıvam problemleri çözüm beklemektedir.

Süperakışkanlaştırıcı (süperplastifiyan) kimyasal katkı kullanılarak üretilen betonların ayrışma problemini çözmek için ilk akla gelen tedbir; karışımdaki ince taneli malzeme miktarını arttırarak kohezyonu geliştirmektir. İnce taneli malzeme UK, SD, KT, YFC olabileceği gibi sertleşmiş halde betona ek nitelikler kazandıracak ince taneli puzolanik maddeler de olabilir. Doğal olarak bu çözüm daha doğru ve yararlıdır. Bu şekilde mineral katkıların süperakışkanlaştırıcılarla birlikte kullanılmaları neticesinde yüksek performanslı betonlar üretilmektedir. Sertleşmiş beton aşamasındaki yararlarına rağmen taze beton aşamasında mineral katkıların SA ile uyumları açısından problemler çıkabilmektedir.

Puzolanik maddeler C_3A ve C_4AF gibi su moleküllerini hızlı absorbe ederlerse, SA'nın etkinliği azalır. Özellikle çökme kaybını hızlandırabilirler, yalnız bu varsayım tartışmalıdır, zira puzolanik etki uzun süre sonunda ortaya çıkar ve mineral katkıların taze haldeki etkisi YFC dışında inceliklerin ve geometrik şekillerin fonksiyonudur. Betonun reolojik sabitlerinin betonun bileşenleri ile uyumu için betonun mineral ve kimyasal katkılarla etkileşiminin açıklığa kavuşturulması gerekir. Tattersal'ın taze betonlar için ileri sürdüğü Bingham denklemindeki ($\tau=\tau_0+d\gamma$) açısal şekil değiştirme hızı ($d\gamma$) yerine 'N' dönme hızı, kayma gerilmesi (τ_0) yerine 'g' tork burulma momenti değerlerini koyarak problemi daha pratik hale getirmiştir. Böylece betonun bileşenleri ve kullanılan kimyasal katkıların etkileri Şekil 2.2'de gösterilmiştir [27].

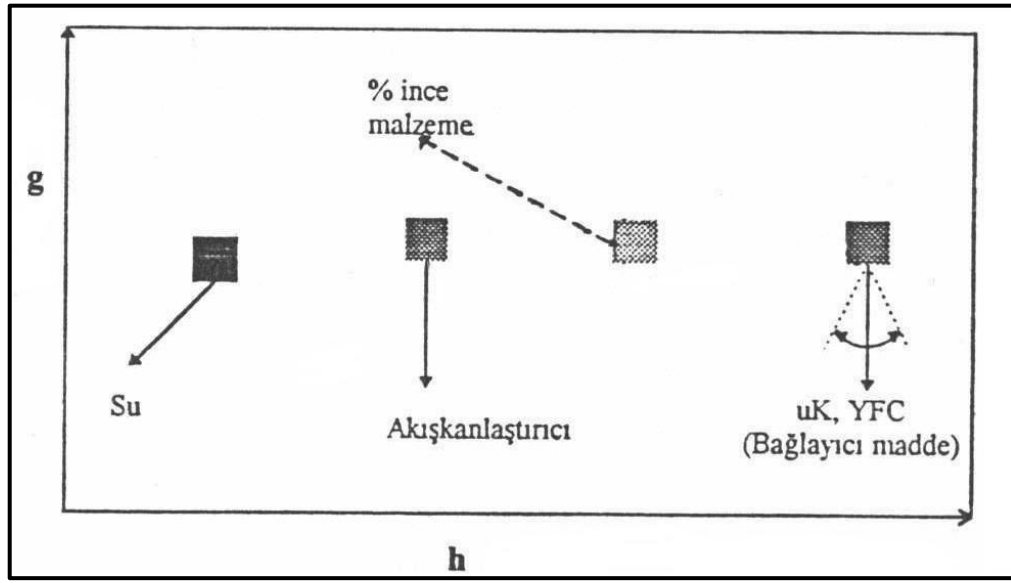
$$\tau = \tau_0 + d\gamma \quad (2.1)$$

$$T = g + hN \quad (2.2)$$

Yukarıda verilen denklemlerden genel olarak şu değerlendirilmeler çıkarılabilir.

- Suyun arttırılması ve diğer bileşenlerin sabit tutulması hem eşik kayma gerilmesi (g), hem de viskozite (h) değerlerini azaltır.

- Akışkanlaştırıcı veya süperakışkanlaştırıcı ilavesinde g azalır. SA'ların akma değeri üzerindeki etkisi oldukça çarpıcıdır. Plastik viskozite ve karışımın kohezyonu değişmezken akış özellikleri artar.
- İnce/kaba agrega oranının artışı g 'nin artışına, h 'nin düşmesine etki edecektir. Bazı karışımlarda zıt etki görülebilir.
- Çimento ile UK veya YFC'nin yer değiştirmesi genelde g 'yi azaltabilir fakat h 'yi artırır veya azaltır. Bu karışımın oranlarına bağlı değişecektir.



Şekil 2.2. Beton bileşenlerinin EKG ve viskozite üzerindeki etkileri [27]

2.3.4.1.1. Uçucu Kül

Bilindiği gibi kendi başına bağlayıcı olmayan ancak öğütülmüş halde, normal sıcaklıkta ve rutubetli ortamlarda kalsiyum hidroksitle (sönmüş kireç) reaksiyona girerek ilave bağlayıcı bileşikler meydana getiren silisli veya silisli ve alüminli malzemelere “**puzolan**” adı verilmektedir. Uçucu kül en yaygın puzolandır. Bu malzeme, termik enerji santralleri içinde öğütülmüş kömürün yanmasıyla ortaya çıkan bir üründür.

Baca gazları atmosfere bırakılmadan önce bu gazlar içindeki ince tanelerin toz toplama sistemi tarafından toplanmasıyla elde edilir. Uçucu kül rutubetli ortamlarda kalsiyum iyonları ile reaksiyona girerek silikat hidrate oluşturan yarı kararlı alümin silikatlar içerir. Dünyadaki uçucu kül üretimi yılda yaklaşık 450 milyon tondur ancak

toplam uçucu kül miktarının sadece %6'sı çimento ve beton karışımlarında puzolan olarak kullanılmaktadır.

Dünyada 1970'li yıllarda başlayan petrol krizinin ardından enerji kullanımını azaltmaya ve alternatif malzemelerin kullanılmasına yönelik çalışmalar artarak devam etmektedir. UK'lerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri incelendiğinde, bunların inşaat sektöründe rahatlıkla kullanılabileceği ve dolayısıyla bir yandan malzeme ve enerji üretiminde ekonomi sağlanırken diğer taraftan çevre kirliliğinin önlenmesi ile ekolojik dengenin korunması da mümkün görülmektedir. İnşaat sektöründe UK; çimento, beton, agrega, kerpiç, tuğla, gaz beton ve yalıtım malzemesi üretiminde, baraj ile yol yapımında ve geoteknik uygulamalarda kullanılmaktadır. Son zamanlarda Türkiye'de UK kullanımına ait pek çok çalışma bulunmakta ve UK'nin genellikle çimento ve tuğla üretimi ile baraj yapımında kullanıldığı görülmektedir.

Türkiye'de elektrik enerjisi, kömüre dayalı termik santrallerden ve hidroelektrik santrallerinden elde edilmektedir. Son yıllarda bunlara üçüncü olarak doğalgaz santralleri de katılmıştır. Düşük kalorili linyit kömürlerinin yakıldığı termik santrallerde, elektrik üretimi sırasında toz haldeki kömürün yanması sonucu baca gazları ile sürüklenen ve elektro filtreler yardımı ile tutularak atmosfere çıkışı önlenen mikron boyutunda kül tanecikleri meydana gelmektedir. Endüstriyel bir atık olan ve uçabilen bu küllere, uçucu kül (UK) adı verilmektedir. Bu işlem esnasında daha iri taneli olan ve baca gazları ile birlikte atmosfere sürüklenemeyerek kazan tabanına düşen küllere de taban külü denilmektedir.

Uçucu küller içerdiği analitik CaO miktarı bakımından;

- CaO miktarı %10'dan az olanlara düşük kireçli/kalsiyumlu UK,
- CaO miktarı %10'dan fazla olanlara yüksek kireçli/kalsiyumlu UK, olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Uçucu küller yapısındaki kireç ve SO₃ miktarına göre ise üç grupta toplanmaktadır.

- Esas yapısı siliko alüminatlardan meydana gelen, SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ (S+A+F) toplamı %70'in üzerinde olan ve genellikle taşkömüründen elde edilen siliko alüminalı UK,
- Genellikle linyit kömüründen elde edilen, S+A+F toplamı %50 ile %70 arasında olan ve kireç ile silika miktarı yüksek olan siliko kalsik UK,

- Genellikle linyit kömüründen elde edilen, S+A+F toplamı %50'in üzerinde olan ve diğerlerine göre daha fazla SO₃ ve CaO ihtiva eden sülfokalsik UK'lerdir.

UK'ler, ASTM C618'e göre de iki başlık altında toplanmaktadır [26]. Bunlar sırasıyla,

- Bitümlü kömürlerden elde edilen ve S+A+F toplamı %70'in üzerinde olan F sınıfı UK,
- Genellikle linyit veya yarı bitümlü kömürlerden elde edilen ve S+A+F toplamı %50'in üzerinde olan C sınıfı UK'lerdir.

Tablo 2.3. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri

Çap (µm)	1-200
Şekil	Yuvarlak
Renk	Gri
Yoğunluk (g/cm³)	2.1-2.7
İncelik	Çimento İnceliğinde

Uçucu kül kullanımı taze betonun terlemesini ve hidratasyon ısını azaltır. Taze betonun işlenebilmesini artırır. Sertleşmiş betonun geçirimsizliğini azaltır ve sülfatlara dayanıklılığını artırır. Betonda ekonomiklik sağlar. Uçucu kül kullanımı taze betonun priz süresini uzatır. İlk günlerdeki dayanımını düşürür. Betonun kür süresini uzatır [27].

Beton karışımında uçucu kül oranının artışı ile betonun bir günlük basınç dayanımı büyük oranda azalırken, çimento yerine %40 uçucu kül ikame edilmiş karışım, bağlayıcı olarak sadece çimento içeren kontrol karışımının dayanım seviyesine 7 günde ulaşmaktadır. 28 günlük dayanımlar incelendiğinde, %50 ve %60 ikame oranında bile kontrol karışımı dayanımına oldukça yakın dayanımlar elde edilmiştir. %70 ikame oranında ise uzun dönemde de olsa kontrol karışımı ile dayanım farkı kapanmamaktadır. [28].

2.3.4.1.2. Kireçtaşı Tozu

Kireç bilinen en eski bağlayıcılardan biridir. Eski Babil, Mısır, Finikeliler, Hitit ve Persler tarafından hava kireci yapıda bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Romalılar devrinde su kireci bulunmuş ve pek çok inşaatda kullanılmıştır. Bu arada puzolan kireç

(volkanik esaslı, killi, kalkerli toprak) ile Türkler tarafından da tuğla kırıkları (pişmiş kil) öğütülüp kireçle karıştırılarak “*Horasan harcı*” adı altında kullanılmıştır.

Kireçtaşı, sönmemiş kireç ve sönmüş kireçten oluşan ürün grubuna 'kireç ürünleri' adı verilir. Kirecin hammaddesi olan ve tabiatta bol miktarda bulunan kireçtaşı, karbonatlı tortul kayaç ve fosiller için kullanılan genel bir deyim olup, yapısında prensip olarak kalsiyum karbonat veya kalsiyum karbonat/magnezyum karbonat bileşikleri ($\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$) kombine halde bulunur. Bunun yanı sıra içinde değişik oranlarda demir, alüminyum, silisyum, kükürt gibi safsızlıklara da rastlanabilir. Dünya’ da çok çeşitli formasyon ve tiplerde kireçtaşı mevcuttur. Bunlar orijin, jeolojik formasyon, mineralojik yapı, kristal yapısı, kimyasal bileşim, renk ve sertlik özelliklerine göre gruplandırılır (örneğin tebeşir, marn, traverten gibi).

Kirecin hammaddesi olan kireçtaşı veya kalker, genellikle kalsiyum karbonattan (CaCO_3) oluşur. İçindeki kalsiyum karbonat oranını temel olarak yapılan sınıflandırmaya göre kireçtaşı cinsleri şöyle sıralanır:

- Çok yüksek kalsiyumlu kireçtaşı (KT) : CaCO_3 : min. %97
- Yüksek kalsiyumlu KT: CaCO_3 : min. %95
- Yüksek karbonatlı KT : ($\text{CaCO}_3+\text{MgCO}_3$) : min. %95
- Kalsitik KT: MgCO_3 :%5
- Magnezyumlu KT: MgCO_3 :%5-20
- Dolomitik KT (Dolomit) : MgCO_3 :%20-40
- Yüksek magnezyumlu dolomit: MgCO_3 :%40-46

Birçok ülkede kireçtaşının ana kullanım sahası %40-70 oranıyla inşaat ve yapı sektörüdür. Kireçtaşı bu sektörde beton harcında agrega (= mıcır) olarak ve yol yapımında agrega/dolgu maddesi olarak kullanılır. Bu amaçla kullanılacak olan kireçtaşı; temiz, kuru, kübik formda, yüksek aşınma mukavemetine ve sertliğe sahip olmalıdır. Daha ince (75 mikron–5 mm) gradasyonlu bazı kireçtaşı (kalker) kumları ise, beton ve inşaat harcına katılır. İnşaat ve yapı endüstrisinde kullanılan yıllık mıcır miktarı, dünyada yaklaşık 1,5 milyar ton/yıl; Türkiye’de ise yaklaşık 180 milyon ton/yıl civarındadır. Bu değer, Türkiye’deki toplam kireçtaşı üretiminin %74’üne karşılık gelmektedir. Kireçtaşının ikinci büyük kullanım alanı Portland çimentosu ($\text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) yapımıdır. Çimentonun ana hammadde girdisi %80’e varan oranlarla düşük

magnezyumlu (en fazla %5) kireçtaşıdır. Bir ton çimento üretimi için yaklaşık bir ton kireçtaşına ihtiyaç vardır. Geleneksel betonda özellikle düşük dozlu karışımlarda beton içerisine taş tozu ilave etmenin yararı, betonun kohezyonu, işlenebilirliği ve kompasitesi açısından büyük avantajlar sağlamasıdır.

2.3.4.2. Kimyasal Katkılar

Betonun bazı özelliklerini iyileştirmek için beton içerisindeki çimento miktarı temel alınarak belli oranlarda katılan organik veya inorganik kökenli kimyasallar katkı maddesi olarak adlandırılır. Katkı maddeleri çoğunlukla beton karışım suyuna katılır. Gereğinden fazla kullanıldığında aksi etkiler oluşturabileceği gibi yine gereğinden az kullanıldığı takdirde bir fayda sağlamayabilir. Şu iyi bilinmelidir ki kurallara uygun üretilmeyen bir betonun özelliklerini katkı maddeleri ile iyileştirmek mümkün değildir. Kurallarına uygun üretilen betonların da katkı maddeleri ile uyumu önceden yapılan deneylerle belirlenmelidir.

İnsanoğlunun yapı teknolojisinde bağlayıcı madde kullanmaya başlaması ile birlikte kimyasal katkı araştırması hemen hemen eş zamanlıdır. Kimyasal katkıları üzerinde bulunabilen ilk yayın 1924 yılında ASTM karışım dergilerinde çıkan Abrams'ın bir çalışması ve önerisidir. Beton teknolojisinin ünlü kurucularından olan Abrams Kalsiyum Klorür'ün priz ve sertleşmeyi hızlandıran bir kimyasal katkı olduğunu belirtmiştir.

20. yüzyıl başlarında betonun iki ana işlevinin işlenebilme ve dayanım olduğu, ayrıca dayanımı etkileyen faktörün su/çimento olduğu bilinmekteydi. Üçüncü ana işlev olan dayanıklılık pek dikkate alınmıyordu. Su/çimento faktörü, işlenebilme ve dayanım özellikleri arasında çelişkili bir durum yaratıyordu. Suyu arttırınca beton kolay işlenebiliyor ama dayanım düşüyordu. Dayanım değerini korumak için çimentoyu arttırmak da gerekiyordu. Böylece çözüm ekonomik olmaktan çıkıyordu. İşte bu yüzden suyu arttırmadan işlenebilmeyi düzelten bir katkı bulunmalıydı. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen verilere göre su miktarı azaltılıp, su/çimento oranı da dayanım açısından sabit tutulunca, beton daha az çimento sarf ederek üretilenmiştir. Böylece ekonomi sağlanmıştır. Buna göre akışkanlaştırıcı katkıların bulunmasının ana nedeni ekonomi olmuştur [29]. Kimyasal katkıları, çimento tanelerinin zeta potansiyel değerinin negatifliğini arttırarak çimento tanelerinin daha iyi dağılmasına neden olur. Bu artışın çimentonun kimyasal kompozisyonuna da bağlı olduğu yapılan deneylerle doğrulanmıştır.

Katkının absorbe edilme miktarı ve hızı, katkının moleküler ağırlığı ile artar. Ancak, yapılan bazı araştırmalar molekül ağırlığındaki artışın bir noktaya kadar işlenebilirliği arttırdığını, daha sonra etkilemediğini hatta azalttığını göstermiştir [30].

Beton üretiminde kullanılan kimyasal katkıları aşağıda belirtildiği şekilde gruplandırılır.

a) Su azaltıcı/akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları;

Bu gruba giren katkıları çoğunlukla çimento ağırlığının %0.2-0.5 arası oranlarda kullanılır. Taze betonun işlenebilirliğini arttıran bu katkıları aynı zamanda beton karma suyu ihtiyacını azalttıkları için betonun dayanımını da arttırmaları.

b) Süperakışkanlaştırıcılar;

Genellikle yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılırlar. Bu katkıları betonun su/çimento oranını 0.25'lere kadar düşürülebilir. Ancak süper akışkanlaştırıcıları normal akışkanlaştırıcılara kıyasla %1-3 gibi daha yüksek dozajlarda kullanılır.

c) Priz süresini değiştiren kimyasal katkıları;

Taze betonun priz adı verilen sertleşme sürecinin bazı koşullarda hızlandırılması veya geciktirilmesi istenir. Özellikle yaz aylarında, uzun taşıma mesafelerinde priz geciktiriciler, kış aylarında ise priz hızlandırıcıları kullanılır.

d) Hava sürükleyici kimyasal katkıları;

Soğuk iklim koşullarında donma-çözülme tehlikesine karşı koruyan bu maddeler, aynı zamanda betonun işlenebilirliğini arttırmaları.

e) Antifrizler;

Bu tip katkıları beton içindeki suyun donma sıcaklığını düşürerek suyun donmasını ve betonun çatlamasını engeller. Ancak soğuk hava şartlarında betona sadece antifriz katkı ilave edilmesi kesin çözüm olmayıp döküm yerinde betonun korunması için özel önlemlerin alınması gereklidir.

f) Diğer katkıları;

Hafif beton, geçirimsiz beton, rötreği önleyici, aderansı artırıcı, renklendirici, su tutucu, su geçirimsizlik vb. değişik kimyasal katkı maddeleri vardır [31].

2.3.4.2.1. Akışkanlaştırıcı Katkılar

Akışkanlaştırıcı katkıları betonun diğer ana bileşenlerine oranla çok az miktarda konulan kimyasallardır. Karışımda kullanılacak miktarı, çimento dozajına göre belirlenir. Akışkanlaştırıcı katkıları taze beton ve harçların işlenebilirliğini etkiler. Etkinlik derecelerine göre normal akışkanlaştırıcı (veya su azaltıcı), orta derecede su azaltıcı (mid-range) ve süperakışkanlaştırıcı (üstün akışkanlaştırıcı) olmak üzere 3 temel grupta toplanabilir. Süperakışkanlaştırıcı akıcı ve doğru hesaplanmış, şekil verilmiş beton ile kolayca karmaşık kalıplar doldurulabilir, zor yüzeyler bitirilebilir.

Betonun üç temel özelliği olan dayanım, dayanıklılık ve işlenebilirlik yüksek performanslı betonlarda özellikle geliştirilmelidir. Bundan dolayı yüksek performanslı beton elde etmek için ilk koşul üretim aşamasında su/çimento oranını mümkün olan en düşük seviyeye düşürmektir. İkincil koşul ise betonun boşluk oluşmadan ve ayrışmaksızın kolayca yerleştirilebilmesidir. Bu iki koşul yıllardan beri klasik beton teknolojisi için geçerli olsalar da ancak süperakışkanlaştırıcıların bulunmasıyla uygulanabilmiştir.

Süperakışkanlaştırıcıların akıcılık kazandırma etkisi sıradan akışkanlaştırıcılarınkine benzer. Sadece polimer moleküllerinin çimento taneleri üzerine yapışması ve parçacıkların elektrostatik yüklerini değiştirmesi diğerlerinden farklıdır.

Mekanizma henüz tam olarak tanımlanamamıştır. Büyük bir ihtimalle karışımın kıvamını önemli ölçüde etkileyen elektrostatik yüklerden başka mekanizmalar da mevcuttur. Yapılmakta olan araştırmalardan çıkan değerlendirmeler deney sonuçlarını sağlamamaktadır. Priz sürelerini fazla uzatmaması ve taze betonun sertleşmesini geciktirmemesi bakımından süperakışkanlaştırıcıların kimyasal bileşiminin sıradan akışkanlaştırıcılarındakinden farklı olduğu anlaşılmaktadır.

Süperakışkanlaştırıcılar kimyasal yapılarına göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılırlar.

- Sülfonatlı sentetik polimerler
- Karboksilatlı sentetik polimerler
- Fonksiyonel olarak karıştırılmış sentetik polimerler

Birinci grup sülfonatlı naftalin formaldehit (SNF) veya sülfonatlı melamin formaldehit (SMF) bileşiklerinden oluşur. İkinci grup ise bazı bilim adamları tarafından polikarbonat grubu olarak adlandırılırlar [32]. Bunlar polikarboksilat polimerler ve poliakrilatlardan meydana gelir. Üçüncü grup süperakışkanlaştırıcılar kimyasal yapılarında

farklı anodik ve kutupsal fonksiyon gruplarına sahiptir. Aminosülfatlar ve modifiye edilmiş linyosülfatlar bu gruba örnek olabilir.

Birinci gruptakiler süperakışkanlaştırıcıların temelini oluşturur ve piyasada çoğunlukla bulunanlar bunlardır. Polikarboksilatlı süperakışkanlaştırıcılar üzerindeki yeni araştırmalar ekonomik ve teknik olarak daha avantajlı yeni bir neslin keşfedilmesini sağlamıştır [33].

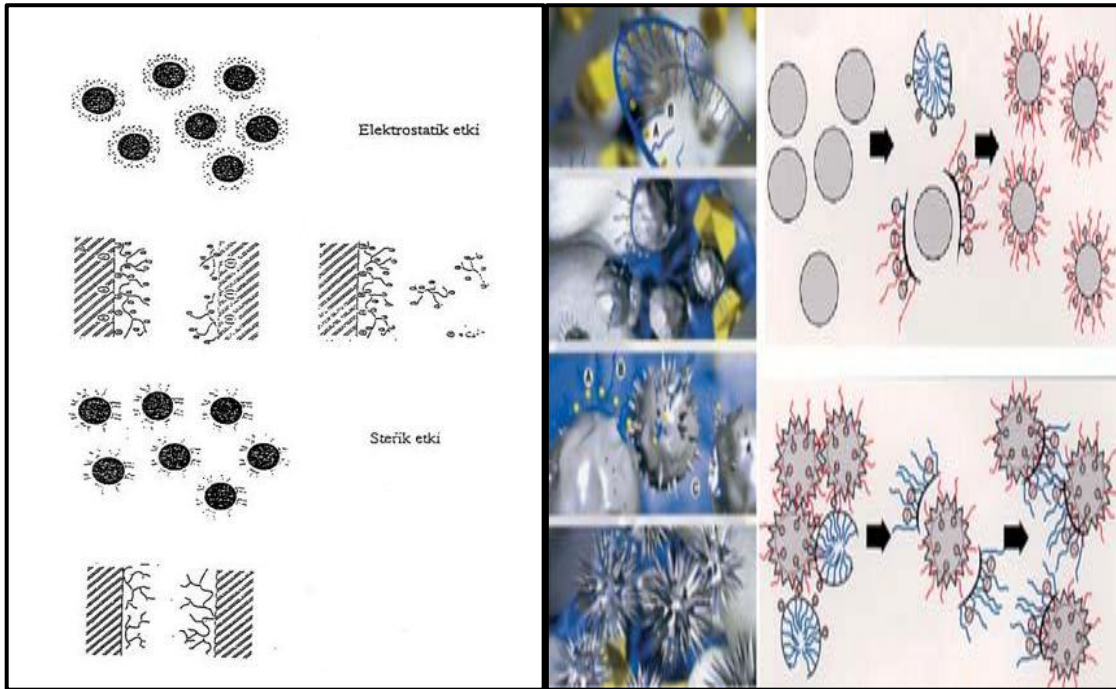
Yeni kuşak süperakışkanlaştırıcılar, günümüzde geniş kullanım alanına sahip olan naftalin ve melamin esaslı süperakışkanlaştırıcılara göre betonda çok daha yüksek oranda su kesmekte ve yaklaşık 90 dakika süreyle işlenebilirliğini korumaktadır.

Bu katkılar, bileşenleri özel olarak seçilmiş bir betona çok akıcı bir kıvam ve kendiliğinden yerleşme özelliği kazandırır. Çimentonun beton içindeki dağılımı, bu katkılarla çalışıldığında klasik süperakışkanlaştırıcılarda olduğu gibi yalnızca elektriksel etki ile değil aynı zamanda uzun dallar içeren polimer zincirleri sayesinde çimento tanecikleri çevresinde birbirini iten fiziksel bir etki ile (sterik etki) Şekil 2.3'teki gibi kararlı hale gelir. Bu şekilde betona hem yüksek oranda su kesme özelliği kazandırılır ve hem de uzun süre kendiliğinden en küçük detaylara dahi ayrışmadan ve titreşim gerektirmeden yerleşebilen betonlar elde etmek mümkün olabilir.

Yüksek performanslı betonların gelişimi için ilave özellikler veren başka kimyasal katkı ve bağlayıcı malzemeler bulunmaktadır. Süperakışkanlaştırıcılar ile birlikte kullanılan kimyasal katkılar; geciktiriciler, hava sürükleyiciler, viskozite artırıcı bileşenler, pompalanabilirlik için yardımcı kimyasallar, su altı betonu üretiminde kullanılan katkı ve korozyon önleyicilerdir. Ayrıca silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıları da kullanılmaktadır. Süperakışkanlaştırıcılar ile tüm bu mineral ve kimyasal katkıların uyumu, etkileşimleri (taze beton özellikleri üzerinde) halen incelenmektedir [34-36].

Süperakışkanlaştırıcıların akışkanlaştırıcı etkileri katı bağlayıcı malzemeleri dağıtma özelliğine bağlıdır. Dağılma, süperakışkanlaştırıcı moleküllerinin bağlayıcı toz parçacıkları tarafından adsorbe edilmesiyle oluşur. Çimento tanelerinin dağılılabirliği sabit olmalıdır. Dağılım ve sürekliliğin açıklanması farklı teorilere bağlı olarak yapılmaktadır. Birinci teori liyofob jelleri için olan DLVO teorisidir (Derjaguin, Landau, Verwey, Overbeck). Bu teoride adsorbe edilen süperakışkanlaştırıcı molekülleri katı çimento tanelerini negatif

yükle yükleyerek taneler arasında elektrostatik bir itki oluşturur. SNF ve SMF gibi sülfonatlı sentetik polimerler kullanılması durumunda oluşan dağılımın sebebi bu elektrostatik itkidir. İkinci teori ise Sterik Etki Teorisi'dir. Esas kısmı uzun ve yandan ekli zincirleri olan absorbe edilmiş molekül halindeki süperakışkanlaştırıcıların stereokiometrik yapıları itici bir potansiyel enerji yaratırlar. Bu dağılım özellikle poliakrilatlar gibi karboksilatlı sentetik polimerler ile etkilidir [37]. Diğer teoriler dağılımı, boşaltıcı etki ve tribolojik etki ile açıklar [38].



Şekil 2.3. Süperakışkanlaştırıcıların etki mekanizması

Süperakışkanlaştırıcı olarak kullanılan polimerlerin moleküler ağırlıkları dağılım yeteneğini etkiler. Yüksek moleküler ağırlıklara sahip olan polimerler çimento tanecikleri tarafından daha iyi adsorbe edilir ve daha yüksek dağılma özelliğine sahiptirler. Fakat moleküler ağırlıkları çok yüksek olursa yararlı bir nitelik olan yüksek dağılma yeteneği yok olur.

Süperakışkanlaştırıcıların betona ilave edilmesiyle reolojik özellikler üzerindeki etkisi kayma gerilmesinin düşmesi olarak ortaya çıkar. Bu ilave viskoziteyi düşürerek veya bazen yükselterek değiştirir. Karışıma sadece su ilave edilmesi durumunda reolojik sabitlerin tamamı düşer. Bu gözlem taze beton kararlılığı için önemlidir. Diğer bir yandan

plastik viskozitenin düşmesi, sürtünmenin azalmasından dolayı, betonun boru ile transferini kolaylaştırır. Fakat plastik viskozitenin çok fazla düşmesi halinde ayrışma ve boruların tıkanması tehlikesi oluşur.

2.4. Beton Sınıfları

2.4.1. Kıvam Sınıfları

Betonun işlenebilme özelliği kıvamı ile tayin edilebilmektedir. Kıvam, betonun kullanıldığı yere (kalıp geometrisi, demir sıklığı, eğim), betonu yerleştirme, sıkıştırma, mastarlama imkânlarına ve işçiliğine, şantiyede beton iletim imkânlarına (pompa, kova) bağlı olarak özenle seçilmesi gereken bir özelliktir. Hazır Beton Standardı TS EN 206'da beton kıvamı çökme, vebe, sıkıştırılabilme ve yayılma sınıflarına göre belirlenir [39].

Hazır betonda şantiye teslimi kıvam, taşıma süresi ve beton sıcaklığına bağlıdır. Taşıma süresi kıvamı etkilemekte, süre uzadıkça ve hava sıcaklığı yükseldikçe santraldan şantiyeye kıvam kaybı artmaktadır. Bu kıvam kaybının betona su verilerek dengelenmesi mukavemeti düşürmektedir.

2.4.2. Basınç Dayanım Sınıfları

Betonun basınç mukavemeti standart kür koşullarında saklanmış ($23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ kirece doymun su içerisinde), 28 günlük silindir (15 cm çap, 30 cm yükseklik) veya küp (15 cm kenarlı) numuneler üzerinde ölçülür. Betonda basınç dayanımı sınıfları, karşılığı silindir ve küp mukavemetleri tablo 2.4'te özetlenmiştir.

Tablo 2.4. Betonda basınç dayanımı sınıfları [39]

Basınç Dayanımı Sınıfı	f_{ck} , silindir (N/mm ²)	f_{ck} , küp (N/mm ²)	Basınç Dayanımı Sınıfı	f_{ck} , silindir (N/mm ²)	f_{ck} , küp (N/mm ²)
C 14/16	14	16	C 50/60	50	60
C 16/20	16	20	C 55/67	55	67
C 20/25	20	25	C 60/75	60	75
C 25/30	25	30	C 70/85	70	85
C 30/37	30	37	C 80/95	80	95
C 35/45	35	45	C 90/105	90	105
C 40/50	40	50	C 100/115	100	115
C 45/55	45	55			

Deprem tesirindeki yapılarda, özellikle mevcut betonarme betonunun yeterli dayanıma sahip olmaması, yıkılmaların ve hasarların başlıca nedenlerinden biridir. Günümüzde beton üretiminde ve yerine dökülmesinde gelinen aşamada, daha yüksek dayanıma sahip beton yaygın olarak imal edilebilmektedir. Türkiye’de yapılan beton üretimi, 2003 verilerine göre %79 oranında 15-25 MPa arasında, %14 oranında 25-35 MPa arasındadır [39]. Ülkemizde 1975-1998 yılları arasında yürürlükte kalan ve günümüz yapı stokunun büyük bir kısmını kapsayan Deprem Yönetmeliği’nde deprem bölgelerindeki betonarme yapılarda minimum beton sınıfı C14 olarak belirtilmiştir. 1997 Deprem Yönetmeliği’nde ise bu değer deprem bölgesi derecesine bağlı olarak C16-C20 sınıfına çıkartılmıştır.

2.5. Özel Betonlar

Özellikleri ve üretim teknikleri bakımından normal betonlardan farklı olan betonlara özel beton denir. Bu tip betonlar şu şekilde üretilir.

- Özellikleri değişik agrega kullanılarak,
- Katkı maddeleri eklenerek,
- Bileşimi değiştirerek normal agrega ve çimento kullanarak,
- Yapım tekniğinde değişiklik yaparak,
- Bu yöntemlerin bir kısmını aynı zamanda kullanarak.

Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte beton endüstrisinde de ilerlemeler olmuş ve beton üretimindeki bu yenilikler beton teknolojisine özel betonlar adı ile girmiştir. Özel betonlar, kullanım yerlerine göre farklı beklentileri karşılamak amacıyla üretilen betonlardır.

Ağır beton, taşıyıcı hafif beton, yüksek akıcılığa sahip beton, yalıtım özellikli beton bu farklı özelliklerden bazılarıdır. Betona bu farklı özellikleri kazandırmak elbetteki betonun geleneksel bileşenlerinin haricinde farklı nitelikteki yapı malzemelerini karışıma ilave etmekle mümkün olmaktadır.

Mineral ve kimyasal katkılarla, farklı tip ve mineralojik kökene sahip agregalar betonun niteliğini değiştiren ana etkenlerden bazılarıdır. Günümüzde bu ilave yapı malzemelerle birlikte geleneksel beton niteliğinde ve daha üstün niteliklere sahip olan taşıyıcı hafif betonlar üretilmektedir.

Özel Amaçlı Betonlar

- Ağır betonlar
- Hafif betonlar
- Ateşe dayanıklı betonlar
- Kendiliğinden yerleşen betonlar

2.6. Kendiliğinden Yerleşen Beton-Harç, (KYB-KYH)

Düşük su/çimento oranına bağlı olarak yüksek dayanıklılığa sahip beton şeklinde tanımlanan Yüksek Performanslı Betonların bir çeşidi de Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB)'lardır. İlk olarak 1986 yılında Japonya'daki Tokyo Üniversitesi'nde geliştirilmiş ve o zamandan beri birçok büyük projede başarıyla uygulanmıştır. KYB için şöyle bir tanım yapılmaktadır: “KYB, kendi ağırlığının etkisiyle akabilen, içinde sık ve yoğun donatı ağı bulunan bir kalıba dahi, hiçbir vibrasyona ihtiyaç duymadan yayılan ve kalıbı tamamen dolduran ve bu esnada homojen yapısı bozulmayan betondur” [2].

Kendiliğinden yerleşen beton literatürde üç farklı isimde anılmaktadır. Literatürde en yaygın kullanılanları: Kendiliğinden Sıkışan Beton (*Self-Compacting Concrete-SCC*), döşeme tipi, geniş boyutlu yüzeysel alanlarda kullanılması halinde, Kendiliğinden Yüzeyleyen Beton (*Self-Levelling Concrete-SLC*)'dur. Kendiliğinden Yüzeyleyen Beton'dan kendi ağırlığı ile her 4 metrede 1 mm'den fazla kot farkı oluşturmaksızın, akarak yatay konum alması beklenmektedir [40].

Kuzey Amerika'da ise Kendiliğinden Konsolide Olan, Çöken Beton (*Self-Consolidating Concrete-SCC*) adı kullanılmaktadır. Kullanım alanı ve bölgeye göre değişen bu isimler birbiri yerine de kullanılmaktadır. Tüm bunlarla birlikte Türkiye'de çoğunlukla Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) terimi kullanılmaktadır.

KYB'nin ortaya çıkışının en önemli nedeni, taze betonun kalıbına, homojen, boşluksuz, ayrışma yapmadan yerleştirilmesinde gerekli teknik yeterliliğe sahip yetişmiş işçi eksikliğinin karşılanmasıdır. KYB kendiliğinden yerleşme yeteneği sayesinde, inşaat çalışmalarının kalitesinden bağımsız olarak dayanıklı beton yapılar yapmayı mümkün kılar.

Geleneksel betona oranla daha fazla çimento, kimyasal katkı ve taş unu gerektirdiği için, KYB'un ilk maliyeti oldukça yüksektir. Ancak vibratör kullanımını ortadan

kaldırması ve yüksek basınç dayanımı ve dayanıklılığa sahip olması makro ölçekte KYB'yi ekonomik bir çözüme dönüştürebilir [41].

KYB'nin kullanımıyla;

- İnşaat hızı artar.
- İşçi sayısı azalır.
- Taze beton daha kolay kalıbına yerleştirilir; daha iyi beton yüzeyi elde edilir.
- Taşıyıcı elemanın dayanıklılığı daha iyidir.
- Betonarme elemanın şekli ve boyutunun tasarımında serbestliğe olanak sağlar.
- Daha ince elemanların imal edilme kolaylığı vardır

KYB'ler, kendi kendine sıkışma yeteneği sayesinde vibrasyon gerektirmez ve tüm olumsuz etkenleri en aza indirerek, işçilikten ve zamandan tasarruf sağlar. Ayrıca gürültü probleminin ortadan kalkması, şehir merkezlerinde ve özellikle gece beton dökümlerinde üstünlük sağlar.

KYB'ler genellikle büyük boyutlu inşaatlarda, sık donatılı dar kesit özelliklerinin bir arada olduğu perde tipi elemanlarda, tamir, bakım ve yenileme işlerinde, tünel gibi özel kalıp gerektiren işlerde, kullanılan güçlendirme projelerinde, sık donatılı elemanlarda, estetik kalıp tasarımlarında, zor ve ulaşılmaz kalıplarda, vibratör kullanımının imkânsız olduğu yerlerde kolaylık sağlar.

Reolojik kavramlar, KYB'nin geliştirilmesi ve taze haldeki davranışının daha iyi anlaşılması için kullanılmaktadır. Reolojik incelemeler kayma gerilmesi ile kayma hızı arasındaki bağıntının elde edilmesine dayanmaktadır. Elde edilen bu ilişkiden de kayma eşiği ve plastik viskozite bulunmaktadır.

Reolojik ölçümler için reometreler ve viskozimetreler kullanılmaktadır. Reolojik ölçümler genel olarak araştırma ve geliştirme aşamalarına yöneliktir, ancak bazı karışım tasarım prosedürleri için de kullanılmaktadır.

Kendiliğinden yerleşen betonların reolojik özelliğinin ölçülmesi için değişik yöntemler geliştirilmiştir:

- Doldurma Yeteneği: Betonun kendi ağırlığı ile kalıptaki bütün boşluklara akabilme yeteneğidir. Bu özellik çökme-yayılma deney yöntemi ile ölçülebilir.

- Ayrışmaya direnç: Karıştırma, taşıma ve döküm işlemleri sırasında betonun homojenliğini koruyarak ince taneli askıda madde (süspansiyon) olarak kalabilme yeteneğidir. L şekilli deney aleti bu özelliği ölçmek için kullanılabilir.
- Engellerin arasından geçme yeteneği: Betonun, kalıpta sık donatılar vb. dar kesitlerin oluşturduğu engeller arasından, agrega tanelerinin tıkanma yapmaksızın geçebilme yeteneğidir. Bu özellik, V hunisi, U ve L şekilli deney aletleri ile ölçülür.
- Viskozite ve kayma eşiği: Bu gibi reolojik özellikler Bingham modeli kullanılarak çimento hamuru, harç ve betonda viskozitemetre aleti ile ölçülür.

KYB'nin yukarıda belirtilen özellikleri sağlayabilmesi için temel bağlayıcı olan çimentonun ve diğer mineral katkıların ince agrega (kum) ile karışımından elde edilen ve iri agregaların etrafını sararak birlikte betonu oluşturan Harcın da aynı özellikleri sağlaması gerekir. Bu nedenle KYB özelliklerini öğrenebilmek için KYH özelliklerinin incelenmesi çok büyük ölçüde gerekli kolaylığı sağlayacaktır.

2.6.1. KYB'de Aranan Malzeme Miktarları

EFNARC'a göre KYB dizayn oranlarının ve miktarlarının belirlenmesinde hacimsel oranlar daha önemlidir. EFNARC'ın önerdiği başlıca dizayn esasları ve deney sınır değerleri ile çözüm yolları aşağıda belirtilmiştir. (Tablo 2.5-2.8)

- Su/toz oranı hacimce 0.80–1.10 aralığında olmalıdır (akışkanlaştırıcı kullanılmadan).
- Toplam toz miktarı m^3 'de 160 ile 240 litre arasında (400-600 kg) olmalıdır.
- İri agrega miktarı hacmin % 28 ile %35'i aralığında olmalıdır.
- Su/çimento oranı EN 206'nın gereksinimlerine göre belirlenmeli ve toplam su içeriği $200 \text{ kg}/m^3$ 'ü aşmamalıdır.
- Kum miktarı diğer malzeme hacimlerine göre ayarlanmalıdır.

**Tablo 2.5. EFNARC standartlarına göre tavsiye edilen KYB deneyleri
sınır değerleri [14]**

	Metot	Birim	Minimum Sınır	Maksimum Sınır
1	Çökme-Yayılma	mm	650	800
2	T ₅₀ cm yayılma süresi	s	2	5
3	J-halkası	mm	0	10
4	V-hunisi	s	6	12
5	L-kutusu	(h ₂ /h ₁)	0.8	1
6	U-kutusu	(h ₂ -h ₁) mm	0	30
7	GTM Stabilite deneyi	%	0	15
8	Orimet	s	0	5

Tablo 2.6. KYB’de sınır değerlerin altındaki değerler için sorunun belirlenmesi ve etki takip tablosu [42]

No	Metot	Birim	Alt sınır değer	Tablo 2.8 ilgili satır	Muhtemel Etki
1	Çökme-Yayılma	mm	650	a	Viskozite çok yüksek
				c	Eşik kayma değeri çok Yüksek
2	T ₅₀ süresi	s	2	b	Viskozite çok düşük
3	J-halkası	mm	10	a	Viskozite çok yüksek
				c	Eşik kayma değeri çok Yüksek
				d	Ayrışma
				f	Bloke olma riski
4	V-hunisi	s	8	b	Viskozite çok düşük
5	5 dk sonra V-hunisi	s		g	Mantık dışı
6	L-kutusu (h ₂ /h ₁)		0.8	a	Viskozite çok yüksek
				c	Eşik kayma değeri çok Yüksek
				f	Bloke olma riski

Tablo 2.7. Sınır değerlerin üstündeki değerler için sorunun belirlenmesi ve etki takip tablosu [42]

No	Metot	Birim	Üst sınır değer	Tablo 2.8 ilgili satır	Muhtemel etki
1	Çökme-Yayılma	mm	750	b	Viskozite çok düşük
				d	Ayrışma
2	T ₅₀ süresi	s	5	a	Viskozite çok yüksek
				c	Eşik kayma değeri çok yüksek
3	J-halkası	mm		b	Viskozite çok düşük
				d	Ayrışma
4	V-hunisi	s	12	a	Viskozite çok yüksek
				c	Eşik kayma değeri çok yüksek
				f	Bloke olma riski
5	L-kutusu (h ₂ /h ₁)		1	g	Hatalı sonuç

Tablo 2.8. Problemlerin çözümüne yönelik yapılması gerekenler [42]

Tahmini Etki		Doldurma Kapasitesi	Geçiş Yeteneği	Ayrışma Direnci	Dayanım	Büzülme	Sünme
A	Viskozite çok yüksek						
a1	Karışım suyunu artır.	+	+	-	-	-	-
a2	Hamur hacmini arttır.	+	+	+	+	-	-
a3	Akışkanlaştırıcı dozajını arttır	+	+	-	+	0	0
B	Viskozite çok düşük						
b1	Karışım suyu azalt.	-	-	+	+	+	+
b2	Hamur hacmini azalt.	-	-	-	-	+	+
b3	Akışkanlaştırıcı dozajını azalt.	-	-	+	-	0	0
b4	Viskozite arttırıcı katkı kullan	-	-	+	0	0	0
b5	Kullandığın tozu incelt	+	+	+	0	-	-
b6	Daha ince kum kullan	+	+	+	0	-	0
C	Eşik kayma değ. çok yük.						
c1	Akışkanlaştırıcı dozajını arttır.	+	+	-	+	0	0

Tablo 2.8. devamı: Problemlerin çözümüne yönelik yapılması gerekenler

Tahmini Etki		Doldurma Kapasitesi	Geçiş Yeteneği	Ayrışma Direnci	Dayanım	Büzülme	Sünme
c2	Hamur hacmini arttır.	+	+	+	+	-	-
c3	Harç hacmini arttır.	+	+	+	+	-	-
D	Ayrışma						
d1	Hamur hacmini arttır.	+	+	+	+	-	-
d2	Harç hacmini arttır.	+	+	+	+	-	-
d3	Karışım suyunu azalt.	-	-	+	+	+	+
d4	Daha ince toz kullan	+	+	+	0	-	-
E	Hızlı işlenebilirlik kaybı						
e1	Hidratasyon hızı yavaş çimento seç.	0	0	-	-	0	0
e2	Geciktirici katkı kullan.	0	0	-	-	0	0
e3	Akışkanlaştırıcıyı değiştir.	?	?	?	?	?	?
e4	Çimento yerine filler ikame et.	?	?	?	?	?	?
F	Bloke olma riski						
f1	Agrega çapını azalt	+	+	+	-	-	-
f2	Hamur hacmini arttır.	+	+	+	+	-	-
f3	Harç hacmini arttır.	+	+	+	+	-	-
G	Hatalı sonuç						
g1	Deney şartlarını kontrol et.	hata	hata	hata	hata	hata	hata

Toz maddeler, parçacık boyutu 125 mikronun altında her türlü inorganik madde olarak tanımlanabilir.

Toz maddeler KYB’de viskozite arttırmak amacıyla kullanılırlar. Parçacık boyutunun küçülmesi parçacıklar arası etkileşimin artmasına sebep olur ve bu etkileşim viskoziteyi artırır [43].

Viskozite arttırmak için kullanılabilecek toz maddeler, uçucu kül, silis dumanı, doğal ve yapay cürufklar, kuvarz kumu tozu, kireçtaşı tozu ve cam tozudur [44].

Yapılan araştırmalarda %10'u 0.2 mm'den geçip 0.1 mm üzerinde kalan tozlar KYB için olumsuz performans göstermiştir [45]. Toz malzeme oranının 400 ila 650 kg/m³ arasında olması tavsiye edilmektedir. Bu miktar kum ve agrega tanecikleri arasındaki boşlukların doldurması için ve daha iyi sıkışma sağlanması için önerilmektedir [46].

KYB dizaynında ince ğtlmş (Blaine değeri > 250 m²/kg) kireçtaşı tozu, granit, kuvarz kumu kullanılabilir. Taş tozunun beton karışımında homojen dağılması sağlanmazsa, dayanım ve dayanıklılık açısından olumsuz etkiler yaratabilir [42].

Taş tozu ile üretilen KYB, diğer puzolanik maddelerin kullanıldığı KYB'lere kıyasla, kr işlemine daha az hassastır. Taş tozunun pürüzlü mikro yüzeyi nedeniyle, yüksek oranda karışım suyu absorbe etmesi ve erken dayanımı hızlandırıcı etkisi sebepleriyle küre hassasiyetinin azaldığı kabul edilebilir [47].

Kendiliğinden yerleşen beton üretiminde kullanılan kum içinde 0.125 mm elekten geçen toz malzeme oranının yüksek olması halinde bu miktar, inert fillere dahil edilmelidir. Böylece hesaplamalar daha hassas yapılabilir [15].

Uçucu kül, taş tozuna kıyasla düşük eşik kayma gerilmesi değeriyle daha yüksek viskozite elde edilmesini sağlar [48].

Uçucu Külün KYB zerine sağladığı olumlu katkılar söyle sıralanabilir:

- Hidratasyon ürünlerini arttırır ve betonun porozitesini azaltır. Mikro agrega etkisi yaparak gradasyonu düzenler ve optimum sıkışmayı sağlar. Böylece betonun dış etkilere karşı dayanıklılığı artar [49].
- Hidratasyon hızını ve ısısını düşürür. Sıcaklık yükselmesinden doğan su kaybını ve çatlakları azaltır. Fakat priz alma süresini geciktirmesi erken dayanımı olumsuz etkiler [50].
- Normal betona kıyasla aynı dayanımı elde etmek için, gerekli imento miktarını azaltarak ekonomik fayda sağlar. Aynı zamanda atık bir ürün değerlendirildiği için çevresel yararları da hesaba katılmalıdır.
- Toz türü seçilirken fiziksel, kimyasal özellikler ile mekanik performansın yanı sıra maliyet unsuru da dikkate alınmalıdır.

2.6.2. Taze KYH Özellikleri

KYH'nın taze iken üç önemli özelliğinin uygun testler ile ve göz ile muayene sonucu sağlanması gerekmektedir. Bu özellikler aşağıda özetlenmektedir:

- Doldurma Kabiliyeti: Taze halde KYH'nın kendi ağırlığı altında kalıp içinde akıp kalıbı doldurma özelliğidir. 'Çökme Yayılma' deneyi ve bazı başka deneyler ile belirlenebilir.
- Geçme Kabiliyeti: Taze halde KYH'nın donatı ağı arasından geçme özelliğidir. 'U- Kutusu' deneyi ve başka bazı deneyler ile belirlenebilir.
- Ayrışma Direnci: Taze halde KYH'nın kendi ağırlığı altında akarken homojenliğini muhafaza etme, segregasyona uğramama özelliğidir. 'V-Hunisi' deneyi, Slump yayılma deneyi sonucu yaklaşık daire şeklinde yayılmış olan taze KYH'nın gözle incelenmesi ve bazı başka deneyler ile belirlenebilir [51].

2.6.2.1. İşlenebilirlik ve Kıvam

Bu terimler taze beton, harç veya çimento hamuru için en önemli iki terimdir. İşlenebilirlik, çimento hamuru içinde herhangi bir şekilde dağılmış agregaya sahip her türlü taze beton ve harç karışımlarının değerlendirilmesinde kullanılırken, kıvam terimine ise agrega bulundurmayan, çimento ve su ile meydana gelmiş çimento hamurunun yorumlanmasında ihtiyaç duyulmuştur.

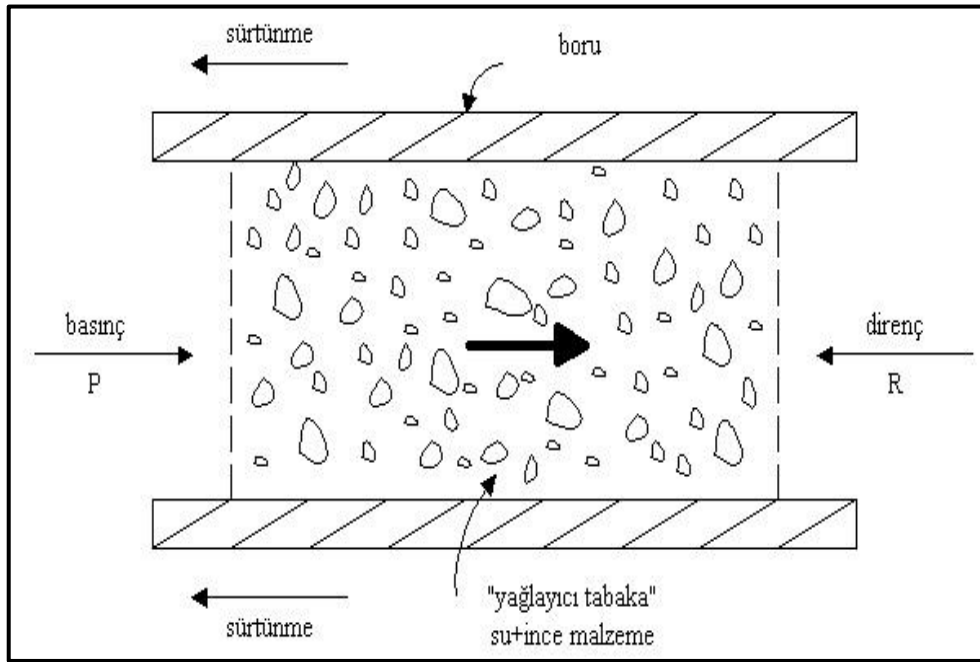
İncelenen bu iki terim; işlenebilirlik ile kıvam arasındaki farkın uygulamada yararlı olduğu gözlemlenmiştir. Çünkü çimento hamuru özellikleri doğrudan taze harç veya beton özellikleri ile ilişkilendirilememektedir [52].

2.6.2.2. Hareketlilik ve Pompalanabilirlik

Betonun taze halde iken taşınması istenen yere yerleştirilmesi, bu karışımın harcanması istenen en az bir dış güç ile ister oluk içinde isterse pompa ile kolayca akıtılabilmesi ve bu süreç içerisinde bileşiminde veya özelliklerinde belirli bir değişiklik olmadan son konumuna ulaşabilmesi gereklidir. Bu konu bir hidrodinamik problemidir ve zorlamalı bir boru içinde hareket eden süspansiyonun hidrodinamiğinin incelenmesi gerekir. Betonun karmaşık kalıpları tamamen doldurması beklenir ve kesintisiz olarak donatılar arasından ve çevresinden kolayca akabilmesi istenir. Beton karışımının köprü ayağı ve fore kazık gibi su altında veya derin çukurlarda akmasının gerektiği uygulamalar da vardır.

Bu nedenle hareketlilik, taze betonun akış kapasitesi olarak tanımlanır. Sırasıyla sarsma, titreşim ve yerçekimi etkisi altındaki hareketliliğin mertebesini ölçmek amacıyla yayılma deneyi ve bunun gibi “akış” deneyleri olsa da hareketliliğin doğrudan ölçümü için herhangi bir deney mevcut değildir.

Şantiye sahasında taşımak ve yerleştirmek için taze betonun pompalanması oldukça yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Kolay bir pompalama için olabilecek en düşük miktardaki basınç ile ve tıkanma tehlikesi olmadan boru içinde kütleli bir şekilde akması gereklidir. Yeterli bir kararlılığa sahip bir betonun iyi derecede hareketlilik, pompalanabilirlik gibi özelliklere sahip olması istenir. Ayrıca taze karışımı boru içinde hareket ettirmek amacıyla dışarıdan basınç uygulandığında hareketlilik ve kararlılığın sürekli olması pompalanabilirlik için gerekli şartlardan biridir. Bu sebeple pompalanabilirlik, çevresini saran boru ile birlikte basınç altındaki betonun hareketlilik ve kararlılığı olarak açıklanabilir.



Şekil 2.4. Boru içinde taze beton akışı [130]

- Taze Betonun Pompa ile İletimi ve Beton-Boru Sürtünmesi

Şekil 2.4’te görülen süspansiyon tıkaç akımının oluşması için boru çeperinde kaygan bir tabakanın meydana gelmesi ve boru uzunluğunca bu tabakanın varlığını koruması

gereklidir [130]. Bu tabaka harcın ince taneleri, çimento ve sudan oluşur. Her ne kadar pompalama işlemine başlarken borudan önce bir harç kütlesi gönderilirse de, üretim süresince bu ilk tabakanın yerinde kalması mümkün değildir. Böylece daha sonra beton kütesinden sızan ince harç sayesinde yenilenir ve sürekliliğini korur.

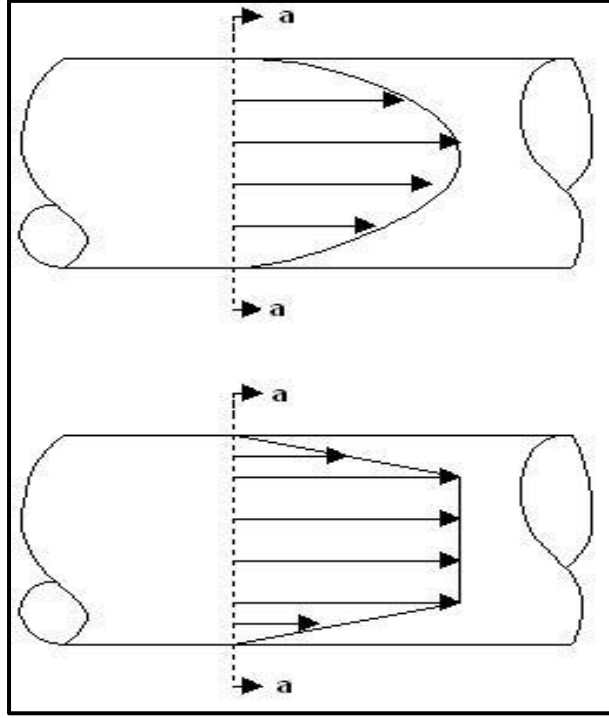
Şekil 2.5'te gösterilen basınç altında boru içinde hareket eden newton sıvısında sürtünme direncinin düşük düzeyde kalmasını sağlayan bu harç fazın aşağıdaki niteliklere sahip olması gerekir.

- Yağlayıcı nitelikli harç, uygulanan basınç nedeniyle esas beton kütesinden çepere doğru sızabilmelidir. Sızmayı sağlayan borudaki radyal basınçtır, bu ise borudaki boyuna istikametteki basınç sonucu meydana gelir. Bu iki basınç doymamış durumda hemen hemen eşit kabul edilebilir, ancak doymuş durumda radial gerilme boyuna gerilmenin %25'ine kadar ineilmektedir [53].
- Yağlayıcı harç tabakası suyunu kaybetmemelidir. Bunun için taşıyıcı ile veya hidrasyon başlangıcında puzolanik maddelerle veya viskoziteyi arttıran kimyasal katkılarla ince malzeme eksikliğinin giderilmesi uygundur [54-56].
- Yağlayıcı tabaka ve boru arasındaki sürtünme kuvveti düşük olmalıdır.

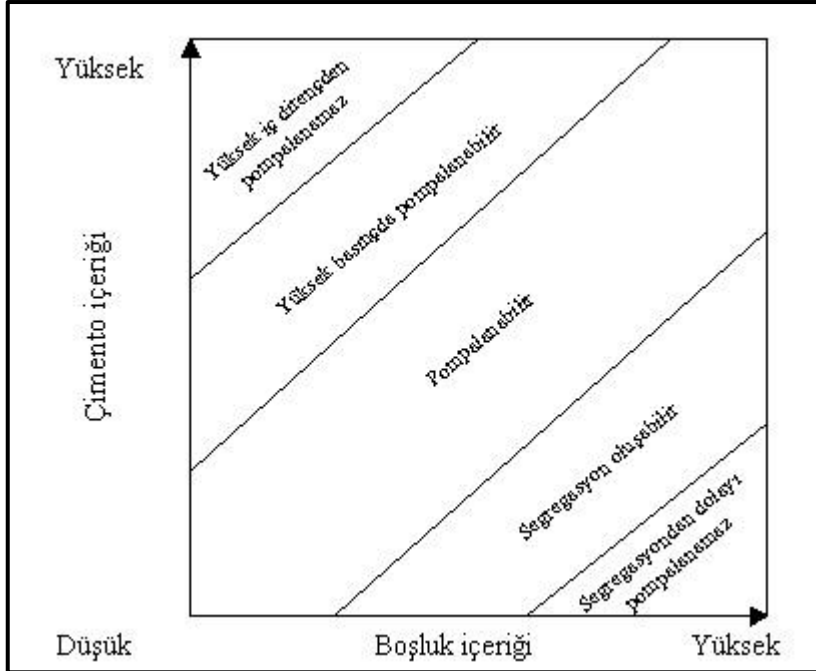
Taze betonun boru içinde hareket etmesi için dışarıdan uygulanan basınç, agrega granülometrisinin önemini işaret eder. Agrega parçacıklarının daha yoğun olarak düzenlenmesi sonucu karışımdaki boşluk muhteviyatı azalır ve böylece pompalanabilirlik ihtimali çok daha fazla yükselir. Çimento da dahil olmak üzere ince parçacıklar ile agregadaki boşluk oranı arasındaki ilişkinin karışımın pompalanabilirliğine etkisi Şekil 2.6'da gösterilmektedir.

Çimento miktarı da dahil olmak üzere toplam bağlayıcı ince malzeme miktarı çok yüksek olursa sürtünme kabul edilemeyecek kadar artar ve pompalama basıncı yükselir. Böyle bir durumda su miktarı arttırılarak, akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak veya agrega granülometrisi değiştirilip boşluk oranı yükseltilerek pompalanabilirlik geliştirilebilir.

Düşük çimento dozajlı betonlarda (grobeton gibi) veya agrega granülometrisi uygun olmayan karışımlarda oluşacak olumsuzluklar, betonun viskozitesini arttıran “yoğunlaştırıcı” katkıları ile aşılabılır.



Şekil 2.5. Basınç altında boru içinde hareket eden newton sıvısında hız dağılımı ve bir süspansiyon lamine akımının hız dağılımı [53]



Şekil 2.6. Bağlayıcı (Ç, UK, KT) malzeme miktarı ve boşluk içeriğinin pompalanabilirlik üzerindeki etkisi [54]

2.6.2.3. Kararlılık, Ayırışma, Terleme

Kararlılık, taze karışımın ilk andaki üniformluğunun tüm taşıma ve yerleştirme süresi boyunca korunabilme kapasitesi olarak tanımlanabilir. Bunun yanı sıra karışımın ayırışma ve terlemeye karşı direnebilme yeteneği olarak da tarif edilebilir. Yani kararlılık ayırışmama ve terlememeyi içermektedir. Taze betonun kalıplara yerleştirilmeden önce elbette taşınabilmesi ve yerleştirilebilmesi istenir. Çünkü karışımın karıştırıcıyı terkettiği anda üniformluğu ve homojenliğini etkileyebilecek olan çarpma yüklerine, basınç ve kaymaya maruz kalacağı düşünülmektedir.

Ayırışma, karışımdaki bileşenlerin dağılımının ilk andaki üniformluğu ve homojenliği azaldığı zaman meydana gelir. Bunun sonucunda taze karışımın diğer özellikleri üniformluğunu kaybeder, hareketlilik veya yerleşebilirlik gibi davranışları da değişir. Ayırışma terimi iri agreganın dağılım düzeninin kaybı ile aynı anlamda kullanılmaktadır. Böyle bir durumda iri agreganın karışımın dibinde veya bir köşesinde birikir.

Taze betonun kararlılığı önemli bir özellik olsa da, değerlendirilmesinde zamanımızda bile geniş kabul görmüş veya standartlaşmış deneyler bulunmamaktadır. Bu sebeple taze beton kararlılığı hakkında dolaylı yorumlar yapılabilmekte ve bu yorumlar oldukça kişisel kalmaktadır.

Klasik çökme deneyinde kayma göçmeleri gözlemlendiğinde kararlılığın zayıf olduğu söylenebilir. Bunun kimi uygulamalarda çökme okuması yapıldıktan sonra çökmüş betona hafifçe vurarak kararlılık hakkında bir yargıya varıldığı bilinir. Eğer beton kayar, dağılır veya devrilirse kararlılığın zayıf olduğu anlaşılır. Ancak orijinal şeklini bozmadan biraz daha çökerse beton için kararlı denilebilir.

Yayılma deneyi, karışım numunesini sarsarak kararlılığını sınamaktadır. Kararsız karışımların ayırışma ve terlemeye olan eğilimleri yayılma deneyi sonunda numunenin çevresini saran su veya çimento hamurundan anlaşılır. Sarsma sonucu su veya çimento hamuru kararsız davranarak agregaya ile birlikte hareket etmemiş ve ayrılmıştır.

Aşağıdaki etkenler taze beton kararlılığını değiştirirler.

Kararlılığı Düşürüp Ayırışma Riskini Arttıran Etkenler:

- Agreganın granülometrisinde boşluk bulunması veya en büyük agreganın boyutu 40 mm ve daha fazla olması.

- Çimento hamurunun özellikle ince agrega ile birlikte yetersiz olması.
- Karışımında yetersiz ince agrega oranı bulunması. Normal bir karışımında kumun inceliğine bağlı olmakla birlikte % 30 - % 40 civarında kum bulunur.
- İri, köşeli kırmataş agregasının çok fazla kullanılması.
- Çok yüksek su/çimento (s/c) oranı. Bu durumda çimento hamurunun kıvamı düşer ve agreganın düzgün dağılımını sağlayan kohezyon yetersizleşir.
- Çok düşük (s/c) oranında, çimento hamuru akıcı davranmaz ve agreganın hareketini kolaylaştıracak ortamı meydana getirmekten uzak halde bulunur. İri agreganın yoğunluğunun çimento hamuru ve ince agreganinkinden çok farklı olması.
- Süper akışkanlaştırıcıların gerektiğinden çok fazla miktarda kullanılması.

Kararlılığı Arttırıp, Ayrışma Riskini Azaltanlar :

- Agrega granülometrisinin uygun olması.
- Optimum su/çimento oranı ve çimento hamuru miktarı
- İnce malzeme miktarının arttırılması (çimento ve yerine kullanılanlar da dahil olmak üzere).
- Karışımın sıvı fazını yoğunlaştırıcı katkıların kullanılması.
- Hava sürüklenme.

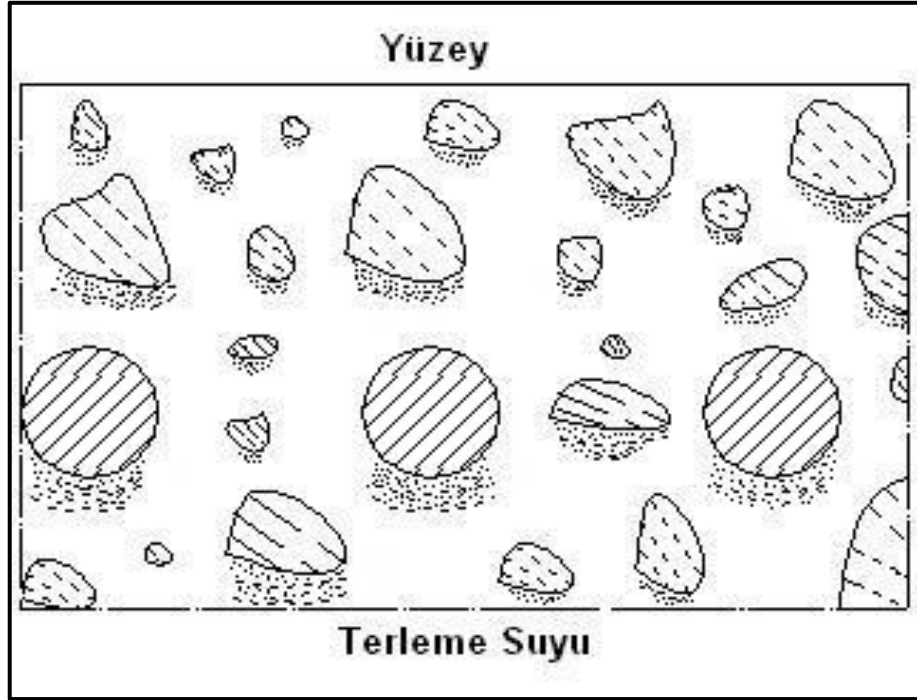
Suyun betondan ayrılarak yüzeye çıktığı özel bir çeşit ayrışmaya terleme denir. Katkısız bir betonda en düşük yoğunluğa sahip bileşen sudur, bundan dolayı su taze karışımın üst yüzeyine çıkmaya çalışır. Ayrışmış su yüzeyde toplanır, burada çok yüksek su/çimento oranına ve ters orantılı olarak zayıf dayanım ve dayanıklılığa sahip tabaka şeklinde çimento hamuru oluşturur.

Kuru, sıcak ve rüzgârlı hava koşullarında yerleştirilmiş taze betonun yüzeyine ulaşan su kısa sürede buharlaşır. Bu süreç sonunda plastik rötre oluşur ve çatlak oluşma ihtimali yükselir. Su beton içinde yüzeye doğru yükselirken iri agrega parçacıklarının ve yatay donatıların altında birikebilir. Böylece Şekil 2.7’de de görüldüğü gibi sertleşmiş betonda dayanımı ve aderansı düşürecek boşluklar meydana gelir.

Bağlayıcı madde olarak bilinen silis dumanı, uçucu kül, kireçtaşı tozu veya bunlar gibi çimento yerine kullanılabilecek ince malzemelerin betona eklenmesi terlemeyi azaltır. Başka bir seçenek ise betonun hava içeriğini hava sürükleyici katkı kullanarak arttırmaktır.

Artan kuruma r  tesinden dolayı beton çatlamaya karşı daha hassas olsa da   imento dozajının arttırılması veya daha ince   imento kullanılması terlemeyi düşürebilir.

D    meler, kaplamalar ve yollar gibi yüzeyi derinlemesine yerleştirme ve perdahlama gibi terlemeyi arttırıcı işlemlere maruz kalacak betonları terlemeye iyi direnç gösterecek kar  ı  mlar ile   retmek önemlidir.



Şekil 2.7. Terleme ile beton suyunun ayrışması ve agrega altında birikmesi [56]

2.6.2.4. Yerleşebilirlik

Normal bir betonun işlenebilirliği, kar  ı  mın içine hapsolmüş havanın kar  ı  tırma ve yerleştirme sırasında yüzeye çıkararak kaçmasına izin verecek kadar yeterli değildir. Hapsedilm     hava, mukavemet ve dayanıklılığın ikisini birden önemli ölçüde düşürmektedir. Bunun için teknik ve ekonomik olarak mümkün olduğu kadar hapsolmüş havayı mümkün olan en büyük oranda çıkarmak gereklidir. Hava boşlukları ancak iyi bir yerleştirme ile yok edilebilir. Sıradan bir beton iyi yerleştirildiğinde genellikle hapsolmüş hava %1 veya %2 mertebesine d    r. Bu mertebeyi daha da düşürmek veya sıfıra indirmek çok fazla ekonomik değildir.

Yerleştirme süreci enerji girişı ve buna ek olarak emek ve denetim ihtiyacı gerektirir. Verilerin gösterdiği enerji miktarı veya belirli bir taze beton karışımını en elverişli şekilde yerleştirmek için gerekli çaba uygulamada çok fazla işe yaramaktadır. Bahsedilen bu enerji ihtiyacı yerleşebilirliğin tanımlanmasında belirleyicidir.

Yerleşebilirlik ölçümü için kullanılan çeşitli deneylerden iki tanesi standartlaşmıştır. Bunlar; (DIN 1048) yerleşebilirlik deneyi ve (BS 1881:Bölüm 103:1983) yerleştirme faktörü deneyidir [148].

Yerleştirme faktörü deneyi yerleşebilirliği aynı karışımdaki kısmen yerleşmiş betonun yoğunluğunun tam olarak yerleşmiş kısmına oranına göre değerlendirmektedir. Bu deney standart bir iş sonucu betonun yerleşme derecesini ölçer. Ancak kısmi yerleştirme iki küçük serbest düşmenin numune üzerindeki darbe etkisi ile tamamlanır. Burada yerleştirmek için sarfedilen güç, uygulamada yerleştirme için kullanılan titreşim ile kıyaslandığında çok küçük kalmaktadır. Bu sebeple tam anlamıyla gerçeği yansıttığı söylenemez.

Alman yerleşebilirlik deneyi, yerleştirme faktörü deneyi'ne göre daha basit olup, amacına ve gerçeğe uygundur.

2.6.2.5. Perdahlanabilirlik

Perdahlanabilirlik, işlenebilirliğin taze betonun özellikleri ile çeşitli türlerdeki perdahlanmanın başarılı uygulamaları arasındaki ilişkiyi de kapsaması amacıyla listeye eklenmektedir. Bu terimin tatmin edici bir tanımı bulunmamaktadır. Her çeşit perdah işinin kendine özgü işlenebilirlik derecesine ihtiyacı vardır. Bunun için uygun hareketlilik, yüksek kararlılık, iyi terleme direnci ve yeterli kohezyon gibi ölçütlerin dışında bir yenisini getirmek imkânsızdır.

Perdahlanabilirlik esas olarak derin ve karmaşık şekilde uzanan kalıplarla karşılaşıldığında veya döşeme ve kaplama olarak taze beton dökümü gerektiğinde önem kazanır. Uygulamada perdahlanabilirlik hakkında veya daha fazla olarak işlenebilirlik deneylerinden çıkarımlar yapılır. Ancak genellikle pratik perdah uygulamalarından edinilen tecrübeler ve buna ek olarak karışımın görsel değerlendirmeleri kullanılır.

Taze beton viskoz sıvı olarak incelenen bir yapı malzemesidir. Reoloji de maddenin deformasyonu ve akış davranışı ile ilgilenen bir bilim dalı olarak kabul edilir. Pratikte reolojinin incelediği malzemeler, ideal malzemelere göre çok daha karmaşık davranışlar

gösterir ve malzeme özellikleri arasında rijit sınırlar bulunmaz. Betonun hem taze hem de sertleşmiş haldeki davranışları için reolojik metodlar uygulanabilir. Sertleşmiş betonun elastik olmayan davranışının pratikte önemli olduğu durumlar da vardır. Bu durumlar sertleşmiş betona olabilecek en yüksek değere yakın gerilmeler uygulandığında oluşan plastik deformasyonlar veya uzun süreli yüklemeler sonucundaki sünme deformasyonları dikkate alındığında ortaya çıkar. Her durumdaki ideal katıların deformasyon kuralları birçok durumda sertleşmiş beton davranışını yeterli derecede tanımlar veya tahmin eder.

Taze beton söz konusu olduğunda reolojik metodların uygulanmasında çok daha geniş bir faaliyet alanı mevcuttur. Bütün betonlar çimento ile suyun temas ettiği ilk andan ideal katı kurallarının uygulanması için yeterli olacak katılaşmaya ulaşıncaya kadar geçen süreyi geçirmek zorundadır. “Taze Beton” terimi bu süreyi işaret eder. Taze beton, en önemli bileşenlerinden biri olan taze çimento hamuru ile birlikte pratik reolojinin faaliyet alanında incelenirler.

Taze beton genellikle uygulamada, sıvı ortam (çimento hamuru) içinde agreganın dağılımı olarak kabul edilir. Çimento hamurunun kendisi katı parçacıkların (çimento) sıvı ortamda (su) asılmalarından ibaret olmasından dolayı taze betonu çok fazlı bir malzeme olarak kabul etmek daha uygun olacaktır.

Malzeme üzerinde reolojik ölçümler yapılırken uygulanan yöntem önemlidir. En çok kullanılan sabit kayma gerilmesine maruz bırakılmasıdır. Pratikte ise bu duruma pek rastlanmaz. Taze karışım pompalanırken, kalıplara yerleştirilirken veya transmiksörlerle taşınırken çok farklı, dinamik ve değişken kayma gerilmeleri altında kalır. Son zamanlardaki çalışmalarda bu durum gözönüne alınmakta ve deney koşulları gerçek beton üretim şartlarına uygun hale getirilmektedir.

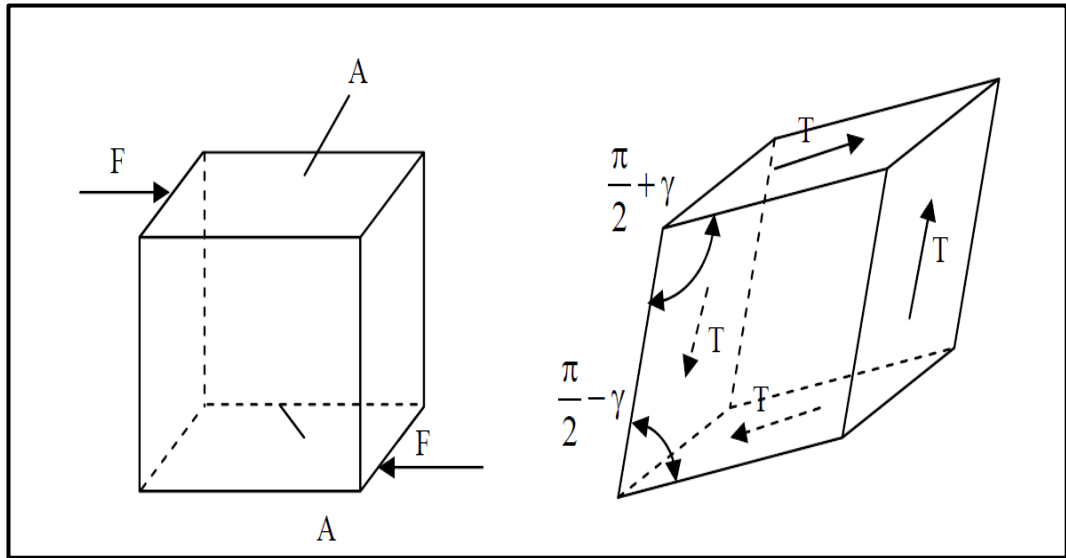
Taze beton gibi çok fazlı bir malzemenin şayet reolojik özellikleri önceden değerlendirilmişse, uygulanan kayma gerilmesi şiddeti önemlidir. Çünkü malzeme çok düşük gerilmelerde farklı, çok yüksek gerilmelerde farklı davranabilmektedir. Bundan dolayı önceden belirlenebilecek malzeme özelliklerine uygun aralıklarda ölçümler yapılmalıdır [57].

Temel reolojik verilerin ve özelliklerin anlaşılabilmesi için, taze beton karışımlarının davranışları hakkındaki mevcut bilgilerin taranması öncelikle gereklidir.

Reolojik parametreler, belirli bir gerilme veya başka bir deyişle belirli miktardaki deformasyonun sebep olduğu gerilme uygulandığında oluşan akış yahut deformasyon miktarının tahmin edilmesini mümkün kılar. Teorik ve pratik reoloji taze beton kadar karmaşık bir malzemeye uygulandığında sınırlamaların farkında olmak da önemlidir.

2.6.2.6. Akış Modelleri

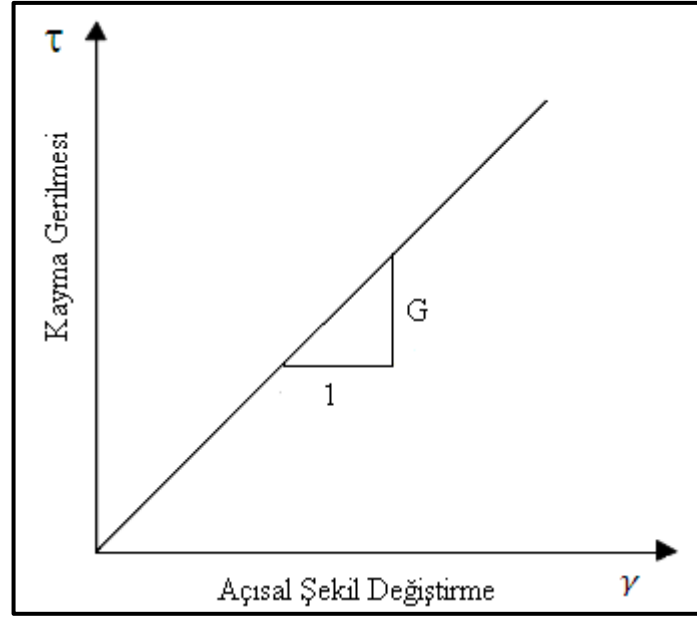
Reolojide en basit viskoz sıvı modeli Newton sıvısıdır. Taze betonun viskoz bir sıvı olarak incelenebileceği kabul edilebilir bir varsayımdır. Bu malzeme türünde kayma gerilmesi ve viskozite katsayılarını bulmak için ideal katıların davranış tarzından yararlanılabilir. İdeal katıya yük uygulanması durumunda Şekil 2.8’deki gibi deformasyon oluşacaktır [58]. Böyle katı bir madde Hooke yasasına uyar: “Yük ile meydana gelen gerilme, bu gerilmenin miktarı ile doğru orantılı ve malzemelerin rijitliği (elastisite modülü) ile ters orantılı olarak deformasyon oluşturur. Bu durumda yük uygulandığı anda zamanla değişmeyecek ani bir deformasyon oluşur. Yük kaldırıldığı anda ise yapı ilk şekline dönecek ve deformasyon (şekil değiştirme) ortadan kalkacaktır.



Şekil 2.8. A alanı üzerinde etkiyen F kayma kuvveti ve kayma şekil değiştirmesi [58]

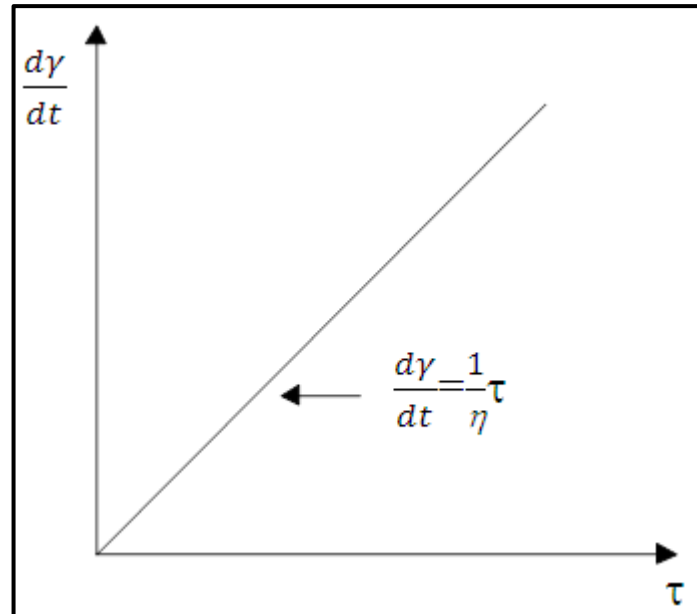
Aynı ilişki ideal katı üzerine τ kayma gerilmesi etkidiği zaman da geçerlidir. Kayma deformasyonu γ , kayma gerilmesi ile Şekil 2.9’daki gibi doğru orantılıdır [58]. Bu oranın katsayısı ise kayma modülü G ’dir. İlişki ise aşağıdaki denklem ile tanımlanabilir.

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (2.3)$$



Şekil 2.9. İdeal katılarda G kayma modülü [59]

Eğer kayma gerilmesi ideal Newton sıvısına uygulanırsa sıvının şekil değiştirmesine sebep olur ve ideal katıya benzemeyerek, Şekil 2.10’da görüldüğü gibi gerilme üzerinde kaldığı sürece sıvı şekil değiştirmeye devam eder [58].



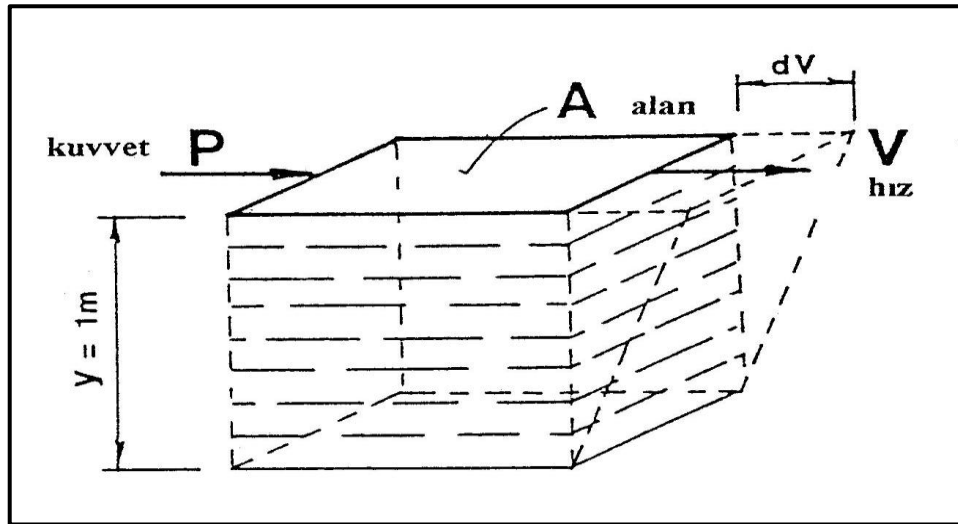
Şekil 2.10. Newton sıvısı [58]

Birim zamandaki deformasyon oranı veya daha genel olarak deformasyon oranının zamana bağlı diferansiyeli aşağıdaki denklemde görüldüğü üzere kayma gerilmesi τ ile orantılıdır.

$$\tau = \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt} = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2.4)$$

Burada, (2.3) bağıntısındaki kayma modülü G , viskozite katsayısı η ile yer değiştirmiş durumdadır. Sıvılarda kayma genellikle biri diğerine göre bağıl olarak hareket eden iki paralel yüzey ile temsil edilir.

Sürekli devam eden kayma deformasyon oranı hız (V) olarak tanımlanabilir. Şayet sıvı laminar (düzgün) harekette kalırsa, aralarında y birim mesafesi bulunan hareketli yüzeylerin hız değişim oranının orantılı olduğu kayma gerilmesi Şekil 2.11’de gösterildiği gibi Newton akışında oluşacaktır [59].



Şekil 2.11. Newton sıvısının viskoz akışı [59]

Kayma gerilmesi daha genel terimlerle tanımlanırsa:

$$\tau = \eta \cdot \frac{dV}{dy} = \eta \cdot D \quad (2.5)$$

[D : hız değişkeni: (dV/dy)]

Hız gradyanı, zaman içindeki kayma deformasyonunun değişme oranına

($\frac{dV}{dt} = \gamma$) eşitlenebilirse denklem şu şekilde yazılabilir:

$$\tau = \eta \cdot \gamma \quad (2.6)$$

Düzgün akan Newton sıvısının temel reolojik özelliği viskozitedir;

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \text{Kayma gerilmesi/Kayma oranı} \quad (2.7)$$

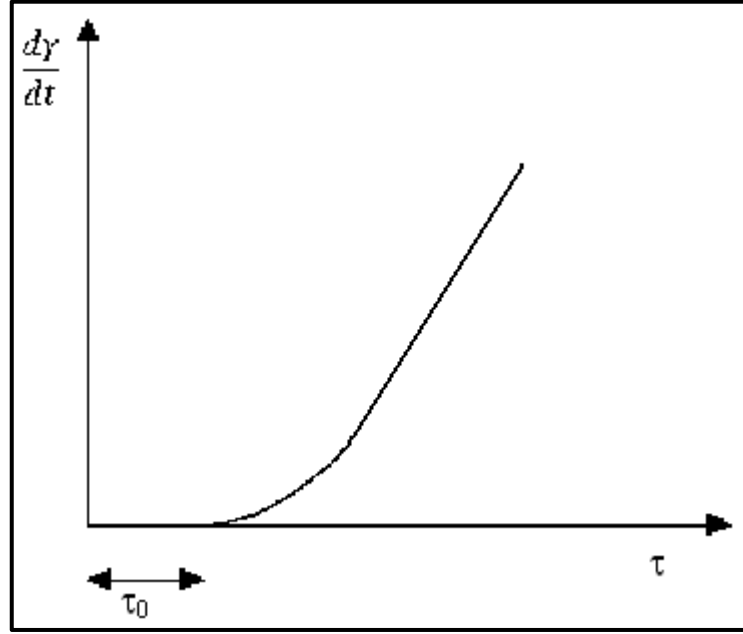
$$= \text{Pa/sn}^{-1} = \text{Pa.sn}$$

Newton sıvısında viskozite η , uygulanan kayma gerilmesi τ ve kayma oranından $\dot{\gamma}$ bağımsızdır. Bundan dolayı tek ölçüm ve bir çift veri ile Kayma gerilmesi/Kayma oranı diyagramı çizilebilir.

Newton sıvılarının viskozitesi çok büyük miktarda sıcaklığa, biraz daha az denebilecek kadar da basınca bağlıdır. Bundan dolayı söz konusu kavramlara dikkat edilmeli ve doğru sonuçlar elde edebilmek için uygun hale getirilmelidir.

Viskozitenin hesaplanmasında kılcal tüpler, dönen eşeksenel silindirler, düşen küreler vb. deney aletlerine dayanan birçok yöntem mevcuttur. Ayrıca viskozite ölçümü başlığı altında oldukça fazla yayın yapılmıştır.

Betonun ve harcın davranışı şimdiye kadar anlatılan Newton sıvısından farklıdır. Ayrıca Newton sıvılarının basit davranışını göstermeyen çok fazla miktarda sıvı vardır. Beton da dahil olmak üzere bunların özellikleri yani viskoziteleri, uygulanan kayma ve kayma deformasyon oranı şiddetinden bağımsız değildir. Bu sıvılar kayma uygulandığı süre boyunca bu sürenin uzunluğuna bağlı olarak akışlarını değiştirebilirler. Kayma oranındaki değişiklikler de etkilidir. Bazı viskoz sıvılarda ve betonda ise akışa geçebilmek için Şekil 2.12’de de görüldüğü gibi akma gerilmesi τ_0 (eşik kayma gerilmesi) denilen belirli bir seviyedeki kayma gerilmesine ihtiyaç duyulur. Ayrıca $\frac{d\gamma}{dt}$ ve τ arasındaki bağıntı başlangıçta doğrusal değildir, artan şekil değiştirme hızı ile azalan bir kayma direnci gösteren (tikotropik) bir eğri formundadır. Bu davranışa uyan cisimlere reoloji biliminin kurucusu olan Bingham’ın adı verilmiştir. Şekil 2.12’de Bingham sıvısının diyagramı gösterilmiştir [59].



Şekil 2.12. Bingham sıvısı [59]

Newtonien olmayan sıvılar için değişik bilim adamları Bingham modelinden ayrı çimento hamuru ve harçlar için incelemeler sonucunda farklı matematiksel ifadeler elde etmişlerdir. Aşağıda bunlardan bir bölümü verilmiştir.

Bingham : $\tau = \tau_0 + \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt}$ (2.8)

Sisko : $\tau = a \cdot \frac{d\gamma}{dt} + b \cdot \left(\frac{d\gamma}{dt}\right)^c, \quad c < 1$ (2.9)

a,b,c: katsayılar

Von Berg : $\tau = \tau_0 + b \cdot \sinh^{-1}\left(\frac{d\gamma}{dt} \cdot \frac{1}{c}\right)$ (2.10)

b,c: katsayılar

Eyring : $\tau = a \cdot \sinh^{-1}\left(b \frac{d\gamma}{dt}\right)$ (2.11)

a,b: katsayılar

$$\text{Herscell-Bulkley :} \quad \tau = \tau_0 + K \left(\frac{d\gamma}{dt} \right)^n \quad (2.12)$$

K:kıvam değeri, n:kuvvet

$$\text{Robertson-Stiff :} \quad \tau = A \left(\frac{d\gamma}{dt} + B \right)^C \quad (2.13)$$

B: kıvam değeri, A,C:kuvvet

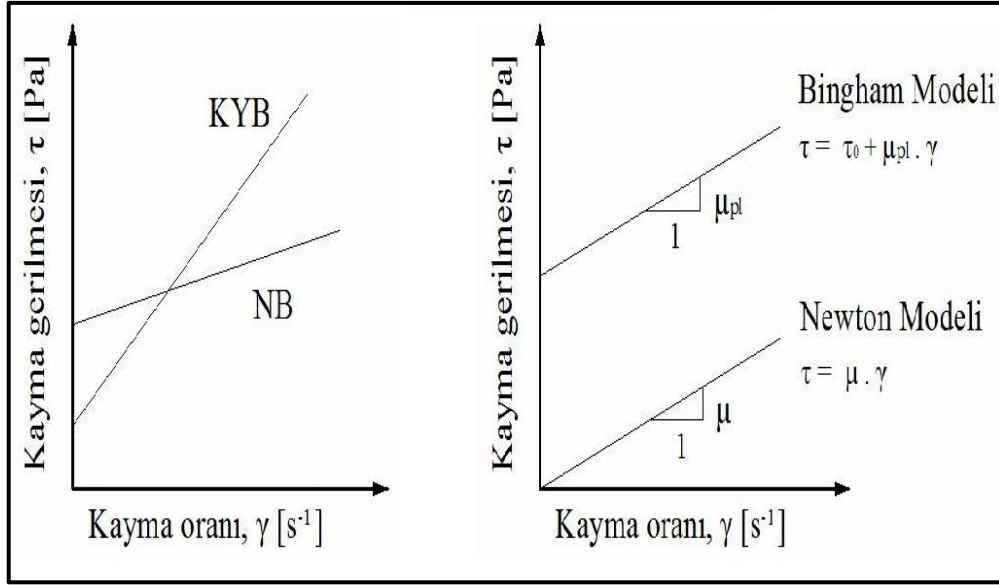
Yukarıdaki ifadelerden Robertson-Stiff ifadesinde $C=1$ değeri verilirse denklem Bingham ifadesine dönüşmekte ve $(\tau=A.B)$, diğer yandan $B=0$ için kuvvet kuralına uymakta, $B=0$ ve $C=1$ içinse Newtonien sıvılar için geçerli ifadeyi vermektedir. Dikkatli incelendiğinde bu ifadeler arasında kullanılan parametreler açısından büyük farklılıklar bulunmamaktadır. Bingham modeli dışında bu teorik formüllerin beton teknolojisinde kullanılmasının kolay olmadığı ve pratik bir yarar sağlayamayacağı açıktır. Bingham cismi Şekil 2.13'te görüldüğü gibi basitleştirilerek ve eğrinin doğrusal bölümü uzatılarak bağıntı, tamamen doğrusal hale getirilmiştir. Böylece viskozite de tek bir değere indirgenmektedir ve plastik viskozite adını almaktadır, Bingham cisminin bünye denklemi de aşağıdaki gibi olmaktadır [58, 59].

$$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \frac{d\gamma}{dt} = \tau_0 + \eta_{pl} \gamma \quad (2.14)$$

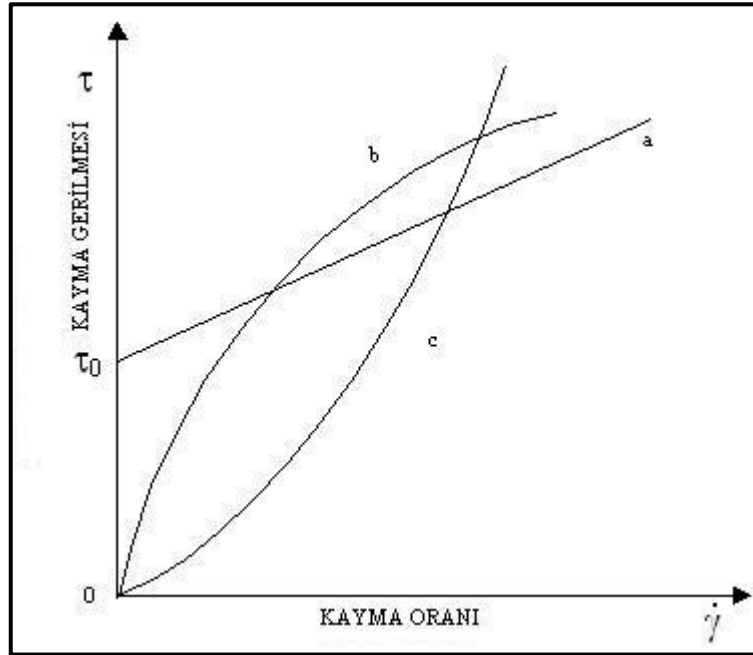
Şekil 2.14'teki düz çizgi, τ kayma gerilmesi ile γ kayma hızı arasındaki basit orantı ilişkisini göstermektedir. Burada sözü edilen ilişki doğrusal olmayan hale gelebilir ve/veya sıvı akma gerilmesi sergileyebilir. Şekil 2.14'te Newton sıvısı olmayan değişik tiplerdeki sıvıların davranışı eğrilerin şekilleri ile gösterilmektedir.

Şekil 2.14'teki b eğrisi tipik yalancı-plastik davranışı temsil etmektedir. Bu davranışa göre kayma oranı arttıkça plastik viskozite azalır fakat sözkonusu değişim doğrusal değildir. Bu olaya kayma incilmesi denir [59].

Şekil 2.14'teki c eğrisi ise bir çeşit kayma kalınlaşmasını temsil eder. Buna aynı zamanda genişleme de denir. Bazı malzemelerin, artan kayma kuvveti etkisi altında kaldıklarında hacimlerinde artış olur ve bu olaya hacimsel genişleme denir.



Şekil 2.13. Normal ve kendiliğinden yerleşen taze harç ve betonlar için kabul edilen Bingham ve Newton modellerinin birlikte gösterimi [59]



Şekil 2.14. Newton olmayan değişik sıvılar için kayma gerilmesi ve kayma oranı [59]

Yalancı-plastik sıvılar için kayma gerilmesi ve kayma oranı arasındaki ilişki genellikle üstel bir fonksiyonla tanımlanır.

$$\tau = A \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2.15)$$

A: Sıvının kıvamına bağlı bir katsayı

n : Akış göstergesi n<1 için kayma-incelmesi

n>1 için kayma-kalınlaşması

Newton sıvısı olmayan malzemelerin birçoğu zamana bağlı davranış gösterir. Bu davranışa dayanarak Newton sıvısı olmayanların iki temel çeşidi tanımlanabilmektedir; bunlara tiksotropik ve anti-tiksotropik (reopektik) adı verilmektedir.

Tiksotropik sıvılarda, sabit kayma oranı altında, zaman içinde, görünen viskozitede azalma meydana gelmektedir veya aynı etki ölçülen kayma gerilmesinde azalma oluşturarak da kendisini gösterebilmektedir. Zamanla kayma gerilmesindeki azalma oranı düşer. Kayma oranı sıfıra geldiğinde ise tiksotropik malzemelerin çoğunluğunda görülen geri kazanma başlar ve bir süre sonra aynı deney sonuçları yeniden elde edilebilecek hale gelir. Anti-tiksotropik sıvılar bunun tersi şekilde davranırlar. Şekil 2.15'te tiksotropik davranışı gösteren tipik akış eğrileri görülmektedir.

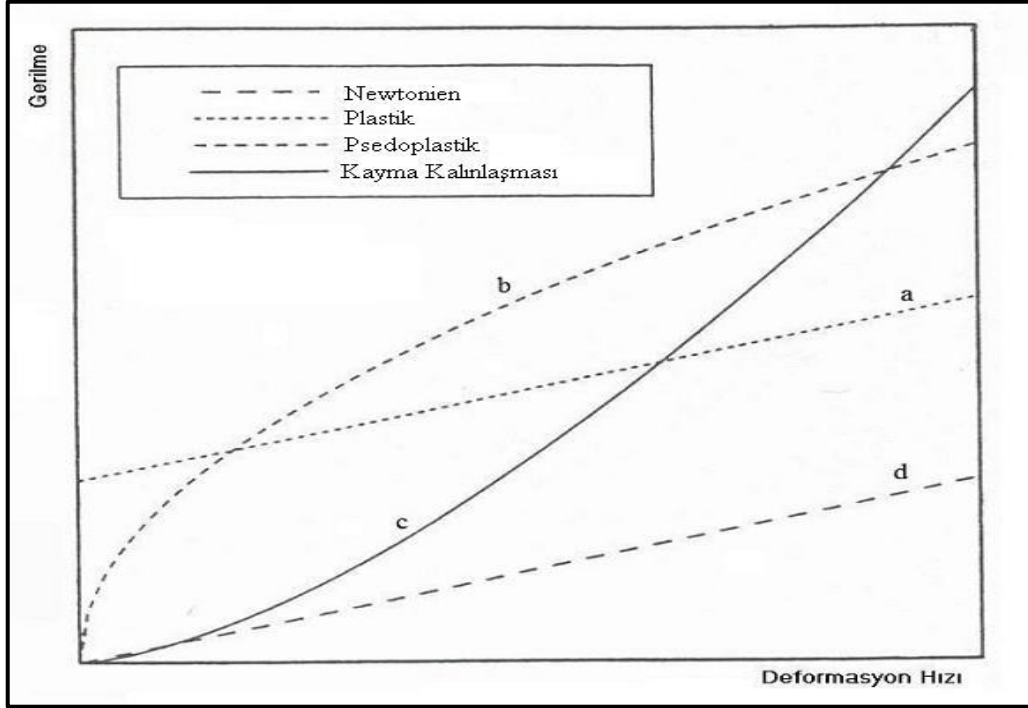
Kayma oranının hızlanması ve yavaşlaması genellikle farklı kayma gerilmelerine karşılık gelirler ve ölçüm noktalarının işaretlenmesi sonucunda histeresis çevrimi şeklinde olduğu yani sürekli bir direnç kaybının meydana geldiği görülür. Eğer başlangıç ve bitiş noktaları çakışıyorsa malzeme gerçekten tiksotropiktir; Şekil 2.15'teki a eğrisi böyle bir davranış gösterir. Ama fark varsa ve kayma oranı sıfıra geldiği anda malzeme tam olarak geri dönmüyorsa, Şekil 2.15'teki b eğrisinde davranışı gösterilen bu malzemelere yalancı-tiksotropik malzemeler denir [59].

Beton teknolojisinde oldukça ilgilenilen ve Newton olmayan sıvıların bir grubunu oluşturan malzemeler vardır ki şekil değiştirmeye başlamadan önce belirli bir seviyede kayma gerilmesi, akma gerilmesi τ_0 , uygulanması gereklidir. Bu malzemelere Bingham sıvıları veya plastikleri denir.

Şekil 2.15'te görülen a eğrisi için Bingham sıvısı davranışını temsil eder diyebiliriz. Bir Bingham sıvısının temel ilişkisi şu şekildedir :

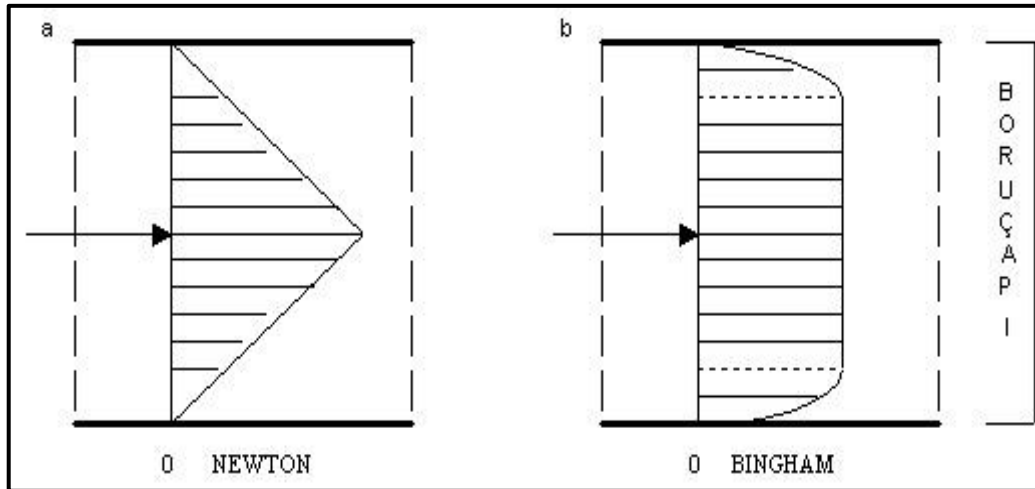
$$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma} \quad \eta_{pl}: \text{Plastik viskozite} \quad (2.6=2.12)$$

İdeal Newton ve Bingham sıvılarının boru içindeki akışı Şekil 2.16.'da gösterilmiştir. Kayma gerilmesi boru çeperinde en yüksek değerinde olmakla beraber çeperden uzaklaştıkça azalmaktadır. Tabii bu azalma Bingham sıvılarında maksimum akma gerilmesine kadar olabilir.



Şekil 2.15. Tiksotropik sıvının akış eğrileri [59]

Akma değerinin altındaki kayma gerilmesi şekil değiştirmeyi sağlayamaz, borunun orta kısmındaki sıvı bir katı gibi hareket eder.



Şekil 2.16. Boru içinden akan ideal Newton ve Bingham sıvılarındaki gerilme dağılımının düzgün akım olduğu kabul edilmiştir [59]

Gerçek sıvıların çoğunluğu normal şartlar altında Newton sıvısı gibi davranır. Aynı asıtlara uygulandığında davranış şekli, katı malzeme konsantrasyonuna veya maddenin inceliği ve düzgün dağılmasına göre değişir. Böyle durumlarda katı maddenin en önemli etkisi asıltının kıvamını arttırmasıdır. Bu etki Einstein'ın temel denklemi ile yaklaşık olarak hesaplanabilir;

$$\eta_s = \eta_o (1+2.5C_v) \quad (2.16)$$

η = Asıltının viskozitesi

η_o = Ortamın viskozitesi

C_v = Parçacıkların hacimsel oranı (konsantrasyonu)

Einstein'ın ilişkisi, oldukça seyreltik yoğunluklarda asılı olan rijit küresel parçacıkların viskozitesini tahmin eder. Asılı parçacıklar arasında etkileşim meydana geldiğinde ilişki kullanılamaz. Bu etkileşim birkaç değişik şekilde meydana gelebilir. Parçacıklar arasında çekim veya itki oluşabilir ya da parçacıkların şeklinden dolayı akış sırasında birbirine kenetlenme ile karşılaşılabilir. Asılı parçacıkların şekli ve yönü, örneğin lifler, değişebilir ve lifler gibi anizometrik parçacıklar genellikle asal gerilmeler doğrultusunda dizilirler. Bu davranış kararsız bir ortamda yapılan reolojik ölçümleri büyük oranda etkiler ve akışın başlangıcı ile bitişinde kendini gösterir. Asıltı maddenin konsantrasyonunun artmasıyla bunun sıvı ortamda etkisinin ölçülmesi daha çok gerekli hale gelmektedir.

Einstein'ın ilişkisine uymayan asıtlılar, sıvı ortamları Newton olsa bile Newton olmayan sıvılar gibi davranırlar. Davranış akış tipine bağlıdır. Newton davranışı ancak, parçacıklar düzensiz şekillerde olsalar da tek yönlü, kararlı akım sayesinde sıralanabilmiş ve etkileşimleri azalmış halde iken yüksek yoğunluklarda devam edebilir. Yani basit bir Newton sıvısı üzerinde önemli miktarda katı asılı mevcut ise faz akma gerilmesi değişik şekillerdeki Newton olmayan sıvıların reolojik davranışlarını gösterebilir.

Newton ve Newton olmayan asıtlıların reolojik davranışı hakkında teorik özelliklerine ulaşmak oldukça zordur. Örneğin bir akma gerilmesi ile karşılaşıldığında bunun katı parçacıklarının mekanik kenetlenmesinden mi yoksa sadece parçacık arasındaki etkileşimden mi meydana geldiğini kestirmek gibi.

2.6.3. Sertleşmiş KYB-KYH Özellikleri

2.6.3.1. Dayanım Özellikleri

Beton kullanıldığı duruma göre, farklı yönlerde ve büyüklüklerde kuvvetlerin (yüklerin) etkisi altında kalmaktadır. Beton elemanlar, bu yükler etkisinde, çok küçük miktarlarda şekil değiştirerek, yüklerin etkilerine karşı koyacak şekilde tasarlanırlar. Beton dayanımı, betonun üzerine gelen yüklerin etkisi ile meydana gelecek şekil değiştirme ve kırılmalara karşı direnç gösterme kabiliyetidir. Beton dayanımının yüksek olması, çimento hamurunun dayanımına, agregaya dayanımına dolayısıyla harcın dayanımına ve çimento hamuru ile agregaya arasında meydana gelen aderansa bağlıdır. Agregaların yeterli dayanımda oldukları kabul edilirse, çimento hamurunun dayanımı ve agregalarla yaptığı aderansın önemi daha iyi anlaşılmaktadır. Beton dayanımını olumsuz yönde etkileyen en önemli faktör, beton içerisinde bulunan boşluklardır. Çünkü boşlukların çevresinde, betonun kırılmasına yol açabilecek gerilme yığılmaları oluşmaktadır. Beton dayanımını etkileyen faktörleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

- Su/bağlayıcı oranı (su/bağlayıcı oranı yükseldikçe, beton içerisinde daha fazla boşluk oluşmakta ve beton dayanımı daha düşük olmaktadır.)
- Karma suyu kalitesi
- Çimento özellikleri (çimentonun kimyasal özellikleri ve inceliği çimentonun hidratasyon hızını ve dayanımını etkilemektedir.)
- Agregaya özellikleri (agreganın tane boyut dağılımı, en büyük tane boyutu, tane şekli, tanelerin yüzey dokusu, dayanımı ve agregada bulunabilecek zararlı maddelerin varlığı)
- Betona uygulanan karıştırma, taşınma, yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri
- Kür koşulları ve betonun yaşı [11].

Basınç, çekme, eğilme ve kayma etkisi yaratacak yükler altında betonun şekil değiştirmeye ve kırılmaya karşı göstereceği direnme kabiliyeti sırasıyla basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve kayma dayanımı olarak tanımlanmaktadır. Tekrarlı yükler altında betonun şekil değiştirmeye ve kırılmaya karşı göstereceği direnme kabiliyetine yorulma dayanımı denilmektedir. Beton üzerine etkiyen yükler basınç, çekme, kayma ve eğilme gibi gerilmeler yaratabilmektedir.

Betonun veya harcın basınç mukavemeti, bunların diğer tüm yararlı özellikleriyle paralellik gösterir. Yani basınç mukavemeti yüksek olan beton veya harç genelde doludur, serttir, su geçirmez, dış etkilere ve aşınmaya dayanıklıdır [60].

2.6.3.1.1. Basınç Dayanımı

Yapı tasarımında yapıda kullanılacak betonun basınç dayanımı önemli bir tasarım ölçütüdür. Bu ölçüte göre yapı elemanlarının (yapı bileşenlerinin) taşıma gücü belirlenmekte ve kesit alanları seçilmektedir. Betonarme yapılarda betonun basınç dayanımı taşıma gücünün temelini oluşturur. Öte yandan betonun nitelik denetiminde uluslararası bir büyüklük olarak basınç dayanımı kullanılmaktadır.

Beton bilindiği üzere gevrek bir malzemedir ve çekme dayanımı basınç dayanımına göre oldukça düşüktür. Betonun basınç dayanımı, eksenel basınç yükü etkisi altında, betonda oluşan maksimum gerilme ile eşdeğerdir [11]. Betonun basınç dayanımı pratikte en çok kullanılan dayanım değeridir. Bunun sebepleri arasında bu deneyin kolay oluşu, betonun basınç dayanımı ile çekme, eğilme vb. dayanımları arasında bir korelasyonun olması ve gerçek hayatta beton elemanlara etkiyen yüklerin çoğunluğunu basınç yüklerinin oluşturması olarak özetleyebiliriz.

Betonun basınç dayanımının bulunabilmesi için farklı yöntemler kullanılmakta olup, (hızlandırılmış kür uygulanan numunelerin basınç dayanımı, karot numunelerinin basınç dayanımı, schmidt çekici kullanılması, ultrasonik ses cihazı ile basınç dayanımının bulunması gibi) en çok kullanılan yöntem standart basınç dayanımı deneyidir. Betonun standart basınç dayanımı, suda saklanmış, 28 günlük, çapı 150 mm, boyu 300 mm olan silindir numunelerin, eksenel basınç altında dayanımı olarak tanımlanır [61].

Aksi belirtilmediği sürece, betonun basınç dayanımından söz edildiğinde, söz konusu değer, standart deney yöntemi ile elde edilen değer olduğu anlaşılmalıdır. Standart deney yöntemi ile ilgili Türk ve ASTM standartları şunlardır. TS EN 206, TS EN 12390, ASTM C 31, ASTM C 39'dur [32, 62-65].

Standart deney yönteminde kullanılan numuneler silindir veya küp numune olarak 2 şekildedir. Silindir numuneler 15 cm çapında, 30 cm yüksekliğindedir. Türkiye'de standart basınç deneyi için kullanılan küp numunelerinin kenar uzunluğu 15 cm'dir. Küp ve silindir numuneler arasında ilişki bulunduğu, silindir numune dayanımlarının, küp numune dayanımlarına oranı 0.8-0.85 olduğu bilinmektedir. Fakat bu oranın kimi zaman 0.7'ye

kadar düştüğü veya 1.1'e kadar çıktığı da tespit edilmiştir [66]. Yukarıda belirtilen standartlarda her beton sınıfı için sağlanması gereken silindir ve küp dayanımları birlikte belirtilmiştir.

Beton karma işleminden sonra, taze beton, su emmeyen malzemeden yapılmış (çelik, plastik, dökme demir vb.) ve işlemiden önce iç yüzeyleri yağlanmış kalıplara yerleştirilir.

Beton numuneler kalıp içerisinde 24 saat kaldıktan sonra kalıptan çıkarılır ve kür süresince (normalde 28 gün), $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve %95 rölatif nem ortamına sahip bir kür odasında veya bu sıcaklıktaki su içerisinde bekletilmektedir. Kür süresi tamamlanan numuneler deney aşamasına gelmiş olup, kırılma işlemine geçilir. Silindir numuneler için, kırma işleminden önce, numunenin alt ve üst yüzeyine gelen yükün üniform dağılması için çimento hamurundan veya kükürt-grafit tozu gibi bir malzemeden başlık yapılmalıdır.

Kür işleminin sonunda beton numuneler, beton presi kullanılarak kırılır. Basınç dayanımının numune cinsine, numune boyutlarına, kür koşullarına, kür süresine, yükleme hızına bağlı olduğu unutulmamalıdır.

2.6.3.1.2. Eğilmede Çekme Dayanımı

Betonun çekme dayanımı betonda çekme etkisi yaratacak kuvvetlerin neden olacağı şekil değiştirmelere ve kırılmaya karşı betonun gösterebileceği direnme kabiliyeti olarak tanımlanır. Beton gevrek bir malzemedir, basit mukavemet değerleri arasında en yüksek olan basınç, en düşük olanı çekmedir [1]. Bu iki direnç arasındaki oran yaklaşık 1/10 mertebesinde. Pratik olarak betonun sadece basınca çalıştığı yani hiç çekme gerilmesi almadığı varsayılır.

Betonarmede; beton çeliğin, çelik de betonun zayıflıklarını gidermektedir. Yangına ve korozyona karşı zayıf olan çelik, beton örtüsüyle korunmakta, çekme dayanımı ve sünekliği yetersiz olan beton ise çelik ile donatıldığında, hem basınç hem de çekme dayanımı yüksek bir malzeme haline gelmektedir [67].

Genellikle yapıdaki betona doğrudan çekme kuvveti uygulanamamaktadır. Ancak, beton elemanlarının üzerine gelen basınç ve eğilme kuvvetleri betonun içerisinde dolaylı olarak çekme kuvvetlerinin oluşmasına neden olmaktadır.

Sertleşmiş Betonda çekme dayanımının bilinmesi, çatlakların ve yapıyla ilgili analizlerin yapılabilmesi bakımından büyük önem taşımaktadır. Betonun Çekme Dayanımı

üç değişik deney yöntemi ile bulunabilmektedir. Bunlar; doğrudan çekme dayanımı (standart bir deney yöntemi yoktur), yarmada çekme dayanımı (TS 3129 ve ASTM C496) [68] ve eğilmede çekme dayanımıdır (TS 3284 -3285 ve ASTM C293 - ASTM C78) [69, 70].

Betonarme yapıların tasarımında betonun çekme dayanımı öngermeli elemanların çatlama momentlerinin hesaplanmasında, çatlama genişliklerinin kontrol edilmesi için donatı hesaplanmasında, erken yaş termal gerilmelerinin neden olduğu çatlakların belirlenmesinde, sehim hesabının yapılmasında kullanılır. Özellikle yüksek sınıf beton kullanımıyla yapı elemanındaki çatlak ve sehim miktarı azalır. Diğer yandan yüksek dayanımlı betonlarda erken yaş termal gerilmeler daha geniş aralıklarla daha geniş açıklıkta istenmeyen çatlaklara neden olabilir.

Donatısız beton tasarımında örneğin yollarda, betonun çekme dayanımı tasarımında kullanılır. Bu durumda daha yüksek dayanımlı beton kullanmak istenilir. Çekme dayanımı özellikle lifli betonlarda kullanılır.

Malzeme en zayıf halkasından kırılır. Deney uygulanan numune ne kadar büyükse o kadar büyük bir olasılıkla belli bir düzlemde boşluklar meydana gelir. Bu nedenle yapı boyutu önemlidir. Eğilmedeki çekme dayanımı yarmadaki çekme dayanımından daha büyük olur. Yarmada çekme dayanımı da direkt çekme dayanımından daha büyük olur.

Betonun çekme dayanımı ilgili şartlara göre TS EN 12390-6 veya TS EN 12390-5'te belirtilen son yönetmelik kurallarına göre hesaplanır [71]. Alternatif olarak 3 nokta yüklemesi veya herhangi bir standardı olmayan direkt çekme deneyleri de yapılabilir.

Çekme dayanımının değerlerinin dağılımı normal basınç dayanımı dağılımından daha fazladır. Bu nedenle çekme dayanımını hedef olarak belirlenirken dikkat edilmelidir.

Gevrek bir malzeme olan betonda, çekme dayanımı karakteristikleri kesin bir temele oturtulamamaktadır. Öncelikle çekme deneylerinin yapılmasında teknik zorluklarla karşılaşılır. Bu nedenle eğilmeye maruz kalan malzemenin durumu en güvenilir biçimde, doğrudan doğruya eğilme deneyi uygulanarak incelenir. Bu deneyde büyük çoğunlukla kare kesitli kirişlerin (4x4x16 cm) kullanılması öngörülür. Malzemenin tamamen gevrek cisim olduğu, ancak kırılma anına kadar Hooke Yasasına uygun davrandığı kabul edilir [72].

Aynı dayanım sınıfında, KYB ile geleneksel betonun çekme dayanımı/basınç dayanımı oranları karşılaştırdığında, KYB'nin çekme dayanımının geleneksel betona oranla daha yüksek olduğu sonucunu elde etmiştir. Bunun en önemli sebepleri KYB'deki boşluk yapısının daha homojen dağılmış olması ve sıkıştırma enerjisinden kaynaklanan mikroyapı kusurlarının ortadan kalkmasıdır [73].

2.6.3.1.3. Rölatif Ultrases Geçiş Hızı

Frekansları 20-200 kHz, çoğunlukla 50-150 kHz arasında olan ses dalgalarına ultrasonik dalgalar denir. Bu titreşimler duyma eşiğinin ötesindedirler. Ultrasonların hızları normal ses dalgalarından farksızdır. Frekansları ise yüksek olduğundan emilmeden daha uzun yol kat edebilirler. Ancak kat ettikleri hacmin iç yapısı ve ortamın gaz, sıvı veya katı olması optimum frekans limitlerini ortaya çıkarır. Örneğin yapısı boşluklu olan betonlar frekansın aşırı derecede artışı parazit yansımalar doğurarak enerji emilmelerine yol açar [74]. Uygun frekans değerleri olarak 20 ile 150 kHz'dir.

Rölatif ultrases geçiş hızı ölçüm yöntemi; katı cisimler içinde hareket eden ve şiddetleri cismin elastik özelliklerini bozmayacak şekilde kalan basınç ve kayma dalgalarının hızları ve genlikleri ile malzemenin mekanik özellikleri ve sabitleri arasından özellikleri yönünden en elverişli olanı ultrasonik (ses ötesi) dalgalarından yararlanılarak yapılan tahribatsız yöntemdir [74].

Rölatif ultrases geçiş hızı test yöntemiyle herhangi bir betonun basınç dayanımını yeterince hassas olarak bulabilmek zordur. Herhangi bir beton içerisinden geçen ses üstü dalga hızı, o betonun içerdiği boşluk miktarı (ve yoğunluğu) ile yakından ilgili olduğu için elde edilen ses üstü hız ile betonun kalitesi hakkında genel bir ilişki kurulabilmektedir. Yoğunluğu yaklaşık 2400 kg/m^3 olan betonlar üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonunda, ses üstü dalga hızı bilindiğinde beton kalitesinin ne olabileceğine ilişkin önerilen sonuçlar Tablo 2.9'da gösterilmektedir [75].

Tablo 2.9. Ultrasonik test yöntemiyle beton kalitesinin değerlendirilmesi

Dalga hızı (m/s)	Beton kalitesi
> 4500	Mükemmel
3500 – 4500	İyi
3000 – 3500	Şüpheli
2000 – 3000	Zayıf
< 2000	Çok zayıf

Ultrases geçiş hızı metodu ile bir malzemenin kalitesinin tayini için ölçümlerinin yüksek duyarlılık ve doğrulukla yapılması gereklidir. Bu işlem uygun frekansta titreşim üreten bir alet kullanarak malzeme içinden bu titreşimlerin geçiş zamanını ve malzeme içinden geçiş uzunluğunun çok doğru olarak ölçülmesiyle gerçekleştirilir. Yapı bakımından oldukça farklı ve ultrases oluşturmak amacıyla kullanılan araçlara transduser adı verilmektedir. Transduserler elektrik enerjisi titreşim enerjisine çevirerek verici, titreşim enerjisini elektrik enerjisine çevirerek alıcı olarak kullanılmaktadırlar.

Ultrases hız testinin doğası gereği, numunenin nem içeriği sonuçlara önemli bir şekilde etki etmektedir. Sesin hızı nemli boşluklarda kuru boşluklardan daha fazladır. Kuru numunelere göre nemli numunelerdeki hız %5 daha fazla olabilir.

Ultrases test hızı tekniği, beton yapısından geçen vibrasyonel enerjinin test edilmesi ile beton içinde yayılan hızı lme yeteneğidir. lüm noktaları arasındaki mesafeden hareketle, ultrasonik hız ölçümü yapılır. Ultrases geçiş hızı, elastik dalga yayılımı ile ilişkilidir. Ultrasonik hızı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki, kalibrasyon deneyleri ile bulunmuştur. Bu yöntem, pek çok dış etkilerden etkilenir. Bu açıdan, çalışmayı yapan operatörün tecrübeli ve dikkatli olması, sonuçların sıhhati açısından önemlidir. Ultrasonik hızların değerleri, betonarme donatı, beton çatlakları, betonun nem durumu gibi sebeplerden etkilenir. Beton yapının durumunun belirlenmesinde, yanlışlıkların önüne geçmek için bütün bunlar göz önüne alınmalıdır [76].

Ultrases test tekniğini kullanmanın avantajları:

- Test sırasında eleman gereksinimi azalır.
- Elemanların ön hazırlık gereksinimini azaltır.
- Daha az miktarda yapı zedelenir.
- Az zedelenme güçlendirme veya onarım gereksinimini azaltır.
- Merkezin delinemediği i duvarlarda zararı azaltacağı için daha faydalıdır.
- Daha ucuzdur.

2.6.3.1.4. Elastisite Modülü

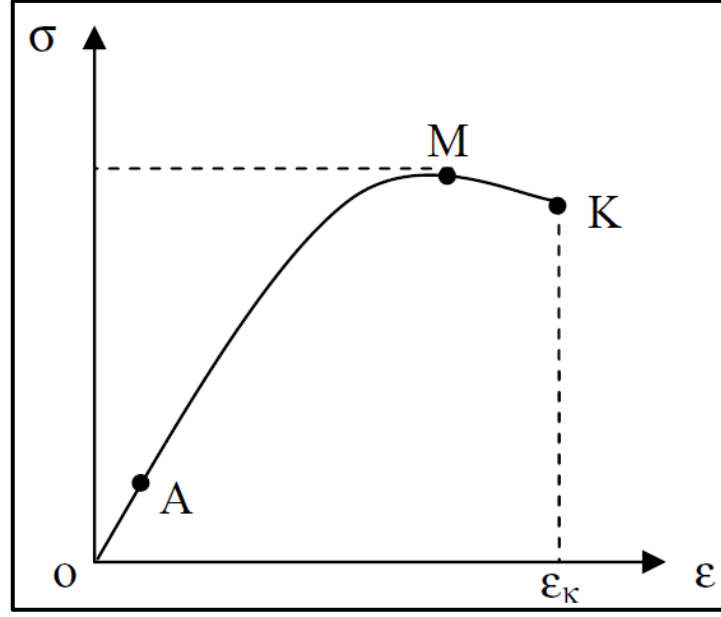
Yapı elemanlarının sehimlerinin hesaplanmasında, levha elemanlarda kontrol parametresi olarak ve öngerilmeli elemanlarda elastisite modülünün bilinmesi gerekir. Mineral katkı malezemeleri türü ve miktarı, betonun elastisite modülü üzerinde doğrudan etkilidir. Artan toz miktarı nedeniyle, KYB'nin elastisite modülünde geleneksel betona

oranla değişiklikler olacaktır. Bu durum tasarım ve uygulamalarda göz önünde bulundurulmalıdır.

Üç fazlı anizotropik gevrek bir malzeme olarak tanımlanan beton üzerine gelen değişik yükler nedeniyle farklı davranışlar gösterir. Elastik özellikteki malzemeden elde edilmiş olan bir elemanın F yükü altında göstereceği toplam deformasyon miktarı o elemana uygulanan yükün büyüklüğü ve elemanın boyu ile doğru orantılı, elemanın kesit alanı ile ters orantılıdır [77]. Bu durum $\Delta L \propto FL/A$ ya da $\Delta L/L \propto F/A$ olarak ifade edilebilir. Beton, gevrek ve farklı fazlardan oluşan bir kompozit olduğundan elastik bir malzeme değildir. Ancak küçük gerilmeler altında elastik özellik gösterebilir. Teorik olarak bu basınç dayanımının %30-40'ı arasındaki bir değere karşılık gelir [77]. Buna karşılık beton, mühendislik hesaplamalarında elastik bir malzeme olarak kabul edilir [11, 78]. Betonun elastik davranışını açıklamakta kullanılan σ - ϵ ilişkisi deneysel yöntemlerle belirlenebilir. Şekil 2.17'de betona ait tipik bir σ - ϵ davranışı görölmektedir. Şekilden göröleceği üzere betonda gerilme arttıkça numunede doğru orantılı olarak deformasyon da artmaktadır. A noktasına kadar bu durum doğrusal olup beton üzerindeki bu kısa süreli elastik yükün kaldırılmasıyla birlikte herhangi kalıcı bir deformasyon görölmez. A noktasında numuneye daha büyük gerilmelerin uygulanmasıyla eğri doğrusallıktan sapar ve bu durum M noktasına kadar eğimin artmasıyla devam eder. A noktasından sonra gerilmenin artması ile betondaki mikro çatlaklar hızla çoğalır ve M noktasında beton paralanmaya başlar. K noktasında ise göçme ya da kırılma meydana gelir. K noktasındaki gerilme değeri σ_k betonun kırıldığı andaki gerilme değeri ϵ_k ise birim deformasyon değeri gösterir. Deneysel verilerden elde edilen sonuçlarla çizilen σ - ϵ eğrisi üzerinden betonun statik E-modülü hesaplanır. Bunun için değişik yöntemler kullanılabilir.

- E-modülü Değerinin Elde Edilmesinde Kullanılan Değişik Yöntemler:

Betonda statik E-modülü elde edilirken genellikle yukarıda anlatılan deneysel yöntem kullanılır. Bu yöntemde TS 3502 ve ASTM C 469'da tanımlanan deney numuneye uygulanarak σ - ϵ eğrisi elde edilir ve bu eğri üzerinde değişik yöntemler ile statik E-modülü değeri hesaplanır [79, 80]. Türk Standartları, Avrupa Beton Komitesi (CEB) ve Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) betonun birim ağırlığı ve basınç dayanımından hareketle beton E-modülünün hesaplanmasına yönelik ampirik bağıntılar da geliştirmiştir. TS 500 Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarım Kuralları olarak bilinen standardında [81],



Şekil 2.17. Betonun tipik σ - ϵ eğrisi [77]

$$E=14000+3250 \sigma^{1/2} \quad (2.17)$$

Statik E-modülü hesaplaması için (2.17) bağıntısı verilmiştir. Avrupa Beton Komitesi (CEB) ise basınç dayanımından E-modülünü hesaplayabilmek için [82],

$$E=9500(\sigma+8)^{1/3} \quad (2.18)$$

(2.18) bağıntısını tanımlamıştır. ACI ise beton statik E-modülü hesaplamasında basınç dayanımı ile birlikte birim ağırlığı da dikkate alan ampirik (2.19) bir bağıntı geliştirmiştir [83].

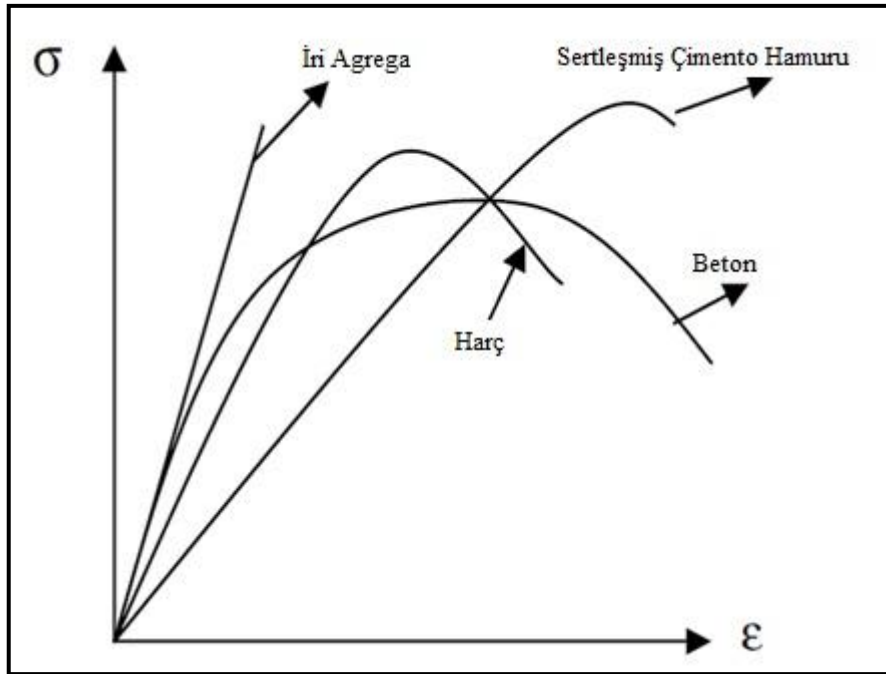
$$E= 0.043 W^{3/2} \sigma^{1/2} \quad (2.19)$$

Burada E: Beton basınç dayanımının % 40'ına denk gelen gerilme düzeyinin temel alınarak sekant yöntemi ile belirlenen E-modülü değeri, W: Normal ağırlıklı betonun birim ağırlığı (yoğunluk), σ : standart silindir numunelerle elde edilen basınç dayanımıdır. Görüleceği üzere yukarıdaki ampirik bağıntılar yardımı ile de beton E-modülü hesaplanabilir. Bu bağıntılar sonuç olarak birbirine yakın değerler vermektedir [78]. Anılan bu kuruluşların geliştirmiş olduğu ampirik bağıntılar dışında sonik ya da ultrasonik yöntemler kullanılarak da beton E-modülü hesaplanabilir. Adına dinamik E-modülü denilen bir başka yöntem ise ultrasonik ses dalgalarının beton içerisinden geçişi esasına dayanır. Bu yöntemde ultrasonik dalgaların beton içerisinden geçiş hızı hesaplanır ve daha sonra kullanılan ampirik bağıntılar yardımıyla betonun dinamik E-modülü bulunur.

Dinamik yöntemler ile hesaplanan E-modülü değeri statik yöntemlerle elde edilen E-modülü değerinden biraz daha yüksektir. Bu durum deney sırasında numune üzerine yük uygulanmaması gerçeği ile ilgilidir. Dinamik yöntemlerle bulunan E-modülü değerine en yakın olan statik E-modülü değeri başlangıç teğet yöntemi ile bulunan değerdir. Yalnız bu yaklaşımların hepsinde E-modülü için oldukça önemli olan beton yaşı, agreganın E-modülü ve boyutu gibi faktörler ihmal edilmektedir. Bu nedenle adı geçen bağıntılar yardımı ile hesaplanan E-modülü değerleri gerçek E-modülü değerini hiçbir zaman temsil etmez.

- Betonun E-modülü Değerini Etkileyen Faktörler

Heterojen bir yapıya sahip olan beton içyapısı, yükleme sırasında agrega, çimento hamuru matrisi, değişik boşluk sistemleri, agrega-çimento hamuru ara yüzeyi gibi sahip olduğu değişik fazlar nedeniyle farklı davranış gösterir [84]. Bu nedenle bunların birisinin nicelik veya niteliğindeki değişiklik beklenen sonuçların çok farklı çıkmasına neden olabilir. Örneğin aynı basınç dayanımına sahip fakat bileşim özellikleri ve bileşenleri farklı olan betonların elastisite değerleri de farklı olabilir.

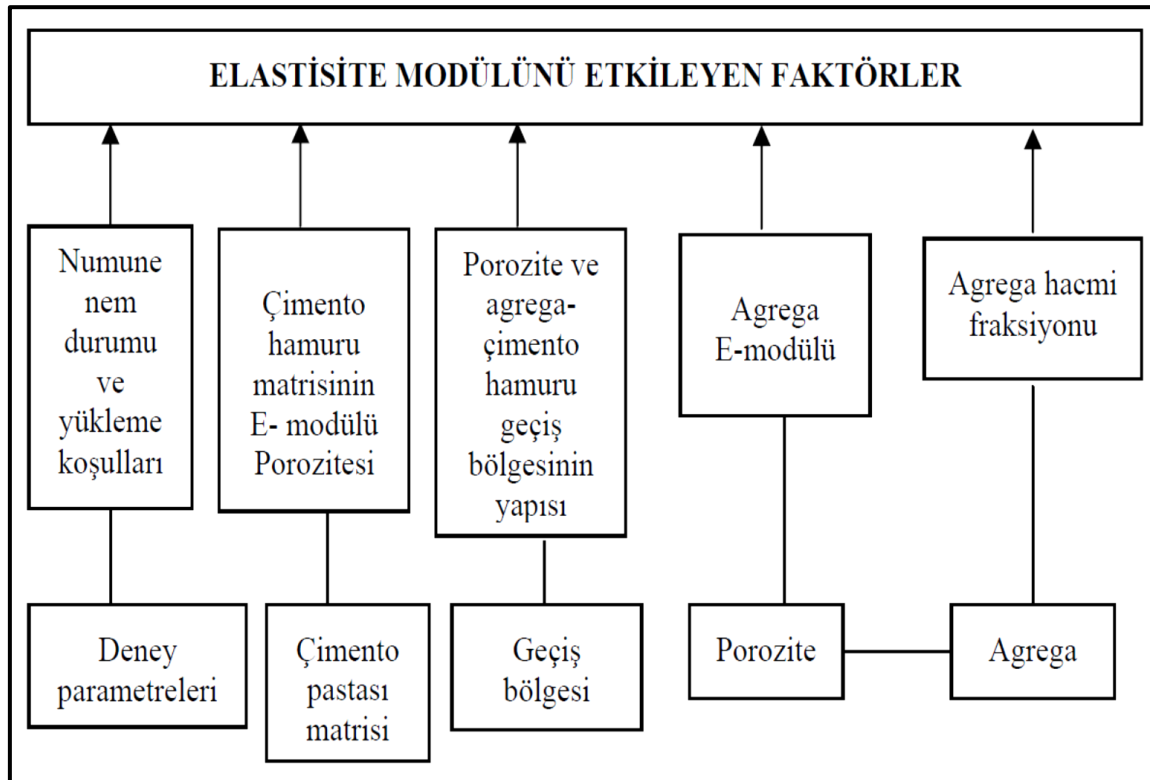


Şekil 2.18. Betonun ve betonu oluşturan malzemelerin σ - ϵ eğrileri [11]

Şekil 2.18'den de görüleceği üzere betonun ve betonu oluşturan bileşenlerin gerilme-deformasyon davranışları birbirinden oldukça farklıdır [11]. Şekilden anlaşılacağı

üzere beton içerisindeki fazlardan agreganın ve sertleşmiş çimento hamurunun basınç dayanımı beton ve harcın dayanımına göre daha yüksektir. Buna karşılık beton kendi bileşenlerine göre daha sünek bir davranış göstermektedir. Yani betonun diğer fazlar ve bileşenlere göre inelastik davranışı daha yüksektir. Şekilden görüleceği üzere betonun gösterdiği deformasyon söz konusu faz ve bileşenlere göre eşdeğer bir basınç dayanımı için daha yüksektir. Bu olguların hepsi sonuçta malzemenin kırılma anındaki davranışını, rijitliğini, E-modülünü ve deformasyon kapasitesini belirler. E-modülünü etkileyen faktörleri Şekil 2.19'daki gibi sınıflandırılabilir.

Şekil 2.19'da verilen bu temel öğelerin hepsi önemli olmakla birlikte agreganın porozitesi ve agreganın E-modülü, çimento hamuru matrisinin özellikleri, çimento hamuru-agrega geçiş bölgesi ve deney parametreleri en önemli faktörlerdir. Agreganın porozitesi ve E-modülü onun rijitliğini belirleyen önemli bir öğedir. Bu nedenle yüksek yoğunluklu boşluksuz agregaların ve bunların kullanıldığı betonların da E-modülü yüksek olur. Çimento hamurunun E-modülü ve çimento hamurunun özellikleri ise deyim yerindeyse tamamıyla su/çimento oranı tarafından belirlenir. Su/çimento oranının küçülmesi ile harç fazının E-modülü artar. Bu durum harç fazı/iri agreganın E-modülü oranının artmasına neden



Şekil 2.19. Betonun E-modülünü etkileyen faktörlerin sınıflandırılması [84]

olur. Bu değişim ise iri agrega çimento hamuru temas bölgesindeki gerilmelerin azalması yönünde etki yapar. Değişik nedenlerle ortaya çıkan çimento hamuru porozitesi de betonun E-modülü üzerinde önemli bir rol oynar. Çimento hamuru-agrega geçiş bölgesi de beton E-modülü için önemli bir parametredir. Genelde hava boşlukları, mikro çatlaklar ve dağılmış kalsiyum hidroksit kristallerinin yoğun olduğu bu bölgenin betonun kırılma ve elastik özellikleri üzerinde ne kadar önemli bir işlevinin olduğu son yıllarda elektron mikroskoplarıyla yapılan içyapı incelemeleri sonucu ortaya çıkmıştır. Agregada ve çimento hamurunun özellikleri bu bölgenin davranışı üzerinde önemli bir rol oynar. Bu iki farklı fazın E-modüllerinin farklı olması nedeniyle betona yük uygulanması sırasında agregada taneleri ile çimento hamuru temas bölgesinde ortaya çıkan çekme, kayma gibi kuvvetler de artar. Bu durum sonuçta büyük çatlaklara ve kırılmalara da yol açabilir.

2.6.3.2. Dayanıklılık Özellikleri

Betonun yıllar boyunca dış etkenlerden ve betonun bileşenlerinden ileri gelen faktörlerden olumsuz etkilenmeyerek dayanımını ve niteliklerini kaybetmemesine dayanıklılık adı verilir. Bir yapının projelendirilmesi ve yapımı, dayanım, dayanıklılık, işlevsellik, ekonomi, estetik, amaca uygunluk ve imalat süresi ilkelerinin birlikte ele alındığı bir optimizasyon problemi olarak tanımlanabilir. Yani yapının planlanan hizmet ömrü süresince dıştan ve içten kaynaklanan yıpratıcı etkilere karşı dayanıklı (kalıcı) olması gerekmektedir.

Yapay bir malzeme olan betonarmenin yararlı özelliklerini sürdürebilmesi kalıcı olmasına bağlıdır. Yapıların kalıcı olması yalnızca doğru taşıyıcı sistemin seçimi, projelendirilmesi ve yapımı ile kısıtlı değildir. Aynı zamanda, yapının belirli zaman sürecinde “kalıcı” denecek kadar uzun ömürlü olmasını sağlayacak önlemler alınmalı ve en az bakımı gerektirecek şekilde yaşlanması da yavaşlatılmalıdır.

Beton bünyesinde veya hemen yakın çevresinde (mikro iklim); sıcaklık, nem ve kimyasal maddelerin taşınım mekanizması ve bunları etkileyen parametreler betonun kalıcılığını etkiler [85].

Mekanik yollar dışındaki bozulma süreçlerini kontrol eden ana etmen su veya nemin varlığıdır. Su beton içine zararlı maddeleri taşır, ayrıca kimyasal reaksiyonların oluşumuna katkıda bulunur. Suyun beton içinde taşınımı, beton içerisindeki boşlukların türüne, çapına, dağılımına ve mikro veya makro boyuttaki çatlakların varlığına bağlıdır. Bu nedenle beton

bünyesinde boşlukların dağılımının kontrol edilmesi ve çatlakların oluşumunun engellenmesi kalıcılığın sağlanması için gereklidir.

Beton elemanların zamanla bozulmalarına çeşitli iç veya dış etkenler neden olur. Bu etkenler fiziksel, kimyasal, biyolojik veya mekanik kökenli olabilir. Bu etkiler arasında;

- Betonda bulunan kalsiyum hidroksitin çözünmesi ve betondan uzaklaşması
- Sülfat Etkisi
- Deniz suyunun etkisi
- Asit etkisi
- Alkali Agregat Reaksiyonu
- Donma-Çözünme Etkisi
- Aşınma
- Beton Çeliğinin Korozyonu (Karbonatlaşma ve/veya klorla bağlı olarak) sayılabilir.

Yukarıda sıralanan unsurlardan donma-çözünme, aşınma ve korozyonu fiziksel etkiler, kalan diğer unsurları ise kimyasal etkiler olarak ayırabiliriz. Tüm bu etkenler kimyasal veya fiziksel yollarla betonun çatlamasına yol açmakta ve bu durum betonun daha boşluklu bir hal almasına, beton içerisinde yer alan donatının daha fazla korozyona uğramasına sebep olmaktadır. Betonun boşluk hacminin artması ile betonun bozulma hızı da zamanla artmaktadır. Bu koşullar altında beton gereken servis ömründen önce işlevselliğini ve dayanımını kaybedebilmektedir

Betonda oluşabilecek hasarın şiddeti bu dış etkilerin derecesi ve betonun kalitesine bağlı olarak değişmektedir. İç etkiler arasında; alkali-agrega reaksiyonu, gecikmiş etrenjit oluşumu, agrega ve sertleşmiş çimento hamurunun termal özellikleri arasındaki farklılıklar gibi etkiler sayılabilir. Betona, karılması aşamasında katılan mineral katkıları ile betonun kalıcılık özelliğinin iyileştirilmesi mümkün olabilmektedir.

Üretim ve yerleştirme sonrasında hizmete girecek betonda dayanıklılığın sağlanabilmesi için gereken başlıca önlemler aşağıda sıralanmıştır, bunlar:

- Su/çimento oranı ve çimento dozajının sınırlandırılması,
- Dökümde işlenebilirlik yeteneğinin kazandırılması,
- Maksimum doluluk oranına ulaşılması,
- Yerleştirmede ve sıkılamada özen gösterilmesi,

- Geçirimsizliğin sağlanması,
- Çatlakların oluşumunun engellenmesidir.

2.6.3.2.1. Su Emme Kapasitesi

Beton dayanıklılığı açısından beton geçirimliliği ve betonun boşluk yapısı oldukça önemlidir. Çünkü betonu etkileyen dış etkenler beton içerisine, kılcal boşluklar vasıtası ile nüfuz etmektedir. Aynı zamanda betonda yer alan boşluklar betonun dayanımını da olumsuz etkilemektedir. Betonun geçirimliliği ne kadar az olursa, bahsedilen dış etkenler beton içerisine nüfuz edemeyeceği için, betonun bozulması engellenmiş olacak, dayanımı korunabilecektir.

Beton içerisinde farklı sebeplerle ve şekillerde meydana gelen bir takım boşluklar mevcuttur. Bu boşluklar betonun geçirimlilik ve su emme özellikleri ile doğrudan ilgilidirler. Bu boşlukları şu şekilde sıralayabiliriz.

Jel Boşlukları ve Kapiler Boşluklar: Betonun hidratasyonu sırasında oluşan C-S-H jellerinin yapısında çok küçük boyutlarda boşluklar bulunmaktadır. Bu boşluklar jel yapısının %28'ini oluşturmaktadır [14]. Bu tür boşluklar içerisinde su ancak çok düşük sıcaklıklarda donabilmektedir. Bu sebeple bu boşluklar beton dayanıklılığı ve geçirimliliğinde aktif bir rol almamaktadırlar.

Beton üretiminde kullanılan suyun bir kısmı, çimentonun hidratasyonu için bir kısmı da istenilen işlenebilmeyi sağlamak için kullanılır. Çimento hidratasyonu sırasında oluşan C-S-H jellerinin aralarında yer alan su taneleri beton içerisinde yer alan kapiler boşlukları oluşturmaktırlar. Beton içerisinde yer alan bu kapiler boşluklar betonun dayanımını etkilediği gibi, beton içerisinde suyun ilerlemesi ile de yakından ilgilidir. Bu boşluklar beton içerisinde çok miktarlarda olduğu zaman beton içerisindeki su kolayca yol bulabilmektedir. Hidratasyon sırasında oluşan jellerin hacimlerinin artması ile bu boşluklar küçülme ve aralarındaki bağlantılar azalmaktadır. Kapiler boşluklar içerisine giren su donma-çözünme etkileri, bu boşluklara sızan suyun içerisindeki sülfat, asit gibi yabancı maddelerin oluşturacağı kimyasal tepkimeler sonucunda, beton içerisinde genleşmelere ve çatlamalara yol açmaktadır.

Günümüz beton teknolojisinde çok ince yapıya sahip kimyasal katkı maddelerinin beton üretiminde kullanılması sonucunda, istenilen işlenebilirlik daha az su kullanılarak sağlanabilmektedir. Öte yandan puzolanik malzemelerin (yüksek fırın cürufu, silis dumanı,

uçucu kül, kireçtaşı tozu vb.) iki tür işlevi vardır. Çok ince tanelerden oluşmalarından ötürü boşlukları tıkama ve puzolanik özelliklerinden dolayı $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girerek C-S-H jelleri oluşturmaktadır. Bu durum beton içerisinde oluşabilecek boşlukların sayısını ve miktarının azaltmakta ve betonun dış etkilere karşı direncini ve betonun dayanımını arttırmaktadır.

Sürüklenmiş Hava Kabarcıkları: Beton üretiminde, betonun donma-çözünme etkileri karşısında dayanıklılığını arttırmak, yangın dayanımını arttırma, işlenebilmeyi kolaylaştırmak, terlemeyi azaltmak vb. sebeplerle, hava sürükleyici katkı maddelerinin kullanılmasıyla istenerek hava boşlukları oluşturulmaktadır. Bu boşluklar küresel şekilli olup, 0.05 mm–1.25 mm boyutlarındadır [14]. Aralarında bağlantı yoktur. Bu tür boşluklar toplam beton hacminin %4'ü ile %8'i aralığında değişmektedir.

Hapsolmuş Hava Boşlukları: Betonun karılması ve yerleştirilmesi esnasında, beton içerisinde hapsolmuş boşluklardır. Bu tür boşlukların bir kısmı yerleştirme esnasında sıkıştırma işlemi yapılarak kaybolursa bile bir miktar boşluk kalabilmektedir. Bu tür boşluklar beton içerisinde gelişigüzel dağılım gösteren, değişik şekil ve boyutlardaki boşluklardır. Normal sıkıştırma işlemine maruz betonlar dahilinde bu tür boşlukların oranı %0.5-%3 aralığında değişmektedir.

Beton içerisinde bu boşlukların yanı sıra terleme ve çimento hamurunun büzülmesi sebebiyle oluşmuş boşluklar da bulunabilmektedir.

Beton içerisinde bulunan bu boşluklar betonun geçirimsizliği ile doğrudan ilgilidir. Beton içerisinde bulunan boşlukların tamamı su ile dolu değilse, ıslak bir ortamda beton içerisine su girebilmektedir. Emilen bu su beton içerisindeki boşluk hacmi ile doğru orantılıdır. Su emme kapasiteleri yüksek olan betonların dayanımları da düşük olmaktadır. Bunun yanında betonun dayanıklılığı da su emme özelliğinden etkilenebilmektedir. Çünkü bu boşluklardaki suyun donarak genişmesi, betonun hidratasyonu sonucu oluşan kalsiyum hidroksitin çözünerek yüzeye çıkması ve boşluk oluşturmaya, betona sızan suyun donatıda korozyon meydana getirmesi ve su içerisinde yer alan asit, sülfat, klor ve benzeri zararlı maddelerin oluşturduğu etkiler sonucu betonun dayanıklılığı azalmaktadır.

Betonun su emme özelliği ile geçirimsizlik özelliği birbirinden ayrılabilir. Su emme beton içerisine sadece suyun girişi olmasına rağmen, geçirimsizlik beton içerisinde akışkan

tüm maddelerin (su, gaz, akışkan sıvılar vb.) girmesidir. Ama pratikte daha çok betonun su geçirimsizliği dikkate alınmaktadır.

Beton geçirimsizliği, depolar ve barajların yapımında kullanılan, kısaca suya maruz kalan tüm yapılardaki betonlar için önemli bir özelliktir.

Beton su ile temas eden yüzeylerinde, beton içerisinde bulunan kapiler boşluklarda, su kılcallık etkisi ile ilerleyebilmektedir. Betonun dayanıklılığını etkileyen bu olay “kılcal su emme” olarak tanımlanmaktadır.

Betonda su emme kapasitesi betonarme çeliklerinde korozyon oluşumunda en önemli fonksiyonlardandır. Beton içine gömülü çeliğin (donatının) korozyonunda alınacak ilk önlem, kaliteli bir beton üretmektir. Donatı korozyonu bakımından kaliteli bir betonun göstergesi dayanıklılıktır. Dayanıklı bir beton, minimum boşluklu, akışkan geçirimsizliğine sahip, kimyasal etkilerle çözülmeyen, aşınmayan bir betondur. Bütün bu nitelikler arasında geçirimsizlik özelliği, betonların dış etkilere karşı dayanımında en önemli rolü oynayan ve en çok sözü edilen özelliktir. Betonda akışkan geçirimsizliği, basınçlı su geçirimsizliği, kılcal su geçirimsizliği ve buhar geçirimsizliği olmak üzere üç farklı süreçle meydana gelmektedir [86].

Geçirimsiz beton üretmek için uyulması gereken kurallar:

- Beton üretiminde kullanılacak çimento standartlara uygun olmalıdır.
- Kütle betonlarının üretiminde, hidrotasyon ısısı yüksek olan çimento kullanılmalıdır.
- Karma suyu, betona zarar verebilecek miktarlarda yabancı maddeler içermemelidir.
- Geçirimsizliği düşük olan agregalar kullanılmalıdır.
- Su/çimento oranı düşük tutulmalıdır.
- Kimyasal katkı kullanılmalıdır.
- Uçucu kül, öğütölmüş tras gibi ince taneli mineral katkılar kullanılmalıdır.
- Beton segregasyona uğramamalıdır.
- Betonun sıkıştırılmasına önem verilmelidir.
- Beton dökümü bittikten sonra hemen kür uygulanmalıdır.

2.6.3.2.2. Aderans

Betonarmenin, betonla çeliğin beraber çalıştığı kompozit bir malzeme olduğu bilinmektedir. Betonarmede beraber çalışma özelliğinin ancak çeliğin beton içerisinde kaymaması halinde mümkün olacağı açıktır. Beton ve çelik donatıdan oluşan herhangi bir yapı elemanının betonarme olarak davranabilmesi için, donatıların betonla kenetlenmesi gerekir. Bu kenetlenmeyi sağlayan, arada kayma olmadan oluşan bu tür gerilme geçişine aderans adı verilmektedir. Aderans kuvveti beton içindeki çubukların kaymasını önler, kenetlenmeyi sağlayarak beton ve çubukların beraber çalışmalarını sağlar. Bu şekilde iki malzemenin birbirini tamamlaması mümkün olur.

Aderans mekanizması, üç farklı mekanizmanın sonucundan oluşur, bunlar: kimyasal adezyon, sürtünme direnci ve donatı çubuklarının çıkıntıları ile beton arasındaki mekanik kenetlenmedir. Mekanik kenetlenme, mekanizmanın dikkate alındığı seviyeye bağlı olarak sürtünme şeklinde değerlendirilebilir. Kimyasal adezyondan kaynaklanan aderans direnci küçüktür; donatı ile beton arasındaki kayma başladığında da etkisini hemen kaybeder [87, 88]. Ancak, donatı çubuk çıkıntılarının taşıma etkisinden kaynaklanan eğik kuvvetler, donatı ile beton arasındaki kuvvetlerin transferinin devamını mümkün kılmaktadır.

Genellikle aderansın çubuk düz yüzü ile çimento harcı arasındaki kimyasal yapışma sonucu ortaya çıktığı düşünülürse de düşük zorlamalar bile bu yapışmayı çözer ve çubuk sıyrılır. Bu tür sıyrılmanın başlamasıyla sürtünme ve kama etkisiyle oluşan aderans başlar. Sürtünmeden ortaya çıkan aderans donatı çubuğunun pürüzlüğüne bağlıdır. Donatının paslanmaya başlamasıyla pürüzlükle beton ile çelik arasındaki aderans artar. Ancak pasın bir tabaka oluşturması donatının bu tabakadan sıyrılmasını kolaylaştırarak aderansın kolayca çözülmesine sebep olur. Bu nedenle çok az paslanma aderansı olumlu yönde etkilediği halde genellikle paslanma aderansın kaybolmasına neden olur.

Betonarme yapıların inşasında, normal betona göre yerleşme kalitesini temin etmek için beton karışımına sıkıştırma işleminin uygulanması gerekir. Yetersiz sıkıştırma, betonarme elemanlarda peteğimsi ve boşluklu yapılar gibi kusurlara sebep olur. Bu eksiklikler dayanıklılık ve yapısal performansta azalmalara yol açar. Bununla birlikte, sık donatılı ve büyük boyutlu elemanlarda sıkıştırma işlemi zordur. Uygun işlenebilirliğe sahip bir beton seçimi, genellikle betonun yerleştirilmesindeki zorlukları çözmek için yapılır. Bu nedenle Betonun yerleştirilmesiyle ilgili problemleri çözmek için kendiliğinden yerleşen beton (KYB) kullanılır. Deprem bölgelerindeki çok sık donatılı yapılarda kullanmak

amacıyla 1980'li yılların ikinci yarısında Japonya'da [89] geliştirilen KYB, mükemmel şekil değiştirebilen, ayrılmaya karşı yüksek dirence sahip olan ve herhangi bir sıkıştırma işlemi olmaksızın kolaylıkla yerleşebilen bir beton olarak tanımlanır [90].

Betonarme elemanların analiz ve tasarımı yapılırken beton ve donatı arasındaki kenetlenme ve bindirmeli ekli donatılar beton ve donatı arasındaki aderans açısından büyük bir öneme sahiptir. Aderansın tam olarak sağlanabilmesi için kenetlenme boyunun yeterli olması gerekmektedir. Bunu sağlayan aderansa da kenetlenme aderansı adı verilmektedir. Kenetlenmenin yeterli olabilmesi için ise donatı akma dayanımına ulaşmalı ya da akma ötesi şekil değiştirme yapması durumunda betondan sıyrılmamalı ve betonu yarmamalıdır [91].

Aderansı oluşturan temel nedenler:

- Beton ve çelik arasındaki sürtünme kuvvetleri,
- Çelik ve beton arasındaki yapışmayı sağlayan moleküler ve kapiler bağ kuvvetleri,
- Donatı çubuğu ve beton arasındaki mekanik dış kuvvetleridir.

Aderansa etki eden önemli değişkenler ise şunlardır:

- Betonun çekme mukavemeti,
- Deneyler sonucunda çeliğin akma gerilmesi,
- Çubuk yüzey geometrisi (düz, nervürlü),
- Çubuk çapı (özellikle nervürlü çelikler için çok önemli olduğu yapılan deneylerden anlaşılmıştır).
- Kenetlenme boyu (aderansla arasında doğrusal bir orantı olmamakla birlikte aderansı etkiler).
- Pas payı veya beton örtü kalınlığı olarak adlandırılan beton örtüsü özellikle nervürlü çubuklarda etkilidir.
- Betonarme çubuğunun betonlama sırasındaki konumu. Özellikle yüzeye yakın çubukların mukavemetinin düşük olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni üst çubukların altında biriken hava kabarcıkları ve döküm ile piriz süresi arasında oluşan çökmedir.
- Kullanılan agreganın cinsi ve katkı maddeleri. Örneğin hafif agregası ile yapılan betonun aderans gerilmesi normal agregası ile yapılanlara göre daha düşüktür [92].

Betonun karakteristik basınç dayanımının (f_{ck}) yüksek, kesme dayanımının (f_{cv}) yaklaşık basınç dayanımının yarısına ($\approx 0.5f_{ck}$) eşit, çekme dayanımının ise çok düşük ($\approx 0.1f_{ck}$) olduğu ve betonarme hesaplarda sıfır kabul edildiği bilinmektedir. Oysa yapı elemanlarının çoğunda, eğilme momentleri ve merkezi çekme kuvvetlerinden dolayı büyük çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Bu nedenle bu tür yapılarda beton kullanmak için çekme gerilmelerini karşılamak üzere, bu gerilmeler doğrultusunda çekme etkisinde kalacak olan bölgelere yeterli miktarda donatı konmuş, donatıyla beton arasındaki aderansın yararlanılarak ortak çalışma sağlanmış ve bu suretle betonarme yapı tekniği doğmuştur [93].

Betonarme yapı elemanlarında, varlığını borçlu olduğu aderans sayesinde, donatıdaki gerilmeler değişebilmekte ve elemana etkiyen iç kuvvetler bir kesitten diğerine aktarılabilir ki bu olay da adaptasyon olarak bilinmektedir.

Aderans gerilmelerinin belirlenmesinde kullanılan en basit deney olan çekip-çıkarma deney düzeneği Şekil 2.20.a'da, donatıya etkiyen çekme gerilmesi dağılımı Şekil 2.20.b'de, aderans gerilmelerinin dağılımı ise Şekil 2.20.c ve 2.20.d'de görülmektedir [94, 95]. Görüldüğü gibi düzgün yayılı olmayan aderans gerilmeleri çelik çubuktaki gerilme düzeyiyle değişmektedir.

Yapılan deneysel araştırmalarda aynı dayanım sınıfındaki KYB ile normal beton arasındaki aderansın, iki normal beton arasındaki aderansa göre eşit veya daha iyi olduğu sonucu elde edilmiştir.

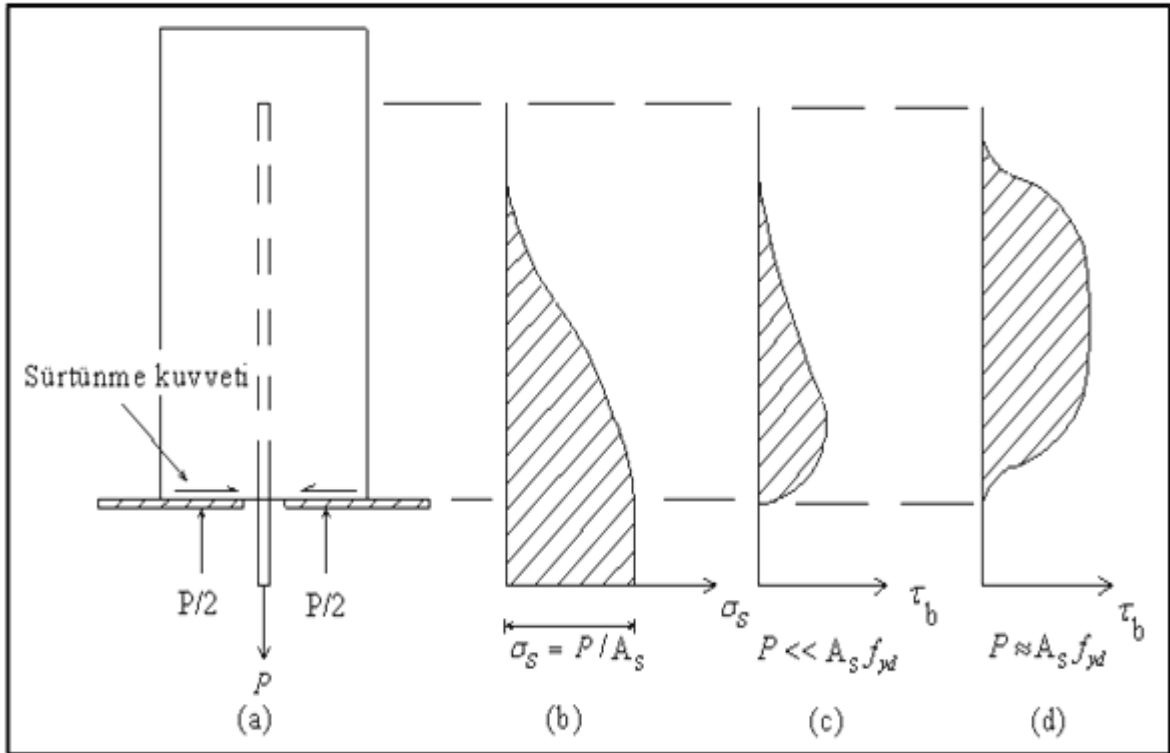
KYB'nin donatı ile aderansının klasik betona kıyasla daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Sıyırılma deneyi ile KYB'de düşey homojenliğin standart betona kıyasla çok daha iyi olduğunu tespit etmiştir. Stabilitesi düşük, ayrışan standart betonun düşeyde mekanik özellikleri homojenlik göstermez. KYB'de ise düşeyde mekanik özelliklerdeki değişkenlik (top-bar effect) önemli ölçüde azaltmaktadır [96].

Taze beton terlemesi, çökmesi ve ayrışması birçok çelik-beton arayüz kusurunun sebebidir. Katı bileşenlerin (agrega, çimento) taze betonda serbest suyun terleme suyu olarak yükselmesine sebep olur; bu terleme suyu iri agrega ve donatı gibi engellerin altında birikebilir. Bazı üretim etkenlerinden dolayı bu etkiler artabilir. Terleme suyu, dikey bir beton kesitin alt ve üst kısmındaki su-çimento oranları arasında farklılıklar yaratır. Bu farklılıklar gözenekliliği ve mekanik özellikleri etkiler. Terleme suyunun yatay çubukların

altında birikmesi, aderans kalitesini azaltır. Donatı altındaki beton derinliği bu durumun önemini arttırır [97-101]. ACI 318 Betonarme Yönetmeliği, donatı çubuğu altındaki beton derinliği 30 cm'nin üzerine çıktığında kenetlenme uzunluğunda % 30 artış öngörmektedir [102].

Mekanik özelliğin ötesinde, çelik-beton arayüz kalitesi bozukluğu donatı korozyonuna neden olabilir. Korozyonun başlaması için çelik-beton arayüzünde kusurların oluşması gereklidir. Genelde, korozyonun başlaması için öngörülen klorür eşik değeri yeterli değildir. Birçok araştırmacı bu değeri farklı hesaplamıştır. Bunun sebebi farklı araştırmalardaki çelik-beton arayüz kalitesi farkı, araştırmaların bir kısmında da beton gözenek çözeltisini simüle eden alkali çözeltilerin kullanılmış olmasıdır [103-105].

Çelik-beton arasındaki kusurları azaltmanın en etkili yolu kendiliğinden yerleşen beton (KYB) kullanımı olacaktır. Bu betonlar vibrasyon kullanılmadan, kendi ağırlığıyla yerleşebilecek şekilde akıcı, ama aynı zamanda kararlı (terleme, çökme ve ayrılmaya karşı dirençli) betonlardır. KYB, süperakışkanlaştırıcı ve viskoziteyi arttıran katkıların iyi bir karışımıyla elde edilebilir [106,107].



Şekil 2.20. Merkezi çekme etkisindeki bir donatı çubuğunda çekme ve aderans gerilmelerinin şematik dağılımı [94]

Betonda ve harçta aderans için çok önemli olan arayüz kalitesi ile ilgili fikir edinebilmek için, 15x15x15 cm boyutlarında harç numuneler dökülmüş ve bunların merkezine 40 cm uzunlukta donatılar yerleştirilmiştir. Bu tip çalışmalarda donatı-harç arayüzü arasındaki kenetlenme uzunluğu çok önemlidir. Uzunluk arttıkça aderans kuvvetinin artacağı da bellidir. Bununla birlikte gerek harçtan gerekse donatıdaki korozyondan kaynaklanabilecek arayüz kusurları aderansı olumsuz olarak etkileyecektir.

20'inci yüzyılın başından bu güne kadar, ortalama aderans gerilmesinin ve gerekli kenetlenme boyunun saptanmasına yönelik çok sayıda deney türü geliştirilmiştir. Hemen belirtmek gerekir ki, geliştirilen bu deney elemanlarının hiçbirisi tam anlamı ile gerçek durumunu yansıtmamaktadır. Bu nedenle deney türlerinin tümü eleştiriye açıktır. Bu güne kadar gerçekçi bir aderans deneyinin geliştirilmemiş olmasının başlıca nedenleri aşağıda sıralanmıştır:

- Aderans- kesme ilişkisi henüz tam olarak aydınlığa kavuşturulmamış karmaşık bir konu olduğundan, bu etkileşimin gerçekçi olarak deney elemanına yansıtılması çok zordur.
- Boyut etkisi aderansı büyük ölçüde etkilemektedir.
- Yerel gerilmelerinin aderans ve kenetlenme üzerinde ihmal edilmeyecek ölçüde etkileri vardır.
- Donatı çubukları arasındaki uzaklık ve beton örtüsü aderansı etkileyen önemli değişkenlerdendir. Deneylerde bunları modellemek çok zordur.
- Sargı donatısı aderansı olumlu yönde etkilemektedir. Deney elemanı bu sargı etkisini de içermektedir.

Bu durumda, aderans ve kenetlenme sorunu incelenecek eleman, laboratuvarında aynı boyut ve sınır koşulları ile imal edilip test edilmedikçe, yapılan deneyin tam olarak gerçeği yansıttığı söylenemez. Karşılaştırılan her sorun için böyle bir deney planlanması, elbette ki pratik ve ekonomik olmayacaktır. Aşağıda tanıtılan ve irdelenen deney türleri, bu gerçeklerin ışığında değerlendirilmelidir.

- Çekip Çıkarma Deneyi
- İtip-Çıkarma Deneyi
- Geliştirilmiş Çekip-Çıkarma Deneyi
- Eksantrik Çekip-Çıkarma Deneyi

2.6.3.2.3. Aşınma Direnci

Aşınma ve darbe etkileri, betona fiziksel yönden zarar verebilecek etkenlerin arasında sayılır. Bu nedenle, aşındırıcı ve darbe verici etkenlerin ortamda gerçekleşme olasılıklarının ve etki düzeylerinin araştırılması gerekir.

En az enerji tüketimi ile üretilen ve günümüzün en yaygın kullanım alanına sahip taşıyıcı yapı malzemesi olan betonun mukavemetini yükseltme çabaları daima çimento hamuru fazını iyileştirme yönünde olmuştur. Hiç boşluk içermeyen bir çimento hamur fazı üretilmesi ile en yüksek mukavemete ulaşılabilir. Bu amaçla en az boşluklu ve çok iyi aderans sağlayan yöntemler üzerinde çalışılmaktadır [108,109]

Betonun yıllar boyunca dış etkenlerden ve betonun bileşenlerinden ileri gelen faktörlerden olumsuz etkilenmeyerek dayanımını ve niteliklerini kaybetmemesine dayanıklılık adı verilir [110]. Beton dayanıklılığını etkileyen etkenlerden biri de aşınmaya karşı dirençtir. Beton yüzeyine sürtünme ve çarpma şeklinde gelen kuvvetler, beton yüzeyini adeta törpülersine etki yaratmakta, yüzeyin aşınmasına yol açmaktadır. Aşınma yavaş tempoda gerçekleşen fiziksel ve mekanik bir olaydır. Aşınmanın etkili olduğu bazı alanlar; üzerinde insan trafiğinin (yayalar), hafif trafiğin veya kayarak sürtünmenin olabileceği kaldırım ve döşeme betonları, üzerinde ağır trafik (özellikle zincirli tekerlekleri bulunan) veya çivili lastikleri olan otoların hareket ettiği beton yollar, akarsular tarafından taşınmakta olan kum, çakıl veya sert parçacıkların sürtünme yaratarak veya çarparak aşındırdığı baraj, tünel, boru, köprü ayağı gibi yapılardır [11]. Geleneksel beton tipik olarak, kavitasyon ve aşınma dayanımı açısından zayıf performans gösterir. Betonun bu özelliğinin belirgin olarak gerektiği yerlerde beton içerisinde değişik malzemelerin kullanılması sonucu betonun bu zayıf özelliği iyileştirilerek beton gibi malzemelere olan ilginin artmasına neden olmuştur [111, 112].

Dayanıklı bir beton üretiminde göz önüne alınan en önemli özellik betonun boşluk yapısı ve oranıdır [113]. Sertleşmiş betonun su emme kabiliyeti yani geçirimsizliği betonun hizmet süresi boyunca karşılaşılabileceği yıpratıcı fiziksel ve kimyasal olaylara dayanıklılığını ve dayanımını etkilemektedir [11]. Suyun ve diğer akışkanların beton içerisinde ilerlemesi sahip olduğu boşluklar yoluyla olur ve zararlı maddeler bu şekilde betonun içerisine taşınır. [114, 115] Bu sebepten bazı depo, baraj vb. yapıların yapımında kullanılan betonlar başta olmak üzere, içerisinde su veya başka bir sıvı bulunduran bütün betonların mümkün olabildiği kadar geçirimsiz olmaları gerekmektedir [11].

Cisimlerde meydana gelen mekanik aşınma kaybı, başka bir maddeyle hareketli teması sebebiyle aradaki sürtünmeden dolayı oluşur. Kompozit bir malzeme olan beton, iri agregâ fazı ve ince agregayla beraber çimentonun oluşturmuş olduğu hamur fazı olmak üzere iki ana fazdan oluşmaktadır. Betonun aşınma direnci bu ikisinden daha dirençli olana göre gelişmektedir [116].

Aşınma direnci yüksek olan bazalt, granit gibi doğal ve yüksek fırın cürufu gibi yapay sert agregalarla üretilen betonun aşınma direnci de yüksek olmaktadır. Diğer yandan sert agregalar, aşınma dirençlerinin daha iyi olmasına karşın konkasör tesislerindeki mekanik aksamalarda daha fazla aşınma ve yıpranmaya neden olduklarından işletme masraflarını da arttırmaktadırlar. Fakat yine de sert agregaların bu dirençli halinden beton yol kaplamalarında yararlanmak gerekmektedir.

Betonun basınç dayanımı, aşınmaya karşı direncini belirleyen ana etmendir. Betonun yüzey bölgesinin özellikleri iyi kürden, yüzey bölgesindeki terleme özelliklerinden, yüzey bölgesi su/çimento oranından fazlaca etkilenir. Özellikle iyi kürün önemi fazladır. Avrupa Standartları EN 206:2000 [6], betonda iyi bir aşınma dayanımının elde edilebilmesi için kür süresinin normalden iki kat daha uzun tutulmasını önerir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Harcın kırılma parametrelerinin doğru olarak belirlenmesi için numunelerin döküm, bakım ve deney uygulama şartlarının mümkün olduğu kadar aynı olması gerekmektedir. Bu tez çalışmasında deney numuneleri aynı laboratuvarında ve yaklaşık aynı şartlarda hazırlanmıştır.

Harç heterojen bir yapı malzemesidir. Harcın özelliklerini etkileyen üretim, yerleştirme, bakım ve karışım oranları gibi birçok parametre vardır. Bu parametrelerin tamamını sabit tutmak mümkün değildir. Ancak harcın kırılma özelliklerinin belirlenmesi için harcı etkileyen özelliklerin yaklaşık %80-90'ı kadar bir miktarın kontrol altında tutulması gerekir. Bu durum harcın kırılma parametrelerinin sadece basınç dayanımı ile ifade edilemeyeceğini, basınç dayanımı kadar etkin olan diğer dayanım ve dayanıklılık parametrelerinin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Çimento

Deneysel çalışmaların tamamında Elazığ Çimento Fabrikası'ndan temin edilen CEM I 42.5 N tipi çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Her deneyin amacına uygun olarak hesaplanan numune sayısına yetecek kadar çimento fabrikadan bir seferde temin edilmiştir. Böylece numuneler çimentonun değişik üretim zamanlarında gösterebileceği farklı davranış durumundan korunulmuştur.

Tablo 3.1. CEM I 42.5 N çimentonun özellikleri

Özellik	CEM I 42.5 N	Özellik	CEM I 42.5 N
SiO ₂ (%)	21.12	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	3.15
Al ₂ O ₃ (%)	5.62	Priz başı (dk)	155
Fe ₂ O ₃ (%)	3.24	Priz sonu (dk)	210
CaO (%)	62.94	İncelik (m ² /kg)	349
Cl (%)	0.0044	Basınç dayanımı, 3 gün (MPa)	25.8
Ç. Kalıntı (%)	0.64	7 gün (MPa)	38.1
K. Kaybı (%)	3.52	28 gün (MPa)	49.1

3.1.2. Agregat (Kum)

Deneylerin tamamında Elazığ ili Palu ilçesinden elde edilen en büyük dane çapı ($d_{\max} = 2 \text{ mm}$) olan nehir agregası (kumu) kullanılmıştır.

3.1.3. Karışım Suyu

Deneysel çalışmaların tamamında TS EN 1008'e uygun Elazığ İli şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Karma suları herhangi bir depoda bekletilmeden, içme suyu şebekesinden alındığı anda kullanılmıştır [117].

3.1.4. Katkı Maddeleri

3.1.4.1. Mineral Katkılar

3.1.4.1.1 Uçucu Kül

Hazırlanan harç karışımlarında Bursa/Orhaneli termik santralinden temin edilen F sınıfı uçucu kül (UK) yapılan tasarımlara uygun olarak çimento ve/veya kireçtaşı tozu (KT) ile ikame edilerek kullanılmıştır.

Orhaneli termik santralinden beş gün boyunca alınan uçucu kül numunelerinin kimyasal analiz sonuçları ve ortalama değerlerin standartlara uygunluğunun değerlendirilmesi Tablo 3.2, 3.3 ve 3.4'te verilmiştir [118].

Tablo 3.2 incelendiğinde Orhaneli uçucu külünün kimyasal bileşenlerin birbirine çok yakın olması nedeniyle, bu santralin sabit koşullarda üretim yaptığı sonucuna varılmıştır. Orhaneli uçucu külü, reaktif kireç miktarının % 10'un altında olması nedeniyle TS EN 197-1'e göre V sınıfı (silissi uçucu kül) kapsamına girmektedir. Bu standartta istenilen reaktif silis miktarının da %25'in üzerinde olması (%34.06) nedeniyle TS EN 197-1 V Sınıfı kül koşullarına tamamen uyduğu anlaşılmıştır [119].

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesinin %70'i geçmesi (%80.73) ve CaO miktarının %10'un altında olması nedeniyle ASTM C618'de belirtilen F sınıfı (düşük kireçli) uçucu kül koşulunu sağlamaktadır [120].

Orhaneli külünün $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesinin %70'i geçmesi aynı zamanda TS 639'daki koşula da uymaktadır [121]. TS EN 450 Standardına göre SO_3 için getirilen %3.0'lük sınırın altında SO_3 içermesi (%2.48) serbest kireç miktarının %1.0'in altında olması nedeniyle bu standarda da uymaktadır [122].

Tablo 3.2. Orhaneli UK'ne ait kimyasal bileşenlerin özellikleri [118]

Numune								
Oksit (%)	1	2	3	4	5	Ortalama	St. Sapma (%)	Varyasyon kats. (%)
SiO ₂	47.48	48.66	48.77	48.52	49.23	48.53	0.65	1.34
Al ₂ O ₃	24.17	25.3	25.25	24.29	24.06	24.61	0.61	2.48
Fe ₂ O ₃	8.03	7.18	7.48	7.63	7.62	7.59	0.31	4.08
S+A+F	79.68	81.14	81.5	80.44	80.91	80.73	-	-
CaO	11.38	8.83	9.06	9.06	9.06	9.48	1.07	11.28
MgO	2.27	2.26	2.29	2.31	2.25	2.28	0.02	0.88
SO ₃	2.49	2.64	2.1	3.0	2.18	2.48	0.36	14.52
K ₂ O	2.47	2.56	2.65	2.44	2.44	2.51	0.09	3.58
Na ₂ O	0.35	0.35	0.37	0.33	0.35	0.35	0.01	2.85
KK	1.11	1.76	1.72	1.93	1.69	1.69	0.34	20.12
Cl ⁻	0.0005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.001	20

Tablo 3.3. Orhaneli UK'ne ait kimyasal bileşenlerin standartlara uygunluğu [118]

Standartlara Uygunluk Sınırları							
Oksit (%)	Uçucukül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO ₂	48.53						
Al ₂ O ₃	24.61						
Fe ₂ O ₃	7.59						
S+A+F	80.73				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	9.48						
MgO	2.28				<5.00		
SO ₃	2.48	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K ₂ O	2.51						
Na ₂ O	0.35						
KK	1.69	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Cl ⁻	0.01	<0.10					
Serb. CaO	0.11	<1.00					
Reak. SiO ₂	34.06	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak. CaO	7.58		<10.00	<10.00			

Tablo 3.4. Orhaneli UK'ne ait fiziksel özellikler [118]

Blaine incelik (m ² /kg)	303
10µm-40µm arası malzeme (%)	42.6
Dmedian (µm)	29
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	2.2
Etkinlik Faktörü, E _f (C=350 kg/m ³) için	0.43

3.1.4.1.2. Kireçtaşı Tozu

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kullanılan KT; Elazığ/Karayazı bölgesi kireçtaşı ocaklarından olan Elkisan Kireç San. ve Tic. A.Ş. ocağından temin edilmiştir. Konkasörlerde 0, 1, 2 ve 3 numaraları ile isimlendirilen eleklerde kırılan kırmataş malzemeden 0 no'lu elekten geçen kısım seçilmiş daha sonra bu malzeme laboratuvar ortamında 0.125 mm elekten geçirilerek KT elde edilmiştir. KT, yapılan harç tasarımlarına uygun olarak çimento ve/veya UK ile ikame edilerek kullanılmıştır. Kireçtaşı kökenli olan bu malzemenin Blaine incelik değeri 443 m²/kg olup hesaplanan özgül ağırlığı 2.70'tir. Tablo 3.5'te KT özgül ağırlığı verilmiştir.

Tablo 3.5. Karayazı kireçtaşı tozunun özgül ağırlığı

KİREÇTAŞI TOZUNUN ÖZGÜL AĞIRLIĞI		
A	Piknometre ağırlığı	120 gr
B	Piknometre + su ağırlığı	370 gr
C	Piknometre + kuru numune ağırl.	170 gr
D	Piknometre + numune + su ağırl.	401.5 gr
[(C-A) / [(B-A)-(D-C)]]		Zahiri özgül ağırlık 2.7 gr/cm ³

3.1.4.2. Kimyasal (Akışkanlaştırıcı) Katkılar

Çalışmada akışkanlaştırıcı katkı olarak polikarboksilat esaslı yeni kuşak süperakışkanlaştırıcı (SA) Sika Viscocrete-E3 (V-E3) kullanılmıştır. Bu katkı harçlarda kullanılan üçüncü nesil süperakışkanlaştırıcı olarak tanımlanan bir SA'dır

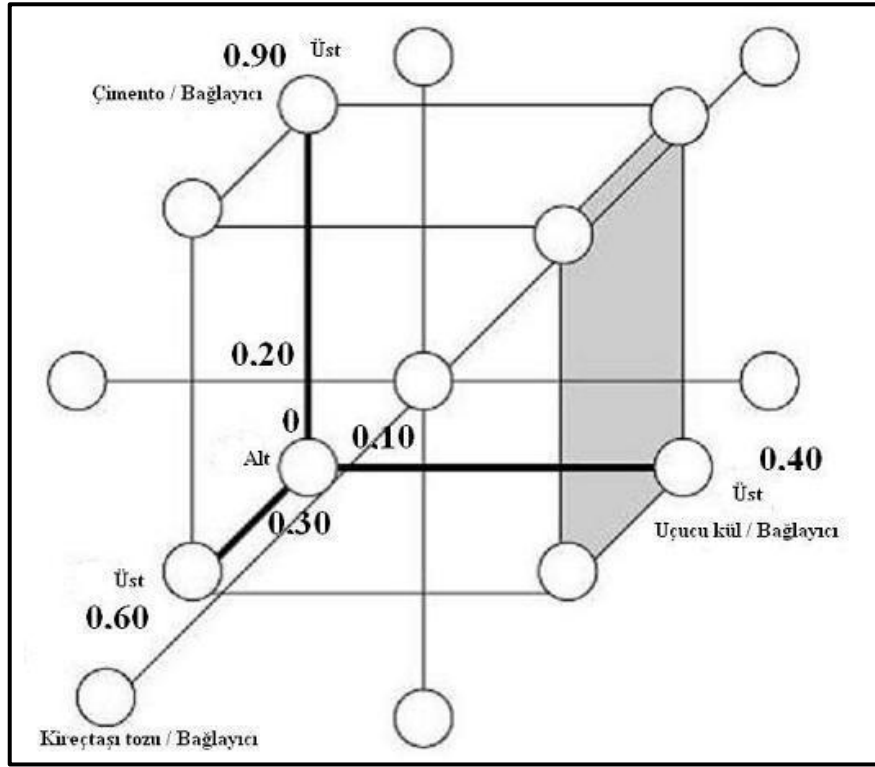
Viscocrete-E3'ün teknik özellikleri:

- Suda çözünen Polikarboksilat esaslı polimerdir.
- Kızılımsı berrak likit renklidir.
- Yoğunluğu ≈ 1.08 kg/l'dir.
- PH derecesi 3.5'dir.
- Solid: %30'dur.
- Viskozitesi: 30 cP'dir

3.2. Yapılan Deneyler Hakkında Genel Bilgiler

Deneyler Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarı, Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı ve Elazığ

Altınova Çimento Sanayi Ticaret A.Ş. Beton Laboratuvarlarında yapılmıştır. KYH karışım oranları, mutlak hacim yöntemi kullanılarak, Şekil 3.1’de gösterilen Faktoriyel Tasarım Metodundan yararlanılıp, EFNARC 2002 dikkate alınarak hazırlanmıştır. Bu sayede çok fazla sayıda deney yapmaya gerek kalmadan daha az deney malzemesi kullanılarak, daha az zamanda, optimum oranların yakalanması mümkün olmaktadır. Bu özel deney metodunda üç değişken kullanılmıştır. Bu metod yıldız metodu veya küp metodu olarak da adlandırılabilir. Metoda göre Şekil 3.1’deki küpün üç ayrı noktasına merkez değerler konulur. Bu noktalardan uzaklaştıkça malzeme oranı artar. Üç tane de orta noktalara değer konulur. Bu şekilde faktöriyel tasarım esasına göre $2^3=8$ tane olmak üzere ikili kombinasyonlar orta noktalardan uç noktalara seçim yapılarak $2 \times 3=6$ tane de uçdeğerler bulunur. Buna ilaveten orta değerler 3 kere tekrar edilerek deneylerin sağlanması yapılır [149].



Şekil 3.1. Harç karışım oranları için Faktöriyel Tasarım Metodu (FTM) [149]

Tablo 3.7’de 1 dm^3 harç için karışım oranları verilen taze harç deney serileri de bu metoda uygun olarak yapılmıştır. Bunlarla birlikte taze harç özelliklerinin yayılma ve akma

değerlerinin Tablo 3.6’da belirlenmiş sınırlar arasında kalması sağlanmıştır. Verilen özellikleri sağlayan karışımlar KYH olarak kabul edilmektedir.

Deneylere başlarken mineral katkı kullanılmayarak sadece çimento ile çalışma yapılan kontrol numunesi elde edilmiştir. Sonraki serilerde kullanılan mineral katkılar UK ve KT çimento ile ağırlıkça yer değiştirmiştir. Su/bağlayıcı oranı 0.44 oranına yakın tutularak etkisi minimum olacak şekilde seçilmiştir. Çalışmada, kendiliğinden yerleşen harcın KYH bileşenlerinden olan mineral katkıların karışımda birden fazla ve farklı dozajlarda kullanımının taze harcın reolojik (yayılma, akma, viskozite, birim hacim ağırlığı), sertleşmiş harcın; dayanım (basınç kırılması, eğilme ve çekme kırılması, ultrases hız geçirgenliği) ile dayanıklılık (aşınma, aderans, su geçirgenliği) özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Tablo 3.6. Kendiliğinden yerleşen taze harç için EFNARC 2002’ye uygun, kullanışlı deney limit sınıfları

Sınıf	Mini Çökme-Yayılma Çapı d (cm)	Mini V-hunisi Tv (s)
KYH	24≤d≤26	7≤t≤11

Karışımlarda toplam bağlayıcı (çimento veya çimento+mineral katkı) miktarı ve yüksek oranda su azaltıcı özelliğe sahip polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı (V-E3) sabit alınmıştır. Kum (0-2 mm) ve su/bağlayıcı oranı tüm karışımlarda 0.44 oranına yakın tutularak, mineral katkıların çimento yerine tekli ve çoklu kullanımının taze ve sertleşmiş harcın özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Taze harç özelliklerini incelemek için yapılan viskozite deneylerinde ise, Bingham Modeli esas alınmıştır. Karışım serileri kodlanırken, çimento için C, uçucu kül için UK ve kireçtaşı tozu için KT kısaltmaları kullanılmış her karışım için toplam bağlayıcı ağırlığı içindeki oranları yanlarına yazılmıştır. Örneğin: 30C20UK50KT karışımında ağırlıkça çimento/bağlayıcı oranı %30, uçucu kül/bağlayıcı oranı %20, kireçtaşı tozu/bağlayıcı oranı %50’dir.

3.2.1. Taze Harç Deneyleri

Taze harç deneylerinde ilk başta mineral katkı (UK, KT) eklenmeden bağlayıcı olarak sadece çimentonun kullanıldığı normal kıvamlı bir kontrol karışımı elde edilmiş ve su/bağlayıcı (s/b) oranı olarak 0.44-0.45 oranı bulunmuştur. Daha sonra bütün karışımlar için mineral katkı kullanılarak SA eklenmiş olarak EFNARC 2002’ye uygun kıvam bulma

deneyleri yapılmış ve 24-26 cm arası yayılma şartını sağlayan s/b oranları tespit edilmiştir. Bunun için SA'nın üretici şirket tarafından tavsiye edilen %1.25 oranı ile çalışılmıştır.

Bütün deneylerde karışım serileri için harç oluşturulurken ilk olarak malzemeler kuru halde karılmış sonra harç makinesinde 2 dakika yavaş karıştırılmıştır. Karıştırma kabı çeperinde çimento kalmaması için el ile 15 saniye bunu müteakip makine ile 1 dakika hızlı karıştırıldıktan sonra yalancı priz oluşumunu atlamak için 3 dakika beklenmiştir. En son makine ile 15 s karıştırılıp deneyler yapılmıştır.

Deneylerden önce yayılma değerleri ölçümü yapıp bu standart sağlandıktan sonra V-hunisi standartları elde edilmiş en son viskozimetre değerleri ölçülmüştür. Bu ölçümlerde doğru sonuçlar elde edebilmek için her bir karışım serisi için 3 ayrı numune karışımı kullanılmıştır.

Yeni kuşak süper akışkanlaştırıcıların taze harç reolojik özellikleri üzerindeki etkisi, eş eksenli viskozimetre kullanılarak ölçülmüştür. Burada kullanılan harçlar RILEM standartlarında önerilen harç karıştırma makinesinde ve önerilen yöntemlerle hazırlanmıştır. Daha sonra ileride bahsedilecek şekilde programlanmış viskozimetrede viskozite değerleri ölçülmüştür. Farklı mineral katkı oranlarının farklı çimento dozajlarında gösterdikleri davranış değişiklikleri incelenmiş ve harcın yerleştirilebilmesi ve ayrışma direnci özellikleri incelenmiştir.

3.2.1.1. Yayılma Deneyleri

Yayılma deneyleri yapılırken yayılmanın EFNARC standartlarına uygunluğu dikkate alınmış ve KYH için 24-26 cm aralığında olması sağlanmıştır. Bunun için başlangıçta 1 dm³ hacminde mineral katkısız %100 çimento kullanılan kontrol harcı deneyleri yapılmıştır. Belirlenen yayılma aralığının elde edilmesi için akışkanlaştırıcı oranı kullanım talimatlarına uygun olarak %1.25 alınmıştır. Su oranının yaklaşık olarak % 44-45 civarında çıktığı görülmüştür. Sonraki deneylerde bu oran çok fazla değiştirilmeden 3.1 denkleminde hava miktarı hacmin %1'i alınarak W_{kum} bulunmuş ve karışım içeriğindeki bulunan son malzeme ağırlıklarına göre hassas terazide tartılıp hazırlanmıştır. Önce kuru malzemeler karıştırılmış, daha sonra buna (akışkanlaştırıcı+su) karışıma eklenmiştir. Harç karıştırma metodu yukarıda belirtilen standartlara uyularak gerçekleştirilmiştir.

$$\frac{C}{\rho_C} + S + \frac{A}{\rho_A} + H = 1 \text{ m}^3$$

3.1.

Denklemdede;

C : Karışımdaki çimento miktarı (kg)

ρ_C : Çimentonun yoğunluğu (kg/m^3)

S : Karışımdaki suyun miktarı (kg)

A : Karışımdaki agreganın miktarı (kg)

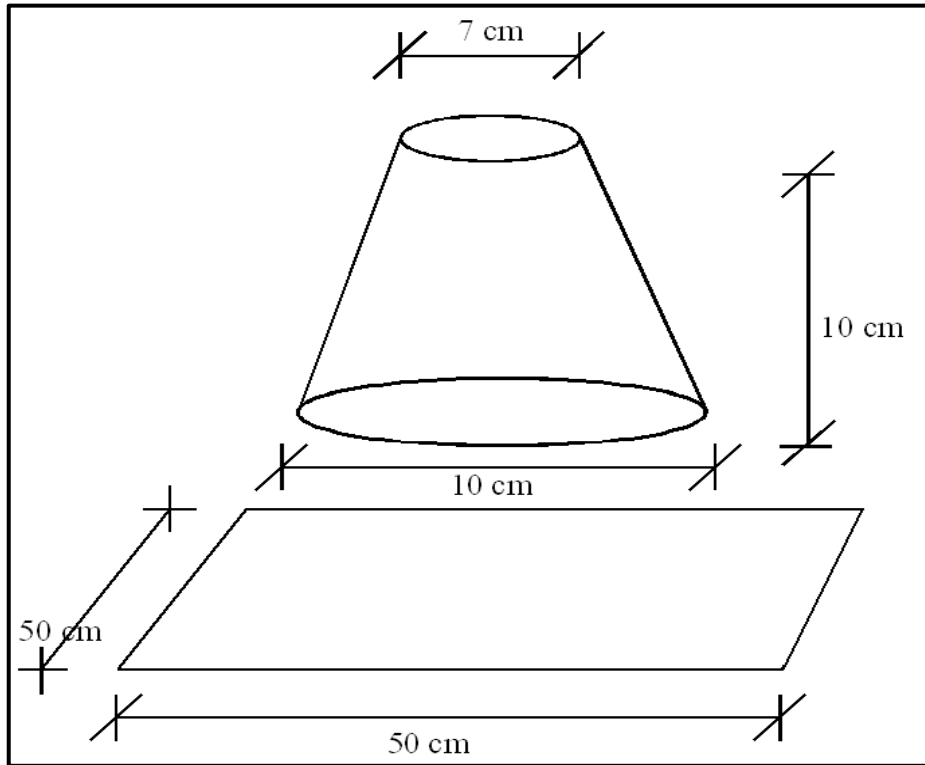
ρ_A : Agreganın yoğunluğu (kg/m^3)

H : Harçtaki toplam hava miktarı (m^3)

3.1 denklemi genel bir normal harç karışım oranları denklemi olup KYH için akışkanlaştırıcı, mineral katkıları UK ve KT ilave edildiğinde denklem aşağıda 3.2'deki hali alır.

$$\frac{W_C}{\gamma_C} + \frac{W_{uk}}{\gamma_{uk}} + \frac{W_{kt}}{\gamma_{kt}} + \frac{W_{ak}}{\gamma_{ak}} + \frac{W_{su}}{\gamma_{su}} + \frac{W_{kum}}{\gamma_{kum}} + H = 1 \text{ m}^3$$

3.2



Şekil 3.2. Taze harç mini çökme (yayılma) konisi boyutları

Tablo 3.7. Harç karışım oranları

Malzeme Seri adı	Çimento C (%)	C Ağırlık (gr)	C Hacim (cm ³)	UK (%)	UK Ağırlık (gr)	UK Hacim (cm ³)	KTT (%)	KTT Ağırlık (gr)	KTT Hacim (cm ³)	Su (gr) (cm ³)	V-E3 Ağırlık (gr)	V-E3 Hacim (cm ³)	Kum Ağırlık (gr)	Kum Hacim (cm ³)	Hava Hacim (cm ³)	Toplam Hacim (cm ³)
100C	100	640.0	203.17	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	294.0	8.0	7.41	1276.65	485.42	10	1000
90C10UK	90	576.0	182.86	10	64.0	29.09	0	0.0	0.00	288.0	8.0	7.41	1269.36	482.64	10	1000
80C20UK	80	512.0	162.54	20	128.0	58.18	0	0.0	0.00	268.0	8.0	7.41	1298.88	493.87	10	1000
70C30UK	70	448.0	142.22	30	192.0	87.27	0	0.0	0.00	262.0	8.0	7.41	1291.59	491.10	10	1000
60C40UK	60	384.0	121.90	40	256.0	116.36	0	0.0	0.00	256.0	8.0	7.41	1284.29	488.32	10	1000
70C30KT	70	448.0	142.22	0	0.0	0.00	30	192.0	71.11	278.0	8.0	7.41	1292.01	491.26	10	1000
60C40KT	60	384.0	121.90	0	0.0	0.00	40	256.0	94.81	276.0	8.0	7.41	1288.37	489.87	10	1000
50C50KT	50	320.0	101.59	0	0.0	0.00	50	320.0	118.52	274.0	8.0	7.41	1284.72	488.49	10	1000
40C60KT	40	256.0	81.27	0	0.0	0.00	60	384.0	142.22	272.0	8.0	7.41	1281.07	487.10	10	1000
60C10UK30KT	60	384.0	121.90	10	64.0	29.09	30	192.0	71.11	276.0	8.0	7.41	1274.20	484.49	10	1000
50C10UK40KT	50	320.0	101.59	10	64.0	29.09	40	256.0	94.81	274.0	8.0	7.41	1270.55	483.10	10	1000
40C10UK50KT	40	256.0	81.27	10	64.0	29.09	50	320.0	118.52	274.0	8.0	7.41	1261.65	479.71	10	1000
30C10UK60KT	30	192.0	60.95	10	64.0	29.09	60	384.0	142.22	272.0	8.0	7.41	1258.00	478.33	10	1000
50C20UK30KT	50	320.0	101.59	20	128.0	58.18	30	192.0	71.11	272.0	8.0	7.41	1261.64	479.71	10	1000
40C20UK40KT	40	256.0	81.27	20	128.0	58.18	40	256.0	94.81	272.0	8.0	7.41	1252.74	476.33	10	1000
30C20UK50KT	30	192.0	60.95	20	128.0	58.18	50	320.0	118.52	270.0	8.0	7.41	1249.09	474.94	10	1000
20C20UK60KT	20	128.0	40.63	20	128.0	58.18	60	384.0	142.22	266.0	8.0	7.41	1250.71	475.55	10	1000
30C30UK40KT	30	192.0	60.95	30	192.0	87.27	40	256.0	94.81	252.0	8.0	7.41	1282.26	487.55	10	1000
20C30UK50KT	20	128.0	40.63	30	192.0	87.27	50	320.0	118.52	252.0	8.0	7.41	1273.36	484.17	10	1000
30C40UK30KT	30	192.0	60.95	40	256.0	116.36	30	192.0	71.11	246.0	8.0	7.41	1283.88	488.17	10	1000
20C40UK40KT	20	128.0	40.63	40	256.0	116.36	40	256.0	94.81	244.0	8.0	7.41	1280.23	486.78	10	1000

KYH üretiminde harç reolojisi de önemli bir etken olup, harçta uygulanan yayılma deneyleri mevcuttur. Harç için Şekil 3.2’de görülen “mini slump (yayılma) konisi” olarak adlandırılan deney aparatı kullanılmaktadır. Çizimi verilen deney aparatı özel olarak yaptırılarak belirtilen deneyler kontrol numunesinden başlanarak ilgili standartları sağlayana kadar deneme yayılma yöntemiyle Şekil 3.3’te görüldüğü gibi gerçekleştirilmiştir. Deney karışım oranları ortalama 2 ila 5 karışım arası denemeler sonucunda EFNARC 2002’de belirtilen 24-26 cm yayılma şartı sağlanmıştır. Yapılan çalışmalarda ilgili harcın ayrışma, kuru kalma, su kuma gibi olumsuzluklar göstermemesine dikkat edilmiştir.



Şekil 3.3. 50C20UK30KT karışım oranlı harcın EFNARC sınırlarına göre mini çökme ölçümü

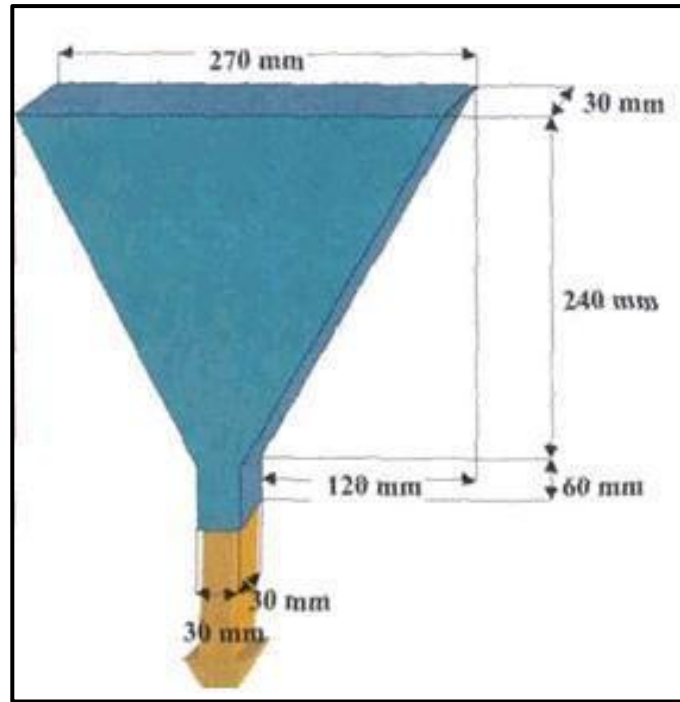
3.2.1.2. V-Hunisi Deneyleri

Taze harcın kendiliğinden yerleşebilirliğinin, laboratuvar ortamında belirlenmesi ve uygulamada kontrolü için çok sayıda deney yöntemi geliştirilmiştir. Pek çok deney yöntemi geliştirilmesine rağmen, hiçbir yöntem tüm reolojik parametreleri tek başına

belirleyememekte, hepsinin eksik yönleri bulunmaktadır. Bir karışımın kendiliğinden yerleşebilirliği, gerek laboratuvar ortamında gerekse pratikte, birkaç deneyin bir arada yapılmasıyla anlaşılabilir. Bu nedenle yapılan harç deneylerinde yayılma deneylerinden sonra V-hunisi ve viskozite deneyleri yapılmıştır[123].

Harçta V-hunisi akma zamanı ile viskozite değerleri arasındaki ilişki incelenmiş ve bir korelasyon saptanmıştır [124]. V-hunisi deneyleri için boyutları Şekil 3.4'te verilen ve harç ölçümleri için kullanılan mini V-hunisi deney aleti kullanılmıştır.

EFNARC, agrega (kum) dane çapı $d_{maks.} = 2$ mm ise 30x30 mm açıklıklı mini V-hunisinden geçiş süreleri için: 7-11 s sınır değerlerini önermektedir. Deneyde belli hacimdeki harcın (≈ 1 lt), orifisten çıkış süresi ölçülmüştür. Harcın akış sebebi kendi ağırlığının eşik gerilmeyi aşması olduğundan, deney viskoziteyle ilişkilendirilebilir.



Şekil 3.4. Mini V-hunisi deney aleti boyutları

Deneyin yapılması sırasında harc akıyorsa yani tıkanma varsa, bunun iki nedeni olabilir; eşik kayma gerilmesi harcın ağırlığının yarattığı gerilmeden büyüktür. Bir başka tıkanma sebebi de harcın yeterli stabiliteye sahip olmaması durumunda ortaya çıkan ayrışma ile agrega tanelerinin çıkış ağzında birikerek kenetlenme yarattığı tıkanmadır. Bu yüzden V-hunisi deneyi ayrışma ile ilgili gözlemsel sonuçlar elde edilebilecek bir deneydir

[125]. Şekil 3.5'te de gösterilen V-hunisi deneyleri yapılırken belirtilen sınırlara uyan numuneler aynı serinin yayılma deneyleri ile karşılaştırılmış, bunlardan uyumsuz olanlar iptal edilerek V-hunisi değerleri ve yayılma değerlerinden her ikisinin birden sağlanması gerçekleştirilmiştir.

KYH'da yapılan çalışmalarda, V-hunisi ile viskozite arasında bir korelasyon olduğu sonucu elde edilmiştir [126].



Şekil 3.5. Harcın EFNARC 2002 standartlarına uygun V-hunisi ölçümü

3.2.1.3. Viskozite Deneyleri

Herhangi bir taze karışımın malzeme özellikleri hakkında daha kesin ve tutarlı bilgi sahibi olabilmek için bir model seçilmesi gereklidir. Bu çalışmada Bingham modeli kullanılarak yeni kuşak süperakışkanlaştırıcılar ile üretilmiş harç karışımlarının Şekil 3.6'da gösterilen eş eksenli bir viskozimetre yardımıyla reolojik parametreleri ölçülmüştür.

Kullanılan Brookfield DV-E viskozimetre deney aleti ölçüm öncesi 1 ila 100 dev./dak. dönme hızları aralığında çalışması için programlanmıştır ve alet bu aralığı otomatik olarak sekiz parçaya bölmüştür. Makine çalıştırdıktan sonra, karşılaştığı direnç

miktarı makinenin alt ve üst limitleri dışına çıkmadığı müddetçe sırasıyla 1, 2.5, 5, 10, 20, 50, 60 ve 100 dev./dak. dönme hızlarının her birinde karşılaştığı dirençleri ölçerek kayma eşik gerilmesi, kayma direnci ve viskozite değerlerini kaydetmek üzere programlanmıştır. Şekil 3.7’de gösterildiği gibi yukarıda bahsedilen her bir dönme hızına karşılık gelen değerler kaydedilmiş, 100 dev./dak. dönme hızından sonra durmaksızın geriye doğru ölçümler yapılmaya devam edilmiş ve direnci en yüksek dönme hızında kırılmış malzemenin kayma gerilmesi ve viskozite değerleri yeniden ölçülmüştür. Her bir ölçüm için gidiş ve geliş değerleri ortalaması tablo olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.6. BROOKFIELD DV-E viskozimetre deney aleti



Şekil 3.7. Harcın viskozite özelliklerinin ölçümü

3.2.1.4. Taze Birim Hacim Ağırlık Deneyleri

Deneyde taze harcın birim ağırlık değerlerini ölçmek için, harç karıştırma makinesinde karılmış taze harçları en iyi temsil edebilecek şekilde malzemelerin ölçümünün yapılmasına dikkat edilmiştir. Deneyde kullanılan kaba, harç karışım serilerine ait numuneler dikkatle doldurulmuştur. Çalışma numuneleri KYH olduğundan sıkıştırılma veya şişleme işlemlerine gerek kalmamıştır. Döküm sonrasında kabın üstü mala ile düzeltilmiş, kabın dışına taşan kısım temizlenmiştir. Numune hassas tartı ile tartıldıktan sonra, harcın net ağırlığının kabın hacmine bölünmesiyle taze harcın birim ağırlığı hesap edilmiştir.

3.2.1.5. Komposite Deneyleri

Komposite deneyleri harcın doluluk oranlarını ölçmek için F.Ü. İnşaat Mühendisliği Malzeme laboratuvarında yapılmıştır. Komposite oranı; harcı oluşturan katı malzemelerden çimento, UK, KT ve kum hassas tartı ile tartıldıktan sonra toplam harç ağırlığına bölünerek Denklem 3.3'te belirtilen formülle ölçülmüştür.

$$K = \frac{(W_c + W_{uk} + W_{kt} + W_{kum})}{(W_c + W_{uk} + W_{kt} + W_{kum} + W_{su} + W_{ak})} \times 100 \quad 3.3$$

3.2.2. Sertleşmiş Harç Deneyleri

Dayanım özelliklerini belirlemek için dökülen harçlar Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında TS EN 12390 standartlarına uygun olarak dökülmüştür. Harç karışımları yapılırken aynı davranışın gösterilebilmesi için ve özellikler arasında düzgün korelasyon oluşturabilmek için taze harç dökümündeki metod aynen uygulanmıştır. Numuneler dökülmeden deney adı, kırılma tarihi ve karışım oranlarının yazılı olduğu isim etiketleri alt ve üst yüze olmak üzere iki adet yapıştırılmıştır. Bu tip deneylerde numune boyutları çok küçük olduğundan kılcal çatlakların oluşmaması için dökümden önce kalıpların yağlanmasına ve dökümden sonra kalıp sökülürken numunelerin sarsılmamasına dikkat edilmiştir. Kalıpta en az bir gün bekletilen numuneler söküldükten sonra kırıldıkları güne kadar Şekil 3.9'daki otomatik ısı koruyuculu kür havuzunda $23\pm2\text{ }^{\circ}\text{C}$ suda bekletilmiştir. Bütün deneyler en az 3 numune ile yapılmıştır. Numuneler kırılmadan 8 saat önce kürden alınmış ve Elazığ Altınova Çimento Sanayi Ticaret A.Ş. beton laboratuvarında kırılmışlardır.

3.2.2.1. Dayanım Deneyleri

Çalışmada harcın fiziksel ve mekanik özelliklerini belirleyebilmek için basınç, eğilmede çekme ve rölatif ultrases hızı ölçümü deneyleri yapılmıştır. Basınç dayanımı ve eğilmede çekme değerlerinin bulunması için yukarıda belirtildiği şekilde hazırlanan 4x4x16 cm boyutlarında prizmatik numuneler dökülmüştür (Şekil 3.8). Numuneler 7, 28 ve 90 günlük 21 karışım serisi halinde her numune çeşidi 3'er adet olmak üzere toplam 189 adet dökülmüştür. Bir seri yani aynı malzeme karışım oranına sahip harç serisi 7, 28 ve 90 günlük olarak yaş etkisini tam inceleyebilmek için bir seferde dökülmüştür. Her yaş için 3'er adet numune olmak üzere bir karışım serisine ait 9 numune bir seferde dökülmüştür. Kalıplar paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Şekil 3.8'de gösterilen kalıplar prizma şeklinde olup üç ayrı bölmesi vardır. Basınç ve Çekme deneyleri dışındaki dayanım deneyleri 28. günlük kür süresi sonunda yapılmıştır.

3.2.2.1.1. Basınç Deneyleri

Sertleşmiş harç numuneleri basınç deneyi uygulanmadan 8 saat önce saklandıkları Şekil 3.9'da gösterilen kür havuzundan çıkarılmıştır. Harç numuneleri kuruması için 8 saat bekletilmiştir. Bu süre sonunda basınç dayanım testleri TS EN 12390-3'e uygun olarak belirlenmiştir. Basınç dayanımı deneyi, TS EN 12390-6 standartlarında belirtilen esaslara

uygun eğilmede çekme dayanımı deneyinde ortadan kırılan 4x4x16 cm boyutlarındaki numunelerden elde edilen ikişer parça olmak üzere toplam 6 adet numune Şekil 3.10'daki gibi kırılarak yapılmıştır. Numunelerin basınç dayanımı için Toni Teknik marka tek eksenli dijital hidrolik pres kullanılmıştır.

Dayanım testleri için, 7, 28 ve 90 günlük, 4x4x16 cm boyutlarında prizmatik standart numuneler, basınç dayanım presinde 3 kN/s yükleme hızı ile basınç uygulanarak kırılıp, dayanımları kaydedilmiştir.



Şekil 3.8. Basınç ve çekme dayanımı deneyleri için harcın kalıblara dökümü



Şekil 3.9. Basınç ve çekme dayanımı deneyleri için hazırlanan numunelerin uygun kür şartlarında saklanması



Şekil 3.10. Tek eksenli basınç dayanımı deneyi

3.2.2.1.2. Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyleri

Bu deney için Elazığ Altınova Çimento Fabrikası Yapı Malzemeleri ve Beton Teknolojisi Laboratuvarında bulunan Toni Teknik marka hidrolik press kullanılmıştır. Deneyler yapılırken, her bir karışım türünden üçer adet olmak üzere TS EN 12390-6 standartlarında belirtilen esaslara uygun 4x4x16 cm boyutlarında prizmatik numuneler hazırlanmış ve Şekil 3.11’de gösterildiği gibi ortadan kırılmıştır. Çekme deneyinde ortadan kırılarak elde edilen 6 numune daha sonra basınç deneylerinde kullanılmıştır. Eğilmede çekme deney değerleri için elde edilen sonuçlar için üç numunenin, basınç deney değerleri için ise 6 numunenin ortalaması alınmıştır.



Şekil 3.11. Eğilmede çekme dayanımı deneyi

3.2.2.1.3. Rölatif Ultrases Geçiş Hızı Deneyleri

Bilindiği gibi titreşim frekansı 20 kHz’den fazla olan ses dalgalarına ultrasonik dalgalar denir. Malzeme testinde kullanılan ultrasonik dalgalar piyezo-elektrik özellik gösteren transdüserler yardımı ile elde edilmektedir. Harcın bir yüzeyinden gönderilen ultrasonik dalgalar harç içinde ilerlerken yolları üzerinde boşluklara rastlarlar. Bu dalgalar boşluk kenarına gelince karşı tarafa geçemediğinden, boşluğun etrafını dolaşacaktır. Bu

olayın pek çok sayıda tekrarlanması ultrasonik dalgaların belirli bir nokta arasındaki yolunu arttıracaktır [127]. Ultrases geçiş hızının azalması, harcın boşluklu olduğunu göstermekte buna bağlı olarak sertleşmiş harç dayanımı da düşmektedir.

Transdüserlerin intibak ettikleri yüzeylere iyi intibak edilmeleri için yüzeylerin temiz, düzgün ve boşluksuz olmaları ve transdüserlerle harç yüzeyi arasında boşluk kalmayacak bir küplaj malzemesi katmanı kullanılması gerekir. Küplaj malzemesi olarak gres yağı, kil çamuru, mastik, gliserin ve alçı kullanılabilinmekle birlikte yapılan deneylerde vazelin kullanılmıştır.

Şekil 3.12’de gösterildiği gibi ultrases geçiş hızı ölçümleri, inşaat mühendisliği laboratuvarında mevcut 12 voltluk akümülatör ile çalışan dijital Pundit marka ultrases hız ölçüm cihazı aleti ile tespit edilmiştir. Deney öncesi, aletin sıfır ayarı yapıp, kalibre edilmiştir. Geçiş hızlarının tespiti için direk ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Hız ölçümleri her grup için üç numune üzerinde yapılmıştır. Ultrases geçiş hızının tespiti yapılırken numunenin ölçüm yapılacak başlıkları bir fırça ile temizlenmiştir. Diğer taraftan okumaların daha sağlıklı olabilmesi için test aletinin başlıkları vazelin ile jellenmiş ve her



Şekil 3.12. Rölatif ultrases geçiş hızı deneyi

bir numune için karşılıklı yönlerden en az ikişer okuma yapılarak bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Ultrases geçiş hızı ölçümleri ASTM C597-83'deki esaslara göre yapılmıştır. Ultrases geçiş süresi mikrosaniye (ms) cinsinden ölçülüp, buradan ultrases hızı hesaplanmıştır.

Ultrases deneyi numunelerin 28. gününde yapılmıştır. Deney numuneleri etüvde 48 saat kurutulup oda sıcaklığına kadar soğutulmuş ve daha sonra test yapılmıştır. Ölçümde her karışım serisinden 3 numune alınmıştır.

Bulunan geçiş süreleri:

$$V = (L/t) \times 10^3 \quad (3.3)$$

Denkleminde yerine konularak ultrases hızı bulunmuştur. Denklemden:

$V =$ Ultrases hızı (km/s)

$L =$ Proplar arasındaki mesafe (m)

$t =$ Cihazdan okunan değer (mikrosaniye)

3.2.2.1.4. Dinamik Elastisite Modülü Değerlerinin Tespiti

Elastisite Katsayısı Değerlerini bulmak için ultrases geçiş hızı deneylerinden alınan değerlerden elde edilen hız değerleri ve su emme deneyleri için etüvde bekletilen numunelerin birim hacimleri ölçülüp alınan değerler kullanılmıştır. Dinamik Elastisite Modülü; Ultrases geçiş hızı değerleri ve harç birim ağırlığı değerleri kullanılarak 3.4 denklemi kullanılarak bulunmuştur.

$$E = [(V^2 \cdot \rho) / g] \cdot 10^{-2} \quad (3.4)$$

Denklemden, E dinamik elastisite modülü değerini (GPa), V ultrases geçiş hızını (km/s), ρ birim hacim ağırlığını (kg/m^3) ve g yerçekimi ivmesini (9.81 m/s^2) gösterir.

3.2.2.2. Dayanıklılık Deneyleri

Su emme ve aşınma deneyleri için kullanılacak numuneler harcın dayanıklılık özelliklerini belirlemek amacıyla hazırlanması ve kalıplara yerleştirilmesinde TS EN 12390-2 esas alınmıştır. Buna göre iç tarafı hafif bir yağ tabakası ile kaplanacak şekilde yağlanarak, 10x10x10 cm boyutlarındaki küp kalıplara el kürekleri ile ayırmaya neden olmayacak şekilde yerleştirilmiştir. Kalıplar tam olarak harç ile doldurulduktan sonra

yüzeyi mala ile düzeltilmiştir. 24 saat sonra numuneler kalıplardan çıkarılmış ve alt ve üst yüzleri etiketlenerek test tarihine kadar bekletilmek için kür tankına yerleştirilmişlerdir. Kür tankı, sahip olduğu termostat sayesinde, içinde bulunan suyu devamlı olarak oda sıcaklığına eşdeğerde tutmuştur. Süre tamamlandıktan sonra deneylerde kullanılacak olan numune kür tankından çıkarılmıştır. Bütün dayanıklılık deneyleri 28 günlük kür süreleri sonunda yapılmıştır.

3.2.2.2.1. Su Emme Deneyleri

28 gün standart küre maruz harçlara kapiler (kılcal) su emme ve toplam su emme deneyi uygulanmıştır. Kılcal su emme deneyi sırasında harç numuneler sabit ağırlığa gelinceye kadar 23 ± 2 °C suda bekletilmiştir. Harç numuneler kür sonunda 110 °C’de etüv fırınında 24 saat bekletildikten sonra tartılmış sabit ağırlığa gelmesi beklenmiştir. Belirli aralıklarla yeniden tartılan numuneler sabit ağırlık değerini sağlayınca sınırlı bir alandan su emmesi için yan yüzeyleri parafin ile kaplanarak Şekil 3.13’te detayları gösterilen bir sistemde suya yerleştirilmiştir. Su yüksekliği numune tabanından 5 mm olarak Şekil 3.14’teki gibi ayarlanmıştır ve deney boyunca seviye korunmuştur. Numuneler (0, 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360 ve 1440 dk.) zaman aralıklarında suya temas eden yüzeyleri nemli bezle silindikten sonra ağırlıkları ölçülmüştür. Harçlardaki su emme deneyi TS EN 480-11’e göre yapılmıştır [128].

Kılcal su emme katsayıları 3.5 denklemindeki bağıntıya göre hesaplanmıştır.

$$\frac{Q}{A} = k \sqrt{t} \quad 3.5$$

Q = Absorbe edilen (kılcal su emme) su miktarı (cm³)

A = Su ile temasta olan numunenin yüzey alanı (cm²)

t = Zaman (saniye)

k = Numunenin su emme katsayısı (cm/s^{1/2})

Farklı UK ve KT ikame oranında hazırlanan numuneler üzerinde 28. gün sonunda gerçekleştirilen deneyler sonucunda hesaplanan kapilarite katsayısı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler bulgular kısmında Tablo 4.1’de verilmiştir.

Sertleşmiş harcın özgül ağırlığı, harcın havada tartılarak bulunan ağırlığının görünür hacmine oranıdır. Ağırlıkça su emme oranı, sertleşmiş harç deney numunelerinin

TS 3624'e uygun olarak su içinde bırakıldıktan sonra denklem 3.6'da verilen formülle onda bir hanesine yuvarlatılarak hesaplanmıştır:

$$m_1 = \frac{B-A}{A} \times 100 \% \quad 3.6$$

Burada: m_1 = Ağırlıkça % su emme oranıdır.

B = Doygun kuru yüzeyli numune ağırlığı

A = Etüv sonu kuru ağırlık

Sertleşmiş harç deney numunesinin kuru özgül ağırlığı denklem 3.7'de verilen formülle yüzde bir hanesine yuvarlatılarak hesaplanmıştır.

$$S_k = \frac{A}{C-D} \text{ (kg/dm}^3\text{)} \quad 3.7$$

Burada;

C = Doygun kuru yüzey ağırlıkları

D = Numunenin su içindeki ağırlığı (Şekil 3.15).

S_k = kuru özgül ağırlıktır. (kg/dm³)

Sertleşmiş harç deney numunesinin TS 3624'e göre suda tutulduktan sonraki doymuş kuru yüzey özgül ağırlığı denklem 3.8'de verilen formülle yüzde bir hanesine yuvarlatılarak, hesaplanmıştır:

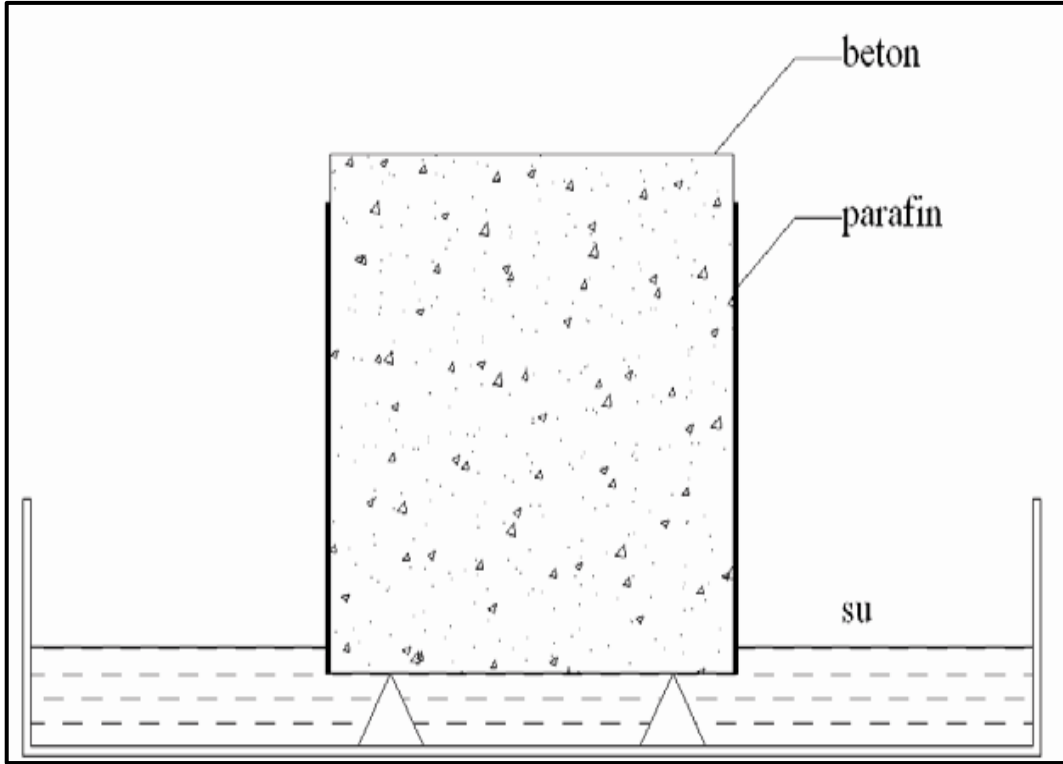
$$S_d = \frac{B}{C-D} \text{ (kg/dm}^3\text{)} \quad 3.8$$

S_d = Doygun kuru yüzeyli özgül ağırlıktır. (kg/dm³)

Sertleşmiş harç deney numunesinin görünür özgül ağırlığı denklem 3.9'da verilen formülle yüzde bir hanesine yuvarlatılarak hesaplanmıştır:

$$S_g = \frac{A}{A-D} \text{ (kg/dm}^3\text{)} \quad 3.9$$

S_g = Görünür özgül ağırlıktır. (kg/dm³)



Şekil 3.13. Kapiler su emme deney düzeneği



Şekil 3.14. Kapiler su emme deney uygulaması



Şekil 3.15. Sertleşmiş harçın özgül ağırlığı deneyi

Sertleşmiş harç deney numunesinde geçirgen boşlukların hacimsel olarak boşluk oranı aşağıdaki formülle onda bir hanesine yuvarlatılarak hesaplanmıştır:

$$B_0 = \frac{C-A}{C-D} \times 100 (\%) \text{ veya } B_0 = \frac{S_g - S_k}{S_g} \times 100 (\%)$$

Burada;

$$B_0 = \text{Görünür özgül ağırlıktır. (\%)}$$

3.2.2.2.2. Aderans Deneyleri

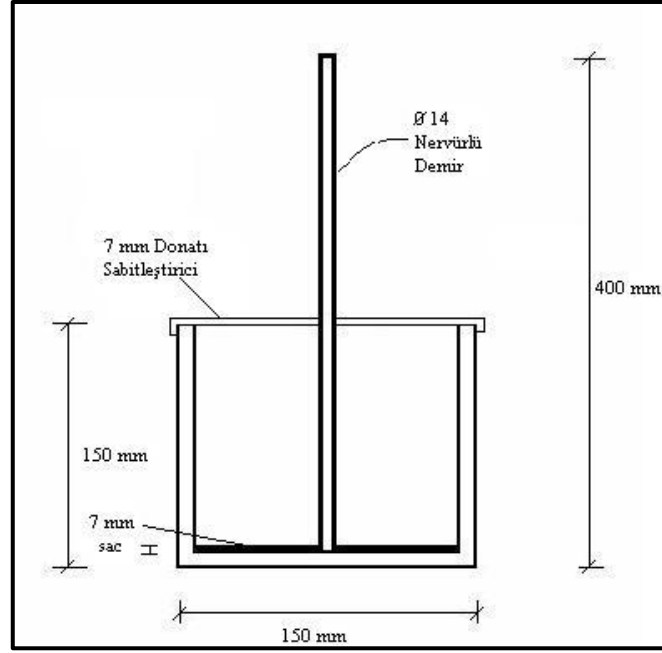
Sertleşmiş harç ile donatı arasındaki aderansın ölçüldüğü bu deneyde donatının dik konumda olması önemli olduğundan, numunelerin kalıplardan çıkarılması ve taşınması esnasında harç daha taze iken aradaki bağın bozulmaması için çok dikkatli ve titiz olunmalıdır. Gerek kalıp sökme sırasında gerekse numunenin taşınması sırasında donatılara dokunulmamış ve donatılara dokunulması durumlarında numunenin yanıltıcı sonuçlar verebileceği göz ardı edilmemiştir. Deneylerde harç 15x15x15 cm boyutlarındaki kalıplara dökülmüştür. Deneyde 14.3 cm'si harç içinde olmak üzere toplam uzunluğu 40 olan donatılar kullanılmıştır. Donatının 90° dik durması için harç tabanına 7 mm kalınlığında sac levha yerleştirmiştir (Şekil 3.16, Şekil 3.17).

$$F_{ad} = \frac{P_{ad}}{A} \quad (3.10)$$

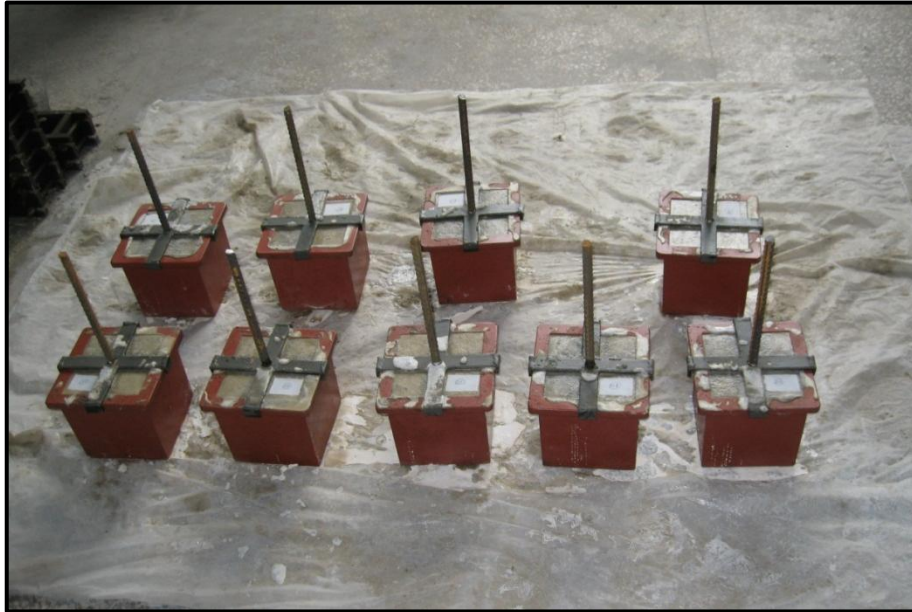
F_{ad} = Harç deney numunesi aderans gerilmesi (N/mm²)

P_{ad} = Aderans Kırılma yükü (N),

A = Kesit alanı (mm²)



Şekil 3.16. Aderans deney düzeneği



Şekil 3.17. Aderans deneyi için donatılı harç dökümü

Aderans deneyi sonuçları 3.10 denklemi kullanılarak bulunmuştur. Bütün aderans deney numuneleri 28 gün Şekil 3.18’de gösterilen standart kür koşullarında bekletildikten sonra deney presinde kırılmadan 8 saat önce kürden çıkartılmıştır. Aderans deneyi için INSTRON 8503 çekme makinesi kullanılmıştır. Deneylerde çekme makinesinin hızı 2 mm/dk olacak şekilde sabit tutulmuştur.



Şekil 3.18. Aderans deneyi numunelerinin uygun kür şartlarında saklanması

Yapılan aderans deneyinin düzeneği Şekil 3.19’da, deneyde numune kırılması Şekil 3.20’de gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Aderans deney düzeneğinde çekip-çıkarma (pull-out) deneyi uygulaması

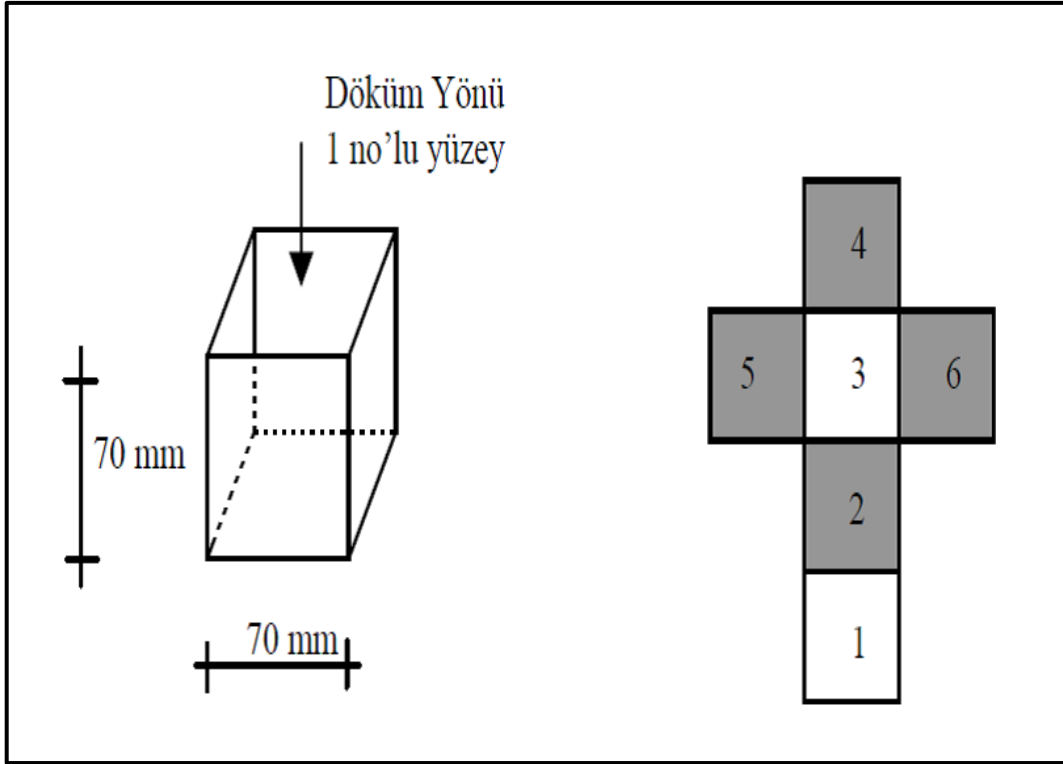
Aderans dayanımı deneyi, her seri için üçer numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Aderans dayanımı bu numunelerin deney sonrası ölçülen değerlerinin ortalamaları alınarak belirlenmiştir.



Şekil 3.20. Harcın aderans deney sonunda deforme olması

3.2.2.2.3. Aşınma Deneyleri

Laboratuvarda 10x10x10cm boyutlarındaki kalıplara daha önce belirtilen standartlara uygun olarak dökülen harç bir gün sonra kalıplardan çıkarılarak 28 günlük kür ortamında bekletilmiştir. Bu süre sonunda numuneler mermer fabrikasında $71\pm 1,5$ mm ölçülerinde kesilmiştir. Kesimde alt ve üst yüzeyler aşınmaya maruz bırakılmayacağından, deneyde kullanılacak dört adet yan yüzeyden kesim yapılmasına özellikle dikkat edilmiştir. Aşınma öncesi numuneler kür suyu üzerinde 4 saat boyunca %60 nemini koruyacak şekilde bekletilmiştir. Yüzeyler 1’den 6’ya kadar numaralandırılmıştır. Numunelerde aşındırılan yüzeyler, Şekil 3.21’deki küp açılımında görülen 2, 4, 5 ve 6 numaralı gri yüzeylerdir. Bu küp açılımında 1 nolu yüzey, serbest yüzey iken 3 no’lu yüzey kalıp tabanıdır. Numuneler, döküm yüzeyinden değil, daha sonra kesilen kalıp yan yüzeylerinden aşındırılmış ve böylece yüzey koşullarından ziyade karışım oranlarının etkisi ön plana çıkarılmaya çalışılmıştır. Numunelere her bir yüzeye $22\times 4=88$ devir aşındırma olmak üzere, dört yüzeyde toplam 352 devir aşındırma uygulanmıştır. Standart olmayan bu yöntem kullanılarak, üretilen serilerin toplam aşınma potansiyelleri, % ağırlık kaybı ve 2–4 ile 5–6 yüzeyleri arası % boy kısaltmalarının elektronik hassas mikrometre kumpas kullanılarak ölçülmesi ile her noktadan hassasiyeti 0.01 mm olacak şekilde 9 noktanın mikrometre ile ölçümleri yapılmıştır. Aşınma deneyi öncesi ve sonrasında numuneler yumuşak fırça kullanılarak tozdan arındırılmış ve su içinde ve dışında tartım ile kumpas ölçümleri yapılarak değerler kaydedilmiştir. Aşınma deneyi düzeneğinde aşındırılacak yüzey Şekil 3.22’de gösterildiği gibi aşağı gelecek şekilde yüzeysel aşındırma cihazına yerleştirilmiştir. Aşındırıcı toz olarak korundum kullanılmıştır.



Şekil 3.21. Böhme aşınma deneyinde aşındırma uygulanacak yüzeyler



Şekil 3.22. Böhme aşınma deneyi uygulaması

Numunenin merkezi ile döner diskin merkezi 22 cm olacak şekilde ayar yapılmış daha sonra baskı pistonu yüksekliği yükleme kolu yatay olacak şekilde ayarlanmıştır. Yükleme kolu 6 kg yük ile yüklenerek (5 kg ağırlık konmuş + 1 kg askı düzeneği ağırlığı olarak kabul edilmiştir) cihaz sayacı sıfırlanıp sürtünme yüzeyine 20 gr standart zımpara tozu (korundum) homojen şekilde yayılarak cihaz çalıştırılmıştır. Döner diskin 22 devri 1 periyot olarak kabul edilmiştir. Toplam 16 periyotluk aşındırma uygulanmıştır. Her periyot işaretlenen 4 yüzeye sırasıyla tek tek ve dörder kere uygulanmıştır. Kalınlıktaki azalmanın ölçülmesi ile aşınma kaybı hesaplanmıştır [129]. Numuneler aşınmadan sonra yeniden su kürüne bırakılmış ve suya doymun hale gelmesi sağlanmıştır. Daha sonra ağırlıkça kayıp tartılarak hesaplanmıştır.

4. BULGULAR

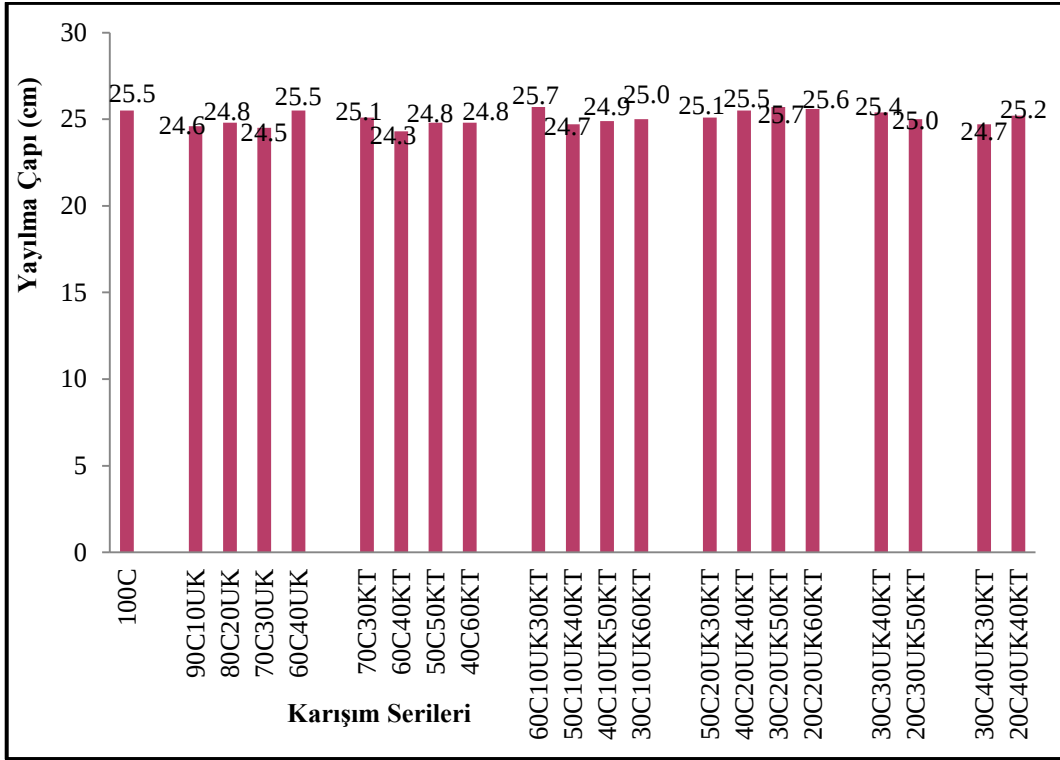
4.1. Taze Harç Deney Bulguları

Tablo 4.1. Taze harç deney değerleri

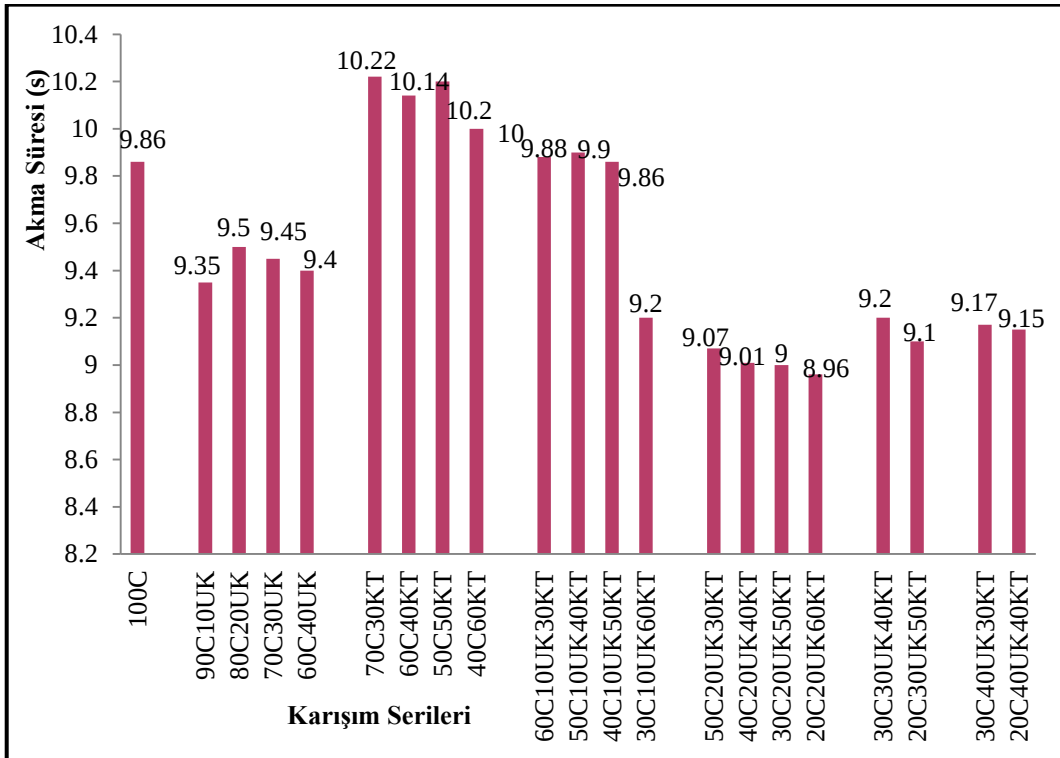
Karışım Serisi	Mini Çökme Yayılma Çapı (cm)	Mini Vhuni Akma Süresi (sn)	Taze Harç Birim Hacim Ağırlığı (gr/cm ³)	Harçta Komposite Oranları (%)
100C	25.5	9.9	2.228	86.71
90C10UK	24.6	10.2	2.205	86.58
80C20UK	24.8	10.1	2.182	86.44
70C30UK	24.5	10.2	2.159	86.29
60C40UK	25.5	10.0	2.136	86.14
70C30KT	25.1	9.4	2.202	86.56
60C40KT	24.3	9.5	2.193	86.50
50C50KT	24.8	9.5	2.184	86.45
40C60KT	24.8	9.4	2.175	86.39
60C10UK30KT	25.7	9.3	2.179	86.41
50C10UK40KT	24.7	9.9	2.170	86.36
40C10UK50KT	24.9	9.9	2.161	86.30
30C10UK60KT	25.0	9.2	2.152	86.24
50C20UK30KT	25.1	9.3	2.156	86.27
40C20UK40KT	25.5	9.0	2.147	86.21
30C20UK50KT	25.7	9.0	2.138	86.15
20C20UK60KT	25.6	9.0	2.129	86.10
30C30UK40KT	25.4	10.2	2.124	86.06
20C30UK50KT	25.0	10.1	2.115	86.00
30C40UK30KT	24.7	10.0	2.109	85.97
20C40UK40KT	25.2	9.7	2.101	85.91

4.1.1. Çökme-Yayılma Deneyi

Bu tez çalışmasında, çimento, uçucu kül ve kireçtaşı tozu olmak üzere üç tip bağlayıcı malzeme kullanılmıştır. Deneylere başlarken KYH için sınır değerlerinin EFNARC şartlarına uygun olması için ilk olarak yayılma şartları sağlanmıştır. Mini çökme deney aleti ile ölçülen yayılmada istenen 24-26 cm şartı için %100 çimento bağlayıcılı kontrol karışımının en uygun karışım oranlarını bulabilmek amacı ile %40 s/b oranından denemelere başlanmış ve en uygun karışım oranının %45 olduğu görülmüştür. Deneylerdeki amaç; özellikle değişken parametre olarak çimento ve mineral bağlayıcı oranlarının etkisini incelemek olduğundan s/b oranının dar bir sınır içinde kalmasına özen gösterilmiştir. Bu nedenle deney serilerinde s/b oranının en büyük değerinin kontrol numunesinde yaklaşık %45 olarak en düşük s/b oranının ise 20C40UK40KT karışımında yaklaşık %39 olarak bulunmuştur. s/b oranları belli bir oranda tutulmaya çalışırken agrega (kum) oranları da belli sınırlarda tutularak deneyler yapılmıştır. Burada 1 dm³ harç hacmi için kum hacmi olarak 0.48 dm³ oranı yakalanmıştır. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi deneylerde bütün karışım oranları için yayılmanın 25 cm’ye yani orta değere yakın olmasına dikkat edilmiş karışım oranları buna göre belirlenmiştir. Taze beton, harç ve çimento pastalarında asıl istenen viskozitenin düşmeden ve segregasyon oluşmadan yayılmanın iyi olmasıdır [130]. Yapılan yayılma deneylerinde önceki kısımda verilen Şekil 3.3’te görüldüğü gibi istenen standartlarda yayılmalar gerçekleşmiş ve yayılmalar 24-26 cm arasında kalmıştır. Bu değerlerin elde edilmesinde eşik kayma gerilmesinin yayılmayı engelleyecek kadar yüksek olmadığı, istenen sınırı aşmayacak kadar da düşük olmadığı ortaya çıkmıştır. Segregasyonun olmaması da viskozitenin iyi olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.1. Mini çökme-yayılma değerleri



Şekil 4.2. V-Hunisinden akma süreleri

4.1.2. V-Hunisi Deneyi

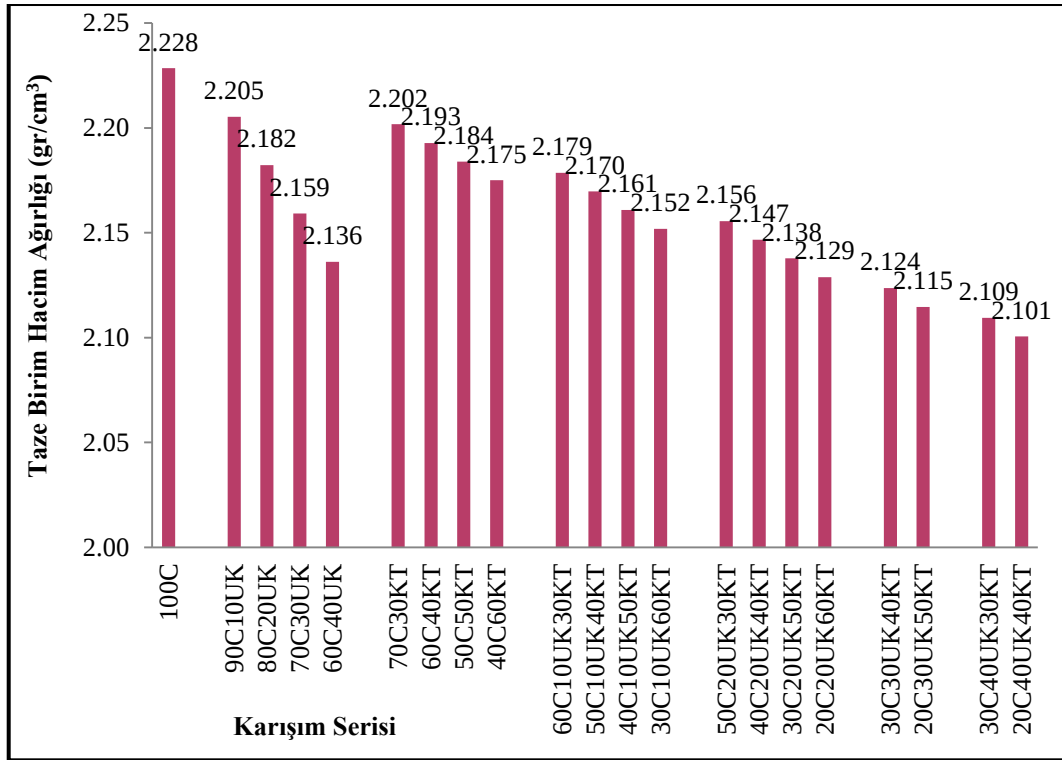
Tablo 4.1’de verilen ve Şekil 4.2’de grafik olarak gösterilen V-hunisi akma değerleri incelendiğinde, en yüksek akma süreleri ikili sistem karışım serilerinden oluşan Ç+KT içeren KT1 grubunda görülmüştür. Kontrol karışımının akma süresi 7-11 s arasında, standart EFNARC değerlerinin ortalamasına yakın bir değerde 9.86 sn olarak ölçülmüştür. Ç+UK içeren UK1 grubu ölçümlerinde birbirine çok yakın değerler elde edilmiştir. UK/B oranının %10 olduğu 10UK grubunda KT/B’nin %50 oranına kadar KT kullanımının akma süresinde kontrol numunesine göre fazla bir fark oluşturmadığı gözlemlenmiştir. Akma sürelerinde asıl kırılma noktası %20 UK kullanım oranı olmuştur. Bu orandan sonra akma süresi kontrol numunesine göre %10 azalmıştır. En kısa akma süresi 20C20UK60KT karışımında en uzun akma süresi ise 70C30KT karışımında ölçülmüştür. Genel bir yorum yapılacak olursa mineral katkı/bağlayıcı oranı büyüdükçe V-hunisi akma süresi kısalmıştır. Bunun nedeni ise hazırlanan taze harçlarda, süperakışkanlaştırıcı katkı sabit tutulup, s/b oranı dar bir çerçevede tutulduğu için tanecik yüzey alanı düşük olan mineral katkı kullanımı EKG’yi düşürmüştür. Böylece akma hızı artarak akma süresi düşmüştür. KT kullanımı ise akma süresini UK kullanımına göre uzatmıştır.

4.1.3. Taze Harç Birim Hacim Ağırlığı

KYH üretiminde belli bir dane çapının altında ince malzeme kullanılması ve yüksek akışkanlığından dolayı konulduğu kalıba daha boşluksuz yerleşebilmeleri sayesinde KYH’ler, diğer harçlara göre daha fazla birim ağırlığa sahiptirler. Tablo 4.1’de verilen ve Şekil 4.3’te grafik olarak gösterilen sonuçlar incelendiğinde genel olarak numunelerdeki mineral katkılar UK ve KT’nin ikame oranları arttıkça ortalama birim hacim ağırlık değerleri azalmıştır. Bu sonuç yapılan literatür araştırmalarına da uygun bir sonuçtur [131]. Her bir dozaj grubunu kendi içerisinde değerlendirdiğimizde de, mineral katkı miktarının artışı ile birlikte harcın taze birim ağırlığında azalma meydana geldiği anlaşılmıştır. UK1 grubu içerisinde UK ikamesinin her %10’luk artış oranına karşılık kontrol numunesine göre TBHA yaklaşık %1 azalma görülmüştür. Yine ikili bağlayıcı kullanılan KT1 grubunda her %10 KT artımına karşılık TBHA %0.5 azalmıştır. Kontrol numunesinin TBHA’sı 2.228 gr/cm^3 olarak en büyük değerde iken 70C30KT numunesinde bu değer 2.202 gr/cm^3 , 40C60KT numunesinde ise 2.175 gr/cm^3 çıkmıştır. Üçlü sistem karışımlarda %10, %20, %30 ve %40 UK ikameli karışımlarda KT oranının her %10 arttırılmasına

karşılık TBHA da sistemli bir şekilde her bir karışım için yaklaşık %0.01 azalmıştır. Bu sonuçlar yapılan literatür araştırmalarına da uygun çıkmıştır [132, 133].

TBHA'lardaki bu azalmaların sebebi artan süper akışkanlaştırıcı miktarı ile s/b oranının azalmasıdır. s/b oranının azalması ile karışımdaki su miktarı azalmış dolayısıyla kompasite oranı Şekil 4.4'te görüldüğü gibi azalmış, buna paralel olarak toplam agrega hacmi artarak harcın taze birim ağırlığında artış meydana getirmiştir.

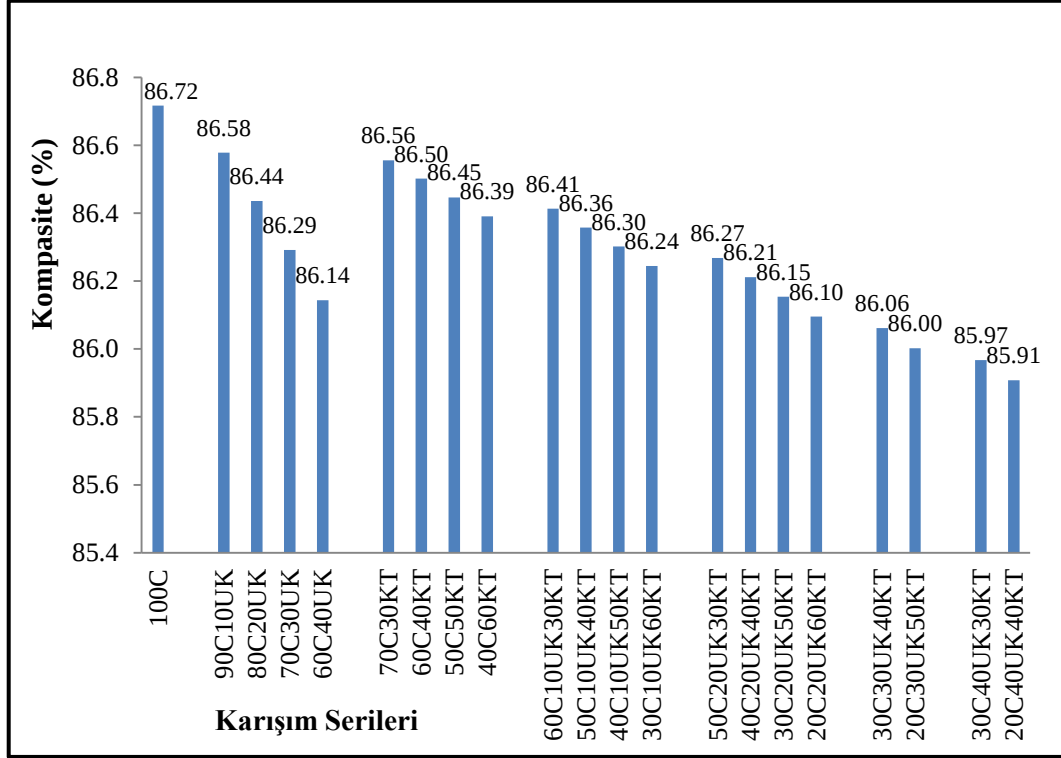


Şekil 4.3. Taze birim hacim ağırlığı değerleri

4.1.4. Kompasite

Deneylerden elde edilen sonuçlara göre kompasitesi en yüksek karışım %86.72 ile kontrol karışımı olmuştur. Mineral katkı kullanım oranı arttıkça kompasite azalmış, dolayısı ile porozite artmıştır. İkili sistem bağlayıcı kullanılan UK1 serisinde her %10 UK artış oranına karşılık kompasite yaklaşık olarak %0.02 azalmıştır. Diğer ikili sistem içeren KT1 serisinde azalma oranı %0.01 olmuştur. Üçlü sistem içeren 10UK, 20UK, 30UK VE 40UK serilerinde UK sabit tutulup KT %10 arttırıldıkça kompasite %0.01 oranında azalmıştır. UK kullanımı KT kullanımına göre kompasiteyi daha fazla azaltmıştır. Yapılan

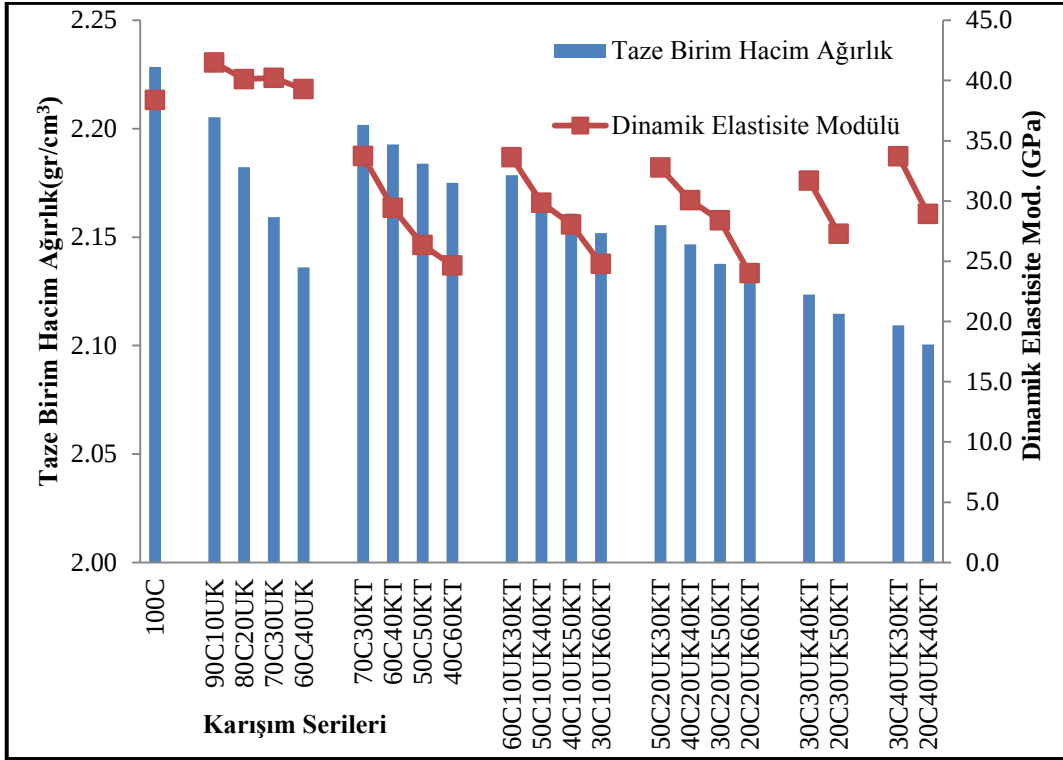
ölçümlere göre en düşük kompasite %85.91 değeri ile UK ve KT olarak en fazla bağlayıcı mineral kullanılan 20C40UK40KT karışımında ölçülmüştür.



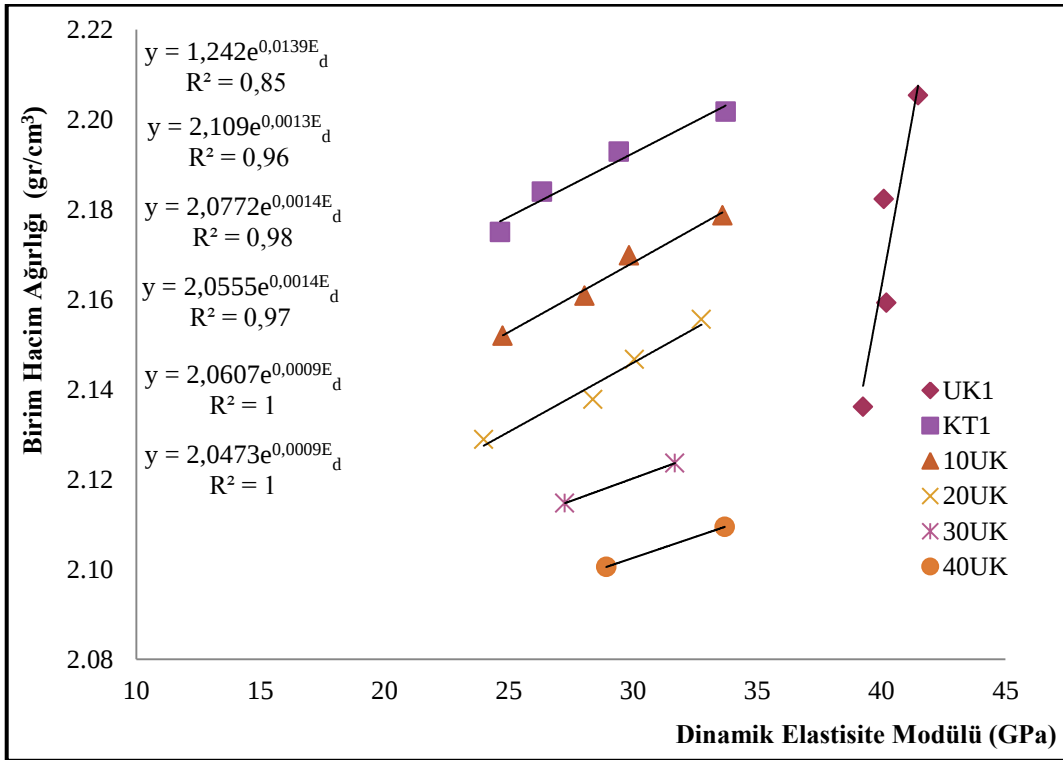
Şekil 4.4. Harçta kompasite değerleri

4.1.5. TBHA, Kompasite ve DEM Özellikleri Arasındaki İlişkilerin Analizi

Literatürde farklı mineral katkı oranlarının kullanılması sonucu harcın çeşitli özelliklerini inceleyen araştırmalarda taze birim hacim ağırlıkla, dinamik elastisite modülü (DEM) arasında kuvvetli bir ilişki olduğu belirtilmiştir[133]. Bu tez çalışmasında, her bir karışım grubu kendi aralarında incelendiğinde elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmaları doğrular nitelikte çıkmıştır. Şekil 4.5'te gösterildiği gibi UK1 grubunda en yüksek TBHA değerine sahip 90C10UK karışımı 41.8 GPa ile en yüksek DEM'e sahipken en düşük TBHA değerine sahip 60C40UK karışımı da 39.27 GPa ile en düşük DEM değerini almıştır. Bununla birlikte TBHA bu grupta sistemli bir azalma davranışı gösterirken DEM'de bu durum görülmemiştir. Kontrol numunesi ile UK1 grubu mukayese edilirken kontrol numunesi TBHA olarak en büyük değere sahipken UK1 grubunun bütün numunelerinde DEM değerleri kontrol numunesinden yüksektir. KT1 grubundan itibaren düzenli azalan TBHA değerlerine paralel olarak DEM değerlerinde de azalma gözlenmiş



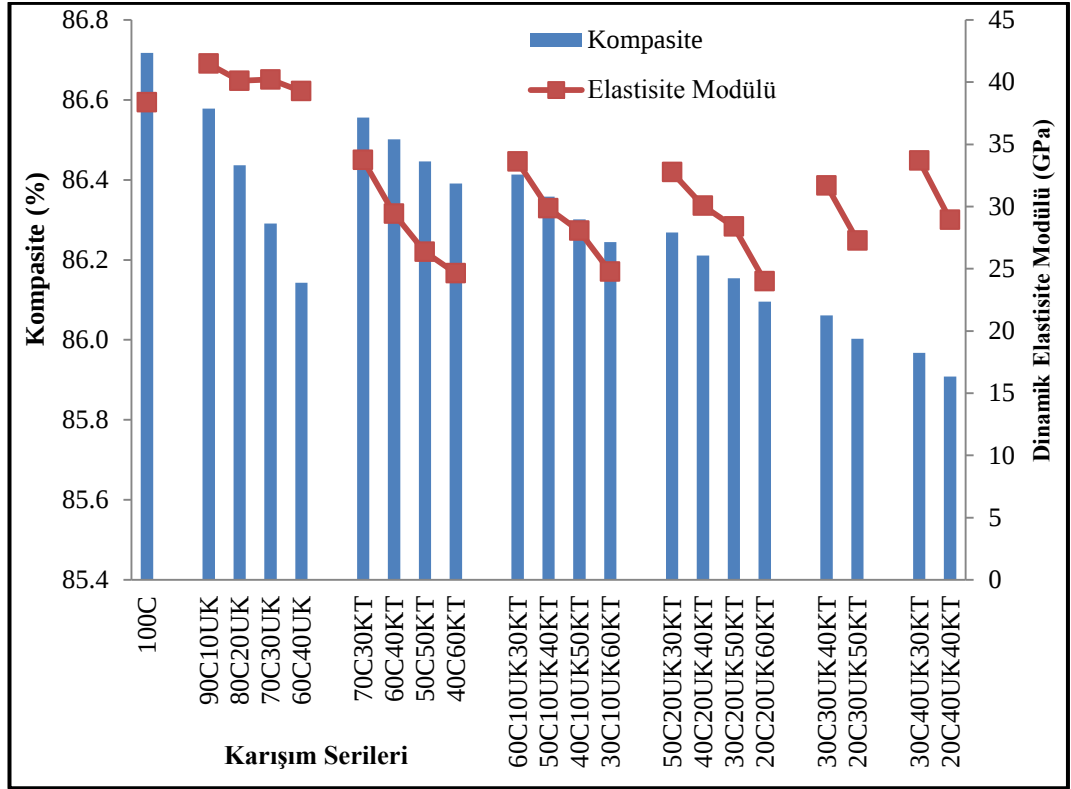
Şekil 4.5. Taze birim hacim ağırlığı - dinamik elastisite modülü değerleri



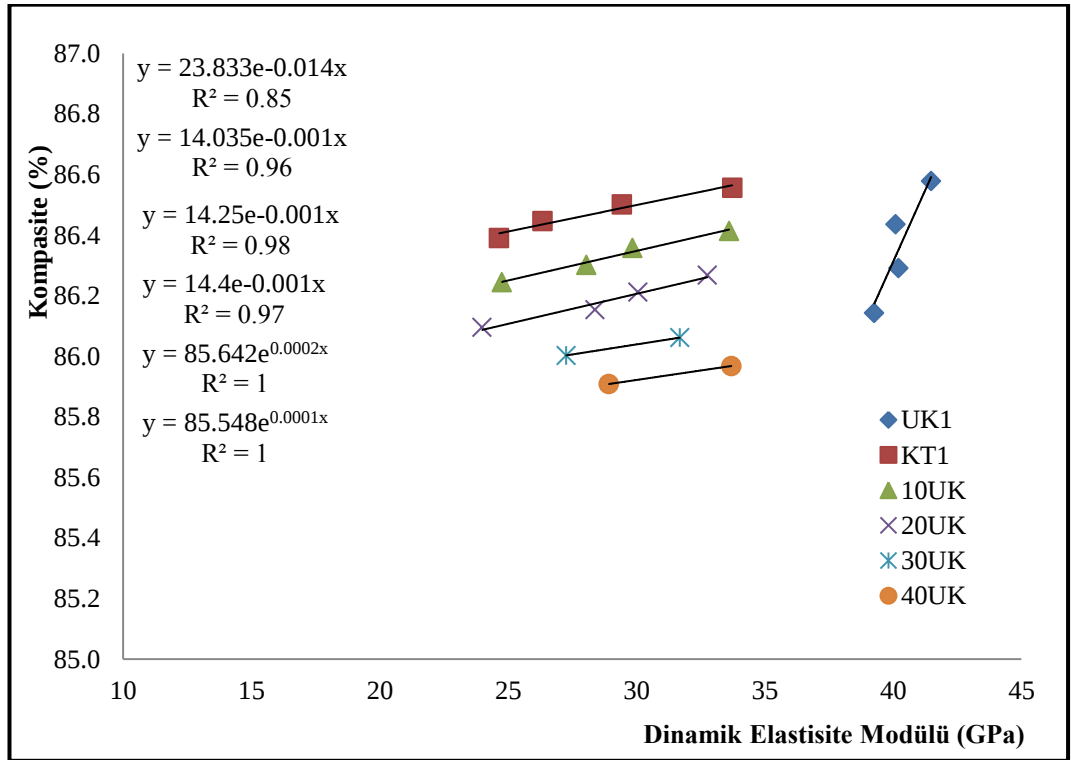
Şekil 4.6. Taze birim hacim ağırlığı - dinamik elastisite modülü regresyon analizi

ama DEM değerlerindeki bu azalmalar 34-24 GPa gibi belli sınırlar arasında kalmış ve bunun altına inmemiştir. Hatta 30UK ve 40 UK gruplarında çimento miktarı ve TBHA değerleri çok düşük olmasına rağmen DEM değerleri belli sınırlar arasında kalmış bu değerlerin altına inmemiştir. Şekil 4.6'daki regresyon analizi grafiği incelendiğinde korelasyon katsayılarının yüksekliği aradaki ilişkinin güvenilirliğini nicel olarak ortaya koymuştur. Bu değerler; (R^2) "**belirlilik katsayısı**" değerlerinden elde edilen (**R**) **korelasyon katsayıları**: 0,982-1 arasında değişmiştir.

Şekil 4.7 incelendiğinde harç kompasitesi değerleri ile DEM değerleri arasında doğru orantılı bir davranış şekli görülmüştür. En yüksek kompasite değeri kontrol karışımında, en düşük kompasite değeri 20C40UK40KT karışımında, en büyük DEM değeri 90C10UK, en küçük DEM değeri ise 20C20UK60KT karışımında görülmüştür. UK miktarı artarken kompasite daha hızlı azalmasına rağmen DEM değerleri çok az miktarda düşmüştür. UK1 grubu dışında ikili bağlayıcı kullanılan KT1 ve diğer üçlü sistem bağlayıcılı karışımlarda ise her bir grup içinde kompasite oranının daha az düşmesine karşın DEM değerleri daha büyük oranda azalmıştır. İki özellik arasındaki regresyon eğrileri Şekil 4.8'de incelendiğinde $R=0.94-0.99$ arasında değişerek arada yüksek bir korelasyon olduğu görülmüştür. Bu çalışmadan kompasitenin DEM ile doğru orantılı olduğu sonucu çıkarılmıştır.



Şekil 4.7. Komposite- dinamik elastisite modülü değerleri



Şekil 4.8. Komposite - dinamik elastisite modülü regresyon analizi

4.1.6. Viskozite Özellikleri

Viskozite deneyi, mineral katkı ve süperakışkanlaştırıcı katkılı olarak üretilen harçlarda, mineral katkı miktarı değişiminin taze harcın viskozitesine etkisini görmek için yapılmıştır.

İkili ve üçlü sistem karışım serilerine ait viskozite değerleri Tablo 4.2’de verilmiştir. KYH’ların viskozite-açısal hız eğrileri ikili ve üçlü sistem karışımlar için sırası ile Şekil 4.9 ve 4.10’da verilmiştir. Görüldüğü gibi açısal hızın 1 devir/dakika’dan 100 devir/dakika’ya belirli aralıklarla artırılmasıyla KYH’ların viskoziteleri düzenli bir şekilde azalmaktadır. UK1 grubu numunelerinin KT1 grubu numuneleriyle mukayesesi sonucunda görüldüğü gibi UK katkılı harçlar KT katkılı harçlara göre başlangıçta daha düşük viskozite değerlerine sahip iken açısal hız büyüdüğünde viskoziteler eşitlenmiş hatta bazı karışımlarda UK daha viskoz davranış göstermiştir.

Şekil 4.11 incelendiğinde UK ve KT içeren ikili sistemdeki harçların viskozite değerleri başlangıçta kontrol harcına göre daha düşüktür. Aynı zamanda UK miktarının %10’dan %40’a ve KT miktarının %30’dan %60’a yükselmesi viskozite değerini sistematik olarak azaltmıştır.

Üçlü bağlayıcı sistemindeki taze harçların viskoziteleri Şekil 4.11 ve 4.12’de incelendiğinde çimento oranı yüksek, mineral bağlayıcı oranı düşük karışımların düşük devirlerde viskozitelerinin yüksek olduğu anlaşılmıştır. 10UK grubunda 5, 10, 20. devirlerde KT oranı yüksek karışımların viskoziteleri bir miktar yükselerek 100 devir/dakika’ya doğru viskoziteleri azalmıştır. Mineral katkının artmasının viskozite üzerindeki etkileri açısal hızın büyümesi ile daha görünür hale gelmiştir.

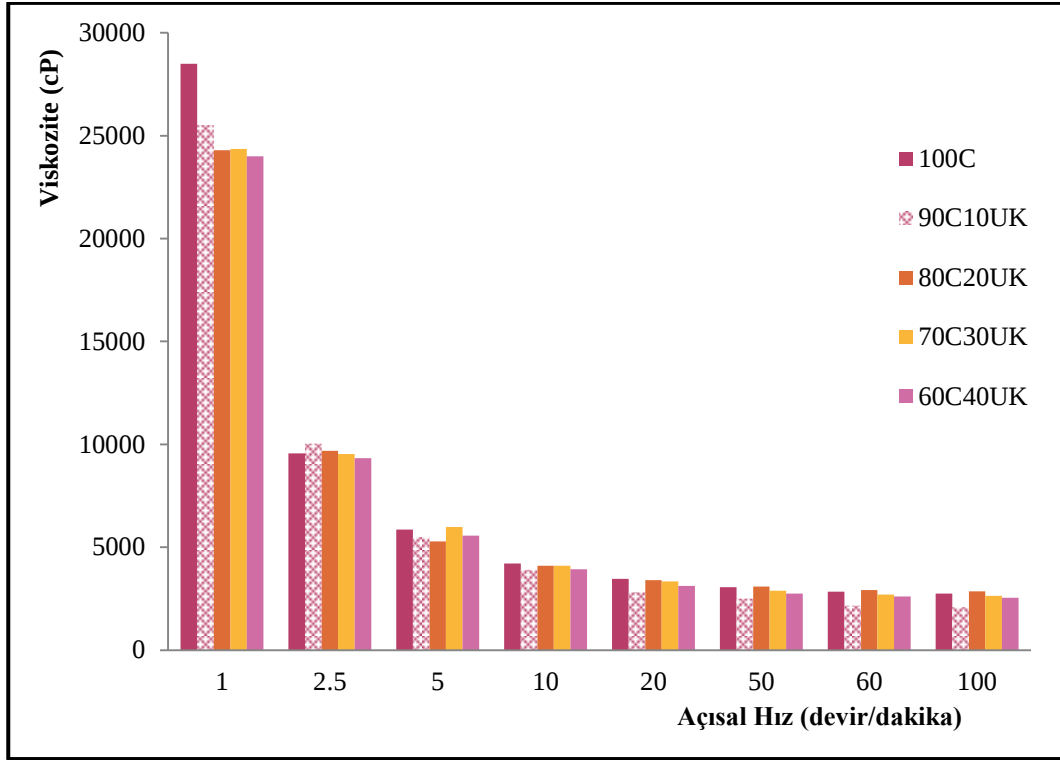
Şekil 4.12’nin, özellikle 4.13’ün incelenmesiyle her grupta UK’nin %20, %30 ve %40 oranlarında sabit tutulup grup içinde KT oranı arttığında düşük açısal hızlarda viskozitenin de düşük değerlerde olduğu açık olarak görülürken yüksek devirlerde bu farkların azaldığı ortaya çıkmıştır. Neticede düşük hızdan yüksek hıza kadar viskozite özellikleri göz önüne alındığında en uygun bağlayıcının UK sonra çimento daha sonra KT olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 4.2. Viskozite deneyleri değ r okumaları

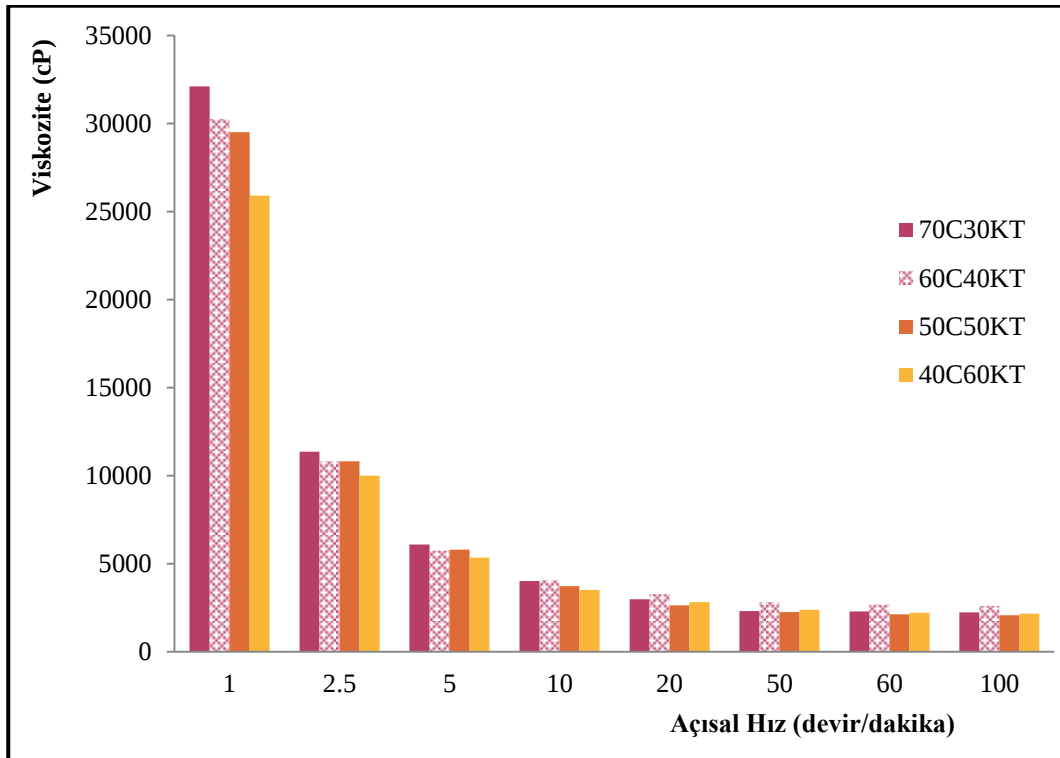
Seri Adı	Devir Sayısı	1	2.5	5	10	20	50	60	100
100C	ileri okuma	20800	11040	7360	5200	4160	3480	3130	3000
	geri okuma	36200	8080	4360	3220	2770	2640	2547	2500
90C10UK	ileri okuma	20800	11100	6800	5020	3400	2800	2300	2200
	geri okuma	30200	8940	4160	2760	2210	2200	2000	1950
80C20UK	ileri okuma	20000	11360	7440	5420	4100	3480	3110	3000
	geri okuma	28600	8000	3120	2780	2708	2705	2710	2700
70C30UK	ileri okuma	20200	11040	7600	5220	4170	3260	2900	2800
	geri okuma	28500	8020	4360	2980	2510	2500	2500	2490
60C40UK	ileri okuma	21800	10480	6800	4860	3700	3020	2800	2700
	geri okuma	26200	8160	4320	3000	2550	2460	2420	2380
70C30KT	ileri okuma	21200	11680	7680	5280	3880	2600	2600	2500
	geri okuma	43000	11040	4500	2760	2100	2040	2000	1990
60C40KT	ileri okuma	20000	11040	6920	4940	3950	3120	2820	2710
	geri okuma	40500	10600	4560	3180	2620	2528	2520	2500
50C50KT	ileri okuma	20400	10960	7120	4680	3130	2520	2337	2240
	geri okuma	38600	10680	4480	2800	2140	1980	1930	1920
40C60KT	ileri okuma	20000	10240	6280	4300	3390	2700	2330	2230
	geri okuma	31800	9760	4400	2740	2270	2076	2110	2090
60C10UK30KT	ileri okuma	20000	12240	7520	5140	3540	2440	2250	2160
	geri okuma	48400	17840	5960	2640	2170	2072	2043	2030
50C10UK40KT	ileri okuma	21200	11840	6520	4180	3280	2520	2210	2110
	geri okuma	39400	11640	4000	2540	2050	1964	1970	1970

Tablo 4.2. devamı. Viskozite deneyleri değ r okumaları

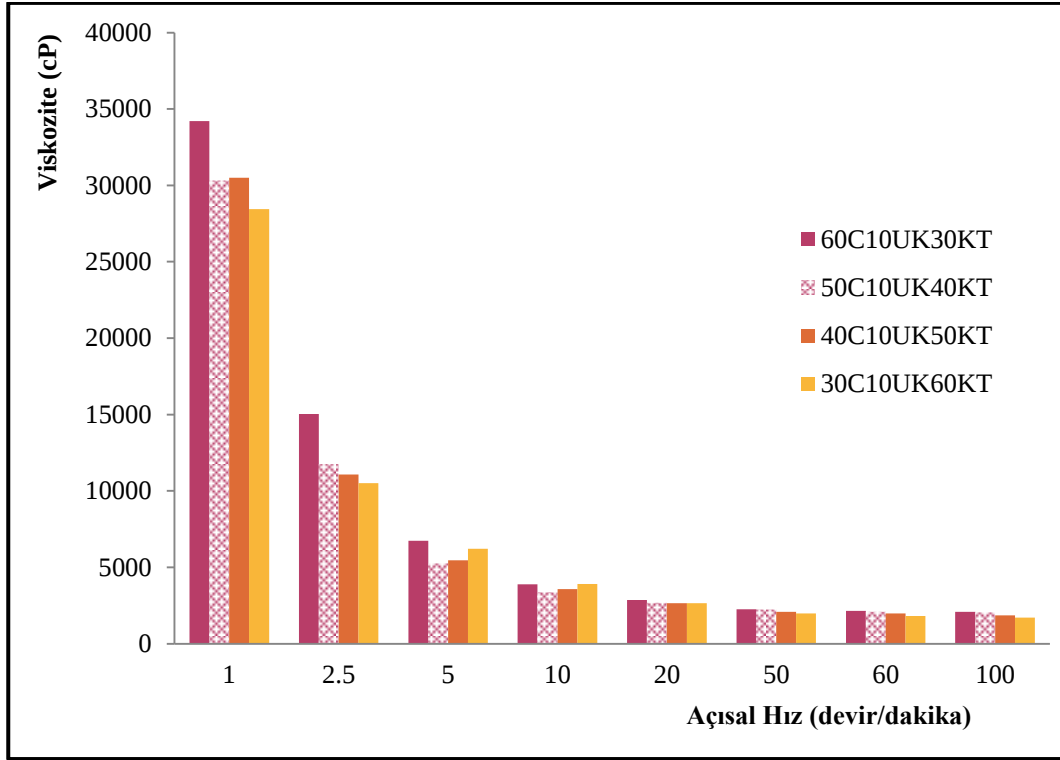
Seri Adı	Devir Sayısı	1	2.5	5	10	20	50	60	100
40C10UK50KT	ileri okuma	20400	11600	6760	4700	3350	2290	2120	1850
	geri okuma	40600	10560	4160	2460	1950	1870	1860	1850
30C10UK60KT	ileri okuma	23600	10480	7840	4760	3270	2320	2010	1810
	geri okuma	33300	10560	4600	3060	2030	1640	1610	1600
50C20UK30KT	ileri okuma	24000	14400	6640	4620	3460	2510	2340	2230
	geri okuma	44800	13840	4040	2720	2140	2100	2040	2030
40C20UK40KT	ileri okuma	20800	12320	6440	4680	3220	2400	2110	2020
	geri okuma	34400	13200	4000	2440	1990	1830	1820	1810
30C20UK50KT	ileri okuma	21000	10320	6360	3780	2810	2210	1940	1790
	geri okuma	33400	11440	4920	2520	1880	1715	1710	1650
20C20UK60KT	ileri okuma	20400	10080	6860	4420	2900	2020	1740	1500
	geri okuma	31200	8880	4460	2660	1930	1590	1510	1450
30C30UK40KT	ileri okuma	20400	10800	6760	4860	2860	2700	2410	2300
	geri okuma	43400	10320	4720	2910	2200	2160	2100	2100
20C30UK50KT	ileri okuma	20600	10800	6560	4400	3340	2520	2120	2020
	geri okuma	36200	9360	4520	2580	2100	1900	1880	1870
30C40UK30KT	ileri okuma	20800	11360	7120	4520	3510	2700	2300	2200
	geri okuma	41600	10320	4680	2820	2170	2076	2030	2020
20C40UK40KT	ileri okuma	20500	10560	6520	4060	3220	2430	2190	2090
	geri okuma	39000	10240	4560	2740	2230	1990	1980	1970



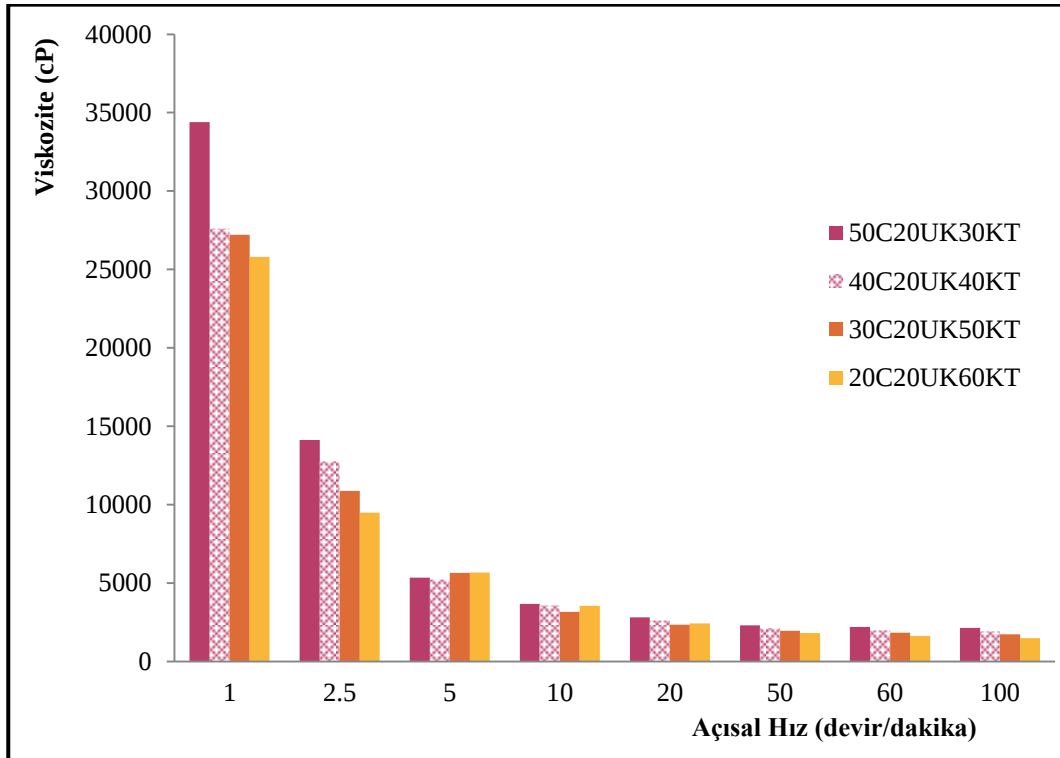
Şekil 4.9. Taze harç UK1 grubu viskozite değerleri



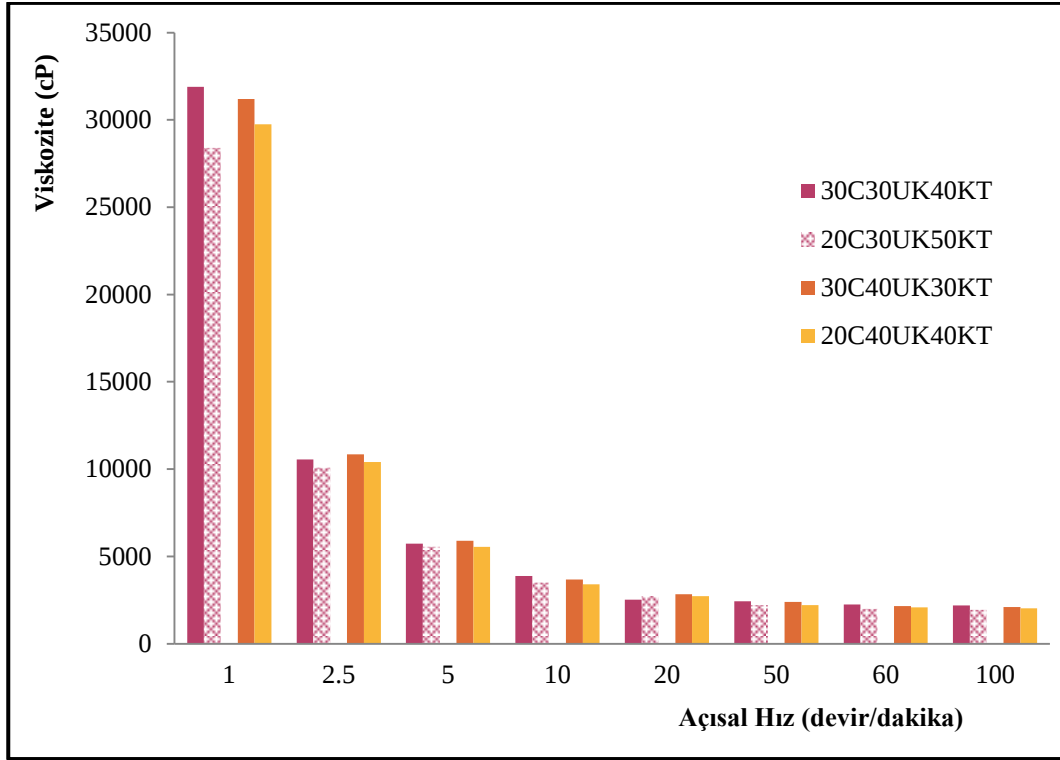
Şekil 4.10. Taze harç KT1 grubu viskozite değerleri



Şekil 4.11. Taze harç 10UK grubu viskozite değerleri



Şekil 4.12. Taze harç 20UK grubu viskozite değerleri



Şekil 4.13. Taze harç 30UK ve 40UK grupları viskozite değerleri

4.2. Sertleşmiş Harç Deney Bulguları

Tez çalışmasının bu kısmında, temel bağlayıcı malzeme olan çimento yerine belirli oranlarda uçucu kül ve kireçtaşı tozu ikame edilerek üretilen harç numunelerinin dayanım ve dayanıklılık özellikleri ve bu özellikler arasındaki korelasyonlar araştırılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

4.2.1. Dayanım Deney Bulguları

Tablo 4.3. Dayanım deneyleri toplu sonuçları

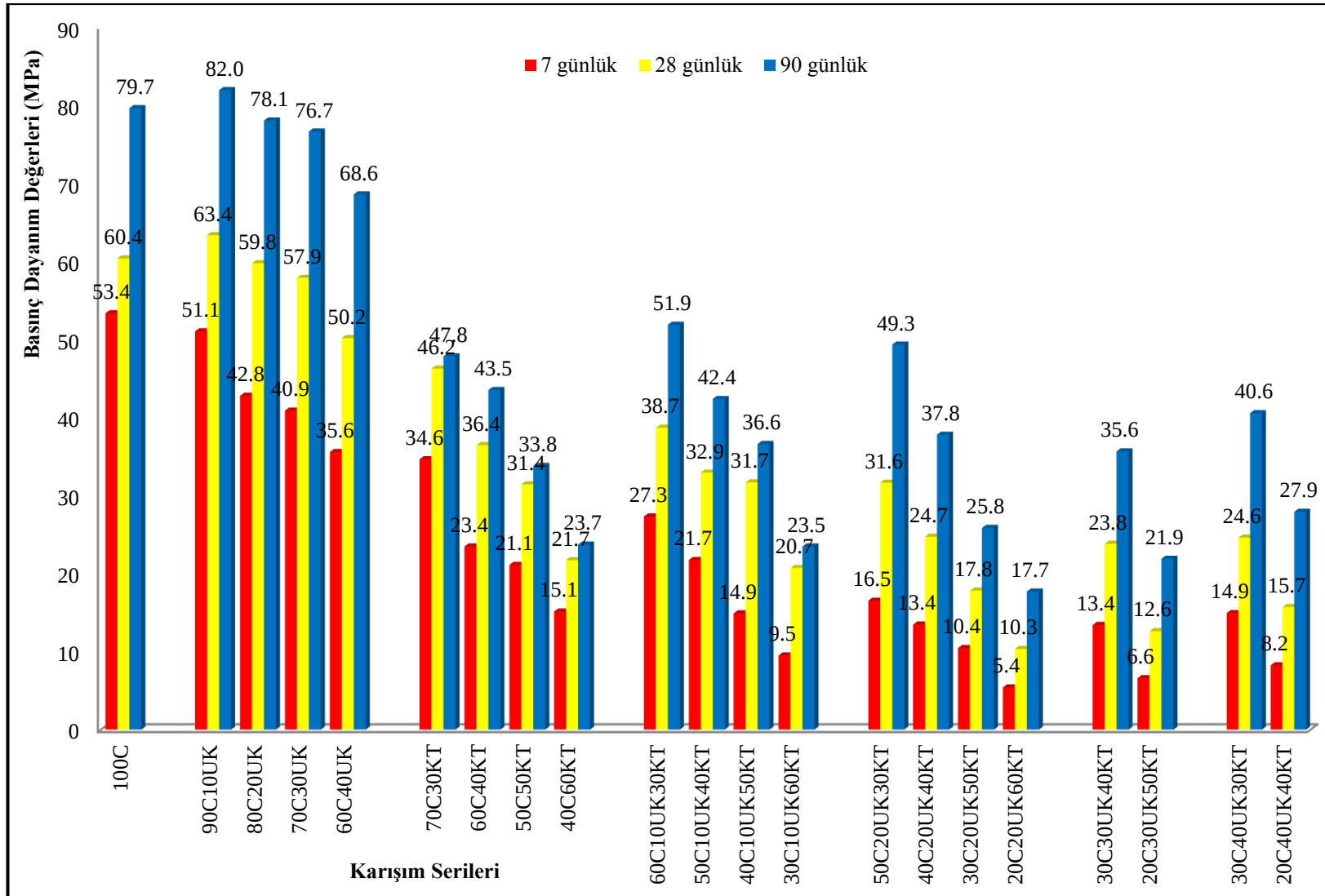
Seri Adı	Basınç Dayanımı (MPa)			Eğilme Dayanımı (MPa)			Rölatif Ultrases Geçiş hızı (m/sn)	Dinamik Elastisite Modülü (GPa)
	7. Gün Ort.	28. Gün Ort.	90. Gün Ort.	7. Gün Ort.	28. Gün Ort.	90. Gün Ort.		
100C	53.4	60.4	79.7	5.57	6.45	6.70	4252	38.6
90C10UK	51.1	63.4	82.0	5.28	6.42	7.24	4412	41.48
80C20UK	42.8	59.8	78.1	5.06	6.11	6.50	4370	40.10
70C30UK	40.9	57.9	76.7	4.88	6.09	6.48	4354	40.21
60C40UK	35.6	50.2	68.6	4.54	6.03	6.09	4289	39.27
70C30KT	34.6	46.2	47.8	5.23	6.05	6.26	4016	33.73
60C40KT	23.4	36.4	43.5	5.08	5.76	5.90	3797	29.43
50C50KT	21.1	31.4	33.8	3.94	5.59	6.01	3606	26.35
40C60KT	15.1	21.7	23.7	3.64	4.40	5.29	3527	24.65
60C10UK30KT	27.3	38.7	51.9	4.99	5.51	6.25	4065	33.61
50C10UK40KT	21.7	32.9	42.4	4.82	5.70	5.95	3831	29.85
40C10UK50KT	14.9	31.7	36.6	3.93	4.71	4.98	3736	28.05
30C10UK60KT	9.5	20.7	23.5	2.74	3.65	4.41	3523	24.76
50C20UK30KT	16.5	31.6	49.3	4.62	5.93	6.30	3971	32.76
40C20UK40KT	13.4	24.7	37.8	3.81	5.62	6.04	3839	30.06
30C20UK50KT	10.4	17.8	25.8	2.83	3.55	3.99	3755	28.39
20C20UK60KT	5.4	10.3	17.7	1.66	2.76	3.77	3472	23.99
30C30UK40KT	13.4	23.8	35.6	3.51	4.39	5.69	3958	31.69
20C30UK50KT	6.6	12.6	21.9	2.11	3.08	3.84	3697	27.26
30C40UK30KT	14.9	24.6	40.6	3.70	4.53	5.62	4046	33.70
20C40UK40KT	8.2	15.7	27.9	2.37	3.57	5.14	3769	28.93

4.2.1.1. Basınç Dayanımı

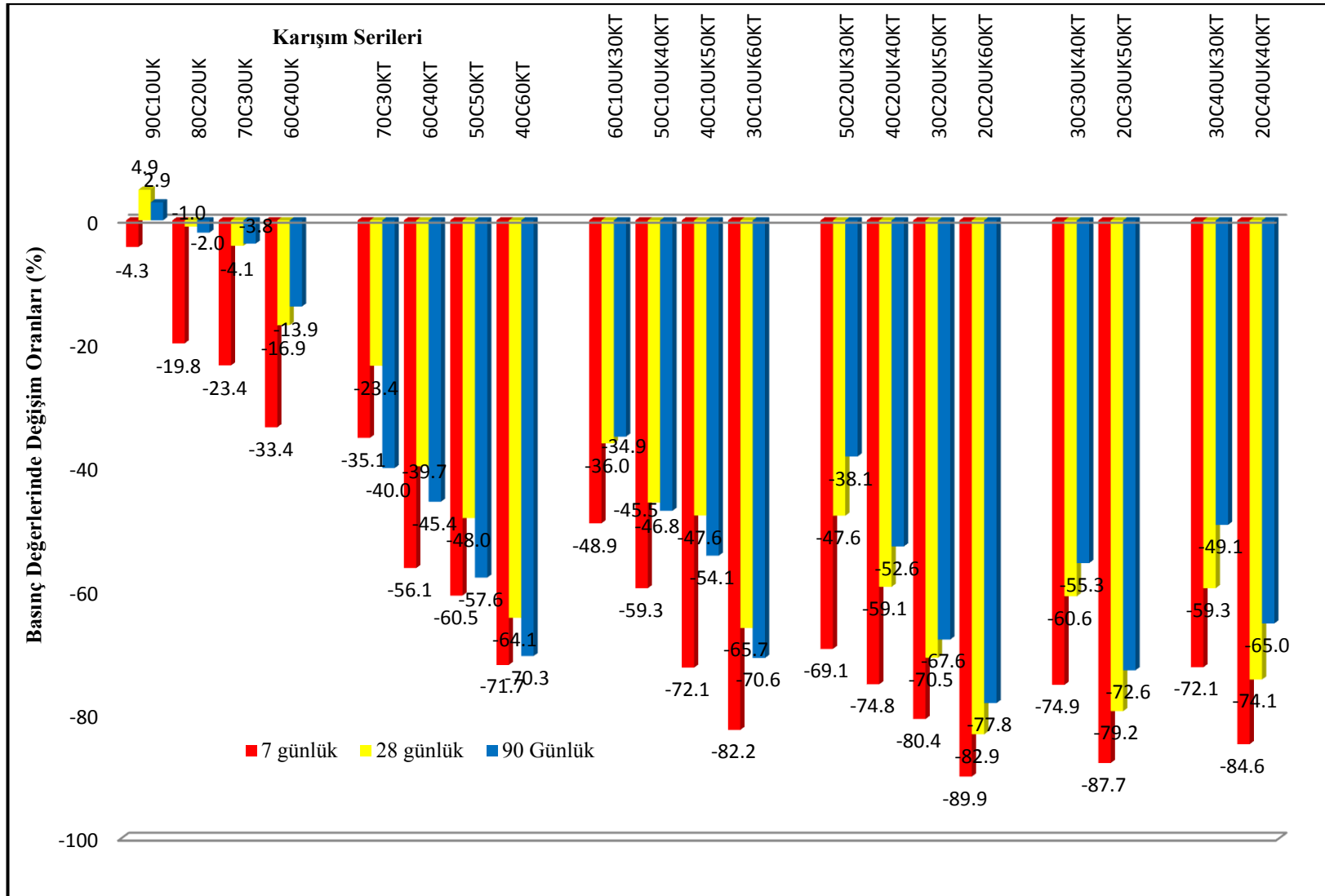
Basınç dayanımı deney sonuçlarını altı ana grupta incelemek mümkündür. Sonuçlar üzerinde yorum yapılırken; benzer reçeteye sahip olan karışımlar dikkate alınarak kıyaslamalar yapılmış olup daha sonra bütün karışım serileri arasında kıyaslamalar yapılarak sonuçların daha sağlıklı bir şekilde değerlendirilmesine çalışılmıştır.

Tablo 4.3'te verilen basınç dayanımı değerleri Şekil 4.14'te verilen grafik üzerinde incelendiğinde sertleşmiş harcın bütün özellikleri arasında basınç değerlerinin en istikrarlı ve sistemli değişen değerlere sahip olduğu görülmüştür.

Erken yaş basınç dayanımı değerlerini öğrenmek için incelenen 7 günlük numunelerde en büyük basınç dayanımına sahip karışım; 53.4 MPa değeri ile kontrol numunesi olmuştur. Daha sonra 51.1 MPa ile 35.6 MPa değerleri arasında değerler alan UK1 grubu olmuştur. UK'li harçların kontrol karışımından düşük değerler alması beklenen bir durumdur. Çünkü UK'nin geç dayanım kazanan puzolanik bir mineral bağlayıcı olduğu bilinmektedir. Bu grup dışında en büyük değere ulaşan karışım 70C30KT karışımı olmuştur. KT1 grubunun yüzdelik değişim grafiği incelendiğinde kontrol numunesine göre erken yaş ile ileri yaş arasındaki farkın KT katkılı karışımlarda daha az olduğu ortaya çıkmaktadır. KT'nin betonun dayanım kazanma hızına etkisi C-S-H oluşumuna uygun çekirdek oluşturarak hisratasyon reaksiyonlarını hızkandırması ve C_3A 'sı yüksek çimentolarla reaksiyona girip bağlayıcı özelliği olan karboalüminat oluşturması ile açıklanmaktadır [150]. Bulgular incelendiğinde bütün numuneler içinde en düşük değere 5.4 MPa ile 20C20UK60KT karışımına ulaşıldığı görülmektedir. Şekil 4.15 incelendiğinde, kontrol karışımına göre basınç dayanımlarındaki yüzdelik değişim oranlarında en büyük fark %89.9 azalma ile 20C20UK60KT karışımında görülürken, en az fark %4.3 azalma ile 90C10UK karışımında görülmüştür. Şekil 4.15'te görüldüğü gibi UK1 grubunda %10, %20, %30 ve %40 oranında çimento yerine UK ikamesi durumunda dayanım %4.3, %19.8, %23.4 ve %33.4 azalmıştır. KT1 grubunda ise %30, %40, %50 ve %60 oranında çimento yerine KT ikamesi durumunda dayanım %35.1, %56.1, %60.5 ve %71.7 oranlarında azalmıştır. Üçlü sistem karışımlarda basınç değerlerindeki düşme oranları çimento kullanım miktarı düştükçe daha fazla olmuş ve en fazla %89.9 oranında düşmenin olduğu görülmüştür.



Şekil 4.14. Basınç dayanımı değerlerine mineral katkı miktarı ve yaş etkisi



Şekil 4.15. Basınç dayanımı değerlerinde yüzdelik değişim oranları

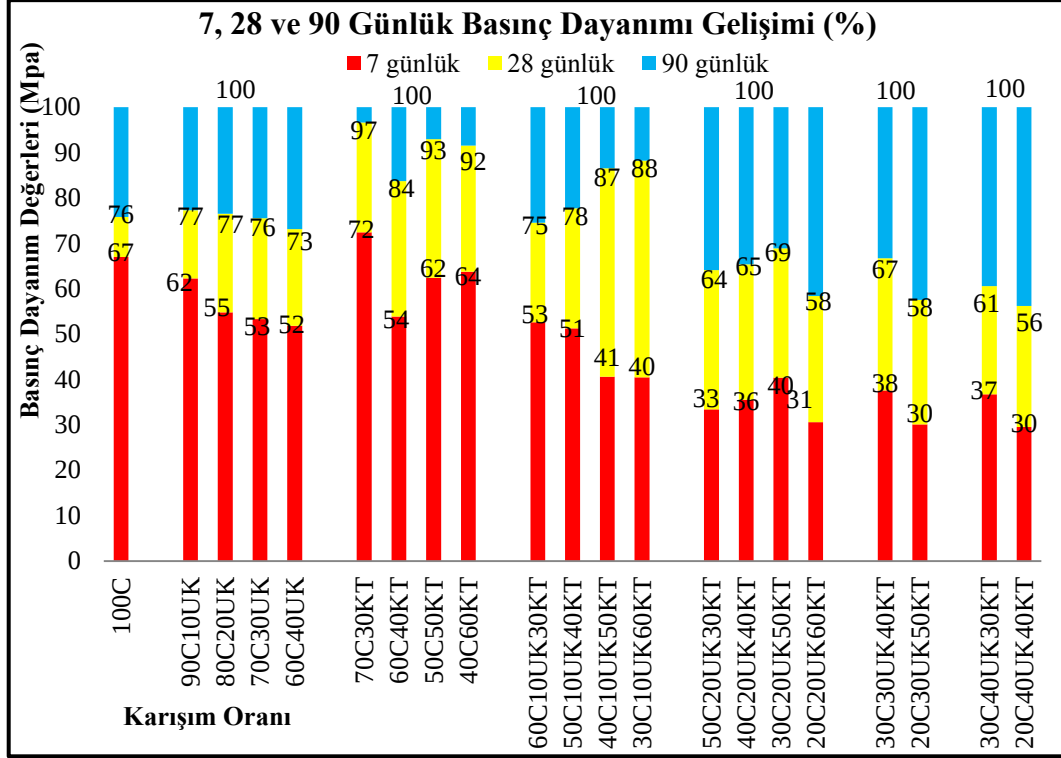
28 günlük dayanım değerleri incelendiğinde en büyük değere ulaşan karışım numunesi bu kez 63.4 MPa ile 90C10UK karışımı olurken en düşük değere ulaşan karışım numunesi 10.3 MPa ile yine 20C20UK60KT numunesi olmuştur. Burada 50MPa değerine göre bir mukayese yapıldığında kontrol karışımı, UK1 grubunun tamamı ve 70C30KT karışımı bu değeri yaklaşık olarak sağlamaktadır. UK1 grubunda çimento yerine %10, %20, %30 ve %40 oranında UK ikamesi karşılığında dayanım %4.9 artma %1, %4.1 ve %16.9 azalma şeklinde olmuştur. Burada farklı olan, bağlayıcı olarak çimento yerine %10 oranına kadar UK ikamesinin harç dayanımını, kontrol numunesine göre arttırmasıdır. Bu orandan fazla UK kullanımı dayanımda azalmaya neden olmuştur. KT1 grubunda çimento yerine her %10 daha fazla KT ikamesi durumunda %30, %40, %50, %60 KT oranları için dayanım değerlerindeki düşüş %23.4, %39.7, %48 ve %64.1 olmuştur. Üçlü bağlayıcılarda azalma oranı daha büyümüş dayanımdaki azalma 20C20UK60KT numunesinde %77.8'e ulaşmıştır.

Nihai dayanıma yakın dayanım değerlerini öğrenmek için 90 günlük dayanım değerleri incelendiğinde en büyük değere ulaşan karışım 82.0 MPa ile 90C10UK karışımı olurken en düşük değere ulaşan 17.7 MPa ile yine 20C20UK60KT karışımı olmuştur. Bu süre sonunda 20C20UK60KT karışımı hariç bütün karışımlar 20MPa değerini geçmiştir. UK1 grubunda çimento yerine %10, %20, %30 ve %40 oranında UK ikamesi karşılığında dayanım %2.9 artma %2.0, %3.8 ve %13.9 azalma şeklinde olmuştur.

Şekil 4.16'da verilen basınç dayanımlarında zamana bağlı gelişimin yüzdelik oranları dikkate alındığında kontrol harcı için dayanımın %67'sinin ilk 7 gün içinde kazanıldığı görülmektedir ki bu oran en büyük orandır. 28 günde toplam dayanımın %76'sına ulaşılmış, 28 ile 90 gün arasında %24 dayanım artışı olmuştur. İkili bağlayıcılar arasında UK1 grubu erken yaş dayanımında KT1 grubundan geride kalmış mineral bağlayıcı oranı arttıkça bu fark daha da büyümüştür. Özellikle 28-90 gün arası sürede UK1 grubundaki dayanım artışı dikkat çekicidir. Bu kısımda dayanım artışı UK1 grubu için %23-%27 arasında olurken KT1 grubu için bu aralık %3-%8 olmuştur. KT1 grubunda ise 7-28 gün aralığındaki dayanım artışı dikkat çekicidir.

Üçlü sistemde erken yaş dayanımı mineral katkı arttıkça düşmektedir. Bu oran %20 çimento içeren karışımlarda minimum değer %30'a kadar düşmüştür. 28 günlük dayanım kazanma oranında en düşük oran %7 ile kontrol numunesi, en büyük oran ise %48 ile 30C10UK60KT numunesinde gerçekleşmiştir. 90 günlük dayanım için en az ilerleme %3

ile 70C30KT numunesinde en fazla ilerleme %44 ile 20C40UK40KT numunesinde gerçekleşmiştir.

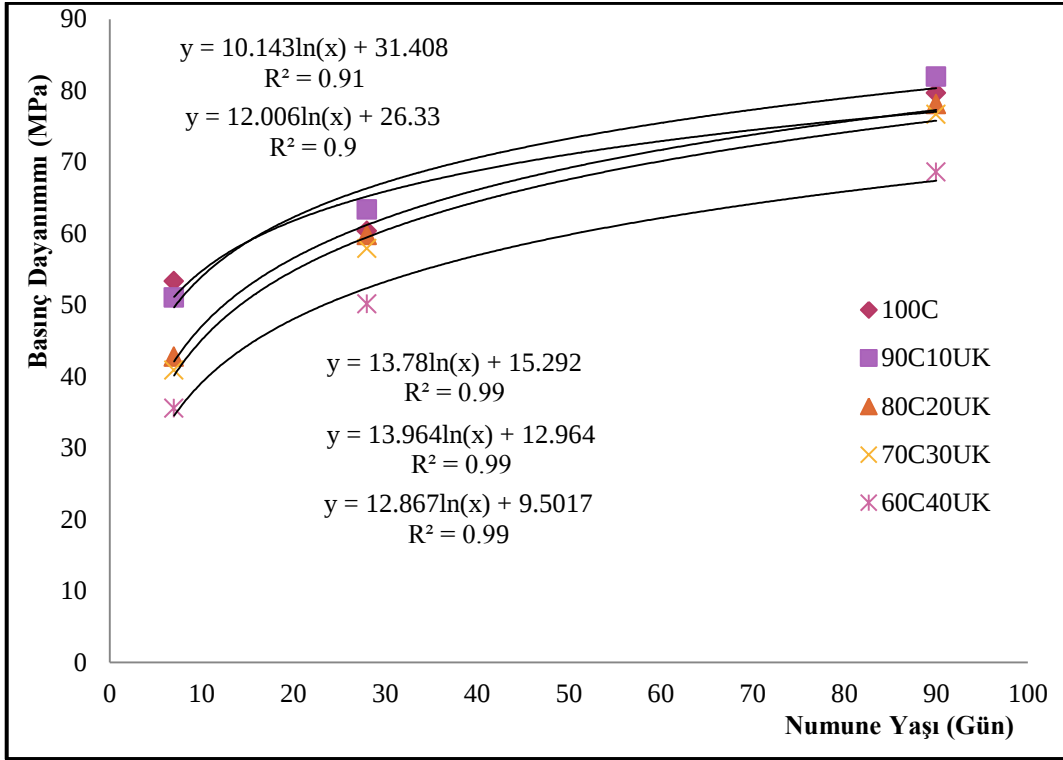


Şekil 4.16. 7, 28 ve 90 Günlük basınç dayanımlarının ilerleme oranları

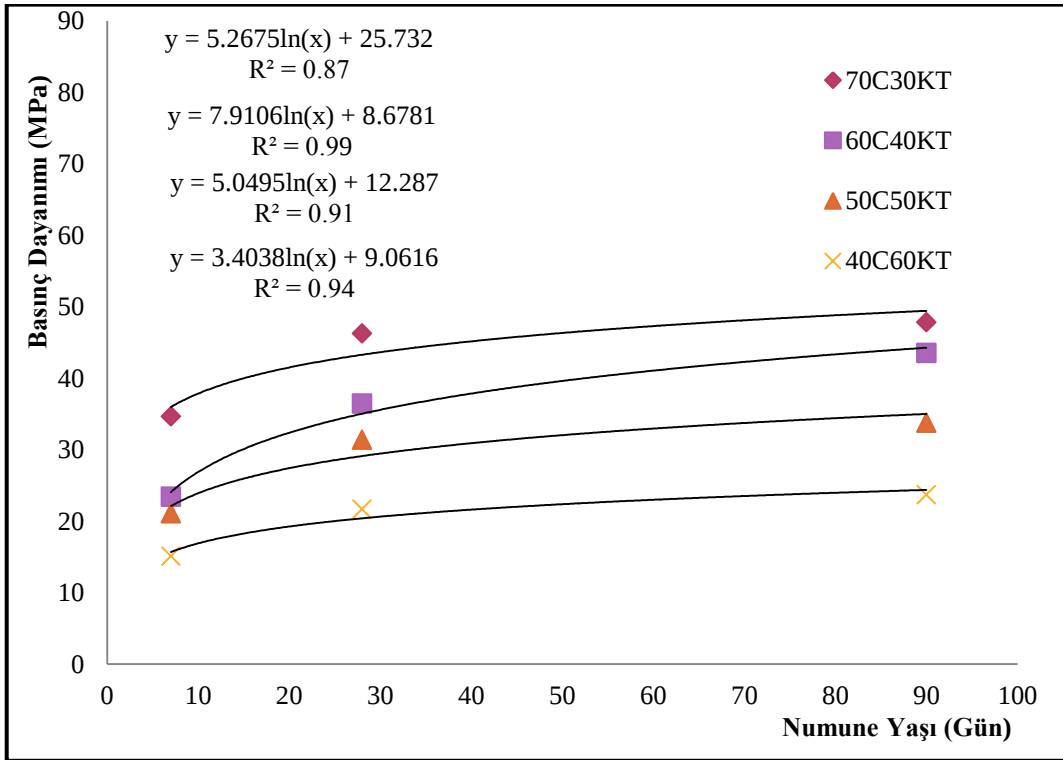
Literatür araştırmalarının da desteklediği sonuçlara göre Şekil 4.14 - Şekil 4.21 arasındaki bütün grafikler incelendiğinde UK ikame oranı %10'da fazla arttıkça, KT ikame oranında ise bütün KT oranları için basınç dayanımı değerlerinin azaldığı, numune yaşına bağlı olarak ise basınç dayanımı değerlerinin arttığı görülmüştür [131].

Çimentonun C_2S ve C_3S bileşenlerinin hidratasyonu sırasında esas hidratasyon ürünü kalsiyum silikat hidratların (C-S-H) yanında, harcın en zayıf halkası $Ca(OH)_2$ 'de açığa çıkar. Puzolanlar işte bu zayıf kısım ile reaksiyona girerek hem kendi bağlayıcılık özelliklerini kazanır, hem de daha yoğun ve suda çözülmeleyen bir yapıya dönüşür [134]. Bilindiği gibi bu reaksiyon aylar yıllar sürebilen nispeten yavaş bir aktivitedir. Dolayısıyla, 7 ve 28 günlük dayanım için (CEM I 42.5 N+puzolan) toplamını salt bağlayıcı olarak değerlendirmek gerçekçi olmayabilir. Puzolanik özellik, kullanılan puzolanın özgül alanına bağlıdır. Bu da malzemenin puzolanik özelliğini arttırmak için onu çok ince öğütmek gerektiğini göstermektedir [135].

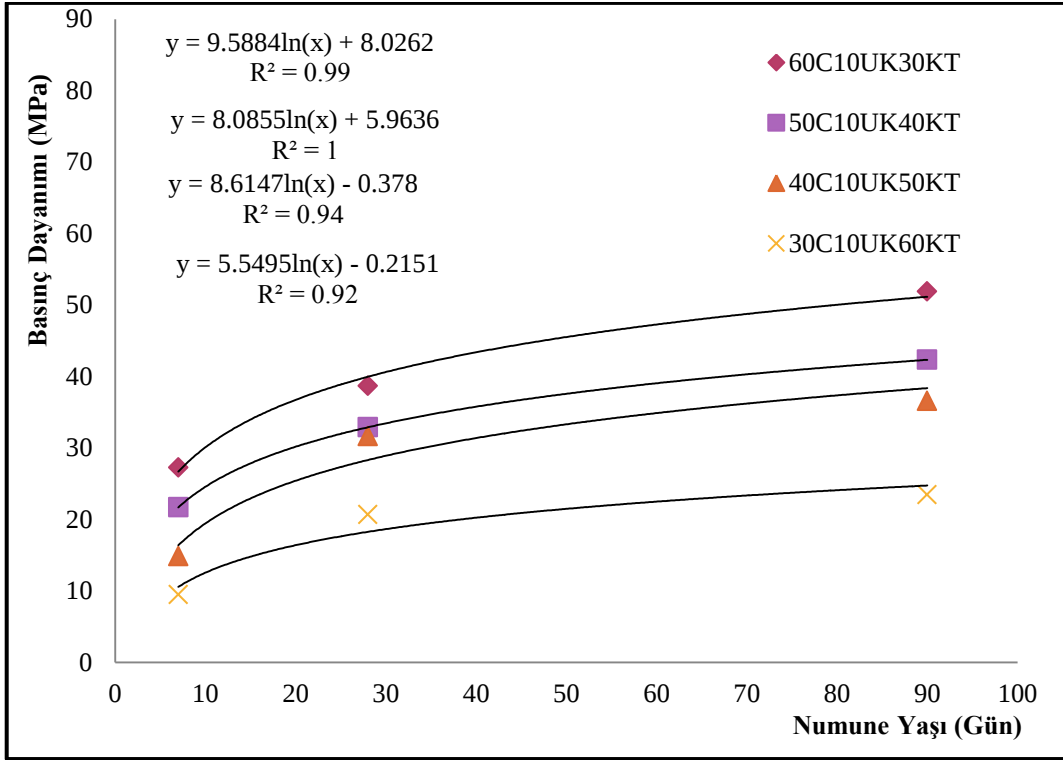
Basınç dayanımı değerlerinin numune yaşı ile arasındaki bağıntının nicel ifadesi Şekil 4.17 ile Şekil 4.21 arasındaki grafikler incelenerek ortaya çıkarılmıştır. Her iki değer arasında regresyon eğrileri çizilmiş, korelasyon katsayıları incelenerek bağıntının güvenilirliği belirlenmiştir. Grafikler her bir grup için ayrı ayrı çizilmiştir. Şekil 4.17 incelendiğinde R^2 belirlilik katsayısından hesaplanan en küçük $R=0.952$, en büyük $R=0.998$ bulunmuştur. Bu aradaki bağıntının güvenilirliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Grafikten başlangıçta dayanım değeri daha yüksek olan kontrol numunesinin 15. gün civarında %10 UK karışımlı numune ile dayanımlarının eşitlendiği, bundan sonra 90C10UK karışımı dayanımının öne geçtiği ve bu farkın zamanla arttığı anlaşılmıştır. UK güçlü bir puzolanik etki göstermiştir. %20 ve %30 UK içeren karışımlar başlangıçta kontrol karışımına göre oldukça düşük değerler almalarına rağmen 90 gün boyunca paralel olarak artmış, 90. gün sonunda değer olarak hemen hemen kontrol karışımına eşitlenmişlerdir. %40 UK içeren karışım ise başlangıçtan 90. güne kadar diğerlerinden daha az değerler almıştır. Bununla birlikte başlangıç değerine göre oran olarak en fazla artış bu karışımda olmuştur. Şekil 4.18'deki KT1 grubu karışımlarına ait dayanım sonuçlarında 7. gün ile 90. gün arasında en az dayanım farkı 70C30KT karışımında, en fazla dayanım kazancı ise 60C40KT karışımında görülmüştür. 40C60KT karışımı başlangıçtan son güne kadar en düşük değerleri almıştır. Burada da korelasyon katsayıları yüksek çıkmış ve $R=0.935$ ile 0.969 arasında değerler almıştır. Üçlü sistem karışım gruplarından; sabit %10 UK içeren 10UK grubu, Şekil 4.20'de incelendiğinde %30 KT içeren ve %60 KT içeren karışım serilerinde ayrışma olmuştur. 30KT ikameli karışım yüksek, 60KT ikameli karışım ise zayıf dayanım kazanmıştır. Şekil 4.20 incelendiğinde 20UK grubu için KT oranının her %10'luk artışı ile 7. gün, 28. gün ve 90. gün için sistemli dayanımlar kazandıkları görülmüştür. Burada korelasyon katsayısı bütün eğrilerde %99 çıkmıştır. Şekil 4.21 incelendiğinde %30 ve %40 UK ikameli karışımlarda %30 çimento içeren karışımlar %20 çimento içerenlerden yüksek çıkmıştır. Bu belli bir dozajdan sonra mineral katkı kullanımının çok faydalı olmadığını açıkça göstermektedir.



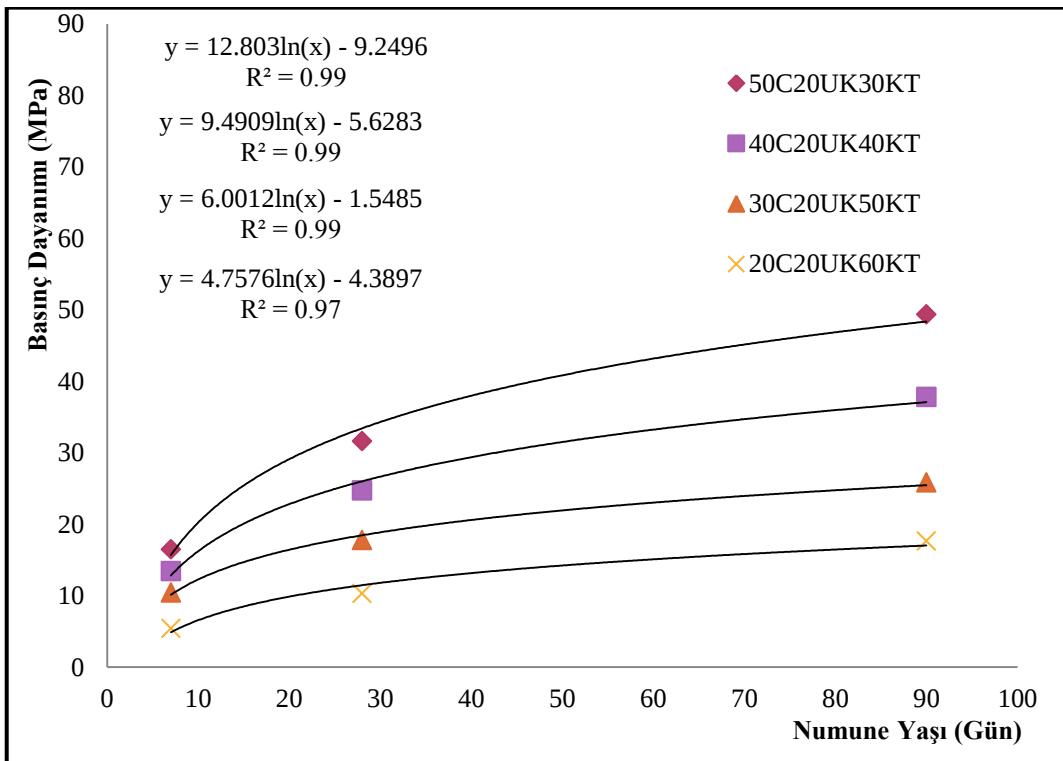
Şekil 4.17. Basınç dayanımı değerleri UK1 grubu logaritmik grafiği



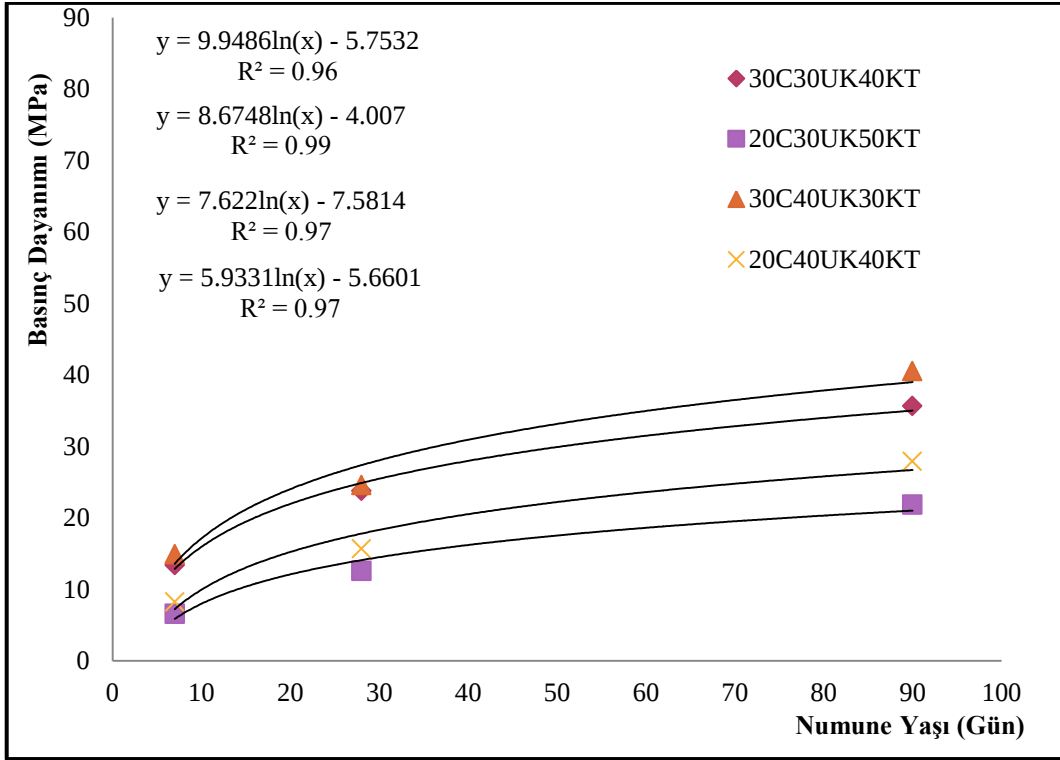
Şekil 4.18. Basınç dayanımı değerleri KT1 grubu logaritmik grafiği



Şekil 4.19. Basınç dayanımı değerleri 10UK grubu logaritmik grafiği



Şekil 4.20. Basınç dayanımı değerleri 20UK grubu logaritmik grafiği



Şekil 4.21. Basınç dayanımı değerleri 30UK ve 40UK grupları logaritmik grafiği

4.2.1.2. Eğilmede Çekme Dayanımı

Eğilmede çekme deney sonuçları incelendiğinde, basınç dayanımı deney sonuçları ile paralellik gösterdiği görülmüştür. Eğilme-çekme deneylerinde kullanılan numuneler basınç deneylerinde de kullanılmıştır. Her iki deney çalışmaları da 7, 28 ve 90. günlerde yapılmıştır. Eğilmede çekme deneyleri 3'er adet numune kırılarak, basınç dayanımları ise ortadan kırılan her numuneden elde edilen ikişer parça alınarak her karışım için toplam 6'şar adet numuneden ölçülmüştür.

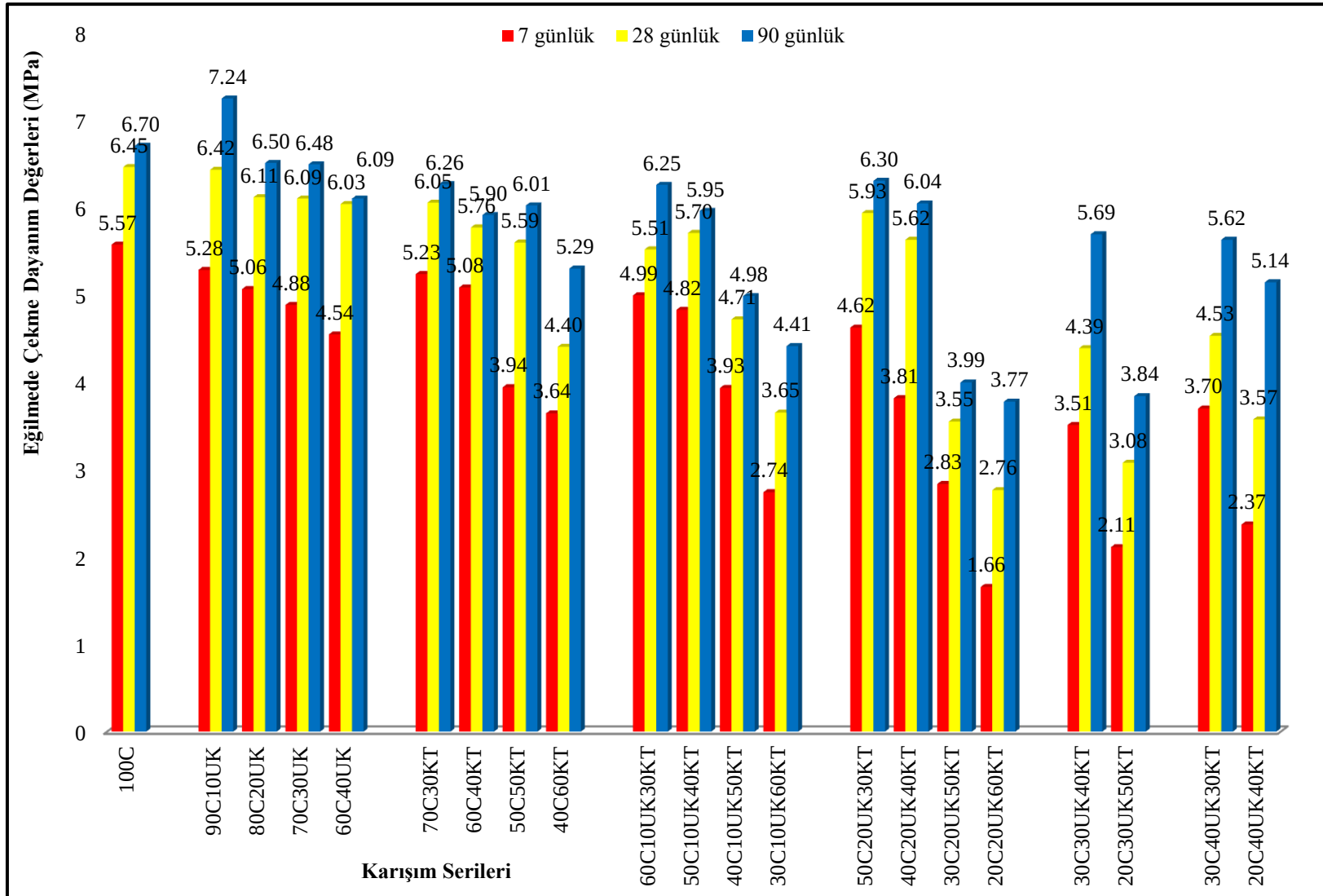
Tablo 4.3'te verilen eğilme-çekme dayanımı verileri Şekil 4.22'deki grafik üzerinde incelendiğinde sertleşmiş harçta eğilme-çekme değerlerinin basınç değerleri kadar geniş bir aralıkta olmadığı görülmüştür.

Eğilme-çekme dayanımı değerlerinde erken yaş dayanım değerlerini öğrenmek için incelenen 7 günlük numunelerde en büyük basınç dayanımına sahip numune 5.57 MPa değeri ile kontrol karışımı olmuştur. Bunu 5.28 MPa ile 4.54 MPa değerleri arasında UK1 grubu karışımları izlemiştir. Basınç dayanımında olduğu gibi UK'li harçların kontrol numunesinden düşük değerler alması beklenen bir durumdur. Bu grup dışında en büyük değere ulaşan karışım 5.23 MPa ile 70C30KT karışımı olmuştur. KT1 grubundan

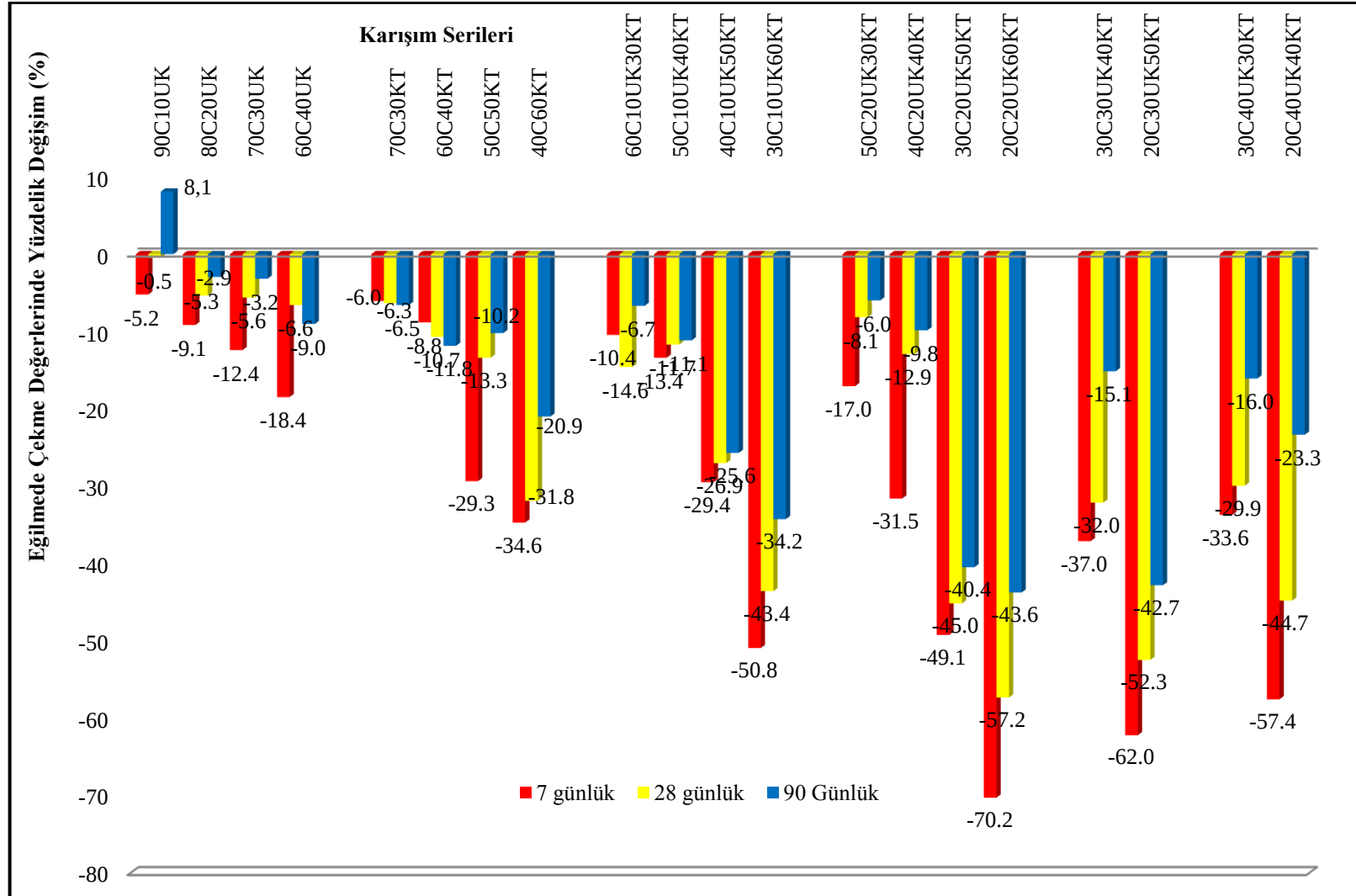
70C30KT numunesi 5.23 MPa dayanım değeri ile bu grubun en büyük değer alan karışımı olmuştur. Bütün numuneler içinde en düşük değere 1.66 MPa ile 20C20UK60KT karışımı numuneler ulaşmıştır. Kontrol karışımları referans alınarak basınç dayanımlarında yüzdelik değişim oranları Şekil 4.23'teki grafikte incelendiğinde en büyük fark %70.2 azalma ile 20C20UK60KT karışımında görülürken en az fark %5.2 azalma ile 90C10UK karışımında görülmüştür. Şekil 4.23'teki yüzdelik değişim grafiğinden anlaşılabileceği gibi UK1 grubunda sırası ile çimento yerine %10, %20, %30 ve %40 oranlarında UK ikamesi durumunda dayanım %5.2, %9.1, %12.4 ve %18.4 azalmıştır. KT1 grubunda ise çimento yerine %30, %40, %50 ve %60 oranında KT ikamesi durumunda dayanım %6.0, %8.8, %29.3 ve %34.6 oranında azalmıştır. Üçlü sistem kullanılan numunelerde basınç değerlerindeki düşme oranları toplam bağlayıcı içinde çimento kullanım miktarı düşürülüp mineral bağlayıcı arttırıldığında daha fazla fark meydana gelmiş ve %70.2 oranında düşmenin olduğu görülmüştür. Bu durum mineral malzemelerin puzolanik özellikleri sebebiyle gerçekleşmiştir.

Sertleşmiş harç numunelerine ait 28 günlük eğilme çekme dayanım değerleri incelendiğinde en büyük değere ulaşan karışım bu kez 6.45 MPa ile yine kontrol numunesi olmuş, en düşük değere sahip karışım da 2.76 MPa ile basınç değerlerine paralel çıkarak 20C20UK60KT karışımı olmuştur. UK1 grubunda %10, %20, %30 ve %40 oranında çimento yerine UK kullanımının ikamesi karşılığında dayanımda %0.5, %5.3, %5.6 ve %6.6 azalma şeklinde olmuştur. Bu grupta UK kullanımı bütün karışım oranlarında dayanımda sistemli azalmaya neden olmuştur. KT1 grubunda çimento yerine her %10 fazla KT ikamesi durumunda %30, %40, %50, %60 KT oranları için dayanım değerlerindeki düşüş %6.3, %8.8, %13.3 ve %31.8 olmuştur. Üçlü sistem karışımlarda 28 günde kontrol karışımına göre dayanımda mineral katkı oranı büyürken, dayanımdaki azalma 20C20UK60KT karışımında %57.2'ye ulaşmıştır.

90 günlük dayanımda eğilme-çekme değerlerini tahlil etmek için Şekil 4.22 incelendiğinde en büyük değere ulaşan karışım 7.24 MPa ile 90C10UK karışımı olurken en düşük değere ulaşan 3.77 MPa ile yine 20C20UK60KT karışımı olmuştur. UK1 grubunda %10, %20, %30 ve %40 oranında çimento yerine UK kullanımının ikamesi karşılığında dayanım %8.1 artma %2.9, %3.2 ve %9.0 azalma şeklinde olmuştur.



Şekil 4.22. Eğilmede çekme dayanımı değerlerine mineral katkı miktarı ve yaş etkisi



Şekil 4.23. Eğilmede çekme dayanımı değerlerinde yüzdelerik değişim oranları

Şekil 4.24 incelendiğinde bütün karışımlar arasında 7. günde en büyük dayanım kazanımı 60C40KT karışımında %86 olmuştur. Aynı karışım 28. günde toplam dayanımın %98'ine ulaşılmıştır. 28 ile 90 gün arasında en düşük artış %1 ile 60C40UK karışımında gerçekleşmiştir. İki sistem karışımlar arasında UK1 grubu erken yaş dayanımında ilk iki karışım KT1 grubundan geride kalmış, son iki karışım ise daha fazla değere sahip olmuştur. Bu sonuç bize karışım mineral dozajın oran bakımından dikkatle ayarlanması gerektiğini göstermektedir.

Üçlü sistem karışımlarda ise eğilme-çekme için 7 günlük erken yaş dayanımı artış oranı genel olarak basınç dayanımından daha büyük olmuştur. 7 günlük eğilme değeri gelişim oranı en büyük değerini ikili sistem karışımlardan 60C40KT'de %86 oranıyla, en az gelişimini ise %44 ile üçlü sistem kullanılan 20C20UK60KT karışımında kazanmıştır. 28 günlük dayanım kazanma oranında en büyük oran %29 ile 20C20UK60KT karışımında, en küçük oran ise %12 ile 60C40KT karışımında gerçekleşmiştir. 90 günlük dayanım için en fazla gelişim %30 ile 20C40UK40KT numunesinde en az ilerleme %1 ile 60C40UK numunesinde gerçekleşmiştir.

Literatür araştırmalarının da desteklediği sonuçlara göre Şekil 4.22-4.30 arasındaki bütün grafikler incelendiğinde UK ikame oranı %10'dan fazla arttıkça, KT ikame oranında ise bütün KT oranları için eğilmede çekme dayanımı değerlerinin azaldığı, numune yaşına bağlı olarak ise eğilmede çekme dayanımı değerlerinin arttığı görülmüştür [131].

Eğilme-çekme dayanım değerlerinin numune yaşı ile arasındaki ilişki Şekil 4.25 ile Şekil 4.29'daki grafikler incelenerek ortaya çıkarılmıştır. Her iki değer arasındaki yaklaşım eğrileri çizilmiş, korelasyon katsayıları incelenerek aradaki bağıntının güvenilirliği belirlenmiştir. Her bir grup için ayrı ayrı grafik çizilmiştir. Şekil 4.25 incelendiğinde R^2 katsayısından en büyük korelasyon katsayısı $R=0.999$ en küçük korelasyon katsayısı $R=0.905$ bulunmuştur. Bu sonuç bağıntının güvenilirliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Grafikten başlangıçta eğilme-çekme dayanım değeri daha yüksek olan kontrol numunesinin 20. gün civarında, %10 UK karışımlı numunenin dayanım değeri ile eşitlenmiştir. Yaklaşık 20 gün sonunda 90C10UK karışımının dayanımının öne geçtiği ve bu farkın zamanla arttığı anlaşılmaktadır. Bu grup aynı karışımların basınç dayanım özellikleri ile çok büyük benzerlik göstermektedir. %10 UK mineral katkılı karışım güçlü bir pozolanik etki göstermiştir. %20, %30 ve %40 UK içeren karışımlar başlangıçta kontrol numunesine yakın değerler almışlardır. 90. gün sonunda %10 UK ikameli karışım değer

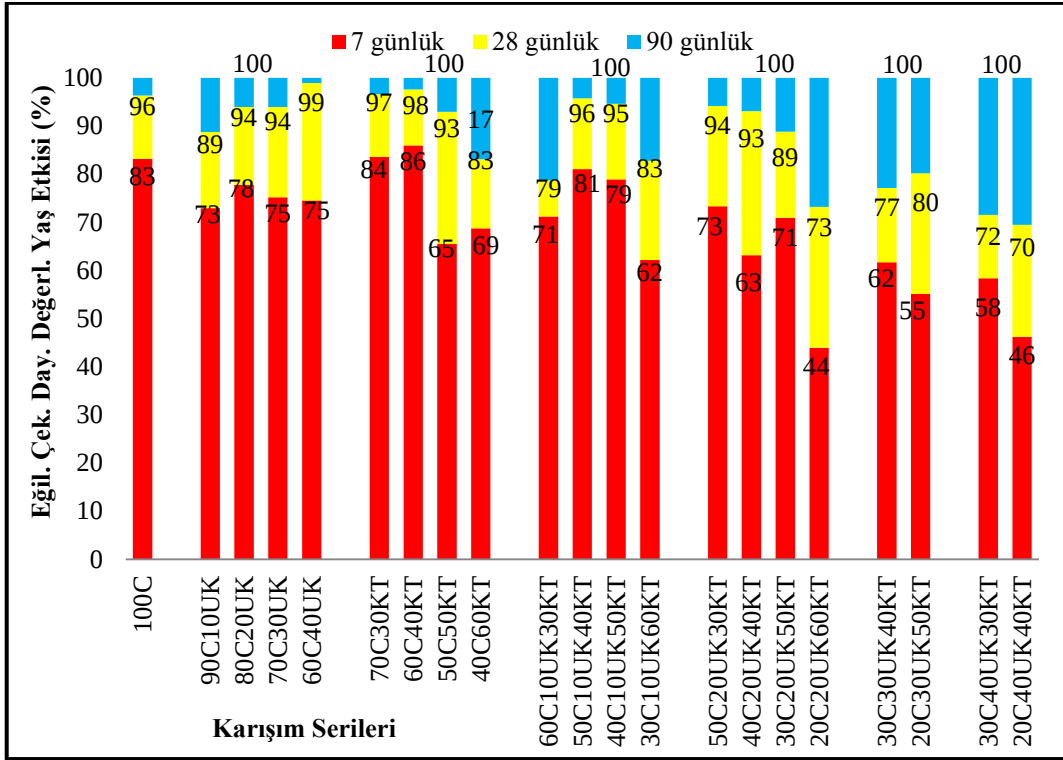
olarak diğerlerinden fazla artarken %30 UK içeren karışımla sonlara doğru hemen hemen eşitlenmişlerdir. %40 UK içeren karışım ise başlangıçtan 90. güne kadar gruptaki diğer karışımlardan ayrışıp daha düşük değere sahip olarak %30 UK içeren karışıma paralel artmıştır. Şekil 4.26'daki KT1 grubu karışımlarına ait eğilme dayanımı sonuçlarında 70C30KT karışımının 7. gün ile 90. gün arasında sürekli en büyük değerlere sahip olmuştur. Bununla birlikte karışım 7-90 günleri arasında en az dayanım kazancı olan karışım olmuştur. En fazla dayanım kazancı ise 50C50KT karışımında görülmüştür. 50C50KT karışımı 60. Gün yakınlarında 60C40KT karışımının dayanımını yakalamış ve onu geçmiştir. 40C60KT karışımı ise başlangıçtan son güne kadar en düşük değerleri almıştır. Bu grupta da korelasyon katsayıları çok yüksek çıkmıştır. Korelasyon katsayısı değerleri $R=0.951$ ile 0.995 arasındadır. Bu basınç-yaş ilişkisinin güçlü olduğunu göstermektedir. Sabit %10 oranında UK içeren 10UK grubu Şekil 4.27'de incelendiğinde %30 ve %40KT içeren karışım serilerinde pozitif yönde ayrışma olmuştur. Bu karışım serileri her yaşta diğer iki karışıma göre dayanım bakımından daha yüksek değerler almışlardır. %60KT ikameli karışım ise en zayıf dayanımları kazanmıştır. Şekil 4.28 incelendiğinde 20UK grubunda 7 günlük değerler %30 ve 40KT ikameli harçlarda %50 ve %60KT ikameli harçlara göre daha yüksek değerlere ulaşmışlardır. 90. güne doğru ilk iki karışımın dayanım miktarları diğer iki karışımından iyice ayrılırken, %40KT içeren karışım değeri %30KT içeren karışım değerine çok yaklaşmıştır Regresyon katsayıları bütün eğriler için 0.956 ile 0.999 arasında çıkmıştır. %30UK ve %40UK içeren karışımlara ait Şekil 4.29'daki grafik incelendiğinde 30UK içeren karışımlarda KT oranının %10 artışının çok büyük bir eğilme-çekme farkı oluşturmadığı görülmüştür. Erken yaşlarda az bir fark olmasına rağmen 90 gün sonunda değerler eşitlenmiştir. %40UK içeren karışım ise başlangıçta oldukça yakın değerlere sahip olmakla birlikte bu fark 90. güne doğru %30KT içeren karışım lehine oldukça artmıştır.

Eğilmede çekme dayanım değerlerinin basınç dayanımı değerlerine oranlarının 7, 28 ve 90. günlerde hangi seviyede olduğu Şekil 4.30'da, incelendiğinde kontrol karışımında bu oranların sırası ile %10, %11 ve %8 olduğu görülmektedir. 90C10UK karışımı kontrol karışımıyla hemen hemen aynı değerler olan %10, %10 ve %9 değerlerine sahiptir. Zaten basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı değerleri de oran olarak birbirine çok yakın çıkmıştır.

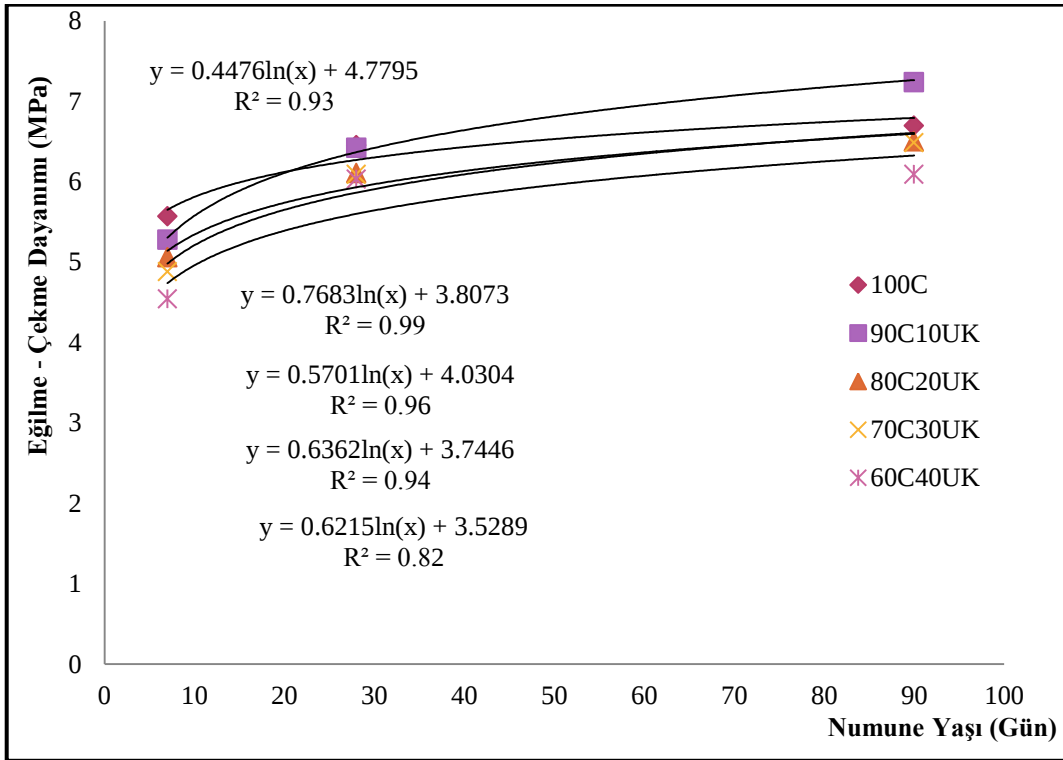
80C20UK karışım serisi de bu iki karışıma oldukça yakın değerlere sahiptir. UK oranı arttıkça erken yaşlarda eğilmede çekme/basınç dayanım oranının arttığı gözlemlenmiştir. KT1 grubunda 7 günlük çekme/basınç oranı UK1 grubundaki eğilme/basınç oranından yüksek çıkmıştır. KT1 grubunda KT miktarının her %10'luk artışına karşın eğilme/bağlayıcı oranları %15, %22, %19 ve %24 değerlerini almıştır. Üç bağlayıcılı karışım gruplarından %10 sabit UK oranlı 10UK grubunda %10'ar oranlarında artan KT miktarına paralel olarak eğilme/bağlayıcı oranı da artmış ve %18, %22, %26 ve %29 değerlerini almıştır. 20UK, 30UK, 40UK gruplarında da KT oranı arttıkça erken yaşta eğilme/basınç oranı yükselmiştir. Bu KT'nin UK'den daha erken dayanım kazandığını göstermektedir. Bütün karışımlar içerisinde en küçük değer %10 ile kontrol numunesinde en büyük değer ise %32 ile 20C30UK40KT numunesinde gerçekleşmiştir.

28 günlük eğilme/basınç sonuçları incelendiğinde kontrol numunesinde bu oran %11 çıkarken, UK1 grubunda sırası ile %10, %10, %11 ve %12 olmuştur. KT1 grubunda eğilme/basınç oranı %13, %16, %18 ve %20 olurken KT miktarının artmasının eğilme dayanımını arttırdığı bariz olarak görülmüştür. 10UK grubunda sabit UK miktarına karşı arttırılan KT oranları ile yine eğilme dayanımının büyüdüğü anlaşılmıştır. %30, %40, %50, %60 oranlarında kullanılan KT'ye karşı çekme/basınç oranı değerleri %14, %17, %15, %18 olmuştur. 20UK-30UK ve 40UK gruplarında da sistematik olarak KT oranı arttığında eğilme/basınç dayanımı oranı da artmıştır. Bu yaş için en küçük değer %10 ile 90C10UK ve 80C20UK karışım numunelerinde en büyük oran ise %27 ile 20C20UK60KT karışımında görülmüştür.

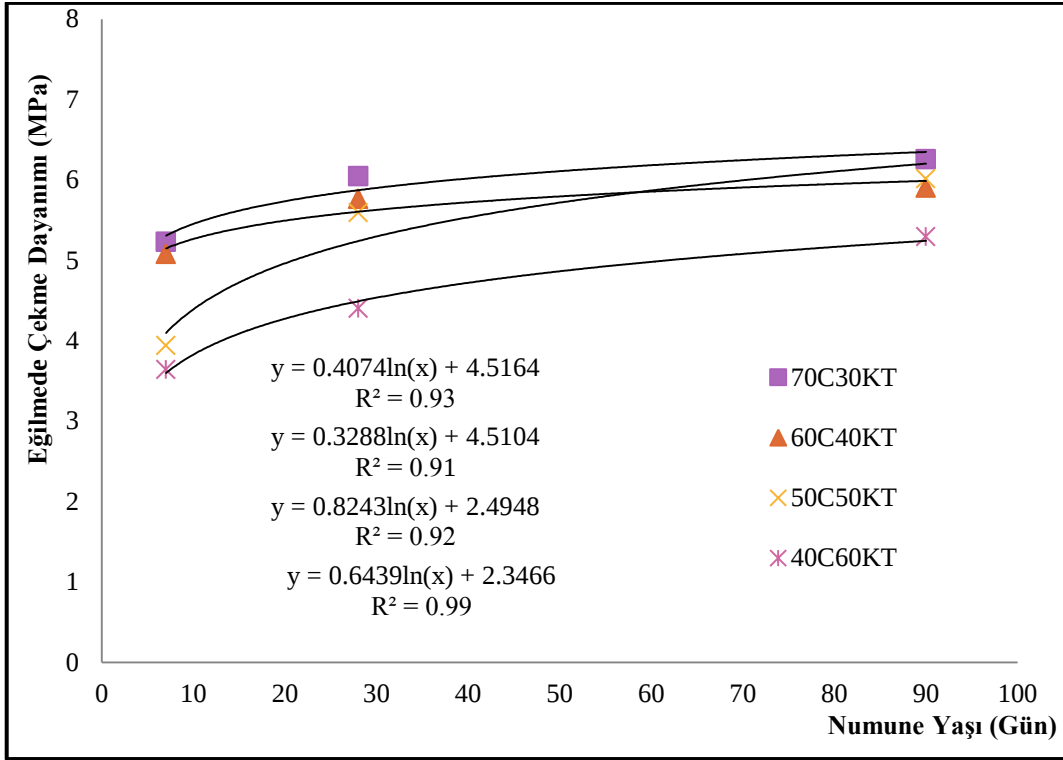
90 günlük çekme/basınç oranları diğer iki yaş gruplarına paralel çıkmıştır. Bu yaş için en küçük değer %8 ile kontrol numunesinde gerçekleşmiştir. 80C20UK ve 70C30UK karışımlarında da buna yakın değerler görülmüştür. En büyük değer ise %22 ile 40C60KT karışımında gerçekleşmiştir. Tüm veriler dikkate alındığında mineral bağlayıcı oranının arttırılması eğilmede çekme dayanımını her yaş için basınç dayanımından daha fazla attırdığı görülmüştür.



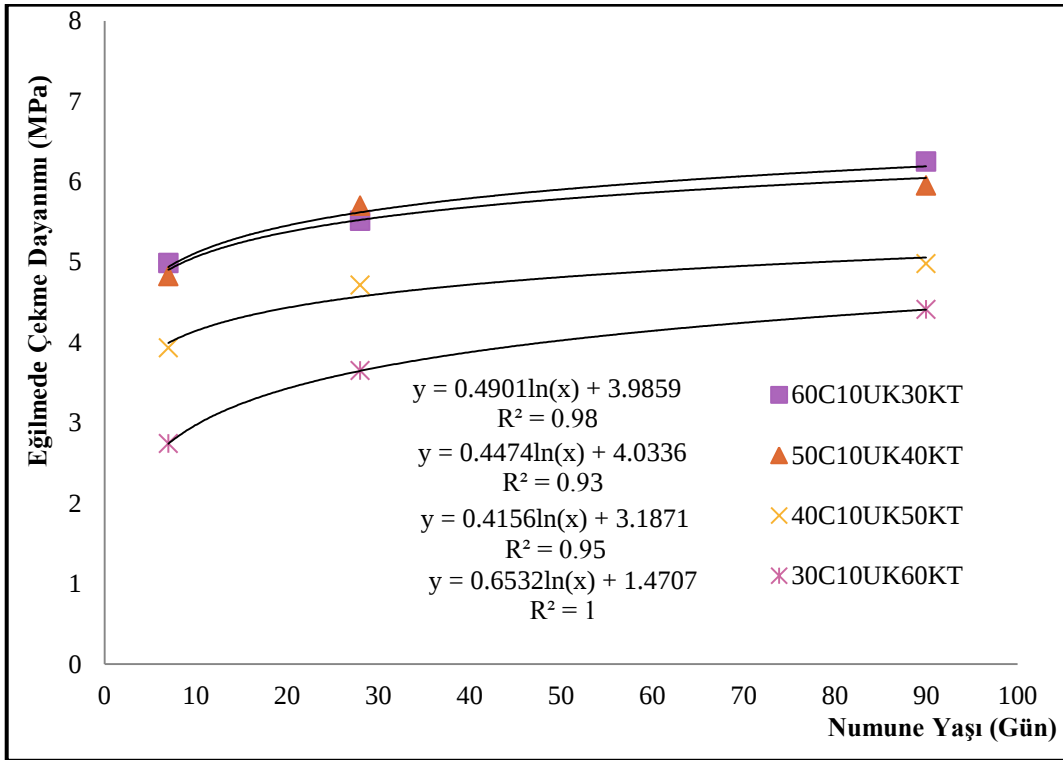
Şekil 4.24. 7, 28 ve 90 Günlük eğilmede çekme dayanımı ilerlemesi oranları



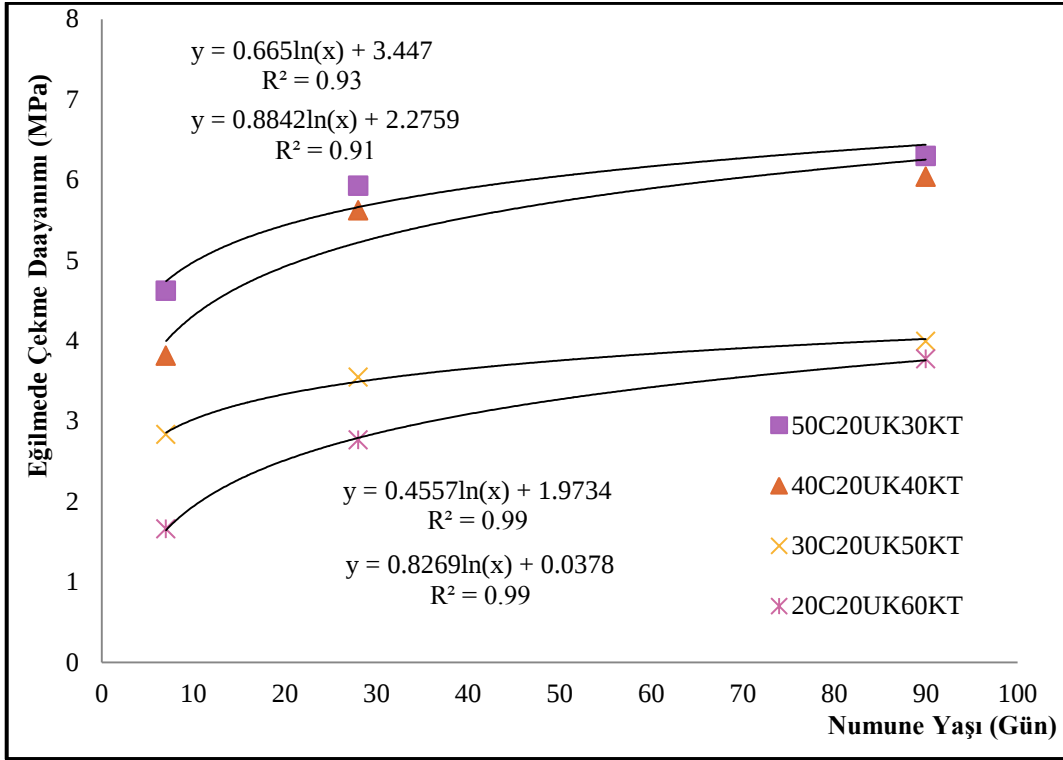
Şekil 4.25. Eğilmede çekme dayanımı değerleri UK1 grubu logaritmik grafiği



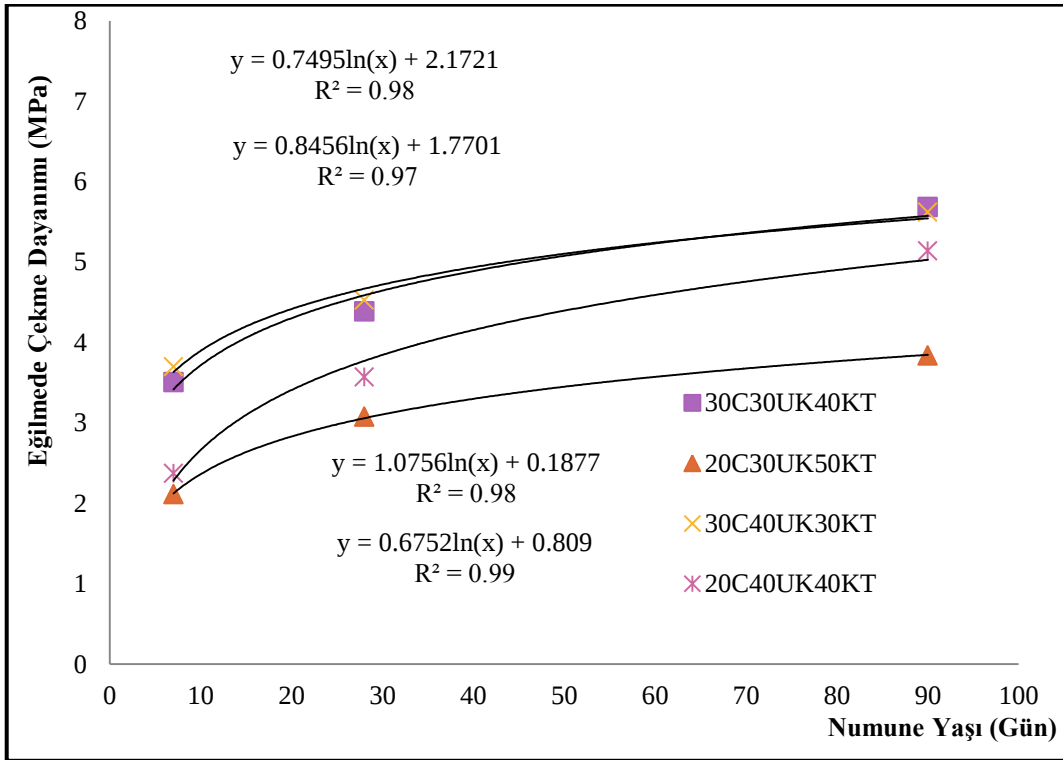
Şekil 4.26. Eğilmede çekme dayanımı değerleri KT1 grubu logaritmik grafiği



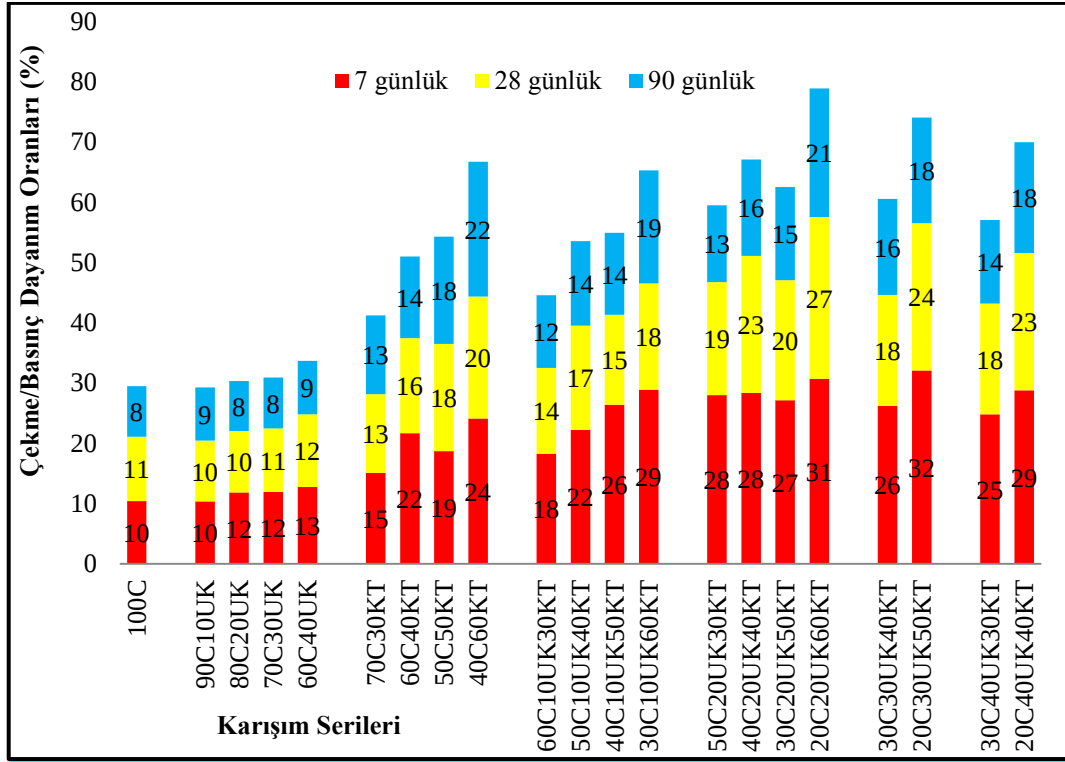
Şekil 4.27. Eğilmede çekme dayanımı değerleri 10UK grubu logaritmik grafiği



Şekil 4.28. Eğilmede çekme dayanımı değerleri 20UK grubu logaritmik grafiği



Şekil 4.29. Eğilmede çekme dayanımı değerleri 30UK ve 40UK grupları logaritmik grafiği

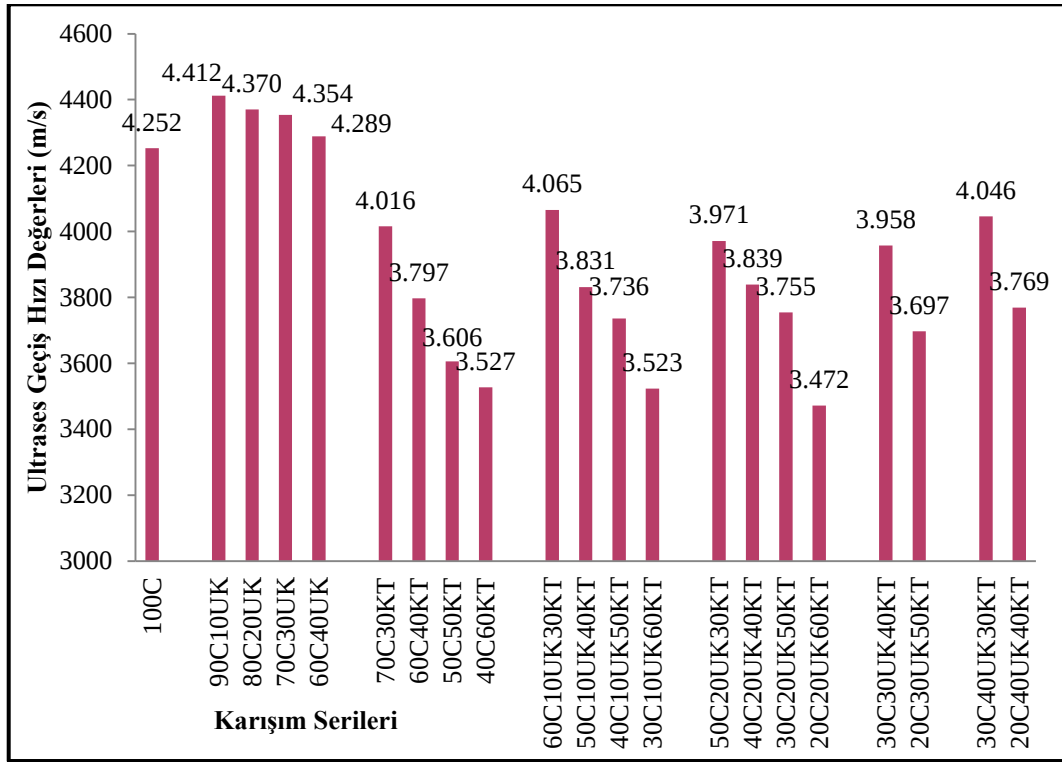


Şekil 4.30. 7., 28. ve 90. Günlerde, eğilmede çekme dayanımlarının basınç dayanımlarına oranları

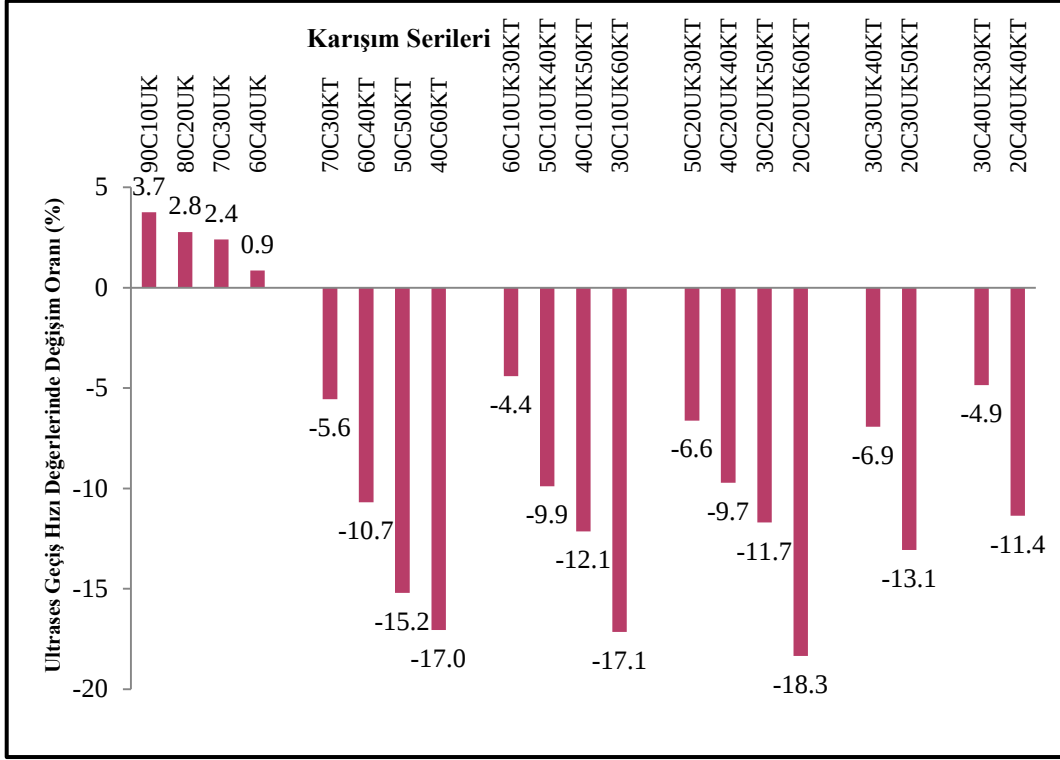
4.2.1.3. Rölatif Ultrases Geçiş Hızı

Tablo 4.3'te verilen 28 günlük ultrases geçiş hızı değerleri Şekil 4.31'de incelendiğinde en büyük hız değerine 90C10UK numunesinde 4412 m/s, en düşük hız değerine ise 20C20UK60KT numunesinde 3472 m/s ile ulaşılmıştır. UK1 grubunun diğer gruplardan oldukça yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Öyleki kontrol numunesinde geçiş hızı bu grubun altında kalmıştır. İkili sistem karışım serilerinden UK1 grubunda hız değerlerinin hepsi kontrol numunesinden yüksek olmakla beraber karışımda çimento yerine UK ikamesi arttıkça ultrases geçiş hızı düşmüştür. Bu grupta ultrases değerleri sırası ile 4412 m/s, 4370 m/s, 4354 m/s, 4289 m/s değerlerine ulaşmıştır. İkili sistemden oluşan KT1 grubunda, KT kullanımı UK1 grubundaki UK kullanımına oranla daha düşük değerlerin elde edilmesine neden olmuştur. Bununla birlikte KT1 grubu kendi içinde ayrıca incelendiğinde KT kullanımı oranı arttıkça da ultrases hızında azalma gözlenmiştir. %30, %40, %50, %60 KT kullanım oranlarına karşın 4016 m/s, 3797 m/s, 3606 m/s ve 3527 m/s değerleri görülmüştür. Üçlü bağlayıcıların kullanıldığı %10 sabit UK'li, 10UK grubunda %30, %40, %50, %60 KT oranlarındaki karışımlar için ulaşılan değerler 4065, 3831, 3736 ve 3523 m/s olmuştur. 20UK, 30UK ve 40UK grupları da ilk üç grupta aynı özellikleri

göstermişlerdir. Hem UK hem de KT ikame oranları arttıkça ultrases hızları sistemli bir düşüş göstermiştir. Şekil 4.32’de Rölatif ultrases geçiş hızı değerlerindeki azalmaların kontrol karışımına göre yüzdelik değişim oranları görülmektedir. Buna göre UK1 grubunda her %10’luk UK miktarının azalmasına karşın karışımlardaki geçiş hızının kontrol numunesine göre değişim oranları %3.7, %2.8, %2.4 ve %0.9 oranlarında artma şeklinde olmuştur. Sonraki gruplarda da çimento yerine mineral katkı ikamesi arttıkça bütün gruplar için ses geçiş hızı düşmüştür. En fazla düşme, %18 ile 20C20UK60KT karışımında, en az düşme ise %4.4 ile 60C40KT karışımında görülmüştür. Yapılan literatür araştırmaları da bu bulguları desteklemektedir. Harçlarda UK kullanımının belli bir dozaja kadar beton ve harçlardaki boşluk miktarını azalttığı [136, 137], kritik oranın üstündeki miktarların ise arttırdığı belirtilmiştir [138]. Yapılan bu çalışmada KT kullanımının, UK’nin tersi bir etkide bulunduğu ortaya çıkmıştır.



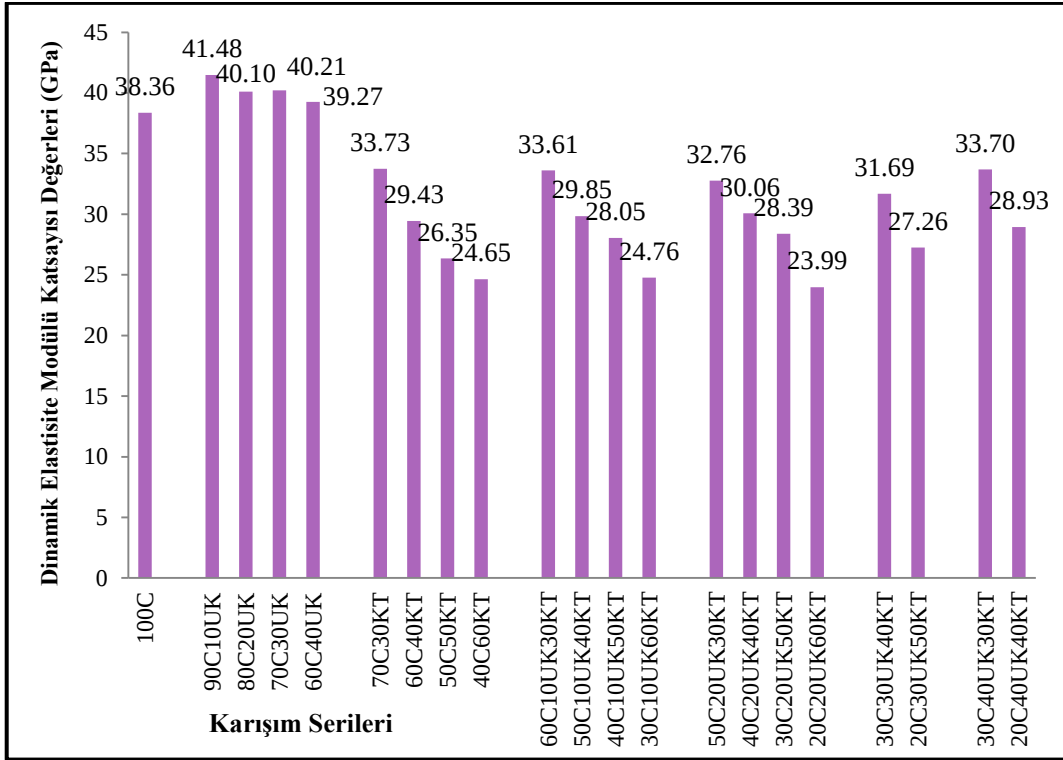
Şekil 4.31. Rölatif ultrases geçiş hızı değerleri



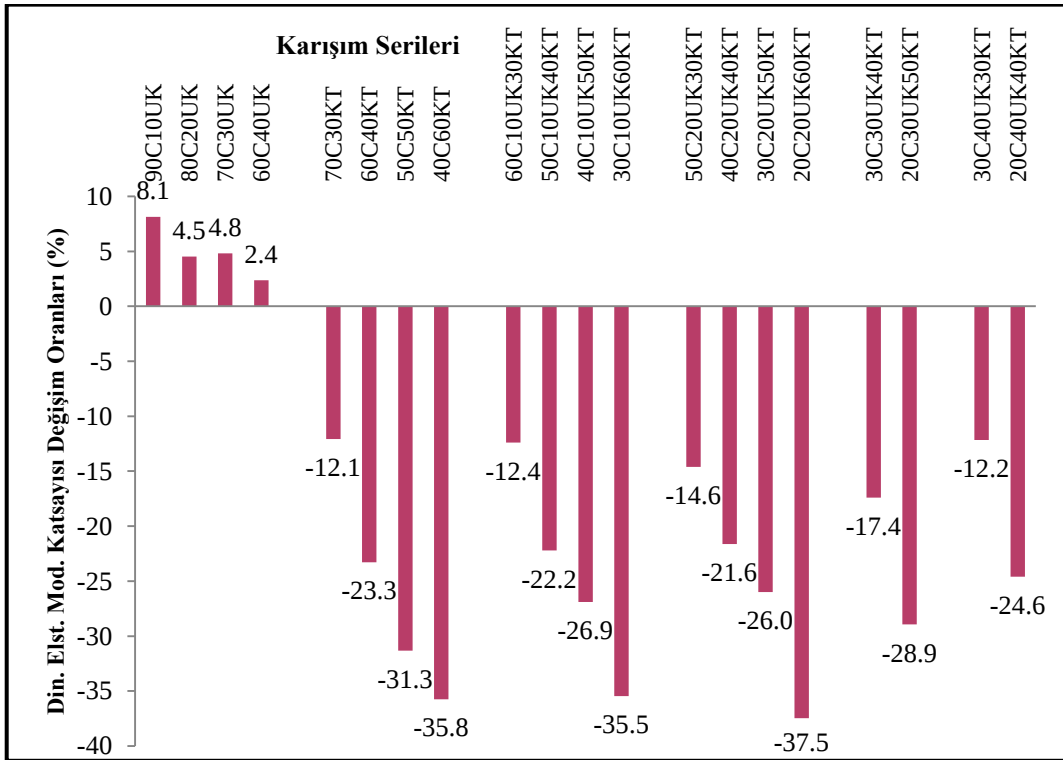
Şekil 4.32. Rölatif ultrases geçiş hızı değerlerinde yüzdelik değişim oranları

4.2.1.4. Dinamik Elastisite Modülü

Dinamik elastisite modülü değerleri Tablo 4.3'te verilmiş, Şekil 4.33'te de grafik, halinde gösterilmiştir. Şekil 4.34'te ise değerler arasında yüzdelik değişim grafikleri çizilmiştir. Tablo ve şekiller incelendiğinde en büyük DEM değerine 90C10UK karışımında 41.48 GPa ile, en düşük DEM değerine ise 20C20UK60KT numunesinde 23.99 GPa ile ulaşıldığı anlaşılmıştır. Şekil 4.33'te UK1 grubunun diğer gruplardan oldukça yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Kontrol numunesinin DEM değeri bu grubun altında kalmıştır. İki bağlayıcılı karışım serilerinden oluşan UK1 grubunda DEM değerlerinin hepsi kontrol numunesinden yüksek olmakla beraber karışımda Ç oranı yerine UK ikamesi arttıkça DEM değeri düşmüştür ve sırası ile 41.48 GPa, 40.10 GPa, 40.21 GPa, 39.21 GPa değerlerine ulaşmıştır. Grafikten de görüldüğü gibi ikili bağlayıcılardan oluşan KT1 grubunda, KT kullanımı UK1 grubundaki UK kullanımına oranla daha düşük değerlerin elde edilmesine neden olmuştur. Bununla birlikte KT1 grubu kendi içinde ayrıca incelendiğinde KT kullanım oranı arttıkça DEM değerlerinde azalma gözlenmiştir. %30, %40, %50, %60 KT kullanım oranlarına karşın 33.73 GPa, 29.43 GPa, 26.35 GPa, 24.65 GPa değerleri ölçülmüştür. Üçlü bağlayıcıların kullanıldığı %10 sabit UK'ye sahip 10UK



Şekil 4.33. Dinamik Elastisite Modülü Değerleri



Şekil 4.34. Dinamik elastisite modülü değerlerinde yüzdelik değişim

grubunda %30, %40, %50, %60 KT oranlarındaki karışımlar için ulaşılan değerler 33.61 GPa, 29.85 GPa, 28.05 GPa, 24.76 GPa olmuştur. 20UK, 30UK ve 40UK grupları da ilk üç grupta aynı eğilimleri göstermişlerdir. Her grubun kendi içinde, hem mineral katkı ikame oranları arttıkça DEM değeri sürekli düşmüştür. Şekil 4.32’de DEM değerlerindeki azalmaların kontrol numunesine göre yüzdelik değişim oranları görülmektedir. Buna göre UK1 grubunda her %10’luk UK miktarının sistematik artmasıyla karışımlardaki DEM kontrol numunesine göre %8.1, %4.5, %4.8, ve %2.4 artmıştır. Sonraki gruplarda çimento yerine mineral katkı ikamesi arttıkça bütün gruplar için DEM değerleri düşmüştür. En fazla azalma oranı %18 azalma ile 20C20UK60KT karışımında, en az oran ise %4.4 ile 60C40KT karışımında görülmüştür. Yapılan literatür araştırmaları bu bulguları desteklemektedir. Araştırmalar harçlarda mineral katkı oranlarının belli bir dozajdan fazla kullanımının DEM değerlerini azalttığını ortaya koymuştur [139].

4.2.2. Dayanıklılık Deney Bulguları

4.2.2.1. Su Emme Özellikleri ve Özgül Ağırlık

Bu bölümde yapılan deneylerin amacı sertleşmiş harcın, toplam su emme, kapiler su emme kapasiteleri ile harcın kuru, yüzey kuru suya doygun, görünür özgül ağırlık, görünür boşluk oranı değerlerinin bulunmasıdır. Çünkü donma-çözülme, nem alma, kimyasal sıvıların geçirimsizliği vb. dayanıklılığı azaltan etkenler sertleşmiş harçlarda istenmeyen durumlardır.

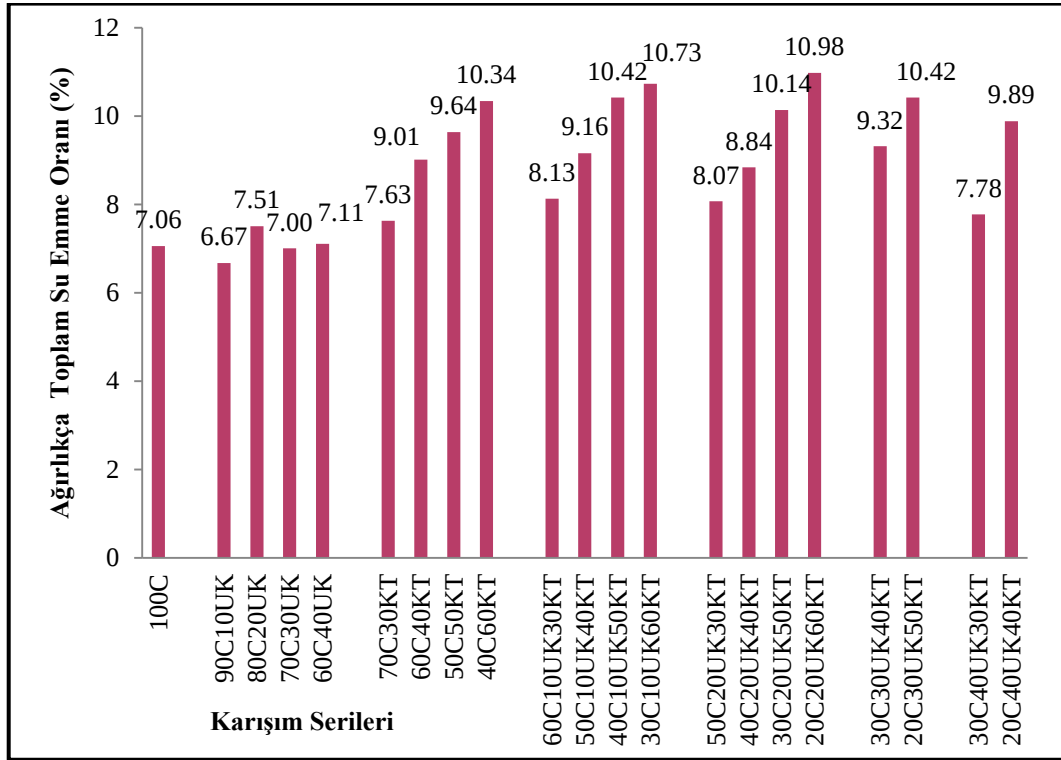
- Ağırlıkça Toplam Su Emme Kapasitesi

Sertleşmiş harcın ağırlıkça toplam su emme kapasitesi harcın bünyesinde en çok ne kadar su depolanabileceğinin öğrenilmesi açısından önemlidir. Şekil 4.35 incelendiğinde kontrol numunesi %7.06 oranında su emmiştir. UK1 grubu numuneleri kontrol numunesiyle yaklaşık aynı değerleri almışlardır. Bununla birlikte karışımda UK miktarı arttıkça az da olsa su emme oranı artmıştır. En düşük su emme oranı %6.67 ile 90C10UK numunesinde, en büyük değer ise %10.98 ile üçlü bağlayıcılardan oluşan 20C20UK60KT

Tablo 4.4. Dayanıklılık deneyleri toplu sonuçları

Deney Adı Seri Adı	Aderans gerilmesi (MPa)	Böhme Ağırlıkça Aşınma (%)	Böhme Boy Kıs. Aşınma (%)	Kapilarite Katsayısı (cm/$\sqrt{s}$) $\times 10^{-3}$	Ağırlıkça Toplam Su Emme Oranı (%)	Kuru Özgöl Ağırlık (kg/dm³)	Doygun Kuru Yüzeyle Özgöl Ağırlık (kg/dm³)	Görünür Özgöl Ağırlık (kg/dm³)	Görünür Boşluk Oranı (%)
100C	7.63	2.82	1.47	1.97	7.06	2.17	2.287	2.455	1.556
90C10UK	7.61	3.08	1.80	2.11	6.67	2.22	2.292	2.396	7.508
80C20UK	7.77	3.68	2.24	2.21	7.51	2.19	2.279	2.406	9.039
70C30UK	6.59	4.28	2.58	2.28	7.00	2.17	2.262	2.389	9.117
60C40UK	6.34	4.36	2.54	2.51	7.11	2.15	2.251	2.393	10.209
70C30KT	6.99	3.55	1.97	2.82	7.63	2.11	2.265	2.501	15.703
60C40KT	5.94	4.77	2.34	4.14	9.01	2.02	2.232	2.561	21.077
50C50KT	5.45	4.93	2.63	4.68	9.64	2.01	2.222	2.559	21.606
40C60KT	5.27	5.34	3.10	4.89	1.34	1.97	2.198	2.561	23.231
60C10UK30KT	7.08	4.29	2.78	2.66	8.13	2.07	2.247	2.519	17.887
50C10UK40KT	6.36	4.56	3.01	3.85	9.16	2.04	2.241	2.548	19.794
40C10UK50KT	5.99	5.23	3.49	4.89	10.42	2.03	2.242	2.581	21.437
30C10UK60KT	5.29	5.50	3.50	6.77	10.73	2.02	2.241	2.590	22.002
50C20UK30KT	7.00	4.31	2.21	3.46	8.07	2.07	2.245	2.503	17.134
40C20UK40KT	6.35	5.40	2.90	4.20	8.84	2.06	2.236	2.499	17.520
30C20UK50KT	5.13	5.58	3.15	5.20	10.14	2.04	2.228	2.517	19.031
20C20UK60KT	4.53	5.72	3.17	7.70	10.98	2.01	2.213	2.531	20.746
30C30UK40KT	6.86	4.07	2.44	4.59	9.32	2.03	2.236	2.550	20.240
20C30UK50KT	5.20	4.91	3.20	5.37	10.42	2.02	2.231	2.557	20.922
30C40UK30KT	6.89	3.97	2.38	3.12	7.78	2.11	2.241	2.435	13.543
20C40UK40KT	5.55	4.83	3.47	5.07	9.89	2.08	2.230	2.443	14.712

numunesinde görülmüştür. 30UK ve 40UK gruplarında toplam mineral bağlayıcı oranı 20C20UK60KT numunesinden fazla olmasına rağmen su emme oranı daha düşüktür. Bu KT'nin, çimento ve UK'den daha fazla su emme kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Her grup kendi içinde incelendiğinde mineral katkı oranı arttıkça toplam su emme kapasitesinin de arttığı belirlenmiştir. Literatürde de UK miktarının artmasıyla su emme kapasitesinde artış olduğu belirtilmiştir [140]. Bu sonucun, harç bünyesindeki suyun buharlaşması sonucu oluşan boşluklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Harçta porozitenin dolayısıyla toplam su emme oranının büyük olmasının nedenlerinden biri de UK ve KT'nin tanecik yüzey alanlarının küçük olmasıdır.



Şekil 4.35. Ağırlıkça toplam su emme oranları

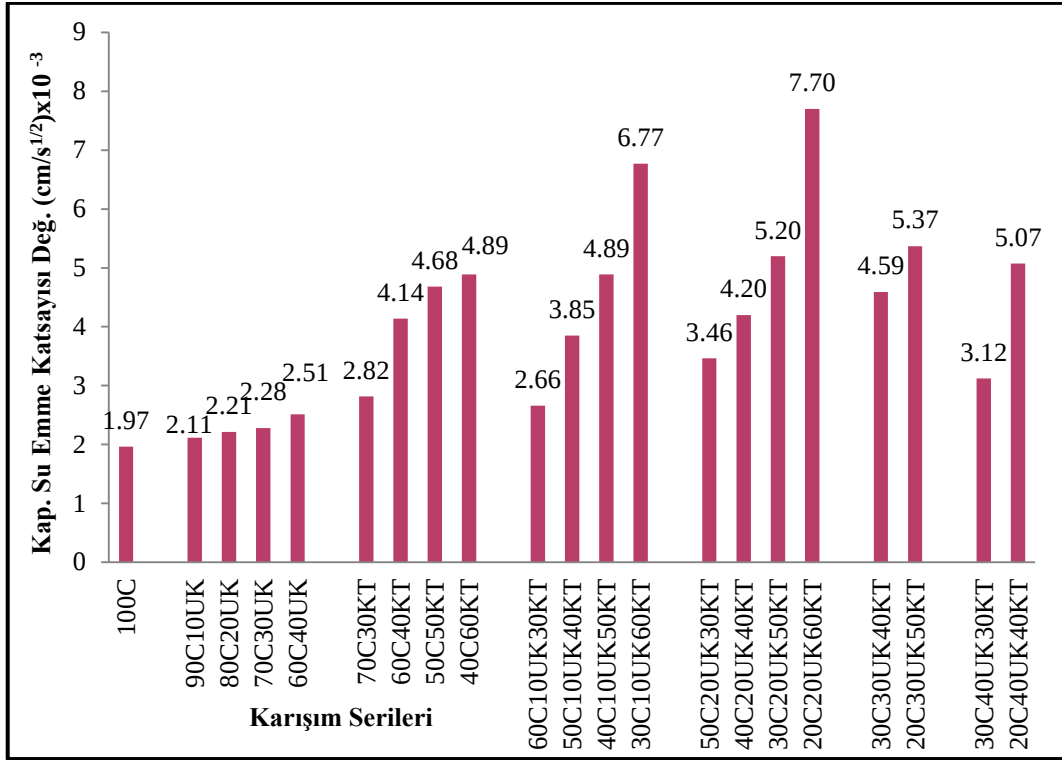
- Kapiler Su Emme Kapasitesi

Kapiler su emme deneyi sonuçları Şekil 4.36'dan incelendiğinde en düşük kapilarite katsayısı değeri $1,97 \times 10^{-3}$ (cm/s^{1/2}) ile kontrol numunesinde, en yüksek değer $7,7 \times 10^{-3}$ (cm/s^{1/2}) ile 20C20UK60KT karışımlı numunede elde edilmiştir. Sonuçlardan anlaşıldığı gibi benzer karışım grupları kendi aralarında mukayese edildiğinde karışımda mineral katkı oranı arttıkça kapiler su emme katsayısı büyüklüğü de artmıştır. %10, %20, %30, %40 UK

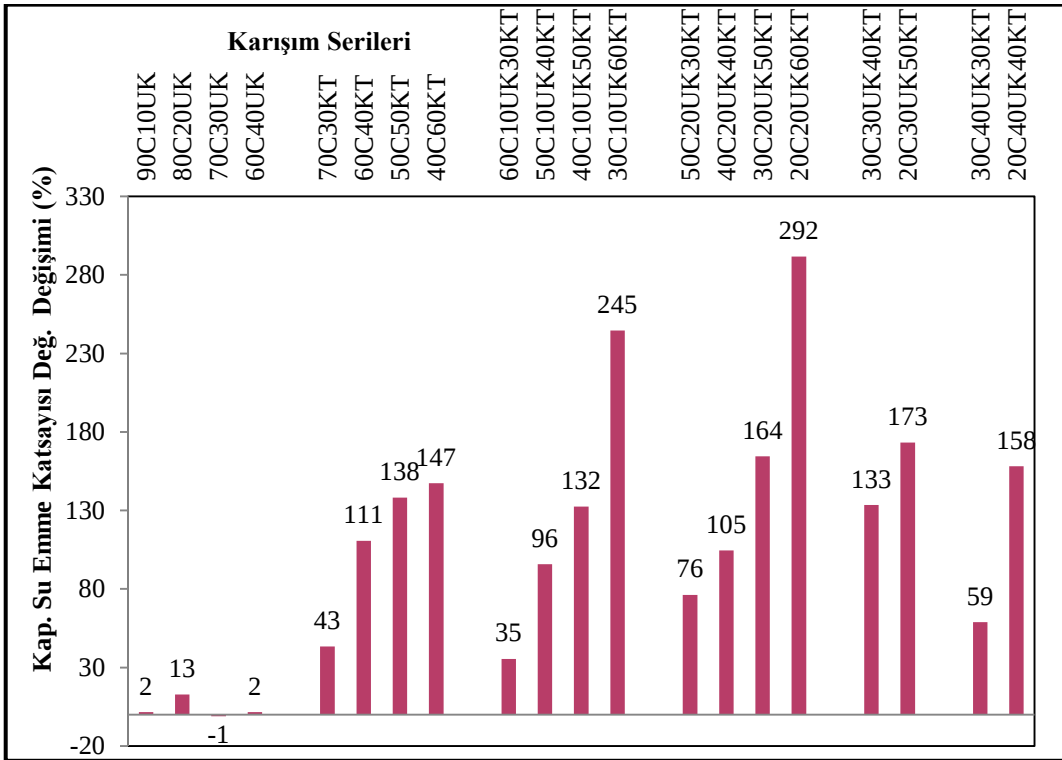
içeren UK1 grubu için ortaya çıkan katsayı değerleri 2.11×10^{-3} , 2.21×10^{-3} , 2.28×10^{-3} , $2.51 \times 10^{-3}(\text{cm/s}^{1/2})$ değerleri olmuştur. Bunların kontrol karışımından farkı oldukça küçüktür. KT1 grubundan görüldüğü gibi KT kullanımı kapilarite değerini UK'ye göre daha fazla arttırmıştır. Bu grupta %30, %40, %50, %60 KT kullanım oranlarına paralel olarak kapilarite katsayıları 2.84×10^{-3} , 4.14×10^{-3} , 4.68×10^{-3} , $4.89 \times 10^{-3}(\text{cm/s}^{1/2})$ değerlerini almıştır. UK1 grubu dışındaki benzer karışım grupları incelendiğinde de KT kullanım miktarının artırılmasının kapilarite katsayısını büyüttüğü görülmüştür.

Çimento hidratasyonu sırasında oluşan C-S-H jellerinin aralarında yer alan su taneleri harç içerisinde yer alan kapiler boşlukları oluşturmaktırlar. Harç içerisinde yer alan bu kapiler boşluklar harç içerisinde suyun ilerlemesi ile de yakından ilgilidir. Bu boşluklar harç içerisinde çok miktarlarda olduğu zaman harç içerisindeki su kolayca yol bulabilmektedir [141]. Şekil 4.37'deki grafikten kapilarite katsayılarının kontrol karışımı ile mukayesesi yapılnca UK1 grubu karışımları %2, %13, -%1 ve %2 gibi çok küçük değerlerdedir. Görüldüğü gibi 70C30UK karışımında negatif değer bile görülmüştür. En büyük değer 20C20UK60KT numunesinde %292 olarak görülmüştür. KT'nin kapilariteyi UK'den daha fazla arttırdığı anlaşılmıştır. Grafikten de görüldüğü gibi her üçü de aynı çimento oranına sahip 60C40UK, 60C40KT ve 60C10UK30KT karışımlarında en büyük kapiler su emme katsayısı %40KT içeren karışımında sonra 60C10UK30KT karışımında en son da 60C40UK ikameli karışımında ortaya çıkmıştır.

Kapiler su emme miktarlarının ölçüldüğü süreler olan (0, 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360 ve 1440) dakikalardaki emilen su miktarlarının kümülatif artış oranları yüzdesi Şekil 4.38-Şekil 4.42 arasındaki grafiklerde gösterilmiştir. Bu grafiklerde sağ tarafta numunelerin sıra ile karışım oranları sol tarafta ise yine sırası ile o karışıma ait regresyon eğrilerinin katsayıları verilmiştir. Kontrol karışımı ve UK1 grubunun gösterildiği Şekil 4.39 incelendiğinde en hızlı su emmenin ilk 30 dakikada olduğu, 200. dakikaya kadar ilk yarım saat kadar olmasa da hızlı bir artışın olduğu görülmüştür. 200-400 dakika arasında azalan bir ivmeyle bir artış olduğu bu dakikadan 1440. dakikaya kadar gittikçe yataya yaklaşan bir su emme grafiği eğrisi gözlemlenmiştir. Mineral katkı arttıkça kapiler su emme hızında artış olmuştur. Kontrol karışımı, 90C10UK ve 80C20UK karışımlarının kapiler su emme hızı birbirine daha yakınken 70C30UK ve 60C40UK karışımlarının hızı birbirine yakın çıkmıştır. Eğrilerin regresyon katsayıları $R=0.95-0.98$ arasında çıkararak kapilarite hızı ile zaman arasındaki bağıntının güçlü olduğu belirlenmiştir.



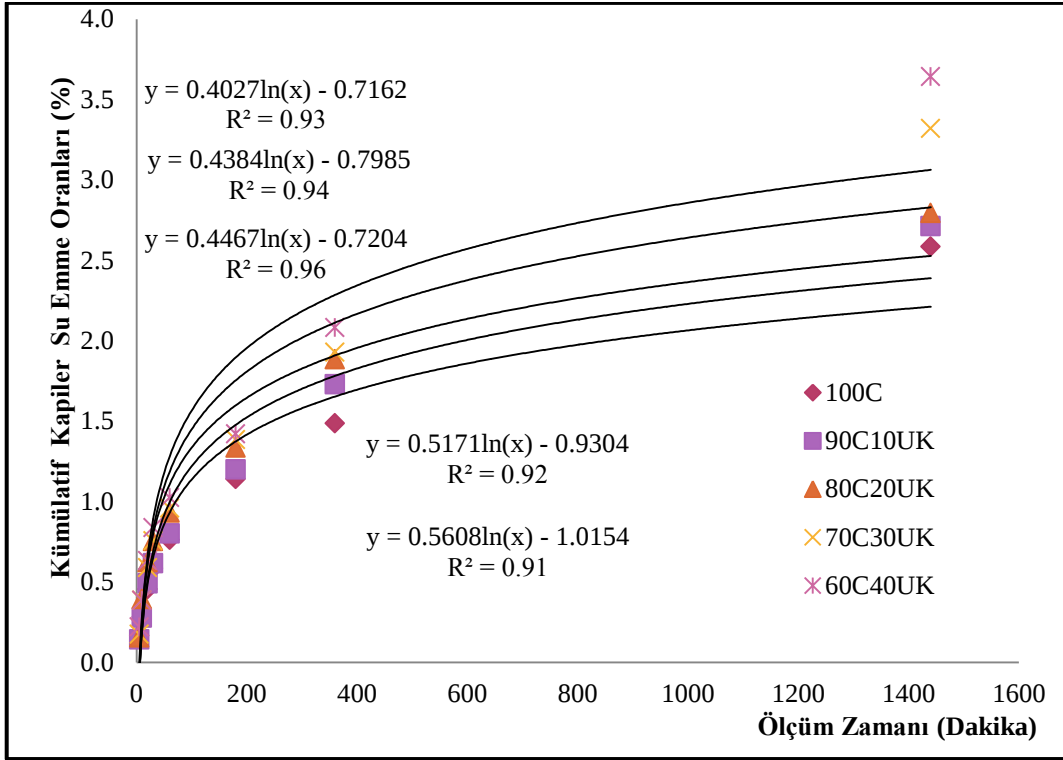
Şekil 4.36. Kapiler su emme katsayısı değerleri



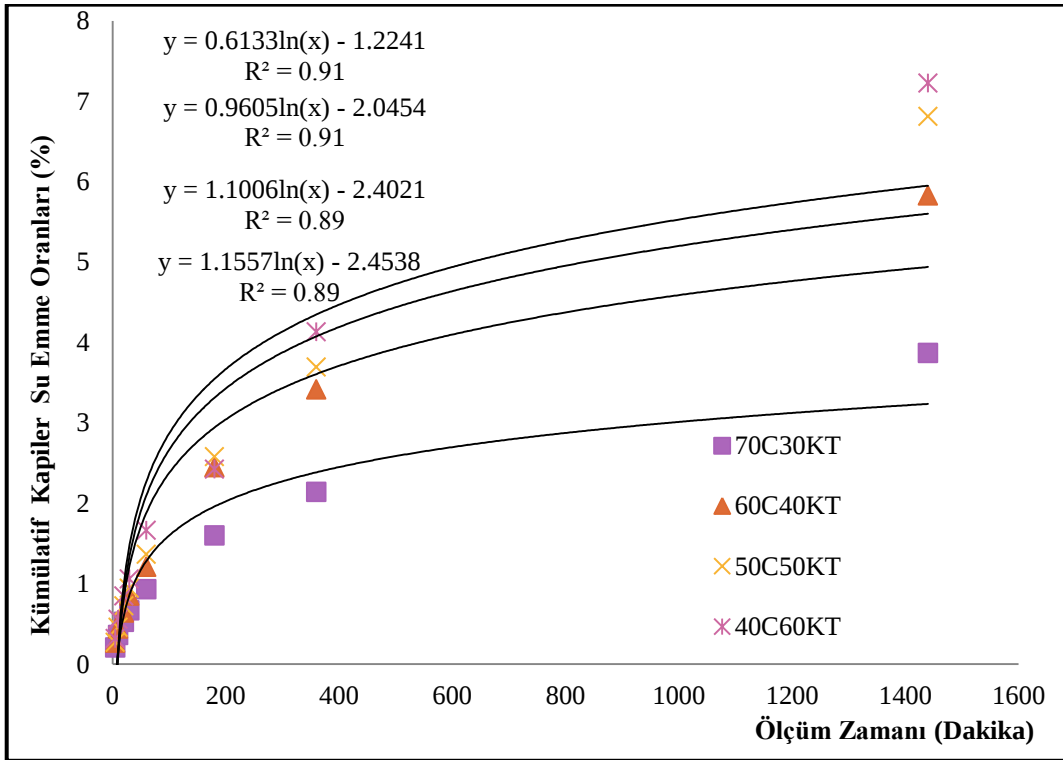
Şekil 4.37. Kapiler su emme katsayısı değerlerinde yüzdelik değişim

KT1 grubu incelendiğinde Şekil 4.40'ta %30 KT içeren karışım diğer üç numuneye göre pozitif yönde ayrılmış su emme hızı en az olan numune olmuştur. 1440. dk. sonunda %30 KT ikameli karışım ile %60 KT içeren karışım arasında 3 kat su emme hız farkı oluşmuştur. Burada da R^2 belirlilik katsayısı değerlerinden alınan regresyon katsayıları yüksek çıkarak $R=0.885$ ile 0.953 arasında değer aldıklarından, su emme miktarı ve hızı ile zaman arasındaki korelasyonun güçlü olduğu görülmüştür.

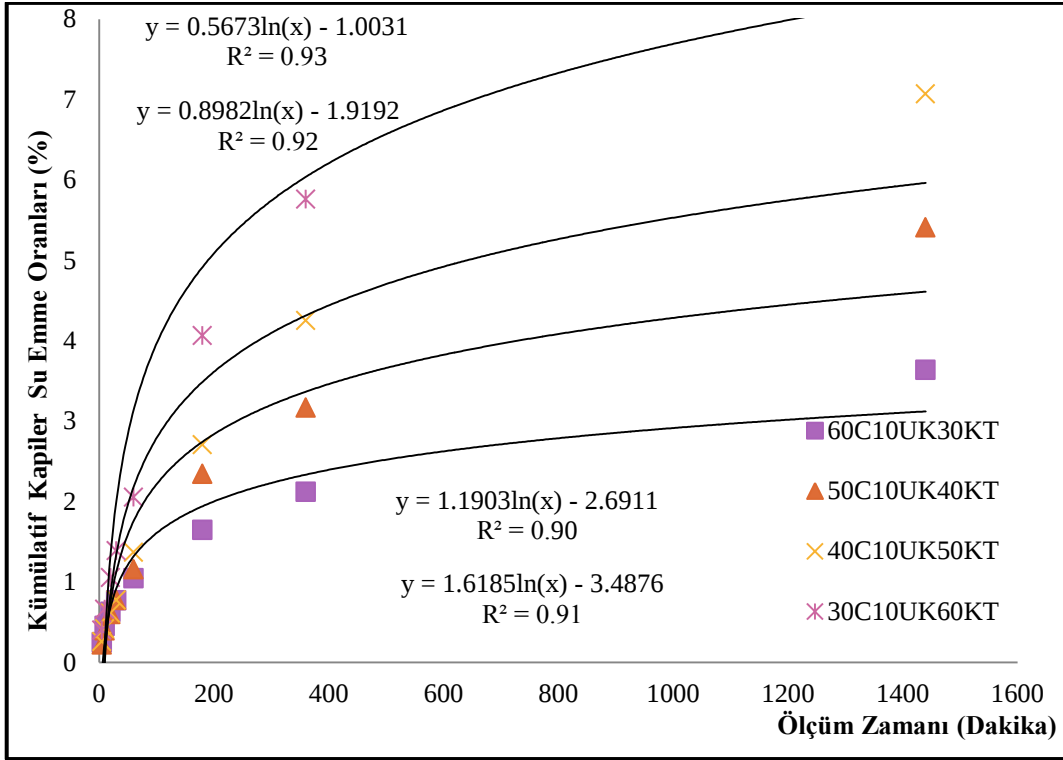
Karışımında UK oranının sabit alındığı KT oranının kendi içinde arttırıldığı üçlü bağlayıcı kullanılan karışım grupları incelendiğinde 10UK grubunda KT oranı %30-%60 arasında her %10'luk artış için ilerleyen zamana göre kapiler su emme miktarında gittikçe artan bir fark oluşmuştur. 1440. dakikaya doğru bu fark artmıştır. R katsayıları 0.947 ile 0.963 arasında değerler alıp, su emme miktarı ve hızı ile zaman arasında güçlü bir korelasyon bulunduğu görülmüştür. Bu KT mineral bağlayıcısının Ç ve UK minerallerinden su emme bakımında daha etkili olduğunu göstermiştir. 20UK grubunda %20 sabit UK kullanımına karşın %30, %40, %50, %60 oranlarında KT kullanılmıştır. İlk üç karışımında sistemli bir artış görülmüşken %60 KT karışımı diğerlerinden ayrılmış, daha fazla artmıştır. R regresyon katsayıları 10UK grubunda 0.948 ile 0.963 arasında, 20UK grubunda 0.930 - 0.981 arasında çıkmıştır. Her iki grupta da regresyon katsayıları oldukça yüksek değerlerdedir. 30UK ve 40UK grupları incelendiğinde aynı eğilimler burada da görülmüştür. $R=0.933$ ile 0.962 arası değerler çıkmıştır. Bu güçlü bir ilişkinin mevcut olduğunu göstermiştir. Kireçtaşı tozunun en çok su emme özelliği olan bağlayıcı mineral olduğu anlaşılmıştır.



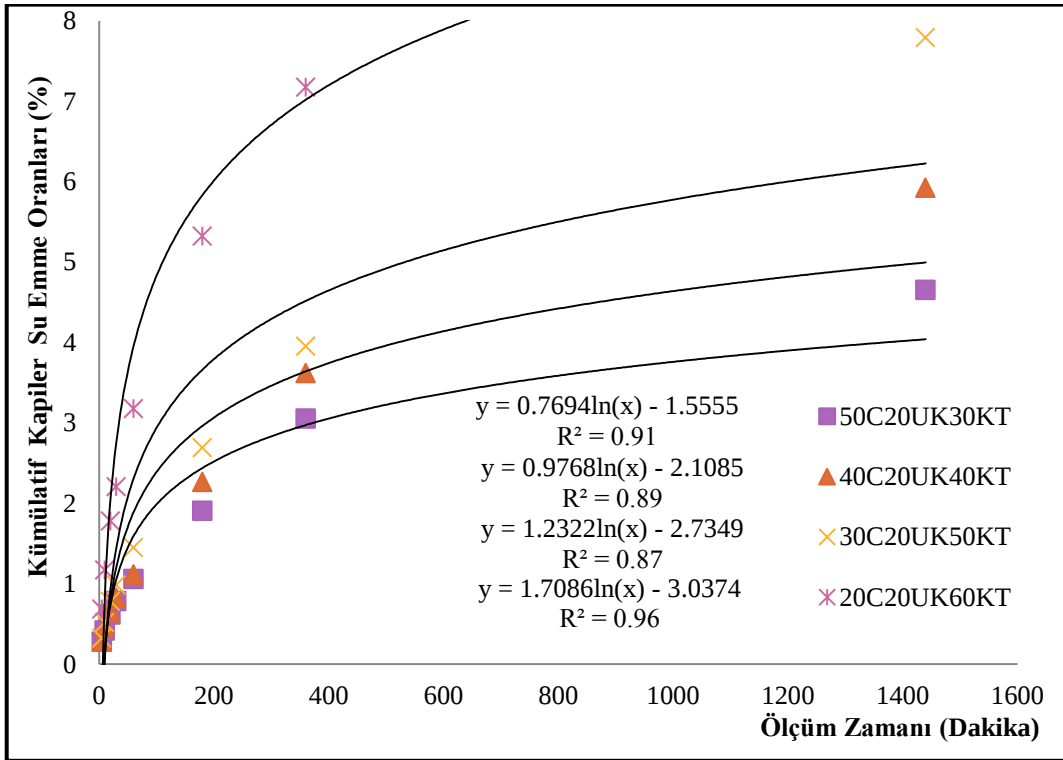
Şekil 4.38. UK1 grubunda kapiler su emme oranlarının kümülatif artışı



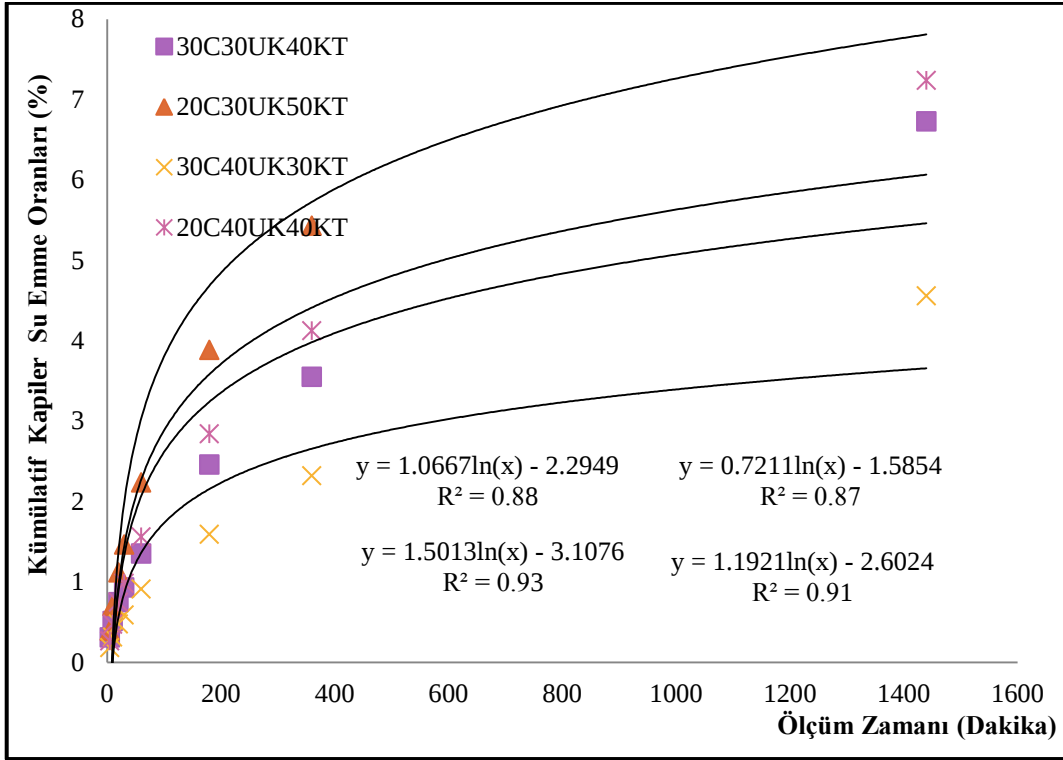
Şekil 4.39. KT1 grubunda kapiler su emme oranlarının kümülatif artışı



Şekil 4.40. 10UK grubunda kapiler su emme oranlarının kümülatif artışı



Şekil 4.41. 20UK grubunda kapiler su emme yüzdelik oranlarının kümülatif artışı



Şekil 4.42. 30UK ve 40UK gruplarında kapiler su emme oranlarının kümülatif artışı

- Sertleşmiş Harcın Özgül Ağırlığı

Sertleşmiş harca ait özgül ağırlıkları bulmak için üretilen kontrol ve %10 ile %40 arasında değişen UK ile %30 ile %70 arasında değişen KT oranlara sahip mineral katkıları içeren üçer adet, 10x10x10 cm boyutlarındaki küp numuneler kür tankında 28 gün bekletilmiştir. Su emme deneyleri ile birlikte, suya doymun halde yüzeyi kurutularak, etüvde bekletildikten sonra ve su içinde tartılarak ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerden yararlanarak özgül ağırlıklar bulunmuştur.

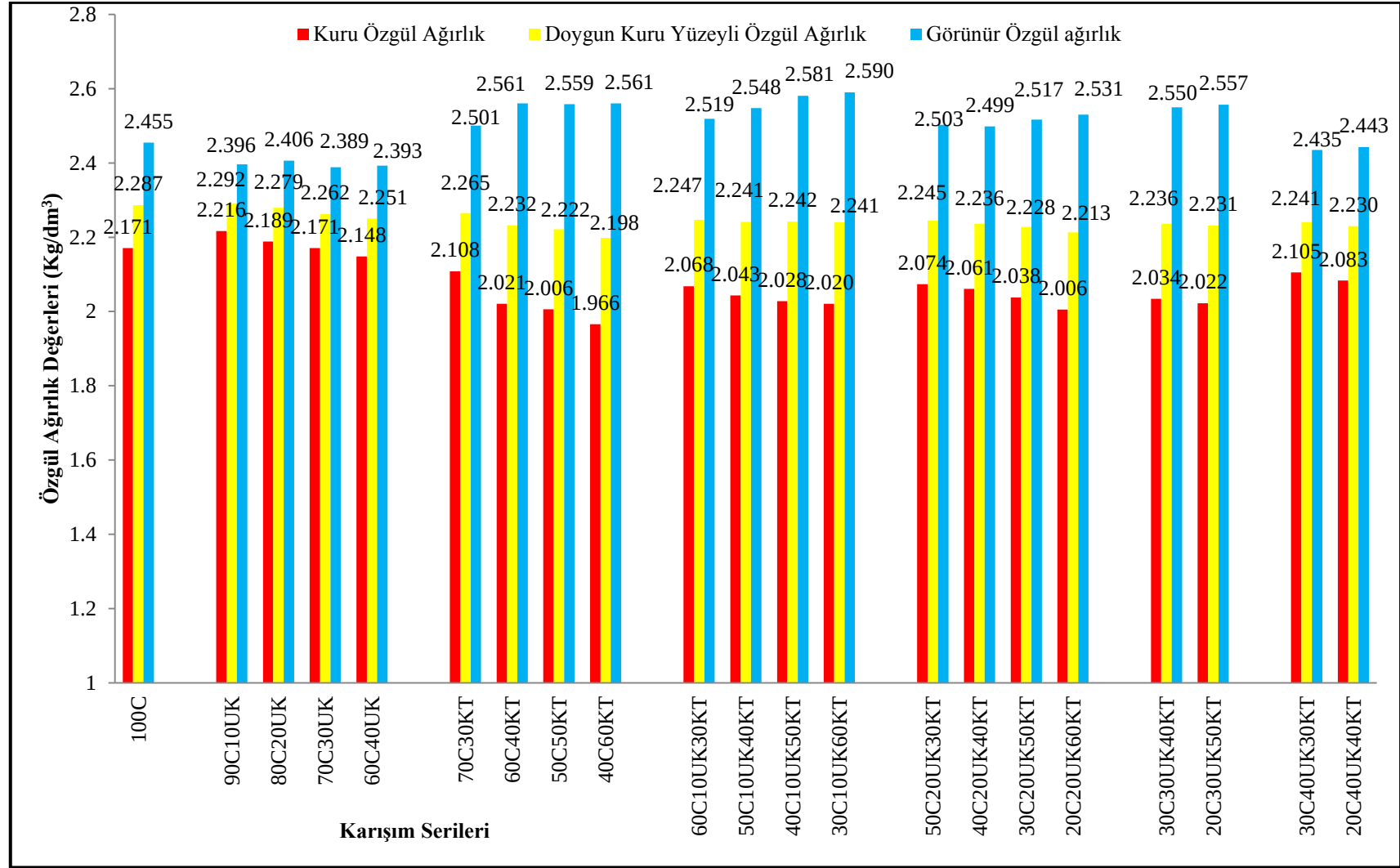
Özgül ağırlık deneyleri esas olarak harç karışımları hesabında önemlidir. Yüksek özgül ağırlığa sahip sertleşmiş harçlar, genellikle dayanıklılık bakımından etkilidir. Şekil 4.43 incelendiğinde Kuru Özgül Ağırlık (KOA), Yüzey Kuru Suyu Doymun Özgül Ağırlık (YKSDOA) ve Görünür Özgül Ağırlık (GOA) değerleri arasındaki karşılaştırmalar yapılabilir. Buna göre ikili sistemden oluşan UK1 grubunda KOA değerleri kontrol numunesine yakın değerlerde çıkmış karışımda UK oranı arttırıldıkça çok hafif bir azalma göstermiştir. Bu grupta en büyük KOA değeri 90C10UK karışımı numunede 2.216 kg/dm^3 en düşük değer ise 60C40UK karışımında 2.418 kg/dm^3 olmuştur. Kontrol numunesine göre yüzdelik değişim oranlarına bakınca 90C10UK karışımı %2.1, 80C20UK karışımı

%0.8 oranlarında artarken, 70C30UK karışımı %0.001 ve 60C40UK karışımı %1.04 oranlarında azalmıştır. Bu grup incelenmesi sonucu UK kullanımının KOA özelliklerini fazla etkilemediği görülmüştür. KT1 grubu incelendiğinde en büyük KOA değeri 2.108 kg/dm³ ile 70C30KT karışımında, en küçük değer ise 1.966 kg/dm³ ile 40C60KT karışımında görülmüştür. Yüzdelik farklar bakımından inceleme yapıldığında KT oranı arttıkça değerlerdeki azalma farkı da artmıştır. 40C60KT karışımında azalma %9.5 oranına ulaşmıştır. Üçlü sistemde de aynı eğilim devam etmiştir. Özellikle KT oranı arttıkça KOA değeri düşmüştür. Bütün değerler içinde en büyük KOA değeri 90C10UK karışımında en düşük değeri de 40C60KT karışımında görülmüştür.

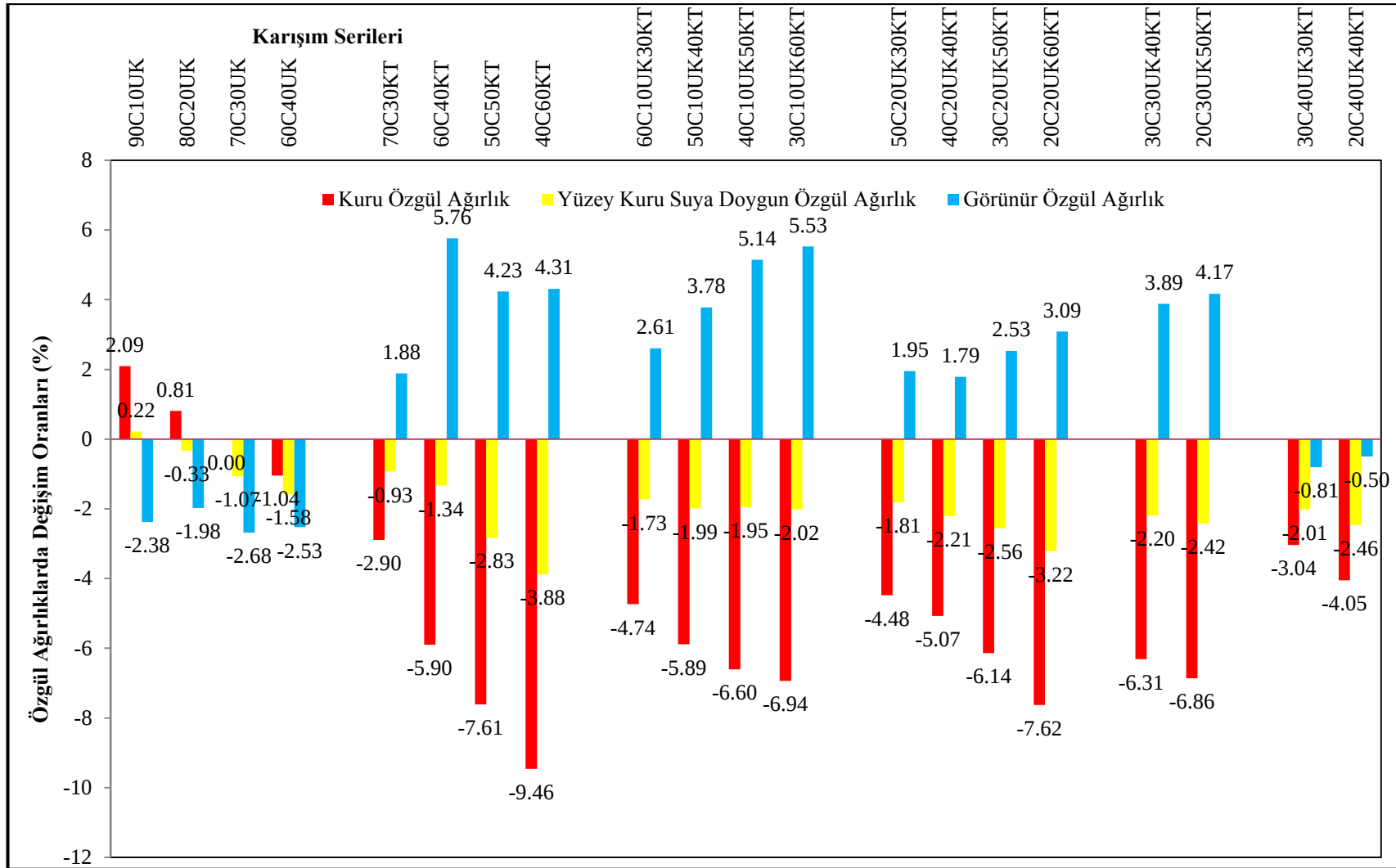
Aynı karışım numunelerinde YKSDOA değerleri KOA değerlerinden büyük değerler almışlardır. Genel olarak benzer eğilim görülmüştür. Değerler hem UK hem de KT oranı arttıkça paralel azalma davranışı göstermişlerdir. En büyük YKSDOA değeri 90C10 UK karışımında 2.292 kg/dm³ en düşük değeri ise KOA değerlerinde olduğu gibi 40C60KT karışımında 2.198 kg/dm³ olarak ölçülmüştür. Şekil 4.43 ve Şekil 4.44'te görüldüğü gibi KT1 grubu hariç diğer bütün gruplarda ardışık değerler arasındaki fark küçüktür. Hem de bütün değerler arasında fazla bir fark yoktur.

GOA'da ise KOA ve UK1 grubu hariç YKSDOA'nın tam tersi davranışlar görülmüştür. Şekil 4.44'te bu çok bariz bir şekilde görülebilmektedir. En büyük GOA değeri 2.590 kg/dm³ ile 30C10UK60KT karışımında en küçük değeri ise 2.393 kg/dm³ ile 60C40UK karışımında ortaya çıkmıştır.

Tablo 4.4'te değerleri verilen ve Şekil 4.45'te grafik halinde gösterilen görünür Boşluk Oranı (GBO) incelendiğinde en büyük GBO değerine 40C60UK karışımında %23.2 olarak en düşük GBO değerine ise 90C10UK numunesinde %7.5 değeri ile ulaşılmıştır. Şekil 4.45'te UK1 grubunun diğer gruplardan daha düşük değerlere ulaştığı belirlenmiştir. UK1 grubunun GBO değerleri kontrol numunesinden daha büyük ölçülmüştür. İki sistem karışım serilerinden oluşan UK1 grubunda GBO değerlerinin hepsi kontrol numunesinden düşük olmakla beraber karışımda Ç oranı yerine UK ikamesi arttıkça GBO değerleri artmış fakat yine de en büyük değeri bile kontrol numunesine kavuşmamıştır. UK1 grubu GBO değerleri sırası ile %7.5, %9.0, %9.1, ve %10.2 olarak ölçülmüştür. Grafikten de görüldüğü gibi ikili sistemden oluşan KT1 grubunda, KT kullanımı arttıkça GBO değerlerinin en çok arttığı grup olmuştur. Bu grupta %30-40-50-60 KT kullanım oranlarına karşın %15.7, %21.1, %21.6, ve %23.2 değerleri görülmüştür.

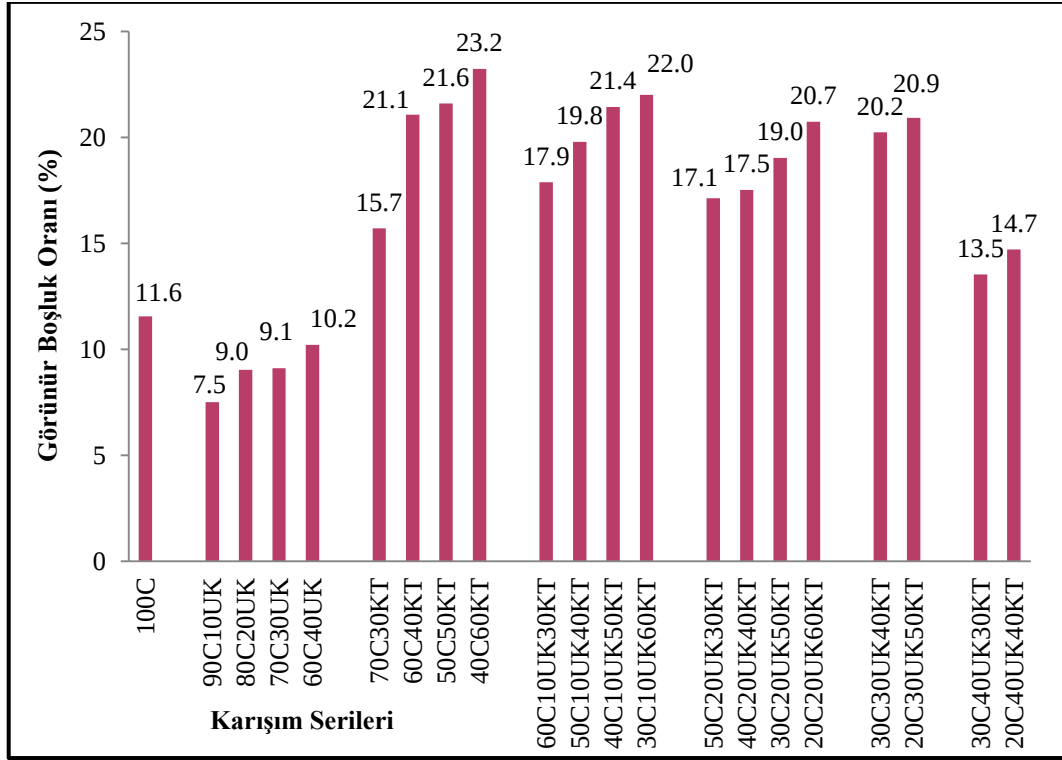


Şekil 4.43. Harçların özgül ağırlık değerlerine mineral katkı etkisi

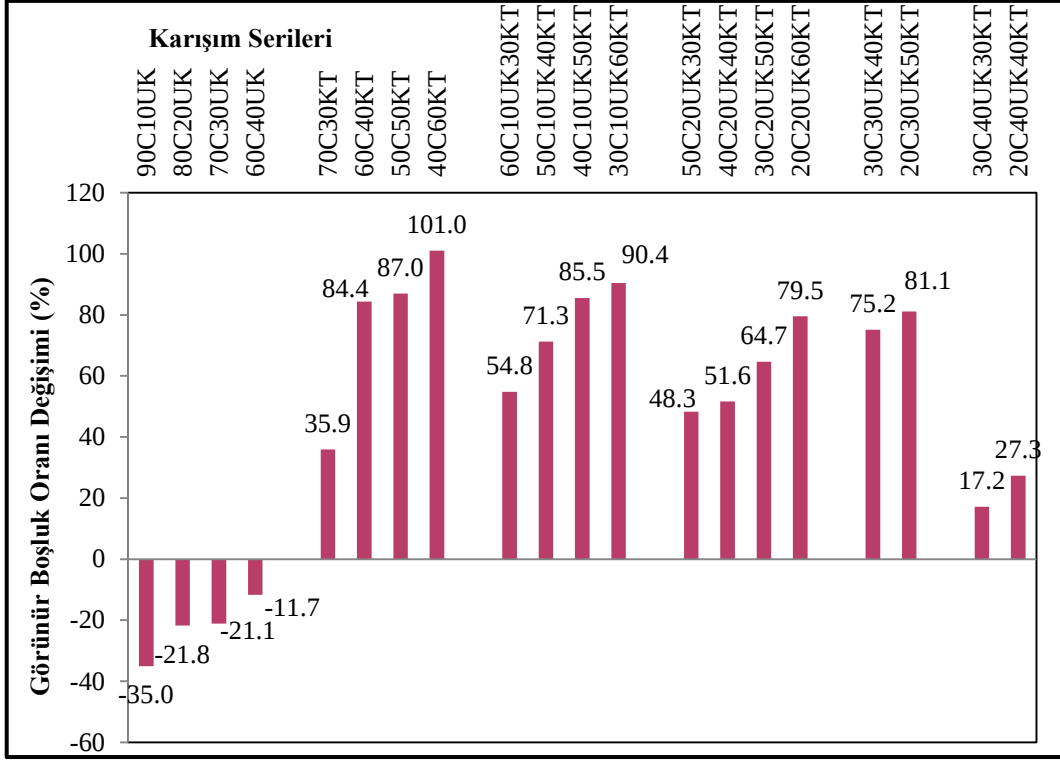


Şekil 4.44. Harçların özgül ağırlık değerlerinde yüzdelik değişim

Üçlü sistemin kullanıldığı %10 sabit UK'li 10UK grubunda %30, %40, %50, %60 KT oranlarındaki karışımlar için ulaşılan değerler %17.9, %19.8, %21.4, ve %22.0 olmuştur. Diğer üçlü sistem gruplarında da ilk üç grupta aynı eğilimler görülmüştür. KT1 grubu ile UK1 grubu arasında değerler almışlardır. Şekil 4.45'te GBO değerlerindeki değişimlerin kontrol numunesine göre yüzdelik değişim oranları görülmektedir. Buna göre UK1 grubunda her %10'luk UK miktarının artmasıyla karışımlardaki GBO kontrol numunesine göre %35.0, %21.8, %21.1 ve %11.7 azalmıştır. Sonraki gruplarda çimento yerine mineral katkı ikamesi arttıkça bütün gruplar için GBO değerleri artmıştır. En fazla artma oranı %101 artma ile 40C60KT karışımında, en az oran ise %17.2 ile 30C40UK40KT karışımında görülmüştür (Şekil 4.46).



Şekil 4.45. Harçta görünür boşluk oranları



Şekil 4.46. Harçta görünür boşluk oranlarında yüzdelik değişim

4.2.2.2. Aderans Deneyi

Sertleşmiş harçta pull out (çekip çıkarma) metoduyla harç-donatı arasındaki aderansı ölçmek için üretilen değişik oranlarda ikili ve üçlü sistem kullanılan üçer adet, 15x15x15 cm boyutlarında küp numuneler kür tankında 28 gün bekletildikten sonra, aderans deneyine tabi tutulmuşlardır. Sertleşmiş harcın aderans ölçüm sonuçlarını belirlemek amacıyla yapılan bu kısımda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

Şekil 4.47’de görüldüğü gibi en büyük aderans gerilmesi değerine 80C20UK karışımında 7.77 MPa değeri ile en küçük değere ise 20C20UK60KT karışımında 4.53 MPa ile ulaşılmıştır. Kontrol numunesi 7.63 MPa değeri ile elde edilen en yüksek ikinci değer olmuştur. UK1 grubunda %20 den fazla UK kullanımı kontrol karışımına göre aderans gerilmesinde %14 azalmaya neden olmuştur (Şekil 4.48). UK oranı arttıkça değer daha da düşmüştür. KT1 grubunda %30’dan fazla KT kullanımı gerilmelerde bir anda fark oluşturmıştır. Bu eğilim üçlü sistemden oluşan karışım gruplarında da devam etmiştir. Her benzer yapıdaki grupta, mineral katkı oranı arttıkça gerilme değeri azalmıştır. Basınç ve eğilme-çekme gerilmeleri ile aderans gerilmeleri arasında güçlü bir korelasyon olduğu

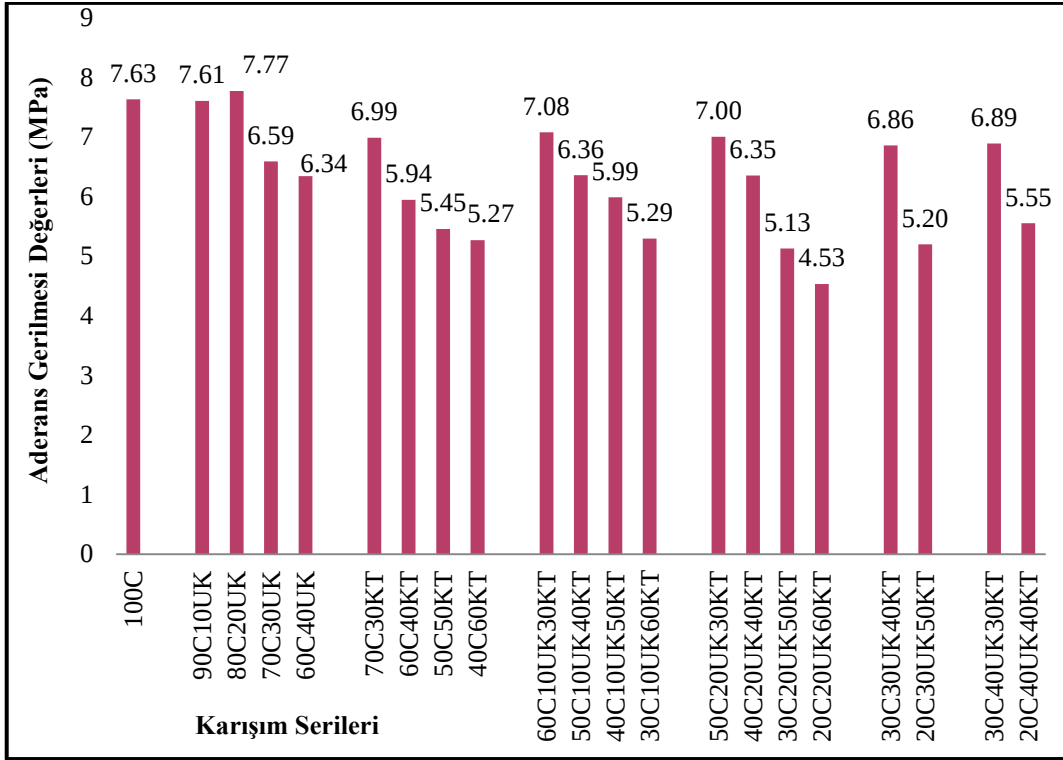
görülmüştür. Bununla birlikte gerilme dağılımları arasında basınç ve eğilmedeki gibi çok büyük farklar oluşmamıştır.

Çimento miktarının %30'un altına düştüğü karışımlarda gerilme değerleri dikkate değer düşmeler göstermiştir. Bu durum 30C20UK50KT, 20C20UK60KT, 20C30UK50KT ve, 20C40UK40KT karışımlarında görülebilmektedir. 20C20UK60KT karışımında fark %40.6'ya ulaşmıştır. Özellikle 30UK ve 40UK gruplarında %10'luk mineral katkı artışı, gerilme değerini bir önceki karışımdan %20 civarında daha düşük olmasına neden olmuştur.

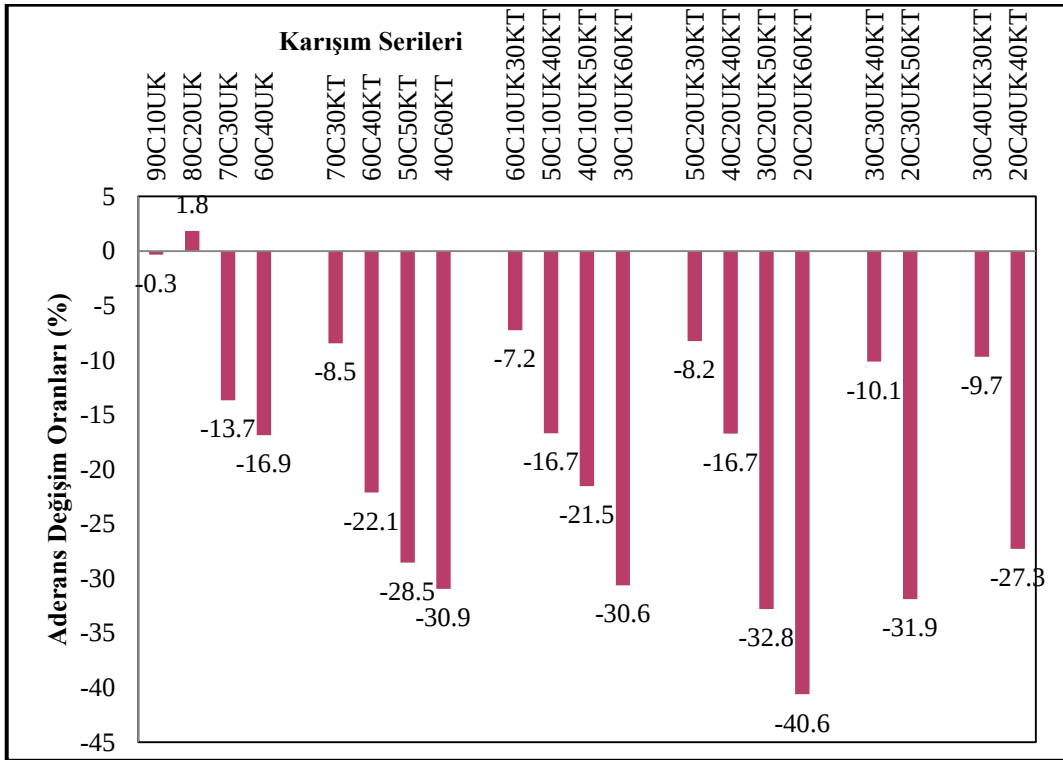
Yapılan deneylerin tamamında donatının harçtan sıyrılarak ayrıldığı görülmüştür. Bunun nedeni aderans boyunun kısa tutulmasıdır. Yeterli aderans boyuna sahip olmayan ve enine donatı ile desteklenmeyen numunelerde donatıda kopma gerçekleşmemektedir. Klasik harçların ve betonların daha fazla oranda su kullanılarak akıcılığı arttığına, w/c de arttığı için terlemeye eğilimleri de artmaktadır. Bu oranı azaltmak için kullanılan süperakışkanlaştırıcı, su-çimento oranında azalmaya neden olmuş, akıcılığı ve viskoziteyi arttırmıştır. Böylece terleme riskini de azaltmıştır [142-144].

Harç-donatı birlikteliği, harç ve donatı arasında güçlü bir aderansı temel alır. Sıyrılmayı önlemek için harç yeterli bir aderans gerilmesine sahip olmalıdır. Aderans etkinliği donatıların pozisyonuna ve dökülen harç kalitesine bağlıdır. Harç ve donatı arasındaki aderans gerilmelerini uygun bir şekilde aktarmak için yeterli paspayı gereklidir.

Yapılan deneylerde aderans değerlerinin yüksek çıkması için özellikle doğru akışkanlaştırıcı ve doğru dozaj ile uygun miktarda mineral katkı gerektiği görülmektedir. Bu çalışmada %20 UK ve %40 KT kullanılması ile yüksek değerler elde edilmiştir. Bu oranların üzerindeki değerlerin de tatmin edici sonuçlar vermelerine karşın belirtilen dozajların kullanımıyla aralarındaki fark birden değişmiştir.



Şekil 4.47. Harç donatı aderansı dayanım değerleri



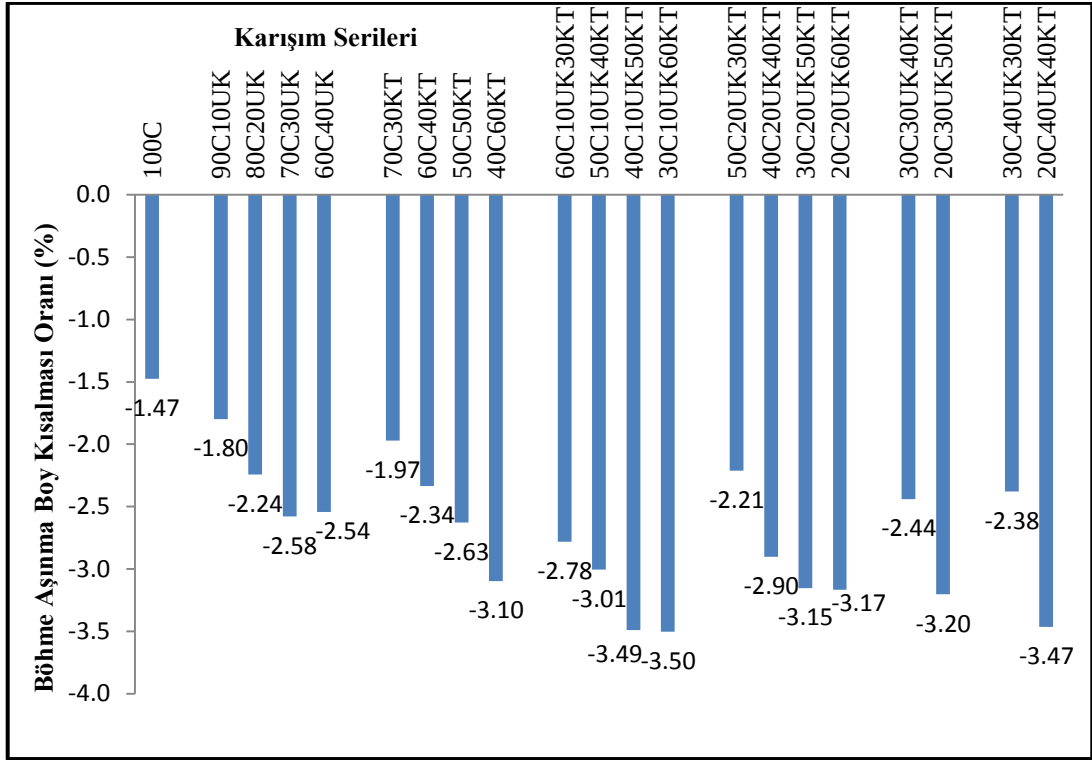
Şekil 4.48. Harç donatı aderansı değerlerinde yüzdelik değişim

4.2.2.3. Aşınma Deneyi

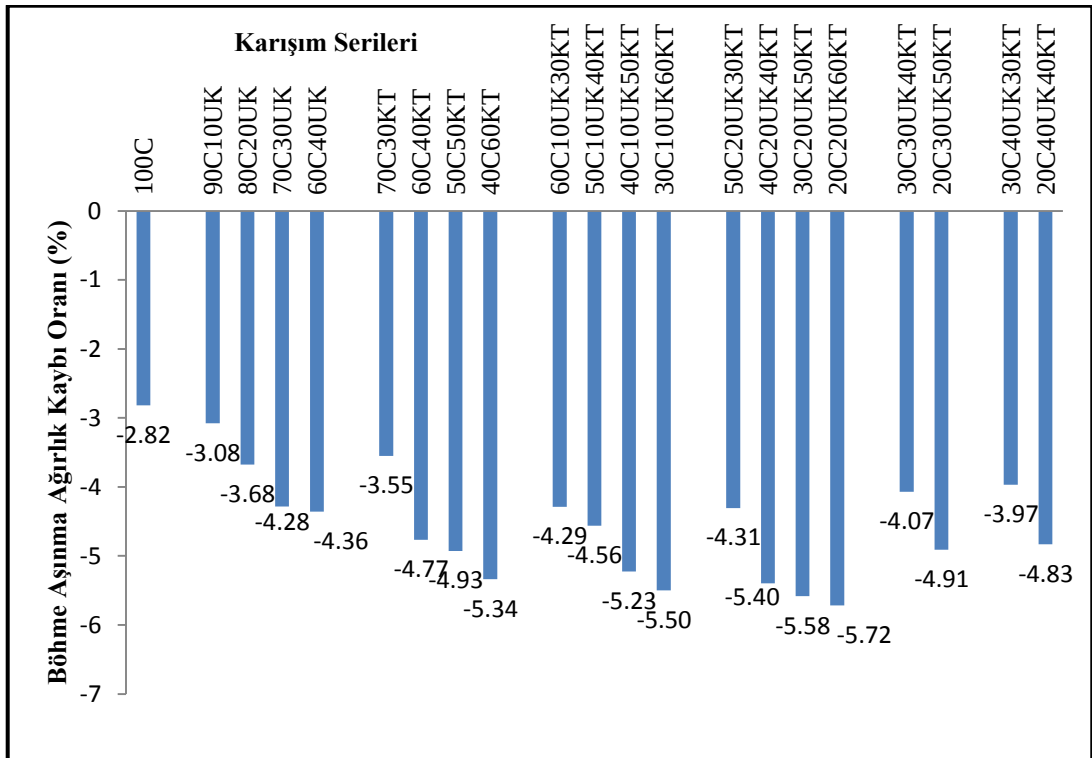
Böhme aşınma metoduyla yüzey aşınması için üretilen kontrol ve %10-40 arasında değişen UK ile %30-%70 arasında değişen KT oranlarına sahip mineral katkıları içeren üçer adet, 71 ± 1.5 mm ebatlarındaki küp numuneler kür tankında 28 gün bekletildikten sonra, yüzey aşınma deneyine tabi tutulmuşlardır. Deneylerde hem ağırlıkça hem de boy kısalması olarak incelemeler yapılmış ve aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

Böhme aşınma deneyinin sonuçları Tablo 4.4'te verilmiş, Şekil 4.49'da boy kısalması, Şekil 4.50'de de ağırlık kaybı olarak gösterilmiştir. Deney sonuçlarından da görüldüğü gibi boy kısalmasında ve ağırlıkça azalmada orantılı değerler görülmüştür. Hem boy kısalmasında hem de ağırlık kaybında en düşük değer kontrol karışımında görülmüştür. Kontrol numunesi için boy kısalmasında %1.47, ağırlık kaybında %2.82 değerleri alınmıştır. En büyük kayıplar; boy kısalmasında %3.5 ile 30C10UK60KT karışımında, ağırlıkça kayıpta %5.72 ile 20C20UK60KT karışımında gerçekleşmiştir. UK1 grubu incelendiğinde mineral katkı kademeli şekilde arttıkça kayıplar da azalmış ve %20'den fazla UK kullanılınca her iki ölçüm türünde de ağırlık kayıpları ani artmıştır. KT1 grubunda da mineral katkı miktarı arttıkça kayıplar artmıştır. Bu gruptaki ani artış ise ilk karışım olan 70C30KT'den sonra meydana gelmiştir. Üçlü sistemin kullanıldığı gruplardaki boy kısalması ölçümlerinde; 10UK grubu en fazla kısalmalara uğrarken ağırlıkça en büyük kayıp 20UK grubunda görülmüştür. 20UK, 30UK ve 40 UK gruplarında boy kısalması oranları/ağırlık kaybı oranları; 0.51 ile 0.71 arasında değişmiştir. Kontrol karışımı dahil olmak üzere mineral katkıların düşük dozajlı olduğu karışımlarda boy kısalmaları daha az iken yüksek mineral katkı miktarlarının kullanıldığı dozajlarda boy kısalması oranları daha büyük değerler almıştır. KT kullanılan karışımlardaki kayıplar, UK kullanılan karışımların kayıbından fazla olmuştur.

Yapılan literatür çalışmaları sonucu beton ve harçlarda; UK, KT kullanımının beton yol kaplama yüzeylerinin aşınma direncine önemli faydalar sağladığı ve basınç dayanımında da bir olumsuzluk oluşmadığı [145], bazı çalışmalarda yüzey aşınmasına bakıldığında mekanik aşınmanın önemli olduğu yerlerde pomza veya yüksek fırın cürufu katkıları yerine kalker taşının kullanılmasının daha uygun olduğu ortaya çıkmıştır [146]. Kendiliğinden yerleşen betonda süperakışkanlaştırıcı katkının yardımıyla uçucu külün sistemde daha homojen karışması pozolanik etkinliğini arttırdığı ve aşınmaya karşı etkili olduğu belirtilmiştir [147].



Şekil 4.49. Böhme aşınma deneyinde ortalama boy kısalması oranları

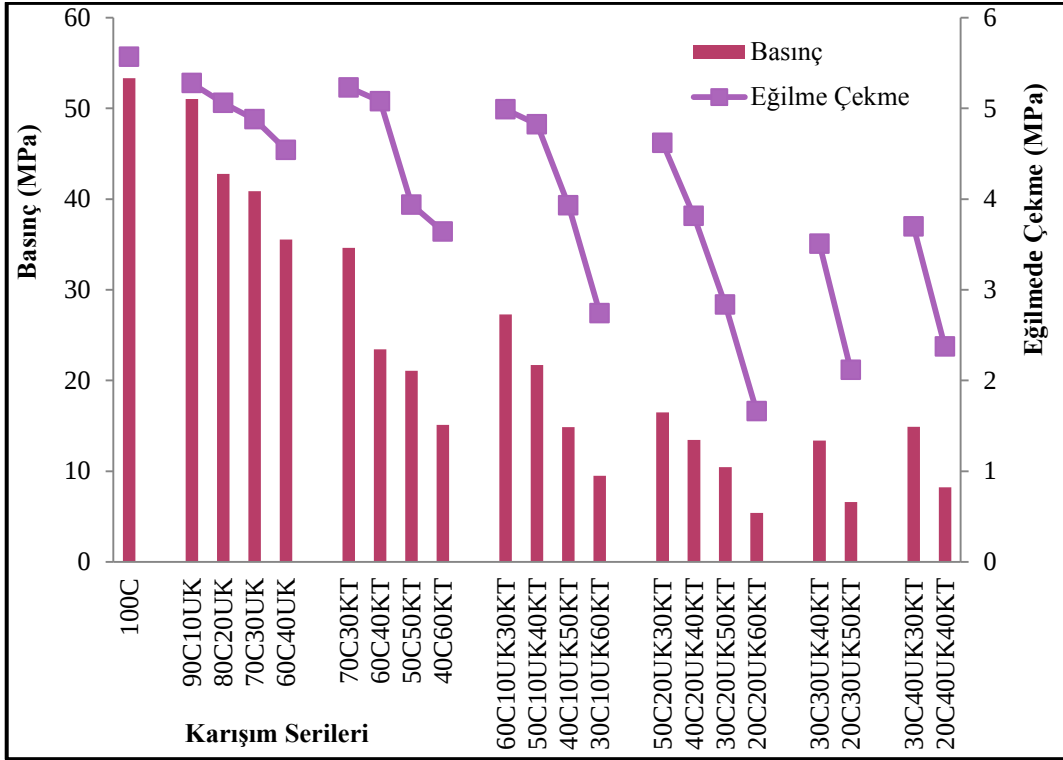


Şekil 4.50. Böhme aşınma deneyinde ağırlık kaybı oranları

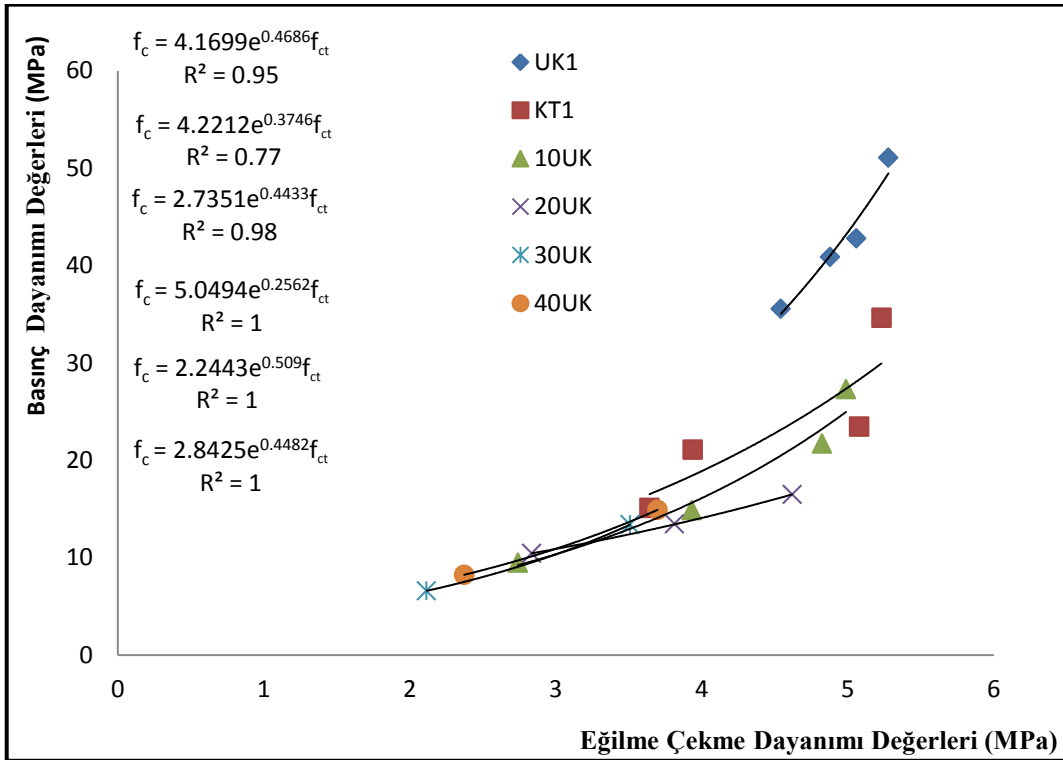
4.3. Harçta Dayanım-Dayanıklılık Korelasyonları ve Regresyon Analizleri

4.3.1. Basınç Dayanımı - Eğilmede Çekme Dayanımı

Sertleşmiş harcın, basınç ve eğilmede-çekme dayanımları arasında güçlü bir korelasyon olduğu incelenen literatür çalışmalarında belirtilmiştir. Şekil 4.51'deki grafik incelendiğinde, bu çalışmada da literatür çalışmalarındakilere paralel sonuçlar görülmüştür. Bağlayıcı malzeme olarak sadece çimento kullanıldığında eğilme/basınç gerilmesi oranının yaklaşık %10 olduğu kabul gören bir kanıdır. Kontrol karışımında bu değer elde edilmiştir. Bağlayıcı olarak UK ve KT gibi mineral katkıların ikame oranı arttıkça basınç dayanımı değerleri eğilme dayanımı değerlerine göre çok daha hızlı düştüğü için eğilme/basınç oranları büyük değerler almıştır. Bu durum özellikle KT'li karışımlarda ve 7 günlük dayanımlar incelendiğinde Şekil 4.51 ve Şekil 4.52'de görülmüştür. Bunun nedeni UK kullanımının erken yaşta puzolanik etkisinin az olmasıdır. UK1 grubu karışımlarının kontrol karışımına göre dayanımı daha düşüktür. Bununla birlikte bu gruptaki karışımlar diğer ikili sistem grubu olan KT1 grubu karışımlarından ve üçlü sistem karışımlardan daha büyük eğilme ve basınç dayanımı değerlerine sahip olmuştur. UK1 grubunda mineral katkı kullanımı arttıkça basınç ve eğilmede çekme değerleri bu artışın tersine değer kayıplarına uğramışlardır. KT1 grubunda ise çimento yerine %30'dan fazla KT kullanılınca basınç dayanımında, %40'tan fazla kullanılınca da eğilme-çekmede ani dayanım kaybı olmuştur. Üçlü sistem gruplardan 10UK grubunda, %40 KT oranı kritik orandır. 20UK grubunda ise basınç dayanımları artık çok düşük olduğundan azalma yüzdesi de düşmüş ve bu düşme daha sistematik olmuştur. Bu kısımda eğilme dayanımı ise biraz daha hızlı düşmüştür. 30UK ve 40UK gruplarında da basınç ile eğilme arasında paralel bir davranış olmuştur. Şekil 4.53'ten alınan değerler arasında yapılan regresyon analizinde $R=0.875-1$ arasında katsayıların bulunması aradaki bağıntının güçlülüğünü teyid eder. R^2 belirlilik katsayısı bulunurken sadece iki kaynak değeri olan 30UK ve 40UK gruplarında sonuç otomatik olarak 1 olduğundan bu iki grup R değeri için seçim dışı bırakılmıştır. UK1 grubu için basınç ve eğilme dayanımları arasındaki bağıntıda y yerine basınç, x yerine de eğilme değeri yazıldığında bulunan denklem:



Şekil 4.51. Basınç dayanımı-eğilmede çekme dayanımı korelasyonu (7 Günlük)



Şekil 4.52. Basınç dayanımı-eğilme çekme dayanımı regresyon analizi (7 Günlük)

$f_c=4.1699e^{0.4686f_{ct}}$ şeklinde olmuştur. Bu bağıntı için R^2 belirlilik katsayısından $R=0.977$ olarak bulunması bağıntının güvenilir olduğunu göstermiştir. Burada:

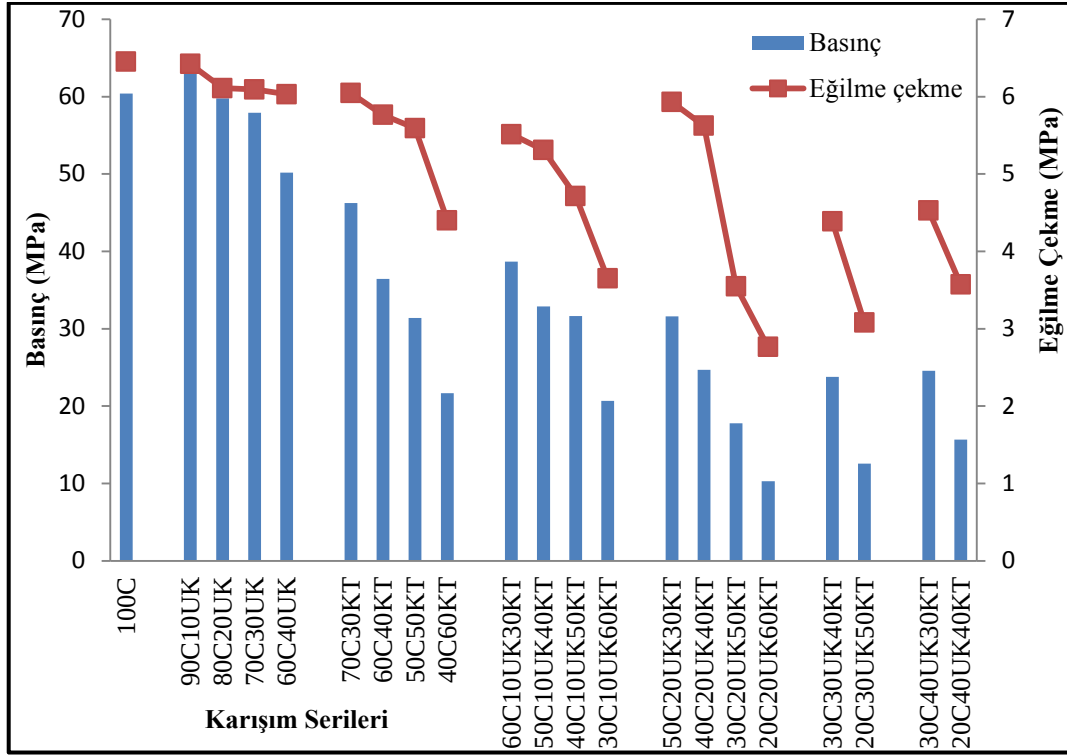
f_c =Harçta basınç dayanımı

f_{ct} = Harçta eğilmede çekme dayanımıdır

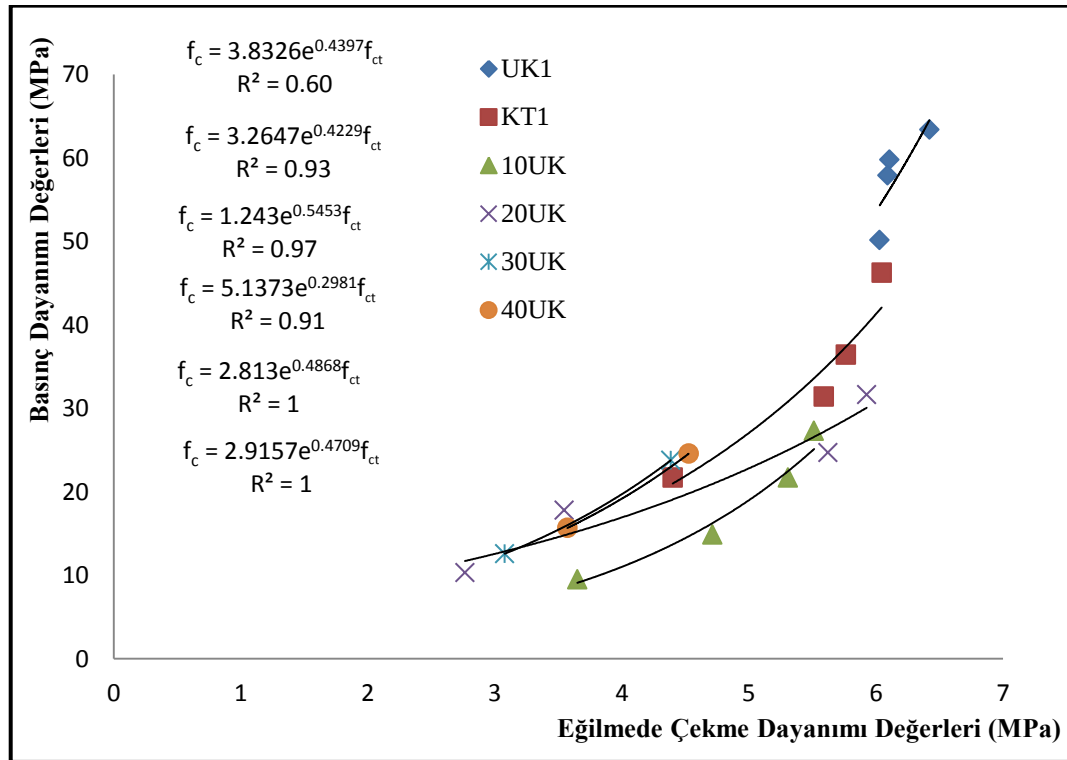
Diğer karışım grupları KT1, 10UK, 20UK, 30UK ve 40UK için formüller Şekil 4.53'te regresyon analizi grafiğinde verilmiştir.

28 günlük numunelere ait basınç ile eğilmede çekme arasındaki ilişki Şekil 4.53'te, regresyon analizi Şekil 4.54'te gösterilmiştir. Buna göre mineral katkı ikame oranının artmasının, büyüklükleri değişmekle birlikte basınç ve eğilme değerlerinde azalmaya sebebiyet verdiği görülmüştür. Her grup kendi içinde incelendiğinde UK1 grubunda UK'nin puzolanik etkisinin zamana bağlı olarak daha fazla ortaya çıkması sonucu %40 oranında bile eğilme dayanımında oldukça yüksek değer olarak %20 ve %30 UK oranları ile aynı seviyeye, 90C10UK karışımında ise kontrol numunesi seviyesine ulaştığı belirlenmiştir. Basınç dayanımında 90C10UK karışımı kontrol karışımı değerini geçmiştir. KT grubunda mineral katkı artarken basınç değerlerindeki ve eğilme değerlerindeki azalma %50KT oranına kadar düzenli iken %60 oranında daha fazla olmuştur. Üçlü sistem kullanımında aynı eğilim devam etmiş farklı olarak 20UK grubunda, KT oranı %40'tan %50'ye çıkarılırken eğilme dayanımı keskin bir düşüş göstermiştir. 30UK ve 40UK gibi çimento kullanımı %30'un altına düşüp, mineral katkı oranı %70-80 gibi yüksek değerlere ulaşınca eğilme dayanımlarına oranla basınç dayanımlarında daha fazla düşme olmuştur. Bu seviyelerde mineral katkı kullanımının %10 artması hem eğilme hem de basınç değerlerini daha fazla etkilemiştir. Şekil 4.54'te çizilmiş olan 28 günlük regresyon analizi grafiği incelendiğinde UK kullanımı ile R değeri bir miktar düşmüş olsa da $R=0.777$ gibi yüksek bir değer almış iken 10UK grubunda bu değer $R=0.986$ değerine kadar çıkmıştır. Bu durum bağıntının güçlü olduğunu göstermiştir. KT1 grubu için bulunan denklem örnek alındığında; $f_c=3.2647e^{0.4229f_{ct}}$ bulunmuştur. Diğer gruplara ait denklemler Şekil 4.54'teki grafikte verilmiştir.

90 günlük numunelere ait basınç ile eğilmede çekme arasındaki ilişki Şekil 4.55'te, regresyon analizi Şekil 4.56'da verilmiştir. Buna göre genel olarak mineral katkı

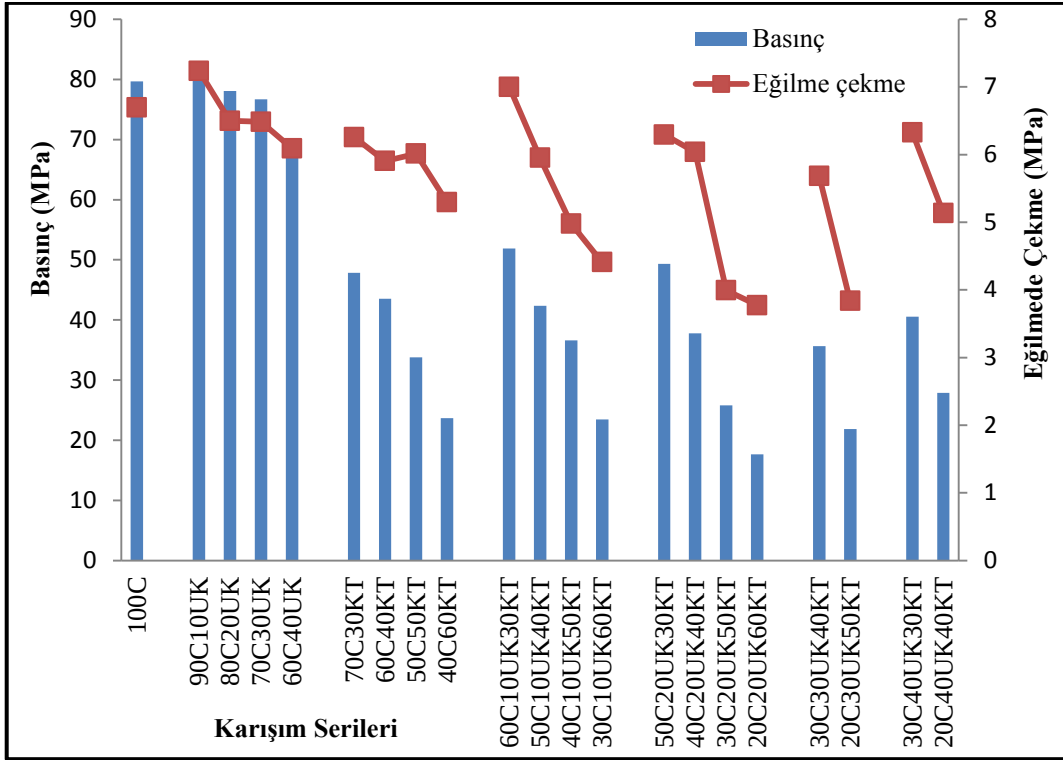


Şekil 4.53. Basınç dayanımı-eğilme çekme dayanımı korelasyonu (28 Günlük)

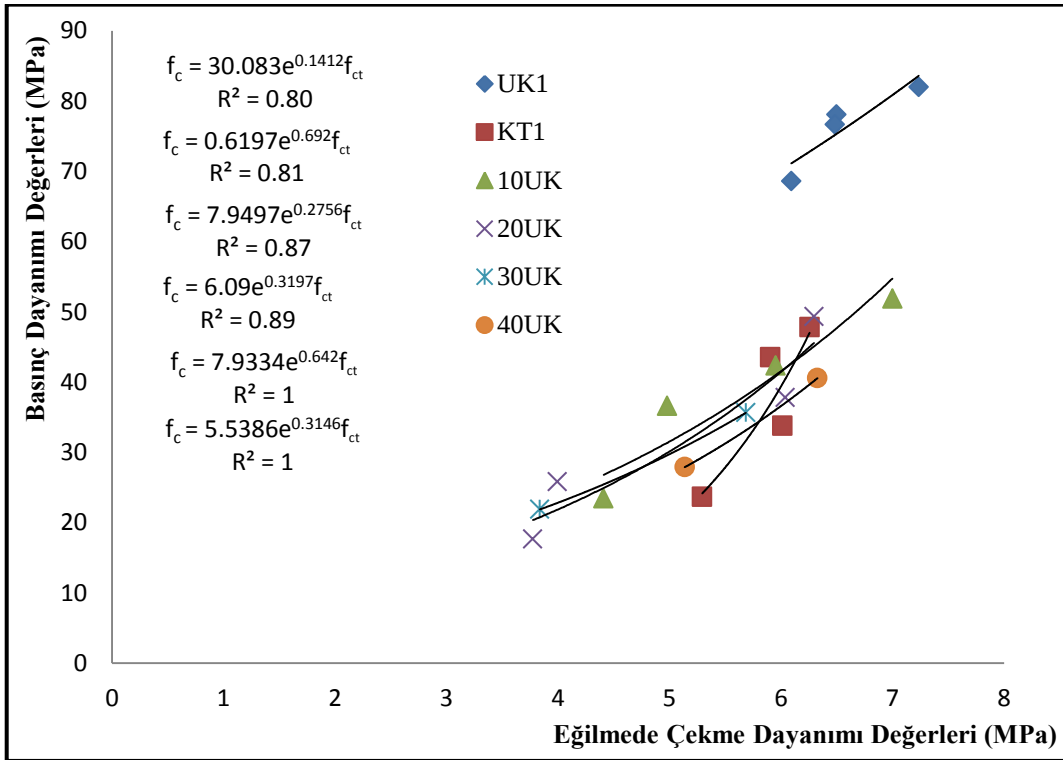


Şekil 4.54. Basınç dayanımı-eğilme çekme dayanımı regresyon analizi (28 Günlük)

oranındaki artış, basınç ve eğilme değerlerinde hemen hemen paralel azalmalar oluşturmuştur. Her grup kendi içinde ayrı ayrı incelendiğinde UK1 grubunda UK'nin puzolanik etkisinin zamana bağlı olarak en fazla değere ulaştığı görülmüştür. Basınç dayanımında 90C10UK karışımının değeri kontrol karışımı değerinden büyüktür. %20 UK ve %30 UK içeren karışımların hem basınç hem de eğilme dayanımları çok yakın değerler almıştır. KT1 grubunda mineral katkı artarken eğilme değerlerindeki azalma %50KT oranına kadar yataya yakın değerler alırken %60KT ikamesindeki düşüş daha fazla olmuştur. Bu grupta basınç dayanımı değerlerindeki azalma lineere yakındır. Üçlü sistem kullanımında aynı eğilim devam etmiş, 10UK grubunda hem basınç hem de eğilme dayanım değerleri düzgün bir şekilde azalmıştır. 20UK grubunda KT ikame oranı %40'tan %50'ye çıkarılırken eğilme dayanımı ani bir düşüş göstermiş, basınç değerlerinde ise böyle bir düşüş olmamakla birlikte diğerlerinden fazla dayanım meydana gelmiştir. Şekil 4.56'da gösterilen 90 gün için regresyon analizi grafiği incelendiğinde bütün denklemlerde R değeri 0.896-0.944 arasındadır. Bu durum 90 günlük basınç dayanımı ile eğilmede çekme dayanımı arasında güçlü bir bağıntının olduğunu göstermiştir. 20UK grubu için bulunan denklem incelendiğinde; $f_c = 6.09e^{0.3197f_{ct}}$ denklemi bulunmuştur. Diğer gruplara ait denklemler Şekil 4.56'da gösterilmiştir.



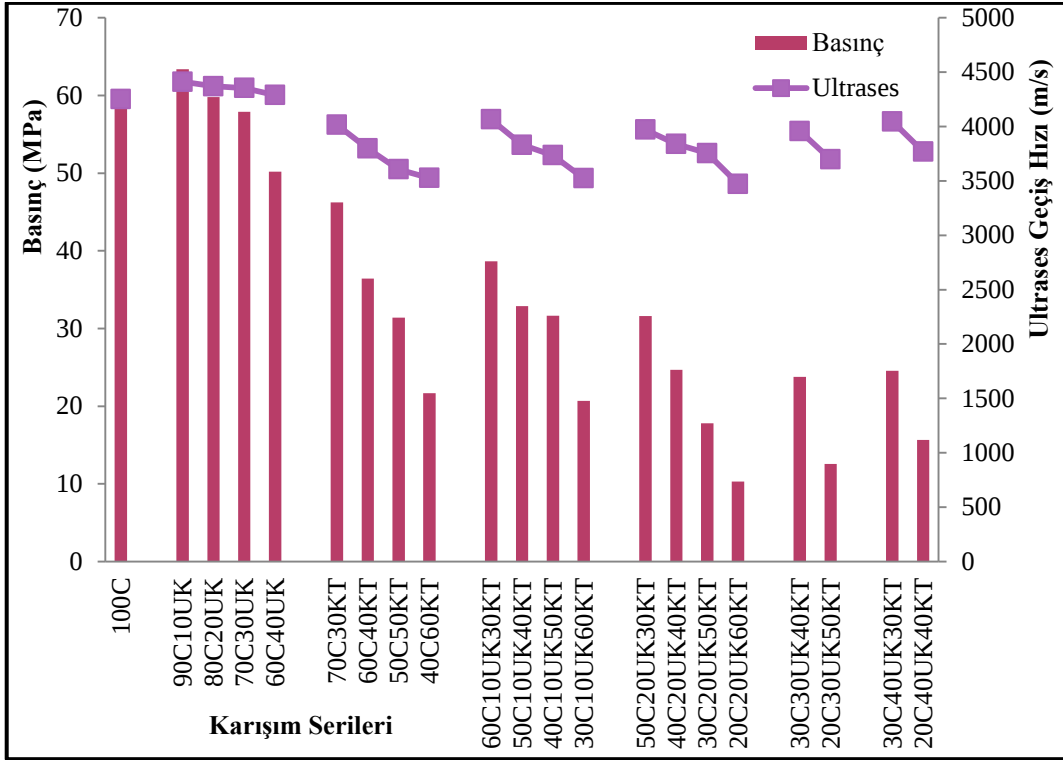
Şekil 4.55. Basınç dayanımı-eğilme çekme dayanımı korelasyonu (90 Günlük)



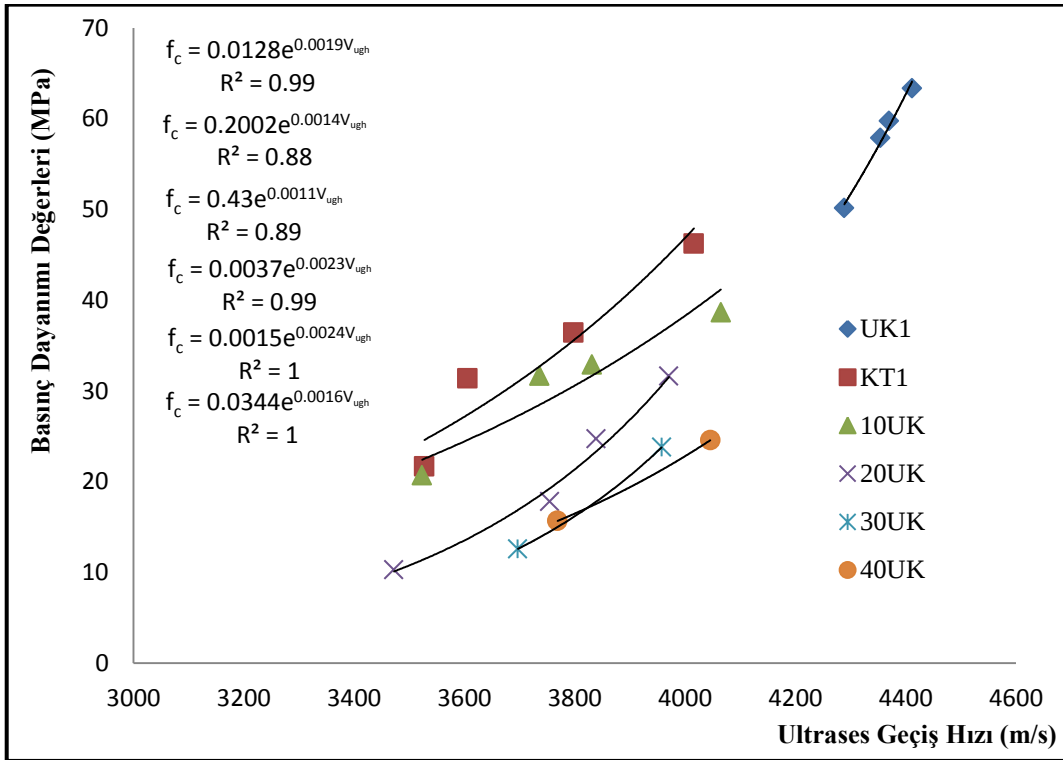
Şekil 4.56. Basınç dayanımı-eğilme çekme dayanımı regresyon analizi (90 Günlük)

4.3.2. Basınç Dayanımı - Rölatif Ultrases Geçiş Hızı

Basınç ile ultrases geçiş hızı (UGH) arasındaki korelasyon Şekil 4.57’de, regresyon analizi Şekil 4.58’de gösterilmiştir. Buna göre mineral katkı oranının artması basınç ve UGH değerlerinde azalmaya neden olmuştur. UGH’yi ölçmek için oluşturulan titreşim frekansları sertleşmiş harçta geçerken harç bünyesindeki boşluklar geçişe engel oluşturduğundan ses frekansları boş kısımları dolanarak geçer. Böylece mevcut mesafe daha uzun zamanda geçildiği için geçiş hızı azalmış olur. Daha dolu ve yoğunluğu büyük olan numunelerde boşluk miktarı az olduğundan UGH daha büyüktür. Şekil 4.57’deki grafik incelendiğinde genel olarak mineral katkı oranının artmasının UGH’yi düşürdüğü görülmüştür. Bu ise numunede kapiler boşlukların arttığını göstermektedir. Her grup kendi içinde incelendiğinde UK1 grubunda %20 oranına kadar UK kullanımının istisnai bir durum oluşturduğu ve bu dozaja kadar mineral katkı kullanımının hem basınç dayanımını hem de UGH’yi arttırdığı gözlemlenmiştir. Basınç dayanımında 90C10UK karışımı, UGH’de ise 90C10UK ve 80C20UK karışımı değerleri, kontrol değerini geçmiştir. %30, %40 UK ikameli karışımlarda da basınç ve UGH değerleri diğer gruplardaki değerlerden daha yüksek çıkmış, değerler birbirine paralel davranış göstermiştir. KT1 grubunda KT katkı oranı artarken basınç değerlerindeki ve UGH değerlerindeki azalma yine paralel bir şekilde lineer azalma göstermiştir. Üçlü sistem kullanımında aynı eğilim devam etmiş farklı olarak 10UK grubunda, KT oranı %50’den %60’a çıkınca basınç dayanımı diğerlerinden biraz fazla düşüş göstermiştir. 30UK ve 40UK gibi çimento kullanımı %30’un altına düşürülüp, mineral katkı oranı %70-80 gibi yüksek değerlere ulaşınca UGH değerleri 3500 m/sn civarında değerler olarak belli bir aralıkta durmuştur. Basınç dayanımları ise oran olarak daha fazla değer kaybına uğramıştır. Yüksek dozajlarda mineral katkı kullanımı sırasında mineral katkı kullanımının %10 artması hem UGH’yi hem de basınç değerlerini düşük dozajda mineral katkı ikamesine göre daha fazla etkilemiştir. Elde edilen sonuçların incelenmesi basınç dayanımının UGH ile çok yüksek bir korelasyona sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 4.58’de verilen regresyon analizi grafiği incelendiğinde UK kullanılması ile R değeri $R=0.937-0.993$ arasında değerler almıştır. Bu değerler regresyon analizi için oldukça yüksek güvenilirlikte değerlerdir. UK1 grubu için bulunan denklem örnek alındığında; $f_c=0.0128e^{0.0019V_{ugh}}$ bulunmuştur. Diğer gruplara ait denklemler Şekil 4.58’deki grafikte verilmiştir.



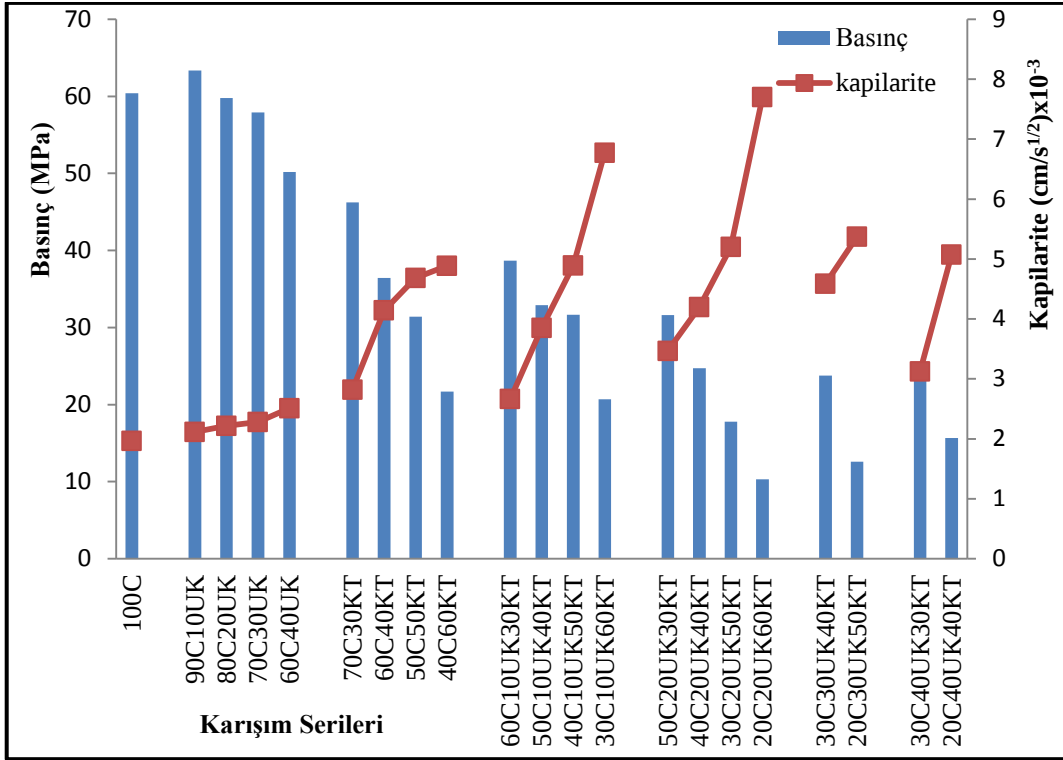
Şekil 4.57. Basınç dayanımı - rölatif ultras ses geçiş hızı değerleri korelasyonu



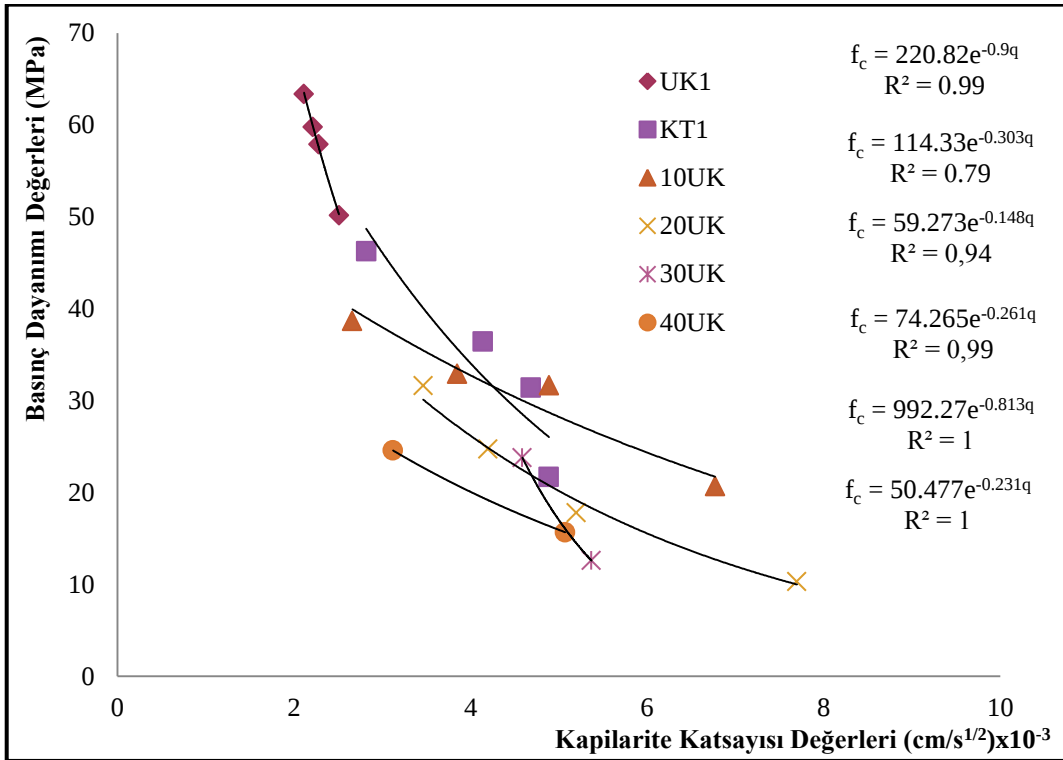
Şekil 4.58. Basınç dayanımı - rölatif ultras ses geçiş hızı regresyon analizi

4.3.3. Basınç Dayanımı - Kapiler Su Emme Katsayısı

Basınç dayanımı ile kapiler su emme katsayıları (KSEK) arasındaki korelasyon Şekil 4.59'da, regresyon analizleri Şekil 4.60'ta verilmiştir. Mineral katkı oranının artması basınç dayanımlarında azalmaya neden olurken kapiler su emme özelliğinde ve daha önce belirtildiği gibi toplam su emme kapasitelerinde tam tersine artmaya neden olmuştur. Sertleşmiş KYH içinde gözle görülemeyen kapiler boşluklar zamana bağlı olarak suyla dolarlar. Bu istenmeyen bir durumdur. Sertleşmiş harcın sızdırmazlık özelliğinin iyi olması istenir. Özellikle kış mevsimlerinde donma çözünme olayları neticesi harçta tahribat meydana gelir. Sertleşmiş harcın kimyasal, radyoaktif vs. sızıntılara karşı dayanıklı olması istenir. Tüm bu özellikler için dolu ve yoğunluğu büyük olan numuneler gereklidir. İstenen bu harçlar için KSEK'nın da küçük olması gerekir. Özellikle KYH'lar bu bakımdan avantajlıdır. Vibratör gerektirmeden ve agrega olarak kum kullanıldığından harç içinde boşluk minimuma iner. Şekil 4.59'daki grafik incelendiğinde genel olarak mineral katkı oranının artması KSEK'yi yükselmiştir. Bu artış, kapiler boşlukların da arttığını göstermektedir. Her grup kendi içinde incelendiğinde UK1 grubunda bütün karışımlarda KSEK kontrol numunesine yakın oldukça düşük değerler almıştır. Sadece 60C40KT karışımında diğer karışımlardan basınç değerlerinde bir miktar fazla azalma görülürken KSEK'te de artma gözlenmiştir. KT1 grubunda KT katkı miktarı artarken basınç değerlerinde sistematik azalma olmuş, KSEK değerlerinde azalan bir ivme ile artma görülmüştür. Üçlü sistem kullanımında da mineral katkı artarken basıncın azalması eğilimine mukabil kapilarite artmıştır. 10UK grubunda, KT oranı 30C10UK60KT karışımında KSEK'teki hızlı artışa oranla basınç dayanımında hızlı düşüş görülmüştür. Özellikle 20C20UK60KT karışım numunelerinde kapilarite artışı en yüksek düzeye çıkmıştır. 30UK ve 40UK gibi çimento kullanımı %30'un altına düşürülüp, mineral katkı oranı %70-80 gibi yüksek değerlere ulaşınca mineral katkı kullanımının %10 artması hem KSEK'yi hem de basınç değerlerini düşük dozajda mineral katkı oranına göre daha fazla etkilemiştir. Şekil 4.60'ta verilen regresyon analizi grafiği incelendiğinde UK kullanılması ile R değeri $R=0.888-0.999$ arasında değerler almıştır. Bu değerler regresyon analizi için yüksek güvenilirlikte değerlerdir. UK1 grubu için bulunan denklem örnek alındığında; $f_c=220.82e^{-0.59q}$ bulunmuştur. Diğer gruplara ait denklemler Şekil 4.60'taki grafikte verilmiştir.



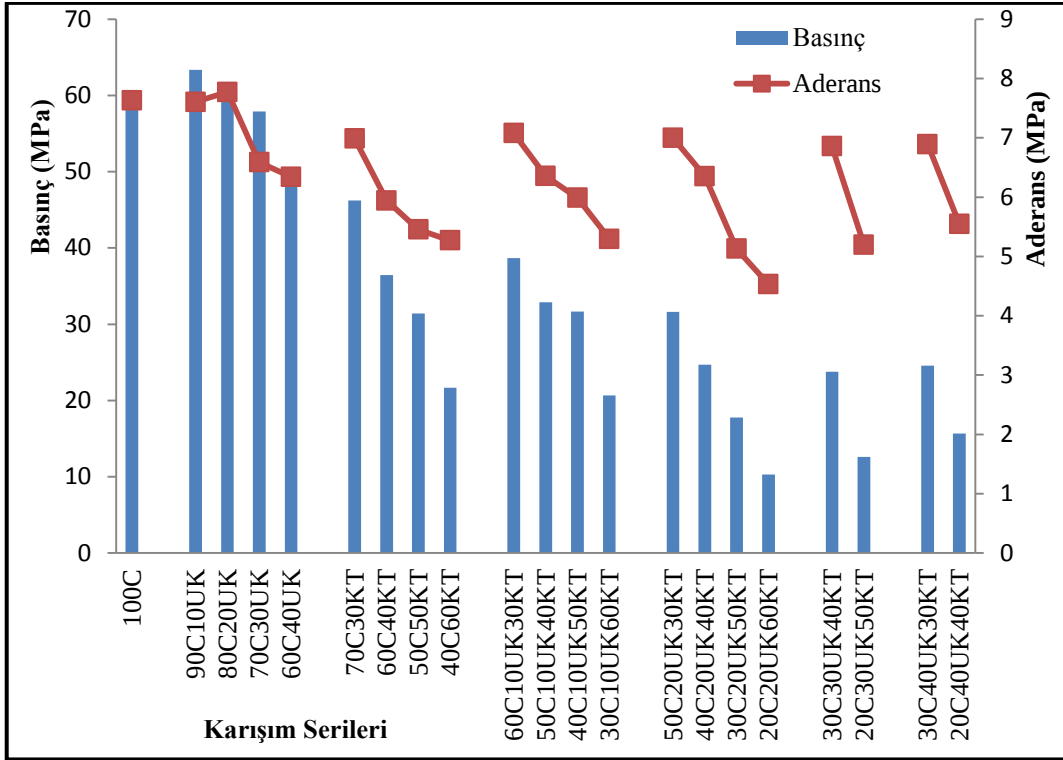
Şekil 4.59. Basınç dayanımı - kapiler su emme katsayısı değerleri korelasyonu



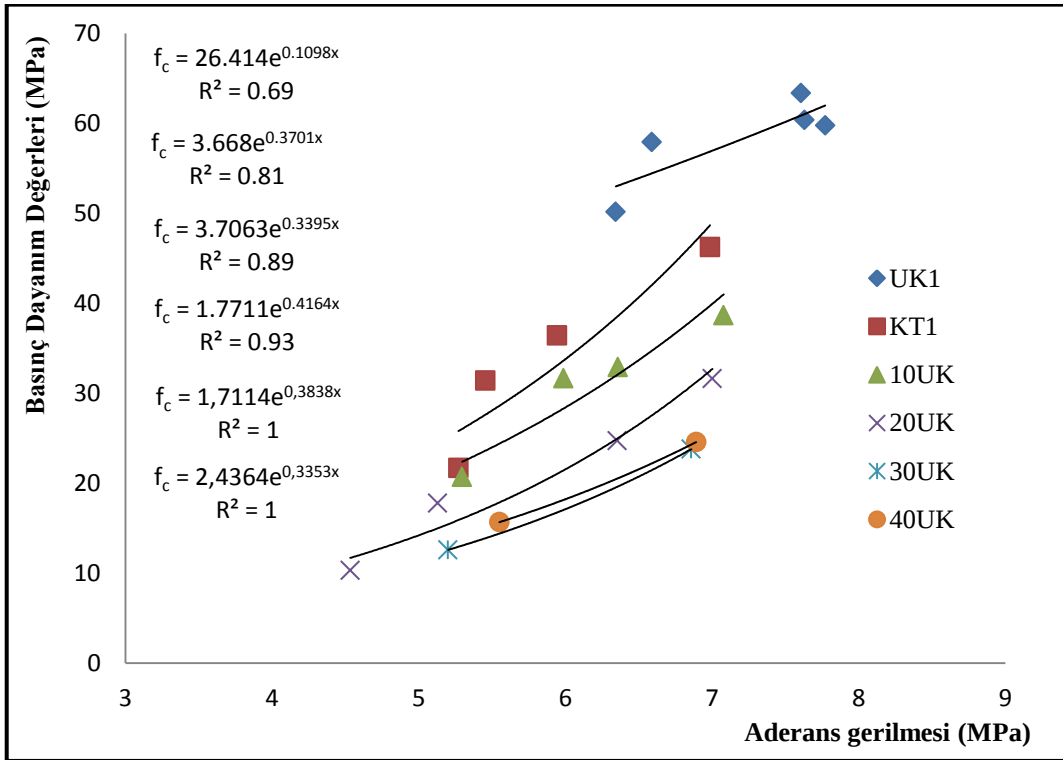
Şekil 4.60. Basınç dayanımı - kapiler su emme katsayısı regresyon analizi

4.3.4. Basınç Dayanımı - Aderans Gerilmesi

Basınç ile aderans gerilmesi arasındaki korelasyon Şekil 4.61’de, regresyon analizi Şekil 4.62’de gösterilmiştir. Buna göre mineral katkı oranının artması basınç ve aderans değerlerinin her ikisinde birden azalmaya neden olmuştur. Daha önce literatür açıklamaları kısmında ve aderans sonuçları kısmında da belirtildiği gibi basınç dayanımı ve aderans arasında güçlü bir bağlantı vardır. Aşağıdaki grafiklerde de bu yakın ilişki açıkça görülmektedir. Her grup kendi içinde incelendiğinde UK1 grubunda %20 oranına kadar UK kullanımı aderans ve basınç değerlerinin yüksek olmasına neden olmuştur. 80C20UK karışımından sonra aderans değerindeki düşüş önceki dozajlara göre daha çok olmuştur. 90C10UK ve 80C20UK karışımlarında, basınç ve aderans değerleri kontrol karışımından yüksektir. %30, %40 UK ikameli karışımlarda da basınç değerleri diğer gruplardaki değerlerden daha yüksek çıkarken aderans değerleri de yüksek olmakla beraber %60-%70 çimento içeren karışımlardan daha düşüktür. KT1 grubunda KT miktarı artarken basınç değerlerindeki azalma aderans değerlerindeki azalmadan oran olarak daha yüksektir. Üçlü sistem kullanımında değerlerde azalma eğilimi devam etmiş her iki özellik en düşük değerlerini 20C20UK60KT karışımında almıştır. 30UK ve 40UK gruplarında çimento kullanımı %30’un altına düşüp, mineral katkı oranı %70-80 gibi yüksek değerlere ulaşınca aderans değerleri 5 MPa civarında değerler olarak belli bir aralıkta durmuştur. Basınç dayanımları ise oran olarak daha fazla değer kaybına uğramıştır. Yüksek dozajlarda mineral katkı kullanımı sırasında mineral katkı miktarının %10 artması hem aderansı hem de basınç değerlerini düşük dozajdaki mineral katkı ikamesine göre daha fazla etkilemiştir. Elde edilen sonuçların incelenmesi basınç dayanımının aderans ile doğru orantılı olarak çok yüksek bir korelasyona sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 4.62’de verilen regresyon analizi grafiği incelendiğinde UK kullanılması ile $R=0.828-0.966$ arasında değerler almıştır. Bu değerler regresyon analizi için yüksek güvenilirlikte değerlerdir. UK1 grubu için bulunan denklem örnek alındığında; $f_c=26.414e^{0.1098x}$ bulunmuştur. Diğer gruplara ait denklemler Şekil 4.62’deki grafikte verilmiştir.



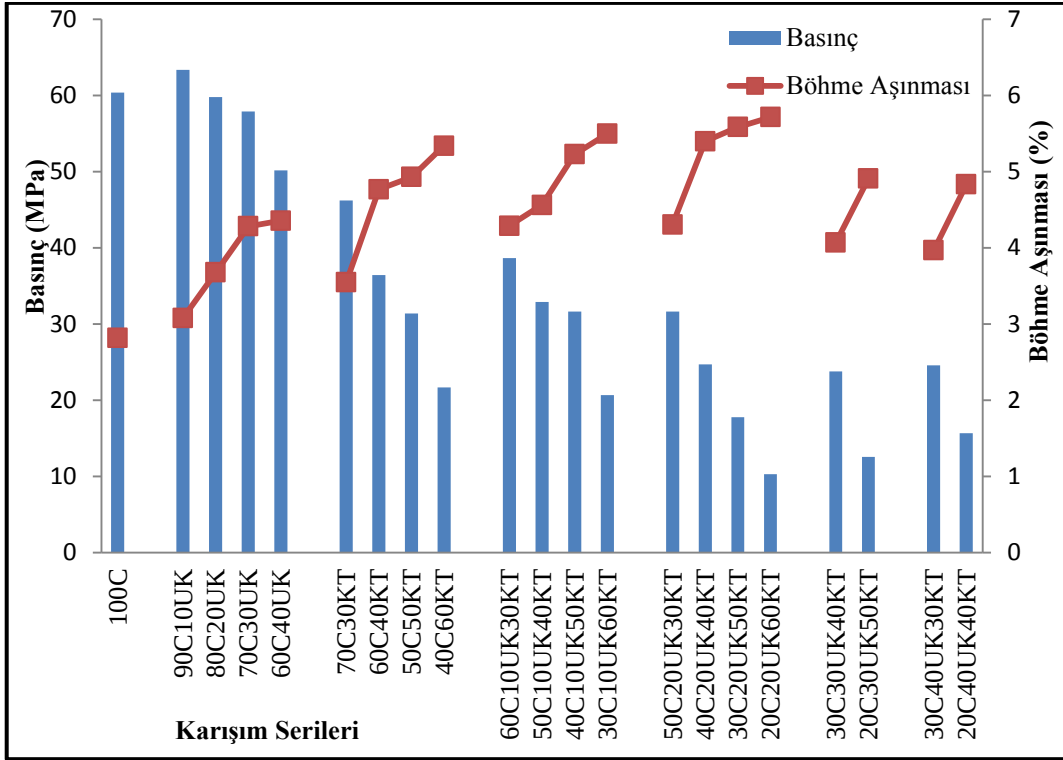
Şekil 4.61. Basınç dayanımı – aderans gerilmesi değerleri korelasyonu



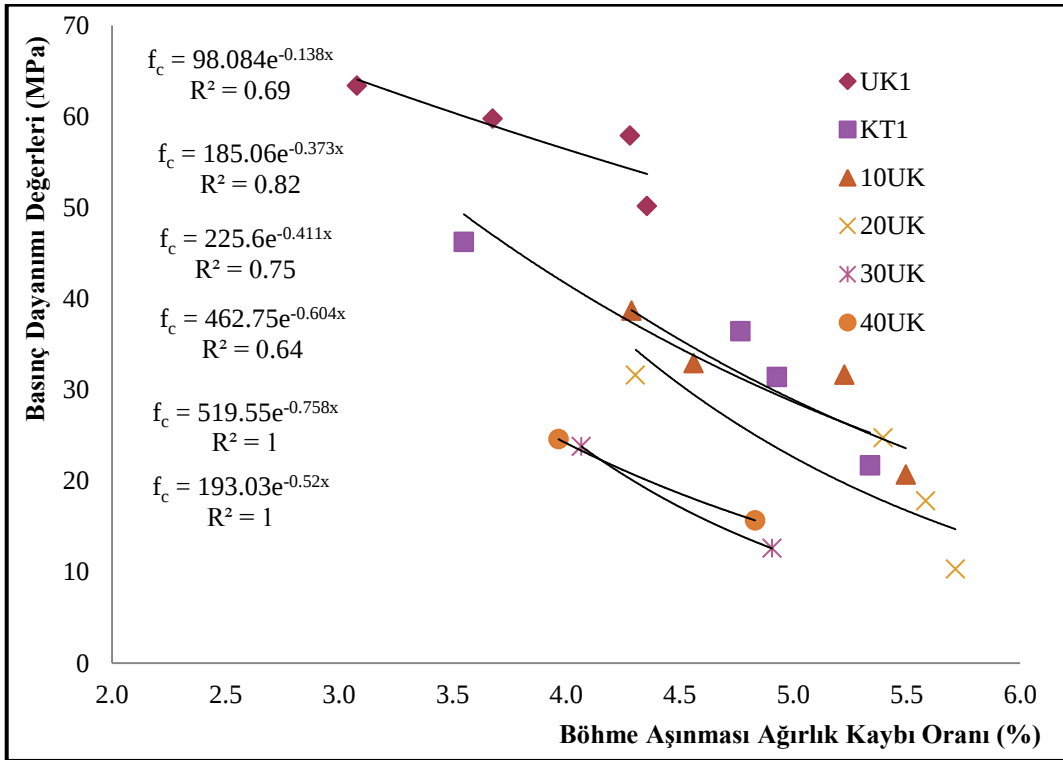
Şekil 4.62. Basınç dayanımı – aderans gerilmesi regresyon analizi

4.3.5. Basınç Dayanımı - Böhme Aşınması

Basınç dayanımı ile Böhme aşınma oranı arasındaki korelasyon Şekil 4.63'te, regresyon analizleri Şekil 4.64'te verilmiştir. Mineral katkı oranının artması basınç dayanımlarında azalmaya neden olurken aşınma oranında ters orantılı olarak artmaya neden olmuştur. Şekil 4.63'teki grafik incelendiğinde genel olarak mineral katkı oranının artması aşınmayı arttırmıştır. Her grup kendi içinde incelendiğinde UK1 grubunda bütün aşınma değerleri kontrol numunesinden büyük değerler almıştır. KT1 grubunda KT katkısı artarken basınç değerlerinde düzenli bir azalma olmuş, aşınma değerlerinde artma görülmüştür. KT oranı %30'dan %40'a çıktığında hızlı bir aşınma artması gerçekleşmiştir. Üçlü sistem kullanımında da mineral katkı artarken basıncın azalması eğilimine mukabil aşınma artmıştır. 10UK grubunda, KT oranı %40'tan %50'ye, 20UK grubunda KT oranı %30'dan %40'a yükseldiğinde aşınma oranındaki artış grup içinde en yüksek düzeye çıkmıştır. 30UK ve 40UK gibi çimento kullanımı %30'un altına düşürülüp, mineral katkı oranı %70-%80 gibi yüksek değerlere ulaşınca mineral katkı kullanımının %10 artması hem aşınmayı hem de basınç değerlerini düşük dozajda mineral katkı ikamesine göre daha fazla etkilemiştir. Şekil 4.64'te verilen regresyon analizi grafiği incelendiğinde R değeri 0.801-0.904 arasında değişmiştir. Bu değerler regresyon analizi için yüksek güvenilirlikte değerlerdir. UK1 grubu için bulunan denklem örnek alındığında; $f_c = 98.084e^{-0.138x}$ bulunmuştur. Diğer gruplara ait denklemler Şekil 4.64'teki grafikte verilmiştir.



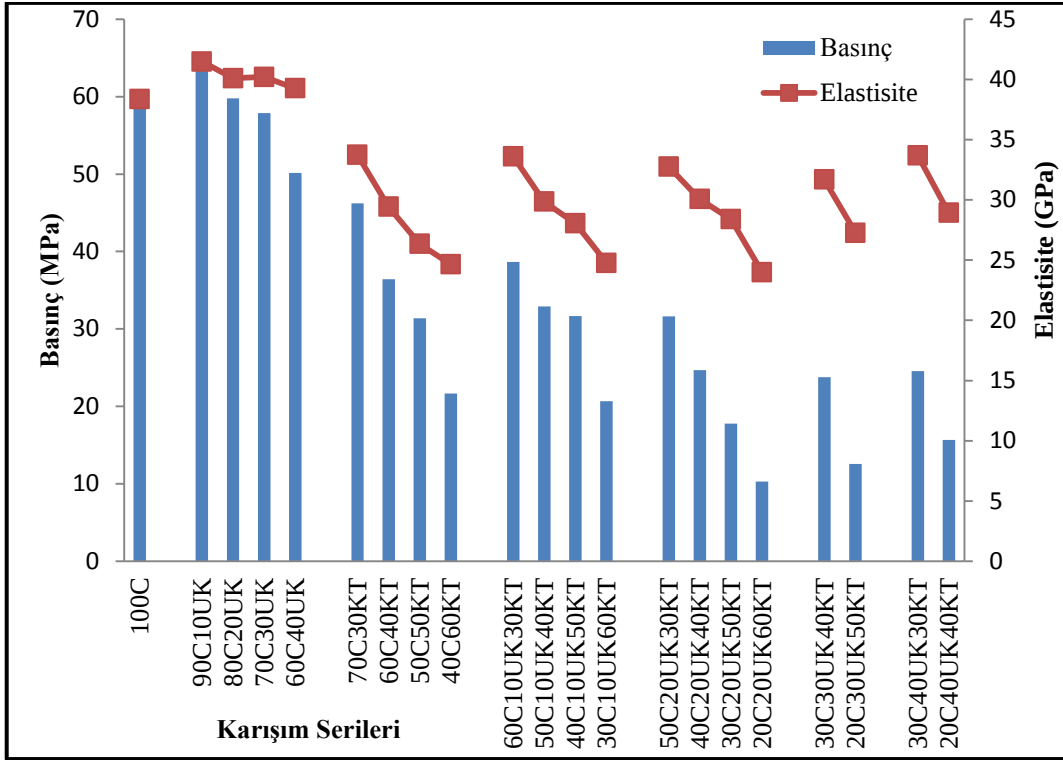
Şekil 4.63. Basınç dayanımı – Böhme aşınması ağırlık kaybı oranları korelasyonu



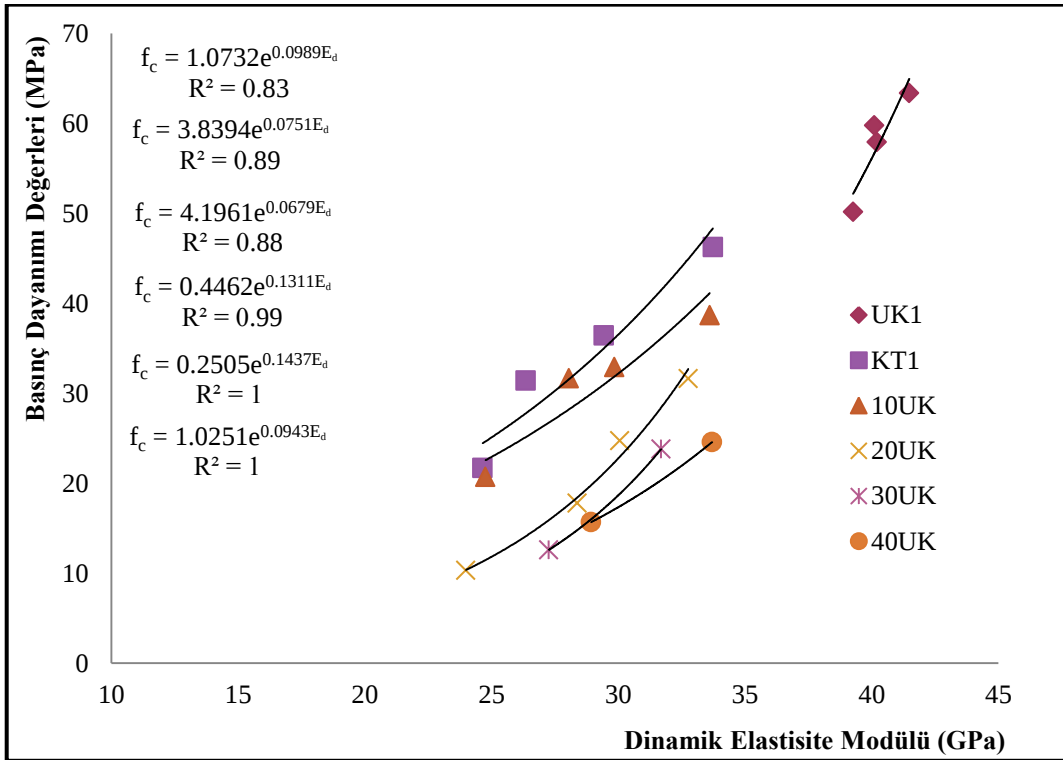
Şekil 4.64. Basınç dayanımı – Böhme aşınması ağırlık kaybı oranları regresyon analizi

4.3.6. Basınç Dayanımı - Dinamik Elastisite Modülü

Basınç dayanımı ile dinamik elastisite modülü (DEM) arasındaki korelasyon Şekil 4.65'te, regresyon analizi Şekil 4.66'da gösterilmiştir. Literatür bölümünde ve bulguların 4.2.1.4 bölümünde açıklandığı gibi basınç dayanımı ve DEM arasında güçlü bir bağıntı vardır. Yapılan incelemelerde mineral katkı oranının arttırılması basınç ve DEM değerlerini düşürmüştür. Aşağıdaki grafiklerde de bu yakın ilişki açıkça görülmektedir. Buna göre her grup kendi içinde incelendiğinde UK1 grubunda %30 oranına kadar UK kullanımı, DEM ve basınç değerlerinin yüksek olmasına neden olmuştur. 70C30UK karışımından sonra DEM azalma değeri önceki dozajlara göre daha yüksek olmuştur. 90C10UK ve 80C20UK karışımlarında, basınç ve DEM değerleri kontrol karışımından yüksektir. %30, %40 UK ikameli karışımlarda da basınç değerleri diğer gruplardaki değerlerden daha yüksek çıkarken DEM değerleri yüksek olmakla beraber %60-%70 çimento içeren karışımlardan daha düşüktür. KT1 grubunda çimento yerine mineral katkı olarak KT ikame oranı artarken basınç değerlerindeki azalma ile DEM değerlerindeki azalma oranları paralel çıkmıştır. Üçlü sistem kullanımında; değerlerde azalma eğilimi devam etmiş her iki harç özelliği en düşük değerlerini 20C20UK60KT karışımında almıştır. 30UK ve 40UK gruplarında çimento kullanımı %30'un altına düşürülüp, mineral katkı oranı %70-80 gibi yüksek değerlere ulaşınca DEM değerleri 27-28 GPa civarında değerler alarak belli bir aralıkta durmuştur. Basınç dayanımları ise oran olarak daha fazla değer kaybına uğramıştır. Yüksek dozajlarda mineral katkı kullanımı sırasında mineral katkı kullanımının %10 artması hem DEM'i hem de basınç değerlerini düşük dozajdaki mineral katkı ikamesine göre daha fazla etkilemiştir. Elde edilen sonuçların incelenmesi basınç dayanımının DEM ile doğru orantılı olarak çok yüksek bir korelasyona sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 4.66'da verilen regresyon analizi grafiği incelendiğinde 20UK grubunda $R=0.910-0.994$ arasında değerler almıştır. Bu değerler regresyon analizi için yüksek güvenilirlikte değerlerdir. UK1 grubu için bulunan denklem örnek alındığında; $f_c=1.0732e^{0.00989E_d}$ bulunmuştur. Diğer gruplara ait denklemler Şekil 4.66'daki grafikte verilmiştir.



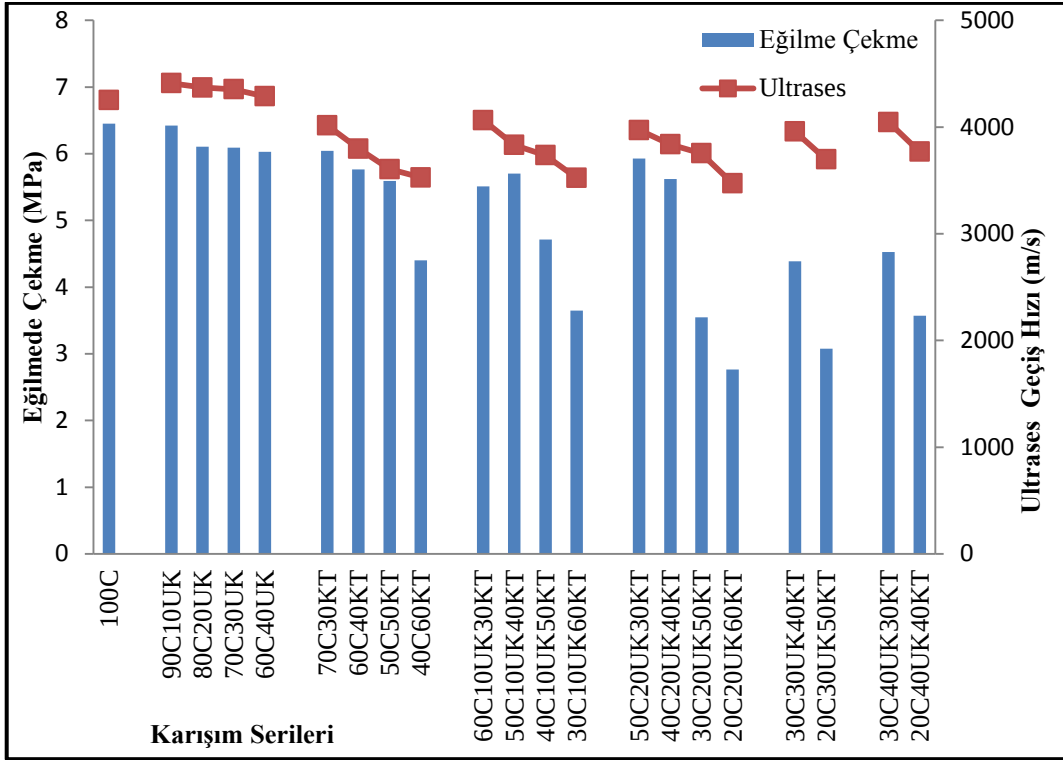
Şekil 4.65. Basınç dayanımı – dinamik elastisite modülü değerleri korelasyonu



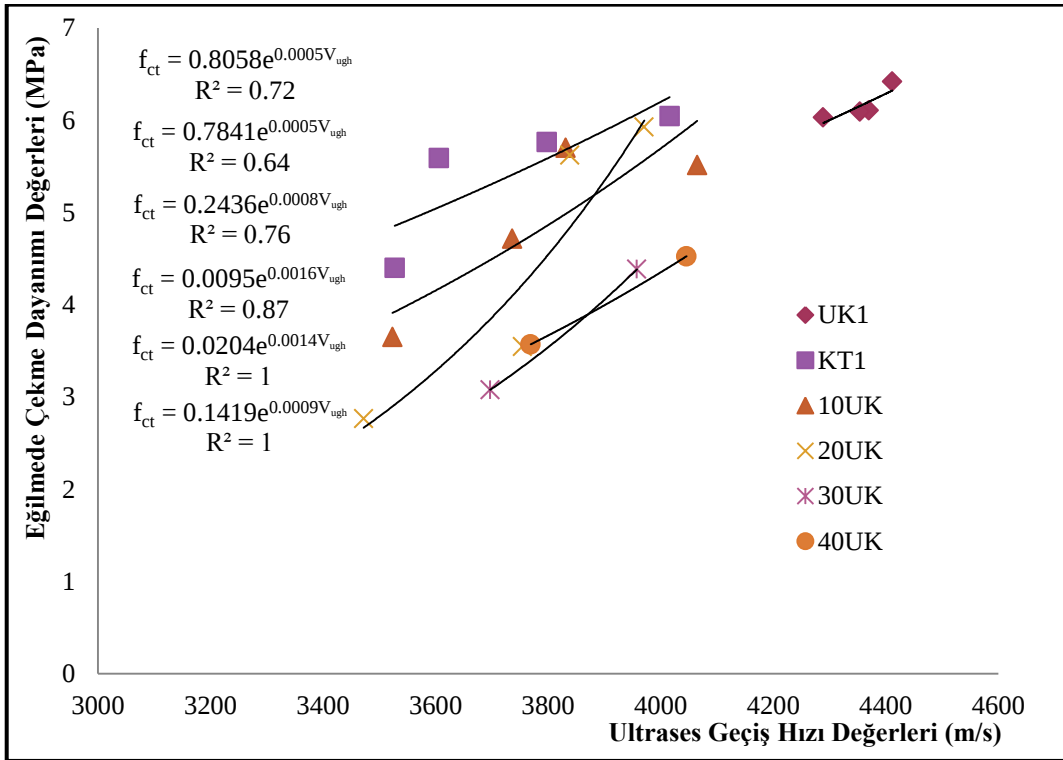
Şekil 4.66. Basınç dayanımı – dinamik elastisite modülü regresyon analizi

4.3.7. Eğilmede Çekme Dayanımı - Rölatif Ultrases Geçiş Hızı

Eğilmede çekme dayanımı ile ultrases geçiş hızı (UGH) arasındaki korelasyon Şekil 4.67’de, regresyon analizi Şekil 4.68’de gösterilmiştir. Buna göre mineral katkı oranının artması eğilmede çekme dayanımı ve UGH değerlerinde ortak özellikte azalma meydana getirmiştir. 4.67’deki grafik incelendiğinde çimento yerine mineral katkı ikame oranının artması UGH’yi düşürmüştür. Buradan, numunede kapiler boşlukların arttığı anlaşılmaktadır. Boşlukların artması çekme dayanımını da düşürmüştür. Bu nedenle eğilmede çekme değerleri ile UGH değerleri doğru orantılı olmaktadır. Her grup kendi içinde incelendiğinde UK1 grubunda %40 UK dozajına kadar mineral katkı kullanımının hem çekme dayanımını hem de UGH değerlerini yüksek seviyede tuttuğu gözlemlenmiştir. UK1 grubunda, bütün karışımların UGH değerleri, 90C10UK ve 80C20UK karışımlarının ise çekme dayanımı değerleri, kontrol karışımı değerlerini geçmiştir. KT1 grubunda KT oranı artarken basınç değerlerindeki ve UGH değerlerindeki azalma birbirlerine paralel olarak lineer bir şekilde azalma göstermiştir. KT1 grubunda %60 KT kullanım oranında çekme dayanımı değeri hızlı düşüş göstermiştir. Üçlü sistem kullanımında aynı eğilim devam etmiştir. Bütün gruplarda, KT oranı %40’tan %50’ye çıkınca çekme dayanımında hızlı düşüşler gözlenmiştir. Bu gruplarda UGH 3457 m/s ile 4065 m/sn hızları arasında birbirlerine yakın değerler almışlardır. Yüksek dozajlarda mineral katkı kullanımı sırasında mineral katkı kullanımının %10 artması hem UGH ‘yi hem de çekme dayanım değerlerini düşük dozajda mineral katkı ikamesine göre daha fazla etkilemiştir. Elde edilen sonuçların incelenmesi çekme dayanımının UGH ile çok yüksek bir korelasyona sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 4.68’de verilen regresyon analizi grafiği incelendiğinde UK kullanılması ile $R=0.797-0.931$ gibi değerler almıştır. Bu değerler regresyon analizi için oldukça yüksek güvenilirlikte değerlerdir. UK1 grubu için bulunan denklem örnek alındığında; $f_{ct}=0,8058e^{0,0005V_{ugh}}$ bulunmuştur. Diğer gruplara ait denklemler Şekil 4.68’deki grafikte verilmiştir.



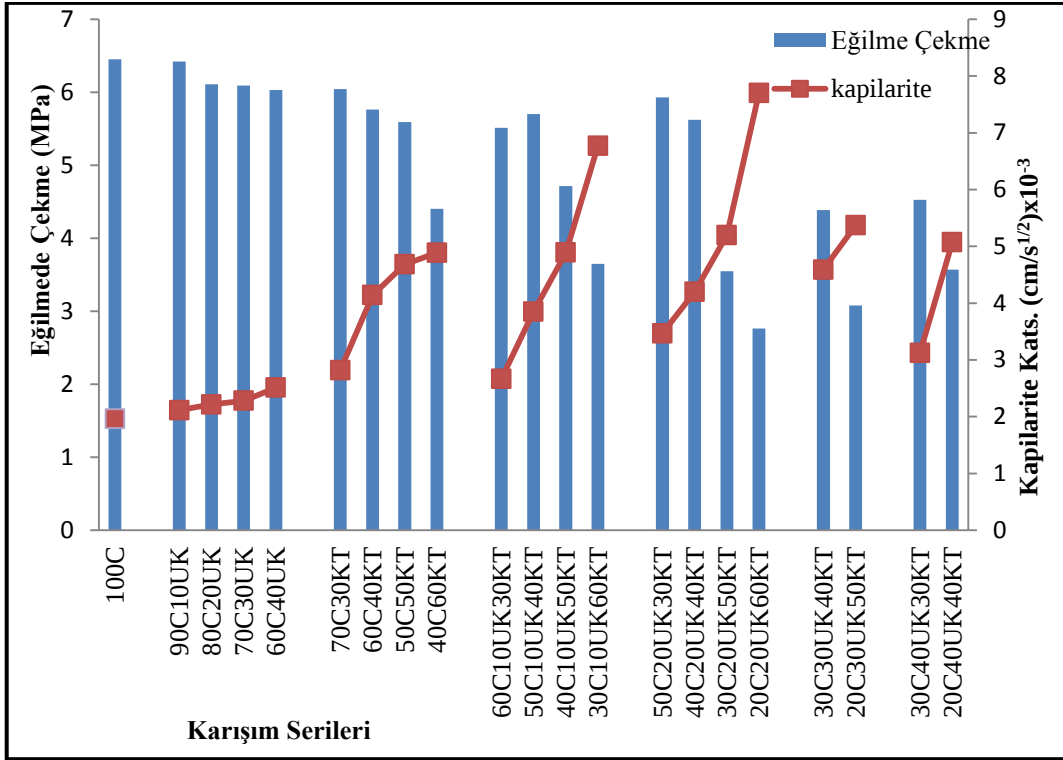
Şekil 4.67. Eğilmede çekme dayanımı - rölatif ultrases geçiş hızı değerleri korelasyonu



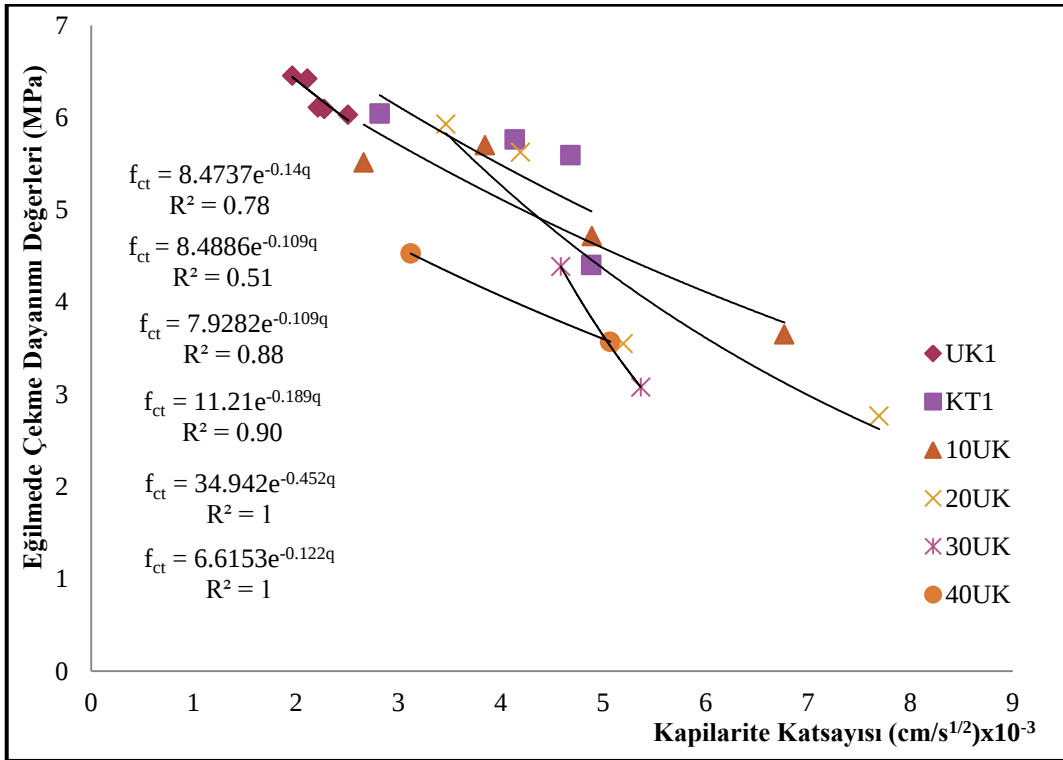
Şekil 4.68. Eğilmede çekme dayanımı - rölatif ultrases geçiş hızı regresyon analizi

4.3.8. Eğilmede Çekme Dayanımı - Kapiler Su Emme Katsayısı

Eğilmede çekme dayanımı ile Kapiler Su Emme Katsayıları (KSEK) arasındaki korelasyon Şekil 4.69'da, regresyon analizleri Şekil 4.70'te verilmiştir. Mineral katkı oranının artması çekme dayanımlarında azalmaya neden olurken kapiler su emme özelliğinde ve toplam su emme kapasitelerinde artmaya neden olmuştur. Şekil 4.69'daki grafik incelendiğinde genel olarak mineral katkı oranının artması KSEK'yi yükseltmiştir. Bu durum numunelerde kılcal boşluk miktarının arttığını göstermektedir. Her grup kendi içinde incelendiğinde UK1 grubunda bütün karışımlarda UK ikame miktarı arttıkça KSEK değerleri de artmıştır. Bu grupta KSEK değerleri diğer gruplardaki değerlere göre daha düşük oranlarda artmıştır. KT1 grubunda KT katkısı artarken çekme dayanımı değerlerinde sistemli bir azalma olmuş, KSEK değerlerinde ise azalan bir ivme ile artma görülmüştür. Üçlü sistem karışım gruplarında da mineral katkı artarken, çekme dayanımında hızlı düşüş ve kapilarite de ters orantılı hızlı artma meydana gelmiştir. Özellikle KT oranının %10 arttığı 30C10UK60KT, 20C20UK60KT, 20C30UK50KT ve 20C40UK40KT karışımlarında KSEK'teki hızlı artışa mukabil çekme dayanımlarındaki hızlı düşüş belirgindir. 20C20UK60KT karışımında kapilarite artışı en yüksek düzeye çıkmış, çekme dayanımı ise en düşük seviyeye düşmüştür. 30UK ve 40UK gibi çimento kullanımı %30'un altına düşürülüp, mineral katkı oranı %70-%80 gibi yüksek değerlere ulaşınca mineral katkı kullanımının %10 artması hem KSEK'yi hem de basınç değerlerini düşük dozajda mineral katkı ikamesine göre daha fazla etkilemiştir. Şekil 4.70'te verilen regresyon analizi grafiği incelendiğinde UK kullanılması ile R korelasyon katsayısı 0.717-0.947 arasında değerler almıştır. Bu değerler regresyon analizi için yüksek güvenilirlikte değerlerdir. UK1 grubu için bulunan denklem örnek alındığında; $f_{ct}=8.4737e^{-0.14q}$ bulunmuştur. Diğer gruplara ait denklemler Şekil 4.70'teki grafikte verilmiştir.



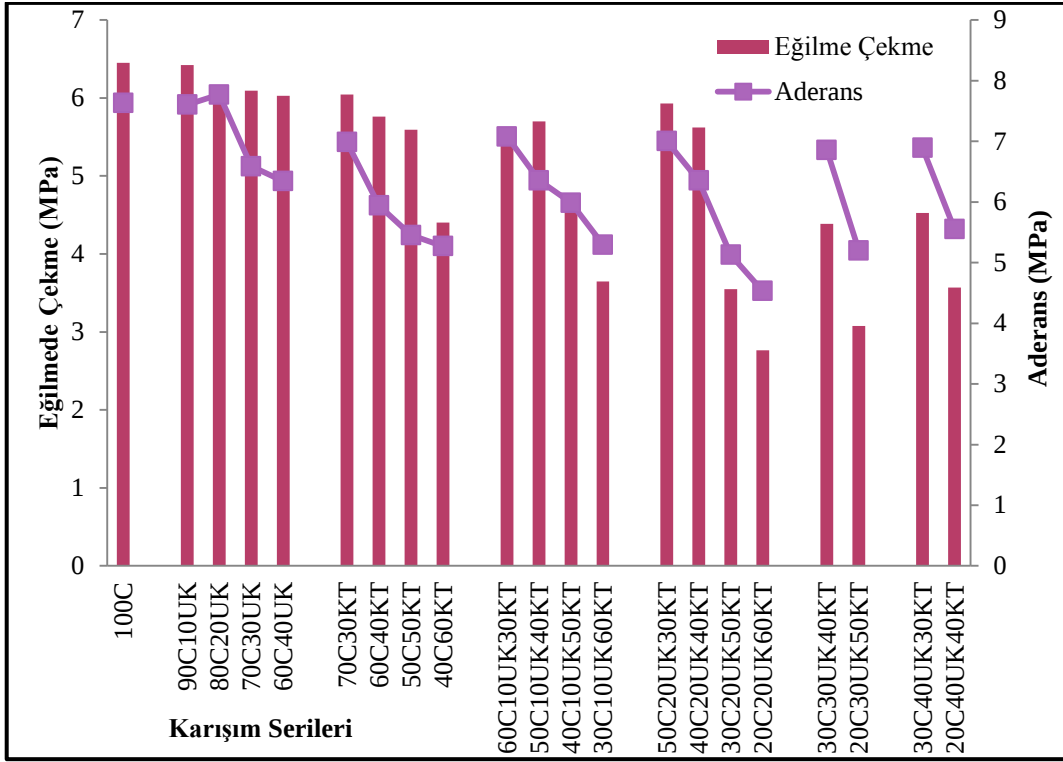
Şekil 4.69. Eğilmede çekme dayanımı - kapiler su emme katsayısı değerleri korelasyonu



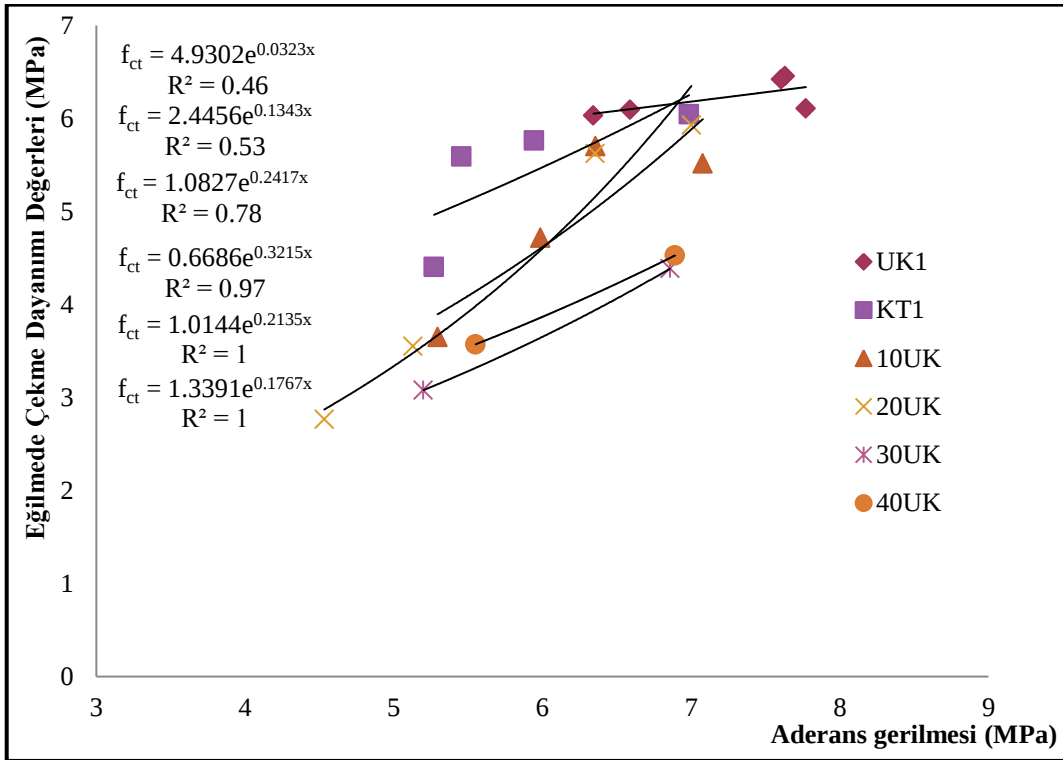
Şekil 4.70. Eğilmede çekme dayanımı - kapiler su emme katsayısı regresyon analizi

4.3.9. Eğilmede Çekme Dayanımı - Aderans Gerilmesi

Eğilmede çekme dayanımı ile aderans gerilmesi arasındaki korelasyon Şekil 4.71’de, regresyon analizi Şekil 4.72’de gösterilmiştir. Mineral katkı oranının artması çekme dayanımı ve aderans değerlerinde azalmaya neden olmuştur. Literatürde çekme dayanımı ve aderans dayanımı arasında güçlü bir bağıntı olduğu belirtilmiştir. Aşağıdaki grafiklerde bu ilişki açıkça görülmektedir. Dozajlarına göre oluşturulan her karışım grubu kendi içinde incelendiğinde; UK1 grubunda %20 oranına kadar UK kullanımı aderans ve çekme dayanımı değerlerinin yüksek olmasına neden olmuştur. 80C20UK karışımından sonra aderans gerilmesindeki azalma oranı önceki dozajlara göre daha çok olmuştur. 90C10UK karışımında çekme gerilmesi kontrol numunesine eşitken, 90C10UK, 80C20UK karışımlarında aderans değerleri kontrol karışımına eşit ve yüksektir. %20-%40 arası UK ikameli karışımlardaki çekme değerleri de kontrol karışımına yakındır. Diğer yandan mineral katkı oranı arttırıldığında çekme dayanımlarında daha fazla kayıp olurken aderans oranlarındaki kayıp daha azdır. KT1 grubunda da aynı eğilim görülmüştür. Fakat 40C60KT karışımında aderans gerilmesi daha az kayba uğrarken çekme dayanımındaki kayıp daha fazla olmuştur. Üçlü sistem kullanımında değerlerde azalma eğilimi devam etmiş, her iki özellik en düşük değerlerini 20C20UK60KT karışımında almıştır. 20UK grubunda özellikle 30C20U50KT karışımında hem çekme hem de aderans değerlerinde yüksek kayıp sözkonusu olmuştur. 30UK ve 40UK gruplarında çimento kullanımı %30’un altına düşüp, mineral katkı oranı %70-%80 gibi yüksek değerlere ulaşıncı aderans değerleri 5 MPa civarında değerler olarak belli bir aralıkta durmuştur. Çekme dayanımları da benzer davranış göstermiştir. Yüksek dozajlarda mineral katkı kullanımı sırasında mineral katkı kullanımının %10 artması hem aderansı hem de çekme dayanım değerlerini düşük dozajda mineral katkı ikamesine göre daha fazla etkilemiştir. Elde edilen sonuçların incelenmesi çekme dayanımının, aderans ile doğru orantılı olarak çok yüksek bir korelasyona sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 4.72’de verilen regresyon analizi grafiği incelendiğinde $R=0.675-0.983$ arasında değerler almıştır. Bu durumda ikili sistemlerden UK1 grubunun korelasyon katsayısının diğer katsayılardan nisbi olarak düşük çıkmasına rağmen genelde katsayıların yüksek çıkması iki özellik arasında dikkate değer bir bağıntı güvenilirliği olduğunu göstermektedir. UK1 grubu için bulunan denklem örnek alındığında; $f_{ct}=4.93032e^{0.0323x}$ bulunmuştur. Diğer gruplara ait denklemler Şekil 4.72’deki grafikte verilmiştir.



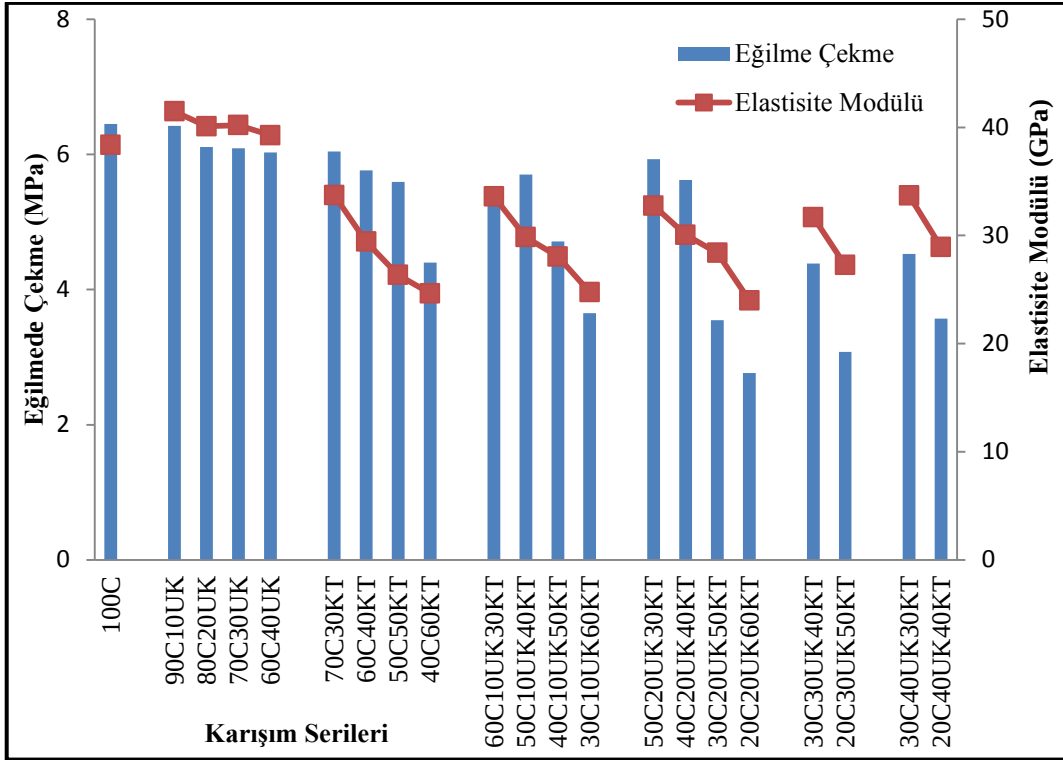
Şekil 4.71. Eğilmede çekme dayanımı – aderans gerilmesi değerleri korelasyonu



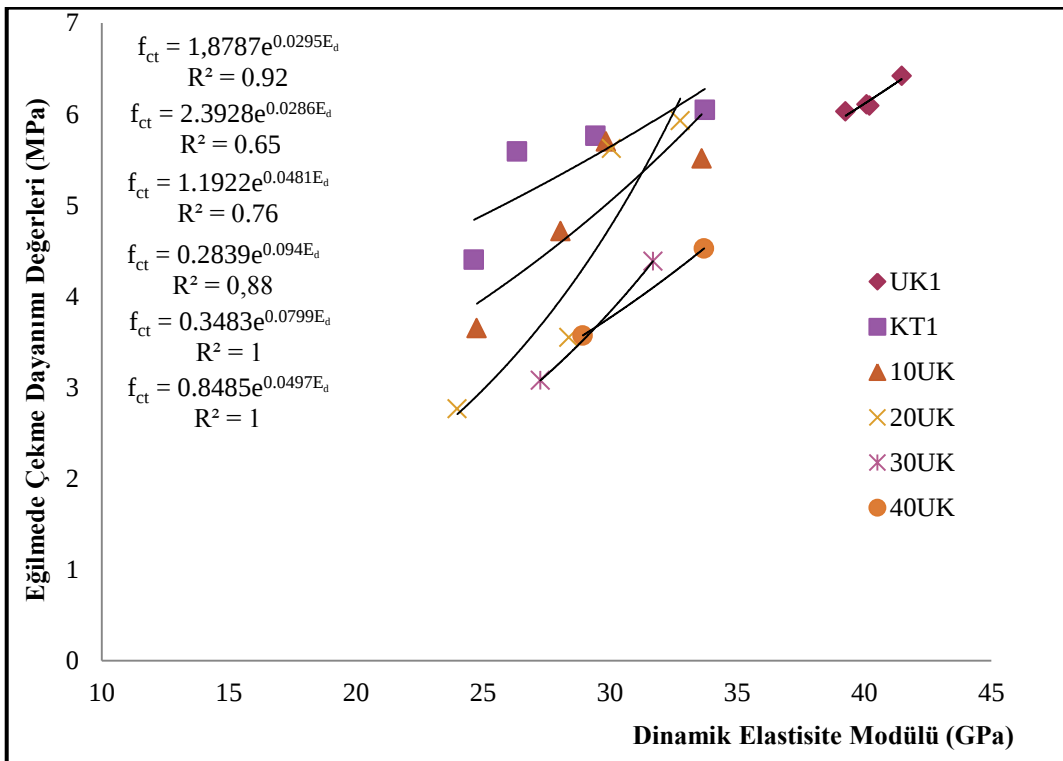
Şekil 4.72. Eğilmede çekme dayanımı – aderans gerilmesi regresyon analizi

4.3.10. Eğilmede Çekme Dayanımı - Dinamik Elastisite Modülü

Eğilmede çekme dayanımı ile dinamik elastisite modülü (DEM) arasındaki korelasyon Şekil 4.73'te, regresyon analizi Şekil 4.74'te gösterilmiştir. Aşağıdaki grafik analizlerinden de anlaşıldığı gibi çekme dayanımı ve DEM arasında güçlü bir bağıntı vardır. Yapılan incelemelerde mineral katkı oranının arttırılması çekme dayanımı ve DEM değerlerini düşürmüştür. Her grup kendi içinde incelendiğinde UK1 grubunda %40 oranına kadar UK kullanımı DEM ve çekme değerlerinin yüksek seviyesinin korunmasını sağlamıştır. 70C30UK karışımından sonra DEM azalma değeri önceki dozajlara göre daha yüksek olmuştur. KT1 grubunda çimento yerine mineral katkı olarak KT ikame oranı artarken çekme değerlerindeki azalma ile DEM değerlerindeki azalma oranları paralel çıkmıştır. Üçlü sistem kullanımında; değerlerde azalma eğilimi devam etmiş harcın her iki özelliği de en düşük değerlerini 20C20UK60KT karışımında almıştır. 30UK ve 40UK gruplarında çimento kullanımı %30'un altına düşüp, toplam mineral katkı oranı %70-80 gibi yüksek değerlere çıkınca DEM değerleri 27-28 GPa civarında değerler olarak belli bir aralıkta durmuştur. Çekme dayanımları ise oran olarak daha fazla değer kaybına uğramıştır. Yüksek dozajlarda mineral katkı kullanımı durumunda mineral katkı kullanımının %10 artması hem DEM'i hem de çekme dayanımı değerlerini düşük dozajda mineral katkı ikamesine göre daha fazla etkilemiştir. Elde edilen sonuçların incelenmesi çekme dayanımının DEM ile doğru orantılı olarak yüksek bir korelasyona sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 4.74'te verilen regresyon analizi grafiği incelendiğinde $R=0.806-0.957$ arasında değerler aldığı görülmüştür. Bu değerler regresyon analizi için yüksek güvenilirlikte değerlerdir. UK1 grubu için bulunan denklem örnek alındığında; $f_{ct}=1.8787e^{0.0295E_d}$ bulunmuştur. Diğer gruplara ait denklemler Şekil 4.74'teki grafikte verilmiştir.



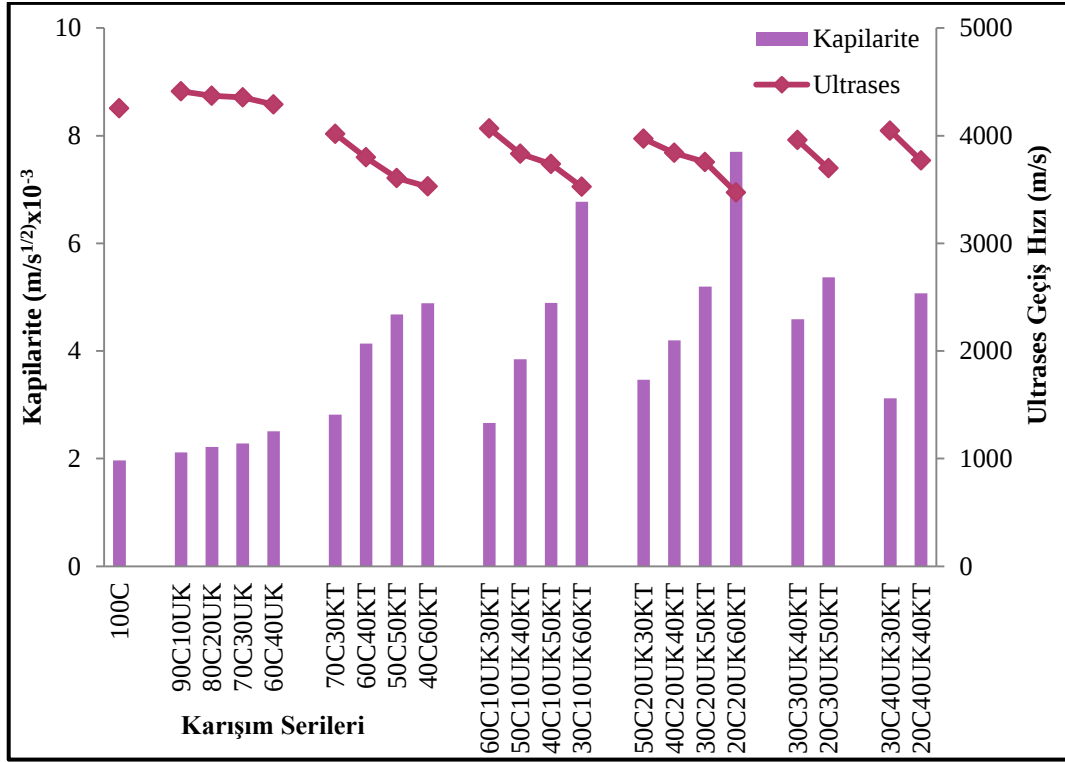
Şekil 4.73. Eğilmede çekme dayanımı – dinamik elastisite modülü değerleri korelasyonu



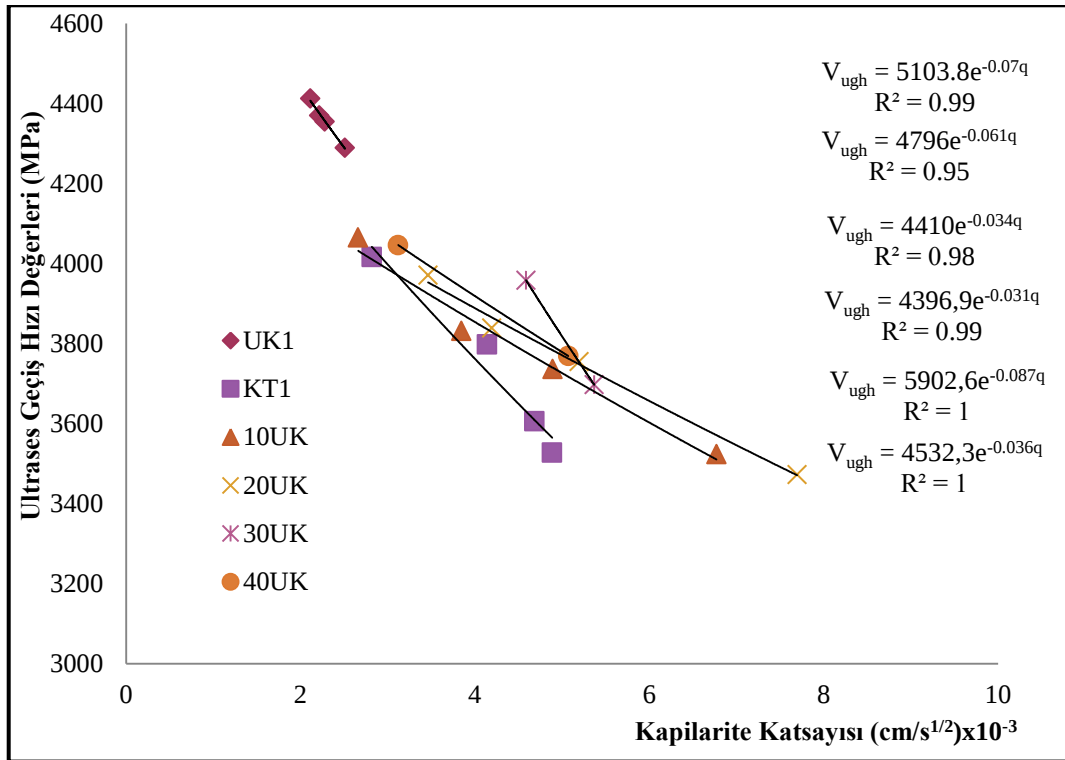
Şekil 4.74. Eğilmede çekme dayanımı – dinamik elastisite modülü regresyon analizi

4.3.11. Rölatif Ultrases Geçiş Hızı - Kapiler Su Emme Katsayısı

Kapiler Su Emme Katsayıları (KSEK) ile Ultrases Geçiş Hızı (UGH) arasındaki korelasyon Şekil 4.75'te, regresyon analizleri Şekil 4.76'da verilmiştir. Mineral katkı oranının artması UGH'de azalmaya neden olurken kapiler su emme özelliğinde artmaya neden olmuştur. Bu durum numunelerde kapiler boşlukların arttığını göstermektedir. Her grup kendi içinde incelendiğinde UK1 grubunda bütün karışımlarda UK ikame miktarı arttıkça KSEK diğer gruplardaki oranlara göre düşük oranlarda değerler alarak artmıştır. Bu grupta UGH de çok az değerlerde azalmıştır. KT1 grubunda KT katkısı artarken UGH değerlerinde düzenli bir azalma olmuş, KSEK değerlerinde ise azalan bir ivme ile artma görülmüştür. Üçlü sistem karışım gruplarında çimento yerine mineral ikame oranı artarken, UGH'de hızlı düşüş, kapilarite de hızlı artma meydana gelmiştir. Özellikle KT oranının %10 arttığı 30C10UK60KT, 20C20UK60KT ve 20C40UK40KT karışımlarında KSEK'te hızlı artış olmuş, UGH hızlarında büyük düşüş görülmüştür. Bunlardan 20C20UK60KT karışımında kapilarite artışı en yüksek düzeye çıkmış, çekme dayanımı ise en düşük seviyeye düşmüştür. 30UK ve 40UK gibi çimento kullanımı %30'un altına düşüp, toplam mineral katkı oranı %70-%80 gibi yüksek değerlere ulaşınca mineral katkı kullanımının %10 artması hem KSEK'yi hem de UGH değerlerini düşük dozajda mineral katkı ikamesine göre daha fazla etkilemiştir. Şekil 4.76'da verilen regresyon analizi grafiği incelendiğinde UK kullanılması ile R korelasyon katsayısı 0,976-0,996 arasında değerler almıştır. Bu değerler regresyon analizi için çok yüksek güvenilirlikte değerlerdir. UK1 grubu için bulunan denklem örnek alındığında; $V_{ugh}=5103,8e^{-0,07q}$ bulunmuştur. Diğer gruplara ait denklemler Şekil 4.76'daki grafikte verilmiştir.



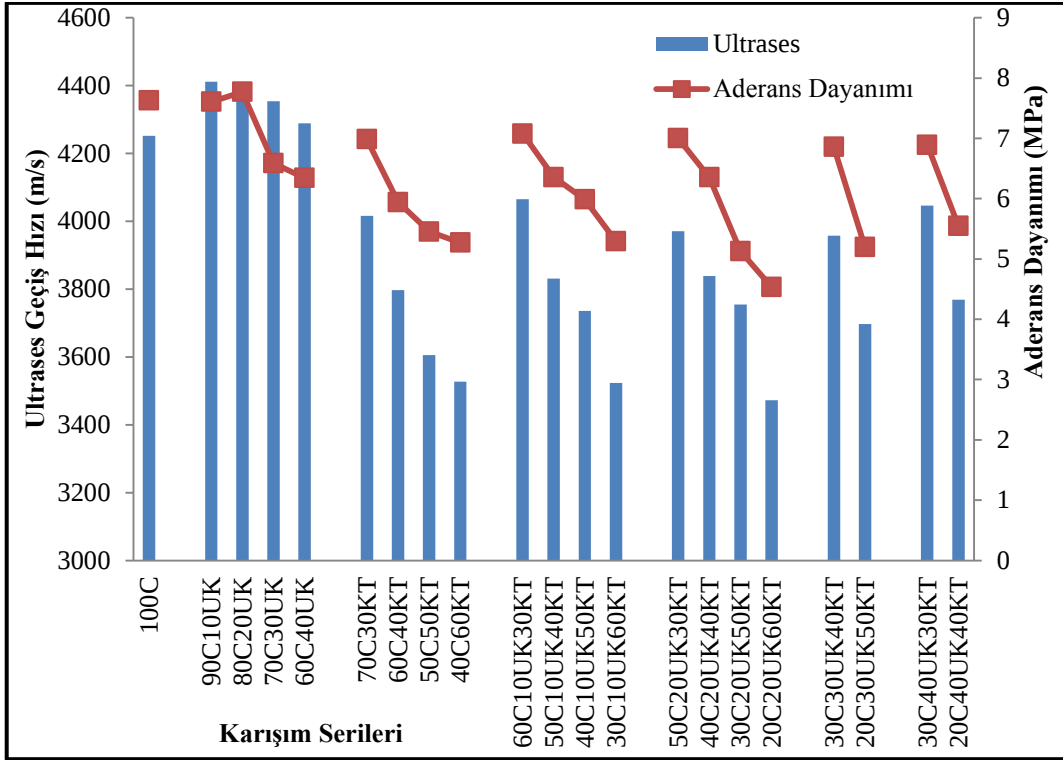
Şekil 4.75. Rölatif ultrases geçiş hızı - kapiler su emme katsayısı değerleri korelasyonu



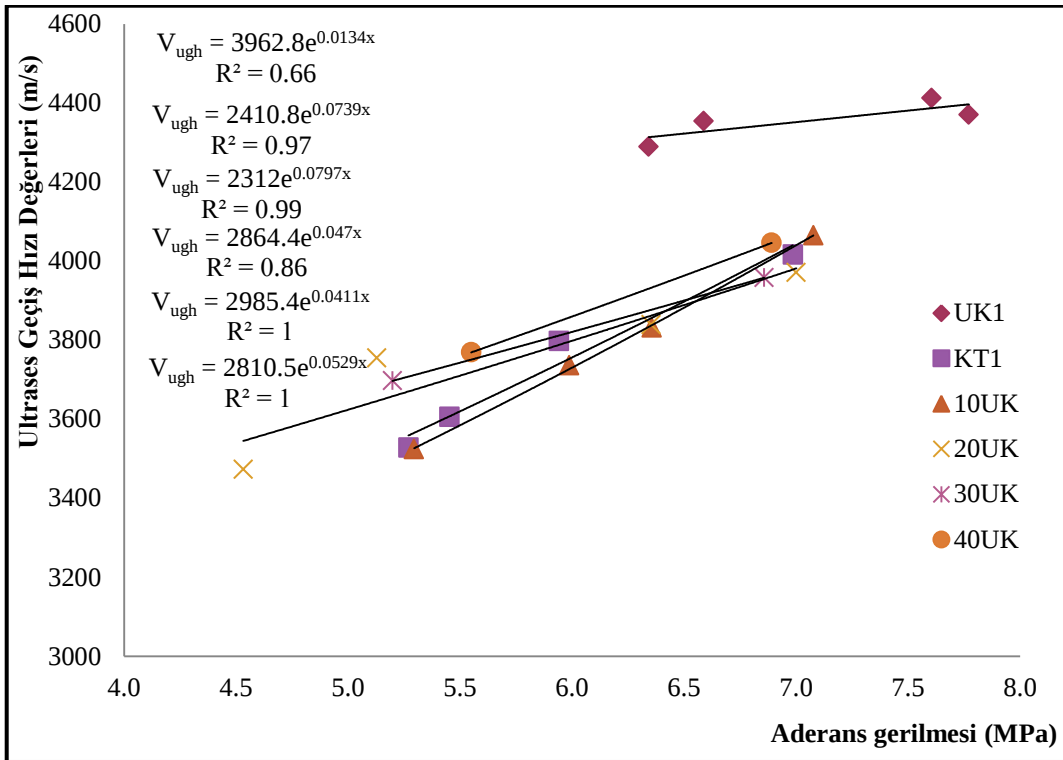
Şekil 4.76. Rölatif ultrases geçiş hızı - kapiler su emme katsayısı regresyon analizi

4.3.12. Rölatif Ultrases Geçiş Hızı - Aderans Gerilmesi

Rölatif ultrases geçiş hızı ile aderans gerilmesi arasındaki korelasyon Şekil 4.77’de, regresyon analizi Şekil 4.78’de gösterilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre katkı olarak kullanılan mineral katkı oranının artması, UGH ve aderans değerlerinin ikisinde de azalmaya neden olmuştur. Aşağıdaki grafiklerde bu yakın ilişki görülmektedir. Mineral katkı dozajlarına göre oluşturulan her grup kendi içinde incelendiğinde UK1 grubunda %20 oranına kadar UK kullanımı aderans değerlerinin kontrol karışımı değerlerinden yüksek olmasına neden olmuştur. 80C20UK karışımından sonra ise kontrol karışımından düşük değerler almıştır. UK1 grubundaki UGH değerlerinin ise tümü kontrol karışımı değerlerinden yüksektir. KT1 grubunda UGH ve aderans gerilmesi arasında çok düzenli bir azalma benzerliği gözlenmiştir. Her iki özelliğin aynı oranlardaki mineral katkı kullanımlarına göre aynı davranışı gösterdikleri anlaşılmıştır. Üçlü sistem kullanımında değerlerde azalma eğilimi devam etmiş her iki özellik en düşük değerlerini 20C20UK60KT karışımında almıştır. 30UK ve 40UK gruplarında çimento kullanımı %30’un altına düşüp, toplam mineral katkı oranı %70-80 gibi yüksek değerlere ulaşıncaya aderans dayanımları 5 MPa civarında değerler olarak belli bir aralıkta durmuştur. UGH’ları ise yüksek dozajlı çimento içeren karışımlardan çok daha düşük değerler almıştır. Yüksek dozajlarda mineral katkı kullanımı durumunda, katkının her %10 oranında artması hem aderansı hem de UGH değerlerini daha fazla etkilemiştir. Elde edilen sonuçların incelenmesi UGH ve aderansın doğru orantılı olarak çok yüksek bir korelasyona sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 4.78’de verilen regresyon analizi grafiği incelendiğinde $R=0.815-0.999$ arasında değerler almıştır. Bu durumda iki özellik arasında yüksek bir bağıntı güvenilirliği olduğunu göstermektedir. UK1 grubu için bulunan denklem örnek alındığında; $V_{ugh}=3962.8e^{0.0134x}$ bulunmuştur. Diğer gruplara ait denklemler Şekil 4.78’deki grafikte verilmiştir.



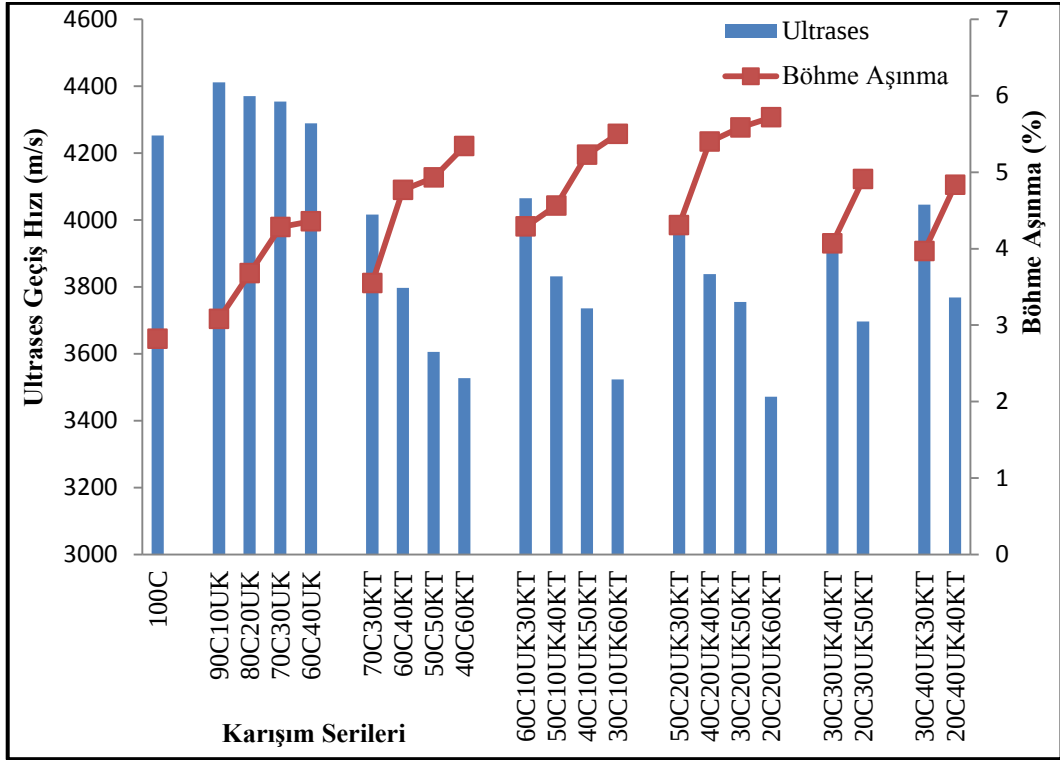
Şekil 4.77. Rölatif ultrases geçiş hızı - aderans gerilmesi değerleri korelasyonu



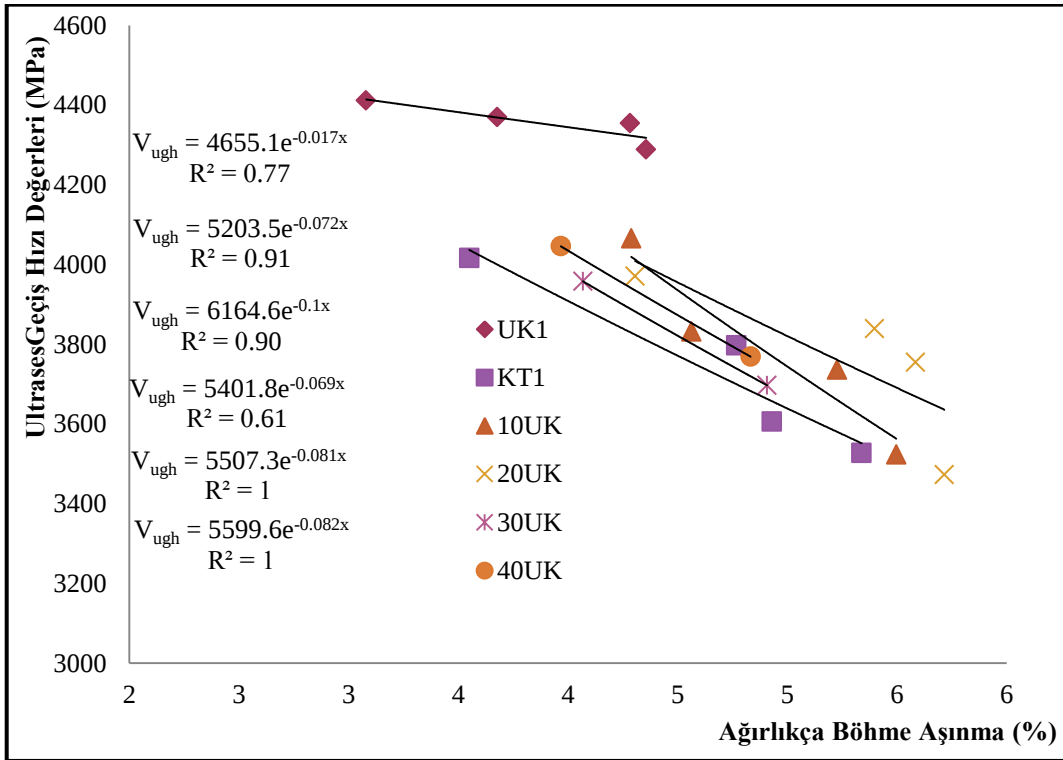
Şekil 4.78. Rölatif ultrases geçiş hızı - aderans gerilmesi regresyon analizi

4.3.13. Rölatif Ultrases Geçiş Hızı - Böhme Aşınması

Ultrases Geçiş Hızı ile Böhme aşınma oranları arasındaki korelasyon Şekil 4.79’da, regresyon analizleri Şekil 4.80’de verilmiştir. Genel olarak mineral katkı oranının artması UGH’de azalmaya neden olurken, Böhme aşınma oranlarında artmaya neden olmuştur. Her grup kendi içinde incelendiğinde ise UK1 grubundaki bütün karışımlarda UK ikame miktarı arttıkça aşınma sistemli bir şekilde artmıştır. Sadece 60C40UK karışımı diğer üç karışıma göre daha az bir oranda artma göstermiştir. Bu grupta UGH ise lineere yakın düzgün bir şekilde ve küçük oranlarda azalma eğilimi göstermiştir. KT1 grubunda KT katkı miktarı artarken UGH değerlerinde düzenli bir azalma görülmüştür. Aşınma değerlerinde KT oranı %30’dan %40’a çıktığında artış hızlı olurken diğer üç numunede daha az oranda görülmüştür. Üçlü sistem kullanılan karışım gruplarında çimento yerine ikame edilen mineral oranı artarken, UGH’de hızlı düşüş ve kapilarite’de hızlı artışlar meydana gelmiştir. Bunlardan 20C20UK60KT karışımında aşınma artışı en yüksek düzeye çıkmış, UGH ise en düşük hız seviyesine düşmüştür. Özellikle KT kullanımının %60 gibi yüksek değerlere ulaşınca UGH en düşük seviyelere düşmüş, aşınma ters orantılı olarak en yüksek seviyelere çıkmıştır. Şekil 4.80’de verilen regresyon analizi grafiği incelendiğinde R korelasyon katsayısı 0.782-0.951 arasında değerler almıştır. Bu değerler regresyon analizi için yüksek güvenilirlikte değerlerdir. UK1 grubu için bulunan denklem örnek alındığında; $V_{ugh}=4655.1e^{-0.017x}$ bulunmuştur. Diğer gruplara ait denklemler Şekil 4.80’deki grafikte verilmiştir.



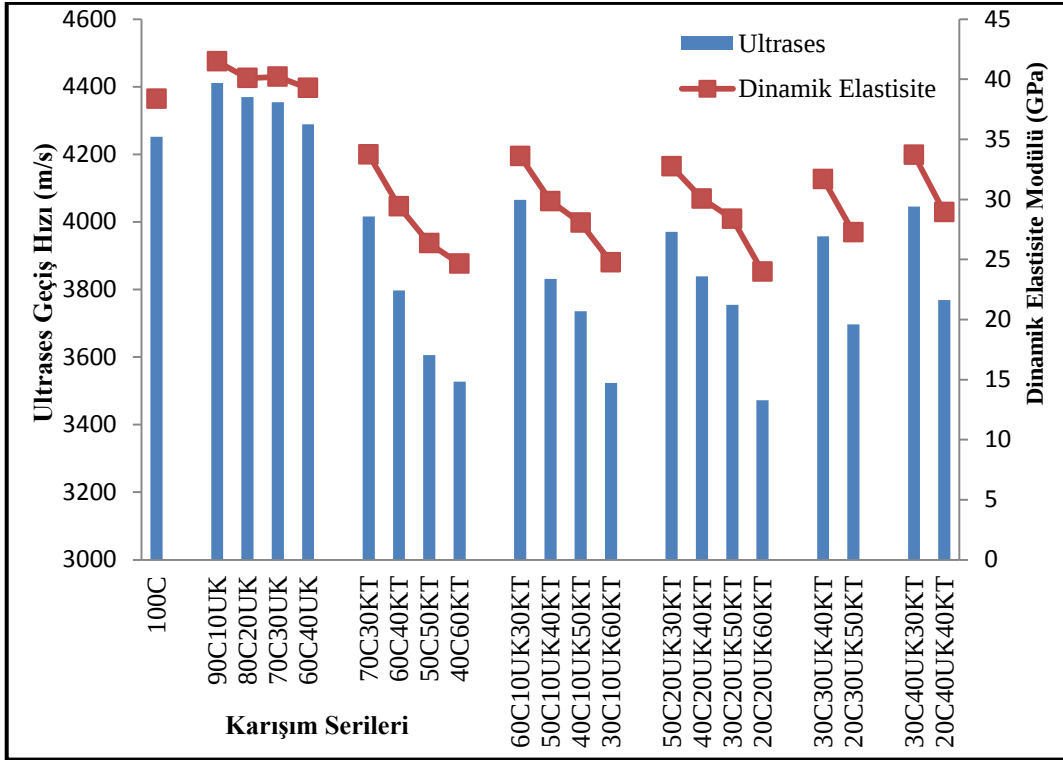
Şekil 4.79. Rölatif ultrases geçiş hızı - Böhme aşınması ağırlık kaybı oranları korelasyonu



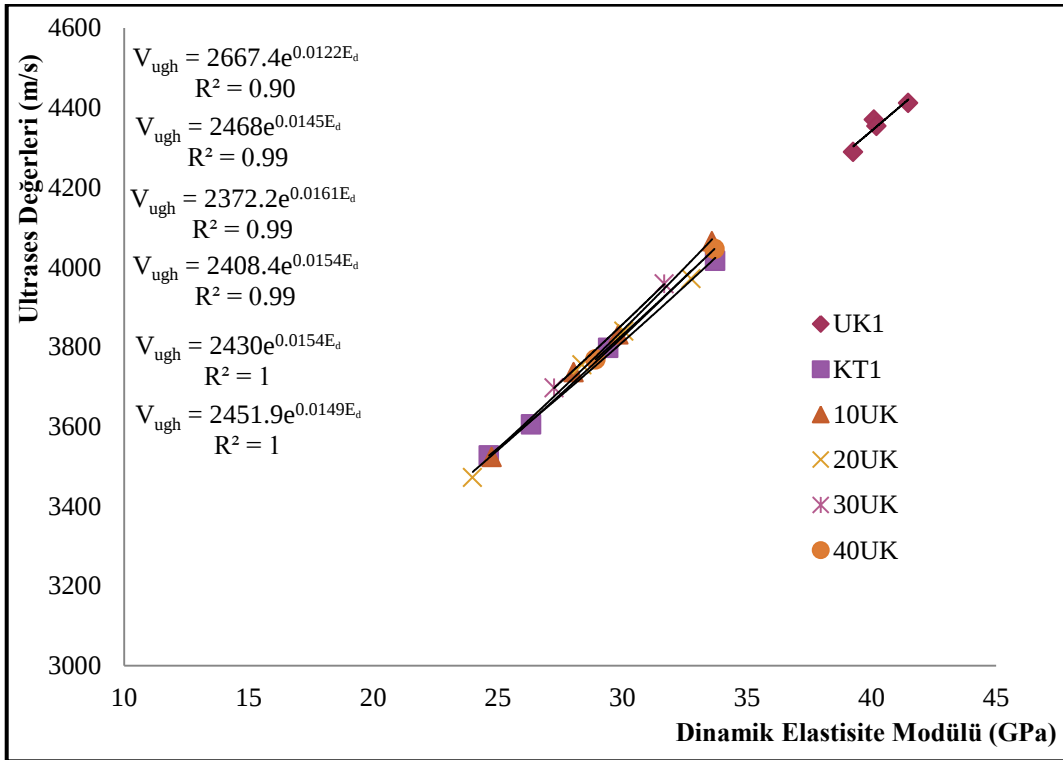
Şekil 4.80. Rölatif ultrases geçiş hızı - Böhme aşınması ağırlık kaybı oranları regresyon analizi

4.3.14. Rölatif Ultrases Geçiş Hızı - Dinamik Elastisite Modülü

Rölatif ultrases geçiş hızı ile dinamik elastisite modülü arasındaki korelasyon Şekil 4.81’de, regresyon analizi Şekil 4.82’de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bağlayıcı olarak kullanılan mineral katkı oranlarının artması UGH ve DEM değerlerinde azalmaya neden olmuştur. Aşağıdaki grafiklerde bu bağıntı görülmektedir. Mineral katkı dozajlarına göre oluşturulan her grup kendi içinde incelendiğinde; UK kullanımı hem UGH hem de DEM değerlerinin hepsinin kontrol karışımı değerinden yüksek olmasına neden olmuştur. KT1 grubu ve üçlü sistem grupları incelendiğinde; sertleşmiş harçta en çok benzerlik UGH ve DEM değerleri arasında gözlenmiştir. Her iki özellik aynı oranlardaki mineral katkı kullanımlarına göre hemen her dozajda aynı davranışı göstermişlerdir. Üçlü sistem kullanımında her iki değerde azalma eğilimi devam etmiş, her iki özellik en düşük değerlerini 20C20UK60KT karışımında almıştır. Özellikle KT kullanımının %50 oranının üzerine çıktığı durumlarda UGH ve DEM değerleri en düşük değerleri görmüştür. Yüksek dozajlarda mineral katkı kullanımı sırasında mineral katkı kullanımının %10 artması hem UGH ve DEM değerlerini düşük dozajda mineral katkı ikamesine göre daha fazla etkilemiştir. Elde edilen sonuçların incelenmesi UGH ve aderansın doğru orantılı olarak çok yüksek korelasyona sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 4.82’de verilen regresyon analizi grafiği incelendiğinde $R=0.947-0.999$ arasında değerler almıştır. Bu durumda iki özellik arasında çok yüksek bir bağıntı güvenilirliği olduğunu göstermektedir. UK1 grubu için bulunan denklem örnek alındığında; $V_{ugh}=2667.4e^{0.0122E_d}$ bulunmuştur. Diğer gruplara ait denklemler Şekil 4.82’deki grafikte verilmiştir.



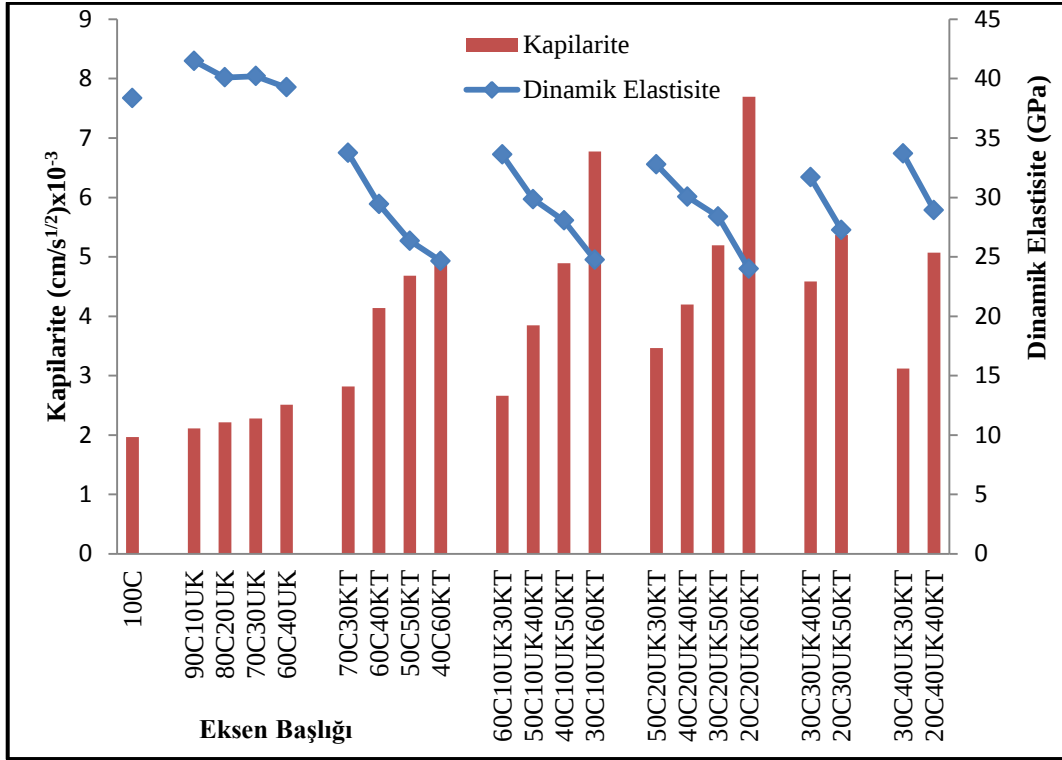
Şekil 4.81. Rölatif ultrases geçiş hızı - dinamik elastisite modülü değerleri korelasyonu



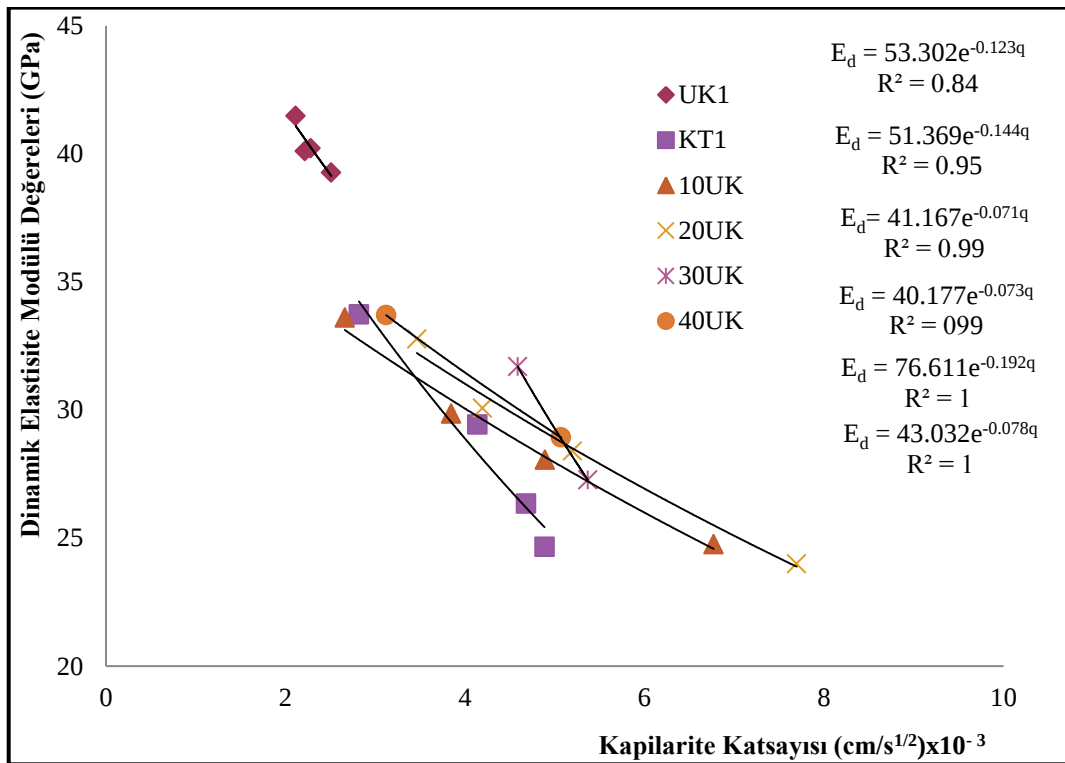
Şekil 4.82. Rölatif ultrases geçiş hızı - dinamik elastisite modülü regresyon analizi

4.3.15. Kapiler Su Emme Katsayısı - Dinamik Elastisite Modülü

Kapiler su emme katsayısı ile dinamik elastisite modülü arasındaki korelasyon Şekil 4.83'te, regresyon analizi Şekil 4.84'te gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bağlayıcı olarak kullanılan mineral katkı oranlarının artması KSEK değerlerinde artmaya, DEM değerlerinde azalmaya neden olmuştur. Aşağıdaki grafiklerde bu bağıntı görülmektedir. Her grup kendi içinde incelendiğinde UK1 grubunda, UK kullanımı hem KSEK hem de DEM değerlerinin kontrol karışımı değerlerinden yüksek olmasına neden olmuştur. KT1 grubu ve üçlü sistem grupları incelendiğinde; KSEK ve DEM değerleri arasında davranış olarak ters orantılı benzerliğin olduğu gözlenmiştir. Kapilarite lineer bir artış gösterirken DEM buna orantılı lineer azalma davranışı göstermiştir. Elde edilen değerlere göre en düşük DEM değerlerinin elde edildiği 20C20UK60KT karışımında en büyük KSEK değerine ulaşılmıştır. Özellikle KT kullanımının %50 oranının üzerine çıktığı durumlarda KSEK hızlı yükselmiş ve DEM değerleri en düşük değerleri görmüştür. Yüksek dozajlarda mineral katkı kullanımı sırasında mineral katkı kullanımının %10 artması hem KSEK ve DEM değerlerini düşük dozajda mineral katkı ikamesine göre daha fazla etkilemiştir. Elde edilen sonuçların incelenmesi KSEK ve aderansın ters orantılı olarak çok yüksek bir korelasyona sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 4.84'te verilen regresyon analizi grafiği incelendiğinde $R=0.917-0.994$ arasında değerler almıştır. Bu durumda iki özellik arasında çok yüksek bir bağıntı güvenilirliği olduğunu göstermektedir. UK1 grubu için bulunan denklem örnek alındığında; $E_d=53,302e^{-0,123q}$ bulunmuştur. Diğer gruplara ait denklemler Şekil 4.84'teki grafikte verilmiştir.



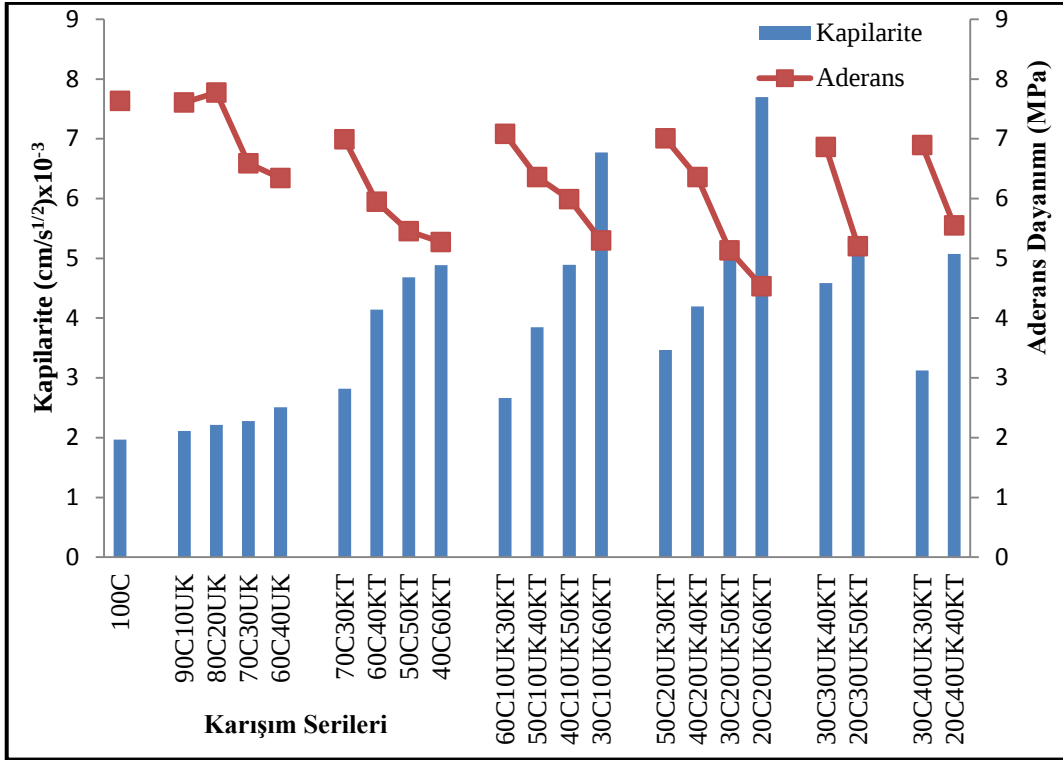
Şekil 4.83. Kapiler su emme katsayısı - dinamik elastisite modülü değerleri korelasyonu



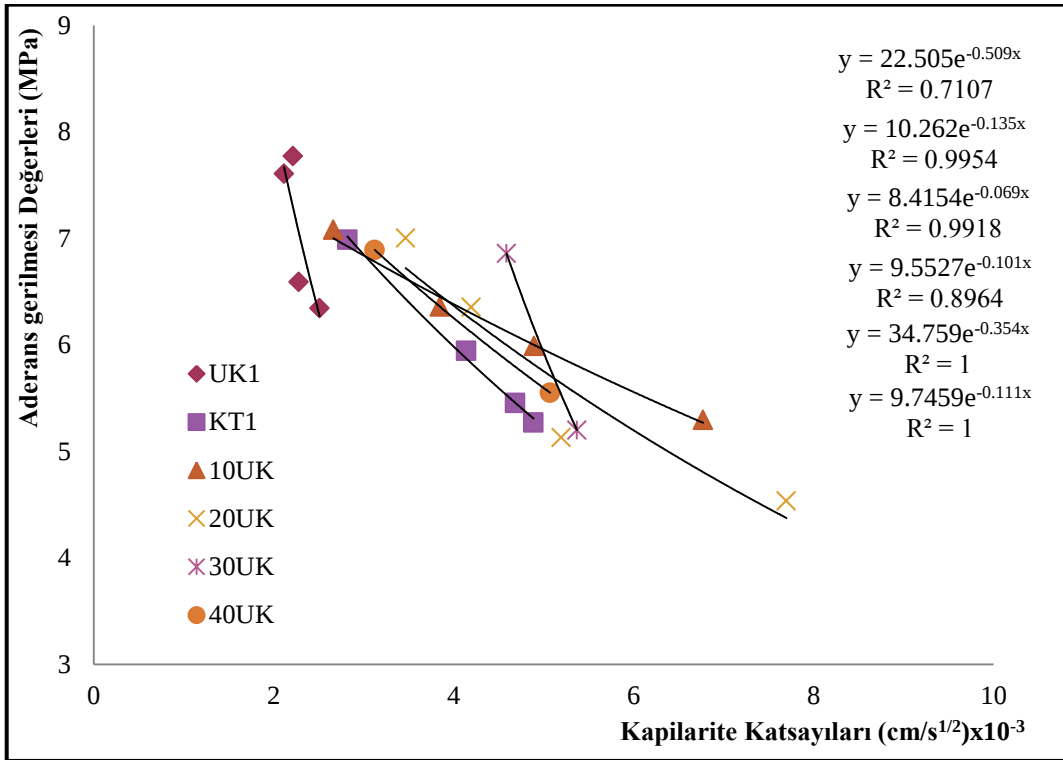
Şekil 4.84. Kapiler su emme katsayısı - dinamik elastisite modülü regresyon analizi

4.3.16. Kapiler Su Emme Katsayısı - Aderans Gerilmesi

Kapiler su emme katsayısı ile aderans gerilmesi arasındaki korelasyon Şekil 4.85'te, regresyon analizi Şekil 4.86'da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bağlayıcı olarak kullanılan mineral katkı oranlarının artması KSEK değerlerinde artmaya, aderans değerlerinde azalmaya neden olmuştur. Bu genel değerlendirmenin yanı sıra her grup kendi içinde incelendiğinde ikili sistem gruplardan UK1 grubunda, UK kullanım miktarının artmasıyla KSEK değerlerinde oluşan artma düşük oranlarda gerçekleşmiştir. KT1 grubu ve üçlü sistem grupları incelendiğinde; KSEK ve aderans değerleri arasında davranış olarak ters orantılı benzerliğin olduğu gözlenmiştir. Kapilarite lineer bir artış gösterirken aderans buna ters orantılı lineer azalma davranışı göstermiştir. Elde edilen değerlere göre en düşük aderans değerlerinin elde edildiği 20C20UK60KT karışımında en büyük KSEK değerine ulaşılmıştır. Özellikle KT kullanımının %50 oranının üzerine çıktığı durumlarda KSEK ani yükselmiş ve aderans değerleri en düşük değerleri görmüştür. Yüksek dozajlarda mineral katkı kullanımı sırasında mineral katkı kullanımının %10 artması hem KSEK ve aderans değerlerini düşük dozajda mineral katkı ikamesine göre daha fazla etkilemiştir. Elde edilen sonuçların incelenmesi KSEK ve aderansın ters orantılı olarak çok yüksek bir korelasyona sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 4.86'da verilen regresyon analizi grafiği incelendiğinde $R=0.843-0.998$ arasında değerler almıştır. Bu durumda iki özellik arasında çok yüksek bir bağıntı güvenilirliği olduğunu göstermektedir. UK1 grubu için bulunan denklem örnek alındığında; $y=22.505e^{-0,509x}$ bulunmuştur. Diğer gruplara ait denklemler Şekil 4.86'daki grafikte verilmiştir.



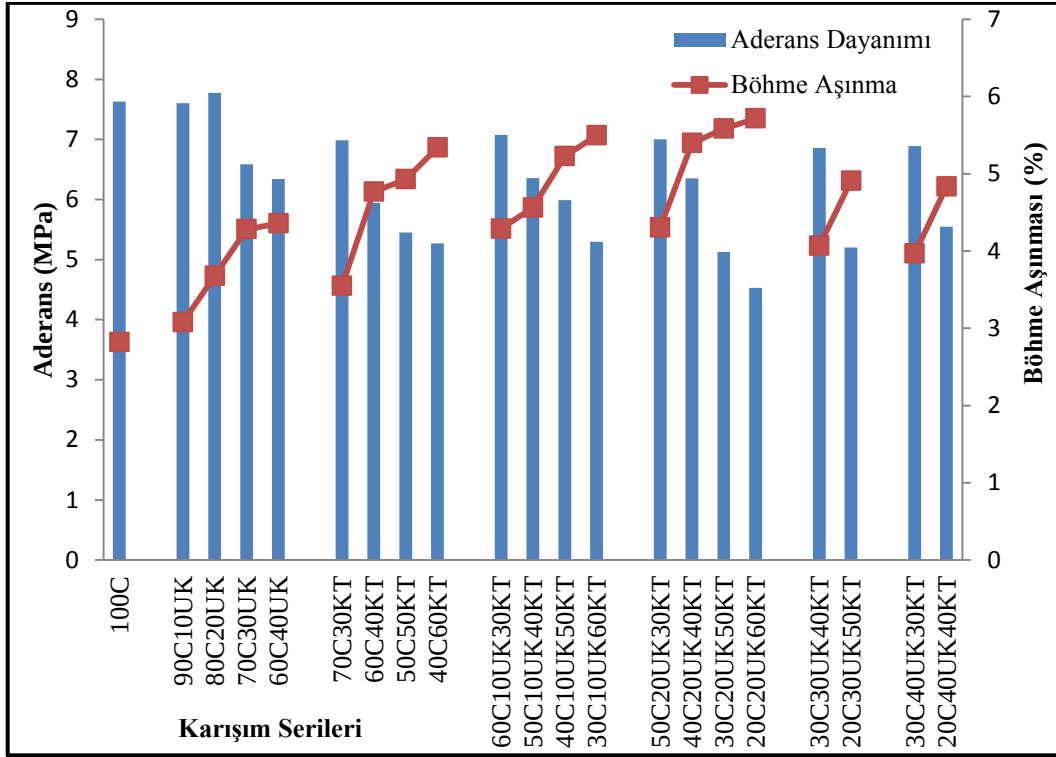
Şekil 4.85. Kapiler su emme katsayısı - aderans gerilmesi değerleri korelasyonu



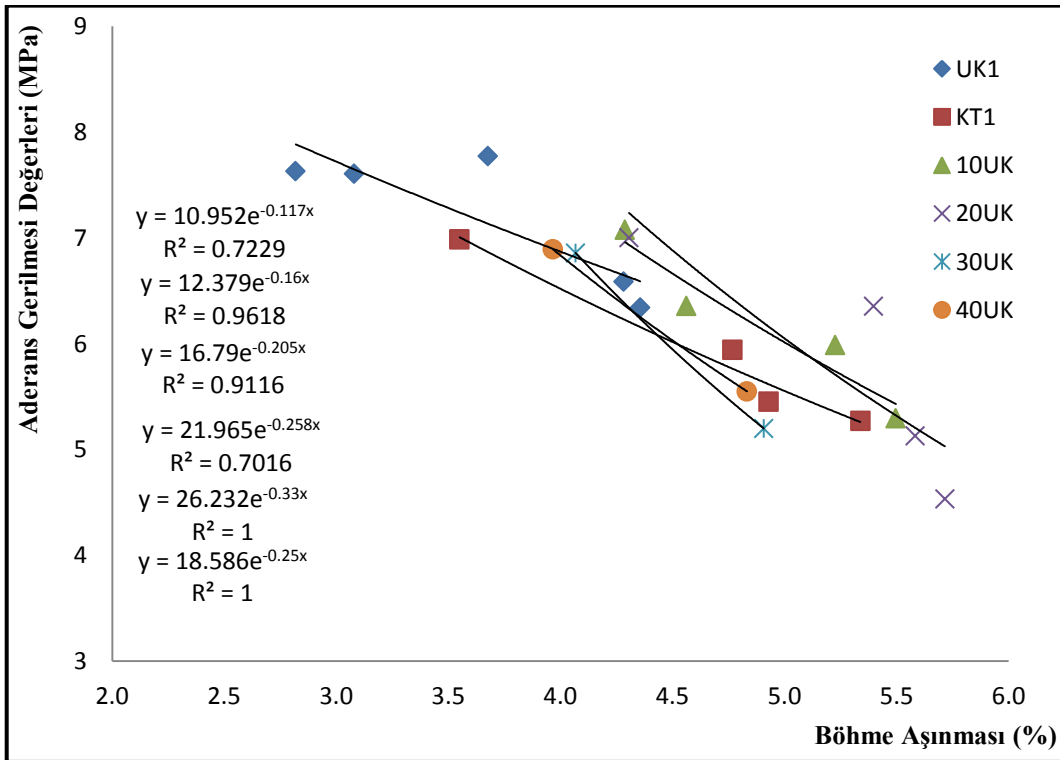
Şekil 4.86. Kapiler su emme katsayısı - aderans gerilmesi regresyon analizi

4.3.17. Aderans Gerilmesi - Böhme Aşınması

Aderans gerilmesi ile Böhme aşınma oranları arasındaki korelasyon Şekil 4.87’de, regresyon analizi Şekil 4.88’de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bağlayıcı olarak kullanılan mineral katkı oranlarının artması aşınma değerlerinde artmaya, aderans değerlerinde azalmaya neden olmuştur. Bu genel değerlendirmenin yanı sıra her grup kendi içinde incelendiğinde ikili sistem gruplardan UK1 grubunda, UK kullanım miktarının artmasıyla aşınma değerlerinde %30UK oranına kadar hızlı %40UK oranında yavaş artma gerçekleşmiştir. Aderans değerlerinde ise %10 kullanımında değerde artma sonra düşüş meydana gelmiştir. Bu durum istisnai bir durumdur. KT1 grubu ve üçlü sistem grupları incelendiğinde; aşınma ve aderans değerleri arasında ters orantılı davranışın olduğu gözlenmiştir. Aşınma miktarlarında lineer bir artış gösterirken aderans lineer azalma davranışı göstermiştir. Elde edilen değerlere göre en düşük aderans değerlerinin elde edildiği 20C20UK60KT karışımında en büyük aşınma, ikinci en büyük aderans değerinin elde edildiği kontrol değerinde ise en küçük aşınma değerinin gerçekleştiği görülmüştür. Özellikle KT kullanımının %50 oranının üzerine çıktığı durumlarda aşınmada yüksek değerler, aderansta düşük değerler görülmüştür. Yüksek dozajlarda mineral katkı kullanımının %10 artması aşınma ve aderans değerlerini düşük dozajda mineral katkı kullanımına göre daha fazla etkilemiştir. Elde edilen sonuçların incelenmesi aşınma ve aderansın ters orantılı olarak yüksek bir korelasyona sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 4.88’de verilen regresyon analizi grafiği incelendiğinde $R=0.838-0.981$ arasında değerler almıştır. Bu durum iki özellik arasında yüksek bir bağıntı güvenilirliği olduğunu göstermektedir. UK1 grubu için bulunan denklem örnek alındığında; $y=10,952e^{-0,117x}$ bulunmuştur. Diğer gruplara ait denklemler Şekil 4.88’deki grafikte verilmiştir.



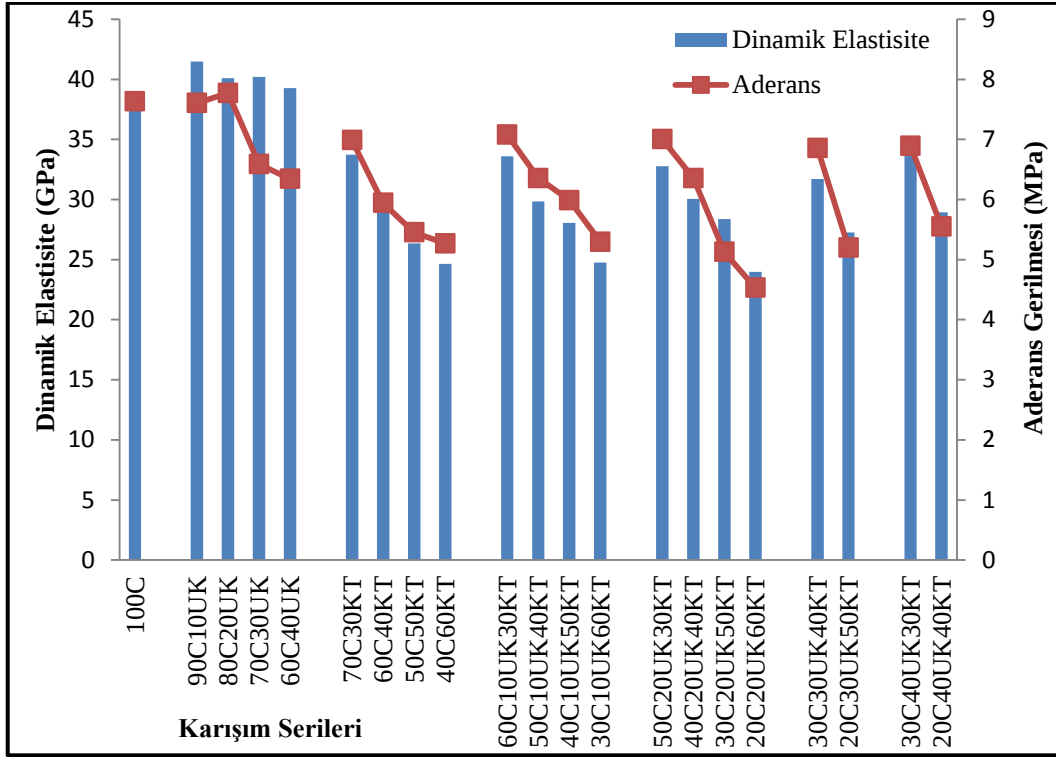
Şekil 4.87. Aderans gerilmesi - Böhme aşınması ağırlık kaybı oranları korelasyonu



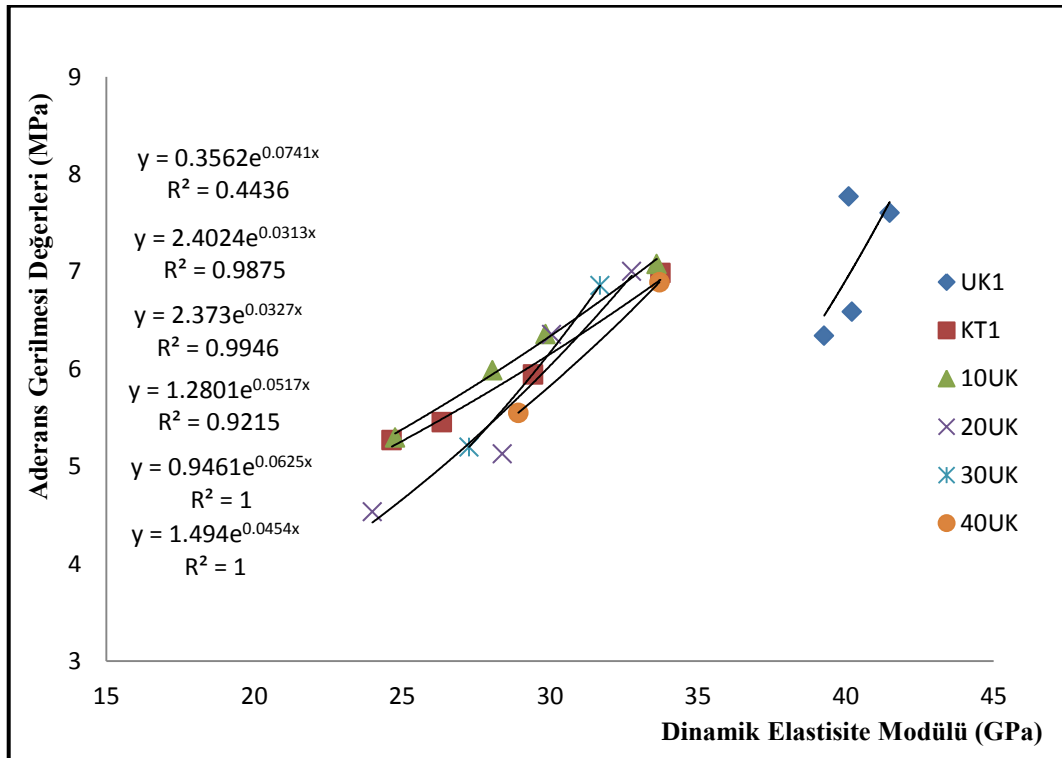
Şekil 4.88. Aderans gerilmesi - Böhme aşınması ağırlık kaybı oranları regresyon analizi

4.3.18. Aderans Gerilmesi - Dinamik Elastisite Modülü

Aderans gerilmesi ile dinamik elastisite modülü arasındaki korelasyon Şekil 4.89’da, regresyon analizi Şekil 4.90’da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bağlayıcı olarak kullanılan mineral katkı oranlarının artması DEM ve aderans değerlerinde azalmaya neden olmuştur. Bu genel değerlendirmenin yanı sıra her grup kendi içinde incelendiğinde ikili sistem gruplardan UK1 grubunda, UK kullanım miktarının artmasıyla DEM değerlerinde %30UK oranına kadar hızlı %40UK oranında yavaş artma gerçekleşmiştir. Aderans değerlerinin ise %10 kullanımında değerde önce artma sonra düşüş meydana gelmiştir. KT1 grubu ve üçlü sistem grupları incelendiğinde; DEM ve aderans değerleri arasında davranış olarak doğru orantılı benzerliğin olduğu gözlenmiştir. DEM değerlerinde ve aderans değerlerinde doğru orantılı lineer azalma davranışı görülmüştür. Elde edilen değerlere göre 20C20UK60KT karışımında en düşük DEM ve aderans değerleri oluşmuş, 90C10UK karışımında ise en büyük değerlere ulaşılmıştır. Özellikle KT kullanımının %50 oranının üzerine çıktığı durumlarda DEM ve aderans en düşük değerler görmüştür. Yüksek dozajlarda mineral katkı kullanımı sırasında mineral katkı kullanımının %10 artması DEM ve aderans değerlerini düşük dozajda mineral katkı ikamesine göre daha fazla etkilemiştir. Elde edilen sonuçların incelenmesi DEM ve aderansın doğru orantılı olarak UK1 grubu hariç yüksek bir korelasyona sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 4.90’da verilen regresyon analizi grafiği incelendiğinde $R=0.666-0.997$ arasında değerler almıştır. Bu durumda UK1 grubu hariç iki özellik arasında yüksek bir bağıntı güvenilirliği olduğunu göstermektedir. UK1 grubu için bulunan denklem örnek alındığında; $y=0.3562e^{0.0741x}$ bulunmuştur. Diğer gruplara ait denklemler Şekil 4.90’daki grafikte verilmiştir.



Şekil 4.89. Aderans gerilmesi - dinamik elastisite modülü değerleri korelasyonu

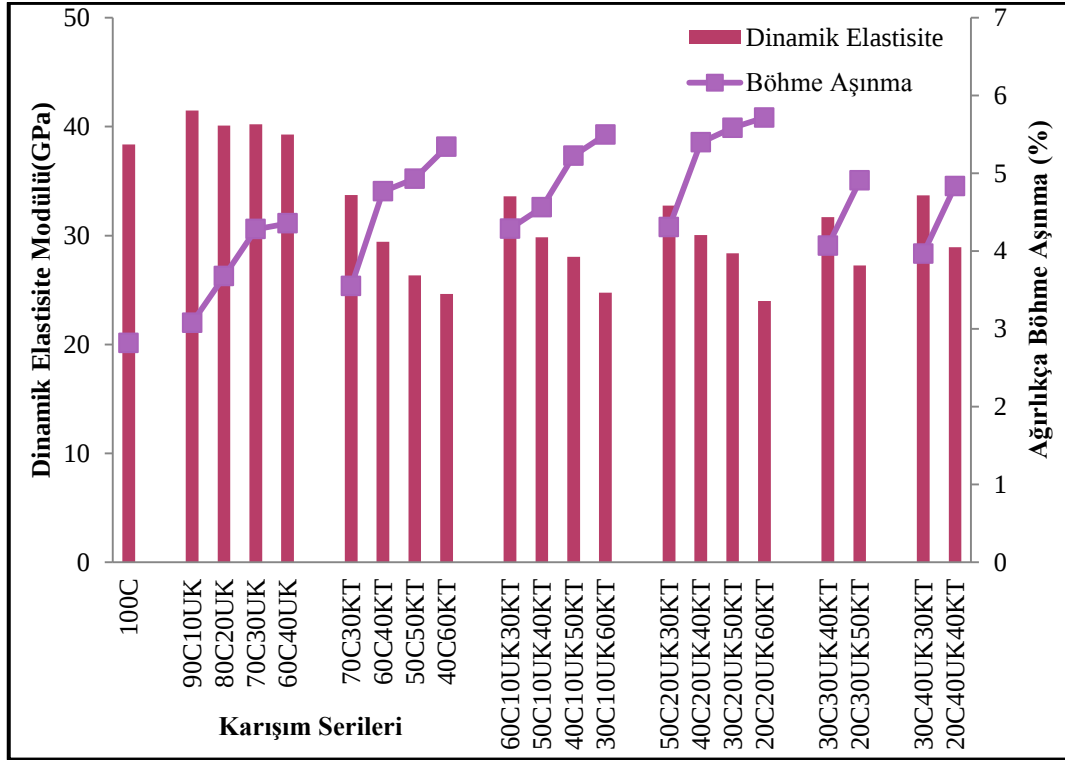


Şekil 4.90. Aderans gerilmesi - dinamik elastisite modülü değerleri regresyon analizi

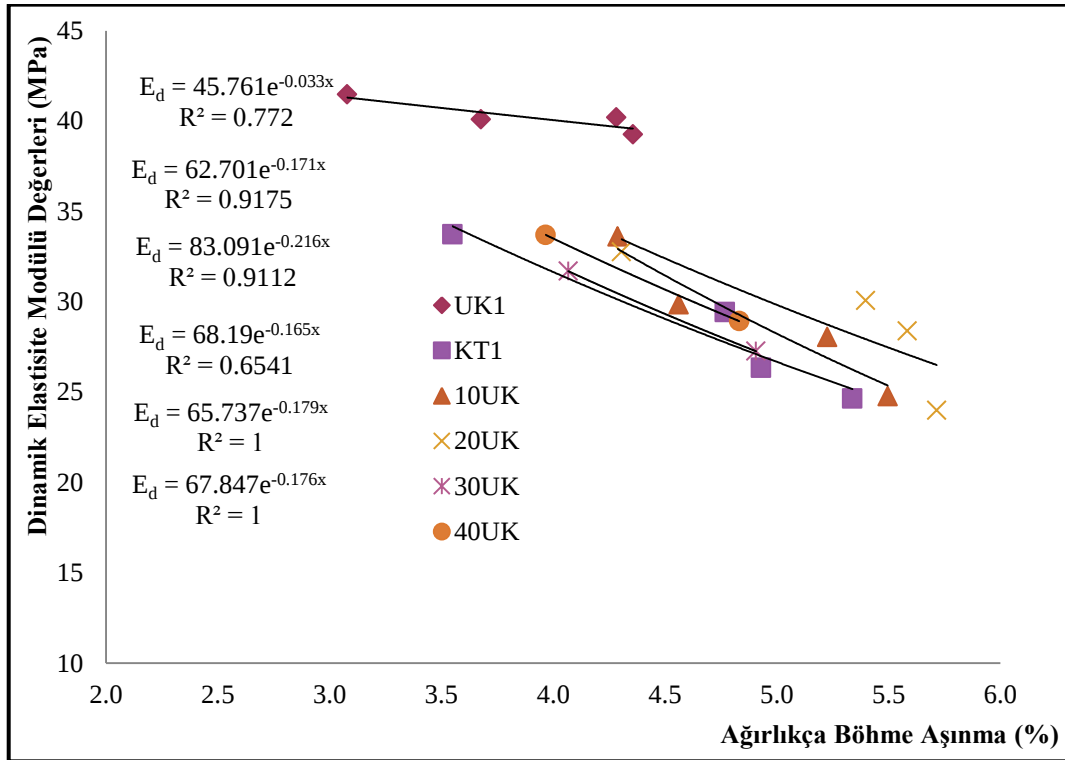
4.3.19. Dinamik Elastisite Modülü – Böhme Aşınması

Dinamik elastisite modülü ile Böhme aşınma oranları arasındaki korelasyon Şekil 4.91’de, regresyon analizi Şekil 4.92’de gösterilmiştir. Aşağıda verilen grafiklere göre bağlayıcı olarak kullanılan mineral katkı oranlarının artması aşınma değerlerinde artmaya, belli dozajda UK katkılı harçlar hariç DEM değerlerinde azalmaya neden olmuştur. Bu genel değerlendirmenin yanı sıra her grup kendi içinde incelendiğinde ikili sistem gruplarından UK1 grubunda, UK kullanım miktarının artmasıyla aşınma değerlerinde %30UK oranına kadar hızlı, %40UK oranında yavaş artma gerçekleşmiştir. DEM değerlerinde ise bütün UK oranlarında değerler kontrol karışımından büyük olmakla birlikte mineral katkı oranı arttıkça az da olsa düşüşler meydana gelmiştir. KT1 grubu ve üçlü sistem grupları incelendiğinde; aşınma ve DEM değerleri arasında davranış olarak ters orantının olduğu gözlenmiştir. Aşınma miktarlarında lineer bir artış gösterirken DEM buna orantılı lineer azalma davranışı göstermiştir. Elde edilen değerlere göre en düşük DEM değerlerinin elde edildiği 20C20UK60KT karışımında en büyük aşınma meydana gelmiştir. En büyük DEM değerinin 90C10UK karışımında en küçük aşınma değerinin ise kontrol karışımında gerçekleştiği görülmüştür. Özellikle KT kullanımının %50 oranının üzerine çıktığı durumlarda aşınmada yüksek değerler, DEM’de düşük değerler görülmüştür. Yüksek dozajlarda mineral katkı kullanımı sırasında mineral katkı kullanımının %10 artması aşınma ve DEM değerlerini düşük dozajda mineral katkı ikamesine göre daha fazla etkilemiştir. Elde edilen sonuçların incelenmesi aşınma ve DEM arasında ters orantılı olarak yüksek bir korelasyon olduğunu ortaya çıkarmıştır. Şekil 4.92’de verilen regresyon analizi grafiği incelendiğinde $R=0.809-0.958$ arasında değerler almıştır. Bu durumda iki özellik arasında güçlü bir bağıntı olduğunu göstermektedir. UK1 grubu için bulunan denklemi örnek alırsak; $E_d=45.761e^{-0,033x}$ bulunmuştur. Diğer gruplara ait denklemler Şekil 4.92’deki grafikte verilmiştir.

Mineral katkı miktarının arttırılmasının harcın incelenen özellikleri üzerindeki etkilerinin referans/kontrol karışımı numunelerine (%100 çimento) göre değişim oranları Tablo 4.5’te bir arada gösterilmiştir.



Şekil 4.91. Dinamik elastisite modülü - Böhme aşınması ağırlık kaybı oranları korelasyonu



Şekil 4.92. Dinamik elastisite modülü - Böhme aşınması ağırlık kaybı oranları regresyon analizi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

- Çimento, uçucu kül ve kireçtaşı tozu katkılı karışımlarda çökme-yayılma deneyi yapılırken, su miktarı ve akışkanlaştırıcı sabit tutulduğunda segregasyon için en dikkat edilecek katkı KT'dir.
- Taze harçta birim hacim ağırlığını en çok düşüren katkı UK'dir. Buna rağmen %20-%30 oranlarında UK kullanıldığında harcın bütün özelliklerinde iyileştirmeler olmuştur.
- Kompasiteyi arttırıp, poroziteyi en çok düşüren bağlayıcı çimento olmuştur. Poroziteyi en çok arttıran bağlayıcı ise UK olmuştur.
- Aynı kimyasal katkı oranı kullanılarak elde edilen ve EFNARC 2002'ye uygun reolojik özelliklere sahip harçlarda mineral katkı arttıkça genel olarak taze harç birim hacim ağırlığı ile dinamik elastisite modülü doğru orantılı olarak azalmıştır.
- Mineral katkı oranı arttıkça porozitenin arttığı, dinamik elastisite modülü değerlerinin ise ters orantılı olarak azaldığı gözlenmiştir.
- Viskozite değeri ölçümlerinde açısız hız (devir/dakika) arttıkça bütün KYH karışımlarında tiksotropik özellik gösterilmesi sayesinde viskozite düşmüştür.
- Viskozite özelliği olarak tüm ölçüm süreleri dikkate alındığında en iyi davranışı UK göstermiştir. UK kullanıldığında karışımın homojenliği daha iyi korunmuştur. Viskoz özelliğin korunmasında sıralama UK>CEM I>KT şeklinde olmuştur. Karışım kompozisyonu iyi ayarlanamadığında KT ayrılmaya çok yatkındır.
- Uygun dozajda bağlayıcı kullanılarak ve uygun karışım kompozisyonu oluşturulduğunda 90 günlük su kürü sonunda C80 dayanımı elde edilebilmiştir. Çimento oranı %20 oranına düştüğünde bile C16 dayanımına ulaşılabilmiştir.
- UK gibi puzolanik katkılar kullanıldığında sertleşmiş harç özelliklerinden basınç ve eğilmede çekme dayanımlarının erken ve ileri yaşlar arasındaki farkı çok büyük olmuştur. Numuneler 28. günden sonra da büyük dayanım kazanmışlardır. Büyük oranda mineral katkı kullanılan karışımlarda küre tabi tutulan 90 günlük numune ile 7 günlük numunenin basınç dayanımları arasında 3 kat dayanım farkı meydana gelmiştir.

- KT katkılı karışımlar mineral yapıları nedeniyle dayanımlarının büyük bölümünü 28 günlük kür sonucunda kazanmıştır. UK katkılı karışımlar ise daha fazla puzolanik özellik gösterilmesi nedeniyle 28-90 günlük sürede de oldukça yüksek değer artışına sahip olmuştur.
- Kontrol karışımında çekme/basınç dayanım oranı 7., 28. ve 90. günler için yaklaşık %10 değerine ulaşmıştır. İkili sistem gruplardan PÇ+UK karışımları bu değere yakın sonuçlar vermiştir. KT kullanımı ise bu oranı yükseltmiştir.
- UK kullanımı ultrases geçiş hızını arttırmış, KT kullanımı ise ultrases geçiş hızını azaltmıştır. UK+KT karışım gruplarında da iyi değerler elde edilmiştir.
- Dinamik elastisite modülü incelemesinde en yüksek değerleri UK katkılı karışımlar almışken KT katkılı karışımlar en düşük değerleri almıştır.
- UK kullanımı, ağırlıkça toplam su emme kapasitesini arttırmazken, KT kullanımı ise CaCO_3 içeren bir mineral olduğundan toplam su emme kapasitesini arttırarak olumsuz bir eğilim göstermiştir.
- Mineral katkı oranı arttıkça kapiler su emme katsayıları ile toplam su emme kapasiteleri benzer eğilim göstererek artmıştır.
- Mineral katkılar sadece bağlayıcı olarak görev almamış ayrıca 125 mikron çapında çok ince tanecik yapısıyla en küçük boşlukları bile dolduracak şekilde çalışarak harç özelliklerini iyileştirmiştir.
- Çimentonun C_2S ve C_3S bileşenlerinin hidratasyonu sırasında esas hidratasyon ürünü kalsiyum silikat hidratların (C-S-H) yanında, harcın en zayıf halkası $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'de açığa çıkar. UK, bu zayıf kısım ile reaksiyona girdiğinden ve puzolanik etkiye sahip olduğundan harçtaki boşlukları doldurma etkisine sahiptir. Bu da dayanım ve geçirimsizliği de arttırmıştır.
- Genel olarak mineral katkı oranı artarken kuru özgül ağırlık ve yüzey kuru doygun özgül ağırlık doğru orantılı değerler alarak azalmıştır. Görünür özgül ağırlık ile görünür boşluk oranları ise bunlara ters orantılı olarak artmıştır.
- İkili sistem karışımlarda UK kullanımı kontrol karışımına göre görünür özgül ağırlık ve görünür boşluk oranlarını azaltmıştır. Fakat UK miktarı arttıkça bu avantaj kaybolmuştur.

- Aderans gerilmelerinde en etkili bağlayıcı çimento olurken, %20 UK kullanımı davranışı daha da iyileştirmiştir. %30 KT kullanımında ise tatmin edici sonuç alınmıştır.
- Böhme aşınma deneylerinde, boy kısalması yüzdeleri/ağırlıkça kayıp yüzdesi oranı %49 ile %72 arasında değişmiş olup ortalama %59 olmuştur. Bununla birlikte her iki kayıp oranı değerleri paralel davranış göstermiştir.
- Elde edilen deney sonuçları bir bütün olarak değerlendirildiğinde, UK'nin çimento ile ikili karışım grubundaki belli dozajları hariç incelenen bütün karışımlarda UK+KT mineral katkı oranı arttıkça taze birim hacim ağırlığı, viskozite, basınç dayanımı, çekme dayanımı, dinamik elastisite modülü, rölatif ultrases hız geçirgenliği, kuru özgül ağırlık, yüzey kuru suya doymun özgül ağırlık, aderans gerilmesi değerlerinde azalma, porozite, toplam su emme, kapiler su emme katsayıları, görünür özgül ağırlık, görünür boşluk oranı ve böhme aşınma değerlerinde ise artma görülmüştür.
- Deneylerde %50'nin üzerinde KT kullanımı bütün deneylerde ani düşmelere neden olmuştur. %30'un üzerindeki UK kullanımı da KT kadar olmasa da değer kayıplarına neden olmuştur. %40'ın altına düşen çimento oranı da tatmin edici sonuçlar vermemiştir.
- Deneylerden elde edilen sonuçlar arasında özellikle dayanım ve dayanıklılık değerleri arasında güçlü korelasyonlar bulunmuştur. Tüm bu özellikler arasında nicel olarak %90'dan fazla doğrulukla bağıntılar kurulabilmektedir. Bulunan bu bağıntılar sayesinde yapılardan tahribat olmadan yapısal bilgiler alınmak istendiğinde tahribatsız deney sonuçları incelenerek elde edilen değerler kullanılıp amaçlanan veriler elde edilebilir. Tam tersi bir durumda uzun zaman gerektiren dayanıklılık değerlerini bilmek gerekirse ve buna karşılık zaman kısıtlı ise tahribatlı deneyler özellikle de kırılma deneyleri yapılarak elde edilen korelasyonlar kullanılıp dayanıklılık değerleri yüksek doğrulukla bulunabilir.
- Kendiliğinden yerleşen harca, kireç taşı tozu, uçucu kül gibi mineral katkıları ve süperakışkanlaştırıcıların eklenmesi, harçta yüksek akıcılık, terlemenin azaltılması, kohezyon, işlenebilirlik, kompakte ve yüksek ayrışma direnci gibi özelliklerin iyi olması için faydalıdır.

- Harç üretiminde kullanılan ince agrega (kum), su ve çimento haricinde, karışıma katılan çimento miktarını düşürerek UK ve KT ilave etmek harç üretiminde çimento miktarının dolayısıyla maliyetin düşmesini sağlamaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bilgilere göre bağlayıcı olarak çimento miktarının optimum oranı yaklaşık %50 bulunmuştur. Bu orana göre çimentodan %50 kazanç sağlanmış olur. Ayrıca UK ikamesi ile harcın kalitesinde karışım miktarına bağlı olarak farklı iyileşmeler meydana getirmektedir. KT ise aynı zamanda erken dayanıma katkı yaparken agrega gibi davranıp filler malzeme olarak da görev yapmaktadır. Harç üretiminde uçucu kül ilavesi yapıldığında ilk dayanımlar katkısız kontrol harcına göre daha düşük çıkmıştır; ama son dayanımları katkısız harçlara göre daha iyi neticeler vermiştir.
- Karışımlarda, erken yaşlarda UK katkı miktarı arttıkça çekme ve basınç dayanımlarında kısmi kayıplar artmakta ve tüm uçucu kül katkılı numunelerin basınç ve çekme dayanımları referans karışımlarından düşük değerler almaktadır. Bu sonuç, UK katkısının basınç ve çekme dayanımlarını arttıran etkilerin görülmesi için gereken 7 günlük sürede ve klinkerin hidratasyonu ile açığa çıkan Ca(OH)_2 'nin, aynı sürede yeteri kadar oluşamamasından dolayı ortaya çıkmaktadır. UK kullanımı erken yaşta harcın dayanımını azaltmakta ve UK miktarı arttırıldıkça dayanım daha geç kazanılmaktadır.
- Çimentonun C_2S ve C_3S bileşenlerinin hidratasyonu sırasında esas hidratasyon ürünü kalsiyum silikat hidratların (C-S-H) yanında, harçun en zayıf halkası Ca(OH)_2 'de açığa çıkar. Puzolanlar işte bu zayıf kısım ile reaksiyona girerek hem kendi bağlayıcılık özelliklerini kazanır, hem de daha yoğun ve suda çözülmeyen bir yapıya dönüşür. Bu reaksiyon aylar yıllar sürebilen nispeten yavaş bir aktivitedir. Dolayısıyla, 7 ve 28 hatta 90 günlük dayanım için (CEM I 42,5+puzolan) toplamını salt bağlayıcı olarak değerlendirmek gerçekçi olmayabilir. Buna ek olarak yüksek inceliğe sahip puzolanlar harçtaki boşlukları doldurma etkisine sahip olmaları nedeniyle de dayanım ve geçirimsizliği de arttıırırlar.
- KYH, hazır beton uygulamaları ile beraber prefabrik beton dökümlerinde de tercih edilebilir. Ayrıca, karmaşık biçimli kalıplarda, kalıpların zor ulaşılabilir bölgelerinde, sık donatılı bölgelerde, hasar görmüş kolon ve kirişlerin onarılmasında tercih edilebilir.

- Mineral katkı kullanımı ile harcın birim maliyetinde ekonomik kazanç sağlanması, depolama maliyetinin azaltılması ve çevreye olan zararlı etkilerinin azaltılması, mineral katkının çimento ve beton sektöründe kullanımının önemini arttırmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- [1]. **Akman, M. S.**, 1987, Yapı Malzemeleri, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [2]. **Prof. Dr. M. Hulusi Özkul**, 2002, ‘Beton Teknolojisinde Bir Devrim: Kendiliğinden Yerleşen-Sıkışan Beton’, Hazır Beton, Temmuz Ağustos 2002, 64-71.
- [3]. **Türk K., Karataş M. Ve Ulucan Z. C.**, 2006, Farklı Oranlarda F sınıf Uçucu kül İçeren Kendiliğinden Yerleşen Betonun Dayanım Özellikleri, Fırat Üniversitesi ve Müh. Bil. Dergisi, cilt18 sayı 4.
- [4]. **Özkul H., Taşdemir M.A., Tokyay M., Uyan M.**, 1999, Her Yönüyle Beton. THBB Yayını, İstanbul.
- [5]. **Ekmekyapar, T., Örüng, İ.**, 2001, İnşaat Malzeme Bilgisi. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ofset Tesisi, 145, Erzurum.
- [6]. **ESCSI**, 1960, Lightweight Concrete (History, Application, Economics), Washington D.C.
- [7]. **Henrichsen, A.**, 2005, Design of Concrete for High Performance Structures, 6. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, Bildiriler kitabı, 23-32.
- [8]. **Taşdemir, M.A., Bayramov, F., İlki, A. ve Kocatürk, A.N.**, 2005, Çelik Tel Donatılı Çimento Esaslı Kompozitler, 6. Uluslararası Beton Kongresi, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 447-457.
- [9]. **Postacıoğlu, B.**, 1975, Yapı Malzemesi. İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları Sayı:1011, İstanbul.
- [10]. **Ersoy, U., Özcebe, G.**, 2001, Betonarme: Temel İlkeler, TS-500-200 ve Türk deprem Yönetmeliğine (1998) Göre Hesap. Evrim yayınevi, No:2, 816s. İstanbul.
- [11]. **Erdoğan, T.Y.**, Mayıs 2003, Beton, O.D.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü Matbaası, Ankara.
- [12]. **Murlin and Wilson**, 1952, Proceedings of the Geologists' Association, Volume 63, Issue 1, Pages 20-48, North Cornwall.
- [13]. **Illstom, J.M. and Domone, P.L.J.**, 2001, Construction Materials their nature and behaviour, Spon Pres, USA and Canada.
- [14]. **EFNARC**, European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification and Production and Use. Association House, UK, (www.efnarc.org), May 2005.
- [15]. **Su N., Hsu K.-C., Chai H.-W.**, 2001, “A simple mix design of self-compacting concrete”, Cem. Concr. Res., Vol: 31.
- [16]. **Sari M., Prat E., Labastire J.-F.**, 1999, “High strength self-compacting concrete Original solutions associating organic and inorganic admixtures”, Cem. Concr. Res., Vol: 29.
- [17]. **Assaad, J., and Khayat, K. H.**, 2005, Effect of Coarse Aggregate Characteristics on Lateral Pressure Exerted by Self-Consolidating Concrete, ACI Materials Journal, 102, pp.145-153.

- [18]. **Aksoy, F.**, 2002, Effect of Aggregate Grading and Coarse Aggregate Type on the Properties of Self-Compacting Concrete, Master Thesis, Boğaziçi University Science and Engineering Institute, 98s.
- [19]. **Brouwers, H. J. H., and Radix, H. J.**, 2005, Self-Compacting Concrete: The Role of The Particle size Distribution, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 109-118.
- [20]. **Bosiljkov, V. B.**, 2005, SCC Mixes with Poorly Graded Aggregate and High Volume of Limestone Filler, Cement and Concrete Research, 33, pp. 1279-1286. Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 261-270.
- [21]. **Tu, T. Y., Jann, Y. Y., and Hwang, C. L.**, 2005, The Application of Recycled Aggregates in SCC, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 145-152.
- [22]. **TS EN 1008**, Beton-Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları, 2003.
- [23]. **Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., Kraiwood Kiattikomol**, 2009, “Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete”, Construction and Building Materials, 23: 3352–3358.
- [24]. **Papayianni, I., Anastasiou, E.**, 2010, “Production of high-strength concrete using high volume of industrial by-products”, Construction and Building Materials, 24: 1412–1417.
- [25]. **Şengül, Ö., Taşdemir, M. A., Gjörv, O. E.**, 2007, “Puzolanik malzemelerin betonun mekanik özellikleri ve klor iyonu yayınına etkisi”, İTÜ Dergisi/d Mühendislik, 6 (1):s. 53-64.
- [26]. **ASTM C618 - 12** Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, <http://www.astm.org/Standards/C618.htm>, 2012.
- [27]. **Topçu, İ. B.**, 2006, Yapı Malzemeleri ve Beton , Şahvar Offset, Eskişehir.
- [28]. **Yazıcıoğlu, S., Bozkurt, N.**, 2005, Pomza Taşı ile Elde Edilen Taşıyıcı Hafif Betonun Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi.
- [29]. **Akman, M. S., Akçay, B.**, 2005, “Kimyasal Beton Katkılarının Gelişimi ve Çimentolara Uyumu”, Yapılarda Kimyasal Katkılar (Beton ve Harç Katkıları) Sempozyum ve Sergisi, 24-25 Mart, Milli Kütüphane-Ankara.
- [30]. **Aydın, S., Aytaç, A. H., Ramyar, K.**, 2005, “Çimento Kompozisyonunun ve Kimyasal Katkı Kökeninin Beton Özelliklerine Etkisi”, Yapılarda Kimyasal Katkılar (Beton ve Harç Katkıları) Sempozyum ve Sergisi, 24-25 Mart, Milli Kütüphane- Ankara.
- [31]. www.betonsa.com. 11 Haziran 2011.

- [32]. **Shonaka, M. Kitagawa, K. Satoh H., Izumi, T. and Mizunuma T.,** 1997 Chemical Structures and Performance of New High Range Water Reducing and Air Entraining Agent, ACI, SP 173, pp. 559-614.
- [33]. **Jeknavonian, A. A., Roberts L.R., Jardine, L., Koyata, H. and Darwin D.,** 1997, Condensed Polyacrylic Acid-Aminated Polyether Polymers as Superplasticizers for Concrete, ACI, SP 173, pp. 55-81.
- [34]. **Okazawa, S., Umezawa, K. And Tanaka Y.,** 2000, A New Policarboxylate Based Polymer: Physical Properties of Concrete, pp 1813-1824.
- [35]. **Houst, Y. F., Flatt, R. J., Bowen, P., Hofman, H., Maeder, U., Widmer, J., Sulser, U. And Bürge, T. A.,** March 21-26 1999. Optimization of Superplasticizers : From Research to Application, , Proceeding of the international Symposium on The Role of Admixture in High Performance Monterrey, Mexico, pp 121-134.
- [36]. **Mitsui, K., Yonezawa, T., Kinoshita, M. And Shimono.,** 1994, Application of a New Superplasticizers for Ultra High-Strength Concrete, ACI sp 148, pp27-45
- [37]. **Verwey, E. J. W. And Overbeck, J. T. G.,** 1948, Theory of Stability of Lyophobic Colloid, Elsevier, Amsterdam.
- [38]. **Ohta, A., Sugiyama, T. and Tanaka, Y.,** 1997, Fluidizing Mechanizm and Application of Polycarboxilate Based Superplasticiers, ACI SP173, pp. 359-378.
- [39]. **Öztürk D., Bozdoğan A., Nuhoglu K. B.,,** Betonarme Yapılarda Beton Sınıfının Taşıyıcı Sistem Davranışına Etkisi 23-25 Mart 2005.
- [40]. **Rols S., Ambrosie J., Pera J.,** 1999, “Effects Of Different Viscosity Agents On The Properties Of Self-Leveling Concrete”, Cem. Concr. Res., Vol: 29, pp. 261-266.
- [41]. **Walraven J.,** Temmuz-Ağustos 2002, ‘Betonun Evrimi’, Hazır Beton, , pp. 26-30.
- [42]. **Felekoğlu, B.,** 2003, Kendiliğinden Yerleşen Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 246s.
- [43]. **Sari M., Prat E., Labastire J.-F.,** 1999, “High Strength Self-Compacting Concrete Original Solutions Associating Organic And İnorganic Admixtures”, Cem. Concr. Res., Vol: 29.
- [44]. **Persson B.,** 2001, “A comparison between mechanical properties of selfcompacting concrete and the corresponding properties of normal concrete”, Cem. Concr. Res., Vol: 31.
- [45]. **Khurana R., Topçu O.,** 2000, Role of superplasticizers in development of self compacted concrete”, Cement and concrete Technology in the 2000's.
- [46]. **Sari M., Prat E.,** 1999, Labastire J.-F. High strength self-compacting concrete – Original solutions associating organic and inorganic admixtures. Cem. Concr. Res., Vol: 29, pp. 813-818.
- [47]. **Ho D.W.S., Sheinn A.M.M., Ng C.C., Tam C.T.,** 2002, “The use of quarry dust for SCC applications”, Cem. Concr. Res., Vol: 32.
- [48]. **Yahia A., Tanimura M., Shimabukuro A., Shimoyama Y.,** 1999, “Effect of

rheological parameters on self compactability of concrete containing various mineral admixtures”, Proceedings of the First International RILEM Symposium, Edited by A.Skarendahl and Ö. Petersson.

- [49]. **Jianxiong C., Xincheng P., Yubin H.**, 1999, “A study of self-compacting HPC with superfine sand and pozzolanic additives”, Proceedings of the First International RILEM Symposium, Edited by A.Skarendahl and Ö. Petersson.
- [50]. **Bouzoubaa N., Lachemi M.**, 2001, “Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash Preliminary results”, Cem. Concr. Res., Vol: 31.
- [51]. **Özkul, M Hulusi**, Temmuz Agustos 2002, ‘Beton Teknolojisinde Bir Devrim: KendiligindenYerlesen-Sıkısan Beton’, Hazır Beton, pp. 64-71.
- [52]. **Bartos, P.**, 1992, Fresh Concrete Properties and Tests, Elsevier, Amsterdam.
- [53]. **Browne, R. D., Bamforth, P. B.**, , May 1977, Test to Establish Concrete Pumpability, ACI Journal, V74, pp 193-202.
- [54]. **Joisel, A.**, "Recherches sur les Pompes a Beton” Material de Chantier N:6, p 18, Anneles de l’Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, 1951.
- [55]. **Anderson, W.G.**, September 1977, Analyzing Concrete Mixtures for pumpability,ACI J. V.74, N.9 pp 447-451.
- [56]. **Wallevik, O. H., Saasen, A., Gjorv, O. E.**, 1995, Effect of Filler Materials on on the Rheological Properties of Fresh Concrete, ACI Materials J.,V 42, pp. 524-528 September-October.
- [57]. **Farraris, C. F.**, 1999, Measurement of The Rheological Properties of Cement Paste A New Approach, Proceeding of the international Symposium on The Role of Admixture in High Performance Monterrey, Mexico, March 21-26 pp 333-342.
- [58]. **Banfill, P. F. G.**, March, 1981, Viscometric Study of Cement Pastes Containing Superplasticizers with a Note on Experimental Techniques, Mag. of. Concrete Res. V.33, N.114.
- [59]. **Banfill, P. F. G.**, 13-21 March 1991, The Rheology of Fresh Mortar Mag. of. Concrete Res. V.43, N.154,.
- [60]. **Akman, M.S.**, 1990, “Yapı Malzemeleri”, T.C İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Fakültesi Matbaası, İstanbul, Sayı 1408.
- [61]. **TS 500**, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, 22.02.2000.
- [62]. **TS 3068**, yerine geçen: TS EN 12390-2; Beton Deneyleri- Deney Numuneleri Bölüm 2: Dayanım Deneyleri İçin Deney Numunelerinin Yapımı ve Kürü, 29.04.2010.
- [63]. **TS 3114** yerine geçen: TS EN 12390-3/AC; Beton-Deney Numunelerinin Basınç Dayanımı Tayini, 19.07.2012.
- [64]. **ASTM C 31**, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field, 2009.
- [65]. **ASTM C 39**, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 2009.

- [66]. **Ersoy, U.**, 1985, Betonarme, Temel İlkeler ve Tasıma Gücü Hesabı, 3. Basım, Evrim Yayınevi, İstanbul.
- [67]. **Ersoy, U.**, 2004, Betonarme Yapıların Deprem Davranışı İle İlgili Bir İrdeleme, Beton Kongresi, İstanbul, Bildiriler kitabı, 16-22.
- [68]. **TS 3129**, yerine geçen: TS EN 12390-6; Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini ve ASTM C 496: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens
- [69]. **TS 3284-TS-3285**, yerine geçen: TS EN 12390-5; Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini, 29.04.2010.
- [70]. **ASTM C 293 - C 78**, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading), 2010.
- [71]. **TS EN 12390/(1-8)**, Beton Deneyleri, 29.04.2010.
- [72]. **Ağar E., Sütaş İ., Öztaş G.**, 1998, “Beton Yollar”, İTÜ, İstanbul.
- [73]. **Turcry P., Loukili A., Haidar K.**, 2002, “Mechanical Properties, Plastic Shrinkage and Free Deformations of Self-Consolidating Concrete”, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, pp. 335-340.
- [74]. **Akman M. S., Tasdemir M. A.**, 1977, Perlite concrete as a structural material (Taşıyıcı Malzeme Olarak Perlit Betonu), 1st National Perlite Congress, Ankara, Turkey,.
- [75]. **Whitehurst, E.A.**, 1951, Soniscope Test Concrete Structures Journal of American Concrete Institute, Proceeding, vol. 47, pp, 443-444.
- [76]. **Long A. E., Henderson G. D. and Montgomery F. R.**, 2001, Why Assess The Properties Of Near-Surface Concrete. Construction and Building Materials 15, 65-79.
- [77]. **Mehta, P.K.**, 1986, Concrete, Prentice-Hall Inc., USA.
- [78]. **Mindess, S., Young, J.F.**, 1981, Concrete, Prentice- Hall Inc., New Jersey, USA.
- [79]. **TS 3502**, Betonda E-modülü ve Poisson Oranı Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 1981.
- [80]. **ASTM C 469**, 1994, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, Annual Book of ASTM Standarts.
- [81]. **TS 500**, 2000, Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [82]. **CEB-FIB**, April 1978, Committee Euro-International du Beton, Model Code for Concrete Structures, Bull. 124/ 125.
- [83]. **ACI 312-92**, 1994, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, ACI Manuel of Concrete Practice, Part 3.
- [84]. **Shah, S. P., Lange A.D., Li, Z., Mitsui, K.**, January-February 1994, Relationship Between Microstructure and Mechanical Properties of the Paste-Aggregate

interface, ACI journal, Vol. 91, No 1, pp. 30-39.

- [85]. **Yıldırım, H., Gülseren, H., Uyan, M. ve Kemerli, M. K.**, 2003, “Geçirimsizlik Sağlayan Katkı Türlerinin Beton Geçirimlilik Özelliklerine Etkisi”, TMMOB, İMO, Ulusal Beton Kongresi, 123-131, İstanbul.
- [86]. **Ersoy, U.**, 1985, Betonarme, Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı, 3. Basım, Evrim Yayınevi, İstanbul.
- [87]. **ACI 408.2R-92**, State of the Art Report on Bond Under Cyclic Loads Reported by ACI Committee 408., ACI, Michigan, 1992.
- [88]. Bond Action and Bond Behaviour of Reinforcement State-of-the-Art Report. CEB Bulletin d’Information No. 151, December, 1981.
- [89]. **Ozawa, K., Maekawa, K., Kunishima, M. and Okamura H.**, 1989, Development of High Performance Concrete Based on the Durability Design of Concrete Structures, The second East- Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2), Proceedings book, Chiang Mai, Thailand, p. 445-450.
- [90]. **Shindoh, T., Yokota, K. and Yokoi, K.**, 1996, Effect of mix constituents on rheological properties of super workable concrete, In: Bartos P.J.M., Marrs D.L., Cleland D.J. (Eds.), Proceedings of the International RILEM Conference Production Methods and Workability of Concrete, Paisley, Scotland, June 3–5, 1996, E& FN Spon, London, p. 263–270.
- [91]. **Ersoy, U. ve Özcebe, G.**, 2001, Betonarme : Temel İlkeler TS-500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) Göre Hesap, Genişletilmiş Yeni Baskı, Evrim Yayınevi, İstanbul.
- [92]. **Bazant, Z.P., and Planas, J.**, 1998, “Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials”, CRC, 616.
- [93]. **Durmuş, A. ve Karaca, Z.**, 1998, Betonarmede Çatlama Mekanizması, Çatlak Çeşitleri ve Denetimleri, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Trabzon Şubesi, Mühendislik Bülteni, 54, 43-54.
- [94]. **Kankam, C. K.**, 2004, Bond Strength of Reinforcing Steel Bars Milled From Scrap Metals, Materials and Design, 25, 231–238.
- [95]. **MacGregor, J. G.**, 1997, Reinforced Concrete: Mechanics and Design, Third Edition, Prentice Hall, New Jersey.
- [96]. **Daczko, J.A.**, 2002, “Stability of Self-Consolidating Concrete, Assumed or Ensured?”, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, pp. 245-252.
- [97]. **Khayat, K.H.**, 1998, “Use of Viscosity-Modifying Admixture to Reduce Top-Bar Effect of Anchored Bars Cast with Fluid Concrete”, ACI Materials Journal, V.95, No.2, pp.158-167.
- [98]. **Trägårdh, J.**, September 13-14, 1999, “Microstructural Features and Related Properties of Self-Compacting Concrete”, Self-Compacting Concrete, Proceedings of the First International RILEM Symposium, Stockholm, pp. 175-186.

- [99]. **Welch, B.W., et Patten, J.F.B.**, 1965, "Bond Strength of Reinforcement Affected by Concrete Sedimentation", ACI Journal, Proceedings, pp. 251-263.
- [100]. **Sonebi, M., et Bartos P.J.M.**, September 13-14, 1999, "Hardened SCC and its Bond with Reinforcement", Self- Compacting Concrete, Proceedings of the First International RILEM Symposium, Stockholm, pp. 275-289.
- [101]. **Ghio, V.A., et Monteiro, P.J.M.**, 1997, "Bond Strength of Reinforcing Bars in Reinforced Shotcrete", ACI Materials Journal, V.94, No.2, p.111-118.
- [102]. **ACI 318**, Building Code Requirements for Structural Concrete, June 2011.
- [103]. **Yonezawa, T., Ashworth, V., et Procter, R.P.M.**, 1988, "Pore Solution Composition and Chloride Effects on the Corrosion of Steel in Concrete", Corrosion Engineering, V.44, No.7, pp. 489-499.
- [104]. **Mohammed, T.U., Otsuki, N., et Hisada, M.**, 1999, "Corrosion of Steel Bars with Respect to Orientation in Concrete", ACI Materials Journal, V.96, No.2, p.154-159.
- [105]. **Castel, A., François, R., Arliguie, G.**, June 4-9, 2000, "Factors other than chloride level influencing corrosion rate of reinforcement", Fifth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Barcelona, pp. 629-644.
- [106]. **Trudel, A., Maniabilité**, 1996, Uniformité et Comportement Structural du Béton Autonivelent à Haute Performance, Ms Thesis, Université de Sherbrooke, Canada.
- [107]. **Khayat, K.H. et Yahia, A.**, 1997, "Effect of Welan Gum-High-Range Water Reducer Combinations on Rheology of Cement Grout", ACI Materials Journal, V.94, No.5, p.365-372.
- [108]. **Akman, M.S.**, 27-30 Mayıs 1991, Yüksek Dayanımlı Beton, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 2. Ulusal Beton Kongresi, ss: 312-317.
- [109]. **Waddell J.J.**, 1974, Concrete Construction Handbook. Newyork, Mac Graw-Hill.
- [110]. **Yıldırım, H., Gülseren, H., Uyan, M. ve Kemerli, M. K.**, 2003, "Geçirimsizlik Sağlayan Katkı Türlerinin Beton Geçirimlilik Özelliklerine Etkisi", TMMOB, İMO, Ulusal Beton Kongresi, 123-131, İstanbul.
- [111]. **Do, M. T., Chaal O. and Aitcin P. C.**, 1993, Fatigue Behavior of High-Performance Concrete, ASCE JM, 96-111.
- [112]. **Can, O., Durmuş, G., Subaşı, S., Yıldız, K. ve Arslan, M.**, 2009, "Lif Katkılı Betonların Aşınma Direnci Üzerindeki Etkileri", 5. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük.
- [113]. **Uyan, M., Pekmezci, B. Y. ve Yıldırım H.**, 2003, "Akışkanlaştırıcı Katkı, Kür ve Koşullarının Betonun Geçirimlilik Özellikleri Üzerine Etkileri", SİKA Teknik Bülten, s10-14.
- [114]. **Akman, M. S.**, 1989, "Betonun Dayanıklılık Özelliği ve Önemi", I. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul.
- [115]. **Young, J. F.**, 1998, "A Review of the Pore Structure of Cement Paste and Concrete and Its Influence on Permeability".
- [116]. **Özturan, T.**, 1984, Beton Aşınmasının İki Fazlı Malzeme Olarak İncelenmesi,

Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [117]. **TS EN 1008**, Beton-Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları, 2011.
- [118]. <http://www.arescimento.com.tr/ucukulkimyasalanaliz.html>, Eylül, 2011
- [119]. **TS EN 197-1**, Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, 12.04.2012.
- [120]. **ASTM C618**, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, <http://www.astm.org/Standards/C618.htm> Haziran 2012.
- [121]. **TS639**, yerine geçen, TS EN 197-1, 12.04.2012.
- [122]. **TS EN 450**, 2008, yerine geçen TS EN 450-1+A1, Uçucu kül - Betonda kullanılan - Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri.
- [123]. **Sajuan, M. A., Moragues, A.**, 1994, Model for Predicting Plastic Shrinkage of Polipropylene Reinforced Mortars. Journal of Materials Science 29 pp 2821-2825.
- [124]. **Perez N., Hermida G., Romero H., Cuellar G.**, 2002, "Self-Compacting Concrete, on the Search and Finding of an Optimized Design", First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, pp. 105-112.
- [125]. **Domone P.L., Jin J.**, 1999, "Properties of mortar for self-compacting concrete", Proceedings of the First International RILEM Symposium, Edited by A.Skarendahl and Ö. Petersson, pp. 109-120.
- [126]. **Ferraris C.F., Brower L., C., Daczko J.**, 2000, "Workability SCC, The Economical Solution for Durable Bridges and Transportation Structures", Proc.of Int. Sym.on High Perf. Conc.Orlando, Florida, pp. 398-407.
- [127]. **Stefanescu, A.**, , 1974, Sur la variation causee parla natur des agregats dans la relation entre lavitesede propagation des ultrasons a travers le betonet saresistance "On Non-Destructive Desting"- Rilem.
- [128]. **TS EN 480-11**, Kimyasal katkıları - Beton, harç ve şerbet için - Deney metotları - Bölüm 11: Sertleşmiş betonda hava boşluğu özelliklerinin tayini, 2001.
- [129]. Testing Of Inorganic Non-metallic Materials - Wear Test Using The Grinding Wheel According To Bohme - Grinding Wheel Method, 05.2010.
- [130]. **İşsever F.**, 31 Mayıs 2002, Süperakışkanlaştırıcı ve Mineral Katkılı Taze Çimento Hamuru ve Harçların Reolojisi, Yüksek Lisans Tezi.
- [131]. **Subaşı S., Emiroğlu M.**, 2011, Uçucu Külün Betonun Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt:7, Sayı:1, s14-27.
- [132]. **Kıvanç H.**, Haziran 2006, Süper Akışkanlaştırıcı Katkıların Sualtı Betonu Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, s. 70.
- [133]. **Tangüner R.**, Uçucu Küllü Düşük ve Yüksek Mukavemetli Betonların Elastiklik Modülünün İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, s. 51, Haziran 2007.
- [134]. **Karabulut, A.**, 2006, Reaktif Pudra Betonunun Özelliklerinin Mineral Katkılarıyla

Geliştirilmesi, s. 169.

- [135]. **Görhan G.**, 2006, Hafif Yapı Blokları Üretiminde Uçucu Külün Kireç Ve Çimento İle Birlikte Kullanımının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi.
- [136]. **Kara İ.**, Temmuz 2008, Seyitömer Uçucu Külünün Farklı Yapı Malzemeleri Olarak Değerlendirilmesi, s. 52-57, Yüksek Lisans Tezi.
- [137]. **Kıvanç H.**, Haziran 2006, Süper Akıscanlastırıcı Katkılarının Sualtı Betonu Özelliklerine Etkisi Yüksek Lisans Tezi, s. 49.
- [138]. **Koçak Y., Subaşı S., Emiroğlu M.**, 2011, Uçucu Külün Betonun Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt: 7, Sayı: 1, s.14-27.
- [139]. **Türk K.**, 2012, Viscosity and hardened properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and silica fume, Construction and Building Materials, 37(2012), pp. 326–334.
- [140]. **Tokyay, M.**, 1990, Uçucu Küllerin Beton Malzemesi Olarak Kullanılması Üzerine Yapılan Araştırmaların Gözden Geçirilmesi. Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı:348.
- [141]. **Angi, L, Booyu, L, Guoping, H, Yeibo, C. and Guolion, S.**, 1991, Study on Corrosion Prevention in Reinforced Concrete Containing Condensed Silica Fume and its Application, II. Canmet/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montreal, Canada, pp. 499-509.
- [142]. **Almussalam, A.A., Beshr, H., Maslehuddin, M. and Al-Moudi,** 2004, O.S.B., Effect of silica fume on the mechanical properties of low quality coarse aggregate concrete, Cement and Concrete Composites, No. 26, 891–900.
- [143]. **Khatrı, R.P. and Sirivivathnanon V.**, 1995, Effect of different supplementary cementations materials on mechanical properties of high performance concrete, Cement Concrete Research, No. 25, 209–220.
- [144]. **Tasdemir, C.**, 2003, Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete, Cement and Concrete Research, No. 33, 1637-1642.
- [145]. **Karpuz O., Akpınar M. V.**, 2009, Electronic Journal of ConstructionTechnologies Vol: 5, No: 2, pp 1-8.
- [146]. **Binici H., Görür E. B., Durgun M. Y.**, 2010, Electronic Journal of ConstructionTechnologies Vol: 6, No: 1, 20 pp. 1-10.
- [147]. **Tekmen T.**, 20 Eylül 2006, Kireçtaşlarından Üretilen Kilitli Beton Parke Bloklarının Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi.
- [148]. **DIN 1048, BS 1881**, Testing concrete; testing of fresh concrete, yerlerine geçen TS EN 12390.
- [149]. http://en.wikipedia.org/wiki/Factorial_experiment
- [150]. **Akkaya Y., Sak i.**, Temmuz 2012, Mikrokalsit Katkısının Betonun İşlenebilirliğine, Mekanik Özelliklerine ve Dayanıklılığına Etkisi, Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Eng. Vol: 23, No: 3, pp. 6051.

ÖZGEÇMİŞ

Fethi İŞSEVER 1975 yılında Elazığ'da doğdu. İlköğrenimini Elazığ Atatürk İlkokulunda, ortaokul öğrenimini Elazığ Anadolu Lisesinde, lise öğrenimini Malatya Fen Lisesinde tamamladı. 1994 yılında öğrenimine başladığı İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünden 1998 yılında mezun oldu. Aynı yıl İTÜ İnşaat Mühendisliği bölümünde yüksek lisans öğrenimine başladı. Yüksek lisans öğrenimiyle birlikte 1998 yılında Samsun-Sakarlı İçme Suyu Arıtma Tesisi İnşaatında, 2000 yılında Alsim-Alarko A.Ş. bünyesinde İzmit Atıksu Arıtma Tesisi İnşaatında çalıştı. Haziran 2000-2002 yılları arasında DSİ Edirne 11. Bölge Müdürlüğü'ne bağlı İpsala 114. Şube Müdürlüğünde kontrol mühendisi olarak görev yaptı. Mayıs 2002 tarihinde yüksek lisans öğrenimini tamamladı. Kasım 2002–Temmuz 2003 yılları arasında Bosna Hersek Türk Barış Gücü Görev Kuvvet Komutanlığında Barış Gücü Askeri olarak vatani görevini yerine getirdi. 2003-2004 yılları arasında DSİ Edirne 11. Bölge Müdürlüğü Proje ve İnşaat Şube Müdürlüğünde, 2004-2009 yılları arasında DSİ Elazığ 9. Bölge Müdürlüğü Proje ve İnşaat Şube Müdürlüğünde kontrol mühendisi olarak görev yaptı. Temmuz 2009 tarihinden itibaren DSİ Elazığ 9. Bölge Müdürlüğü Barajlar ve HES Şube Müdürlüğünde çalışmakta olup, evli ve bir çocuk babasıdır.