

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

İrfan COŞKUN

**ÇİMENTO VE MİNERAL KATKI MADDELERİNİN İKİLİ, ÜÇLÜ
VE DÖRTLÜ KOMBİNASYONLARINI İÇEREN BETON
NUMUNELERİNİN BAZI MEKANİK VE DURABİLİTE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADANA, 2022

ÖZ

DOKTORA TEZİ

**ÇİMENTO VE MİNERAL KATKI MADDELERİNİN İKİLİ, ÜÇLÜ
VE DÖRTLÜ KOMBİNASYONLARINI İÇEREN BETON
NUMUNELERİNİN BAZI MEKANİK VE DURABİLİTE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

İrfan COŞKUN

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Danışman : Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAĞATAY
Yıl: 2022, Sayfa : 245
Jüri : Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAĞATAY
: Prof. Dr. Serkan TOKGÖZ
: Prof. Dr. İlker Fatih KARA
: Prof. Dr. Hüseyin YERLİ
: Doç. Dr. Gözde ÇELİK

Bu doktora çalışmasında, portland çimentosu (CEM 1 42,5 R) ile uçucu kül (UK), silis dumanı (SD) ve granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) mineral katkı maddelerinin, ikili, üçlü ve dörtlü kombinasyonlarından üretilen farklı tasarımlardaki beton numuneleri 1, 3, 7, 28, 56, 90, 180 ve 360. günlerde basınç, eğilme dayanımı testine tabi tutulmuştur. Tüm karışımlar için su / bağlayıcı oranı 0,5 olacak şekilde sabit tutulmuştur.

Yürütülen basınç ve eğilme dayanımı test sonuçlarına göre %5 SD+%10 UK+%10 GYFC ve %7,5 SD+%15 UK+%15 GYFC olan karışımların optimum dörtlü kombinasyon olarak kullanılabileceği kanaatine varılmıştır.

Mekanik deneylerin yapıldığı tüm karışımların 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360. günde basınç ve eğilme dayanımları sonuçları her bir gün için ayrı ayrı karşılaştırılmış ve her gün için sonuçlar arasındaki korelasyon üssel olarak araştırılmıştır. Tüm yaşlar için determinasyon katsayısı (R^2) 0,806 ile 0,99 arasında değişmiştir. Karışım tiplerine göre ikili, üçlü ve dörtlü bağlayıcı sistemler için basınç dayanımı ve eğilme dayanımı ilişkisi üssel olarak araştırılmıştır. Tüm determinasyon katsayıları (R^2) 0,969 ile 0,985 arasında bulunmuştur. Sonuç olarak basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasındaki ilişkinin bağlayıcı tipinden ziyade, kür süresinden daha fazla etkilendiği gözlemlenmiştir.

Bu aşamadan sonra mekanik sonuçlara dayanarak optimum karışım olarak tespit edilen iki farklı reçeteden oluşan dörtlü kombinasyon beton numuneleri ile referans karışım üzerinde durabilite deneyleri yürütülmüştür. Bu kapsamda seçilen iki optimum beton karışımının ve referans beton karışımının $MgSO_4$ çözeltisine direnç, $NaSO_4$ çözeltisine direnç, basınç altında su işleme (permeabilite), klor iyonu difüzyonu özellikleri incelenmiştir. Sülfat dirençlerine tayin deneyleri neticesinde numuneler basınç testine, ultrasonik hız testine ve ağırlık kaybı testlerine tabii tutulmuşlardır. Ayrıca bu numunelerin SEM (Scanning Electron Microscopie) ve XRD (X-Ray Diffraction) metodları ile 3, 7, 14, 28, 56, 90, 180 ve 360. günlerdeki iç yapılarının gelişimleri birbirleri ile karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Yürütülen durabilite deneyleri neticesinde, çimento yerine SD, GYFC, UK gibi mineral katkı ikame edilerek üretilen betonların, sadece CEM 1 42,5 R tipi çimento ile üretilen betonlara kıyasla dayanım özelliklerinin yanında dayanıklılık özelliklerinin de daha güçlü olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca mineral katkı ikameli beton karışımlarının daha ekonomik, çevre dostu ve sürdürülebilir olduğu sonuçlarına varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Minarel Katkı, Dayanım, Dürabilite, Mikro Yapı, Sürdürülebilirlik.

ABSTRACT

PhD THESIS

INVESTIGATION OF SOME MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF CONCRETE SAMPLES CONTAINING BINARY, TERNARY AND QUATERNARY COMBINATIONS OF CEMENT AND MINERAL ADDITIVES

İrfan COŞKUN

ÇUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

Advisor : Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAĞATAY
Year: 2022, Pages: 245
Jury : Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAĞATAY
Prof. Dr. Serkan TOKGÖZ
Prof. Dr. İlker Fatih KARA
Prof. Dr. Hüseyin YERLİ
Assoc. Prof. Dr. Gözde ÇELİK

In this PhD study, concrete samples of different designs produced from binary, ternary and quaternary combinations of portland cement (CEM 1 42,5 R) and fly ash (UK), silica fume (SD) and granulated blast furnace slag (GYFC) mineral additives were subjected to compressive and flexural strength tests at the age of 1st, 3rd, 7th, 28th, 56th, 90th, 180th and 360th days. The water/binder ratio was kept constant as 0,5 for all mixtures.

According to the results of the conducted compressive and flexural strength tests, it was concluded that the mixtures with 5% SD+10% UK+10% GYFC and 7,5% SD+15% UK+15% GYFC can be used as the optimum quartet combination.

The compressive and flexural strength results of all mixtures in which the mechanical tests were performed on the 1st, 3rd, 7th, 28th, 90th, 180th and 360th days were compared separately for each day and the correlation between the results for each day was investigated exponentially. The coefficient of determination (R^2) for all ages ranged from 0,806 to 0,99. The relationship between compressive strength and flexural strength was investigated exponentially for systems with binary, ternary and quaternary binders according to the mixture types. All coefficients of determination (R^2) were found between 0,969 and 0,985. As a result, it was observed that the relationship between compressive strength and flexural strength was more affected by the curing time rather than the binder type.

After this stage, durability tests were carried out on the reference mixture with quaternary combination concrete samples consisting of two different recipes, which were determined as the optimum mixture based on the mechanical results. In this context, the resistance to $MgSO_4$ solution, resistance to $NaSO_4$ solution, water treatment under pressure (permeability), and chloride ion diffusion properties of the two optimum concrete mixes and the reference concrete mix were investigated. As a result of the sulphate resistance determination tests, the samples were subjected to pressure test, ultrasonic velocity test and weight loss tests. In addition, the development of the internal structures of these samples on the 3rd, 7th, 14th, 28th, 56th, 90th, 180th and 360th days were examined comparatively with each other by SEM (Scanning Electron Microscope) and XRD (X-Ray Diffraction) methods. As a result of the durability tests carried out, it has been determined that the concretes produced by substituting mineral additives such as SD, GYFC, UK instead of cement have stronger durability properties as well as strength properties compared to the concretes produced with only CEM 1 42,5 R type cement. In addition, it has been concluded that concrete mixtures with mineral additives are more economical, environmentally friendly and sustainable.

Keywords: Mineral additive, Strength, Durability, Micro structure, Sustainability.

**Oğlum
ve
Eşim' e...**



ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmam boyunca hiçbir konuda desteğini esirgemeyen eğitim hayatımda önemli bir yere sahip olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAĞATAY' a teşekkürü borç bilirim.

Doktora ve yüksek lisans tez çalışmalarım boyunca birçok konuda desteğini esirgemeyen Çimko Çimento ve Beton San Tic.A.Ş. Genel Müdürü Sn. Dr. Önder KIRCA' ya, Kalite Müdürü Sn. Emin ÖZLÜ' ye, Sn. Erhan Ali CAN' a, Sn. Ahmet DERİN' e, Sn. Ergin TANDIRCI' ya, Çimko Çimento ve Beton' da görev yapıp bu çalışmada farklı konularda destek veren diğer tüm mesai arkadaşlarıma, Türkiye Hazır Beton Birliği personelleri ve meslektaşlarım, Teknik ve Sürdürülebilirlik Direktörü Koray SAÇLITÜRE' ye, İnş. Yük. Müh. Yasin ENGİN' e, Dr. Eyüp EREN' e, İnş. Yük. Müh. Arda IŞIK' a ve İnş. Yük. Müh. Cenk KILIÇ' a, Türk Çimento personeli, meslektaşım İnş. Yük. Müh. Barış AKBELN' e ayrıca teşekkür ederim.

Doktora tez çalışmam boyunca farklı konularda destek veren Doç. Dr. Tahir Kemal ERDEM' e, destek ve katkılarından dolayı özel bir teşekkürü ayrıca borç bilirim.

Meslek ve eğitim hayatımdaki katkıları ile bu çalışmada emekleri olan Prof. Dr. Ömer ARIÖZ ve Prof. Dr. Hüseyin TEMİZ hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca manevi desteklerini esirgemeyen başta eşim ve oğlum olmak üzere tüm aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖZ	I
ABSTRACT.....	II
ÖNSÖZ	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÇİZELGELER DİZİNİ	XIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	XIX
SİMGE VE KISALTMALAR	XXVII
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	5
2.1. Uçucu Kül, Silis Dumanı ve GYFC İçeren Betonların Özellikleri	5
2.1.1. Eğilme ve Basınç Dayanımı	5
2.1.2. Sülfat ve Diğer Zararlı Kimyasallara Karşı Dayanıklılık	15
2.1.3. Aşınma.....	19
2.1.4. Rötire ve Karbonatlaşma	20
2.1.5. İşlenebilirlik.....	20
2.1.6. Hidratasyon Isısı.....	23
2.1.7. Boşluklu Yapı ve Geçirgenlik	24
2.1.8. Donma-Çözülme.....	26
2.1.9. ASR (Alkali-Silika Reaksiyonu)	28
2.1.10. Mikroyapısal Çalışmalar.....	29
3. MATERYAL VE METOD.....	33
3.1. Materyal	33
3.1.1. Beton Ana Bileşenleri.....	33
3.1.1.1. Çimento	34
3.1.1.1.(1). Çimentonun Temel Özellikleri.....	34
3.1.1.1.(2). Çimentonun Hidratasyonu.....	37
3.1.1.2. Su	41

3.1.1.3. Agrega	41
3.1.2 Mineral Katkı Maddeleri (Genel tanımı, sınıfları, özellikleri vs.).....	45
3.1.2.1. Uçucu Kül	46
3.1.2.1.(1). Uçucu Küllerin Beton Özelliklerine Etkileri.....	50
3.1.2.2. Silis Dumanı.....	51
3.1.2.3 Granüle Yüksek Fırın Cürufu.....	55
3.1.3 Kimyasal Katkı Maddeleri.....	58
3.2. Metod	61
3.2.1. Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması	61
3.2.1.1. Portland Çimentosu	61
3.2.1.2. Uçucu Kül.....	62
3.2.1.3. Granüle Yüksek Fırın Cürufu.....	62
3.2.1.4. Silis Dumanı	62
3.2.1.5. Su.....	63
3.2.1.6. Agrega	64
3.2.2. Yürütülen Deneyler	65
3.2.2.1. Beton Karışım Oranları Hesaplanması.....	65
3.2.2.1.(1). İnce Agrega Özgül Ağırlık ve Su Emme Değerlerinin Hesaplanması	65
3.2.2.1.(2). İri Agrega Özgül Ağırlık ve Su Emme Değerlerinin Hesaplanması	67
3.2.2.1.(3). Agregaların Elek Analizi Deneyi.....	68
3.2.2.1.(4). Agrega Granülometri Eğrisi, Beton Karışım Oranlarının Hesaplanması, Numune Hazırlanması ve Kür Şartları	69
3.2.2.2. Mekanik Deneyler	76
3.2.2.2.(1). Basınç Dayanımı Deneyi	76
3.2.2.2.(2). Eğilme Dayanımı Deneyi.....	77
3.2.2.3. Durabilite Deneyleri.....	78

3.2.2.3.(1). Betonda Magnezyum Sülfat Çözeltisine Karşı	
Dayanıklılık Deneyi.....	79
3.2.2.3.(2). Betonda Sodyum Sülfat Çözeltisine Karşı	
Dayanıklılık Deneyi.....	79
3.2.2.3.(3). Numunelerin Ultrasonik Dalga Hızı Tayini	80
3.2.2.3.(4). Betonda Klorür İyonlarının Geçişlerine Karşı	
Direnç Deneyi.....	81
3.2.2.3.(5). Numunelerinin Basınç Altında Su İşleme Derinliği	
Deneyi	82
3.2.2.4. Mikroyapı Deneyleri	82
3.2.2.4.(1). SEM (Taramalı Elektron Miroskopu) Analizi.....	83
3.2.2.4.(2). XRD (X Işınları Kırınımı) Analizi	84
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	87
4.1. Mekanik Deney Sonuçları.....	87
4.1.1 Basınç Dayanımları	87
4.1.1.1. Farklı Oranlarda UK İçeren İkili Kombinasyon Betonların	
Basınç Dayanımlarının Birbirleri ve Referans Numune	
Dayanımı ile Kıyaslanması	87
4.1.1.2. Farklı Oranlarda GYFC İçeren İkili Kombinasyon	
Betonların Basınç Dayanımlarının Birbirleri ve Referans	
Numune Dayanımı ile Kıyaslanması.....	91
4.1.1.3. Farklı Oranlarda SD İçeren İkili Kombinasyon Betonların	
Basınç Dayanımlarının Birbirleri ve Referans Numune	
Dayanımı ile Kıyaslanması	96
4.1.1.4. %5 SD ile Farklı Oranlarda GYFC İçeren Üçlü	
Kombinasyon Betonların Basınç Dayanımlarının,	
Birbirlerine Göre, Sadece %5 SD İçeren Numuneye ve	
Referans Numuneye Göre Kıyaslanması	100

4.1.1.5. %5 SD ile Farklı Oranlarda UK İçeren Üçlü Kombinasyon Betonların Basınç Dayanımlarının Birbirlerine Göre, Sadece %5 SD İçeren Numune ve Referans Numuneye Göre Kıyaslanması	104
4.1.1.6. %7,5 SD ile Farklı Oranlarda GYFC İçeren Üçlü Kombinasyon Betonların Basınç Dayanımlarının Birbirlerine Göre, Sadece %7,5 SD İçeren Numune ve Referans Numuneye Göre Kıyaslanması	107
4.1.1.7. %7,5 SD ile Farklı Oranlarda UK İçeren Üçlü Kombinasyon Betonların Basınç Dayanımlarının Birbirlerine Göre, Sadece %7,5 SD İçeren Numune ve Referans Numuneye Göre Kıyaslanması	111
4.1.1.8. %5 SD ile Farklı Oranlarda UK ve GYFC İçeren Dörtlü Kombinasyon Betonların Basınç Dayanımlarının Birbirlerine Göre, Sadece %5 SD İçeren Numune ve Referans Numuneye Göre Kıyaslanması	114
4.1.1.9. %7,5 SD ile Farklı Oranlarda UK ve GYFC İçeren Dörtlü Kombinasyon Betonların Basınç Dayanımlarının Birbirlerine Göre, Sadece %7,5 SD İçeren Numune ve Referans Numuneye Göre Kıyaslanması	119
4.1.2. Eğilme Dayanımları.....	122
4.1.2.1. Farklı oranlarda UK İçeren İkili Kombinasyon Betonların Eğilme Dayanımlarının Birbirleri ve Referans Numune Dayanımı İle Kıyaslanması.....	123
4.1.2.2. Farklı oranlarda GYFC İçeren İkili Kombinasyon Betonların Eğilme Dayanımlarının Birbirleri ve Referans Numune Dayanımı ile Kıyaslanması	126

4.1.2.3. Farklı Oranlarda SD İçeren İkili Kombinasyon Betonların Eğilme Dayanımlarının Birbirleri ve Referans Numune Dayanımı ile Kıyaslanması.....	130
4.1.2.4. %5 SD ile Farklı Oranlarda GYFC İçeren Üçlü Kombinasyon Betonların Eğilme Dayanımlarının Birbirlerine Göre, Sadece %5 SD İçeren Numune ve Referans Numune Göre Kıyaslanması.....	133
4.1.2.5. %5 SD ile Farklı Oranlarda UK İçeren Üçlü Kombinasyon Betonların Eğilme Dayanımlarının Birbirlerine Göre, Sadece %5 SD İçeren Numune ve Referans Numuneye Göre Kıyaslanması.....	136
4.1.2.6. %7,5 SD ile Farklı Oranlarda GYFC İçeren Üçlü Kombinasyon Betonların Eğilme Dayanımlarının Birbirlerine Göre, Sadece %7,5 SD İçeren Numune ve Referans Numuneye Kıyaslanması.....	139
4.1.2.7. %7,5 SD ile Farklı Oranlarda UK İçeren Üçlü Kombinasyon Betonların Eğilme Dayanımlarının Birbirlerine Göre, Sadece %7,5 SD İçeren Numune ve Referans Numuneye Göre Kıyaslanması.....	142
4.1.2.8. %5 SD ile Farklı Oranlarda UK ve GYFC İçeren Dörtlü Kombinasyon Betonların Eğilme Dayanımlarının Birbirlerine Göre, Sadece %5 SD İçeren Numune ve Referans Numuneye Göre Kıyaslanması.....	145
4.1.2.9. %7,5 SD ile Farklı Oranlarda UK ve GYFC İçeren Dörtlü Kombinasyon Betonların Eğilme Dayanımlarının Birbirlerine Göre, Sadece %7,5 SD İçeren Numune ve Referans Numuneye Göre Kıyaslanması.....	149
4.1.3. Basınç ve Eğilme Dayanımları Arasındaki İlişkiler	152

4.1.3.1. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Kür Süresine Göre Oluşan İlişkiler	152
4.1.3.2. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre Olan İlişkiler	156
4.2. Dayanıklılık (Durabilite) Deney Sonuçları	174
4.2.1. Beton Numunelerinin Magnezyum Sülfat Çözeltilisine Karşı Dayanıklılık Deney Sonuçları ve Sonuçların Kıyaslanması	174
4.2.1.1. Magnezyum Sülfat Çözeltilisinde Bekletilen Numunelerin Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Değişimi.....	176
4.2.2. Beton Numunelerinin Sodyum Sülfat Çözeltilisine Karşı Dayanıklılık Deney Sonuçları ve Sonuçların Kıyaslanması	178
4.2.2.1. Sodyum Sülfat Çözeltilisinde Bekletilen Numunelerin Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Değişimi	179
4.2.3. Beton Numunelerinin Klorür İyonlarının Geçişlerine Karşı Direnç Deney Sonuçları ve Sonuçların Kıyaslanması	181
4.2.4. Beton Numunelerinin Basınç Altında Su İşleme Derinliği Deney Sonuçları ve Sonuçların Kıyaslanması.....	183
4.3. Mikroyapı (SEM ve XRD) Çalışmaları ve Diğer Deney Sonuçlarının Mikroyapı ile İlişkilendirilmesi.....	184
4.3.1. Mikroyapı (SEM-Taramalı Elektron Mikroskop, XRD-X Işını Kırınımı) ve Mekanik Deney Sonuçları Arasındaki İlişkiler.....	185
4.3.2. Mikroyapı ve Durabilite Deney Sonuçları Arasındaki İlişkiler.....	192
4.3.2.1. Basınç Altında Su Geçirimsizlik Deneyi ve Mikroyapı İlişkisi	192
4.3.2.2. Klorür İyonları Geçirimsizliği Deneyi ve Mikroyapı İlişkisi	194
4.3.2.3. Sülfat (Na_2SO_4 - MgSO_4) Direnci Deneyleri ve Mikroyapı İlişkisi.....	196
4.3.3. R1, L2, L3 Beton Numunelerinin Değişik Kür Sürelerine Göre SEM Görüntülerinin İncelenmesi.....	199

4.3.3.1. R1 Beton Numunelerinin Değişik Kür Sürelerine Göre SEM Görüntülerinin İncelenmesi	200
4.3.3.2. L2 Beton Numunelerinin Değişik Kür Sürelerine Göre SEM Görüntülerinin İncelenmesi	204
4.3.3.3. L3 Beton Numunelerinin Değişik Kür Sürelerine Göre SEM Görüntülerinin İncelenmesi	207
4.3.4. Diğer SEM (Taramalı Elektron Mikroskop) - XRD (X Işını Kırınımı) Mikroyapı Bulgularının İlişkilendirilmesi	211
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	215
5.1. Mekanik Deney Sonuçları	215
5.1.1. Basınç Dayanımı	215
5.1.2. Eğilme Dayanımı	218
5.1.3. Basınç ve Eğilme Dayanımı Arasındaki İlişkiler	220
5.2. Dayanıklılık (Durabilite) Deney Sonuçları ve Mikroyapı İncelemeleri ile Sonuçların Desteklenmesi	221
5.2.1. Magnezyum Sülfat Çözeltilisine Karşı Dayanıklılık Deney Sonuçları ve Sonuçların Kıyaslanması	221
5.2.2. Sodyum Sülfat Çözeltilisine Karşı Dayanıklılık Deney Sonuçları ve Sonuçların Kıyaslanması	222
5.2.3. Beton Numunelerinin Klorür İyonlarının Geçişlerine Karşı Direnç Deney Sonuçları	222
5.2.4. Beton Numunelerinin Basınç Altında Su İşleme Derinliği Deney Sonuçları	223
5.3. Mikroyapısal Sonuçlar	223
5.3.1. R1 (%100 CEM 1 42,5 R) Beton Numunelerinin Değişik Kür Sürelerine Göre SEM Görüntülerinin İncelenmesi	223
5.3.2. L2 (SD7,5+UK10+GYFC10) Beton Numunelerinin Değişik Kür Sürelerine Göre SEM Görüntülerinin İncelenmesi	224

5.3.3. L3 (SD7,5+UK15+GYFC15) Beton Numunelerinin Değişik	
Kür Sürelerine Göre SEM Görüntülerinin İncelenmesi.....	224
5.3.4. R1, L2, L3 Numuneleri için XRD (X Işını Kırınımı) Mikroyapı	
Bulguları	225
5.4. Öneriler	226
KAYNAKLAR.....	227
ÖZGEÇMİŞ	245



ÇİZELGELER DİZİNİ

SAYFA

Çizelge 3.1.	Portland Çimentosunu Oluşturan Oksitler	36
Çizelge 3.2.	Çimentoyu Oluşturan Ana Bileşenler.....	36
Çizelge 3.3.	Çimento Ana Bileşenlerinin Özellikleri.	37
Çizelge 3.4.	C ve F Sınıf Uçucu Küllerin Kimyasal Analizleri.	49
Çizelge 3.5.	TS EN 450-1' e Göre Uçucu Kül Özellikleri	51
Çizelge 3.6.	Silis Dumanının Yüzde (%) Olarak Genel Kimyasal Kompozisyonu	55
Çizelge 3.7.	Yüksek Fırın Cürufunun Yüzde (%) Olarak Genel Kimyasal Kompozisyonu	58
Çizelge 3.8.	Beton Karışımında Kullanılan Bağlayıcı Hammaddelerin Kimyasal Özellikleri	63
Çizelge 3.9.	Kullanılan Suyun Analiz Raporu	64
Çizelge 3.10.	İnce Agregâ Özgöl Ağırlık ve Su Emme Değerleri.....	66
Çizelge 3.11.	İri Agregâ Özgöl Ağırlık ve Su Emme Değerleri.....	68
Çizelge 3.12.	Referans, İkili, Üçlü ve Dörtlü Beton Kombinasyonlarının Reçeteleri.....	75
Çizelge 3.13.	Dayanıklılık Deneyleri İçin Hazırlanan Numuneler.....	78
Çizelge 4.1.a.	Çimento+UK ile Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları (MPa).....	88
Çizelge 4.1.b.	28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar	89
Çizelge 4.1.c.	7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri	89
Çizelge 4.1.d.	UK İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Dayanımları.....	90
Çizelge 4.2.a.	Çimento+GYFC ile Yapılan Betonların Basınç Dayanımları (MPa).....	92
Çizelge 4.2.b.	28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar	93

Çizelge 4.2.c.	7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri	94
Çizelge 4.2.d.	GYFC İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Dayanımları.....	94
Çizelge 4.3.a.	Çimento+Silis Dumanı ile Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları (MPa).....	97
Çizelge 4.3.b.	28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar	97
Çizelge 4.3.c.	7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri	98
Çizelge 4.3.d.	SD İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Dayanımları.....	98
Çizelge 4.4.a.	Çimento+GYFC ile Yapılan Betonların Basınç Dayanımları (MPa).....	101
Çizelge 4.4.b.	28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar	101
Çizelge 4.4.c.	7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri	102
Çizelge 4.4.d.	SD5+GYFC İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Dayanımları.....	102
Çizelge 4.5.a.	Çimento+SD+UK ile Yapılan Betonların Basınç Dayanımları (MPa).....	105
Çizelge 4.5.b.	28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar	105
Çizelge 4.5.c.	7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri	106
Çizelge 4.5.d.	SD5+UK İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Dayanımları.....	106
Çizelge 4.6.a.	Çimento+SD+YFC ile Yapılan Betonların Basınç Dayanımları (MPa).....	108
Çizelge 4.6.b.	28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar	109
Çizelge 4.6.c.	7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri	109
Çizelge 4.6.d.	SD7,5+GYFC İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Dayanımları	110
Çizelge 4.7.a.	Çimento+SD+UK ile Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları (MPa).....	112

Çizelge 4.7.b.	28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar	112
Çizelge 4.7.d.	SD7,5+ UK İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Dayanımları.....	113
Çizelge 4.8.a.	SD+UK+GYFC ile Yapılan Betonların Basınç Dayanımları (MPa).....	116
Çizelge 4.8.b.	28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar	116
Çizelge 4.8.c.	7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri	117
Çizelge 4.8.d.	SD5+UK+GYFC İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Dayanımları	117
Çizelge 4.9.a.	Çimento+SD+UK+GYFC ile Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları (MPa).....	120
Çizelge 4.9.b.	28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar	120
Çizelge 4.9.c.	7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri	121
Çizelge 4.9.d.	SD7,5+UK+GYFC İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Dayanımları	121
Çizelge 4.10.a.	UK İçeren Beton Karışımlarının Eğilme Dayanımları (MPa).	124
Çizelge 4.10.b.	28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar	124
Çizelge 4.10.c.	7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri	125
Çizelge 4.10.d.	UK İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Eğilme Dayanımları	125
Çizelge 4.11.a.	GYFC İçeren Beton Karışımlarının Eğilme Dayanımları (MPa).....	127
Çizelge 4.11.b.	28 günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar	128
Çizelge 4.11.c.	7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri	128
Çizelge 4.11.d.	GYFC İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Eğilme Dayanımları	129
Çizelge 4.12.a.	SD İçeren Beton Karışımlarının Eğilme Dayanımları (MPa) .	131
Çizelge 4.12.b.	28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar	131
Çizelge 4.12.c.	7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri	132

Çizelge 4.12.d.	SD İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Eğilme Dayanımları	132
Çizelge 4.13.a.	SD+ GYFC İçeren Beton Karışımlarının Eğilme Dayanımları (MPa).....	134
Çizelge 4.13.b.	28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar	134
Çizelge 4.13.d.	SD+GYFC İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Eğilme Dayanımları	135
Çizelge 4.14.a.	SD+UK İçeren Beton Karışımlarının Eğilme Dayanımları (MPa).....	137
Çizelge 4.14.b.	28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar	137
Çizelge 4.14.c.	7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri	138
Çizelge 4.14.d.	SD+UK İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Eğilme Dayanımları	138
Çizelge 4.15.a.	SD+ GYFC İçeren Beton Karışımlarının Eğilme Dayanımları (MPa).....	140
Çizelge 4.15.b.	28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar	140
Çizelge 4.15.c.	7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri	141
Çizelge 4.15.d.	SD+ GYFC İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Eğilme Dayanımları	141
Çizelge 4.16.a.	Çimento+SD+UK İçeren Beton Karışımlarının Eğilme Dayanımları (MPa).....	143
Çizelge 4.16.b.	28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar	143
Çizelge 4.16.c.	7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri	144
Çizelge 4.16.d.	SD+UK İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Eğilme Dayanımları	144
Çizelge 4.17.a.	Çimento+SD+UK+YFC İçeren Beton Karışımlarının Eğilme Dayanımları (MPa).....	146
Çizelge 4.17.b.	28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar	147
Çizelge 4.17.c.	7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri	147

Çizelge 4.17.d.	SD+UK+GYFC İkameli Numunelerinin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Eğilme Dayanımları..	148
Çizelge 4.18.a.	Çimento+SD+UK+YFC İçeren Beton Karışımlarının Eğilme Dayanımları (MPa)	150
Çizelge 4.18.b.	28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar	150
Çizelge 4.18.c.	7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri	151
Çizelge 4.18.d.	SD+UK+GYFC İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Eğilme Dayanımları..	151
Çizelge 4.19.	Tüm Karışımların Erken, 28. Gün ve Geç Dayanım Değerlerine Göre Üssel, Doğrusal Denklem ve R^2 Değerleri .	170
Çizelge 4.20.	Magnezyum Sülfat Çözeltisinde Bekletilen Numunelerin Ağırlık Değişimleri ve Dayanım Değerleri	175
Çizelge 4.21.	Magnezyum Sülfat Çözeltisinde Bekletilen Numunelerin Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Değişimleri (m/s)	176
Çizelge 4.22.	Sodyum Sülfat Çözeltisinde Bekletilen Numunelerin Ağırlık Değişimleri ve Dayanım Değerleri.....	178
Çizelge 4.23.	Sodyum Sülfat Çözeltisinde Bekletilen Numunelerin Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Değişimleri (m/s)	180
Çizelge 4.24.	Betonun Klorür İyonu Geçiş Deneyi Ölçüm Sonuçları (Coulombs).....	182
Çizelge 4.25.	Basınç Altında Su İşleme Derinlik Kıyaslama Çizelgesi	183



ŞEKİLLER DİZİNİ

SAYFA

Şekil 3.1.	Çimento Üretim Süreci	35
Şekil 3.2.	Beton Üretiminde Kullanılan Agregalar	44
Şekil 3.3.	Puzolanların Sınıflandırılması	46
Şekil 3.4.	İnce Agrega Özgöl Ağırlık Deney Düzeneği.....	66
Şekil 3.5.	Tel Sepet Yöntemi ile İri Agrega Özgöl Ağırlık Deney Düzeneği ..	67
Şekil 3.6.	Agrega Elek Seti	68
Şekil 3.7.	Referans Numune Beton Karışım Oranı Tablosu	71
Şekil 3.8.	İkili Kombinasyon Beton Karışım Oranları Tablosu (1. Etap).....	72
Şekil 3.9.	Üçlü Kombinasyon Beton Karışım Oranları Tablosu (2. Etap).....	73
Şekil 3.10.	Dörtlü Kombinasyon Beton Karışım Oranları Tablosu (3. Etap)	74
Şekil 3.11.	Numunelerin Hazırlanıp Kalıplanması	76
Şekil 3.12.	15x15x15 cm lik Numune Üzerinde Basınç Dayanımı Deneyi	77
Şekil 3.13.	15x15x60 cm Boyutlu Numuneler Üzerinde Eğilme Dayanımı	78
Şekil 3.14.	10x10x10 cm Boyutlu Numunelerin MgSO ₄ Çözeltisine Direnç Deneyi.....	79
Şekil 3.15.	10x10x10 cm Boyutlu Numunelerin Na ₂ SO ₄ Çözeltisine Direnç Deneyi.....	80
Şekil 3.16.	Ultrasonik Test Cihazı	81
Şekil 3.17.	Klorür İyonlarının Geçişlerine Karşı Direnç Deney Düzeneği.....	81
Şekil 3.18.	15x15x15 cm Boyutlu Numunelerin Basınç Altında Su İşleme Derinliği Deneyi	82
Şekil 3.19.	Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope) Deneyi İçin Numuneyi Altın Kaplama Cihazı.....	84
Şekil 3.20.	Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope) Deney Cihazı.....	84
Şekil 3.21.	XRD Deneyinde Kullanılan Manuel Öğütücü ve Numune Tutucu .	85
Şekil 3.22.	XRD (X-Işını Difraktometre) Deney Cihazı ve Numune Haznesi ..	86

Şekil 4.1.	Çimento+Uçucu Kül ile Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları/Zaman Grafiği.....	90
Şekil 4.2.	Çimento+GYFC ile Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları/Zaman Grafiği.....	95
Şekil 4.3.	Çimento+Silis Dumanı ile Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları/Zaman Grafiği.....	99
Şekil 4.4.	Çimento+SD+GYFC ile Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları/Zaman Grafiği.....	103
Şekil 4.5.	Çimento+SD+UK ile Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları/Zaman Grafiği.....	107
Şekil 4.6.	Çimento+SD+GYFC ile Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları/Zaman Grafiği.....	110
Şekil 4.7.	Çimento+SD+UK ile Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları/Zaman Grafiği.....	114
Şekil 4.8.	Çimento+SD+UK+GYFC ile Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları/Zaman Grafiği.....	118
Şekil 4.9.	Çimento+SD+UK+GYFC İle Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları/Zaman Grafiği.....	122
Şekil 4.10.	Çimento+UK ile Yapılan Betonların Eğilme Dayanımları/Zaman Grafiği.....	126
Şekil 4.11.	Çimento+GYFC ile Yapılan Betonlara Ait Eğilme Dayanımları/Zaman Grafiği.....	129
Şekil 4.12.	Çimento+SD ile Yapılan Betonların Eğilme Dayanımları/Zaman Grafiği.....	133
Şekil 4.13.	Çimento+SD+GYFC İle Yapılan Betonlara Ait Eğilme Dayanımları/Zaman Grafiği.....	136
Şekil 4.14.	Çimento+SD+UK ile Yapılan Betonlara Ait Eğilme Dayanımları/Zaman Grafiği.....	139

Şekil 4.15.	Çimento+SD+GYFC İle Yapılan Betonlara Ait Eğilme Dayanımları/Zaman Grafiği.....	142
Şekil 4.16.	Çimento+SD+UK ile Yapılan Betonlara Ait Eğilme Dayanımları/Zaman Grafiği.....	145
Şekil 4.17.	Çimento+SD+UK+GYFC İle Yapılan Betonlara Ait Eğilme Dayanımları/Zaman Grafiği.....	148
Şekil 4.18.	Çimento+SD+UK+YFC ile Yapılan Betonlara Ait Eğilme Dayanımları/Zaman Grafiği.....	152
Şekil 4.19.	1. Günde Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Kür Süresine Göre Oluşan İlişkiler.....	153
Şekil 4.20.	3. Günde Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Kür Süresine Göre Oluşan İlişkiler.....	153
Şekil 4.21.	7. Günde Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Kür Süresine Göre Oluşan İlişkiler.....	154
Şekil 4.22.	28. Günde Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Kür Süresine Göre Oluşan İlişkiler.....	154
Şekil 4.23.	90. Günde Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Kür Süresine Göre Oluşan İlişkiler.....	155
Şekil 4.24.	180. Gün Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Kür Süresine Göre Oluşan İlişkiler.....	155
Şekil 4.25.	360. Gün Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Kür Süresine Göre Oluşan İlişkiler.....	156
Şekil 4.26.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R+UK) Olan Genel İlişki.....	157
Şekil 4.26.a.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R+UK) Olan Erken Dayanım İlişkisi ...	157
Şekil 4.26.b.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R+UK) Olan 28. Gün İlişkisi.....	158

Şekil 4.26.c.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R+UK) Olan Geç Dayanım İlişkisi	158
Şekil 4.27.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +GYCF) Olan Genel İlişki.....	159
Şekil 4.27.a.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +GYCF) Olan Erken Dayanım İlişkisi	159
Şekil 4.27.b.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +GYCF) Olan 28. Gün İlişkisi.....	160
Şekil 4.27.c.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +GYCF) Olan Geç Dayanım İlişkisi.	160
Şekil 4.28.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +SD) Olan Genel İlişki	161
Şekil 4.28.a.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +SD) Olan Erken Dayanım İlişkisi ...	161
Şekil 4.28.b.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +SD) Olan 28. Gün İlişkisi	162
Şekil 4.28.c.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +SD) Olan Geç Dayanım İlişkisi	162
Şekil 4.29.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R+SD+GYCF) Olan Genel İlişki	163
Şekil 4.29.a.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R+SD+GYCF) Olan Erken Dayanım İlişkisi	163
Şekil 4.29.b.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R+SD+GYCF) Olan 28. Gün İlişkisi ...	164
Şekil 4.29.c.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R+SD+GYCF) Olan Geç Dayanım İlişkisi	164

Şekil 4.30.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +SD+UK) Olan Genel İlişki	165
Şekil 4.30.a.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +SD+UK) Olan Erken Dayanım İlişkisi	165
Şekil 4.30.b.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +SD+UK) Olan 28.Gün İlişkisi	166
Şekil 4.30.c.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +SD+UK) Olan Geç Dayanım İlişkisi	166
Şekil 4.31.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +SD+UK+GYCF) Olan Genel İlişki	167
Şekil 4.31.a.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +SD+UK+GYCF) Olan Erken Dayanım İlişkisi	167
Şekil 4.31.b.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +SD+UK+GYCF) Olan 28. Gün İlişkisi	168
Şekil 4.31.c.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +SD+UK+GYCF) Olan Geç Dayanım İlişkisi	168
Şekil 4.32.a.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Genel İlişki.....	169
Şekil 4.32.b.	1, 3, 7. Günlerde Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Farklı İlişkilerin Karşılaştırılması	171
Şekil 4.32.c.	28. Günde Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Farklı İlişkilerin Karşılaştırılması	172
Şekil 4.32.d.	90, 180, 360. Günlerde Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Farklı İlişkilerin Karşılaştırılması	172
Şekil 4.32.e.	Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Farklı İlişkilerin Genel Karşılaştırılması	173

Şekil 4.33.a.	Magnezyum Sülfat Çözeltisinde Bekletilen Numune Ağırlığı (Gr)/Zaman Grafiği.....	175
Şekil 4.33.b.	Magnezyum Sülfat Çözeltisinde Bekletilen Numunelerin 56. Gün Basınç Dayanımı Grafiği (MPa).....	175
Şekil 4.34.	Magnezyum Sülfat Çözeltisinde Bekletilen Numunelerin Ultra Ses Geçiş Hızı/Zaman Grafiği (m/s).....	177
Şekil 4.35.a.	Sodyum Sülfat Çözeltisinde Bekletilen Numune Ağırlığı/Zaman Grafiği (Gr).....	178
Şekil 4.35.b.	Sodyum Sülfat Çözeltisinde Bekletilen Numunelerin 56. Gün Basınç Dayanımı Grafiği (MPa).....	179
Şekil 4.36.	Sodyum Sülfat Çözeltisinde Bekletilen Numunelerin Ultra Ses Geçiş Hızı/Zaman Grafiği (m/s)	180
Şekil 4.37.	Betonun Klorür İyonu Geçiş Deneyi Ölçüm Sonuçları (Coulombs)	182
Şekil 4.38.a.	Basınç Altında Su İşleme Derinlik Grafiği (mm)	183
Şekil 4.38.b.	R1, L2 ve L3 Numunelerinin Basınç Altında Su İşleme Derinlik Grafiği (mm).....	184
Şekil 4.39.	3 Günlük Karışımların XRD Profilleri (P: Portlandit, C: Kalsit) ..	185
Şekil 4.40.	7 Günlük Karışımların XRD Profilleri (P: Portlandit, C: Kalsit) ..	186
Şekil 4.41.	28 Günlük Karışımların XRD Profilleri (P: Portlandit, C: Kalsit) ..	186
Şekil 4.42.	56 Günlük Karışımların XRD Profilleri (P: Portlandit, C: Kalsit) ..	186
Şekil 4.43.	90 Günlük Karışımların XRD Profilleri (P: Portlandit, C: Kalsit) ..	187
Şekil 4.44.	180 Günlük Karışımların XRD Profilleri (P: Portlandit, C: Kalsit) ..	187
Şekil 4.45.	365 Günlük Karışımların XRD Profilleri (P: Portlandit, C: Kalsit) ..	187
Şekil 4.46.	3 Günlük a) R1, b) L2 ve c) L3 Betonlarında Gözlenen Portlandit ..	189
Şekil 4.47.	L3 Betonunda 7 Gün Sonunda Başlayan Puzolanik Reaksiyonlar ..	190
Şekil 4.48.	Karışımların Basınç Dayanımı Gelişimi	191
Şekil 4.49.	Karışımların Eğilme Dayanımı Gelişimi	192

Şekil 4.50.	56. günlük, a) R1 Betonu, b) L2 Betonu ve c) L3 Betonlarında Farklı Miktarlarda Bulunan Portlandit.....	193
Şekil 4.51.	56 günlük, a) R1, b) L2 ve c) L3 Betonlarındaki Boşluk Yapısı ...	195
Şekil 4.52.	180 Günlük R1 Betonunun Boşluklu ve Heterojen İç Yapısı.....	196
Şekil 4.53.	Sülfat Hücumuna Maruz Betonlarda Ultrases Dalga Hızı Kaybı ..	197
Şekil 4.54.	Sülfat Hücumuna Maruz Betonlarda Ağırlık Kaybı	198
Şekil 4.55.	R1 Betonunun 3 Günlük SEM Görüntüsü	200
Şekil 4.56.	R1 Betonunun 7 Günlük SEM Görüntüsü	200
Şekil 4.57.	R1 Betonunun 14 Günlük SEM Görüntüsü	201
Şekil 4.58.	R1 Betonunun 28 Günlük SEM Görüntüsü	201
Şekil 4.59.	R1 Betonunun 56 Günlük SEM Görüntüsü	202
Şekil 4.60.	R1 Betonunun 90 Günlük SEM Görüntüsü	202
Şekil 4.61.	R1 Betonunun 180 Günlük SEM Görüntüsü	203
Şekil 4.62.	R1 Betonunun 365 Günlük SEM Görüntüsü	203
Şekil 4.63.	L2 Betonunun 3 Günlük SEM Görüntüsü	204
Şekil 4.64.	L2 Betonunun 7 Günlük SEM Görüntüsü	205
Şekil 4.65.	L2 Betonunun 14 Günlük SEM Görüntüsü	205
Şekil 4.66.	L2 Betonunun 28 Günlük SEM Görüntüsü	205
Şekil 4.67.	L2 Betonunun 56 Günlük SEM Görüntüsü	206
Şekil 4.68.	L2 Betonunun 90 Günlük SEM Görüntüsü	206
Şekil 4.69.	L2 Betonunun 180 Günlük SEM Görüntüsü	207
Şekil 4.70.	L2 Betonunun 365 Günlük SEM Görüntüsü	207
Şekil 4.71.	L3 Betonunun 3 Günlük SEM Görüntüsü	208
Şekil 4.72.	L3 Betonunun 7 Günlük SEM Görüntüsü	208
Şekil 4.73.	L3 Betonunun 14 Günlük SEM Görüntüsü	209
Şekil 4.74.	L3 Betonunun 28 Günlük SEM Görüntüsü	209
Şekil 4.75.	L3 Betonunun 56 Günlük SEM Görüntüsü	209
Şekil 4.76.	L3 Betonunun 90 Günlük SEM Görüntüsü	210
Şekil 4.77.	L3 Betonunun 180 Günlük SEM Görüntüsü	210

Şekil 4.78.	L3 Betonunun 365 Günlük SEM Görüntüsü	211
Şekil 4.80.	90 Günlük L2 Betonu XRD Profilleri.....	212
Şekil 4.81.	90 Günlük L3 Betonu XRD Profilleri.....	213
Şekil 4.82.	180 Günlük R1 Betonu XRD Profilleri	213
Şekil 4.83.	180 Günlük L2 Betonu XRD Profilleri.....	213
Şekil 4.84.	180 Günlük L3 Betonu XRD Profilleri.....	214
Şekil 4.85.	90. Gün Sonunda a) L2 ve b) L3 Betonunda Reaksiyona Girmemiş Tanecikler	214



SİMGE VE KISALTMALAR

ACI : American Concrete Institute

C : Kalsit

GYFC : Granüle yüksek fırın cürufu

KYB : Kendiliğinden Yerleşen Beton

P : Portlandit

PÇ : Portland çimentosu

SD : Silis dumanı

SDÇ : Sülfata dayanıklı çimento

SEM : Taramalı elektron mikroskobu (Scanning electron microscope)

TBDY : Türkiye bina deprem yönetmeliği

TS : Türk standartı

UK : Uçucu kül

XRD : X-Işını Difraksiyon (X-Ray Diffraction)

1. GİRİŞ

Günümüzde sanayiler, endüstriler başta olmak üzere birçok işletme; çevre bilinci arttığından dolayı, daha çevreci malzemeler, ürünler, süreçler ve hizmetler için daha az doğal kaynak ve enerji tüketen, daha geri dönüştürülebilir, daha dayanıklı ve daha az emisyon ve katı atık açığa çıkaran ürünlere yönelmek durumunda kalmışlardır. Çevre kirliliğini önlemek için uygun teknikler ve stratejiler kullanan işletmeler, daha düşük çevresel etkilere sahip ürünler tasarlayarak ve üreterek aynı zamanda rekabet avantajı da sağlamaktadır. Ayrıca, hükümetler kullanılan ürünlerin ve gerçekleştirilen faaliyetlerin yaşam döngüsü etkilerini dikkate alma ihtiyacını teşvik eden yeni politikalar ve düzenlemeler de oluşturmaktadır.

Beton çağdaş toplumların temelini oluşturan ve eski medeniyetlerin kurulmasında önemli bir yere sahip yapı malzemesidir. Yalın bir tanımla çimento, kum, su ve agregadan oluşmaktadır. Çağdaş beton tarihinin ise 1800’lü yılların başında Fransız Louis Vicat’ın su kireci (hidrolik kireç) kullanımıyla ilgili çalışmalar yaparak ilk yapay çimentoyu üretmesi ve Joseph Aspdin isimli bir duvarcı ustasının “Portland Çimentosu”nun patentini almasıyla başladığı düşünülebilir. Geleneksel beton değişik koşullarda ve değişik çevresel etkiler altında dayanım sağlamak üzere zamanla geliştirilmiş ve farklı mineral katkıların ikamesi ile hem yüksek dayanım ve dayanıklılığa sahip beton üretilmeye hem de endüstriyel atıkların kullanımı sağlanarak ülke ekonomisine ve sürdürülebilirliğe katkı sağlanmaya çalışılmıştır (Baradan ve ark, 2012).

Beton en çok kullanılan yapı malzemesidir. Dünyada beton üretiminin yıllık kişi başı 1 m³’ün üzerinde olduğu tahmin edilmektedir. Bu konuda net bir veri bulunmasa da güncel durumda yıllık dünya çimento üretiminin 4,1 milyar ton olduğu bilinmektedir (THBB, 2021).

Beton malzemesi binaların, köprülerin, barajların, yolların, tünellerin ve birçok yapının inşasında kullanılır. Mekanik özellikleri, dayanıklılığı, kolay

üretimi, maliyeti ve kaynakların kolay erişilebilir olması nedeniyle beton; bina inşaatı için en yaygın yapısal malzeme konumundadır.

Hızla genişleyen kentleşmeye paralel olarak giderek daha çok artan beton tüketimi dünya çapında daha fazla doğal rezerv kullanımına neden olmaktadır. Sürdürülebilirlik ve maliyet açısından düşünülmesi gereken bu durum daha çevreci alternatif ham maddelerin ve üretim yöntemlerinin araştırılmasını teşvik etmektedir.

Çimento üretimi önemli CO₂ kaynaklarından birisidir. Teknolojik olarak 1 ton çimento üretimi yapıldığında yaklaşık 700-760 kg CO₂ eşdeğeri emisyon ortaya çıkmaktadır. Betonun çevreye olan zararının azaltılması, beton içerisinde kullanılan portland çimentosunun puzolanik malzemelerle yer değiştirilmesi sonucu çimento tüketiminin azaltılması ile sağlanabilir. Puzolanik malzeme ikamesi ile üretilecek betonun durabilitesinin iyileştirilmesi ve böylece servis ömrünün arttırılmasıyla da uzun dönemde beton ihtiyacı doğacak ve dolayısıyla betonun çevresel etkileri azalacaktır.

Beton içerisinde puzolanik malzemelerin kullanılması, uzun dönem durabilitesi iyi olan betonların elde edilmesinde önemli bir etkidir. Bu malzemeler, beton içerisindeki çimentonun bir kısmının yerine kullanıldıkları için betondaki çimento tüketimini azaltmaktadırlar. Bu şekilde çevreye verdikleri zararın azaltılmış olmasının yanında taze ve sertleşmiş beton özelliklerini de iyileştirmektedirler.

Önemli puzolanik malzemelerden biri olan uçucu kül; termik santrallerden temin edilmektedir. Elektrik enerjisi üretimi için yakıt olarak pulverize (öğütülmüş) kömürün yanmasıyla atık malzeme olarak ortaya çıkan çok ince taneli bu küllere uçucu kül denilmektedir. Uçucu kül bacalardan elektrostatik veya elektromekanik yöntemler vasıtasıyla tutulmakta ve atık olarak depolanmaktadır.

Betonda uçucu kül kullanımı sayesinde beton içerisindeki yüksek maliyetli portland çimentosundan tasarruf edilir. Ayrıca betonda uçucu kül kullanımı taze ve sertleşmiş beton performansını da arttırmaktadır. Buna ek olarak uçucu kül taze

betonda hidrasyon ısını düşürmekte, taze beton işlenebilirliğini arttırmakta, terleme ve kusmayı azaltmakta ve betonun pompalanabilirlik özelliğini iyileştirmektedir. Sertleşmiş betonda ise uzun vadede mekanik dayanıma ve durabiliteye (dayanıklılık) olumlu katkıda bulunmaktadır.

Elektronik endüstrisinde silisyum metali veya ferrosilisyum (FeSi) alaşımlarının üretiminde elektrik ark fırınlarında SiO'dan oluşan gazlar çıkmaktadır. Fırınların soğuk kısımları olan üst bölümlerinde SiO gazı hava ile temas ederek hızla okside olur. Bu yapı amorf yapıya sahip SiO₂ durumuna dönüşen çok ince katı parçacıklara dönüşerek silis dumanını oluşturmaktadır. Silis dumanının %85- %98'i SiO₂'den oluşmaktadır (Özdemir, 2006).

Ortalama çapı 0,1-0,2 µm civarlarında olan silis dumanının tanecikleri normal portland çimentosundan yaklaşık 100 kat daha küçük olduğu bilinmektedir. Silis dumanı, bu yüksek inceliği sebebiyle uçucu kül ve yüksek fırın cürufuna kıyasla çok daha reaktiftir. Silis dumanının yüksek inceliği ve reaktivliğine bağlı olarak beton mikro yapısına önemli etkileri bulunmaktadır. Betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirerek betonun mukavemetini ve geçirimsizliğini artırır. Ayrıca içerdiği aktif silis sayesinde hidrasyon sonucu oluşan kalsiyum hidroksiti bağlayarak betonun durabilitesini arttırmaktadır.

Demir üretiminde demir cevherleri yüksek fırınlarda çok yüksek sıcaklıklarda ısıtılmaktadır. Bu fırınlarda kok kömürü yakıt olarak kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklığın etkisiyle eriyik haldeki demirin alınmasıyla geriye GYFC (granüle yüksek fırın cürufu) denilen mineral katkı malzemesi kalmaktadır.

Beton içerisine ikame edilen GYFC, betonun hidrasyon ısını büyük ölçüde azaltmaktadır. Dolayısıyla hidrasyon ısının az olması gereken kütle beton yapılarında (derin temel, geniş istinat duvarı, baraj, köprü vs.) yüksek performans göstermektedir. Betonda GYFC kullanımı durumunda betonun su geçirimsizliği ve terlemesi azalmaktadır. Ayrıca betonun sülfata karşı dayanıklılığını da arttırmaktadır.

Yeryüzündeki nüfusun hızlı artışı, sanayi ve teknolojinin gün geçtikçe üzerine ekleyerek gelişmesi gibi sebeplerle enerji ihtiyacında hızlı bir şekilde artmaya devam etmektedir. Bu sebeple özellikle sürdürülebilirlik konusu çok büyük önem arz etmekte olup bu konu paralelinde atık malzemelerin yönetimi, mevcut kaynakların doğru kullanımı gibi konular çok daha fazla hassasiyet kazanmıştır.

Şimdiye kadar dörtlü kombinasyonlar ile yapılan çalışmalar çok az olup, bu konuda yapılan benzer çalışmalar genelde harç numuneler üzerinde yürütülmüştür. Bu çalışmada endüstriyel atık olarak oluşan mineral katkıları olan, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanının beton üretiminde kullanımı araştırılmış, ikili, üçlü ve dörtlü kombinasyonlarda bağlayıcı içeren betonlar üretilmiştir. Çimento yerine ikame edilen mineral katkıları ile oluşturulan ikili, üçlü ve dörtlü kombinasyonlarda bağlayıcı içeren betonların mekanik, dayanıklılık ve bazı mikroyapı özellikleri araştırılmıştır. Böylece atıkların çimento yerine optimum miktarlarda ikame edilmesi ile çevreye daha duyarlı, sürdürülebilir ve ekonomik beton tasarımları oluşturulmaya çalışılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Uçucu Kül, Silis Dumanı ve GYFC İçeren Betonların Özellikleri

2.1.1. Eğilme ve Basınç Dayanımı

Betonun basınç dayanımı, eksenel basınç yükü etkisi altındaki betonun kırılmamak için gösterebileceği direnme kabiliyeti olarak tanımlanır. Eğilme deneyi malzemenin mukavemeti hakkında tasarım bilgilerini belirlemek ve malzemenin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini tespit etmek amacı ile yapılır. Enine yük taşıyan kiriş gibi elemanlar eğilmeye maruz kalırlar. Kirişin her bir bölgesinde eğilme momentleri meydana gelir. Buda eğilme gerilmesi ile alakalıdır. Betonun basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasında yaklaşıktır olsa bir korelasyon bulunmaktadır, o nedenle basınç dayanımı bilindiği takdirde eğilme dayanımı hakkında fikir edinmek mümkündür. Betonun eğilme ve basınç dayanım değerlerini bilmek, yapının dayanım, dayanıklılık ve teknik ömür gibi birçok konuda fikir verebilmektedir (Erdoğan, 2003). Mineral katkıları sahip oldukları pozolanik bağlayıcı özellikleri nedeniyle betonun dayanım özelliklerini önemli ölçüde değiştirirler.

Lam ve arkadaşları tarafından çimento yerine uçucu kül ve silis dumanı kullanıldığında betonun dayanımı, basınç-gerilme ilişkisi ve betonun kırılma davranışına etkisi incelenmiştir. İnceleme, sadece çimento ile yapılan şahit numuneye düşük ve yüksek miktarlarda ikame edilen uçucu külün ve silis dumanının, farklı su/çimento oranlarında beton karışımlarını kapsamaktadır. Sonuçlar incelendiğinde betona uçucu külün ve özellikle silis dumanının ikame edilmesinin numunelere pozitif yönde etki ettiği görülmüştür. Yüksek hacimli uçucu kül betonu, biraz daha düşük çekme mukavemeti göstermiş, az miktarda silis dumanı, silindirik basınç dayanımı ve çekme dayanımı üzerinde büyük bir pozitif etki yaratmıştır (Lam ve ark., 1998).

Mackerle tarafından yapılan araştırmada, düşük ve yüksek hacimde uçucu kül içeren ve az miktarda silis dumanı katkılı veya katkısız farklı su-çimento oranlarında beton karışımlarını tasarlanmıştır. Düşük hacimli uçucu kül, betonun çekme dayanımını iyileştirmiştir. Az miktarda silis dumanının, silindir basınç dayanımı ve gerilme mukavemeti üzerinde büyük bir pozitif etkiye sahip olduğu, ancak küp basınç dayanımı üzerinde daha az etkiye sahipken, ortaya çıkan betonun kırılma davranışının kırılğan olduğu görülmüştür (Mackerle, 1998).

Hazır betonda yüksek performans elde etmek için mineral katkı maddesi olan silis dumanı kullanılması ile oluşacak pozitif etki Topçu ve Kaval'ın 2000 yılında yaptıkları çalışmada da görülmüştür. Çalışmada 0,50 su / bağlayıcı ve %1,6 süper akışkanlaştırıcı olmak üzere iki farklı çimento türü kullanılarak; 300, 350 ve 400 dozlarda silika dumansız kontrol betonları ve silis dumanı ikame betonları üretilmiştir. Üretilen betonun ultrason hızı, Schmidt sertliği ve rezonans frekansı gibi hasar testleri ve 28 günlük silindir basınç dayanım testleri yapılmıştır. Her iki çimento türü üzerinde yapılan deneyler, %15 silis dumanı kullanılmasının en uygun sonucu verdiğini göstermiştir.

Siddique 2004 yılında yaptığı çalışmasında F sınıfı uçucu külü %35, %45 ve %55 oranlarında, uzunluğu 25 mm lik bir bitki olan san liflerle birlikte %0,25, %0,50 ve %0,75 oranlarında kullanılarak betonlar üretmiştir. Su/bağlayıcı oranı 0,47, akışkanlaştırıcı/bağlayıcı oranı ise %1,5 seçmiştir. İşlenebilirlik, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve darbe dirençlerini araştırmıştır. Deneyler sonucunda, çimentonun yerine üç farklı oranda uçucu kül ile üretilen numunelerin işlenebilirliğinin şahit numuneye göre arttığı, san liflerin artması ile ise slumpın düştüğü görülmüştür. %32, %43 ve %48 gibi yüksek ikame oranlarında 28. günlük basınç dayanımları düşmüştür. Bu etkinin külden kaynaklandığı san liflerin dayanıma bir etkisinin olmadığı ancak yarmada çekme dayanımlarının uçucu kül ile azalırken, san liflerinin yarmada çekme dayanımını arttırdığı belirtilmiştir. Ayrıca uçucu kül oranı artarken eğilme dayanımı azalmakta ancak san liflerin eğilme dayanımlarını da arttırmakta olduğunu vurgulanmıştır.

Safiuddin tarafından yapılan çalışmada silis dumanı ve uçucu külün ortaklaşa ikame edilmesi ile betonun taze ve sertleşmiş özelliklerinin ne şekilde etkilendiği incelenmiştir. Silis dumanı, yüksek basınç dayanımına, dinamik elastisite modülü ve darbe direncine katkıda bulunmuştur. Silis dumanı ve uçucu kül ortaklaşa betonun taze ve sertleşmiş özelliklerini iyileştirmektedir. Sadece uçucu kül kullanımı, yüksek performanslı betonun özelliklerini geliştirmek için silis dumanına göre önemli bir katkı sağlayamamıştır (Safiuddin, 2005).

Yazıcıoğlu ve Bozkurt tarafından yapılan çalışmada pomza ve mineral katkılı taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin incelenmiştir. Çalışmada CEM I 42,5 N sınıfı çimento, mineral katkı olarak kullanılan silis dumanı (SD) ve uçucu kül (UK) ile sırasıyla %10 ve %30 oranlarında ikame edilmiştir. Farklı oranlarda katkı maddeleri ile hazırlanan 3, 7, 14, 28 ve 90 günlük numunelere basınç, yarmada çekme dayanımı ve ultrasonik ölçüm testleri uygulanmış, elde edilen sonuçlara göre silis dumanı katkılı beton karışımlarının her kür süresinde daha iyi mukavemet sonuçlarına ulaştığı görülmüştür. Erken yaşlarda kontrol betonu olarak hazırlanan numuneler ile silis dumanı katkılı beton numuneleri benzer özellikler gösterirken, erken yaşlarda uçucu kül ilaveli beton serilerinde önemli bir artış görülmemiştir. Bununla birlikte UK beton serisi ileri yaşlarda (90. gün) kontrol betonuna daha yakın sonuçlar vermiştir (Yazıcıoğlu ve Bozkurt, 2006).

Barnett ve ark. yüksek fırın cürufu içeren karışımların erken yaşlardaki mukavemet gelişimleri büyük ölçüde kür sıcaklığına bağlı olduğunu gösteren bir çalışma yapmışlardır. Standard kür şartları altında, yüksek fırın cürufu harçlar, portland çimentolu harçlara göre daha düşük hızda mukavemet kazanırken, yüksek sıcaklıklardaki mukavemet kazanımı çok daha hızlıdır ve erken yaştaki mukavemet gelişimi yüksek ikame oranlarındaki cüruf katkılı karışımlar için daha önemli olmaktadır (Barnett ve ark., 2006).

2006 yılında yapılan çalışmada Çağatay ve Özdemir değişik oranlarda portland çimentosu (PÇ), silis dumanı (SD), uçucu kül (UK) ve granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) kullanılarak PÇ-SD-UK ve PÇ-SD-GYFC şeklinde iki farklı

üçlü karışım tasarlamış ve bu harçların basınç ve eğilme dayanımlarını araştırmışlardır. Tüm karışımlar için su/bağlayıcı oranı 0,5 alınmıştır. Deney sonuçlarına göre erken yaşta dayanım artışı, %10-%25 SD ile sadece %5 gibi düşük oranda UK veya GYFC kullanılmasıyla elde edildiği görülmüştür. Uzun dönemde (180 gün) PÇ-SD-UK içeren numuneler %3-%20, PÇ-SD-GYFC içeren numuneler ise %2-%13 oranında kontrol numuneden daha yüksek basınç değerlerine ulaşmışlardır. 6 ay sonunda tüm harç karışımları kontrol harç karışımı ile eşit veya daha fazla basınç ve eğilme dayanımları geliştirmişlerdir. SD ile %5 UK içeren harç guruplarında 1. günden sonra tüm numuneler kontrol numunenin basınç değerini aştığı gözlemlenmiştir. SD ile GYFC içeren harç numuneleri genel olarak 28. günden itibaren kontrol harca yakın veya daha yüksek basınç ve eğilme dayanımları geliştirmişlerdir. Erken yaşta dayanım artımı, SD ile sadece %5 gibi düşük oranda UK veya GYFC kullanılmasıyla elde edilmektedir. Ayrıca tüm üçlü karışımların (SD+UK+PÇ ve SD+GYFC+PÇ) basınç ve eğilme mukavemetleri arasında kuvvetli bir ilişki olduğu görülmüştür.

Fiber katkılı betonlarda, silis dumanı ilavesiyle birlikte eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımında meydana gelen değişimleri incelemek amacı ile Demirel ve Yazıcıoğlu yaptıkları araştırmalarında silis dumanı, CEM I 42,5 portland çimento, Elazığ yöresi bazik karakterli pomza agregası ve karbon fiber ile hafif beton numuneleri hazırlamışlardır. Çalışma kapsamında, silis dumansız hafif beton, silis dumansız karbon fiberli hafif beton, silis dumanlı hafif beton ve silis dumanlı fiberli hafif beton olmak üzere 4 farklı seri numune hazırlanmıştır. Karışımlar hazırlanırken, sabit slump değerinde çalışılmış ve çökme sınıfı S3 olarak alınmıştır. Kür süresini tamamlayan küp numunelere, önce tahribatsız deney yöntemi olan ultrases geçiş hızı deneyi, daha sonra basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Prizma numunelere ise eğilmede çekme deneyi yapılmış ve böylece hem karbon fiberin hem de silis dumanının hafif betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Karbon fiber ilavesi, mineral katkısız serilerde eğilmede çekme dayanımını %21,91 arttırırken; silis dumanı katkılı serilerde ise

%32,07 arttırmıştır. Silis dumanı açısından incelendiğinde ise, silis dumanı ilavesinin fiberli serilerde basınç dayanımını %31,12 arttırırken eğilmede çekme dayanımını %23,14 arttırdığı görülmüştür (Demirel ve Yazıcıoğlu, 2007).

Betonda ferrosilikon ve silikoferrokrom dumanları kullanarak bazı dayanım ve dayanıklılık özelliklerini incelemek üzere Ekinci ve Yeğinboğalı yaptıkları çalışmada üç farklı beton karışımı hazırlanmıştır. Bu betonlar katkısız (kontrol) betonlar, silis dumanı katkılı betonlar (%10, 15, 20, 25 ve 30) ve silis dumanı ve süper akışkan katkılı betonlardır (%10, 15 ve 20). Betonlara basınç dayanımı ve darbe hızı testleri uygulanmıştır. Betonların boşluk miktarı ve su emme miktarı azaldıkça hem basınç dayanımları artmakta hem de donma-çözülme olayına karşı daha dayanıklı oldukları anlaşılmıştır. Silis dumanlarının kullanım oranlarının artırılması betonlarda büyük boşlukların azalması ve buna karşın daha küçük yapılı boşlukların artmasına neden olduğu değerlendirilmiştir (Ekinci ve Yeğinboğalı, 2008).

Yüksek oranda Yumurtalık-Sugözü uçucu külü içeren betonun basınç ve eğilmeye karşı direncinin deneysel olarak incelendiği çalışmada ise farklı miktarlarda uçucu kül ikamesi ile beton karışımları oluşturulmuş süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı ilavesi ile sabit su-çimento oranında beton numuneleri hazırlanmıştır. Uçucu kül ile çimento ile ikame edilerek beton daha ekonomik şekilde üretilmiş ve tasarruf sağlanmıştır. Çimento ile ağırlıkça %10 ikame oranında normal beton dayanımına eşdeğer dayanım sonuçlarına ulaşılabileceği görülmüştür. Çalışmaya göre, mevcut uçucu külün çimentoya %10-%40 oranları arasında ikame edebileceği ve incelenen betonun, uygun bir şekilde tasarlandığı takdirde özellikle beton yol kaplaması olarak kullanılabileceği belirtilmiştir (Çağatay ve Günindi, 2008).

Portland çimentosu (PC) ile uçucu kül (UK) mineral katkı maddesinin, ikili harç numunelerinin basınç, eğilme ve aşınma özelliklerine olan etkilerini incelemek üzere Çağatay ve Özdemir'in yaptıkları çalışmada, su/bağlayıcı oranını tüm karışımlar için sabit 0,5 alınmıştır. PÇ ile sadece UK içeren harç

karışımlarında ilk günlerde basınç dayanımı kazanımlarının ikame oranları arttıkça yavaşladığı fakat daha sonraki günlerde basınç dayanımı kazanımının giderek artış gösterdiği izlenmiştir. 360 günün sonunda PÇ+UK içeren numuneler şahit numunenin basınç değerini %9-%24 oranında aşmışlardır. Tüm numunelerde aşınma mukavemeti ile basınç ve eğilme mukavemetleri arasında kurulan ilişkilerin kuvvetli olduğu görülmüştür. Basınç, eğilme ve aşınma dayanımı test sonuçlarına göre ikili karışımlarda %5-%30 mertebesinde UK 'ün çimento katkı malzemesi olarak kullanılabileceği belirtilmiştir (Çağatay ve Özdemir, 2009).

C sınıfı uçucu kül (FA) ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GGBFS) ile üretilen reaktif toz betonun (RPC), basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve tokluk gibi mekanik dayanımlarını, farklı kürleme koşulları (standart, otoklav ve buhar) altında incelenmesi için Yazıcı ve ark. 2009 yılında çalışma yapmışlardır. Çalışma sonuçları, RPC'nin basınç dayanımının, standart kürleme ile kıyaslandığında buhar ve otoklavlamadan sonra önemli ölçüde arttığını göstermektedir.

Portland çimentosu (PÇ) ile silis dumanı (SD) mineral katkı maddesinin ikili harç numunelerinin işlenebilirlik, basınç, eğilme ve aşınma özelliklerine olan etkilerinin incelenmesi için Çağatay ve Özdemir'in yaptıkları çalışmada, tüm karışımların su/bağlayıcı oranını 0,5 alınmıştır. Sadece PÇ ve SD içeren numunelerde ilk 28 günde mukavemet artış hızı çok fazla iken 28. günden sonra bu artış giderek düşmeye başladığı gözlemlenmiştir. Yapılan basınç dayanımı, eğilme dayanım ve aşınma dayanımı sonuçlarına göre ikili karışımlarda %5-%20 mertebesinde SD' nin çimento katkı malzemesi olarak kullanılabileceği kanaatine varılmıştır (Çağatay ve Özdemir, 2009).

Çevresel faktörlerin dikkate alınması ile yapılan beton tasarımı daha sürdürülebilir bir yapı elde edilebilmesini sağlar. Betonarme yapılarda yangın durumu göz önüne alındığında, yüksek sıcaklık, sürdürülebilir beton tasarımında etkili olan önemli bir çevresel faktördür ve betonun fizikomekanik özelliklerinde ciddi kayıplara neden olabilir. Bu kapsamda Subaşı ve arkadaşları çalışmalarında,

yüksek sıcaklığın uçucu kül ikameli çimentolar üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışma kapsamında hazırlanan numuneler 100-200-300-400-500-600 °C sıcaklıklarına maruz bırakılarak basınç ve eğilme dayanımı deneyleri TS EN 196-1 standardına uygun olarak yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. %5 oranında uçucu kül ikamesi ile çimento mekanik ve fiziksel özelliklerinde iyileşmeler sağlanmıştır. %10'a kadar uçucu kül ikamesi ile çimento harçları yüksek sıcaklık etkisinden daha az zarar görmüştür. Tüm uçucu kül ikame oranlarında sıcaklık artışına paralel olarak dayanım değerleri düşmüştür (Subaşı ve ark, 2011).

Islak ve kuru olmak üzere iki farklı ortamda kür edilmiş farklı su/bağlayıcı oranlarında tasarlanmış harçların, aşınma dirençleri ile eğilme ve basınç mukavemetleri üzerinde cüruf ikamesinin etkilerini araştırmak için Bilim ve Atış yaptıkları çalışmada, 4250 cm² /gr blaine değerine sahip olacak şekilde öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. CEM I 42,5 R Portland çimentosunun kullanıldığı karışımların kum/bağlayıcı oranı 2,75 olup, su/bağlayıcı oranları ise sırasıyla 0,30, 0,40 ve 0,50 olarak seçilmiştir. Cürufun çimento ile ikamesi ise her su/bağlayıcı oranı için %0, 20, 40, 60 ve 80 olarak belirlenmiştir. Hazırlanan karışımlardan 40x40x160 mm boyutlarında prizma olarak üretilen harç numunelerinin, 7, 28, 90 ve 180 günlük Los Angeles aşınma dirençleri ile eğilme ve basınç dayanımları bulunmuştur. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, kür şartlarının cüruf içeren numuneleri, şahit numunelere göre daha fazla etkilediğini ve ıslak kür edilmiş harç numunelerinin, kuru kür edilmiş harç numunelerine göre daha yüksek dayanım ve aşınma direnci sergilediklerini göstermiştir. Uygun bir kür uygulanması şartıyla, 0,30 gibi düşük su/bağlayıcı oranlarında yapılacak %40 yüksek fırın cürufu ikamesinin dayanım ve aşınma direnci testlerinin tatminkâr sonuçlar verebileceği, bunun yanı sıra, Los Angeles aşınma deney aletinin, aşınma ve dayanımlar arasında kurulan ilişkilere bağlı olarak, harçların aşınma oranlarının bulunmasında kullanılabileceği belirtilmiştir (Bilim ve Atış, 2011).

Mohamed tarafından yürütülen çimento ile ikame edilen 2 farklı mineral katkının kendiliğinden yerleşen betona (SCC) etkisinin incelendiği deneysel

çalışmada, birincisi farklı uçucu kül yüzdeleri (FA), ikincisi farklı silis dumanı (SD) yüzdeleri ve üçüncüsü FA ve SD 'nın bir karışımını kullanan üç çeşit karışım hazırlanmıştır. Kendiliğinden yerleşen betonlara çökme ve V-huni testi deneyleri yapıp, beton basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Sonuçta, %15 SD içeren SCC' nin, 28 günlük basınç dayanım değerinin diğer numunelere kıyasla daha yüksek basınç dayanımı değerleri verdiği gözlemlenmiştir (Mohamed, 2011).

KYB (kendiliğinden yerleşen beton), geleneksel beton ile kıyaslandığında işlenebilirlik, işçilik maliyetinin düşmesi ve yüksek dayanım gibi faydalar sağlar. KYB üretiminde viskozite düzenleyici ve yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkıları ve toz malzeme kullanılmalıdır. Toz malzeme olarak kireçtaşı tozu, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanı kullanılmaktadır. Bu bağlamda Tohumcu ve Bingöl yaptıkları çalışmada mineral katkı maddesi olarak çimento yerine ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı ve %25, %40 ve %55 oranlarında uçucu kül kullanarak KYB üretmiş ve taze beton özellikleri ve sertleşmiş betonların 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Silis dumanı ilavesi basınç dayanımlarında artışa yol açarken uçucu kül katkılı betonlarda dayanım düşüşleri belirlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı değeri 88 MPa değeri ile %15 silis dumanı kullanılarak üretilen betonlardan elde edilmiştir (Tohumcu ve Bingöl, 2013).

2014 yılında Wongkeo ve ark. tarafından silis dumanı ve yüksek oranda kalsiyum içeren uçucu kül ile ikili ve üçlü olarak harmanlanmış kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) basınç dayanımı ve klorür direnci üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışma yapılmıştır. Yüksek oranda uçucu kül içeren ikili kombinasyon olarak hazırlanan tasarımın tüm test yaşlarında (3, 7, 28 ve 90 gün) KYB' nin basınç dayanımını düşürdüğü görülmüştür. Bununla birlikte, uçucu kül ve silis dumanı içeren üçlü harmanlanmış betonun, aynı ikame seviyesindeki ikili karışımılı uçucu küllü beton ile karşılaştırıldığında 7 gün sonra daha yüksek basınç dayanımı kazandığı, yüksek kalsiyum içerikli uçucu kül ve silis dumanının üçlü harmanlı karışım olarak kullanıldığında 60 MPa' dan daha fazla basınç dayanımının elde

edilebildiği görülmüştür. KYB’ de görülen geçirgen gözenek yapısı, içindeki boşluklar ve su emiliminin yüksek olması artan uçucu kül içeriği ile azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir.

Portland çimentosu (PÇ) ile öğütülmüş yüksek fırın cürufunun ikili kombinasyon harçlarının basınç dayanımı, eğilme dayanımı, aşınma direnci, işlenebilirlik ve büzülme üzerindeki etkisi üzerine araştırmak üzere Çağatay ve Özdemir tarafından yapılan çalışmada tüm karışımlar 0,5 sabit su/bağlayıcı oranı ile hazırlanmıştır. Çalışmada PC yerine %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30, %50 ve %75 oranında GGBFS kullanılmıştır. Örneklerin erken ve geç dönemdeki özelliklerini belirlemek için 1, 3, 7, 28, 90 ve 360. günlerde deneyler yapılmıştır. Basınç, eğilme ve aşınma direnci sonuçlarına göre, ikili karışımlar için %5-%50 oranında GGBFS ikamesinin çimento ve beton üretiminde mineral katkı olarak kullanılabileceği görülmüştür. %25-50 GGBFS ikameli numuneler kontrol numuneleri ile aynı mukavemete sahip olduğu belirtilmiştir. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve aşınma dayanımı sonuçlarına göre, ikili karışımlar için %5-50 arasındaki GGBFS ikamesinin karışımda kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Çağatay ve Özdemir, 2016).

CEM I 42,5 R çimentosu ile hacimce %10, %20, %30 ve %40 oranında ikameli edilen barit, diatomit, silis dumanı ve F sınıfı uçucu kül gibi farklı minerallerin kullanılmasıyla betonun bazı mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisinin deneysel olarak incelenmesi amacı ile yapılan çalışmada, 28 günlük dayanıma sahip mineral katkılı beton numunelerin; kuru birim ağırlıkları, su altı ağırlıkları ve suya doymuş ağırlıkları hesaplanmıştır. Su emme yüzdeleri de tespit edilen beton numunelerin puls geçiş hızı (PGH) ölçümleri yapılmış, daha sonra 200, 400, 600 ve 800C° gibi yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan numuneler, oda sıcaklığın da soğumaya bırakılıp basınç dayanımları test edilmiştir. En yüksek su emme diatomit katkılı betonlarda (%9,8) olurken, en yüksek basınç dayanımları %10 barit tozu katkılı betonlarda (46 N/mm²) elde edilmiştir (Esen, 2017).

Granüle Yüksek Fırın Cürufu (GBFS) veya Silis Dumanı (SF) ikame edilen çimento harçlarının ısı sonrası performansı üzerine yapılan deneysel çalışmada, çimento yerine %7, 14 ve 21 puzolanik malzeme içeren harç numuneleri üzerinde basınç, çekme ve eğilme dayanımı testleri yapılmıştır. Isıtma işlemini gerçekleştirmek için numuneler 25, 100, 250, 500, 700 ve 900 °C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Elde edilen neticelere göre, düşük ve yüksek maruz kalma sıcaklıklarında (250 ve 500 °C' ye kadar veya daha yüksek), GBFS ve SF kullanımının harç performansını etkili şekilde artırabildiği gözlemlenmiştir. (Ghasem ve ark., 2019).

Betonda kullanılacak standartları karşılamayan kalsiyum içeriği yüksek (≈ 43) Afşin-Elbistan uçucu külünün (FA) jeopolimer hammadde olarak kullanılmasının amaçlandığı çalışmada, bu yüksek kalsiyum içerikli FA'nın jeopolimer hammadde olarak kullanımını artırmak için, silika dumanı (SF) ve atık cam tozu (GP) olmak üzere iki yüksek silika kaynaklı endüstriyel yan ürün değerlendirilmiştir. Bu yan ürünler ağırlığa göre ve FA yerine %5, %15, %20, %25 ve %50 konsantrasyonlarında kullanılmıştır. Hazırlanan numunelerin taze ve sertleşmiş birim ağırlıkları, ultrasonik darbe hızları, basınç dayanımları ve yarmada gerilme dayanımları ölçülmüş, ayrıca mikroyapıda meydana gelen değişiklikler, taramalı elektron mikroskobu, enerji dağıtıcı X-ışını analizleri ve X-ışını kırınım analizi ile incelenmiştir. Referans numune basınç dayanımı değeri 9.4 MPa iken, SF içeren seriler için en yüksek basınç dayanımı sonucu 27.2 MPa, GP içeren seriler için en yüksek değer 22.2 MPa bulunmuştur. Deneysel sonuçlar, çimento ve beton endüstrisinde kullanılamayan Afşin-Elbistan uçucu külünün yüksek silika kaynağı desteği ile jeopolimer hammaddesi olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur (Sevinç ve Durgun, 2020).

Farklı mineral katkıların kütlece çimento ile ikame edildiği çalışmada harç numuneler mekanik ve elektromanyetik testlerden geçirilmiş yansıma, geçirgenlik ve soğurma özellikleri incelenmiştir. Farklı katkı maddeleri ve dozajlarla harç numuneleri hazırlanmıştır. Basınç dayanımı test sonuçlarına göre, öğütülmüş

granüle yüksek fırın cürufu içeren harçların erken yaş dayanımı zayıf ve ileri yaş basınç dayanımı değerlerinin yüksek olduğu, uçucu kül içeren harçlarda ise 7. ve 28. günde harç karışımında artan katkı miktarı ile daha düşük basınç dayanımına sahip oldukları belirtilmiştir. 28 günlük numunelerde, silis dumanı içeren harçlar maksimum mukavemet değerlerine %20 ikame seviyesinde sahip olmuş ve son olarak %10'dan fazla pirinç kabuğu külü içeren harçlar artan pirinç kabuğu külü ile daha zayıf mukavemet davranışları göstermiştir. Harç örneklerinin elektromanyetik test sonuçlarına göre öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren harçların, geniş bir frekans aralığında iletişim alanında yüksek gizlilik teknolojisi ve elektromanyetik kalkan uygulamalarında kullanılabileceği ortaya çıkmıştır (Öztürk ve ark.,2020).

2.1.2. Sülfat ve Diğer Zararlı Kimyasallara Karşı Dayanıklılık

Betonarme yapılarla ilgili önemli durabilite sorunlarından birisi de sülfat hücumudur. Sülfat, beton içinde meydana gelen belirli reaksiyonlar yoluyla çatlama, genleşme ve dökülme gibi bazı düzensizliklere neden olur. Sonuç olarak beton dayanımında bozulmaya sebep olmaktadır.

Kimyasal ortam etkilerini, şahit olarak portland çimentosu (OPC) ile hazırlanan harç numunelerin, çeşitli miktarlarda silis duanı (SF) ikame edilerek karşılaştırılması amacıyla yapılan araştırmada; sülfürik asit, hidroklorik asit, nitrik asit, asetik asit, fosforik asit ortamlarında numunelerin tepkileri incelenmiştir. Çalışma neticesinde, silis dumanı ikame edilmiş numunelerin basınç dayanım deney sonuçlarının ve çeşitli kimyasal etkilere maruz kalan numune dirençlerinin daha iyi sonuç verdiği görülmüştür (Roy ve ark., 2001).

Alkalilerle aktive edilmiş cüruf içeren betonların sülfat dayanıklılığını tayin etmek amacıyla tarafından yapılan çalışmada, %5 sodyum sülfat ve %5 magnezyum sülfat çözeltilerine maruz bırakılan cürufllu ve saf portland çimentolu numunelerin bir yıl sonundaki mikro yapısal değişiklikleri ve basınç mukavemeti gelişimleri incelenmiştir. Sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerde oluşan mukavemet kayıplarının, alkalilerle aktifleştirilmiş cüruf içeren betonlar

için %17, normal portland çimentolu betonlar için ise %25 olduğu, magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerde meydana gelen mukavemet kayıpları ise daha büyük olup, alkalilerle aktive edilmiş cüruf katkılı betonlarda %23, normal portland çimentolu betonlarda ise %37 olarak tespit edilmiştir. Sülfat atağı neticesinde meydana gelen bozulmanın ana ürünleri, portland çimentolu sistemlerde etrenjit ve alçı olurken, alkalilerle aktive edilmiş cüruf lu betonlarda yalnızca alçı olduğu belirlenmiştir (Bakharev ve ark., 2002).

Uçuşu kül ve öğütölmüş granöle yüksek fırın cüruf u içeren betonların özelliklerini araştıran ve bu amaçla %40 uçucu kül içeren beton ve portland çimentolu kontrol betonları hazırlayan Li ve Zhao, bu betonların kısa ve uzun dönemdeki performanslarını incelemişlerdir. Araştırmada, 100x100x300 mm boyutlarındaki test numuneleri, 3 günlük ıslak kürün ardından, 4 gün oda sıcaklığında bekletilen 8, 16 ve 50 haftalık süreyle %2 H₂SO₄ çözeltisinde bekletilmiştir. Deney sonuçlarına göre, %15 yüksek fırın cüruf u ve %25 uçucu kül içeren betonların asit ataklarına karşı hem portland çimentolu hem de %40 uçucu küllü betonlardan daha üstün olduğunu, 50 haftanın sonunda meydana gelen ağırlık değişimlerinin de yaklaşık %8 civarında çıktığı ileri sürölmüştür. Portland çimentolu betonların H₂SO₄ atağına karşı gösterdikleri zayıf dayanıklılık, beton içerisindeki serbest kirecin ve büyük boşlukların varlığından ileri gelmekte olup, asit atağına karşı %40 uçucu kül içeren betonlarda erken yaşlarda görölen zayıf dayanıklılık ise, hidrate olmamış çok sayıdaki uçucu kül tanelerin bulunmasından ve çimento hamurunun boşluklu olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir (Li ve Zhao, 2003).

%8 SD, %25 UK ve %25 GYFC katkılı ve 0,30, 0,45, 0,60 su/bağlayıcı oranına sahip harç numunelerinin %10 Na₂SO₄ ve %10 MgSO₄ çözeltilerindeki dayanıklılıklarının incelendiğı çalışmada, 9 ay boyunca bu çözeltilerde bekletilen numunelerin mikro yapıları optik ve taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Su/bağlayıcı oranı arttıkça genleşmenin de o arttığı ve %8 SD katkılı

harçların en az genleşme gösterdiği, ikinci olarak GYFC ve en fazla genleşmeyi de UK katkılı harçların gösterdiği açıklanmıştır (Nehdi ve Hayek, 2005).

Donma-çözülme, değişen nem koşulları, aşındırıcı yükler, asit, sülfat, alkali agrega reaksiyonu, klorür veya karbonatlaşma etkisi betona zarar veren en önemli faktörlerdir. Bu nedenle betonun hizmet ömrü boyunca performansı olumsuz etkilenir. Yani sertleştikten sonra çevre şartlarına ve yangına karşı drençli hale gelen beton, teknik hizmet ömrü boyunca mekanik, fiziksel veya kimyasal yollarla zarar görebilir. Klorür kaynaklı çelik korozyon, çelikle güçlendirilmiş beton yapılar için dünya çapında en yaygın hasarlardan biridir. Yüksek alkaliliğe sahip kaliteli beton, içine gömülü çelik yüzey üzerinde pasif bir film oluşturarak korozyonun ilerlemesini engeller. Ancak klor atağında pasif tabaka zarar görür ve çelik korozyona uğrar. Bu kapsamda Özkul ve Yamaç silis dumanı katkılı beton numuneleri içerisine gömülü çelik donatıların klorür etkisi altında korozyonunu incelemişler, bu doğrultuda, farklı silis dumanı/toplam bağlayıcı, su/toplam bağlayıcı ve toplam bağlayıcı oranları kullanılarak üretilen silindir numuneler sırası ile 7 gün bir molar NaCl çözeltisi içerisinde ve 7 gün havada bırakılmıştır. İki haftada bir olmak üzere Gecor 8 cihazı yardımı ile öz direnç, yarı hücre potansiyeli ve korozyon hızı ölçümleri yapılmıştır. Deneysel çalışma sonuçları, silis dumanı katılmasının betonun korozyon dayanıklılığını arttırdığını göstermiştir (Özkul ve Yamaç, 2010).

Betonda mineral katkı maddesi olarak kullanımının incelendiği araştırmada, silis dumanı (mikro-silika veya nano-silika) ikame edilmiş betonun taze ve sertleşmiş özellikleri incelenmiş, çeşitli araştırmalardan belirgin sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar, SF ikame edilmiş betonun mekanik özelliklerinde önemli bir gelişme olduğunu göstermiştir. SF değişim yüzdesinde bir artış olduğunda, işlenebilirlikte azalma eğilimi (çökme değeri) belirlenmiştir. Çalışma ayrıca silika dumanının su emme, geçirimsizlik, sülfat atağı ve klorür gibi dayanıklılık parametrelerinin beton üzerinde önemli derecede olumlu etkisini göstermektedir (Imam ve Srivastava, 2018).

Değişik mineral katkıları içeren farklı tasarımlara sahip betonların hava, %3,5 deniz suyu ve %5 sülfürik asit ortamlarında durabilite performanslarının incelenmesi amacıyla yürütülen çalışmada kontrol (K) ve uçucu kül betonlarının (U) eşdeğer su/çimento oranı 0,45 olup, bağlayıcı miktarları sırasıyla 400 ve 470 kg/m³'tür. Cürufu (C) ve hem uçucu kül hem de silis dumanı içeren betonların (US) betonların eşdeğer su/çimento oranı 0,53 olup, bağlayıcı miktarları 500 ve 440 kg/m³' tür. Üretilen betonların farklı ortamlardaki durabilite performansları, ağırlık ve basınç dayanımlarındaki değişimler ile belirlenip, toplam bağlayıcı ve eşdeğer su/çimento oranı parametrelerinin beton performansına etkileri kapsamlı bir şekilde irdelenmiştir. Sonuçlara göre, uçucu küllü ve silis dumanlı beton diğer betonlardan daha yüksek eşdeğer su/çimento oranına ve diğerlerinden daha az çimento miktarı içermesine rağmen kimyasal etkilere karşı en iyi performansı göstermiştir. En kötü kimyasal performansı ise yüksek CaO içerdiğinden dolayı cürufu ve kontrol betonlar göstermiştir. TS 13515 standardında kullanılan çimento eşdeğerlik katsayısı uçucu kül için uygun sonuçlar verirken, cürufu ve silis dumanı içeren betonların eşdeğer su/çimento hesaplamalarında kullanılmak üzere TS 13515 standardına önemli tavsiyelerde bulunulmuştur (Niş, 2009).

Silis dumanı ve uçucu külün betonun sülfat direncine karşı etkisinin araştırılması amacı ile yürütülen çalışmada üretilen betonlarda ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı ve ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında çimento yerine uçucu kül ikame edilmiştir. Üretilen betonlardan hazırlanan numuneler üzerinde 28, 90 ve 180 günlük kür sürelerinden sonra basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve birim ağırlık testleri yapılmıştır. Ayrıca, üretilen betondan hazırlanan numuneler, ASTM C 1012' ye göre sülfat testleri yapmak için 100 g / l su içeren sülfat (Na₂SO₄) içinde 28 günlük kürlenme süresinden sonra 90 gün 180 gün sülfat etkisinde bırakılmıştır. Sülfata maruz örnekler karşılaştırıldığında hem basınç hem de eğilme dayanımları için en iyi sülfat dayanım performansı %10 uçucu kül ve %5 silis dumanı içeren betonlardan elde edilmiştir (Bingöl ve Balaneji, 2019).

2.1.3. Aşınma

Betonun aşınma dayanımının yüksek olması için basınç dayanımının yüksek olması gerekir. Betonda uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıların kullanılması betondaki gözenekliliği ve mikro çatlakları azaltarak daha yüksek mukavemet ve dolayısıyla daha yüksek aşınma dayanımı sağlar (Hague ve Kayalı, 1998).

Beton yüzeyine sürtünme veya çarpma şeklinde gelen kuvvetler, betonun yüzeyinde adeta törpülercesine etki yaratmakta, yüzeyin aşınmasına yol açmaktadırlar. Aşınma yavaş tempoda gerçekleşen fiziksel ve mekanik bir kavramdır. Aşınma dayanımı yapının ömrü ile ilgili fikir sağlar (Erdoğan, 2003).

Yazıcı ve Sezer (2007) tarafından yapılan çalışmada, 65-85 MPa basınç dayanımı olan yüksek dayanımlı betonun aşınma dayanımı ile basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla yüksek dayanımlı beton kontrol karışımı ve katkı içeren yüksek dayanımlı beton karışımlarından oluşan toplam altı beton karışımı hazırlanmıştır. Tüm karışımların 28 günlük basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve aşınma dayanımı belirlenmiştir. Basınç ve eğilme dayanımına bağlı olarak betonların aşınma direncini tahmin eden matematiksel bir denklem önerilmiştir.

Betonların dayanıklılık özelliklerinin incelendiği çalışmada, çimento yerine silis dumanı (SD), uçucu kül (UK) ve yüksek fırın cürufu (YFC), ağırlıkça %5 ve %10 tek, %10 ikili ve üçlü karışım olarak ikame edilmiştir. Ayrıca agrega yerine %5 ve %10 YFC kullanılmıştır. Hazırlanan farklı tasarımlardaki numunelerin 7, 28, 180. günlerde basınç dayanımı, 28 günlük numunelerin geçirgenliği ve aşınması ile 60 günlük sülfat direnci ve SEM taramaları incelenmiştir. Yüksek fırın cürufu dayanıklılığa ve dayanıma olumlu katkıda bulunmuştur (Binici ve ark., 2013).

2.1.4. Rötire ve Karbonatlaşma

Beton üretiminde mineral katkı kullanımının betonda oluşacak rötreye etkisi kullanılan mineral katkının tipine ve miktarına bağlı olarak değişmektedir. Genel olarak çimentonun kendisinden daha ince bir mineral katkı ile ikamesi rötreyi bir miktar daha artırsa da karbon oranı az ve inceliği yüksek uçucu küllerin kullanılmasıyla betonların rötresi bir miktar azalmaktadır (Lea, 1970).

Silis dumanı miktarının artırılması toplam büzülme önemli ölçüde etkilemeyip, karışımdaki silis dumanı oranı arttıkça otojen büzülme de artmaktadır (Akçaözoğlu, 2007).

Silis dumanı katkılı harçların karbonatlaşma ve büzülme özelliklerinin araştırıldığı çalışmada, normal portland çimentosunun (PÇ 42,5) ağırlıkça %10, 15, 20 ve 40 silis dumanı ikamesi ile hazırlanan harç karışımlarının su/bağlayıcı oranları 0,25, 0,30, 0,40, 0,50 ve 0,60 olarak ayarlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda tüm su/bağlayıcı oranlarında karbonatlaşma değerlerinin 28., 90. ve 180. günlerde arttığı görülmüştür. %10 ve %15 oranında silis dumanı kullanılması karbonatlaşma değerlerini düşürürken, silis dumanı kullanımı %40 oranına çıktığında karbonatlaşma değerlerini artırmıştır. Su/bağlayıcı oranının 0,25 ve 0,30 olduğu harçlarda, %40 silis dumanı ilavesi hariç diğer ikame oranlarında rötreyi azaltıcı etkisi belirgin olarak görülmüştür. Ancak su-bağlayıcı oranının artması ile silis dumanının rötreyi azaltıcı etkisi düşük seviyelerde kaldığı bildirilmiştir (Özcan ve Atış, 2017).

2.1.5. İşlenebilirlik

Taze betonun segregasyon göstermeden, kolayca karılabilirliği, taşınabilirliği, yerleştirilip sıkıştırıldıktan sonra kolayca düzeltilebilmesine işlenebilirlik özelliği adı verilir. Taze betonun işlenebilirliği ne kadar yüksekse beton kalıba o kadar iyi yerleştirilecek ve o kadar iyi sıkıştırılabilecektir. İnce taneli

mineral katkı maddelerinin kullanımı sabit bir çökme değeri için karma suyu ihtiyacını bir miktar artırsa da betonun daha akışkan olmasını sağlamaktadır (Erdoğan ve Erdoğan, 2006).

Çimento dozajı düşük beton tasarımlarında, çimentonun yaklaşık %5' i oranında SD ilave edilirse su ilavesine gerek kalmayabilir. Ayrıca, SD katkı maddesi, plastikleştirici veya süper akışkanlaştırıcı katkı maddeleri ile kullanılmalıdır. Bu sayede SD katkısı artsa bile su miktarını artırmadan hatta azaltarak aynı işlenebilirliğe ulaşmak mümkün olabilir (Khayat ve Aitcin, 1992).

Beton üretiminde kullanılan çimentonun yüksek fırın cürufu ile ikamesi sonucunda, betonun işlenebilirliğinin ne şekilde etkilendiğini araştırmak için yapılan çalışmaya göre, eşit slump değerlerinde, portland çimentoları ile yapılmış betonla kıyaslandıklarında yüksek fırın cürufu ikame edilmiş betonlar daha düşük su ihtiyacı gösterirler, böylece daha düşük su ile aynı işlenebilirlik oranına sahip olurlar. Bu durumun sebebi, cüruf taneciklerinin pürüzsüz yüzey dokusuyla ve kimyasal reaksiyonların daha geç meydana gelmesinden kaynaklı olduğu düşünülebilir. Ayrıca, yüksek fırın cürufunun, klinkere göre, daha az bir yüzey pürüzlülüğüne sahip olması ve özgül ağırlığının düşük olması, dolayısıyla hacim olarak daha fazla bağlayıcı hamur elde edilmesi, cüruf katkılı betonların işlenebilirliğinin pozitif yönde etkileneceğinin göstergeleridir (Newman ve Choo, 2003).

Uçucu kül (UK) ikameli betonlar, katkısız betonlara göre daha iyi işlenebilir. UK kullanıldığında betondaki bağlayıcı hamur hacmi artmaktadır. Bağlayıcı hamur hacminin daha büyük olması, taze betonda agrega taneleri arasını daha iyi doldurur ve plastisite sağlar. Ek olarak, UK tanelerinin küresel şekli, iç sürtünmeyi azaltır ve betonun akışkanlığını artırır. Öğütülmüş GYFC' nun katkı maddesi olarak kullanılması, betonun işlenebilmesini ve dayanımını arttırmakta, büzülmesini azaltmaktadır (Erdoğan, 2003).

Kendiliğinden yerleşen beton (SCC) üretiminde, mineral katkı maddelerinin üçlü ve özellikle dörtlü kombinasyonlarının kullanımı SCC' lerin

üretiminde yeterli uygulama alanı bulamamıştır. Oysa mineral katkı maddelerinin SCC üretiminde kullanılması çevresel etki ve maliyet azaltılabilmesi için beton endüstrisine umut verici bir seçenektir. Mineral katkılı SCC' lerin özelliklerini araştırmak için yapılan deneysel çalışmada sabit su/bağlayıcı oranı 0,44 ve toplam bağlayıcı içeriği 450 kg/m^3 olan toplam 22 farklı beton karışımı tasarlanmıştır. Kontrol karışımı bağlayıcı olarak yalnızca portland çimentosu (PC) içerirken, geri kalan karışımlar ikili, üçlü ve dördü şeklinde, çimento (PC), uçucu kül (FA), öğütülmüş yüksek fırın cürufu (S) ve silis dumanı (SF) içermektedir. SCC' lerin taze özellikleri çökme akış çapı, çökme akış süresi, L-kutu yükseklik oranı ve V-huni akış süresi için test edilmiştir. Ayrıca betonların sertleştirilmiş özellikleri su geçirgenliği, klorür geçirgenliği, elektriksel direnç, kuruma büzülmesi, basınç dayanımı ve ultrasonik hız açısından test edilmiştir. Sonuçlar, betonların dayanıklılık özellikleri dikkate alındığında, S ve SF' nin üçlü kullanımının en iyi performansı sağladığını göstermiştir (Ortiz ve ark, 2009).

Ultra ince uçucu kül (UFFA) ve silis dumanının (SD) taze ve sertleşmiş betonun özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak için UFFA ve SD içeren üçlü harman karışımı, UFFA veya SD içeren ikili harman karışımı ve şahit portland çimentolu betonların performanslarının karşılaştırıldığı çalışma yapılmış, SD veya UFFA' nın betona dâhil edilmesinin daha yüksek mukavemet ve gelişmiş dayanıklılık (klorür penetrasyonuna direnç) ile sonuçlandığı görülmüştür. Bu faydaların SD betonunda daha belirgin olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, SD betonu düşük işlenebilirlik ve erken yaşta büzülme gibi birkaç dezavantaj gösterirken, UFFA ilavesi, işlenebilirliği arttırmış ve erken yaşta büzülmeyi azaltmıştır. Test sonuçları hem SD hem de UFFA' nın dâhil edilmesinin, SD betonundaki özelliklere benzer olarak, erken yaşta yüksek dayanım ve gelişmiş dayanıklılık gösteren bir beton karışımı ürettiğini göstermiştir (Hossain ve ark., 2009).

Silis dumanı içeriğindeki artışla birlikte işlenebilirlik azalır ve büzülme yavaş yavaş artar. Zhang ve Li' nin yaptığı çalışmada silis dumanının, su

geçirimsizlik, kuru büzülme özelliği, karbonatlaşma direnci ve donma-çözülme direnci dâhil, uçucu kül içeren beton kompozitlerin işlenebilirliği ve dayanıklılığı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Dört farklı silis dumanı içeriği (%3, %6, %9 ve %12) kullanılmıştır. Sonuçlar, silis dumanının eklenmesinin, uçucu kül içeren beton kompozitlerinin donma-çözülme direncini, su geçirimsizliğinin dayanıklılığını, karbonatlaşma direncini büyük ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Silis dumanı içeriğindeki artışla birlikte, su geçirgenliğinin azaldığı, numunelerin karbonatlaşma derinliğinin kademeli olarak azaldığı görülmüştür. Ancak, silis dumanının eklenmesi, uçucu kül içeren beton kompozitlerin işlenebilirliği ve kuru büzülme özelliği üzerinde küçük bir olumsuz etkiye sahiptir (Zhang ve Li, 2013).

2.1.6. Hidratasyon Isısı

Çimento ile silis dumanının ikame edildiği betonlarda %8-%10 arasında daha az hidratasyon ısısı açığa çıkmaktadır (Malthotra vd, 1983).

Mineral katkı (puzolan) kullanılan betonlarda çimento miktarı daha az olduğu için hidratasyon ısısı da düşmektedir (Erdoğan 2003).

Beton üretiminde çimentonun mineral katkı ile ikamesinin hidratasyon ısısına olan etkilerinin araştırılması için Langan ve ark. tarafından yapılan çalışmada portland çimentosu, silis dumanı ve uçucu kül karışımlarında kalorimetre testlerinin sonuçlarını incelenmiştir. Veriler silis dumanının yüksek su/çimento oranlarında çimento hidratasyonunu hızlandırdığını ve düşük su/çimento oranlarında hidratasyonu geciktirdiğini göstermektedir. Ayrıca, uçucu külün, yüksek su/çimento oranlarında, çimento hidratasyonunu daha belirgin şekilde geciktirdiği görülmüştür. Silis dumanı ve uçucu kül çimento ile kullanıldığında, silis dumanının reaktivitesi engellenmekte, hidratasyon ısısının düşmekte olduğu belirtilmiştir (Langan ve ark., 2002).

Çimentonun beton üretiminde cüruf ile ikame edilmesi hidratasyon ısını düşürerek maksimum beton sıcaklığını azaltır. Ayrıca yüksek fırın cürufu ile artan sıcaklık değişim hızı düşer. Yüksek sıcaklıkların oluşmasını engelleyen bu durum, büyük kütleli betonların dökümünde oldukça faydalıdır. Uygulamalarda elde edilen sıcaklık düşüşleri temelde enine kesit boyutu, çimento miktarı, cüruf oranı, bağlayıcı bileşenlerin inceliği ve kimyasal bileşim gibi birçok faktöre bağlıdır (Bilim, 2006).

Çimento hidratasyon reaksiyonu ürünü olan kalsiyum hidroksit ile uçucu kül arasındaki kimyasal reaksiyon, çimentonun hidratasyonundan daha yavaş bir süreçtir. Bu durum, daha yavaş ısı oluşumuna ve daha az iç gerilmeye ve dolayısıyla betonda daha az büzölmeye neden olur. Uçucu külün bu özelliği, özellikle baraj yapıları kütle betonlarında oluşan yüksek sıcaklıkları kontrol etmek için kullanılmaktadır (Karahan, 2006).

2.1.7. Boşluklu Yapı ve Geçirgenlik

Betonda mineral katkı kullanımı sertleşmiş çimento hamurunun boşluk yapısını değiştirir; daha ince bir boşluk yapısı oluşur, toplam boşluk miktarı azalır ve daha yoğun bir iç yapı ve dolayısıyla daha düşük geçirgenlik elde edilir (Şengöl ve ark., 2005).

Betonların klorür geçirimsizliklerinin karşılaştırmalı olarak incelenebilmesi için yürütölen çalışmada, su bağlayıcı oranı 0,35 ve 0,50 olan toplam sekiz karışım içerisinde bağlayıcı olarak sırasıyla yalnız portland çimentosu, portland çimentosu ve silis dumanı, portland çimentosu ve uçucu kül ile portland çimentosu, uçucu kül ve silis dumanı birlikte kullanılmıştır. Bu karışımlarda silis dumanı ağırlıkça %10 oranında, uçucu kül ise ağırlıkça %15 oranında çimento ile ikame edilmiştir. Üretilen tüm karışımlardan plak numuneler yapılmış ve bu numunelerin üst yüzeyleri bir yıl süreyle %3 NaCl solüsyonuna maruz bırakılmış, betonların klorür geçirimsizlikleri ölçölmüştür. Beton numuneler 28 ve 90 günlük basınç dayanımı

testlerine de tabii tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar, mineral katkı kullanımının beton klorür geçirimsizliğini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir (Güneyisi ve ark., 2003).

Uçucu kül katkılı çimentoların beton yapılarda kullanılabilme imkânlarını araştırabilmek için McCarthy ve Dhir'in 2005 yılında yaptıkları çalışmanın bulguları arasında, yüksek içerikli UK ile pratikte ihtiyaç duyulan hedef dayanıma ulaşabilen betonu üretmenin mümkün olduğu, portland çimentosunun hidratasyon ısısını düşürülebildiği, az orandaki UK katkısı ile betonun işlenebilme yeteneği artırılabilirdiği ve karbonatlaşma oranlarında PÇ ile üretilen betonun performansına benzer bir performans yakalanabileceği görülmüştür. Ayrıca uçucu kül ikame edilmiş betonda geçirgenlik ve klorat difizyonu özellikleri bakımından yüksek dayanıklılık saptanmıştır. Çalışmanın verilerine dayanılarak PÇ veya diğer katkılı çimentolarda uçucu küllerin kullanılması önerilmiştir.

Granüle yüksek fırın cürufu ikameli olarak üretilen betonların klorür geçirgenliğinin incelendiği çalışmada Luo ve ark. (2003), granüle yüksek fırın cürufu betonların yapısında mevcut olan boşluklarının daha az olduğunu ve normal portland çimentolu betonların boşluk yapısının, %70 oranında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun ikamesi durumunda özellikle 60 günlük zaman periyodunun ardından giderek daha da iyileştiğini belirtilmiştir.

Mineral katkılar, hem yüksek performanslı betonda (HPC) hem de kendiliğinden yerleşen betonda (SCC) çimentoya ikame edilerek yaygın şekilde kullanılabilirler. Mineral katkı maddelerinin SCC' nin reolojik özellikleri ve HPC' nin mekanik davranışı üzerindeki etkisi birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Bu bağlamda yapılan çalışmada, doğal zeolit, silis dumanı ve uçucu külün taze ve sertleşmiş betonun özellikleri üzerindeki etkisi incelemiştir. Hazırlanan tüm karışımlar için çökme değeri, betonun yayılması, basınç dayanımı, elektrik direnci, su emme ve klorür geçirgenliği ölçülmüştür. Test sonuçları, mineral katkılarının dâhil edilmesinin genellikle karışımların mekanik ve durabilite özelliklerini geliştirdiğini göstermektedir (Sabet ve ark., 2013).

Niğde yöresinden elde edilen mikrokalsit ile Yumurtalık Sugözü Termik Santrali'nden elde edilen uçucu külün beton özelliklerine etkilerinin araştırıldığı çalışmada karışımlarda bağlayıcı miktarı ve su/bağlayıcı oranı sabit tutulmuştur. Mikronize kalsit ve uçucu kül ayrı ayrı ve birlikte %10 ve %20 çimento ile ikame edilerek toplam 7 karışım hazırlanmıştır. Karışımlar üzerinde taze ve sertleşmiş beton testleri yapılmıştır. Mikrokalsitin taze beton özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı, mikrokalsit katkılı betonların erken basınç dayanımı, şahit ve uçucu kül içeren betondan daha yüksek olduğu görülmüştür. Ancak mikrokalsit katkılı betonun ileri yaşlarda basınç dayanımı, aşınma ve geçirgenlik direncinin daha düşük olduğu görülmüştür (Akçaözoğlu ve Güldür, 2017).

2.1.8. Donma-Çözülme

Mineral katkı ikame miktarının artması hidrasyon reaksiyonlarını yavaşlatmakta böylece bağlayıcı unsur olarak oluşan tobermorit jel miktarı azalmaktadır. Bu olay neticesinde porozitesi fazla (bosluk oranı fazla) bir beton oluşmaktadır. Böylece betonda mineral katkı oranı arttıkça, özellikle ilk yaşlardan başlayarak donma-çözülme olaylarından olumsuz yönde daha fazla etkilenmesi söz konusu olabilmektedir.

Kırma taş kumu ile doğal kumun belirli oranlarda yer değiştirmesinin, öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC) içeren ve içermeyen betonların basınç dayanımı ve eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerine ve donma-çözülme dayanıklılığına etkisinin incelendiği çalışmada, bağlayıcı malzeme miktarı tüm betonlarda 350 kg/m³; su/bağlayıcı malzeme oranı 0,52 olarak sabit tutulmuştur. Bağlayıcı miktarının hepsi çimento olan normal ve %30 olan ÖYFC ikameli beton olmak üzere kırma kum/ince doğal agrega oranları %0, %25, %50, %75, %100 olan toplam 10 seri beton üretilmiştir. Her karışım için taze betonda slump, birim ağırlık, hava tayini; sertleşmiş betonda basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve donma-çözülme deneyleri yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda betonların basınç ve

eğilme dayanımlarının kırma kum içeriğinin artmasıyla arttığı gözlenmiştir. Ayrıca, ÖYFC' lu betonların erken yaşlarda donma-çözülme etkilerine dayanıklılığının normal betonlara göre az olduğu görülmüştür (Öner ve Yıldırım, 2005).

Betonlarda ferrosilisyum dumanı katkısının silikoferrokrom dumanı katkısına kıyasla etkisinin araştırıldığı çalışmada üç farklı beton karışımı hazırlanmıştır. Bunlar katkısız (kontrol) betonlar, silis dumanı katkılı betonlar (%10, 15, 20, 25 ve 30) ile silis dumanı ve süper akışkan katkılı (%10, 15 ve 20) betonlardır. Betonlara basınç dayanımı ve puls geçiş hızı testleri uygulanmıştır. Kontrol betonları, 80. donma çözülme tekrarı sonunda elastiklik modülü $E_o=2.3 \times 10^5$ 'ten $E_n=0.30 \times 10^5$ 'ya düşerek parçalanmıştır. Bu parçalanma 40. donma-çözülme sonunda önce köşe yerlerindeki küçük boyuttaki agregaların kopması ile başlamış, 60. donma-çözülme sonunda da 6-7cm'ye kadar ulaşmıştır. FeSi ve SiFeCr katkılı betonlarda 60. donma-çözülme sonunda özellikle köşelerinde küçük parçalar halinde ana kütleden kopmalar başlamıştır. 70. donma-çözülme sonunda bütün FeSi ve SiFeCr katkılı betonların yan yüzeylerinde 1-2 cm boyunda çok ince çizgi halinde çatlaklar oluşmaya başlamıştır. 80. Donma-çözülme sonunda ise özellikle %20, 25 ve 30 FeSi ve SiFeCr katkılı betonlarda bu ince çizgi halindeki çatlaklar daha da büyüyerek 2-4 cm boyutunu almıştır. SD katkılı %25 ve 30 olanlarda çatlak boyları daha büyüktür. 90. donma-çözülme sonunda %25 ve 30 SD katkılı betonların bazı yan yüzeylerinde şişmelerin yanı sıra ince çizgi halindeki çatlaklar oluşmaya devam etmiştir (Ekinci ve Yeğinboğalı, 2008).

Uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıların %40 oranında çimento ile ikame edilmesi ile donma-çözülme etkisine karşı yüksek performans elde edilebilir (Uysal, 2011).

Fu ve arkadaşlarının çalışmalarında alkali aktif cüruf betonu (ASC); cüruf ve NaOH kompleks aktivatörü Na_2SiO_3 kullanılarak hazırlanmıştır. ASC' nin donma-çözülme direnci, mikroyapı, performans mekanizması, iç donma-çözülme hasar dağılımı ve mekanik modelleri, donma-çözülme döngüsü, SEM ve EDS

testleri ile incelenmiştir. Çalışma, ASC' nin donmaya karşı en düşük F300 derecesiyle mükemmel donma-çözülme direncine sahip olduğunu göstermektedir (Fu ve ark., 2011).

2.1.9. ASR (Alkali-Silika Reaksiyonu)

Alkali-silika reaksiyonu, sertleşmiş betonun içerisindeki alkalilerle, reaktif silika içeren agregalar arasındaki oluşan reaksiyondur. Oluşması aylar hatta yıllar süren bu reaksiyon neticesinde betonda oluşan genleşmelere bağlı olarak çok sayıda derin çatlaklar meydana gelebilir. Beton üretiminde ince taneli puzolanik mineral katkı kullanımı alkali-silika genleşmesinin daha az olmasını sağlamaktadır. Bunun nedeni mineral katkılarda çimentoya göre daha az alkali ihtiva etmesidir (Erdoğan, 2003).

Thomas ve arkadaşları portland çimentosu, silis dumanı ve çok çeşitli uçucu küllerin üçlü karışımlarını içeren betonun dayanıklılığı konusunu incelemişlerdir. Araştırmalarında ASR' ye bağlı genleşmeyi kontrol etmek için %60' a varan ikame seviyelerinin gerekli olduğu görülmüş, ayrıca küçük ikameli silis dumanı (%3 ila 6) ve orta seviyedeki uçucu kül (%20 ila 30) kombinasyonları, ASR' ye bağlı genleşmeyi azaltmada çok etkili olduğu ve yüksek bir sülfat direncine sahip olduğu görülmüştür. Bu oranlarla yapılan betonların mekanik özellikleri oldukça iyi değerler vermiştir. Silis dumanı ve uçucu kül kombinasyonuna sahip olan beton karışımlarının birlikte çok iyi çalışmakta olduğu izlenmiştir. Örneğin; uçucu kül, yüksek seviyelerde silis dumanı kullanımı sonucu oluşabilen bazı işlenebilirlik problemlerini telafi ederken, silis dumanı ise uçucu kül ikameli betonların nispeten düşük erken dayanımını yükselterek bu yönde pozitif katkı sağlamaktadır (Thomas ve ark., 1999).

Çimento yerine aynı oranlarda silis dumanı (SD) ve uçucu kül (UK) içeren karışımların alkali silika reaksiyonu (ASR) etkisinin araştırıldığı çalışmada, ASR nedeniyle oluşan genleşmenin kontrol altına alınması için kullanılan SD ve UK'

nın genleşme ve mekanik özellikleri üzerine etkisi belirlenmiştir. Araştırmada, SD ve UK %5, 10, 15 ve 20 oranlarında çimento yerine ikame edilmiştir. Agregat ve çimento karışımlarının reaktifliğini belirlemek için ASTM C 1260 deney standardı kullanılmıştır. Deneysel çalışmada, ASR etkisinde bırakılan örneklerin morfolojisi ve kimyasal kompozisyonu taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji yayıcı X-ışını analizörü (EDX) kullanılarak incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, 14 günlük ölçümler sonucunda, ortalama en yüksek boy uzamasının kontrol harç çubuklarında %0,34, ortalama olarak en düşük boy uzamasının ise %20 SD ikamesi yapılan harç çubuklarında %0,04 olduğu gözlemlenmiştir. ASR etkisine maruz kalan harçlarda en az dayanım kaybı %20 SD ikamesi yapılan harçlarda olmuştur. ASR etkisinde bırakılan %0–20 ikameli SD’li harçlar UK’lı harçlara göre %18 daha iyi eğilme dayanımına ve basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür. SEM görüntüsünde ASR çatlaklarının yoğun ve geniş çatlaklı olduğu bölgelerde yapılan EDX sonuçlarında kalsiyum oranı yüksek silis oranı düşük olarak gözlemlenmiştir (Demir, 2010).

2.1.10. Mikroyapısal Çalışmalar

Mineral katkıların ikili ve üçlü karışımlar halinde kullanılması; mineral katkıların tek başlarına kullanılması ile ortaya çıkan eksiklikleri giderirler. Yani mineral katkıların birbirlerinin eksiklerini tamamlayarak ilk yaşlardaki dayanımlarının mineral katkı kullanılmadan üretilen referans numunelere yakın ve daha homojen olmasını sağlarken mikroyapı özellikleri olarak boşluk ve etrenjit miktarını da azaltırlar. Bu durum mineral katkı kullanımının daha güçlü bir beton iç yapısı sağladığının göstergesidir (Binici ve ark., 2013).

Silis dumanı (SD), uçucu kül (UK), cüruf (GYFC) ikameli harç numunelerinin Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltilerinde bekletildikten sonraki dayanıklılıklarını ve bazı mikroyapı özelliklerini incelemek amacı ile Nehdi ve Hayek tarafından yapılan çalışmada; %8 SD, %25 UK, %25 GYFC katkılı ve 0,30,

0,45, 0,60 su/bağlayıcı oranına sahip harç numuneleri %10 Na₂SO₄ ve %10 MgSO₄ çözeltilerinde 9 ay boyunca bekletilmişlerdir. Numunelerin mikro yapıları optik ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Su/bağlayıcı oranı arttıkça genleşmenin de aynı şekilde arttığı ve %8 SD katkılı harçların en az genleşme gösterdiği, en fazla genleşmeyi de UK katkılı harçların gösterdiği bildirilmiştir (Nehdi ve Hayek, 2005).

Beton numunelerinin klorür içeriğinin Volhard, iyonmetre, tarayıcı elektron mikroskopu (SEM) ve renk analizi (CA) yöntemlerine göre araştırıldığı çalışmada, SEM analizi ile beton numunesinin kristalografik yapısı, kimyasal bileşimi elde edilmiş ve malzemenin fiziksel özellikleri ise X-ışını difraksiyonu (XRD) teknikleri ile kullanılarak analiz edilmiştir. CA ile renk değiştiren piksellerin yüzdesi ve derinlik grafikleri, tahmin edilen ampirik formülasyonu kullanarak klorür penetrasyonunu gözlemlemek için kullanılabilir olduğu belirlenmiştir (Gül ve ark., 2010).

Uçucu kül, silis dumanı ve metakaolin ile çimento değişiminin, harç karışımlarının basınç dayanımı, dinamik elastik modülü, klorür-iyon penetrasyonu, su emme, donma-çözülme ve sülfat dayanımına etkisinin karşılaştırmalı olarak araştırıldığı çalışmada, seçilen bazı harç karışımları üzerinde mikro yapısal inceleme yapılmış ve sülfat direnç testi sonuçlarına regresyon analizi uygulanmıştır. Mineral katkının varlığının ve türünün etrenjit morfolojisini değiştirdiği görülmüştür. Ayrıca silis dumanı ve metakaolin içeren karışımlarda sırasıyla sadece bilyeli etrenjit ve özel bir etrenjit türü gözlenmiştir. Uçucu kül karışımlarında iğne benzeri ve bilyeli etrenjit oluşumu bulunmuştur. Kontrol karışımında iğne benzeri, bilye etrenjit ve masif etrenjit tespit edilmiştir. Genel test sonuçları, karışımların performansının azalan sırada silis dumanı, metakaolin, uçucu kül içeren karışımlar ve kontrol karışımı olarak düzenlendiğini ortaya koymuştur (Mardani ve ark. 2014).

Otoklavlanmış gözenekli betondaki (Autoclaved Cellular Concrete-ACC) kuvars kumu kullanılması ve sepiyolit ilavesinin çimento kompozitinin özellikleri

üzerindeki etkisi incelenmesi amacı ile Demir ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada numuneler üzerinde SEM görüntü analizi yapılmış, sepiyolit içeriğine sahip ACC'lerin mikro yapısal özellikleri incelenmiştir. %10 sepiyolit içeriğine sahip ACC numunelerinin SEM inceleme sonuçlarında bağlayıcı matrisin esas olarak C-S-H ve portlanditten oluştuğu görülmüştür. %20 sepiyolit ilavesine sahip ACC, bağlayıcı matrisinin C-S-H ve portlandit kristalleri bakımından daha zengin olduğu belirtilmiştir (Demir ve ark., 2015).

Betonda iç yapısında ara yüzey geçiş bölgelerinin sağlam olması agrega yüzey pürüzlülüğünden büyük ölçüde etkilenmektedir. Qudoos ve arkadaşlarının yaptığı çalışma için beş farklı doğal kaynaktan sağlanan değişken yüzey pürüzlülüğüne sahip beş adet kırılmış doğal iri agregadan beton numuneler hazırlanmıştır. Polimer lateks ve metakaolin, silis dumanı, cüruf ve uçucu kül gibi mineral katkıların etkisi de incelenmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün ara yüzey geçiş bölgesi üzerindeki etkisi, mikro sertlik testi ile karakterize edilmiştir. Mikro sertlik testi sonuçları, enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi ile doğrulanmıştır. Sonuçlar, yüzey pürüzlülüğünün geçiş bölgesinin mikro sertliği üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu ve çimento esaslı mineral malzemelerin eklenmesiyle etkinin daha fazla arttığını göstermiştir. Polimer lateks, mikro sertlik üzerinde hafif bir etki gösterirken, çimento esaslı malzemelerin etkisinin daha fazla olduğu belirtilmiştir (Qudoos ve ark., 2018).

Uçucu kül ve silis dumanı içeriğinde yüksek miktarda silikanın bulunması nedeniyle, beton içeriğine ikame edildiğinde betona yüksek mukavemet ve dayanıklılık kazandıran mineral malzemelerdir. Uçucu kül ve silis dumanının çimento ile ikamesinin hidrasyon ürünleri (C-S-H ve CH) ile betonun mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisinin araştırılması amacı ile yapılan çalışmada, portland çimentosu yerine uçucu kül ve silis dumanı tekli ve ikili kombinasyonlar şeklinde ikame edilmiştir. Hazırlanan numuneler üzerinde basınç dayanımı testi yapılmış ve numunelerin mikro yapıları X-ışını kırınımı (XRD) yöntemi ile incelenmiştir.

Uçucu kül, silis dumanı ve bunların ikili kombinasyonu çimento yerine kullanılması ile numunelerindeki portlandit (Ca(OH)_2) yüzdesi genel olarak azalmış ve C-S-H oranı artmıştır. Bu durum uçucu kül ve silis dumanının CH ile gerçekleştirdiği reaksiyonların bir sonucu olarak açıklanmıştır. Değerlendirme neticesinde betona uçucu kül eklenmesi 7 günlük dayanımı olumsuz etkilerken, 28. ve 90. günlerde ise basınç dayanımının artırdığı gözlemlenmiştir. SD ve SD+UK kullanılması bütün yaşlarda basınç dayanımını artırmıştır (Uzbaş ve Aydın, 2018).

Mineral katkı ikameli betonların bir diğer özelliği servis ömrünün geleneksel betonun yaklaşık 2-3 katı kadar olmasıdır. Dolayısıyla daha çok baraj, liman, havaalanı, tünel, nükleer yapı, su yapıları, yol vs. gibi önem derecesi yüksek olan yapılarda kullanılmaktadır. Şimdiye kadar dörtlü kombinasyonlarla tasarlanan beton numuneler üzerinde hem mekanik hem de durabilitenin aynı anda incelendiği çalışma sınırlıdır. Bu çalışmada beton içerisine farklı kombinasyonlar kullanılarak ikame edilen uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanı ile üretilen beton numunelerinin mekanik ve durabilite özellikleri mikroyapı (SEM-XRD) analizleri ile desteklenerek araştırılmıştır.

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Materyal

3.1.1. Beton Ana Bileşenleri

Beton; bileşenleri çimento, agrega, su ve gerektiğinde katkı maddelerinin belirli miktardaki karışımlarından meydana gelmektedir. Kullanışlarına göre çok çeşitli tiplerde beton elde etmek mümkündür. Betonun oluşturan ham maddeler doğada bol miktarda bulunmaktadır. Ucuz sağlanması ve kolay şekil verilmesinin yanı sıra dış etkenlere karşı dayanıklı olması bakımından beton yaygın kullanılan yapı malzemesi olmuştur (Baradan, 2000).

Beton, her ikisi de gevrek malzeme olan çimento hamuru ve agregadan oluşmasına karşın yarı gevrek bir malzemedir. Bunun bir nedeni çimento bazlı matrislerde dış yüklerden bağımsız olarak oluşan mikro çatlaklar ve boşluklardır. Düşük yükler altında lineer elastik davranış gösteren betonda elastik sınır aşıldıktan sonra, bu boşluk ve mikro çatlaklar büyümeye başlar ve betonda hem gerilme-şekil değiştirme oranı arasındaki lineer ilişki bozulur hem de plastik davranış başlar. Betonun yaklaşık %60-80'ini meydana getiren agrega, bağlayıcı malzemeler ile herhangi bir kimyasal etkileşime girmez. Agrega ve bağlayıcı faz arasındaki bağlantı fiziksel ve mekanik karakterlidir. Beton içerisindeki oranı da göz önünde bulundurulduğunda, dayanım, özgül ağırlık, şekil, boyut olmak üzere agreganın özellikleri betonun özelliklerine önemli ölçüde etki etmektedir. Aynı nitelikte hamur ile doku, şekil, özgül ağırlık, dayanım gibi özellikleri farklı agregalar kullanılarak üretilen betonların özellikleri de birbirinden farklı olur (Akkaya ve ark., 2003).

3.1.1.1. Çimento

3.1.1.1.(1) Çimentonun Temel Özellikleri

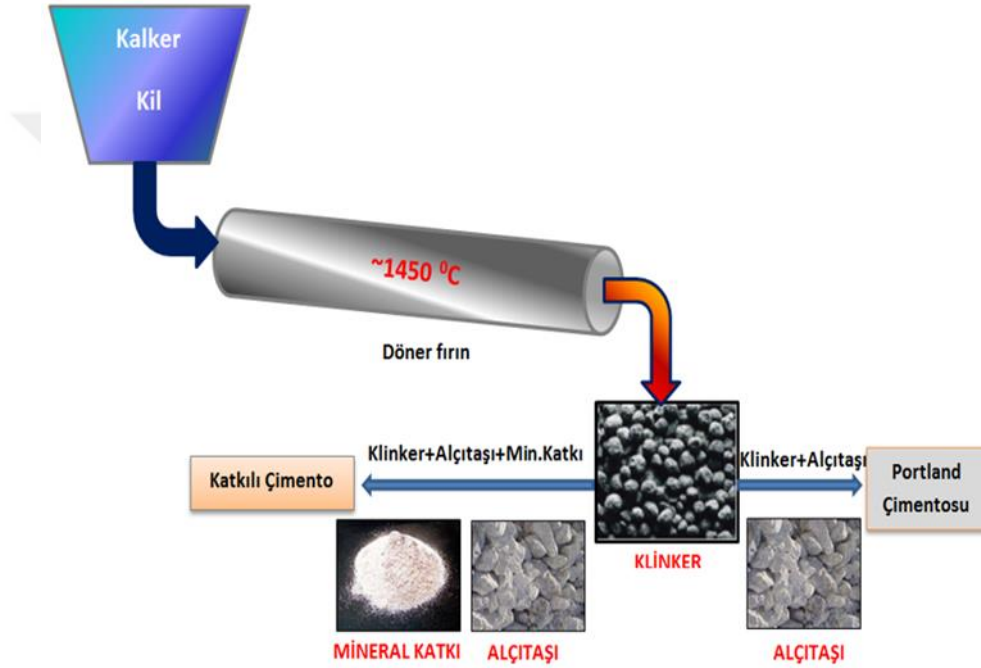
Temel hammadde olarak kullanılan CaCO_3 içeriği yüksek kireç taşı türleri ve kil ile daha az oranda boksit, demiroksit gibi diğer mineraller uygun oranlarda karıştırıldıktan sonra pişirme denilen kimyasal tepkimelere hazırlık olarak ince öğütülür ve iyice karıştırılarak homojene edilir. Kuru veya yaş ortamda hazırlanan bu karışım yüksek sıcaklıklarda pişirilerek, tepkimelere sokulur, elde edilen ara ürüne klinker (yarı mamul) denir. Klinkerin alçı taşı ile öğütülerek, çimento olarak adlandırılan ve hidrolik bağlayıcı özelliği olan, yapı malzemesi üretilir (Kuleli, 2010).

Yapı malzemeleri içinde önemli bir bağlayıcı madde olan çimento temel olarak kil ve kireçtaşının pişirilmesiyle meydana gelir. Su ve agrega ile karışınca harç ve betonun oluşmasını sağlayan çimento, bilinen en eski ve çok kullanılan yapı malzemelerinden birisi olmakla birlikte bundan sonra da yapı sektöründeki yerini koruyacağı düşünülmektedir (Agar, 2009).

Çimento dünyada en çok kullanılan insan yapısı malzemelerden birisidir. Çimentodan yapılan yapı malzemesi beton, dünyada kişi başına sudan sonra en çok tüketilen temel bir malzemedir. Çimento denilince ilk akla gelen portland çimentosudur. Son yıllarda doğal ve yapay birçok puzolanik madde değişik oranlarda klinkere katılarak, portland çimentosuna göre değişik özellikler taşıyan çimentolar üretilmiştir (Yalçın ve ark., 2006).

Portland çimentosu 1824 yılında Josheph Aspdin adında bir İngiliz tarafından bulunmuştur. Aspdin, 1800'lü yılların başında yollarda bulunan taş tozlarını toplayıp bunları kil ile pişirerek bağlayıcı bir malzeme elde etmeye başladı. Ürettiği bağlayıcıyı renk ve diğer özellikleri bakımından Portland Adası'ndan çıkartılan yapı taşlarına benzetmesi sebebiyle 'Portland Çimentosu' adını verdiği bağlayıcının 1824 yılında patentini almıştır (Agar, 2009).

Portland çimentosu esas olarak, killi ve kalkerli maddelerin uygun oranlarda karıştırılması ve 1400-1500°C sıcaklıkta pişirilmesi sonucu katı parçacıklar halinde elde edilen klinkerin, uygun oranda alçı taşı ile öğütülmesi sonucu elde edilir (Yalçın ve ark., 2006). Çimentonun üretim süreci özet olarak Şekil 3.1.'de verilmiştir.



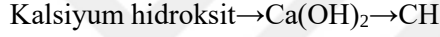
Şekil 3.1. Çimento Üretim Süreci (Engin, 2014)

Hammadde karışımının döner fırınlarda pişirilmesi sonucu ortaya çıkan ve klinker yapısı dolayısı ile çimentonun yapısını oluşturan oksitler ve ana bileşenler Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2 de gösterilmiştir (Erdoğan, 2003).

Çizelge 3.1 Portland Çimentosunu Oluşturan Oksitler

Genel ismi	Oksit	Çimento Kimya Sembolü	Miktarı (%)
Kireç	CaO	C	60-67 kalkerden gelir
Silis	SiO ₂	S	17-25 kilden gelir
Alümin	Al ₂ O ₃	A	3-8 kilden gelir
Demir	Fe ₂ O ₃	F	0,5-6 Kalker ve Kilden Gelir
Magnezyum	MgO	M	0,1-4 Kalkerden gelir
Alkaliler	Na ₂ O+K ₂ O	N+K	0,2-1,3 Kalkerden gelir
Kükürt Anhidridi	SO ₃	$\bar{S}$	1-3 Klinker de bulunur alçıtaşıdan gelir

Çimentolarla ilgili formüllerde yer alan H₂O, Ca(OH)₂, CaSO₄·2H₂O, CO₂, CaCO₃ çimento kimyasına uygun olarak gösterilişleri şu şekildedir.



Çizelge 3.2. Çimentoyu Oluşturan Ana Bileşenler

Anabileşen	Kimyasal sembolü	Çimento kimyasına göre sembolü
Dikalsiyum silikat	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Trikalsiyum silikat	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
Trikalsiyum aluminat	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Telrakalsiyum aluminoferrit	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Çimentonun ana bileşenlerinden;

- C_2S : Bu bileşenin hidrate olması çok yavaş olup çimentonun 14. gün ile 28. gün arasındaki dayanım artışında oldukça önemlidir. Çimento içerisinde C_2S oranının fazla olması çimentonun kimyasal etkilere karşı dayanıklılığını artırır.

- C_3S : Bu bileşen etkinliğini erken safhalarda gösterir. Hidratasyon sırasında önemli miktarda ısı açığa çıkmasına neden olur ve betonun erken dayanım kazanmasını sağlar.

- C_3A : Bu bileşen hidratasyonun hızlı olmasını sağlar. Hidratasyon sırasında önemli miktarda ısı açığa çıkmasına neden olur ve çimentonun ilk priz alması için oldukça önemlidir. Fakat dayanıma katkısı yok denilecek kadar azdır ve kimyasal etkilere karşı dayanıklılığı kötüdür.

- C_4AF : Çimentonun rengini almasında etkili olup çimentonun dayanımı, priz alması vs. özelliklerine katkısı yoktur (Agar, 2009).

Çimentoyu oluşturan ana bileşenlerin özellikleri Çizelge 3.3.'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Çimento Ana Bileşenlerinin Özellikleri (Erdoğan, 2003)

Özellik	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Reaksiyon Hızı	Orta	Yavaş	Hızlı	Orta
Hidratasyon Isısı	Orta	Az	Çok	Orta
Erken Dayanım	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Geç Dayanım	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük

3.1.1.1.(2). Çimentonun Hidratasyonu

Çimento ve suyun birleştiği andan itibaren bu iki malzeme arasında hidratasyon olarak adlandırılan kimyasal reaksiyon başlamakta ve devam etmektedir. Önceleri, yumuşak ve plastik durumda olan çimento hamuru, zaman ilerledikçe daha az plastik duruma gelmekte ve katılaşarak sertleşmektedir. Çimento hamurunun katılaşma göstererek şekil verilemez bir duruma gelmesine priz alma denilmektedir. Bu safhadan sonraki duruma sertleşmiş çimento hamuru denilmektedir. Çimento hamuru, beton karışımı içerisinde yer alan agrega

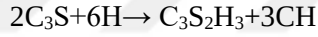
tanelerinin yüzeyini kaplamakta, aralarındaki boşlukları doldurmakta ve taneleri bağlayarak bu kompozit malzemenin tek bir malzeme gibi davranmasını sağlamaktadır. Ana bileşenlerin su ile reaksiyonu sonucu oluşan ürünün çimento hamurunun bağlayıcılık özeliğine etkisi farklı olmaktadır (Erdoğan, 2003).

Hidratasyon olayı zamanın bir fonksiyonu olarak gelişir. Hidratasyon kinetiğinin hızını etkileyen faktörler dayanım kazanma hızını da etkiler. Hidratasyon, su ile çimento içerikleri arasındaki kimyasal reaksiyon, zaman bağımlılığının en önemli özelliklerinden biridir (Aydın ve ark., 2007).

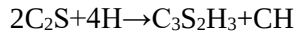
Çimentonun su ile karıştırılması sonucu yüzeyden itibaren hidratasyon başlar. Hidratasyon zamanla gelişen bir olaydır. Çimento prizi tamamlandıktan sonra bile azalan bir hızla olsa dahi uzun süre devam eder (Popovics, 1992).

C₃S ve C₂S Ana bileşenlerinin (kalsiyum silikatların) hidratasyonu ve hidratasyon ürün özellikleri:

Trikalsiyumsilikat (C₃S) ve su (H) arasındaki tepkime;

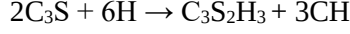


Dikalsiyumsilikat (C₂S) ve su (H) arasındaki tepkime:

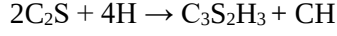


Gerek C₃S gerekse C₂S in hidratasyon ürünleri aynıdır. C₃S₂H₃ ve CH kalsiyum hidroksittir. (CaO.H₂O)=Ca(OH)₂

C₃S₂H₂ yani 3CaO 2SiO₂.3H₂O Tobermorit olarak adlandırılır. İsmini doğada benzeri olan bir maddeden alır. Harç veya betonlarda ana bağlayıcılık görevini yapan jeldir. C₃S ve C₂S ana bileşenlerinin hidratasyonları sonucu oluşan C₃S₂H₃ ve CH miktarları farklıdır. Sırasıyla atom ağırlıkları Ca, O, Si, H için 40,16, 28, 1 ise ürün miktarı şöyle açıklanabilir.



456 108 342 222 Atom ağırlıkları
(100) (24) (75) (49) 100 kısım C₃S ini oluşturduğu ürünler.

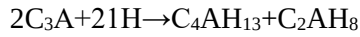


344 72 342 74 Atom ağırlıkları
(100) (21) (99) (22) 100 kısım C₂S nin oluşturduğu ürünler.

Burada görüldüğü gibi C₃S ve C₂S nin hidratasyonu için gereken su miktarı yaklaşık olarak aynıdır fakat C₃S nin hidratasyonu sırasında oluşan Ca(OH)₂ daha fazladır ve Ca(OH)₂ in dayanımına etkisi azdır. O halde özellikle ileri yaşlardaki çimento dayanımına C₂S nin önemli katkısı vardır. Çünkü C₂S hidratasyonu sonucunda daha fazla C-S-H jeli daha az Ca(OH)₂ oluşmaktadır. Fakat C₃S nin hidratasyonu daha hızlı olduğu için, ilk yaşlardaki dayanımı C₃S etkiler. C-S-H jelleri mikroskopla incelendiğinde üzerinde dikenleri olan bir kese görünümündedir (Erdoğan, 2003).

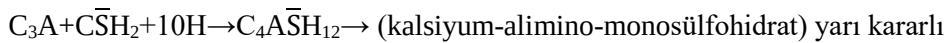
C₃A Ana bileşenlerinin hidratasyonu ile Ortaya çıkan Hidratasyon Ürünleri Özellikleri:

C₃A ve su arasında çok hızlı reaksiyonlar olmakta ve kalsiyum-alümina-hidratların oluşmasına yol açmaktadır.



Buradaki kalsiyum-alümino-hidratlar kararlı değildir ve kısa sürede kararlı formdaki kübik-hidrogarnet (C₃AH₆) durumuna dönüşmektedir (Erdoğan, 2003).

C₃A ve su arasındaki reaksiyonlar çok hızlı seyreder ve çok yüksek ısı açığa çıkarır. Ani priz meydana gelir. Çimento hamuru ani prizde çabucak katılaşır. Dayanım kazanamadan reaksiyonu tamamlar. Yukarıda ifade edildiği gibi ani priz olayını engellemek için klinkere alçı taşı ilave edilerek (%3-6) öğütülür, böylece reaksiyon yavaşlar. C₃A, su ve alçıtaşının gerçekleştirdiği hidratasyon reaksiyonları aşağıdaki şekildedir;



$C_3A + 3\bar{C}\bar{S}H_2 + 26H \rightarrow C_6\bar{A}\bar{S}_3H_{32} \rightarrow$ (kalsiyum-alümino-trisülfohidrat) kararlı

Yarı kararlı haldeki $C_4\bar{A}\bar{S}H_{12}$ ortamda sülfat bulursa:

$C_4\bar{A}\bar{S}H_{12} + 2\bar{C}\bar{S}H_2 + 16H \rightarrow C_6\bar{A}\bar{S}_3H_{32}$ oluşturur (Erdoğan, 2003).

Yarı kararlı haldeki $C_4\bar{A}\bar{S}H_{12}$ kararlı halde $C_6\bar{A}\bar{S}_3H_{32}$ ye döner, yani etrenjit adı verilen $C_6\bar{A}\bar{S}_3H_{32}$ oluşur. Bünyesinde 32 molekül su bulunduran etrenjit çimento hamurunda çok büyük bir genleşmeye neden olur. Bunun sonucunda betona veya çimento hamuruna dışarıdan sülfat girmesiyle yarı kararlı haldeki $C_4\bar{A}\bar{S}H_{12}$ lar $C_6\bar{A}\bar{S}_3H_{32}$ lara dönüşür. Bu olay sülfat hücumu olarak adlandırılır. Çimento üretimi için klinkerle birlikte gereğinden çok SO_3 Çimento hamurunda etrenjit oluşmasına ve hasara yol açar. Sülfata dayanıklı çimento üretebilmek için C_3A yüzdesi %5 den düşük olmalıdır (TS EN 197-1).

C_4AF Ana bileşenlerinin Hidratasyonu:

C_4AF anabileşenin hidratasyonunun C_3A anabileşenin gösterdiği hidratasyona benzer şekilde olduğu bilinmektedir. Klinkere alçıtaşı katılmadığı durumlarda, aynı C_3A nın hidratasyonunda olduğu gibi, C_4AF nin hidratasyonunda da çok yüksek ısı oluşur ve ani priz meydana gelir. C_4AF nin hidratasyonu ile ortaya çıkan kalsiyum-alimino-sülfohidrat ürünleri $C_4(AF)SH_{12}$ ve $C_6(AF)S_3H_{32}$ kompozisyonuna sahip olmaktadır. Bu ürünlerin yanı sıra bir miktar $(AF)H_3$ meydana gelir ortamdaki demir oksidin fazlaşması reaksiyonun yavaş oluşmasına neden olur. C_3A oranı düşük fakat C_4AF oranı yüksek olan çimentolarla yapılan betonların sülfat hücumuna karşı oldukça dayanıklı oldukları görülmüştür. Bunun sebebi tam olarak bilinmese de demir iyonu içeren kalsiyum-alimino-mono sülfat ürünleri, sülfatlı ortamda etrenjit haline dönüşmemekte veya $(AF)H_3$ ürününün oluşması, etrenjit oluşmasını önlemektedir (Erdoğan, 2003).

Betonda içerisindeki bağlayıcı maddeler priz alma esnasında önemli miktarda ısı açığa çıkarırlar ve bu ısı, çimentonun içerisindeki bileşenlerle su arasında meydana gelen reaksiyonlarda başka bir tabirle hidratasyonda oluştuğu için hidratasyon ısısı olarak isimlendirilir. Hidratasyonun tamamlanması uzun

sürdüğü için açığa çıkan ısı da zaman geçtikçe artmaktadır ve betonarme yapılarda bu ısı yüzey/hacim oranının fazla olması nedeniyle rahatlıkla dışarı çıkabilmektedir. Ancak bu ısı değeri, baraj gibi büyük kütleli betonlarda yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Hidratasyon ısısının yüksek olması sebebiyle zaman zaman betonlarda çatlaklar görülebilmektedir (Postacıoğlu, 1975)

3.1.1.2. Su

Beton üretiminde kullanılacak olan karışım suyu TS EN 1008 standardına uygun olarak içilebilecek nitelikte su seçilmelidir. Beton malzemelerin karılmasında kullanılan karışım suyunun iki önemli görevi bulunmaktadır: Birincisi, çimento ile birleşerek hidratasyonun başlamasını ve devamını sağlamak, ikincisi ise agregası ve çimento tanelerinin yüzeyin ıslatarak üretilen taze beton karışımında istenilen işlenebilirliği sağlamaktır.

Temiz, içilebilir, berrak ve kokusuz olan her su beton üretiminde kullanılabilir. Beton karma suyu asit niteliğinde olmamalıdır. Sülfat, değişik tuz vb. betona zarar verebilecek kimyasal maddeleri içermemelidir.

3.1.1.3. Agregası

Beton içerisinde yaklaşık olarak %70 oranında agregası yer almaktadır. Betonun iskeletini oluşturan agregalar betonun; işlenebilirliği, dayanımı, dayanıklılığı, durabilitesi, rötresi, geçirimsizliği, kimyasal etkilere karşı dayanımı gibi birçok özellikleri üzerinde etkili olmaktadır (Bayazıt, 1998)

Agregası, beton yapımında çimento ve su karışımından oluşan, bağlayıcı madde yardımıyla bir araya getirilen, organik olmayan, kuru, çakıl, kırmataş gibi doğal kaynaklı veya yüksek fırın cürufu, genleştirilmiş perlit, genleştirilmiş kil gibi yapay kaynaklı olan taneli malzemedir (Erdoğan, 1995).

Agregası genel olarak beton hacminin %70-75'ini oluşturur. Agregası, yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesi olması nedeniyle yapı maliyetlerini büyük

ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle uygun niteliklerdeki agregayı, yeterli miktarda ve en yakın ocaktan, en ekonomik şekilde elde edebilmek mühendislik açısından önemli bir konudur (Baradan, 2004).

Agrega grubu, beton yapımında çimento ve su ile kullanılan, kum, çakıl, kırmataş gibi taneli malzemelerden oluşur. Beton hacminin yaklaşık %75'i agregadan oluşmaktadır. Beton yapımında kullanılan en pahalı malzemelerden biri çimentodur. Agreganın maliyeti çimento maliyetine göre oldukça düşüktür. Bu nedenle, istenilen kalitedeki betonu elde edebilmek kaydıyla, betonda mümkün olabildiği kadar çok miktarda agreganın kullanılması, betonun daha ekonomik olmasına yol açmaktadır. Beton yapımında kullanılan agregalar, genellikle, sert ve dayanımı oldukça yüksek olan malzemelerdir. Agreganın dayanımının yüksek olması, beton dayanımının da yüksek olmasına katkıda bulunmaktadır (Erdoğan, 2003).

Agrega taneleri ile çimento hamuru arasındaki geçiş ara yüzeyi, çimento hamurundan daha boşluklu bir yapıya sahiptir. Aynı zamanda, bu ara geçiş yüzeyi çimento hamurundan daha yüksek su/bağlayıcı oranına sahiptir. Bu yüzden bu ara geçiş zonları her zaman betonda zayıf bölge olarak görülmektedir. Beton üretiminde, çimento yerine çimentoya göre daha ince tanecik boyutuna sahip olan metakaolin katkısının kullanımı, geçiş ara yüzeyinin daha boşluksuz ve yoğun bir hale gelmesini sağlar (Khatip, 2004).

Agregalar betonun taşıyıcı iskeletini oluşturması sebebiyle oldukça önemlidirler. Bununla beraber beton içerisinde kullanılan agreganın tane dağılımının da düzgün olması beton karışım hesapları ve kaliteli beton için önem taşımaktadır. Beton karışım hesaplarında agreganın granülometrisi daima sınırlandırılır ve bu sınırlandırma en sıkı doluluktaki agreganın granülometrisi ile elde edilebilecek daha ekonomik ve daha nitelikli beton üretimine yöneliktir. Beton içerisinde kullanılan agregaların granülometrisi, betonun ses yalıtımı ve dayanımını etkileyen en önemli etkidir (Murlin ve Wilson, 1952).

İyi nitelikteki bir agrega temiz, sert ve sağlam olmalı, bunların yanında suyun etkisi ile yumuşamamalı, dağılmamalı, çimentoların bileşenleriyle zararlı bileşikler meydana getirmemeli ve donatının korozyona karşı korumasını tehlikeye düşürmemelidir (Özkul ve ark., 1999).

Agrega tanelerinin olabildiği kadar küre veya küpe yakın olması istenir, böylece agregaya yığını daha iyi bir biçimde yerleşir. Taneler arası boşluk minimuma iner ve verilen bir kıvam için daha az suya ihtiyaç olur. Biçimsiz yani küreden büyük oranda farklı geometriye sahip taneler kütle içinde kenetlenir. Betonun işlenebilirliği azalır. Kayacın yapısı ve kırma işlemleri agrega tanelerinin şeklini etkiler. Agregalar tane şekillerine göre yuvarlak, düzensiz, köşeli, yassı veya uzun olarak sınıflandırılabilir. Agregadaki ince madde miktarı agregaya çimento bağını zayıflatır. İnce madde miktarının çok olması aynı zamanda betonun karma suyu ihtiyacını artırır, taze betonun işlenebilmesini azaltır. Yıkanmış agregaya ile elde edilen beton basınç dayanımı, yıkanmamışa göre %12' lere varan artışlar gösterir (Özbolet, 2005).

Genel olarak agregaların fiziksel özellikleri göz önüne alındığında agreganın nemi, birim ağırlığı, özgül ağırlığı, kompasitesi, granülometrisi (tane dağılımı) ve incelik modülü ilk olarak akla gelmektedir. Beton üretiminde kullanılacak olan agregalar için deney numunesi hazırlama ve granülometri deneyleri sırasıyla TS-707 ve TS-3530 EN-933-1'e göre yapılmalıdır. Agregaların özgül ağırlıkları, su emme ve nem oranları ise TS EN 1097-6 ya göre hesaplanmalıdır.

Agrega üretim merkezlerinde, beton santrallerinde ve şantiyelerde agregaya yığınlarının depolanmasında ve taşınmasında şu hususlara dikkat etmek gerekmektedir;

- Agregaya tanelerinin kirlenmemesi için önlem alınmalıdır. Agreganın kirlenmemesi veya dikkatsizlik sonucu agregaya içerisine zararlı maddelerin girmemesi için gerekli özen gösterilmelidir. Agregaya yığınları oluşturulurken, mümkünse sert ve temiz bir zemin seçilmeli

veya beton döşeme hazırlanarak agregalar bu döşeme üzerine yığılmalıdır. Tabana önceden kum, çakıl veya kaya parçaları da serilerek agrega yığını böyle bir zemin üzerine oturtulabilir. Agregadaki suyun yığından dışarıya kolayca drenajını sağlayabilecek önlemler alınmalıdır. Çevredeki gevşek toprak tanelerinin rüzgâr etkisiyle agrega danelerinin arasına karışmamasına dikkat edilmelidir (Lkhagva, 2006).

- Ayırmaya neden olunmamalıdır. Agregaların bir yere yerleştirilmesi, depolanması veya taşınması esnasında iri agregaların ve ince agregaların bir yığın içerisinde adeta ayrı ayrı kümeler oluşturarak 'ayırma' (segregasyon) yapmasını önleyecek önlemler alınmalıdır (Lkhagva, 2006).

Agreganın Sınıflandırılması (Lkhagva, 2006);

A. Elde Ediliş Şekline Göre

B. Tane Boyutlarına Göre

A) Elde Ediliş Şekline Göre

a) Doğal Agregası (Doğal taş agregası)

b) Yapay Agregası (Sanayi ürünü agregası)



Şekil 3.2. Beton üretiminde kullanılan agregalar

B. Tane Boyutlarına Göre Sınıflama**a) İnce Agregası (4mm altı)**

Kum

Kırma kum

Yapay kum

b) İri Agregası (4mm üstü)

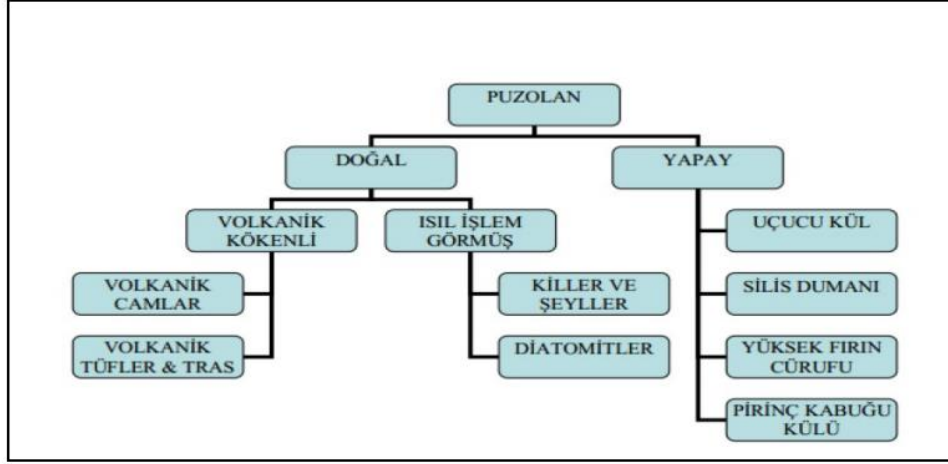
Çakıl

Kırma taş (mıcır)

Yapay taş

c) Taşunu (Filler) (0,25mm altı)**3.1.2 Mineral Katkı Maddeleri (Genel tanımı, sınıfları, özellikleri vs.)**

Çimento ile ikame edilerek kullanılan endüstriyel yan ürünler (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı vb.) ve doğal puzolanlar (kırmızı kil, metakaolin) yaygın olarak kullanılan mineral katkı maddeleridir. Uçucu kül ve cüruf en sık kullanılanları olmakla birlikte dünyanın bazı bölgelerinde ise silis dumanı sıklıkla çimento yerine kullanılmaktadır. Ayrıca özellikle Bangladeş gibi pirinç üreten ülkelerde pirinç kabuğu külü kompozit çimento üretiminde kullanılma potansiyeline sahiptir. ABD’de beton üretimi genellikle çimentolu malzemelerin eklenmesi ile üretilir. Hazır beton santrallerinde mineral katkı maddeleri oldukça fazla kullanılmaktadır. Ancak katkı maddelerinin reaktifliği genellikle çimentoya kıyasla daha düşük olduğundan bu maddelerin kullanımında bazı sınırlamalar getirilmiştir (Baradan ve Yazıcı, 2012).



Şekil 3.3. Pozolanların Sınıflandırılması (Ün, 2007)

Mineral katkıların kullanımı sertleşmiş çimento hamurunun yapısının modifikasyonuna yol açar ve özellikle ara yüzey bölgesinde değişikliklere sebep olur. Normal dayanımlı betonlar için uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıları dayanımda küçük etkiler ile çimento ile yer değiştirmeli olarak kullanılabilir. Bu durumda genellikle uzun dönemli dayanım artarken başlangıç dayanımı ve dayanım kazanma hızı azalabilir (Baradan ve ark., 2012).

3.1.2.1. Uçucu Kül

Elektrik enerjisi Türkiye’de hidroelektrik santrallerinden, kömüre bağlı termik santrallerden, yaygınlaşan doğalgaz santrallerinden ve son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmektedir. Kalorisi düşük olan linyit kömürlerinin yakıldığı termik santrallerde, elektrik üretimi esnasında toz halindeki kömürün yanmasından ötürü baca gazları ile sürüklenen ve elektro filtreler yardımı ile tutularak atmosfere çıkışı önlenen çok küçük boyutlarda kül tanecikleri oluşmaktadır. Uçabilen ve endüstriyel bir atık olan bu küllere, uçucu kül denilmektedir. 1960’lı yıllarda metakaolin (ısıl işlem görmüş kaolin kili olup yüksek silika içeriğine sahip bir mineraldir) pozolan olarak çimento harcında

kullanılmaya başlanmıştır. Bu yıldan itibaren betona sağladığı yüksek dayanım ve dayanıklılık özellikleri sebebiyle kullanımı beton üretiminde daha çok yaygınlaşmıştır (Delikurt ve Sevim, 2015).

Uçucu küllü betonun geçirgenliği genelde katkısız betonun geçirgenliğinden daha düşüktür. Geçirgenliğin böyle düşük olmasının nedeni uçucu kül ile çimentonun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksit arasındaki pozolanik reaksiyon sonucu ortaya çıkan ilave C-S-H jelleridir. Bu jeller kapiler boşlukları azaltmaktadır. Uçucu kül kullanımının betonda geçirgenliği azaltması ayrıca sülfat atağının beton üzerindeki bozucu etkilerini de azaltmaktadır. Çimentonun alkalileri ile agreganın reaktif silis bileşenleri arasında yer alan alkali agregat reaksiyonu sonucundaki genleşme ve çatlamlar, uçucu kül kullanılması ile azaltılabilmektedir. Uçucu külün bağlayıcı hamurunun hacmini artırdığı durumlarda su miktarı sabit tutulduğu zaman rötre de artış görülebilir. Bunun yanı sıra, uçucu kül ilavesi işlenebilirliği artırdığından sabit işlenebilirlik için su miktarı azaltılabilir, bu da rötre artışını yok edebilir. Uçucu külün yüksek oranda kullanılması rötreyi azaltmaktadır (Karahan, 2006).

Termik santrallerin çevresi, çıkan gazlar ile büyük miktarda külün dışarı çıkmasıyla kısa sürede küllerle kaplanmaktadır. Bacadan dışarıya çıkacak küller birtakım elektrostatik veya elektromekanik yöntemler vasıtasıyla tutulmakta ve kül toplayıcı silolara kanallı edilmektedir ve daha sonra da silolardan, konveyör bantlarla veya başka yöntemlerle, termik santrallerin uzağındaki bir yere atık olarak depolanmaktadır (Erdoğan, 2003).

Uçucu külün ana bileşenleri SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 'tür ve uçucu kül tipine bağlı olmak üzere belli miktarda CaO , MgO , SO_3 ve yanmamış karbon içerir.

TS EN 197-1 standardına göre:

- V sınıfı uçucu küller: Genellikle pozolanik özelliğe sahip küresel taneciklerden oluşan ve çoğunlukla reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'den oluşan küllerdir. Bu tip uçucu küllerin reaktif silis miktarı %25'ten fazladır.

- W sınıfı uçucu küller: Hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan çoğunluk olarak reaktif kireç CaO , reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'ten oluşan küllerdir. Bu tip uçucu küllerin reaktif kireç miktarı %10'dan fazla, reaktif silis miktarı da %25' den fazladır.

ASTM C 618 standardına göre:

- F sınıfı uçucu küller: Bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %70'ten fazla olan uçucu küllerdir. Ayrıca bu sınıfa giren uçucu küllerin CaO miktarı %10'un altındadır. Bu nedenle düşük kireçli olarak da adlandırılır. Bu tip uçucu küller puzolanik özelliğe sahiptir.
- C sınıfı uçucu küller: Linyit ve yarı bitümlü kömürden elde edilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %50'den fazla olan uçucu küllerdir. Ayrıca bu sınıftaki uçucu küllerde CaO miktarı %10'dan fazla olması nedeniyle yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar.

F tipi uçucu küllerde CaO oranı %10 dan düşüktür bu yüzden bunlar sadece puzolan özellik gösterir. Fakat C tipi küllerde CaO miktarı %10 dan fazladır. Bu yüzden bir miktarda bağlayıcılık özelliği vardır. Örnek olarak Çizelge 3.4 de 2 farklı külün kimyasal analizleri verilmiştir (Türker ve ark., 2004).

Çizelge 3.4. C ve F Sınıf Uçucu Küllerin Kimyasal Analizleri (Türker ve ark., 2004)

	F sınıfı CaO <%10	C sınıfı kül CaO > %10
	Puzolan	Puzolan+Bağlayıcı
SiO ₂	43-64	23-50
Al ₂ O ₃	19-30	13-21
Fe ₂ O ₃	3-23	4-22
CaO	0,7-6,7	11,5-29
MgO	0,9-1,7	1,5-7,5
Na ₂ O	0-2,8	0,4-1,9
C (kız.kayı)	0,4-7,2	0,3-1,9

Uçucu küller puzolanik ve bağlayıcı özelliğe sahiptirler. Termik santrallerden atık olarak elde edilen ve çevreye büyük zararı olan uçucu külün, bu zararını azaltmak için başka alanlarda değerlendirilebilmesi çok önemlidir. Uçucu külün oluşturduğu tozlanmanın sebep olduğu çevre sorunu, doğaya atık olarak bırakılması yerine farklı alanlarda değerlendirilerek bertaraf edilebilir. Uçucu kül, özellikle inşaat sektörü başta olmak üzere, seramik, tarım, kimya ve maden gibi farklı alanlarda da kullanılabilir. Amorf bir yapıya ve küresel bir şekle sahip olan uçucu küllerin tanecik boyutları 1 µm – 150 µm değerleri arasında değişmektedir (Temiz ve Yeğinobalı, 1995).

Yapay bir puzolan türü olan uçucu kül, çimentonun hidratasyonu ile açığa çıkan CH'lar ile tepkimeye girerek ilave hidrat jelleri oluştururlar. Böylece betonun dayanımına ilave bir katkı sağlarlar. Uçucu külle üretilen betonlarda daha az miktarda hidratasyon ısısı açığa çıkmaktadır. Dolayısıyla bu şekilde üretilen betonların özellikle hidratasyon ısısının düşürülmesinin önemli olduğu baraj gibi kütle betonlarda kullanılmaktadır (Aruntas, 2006).

Uçucu kül, fiziksel ve kimyasal özellikleri sebebiyle yapay puzolanik bir katkı maddesi olma özelliği göstermektedir. Bu özelliğinden ötürü inşaat sektöründe çok fazla yer bulmaktadır. Dünyada yıllık ortalama 450 milyon ton üretilmektedir. Çimento ve beton karışımlarında puzolan olarak, bunun sadece %6'lık bir kısmı kullanılmaktadır. Uçucu külün çimento sanayisinde kullanılmasıyla çevreye verilen zarar azaltılabilmektedir. Uçucu küllerin içerisinde

zaman zaman az miktarda neme rastlanabilir ve nem miktarı fazla olan uçucu küller kullanıcının işini zorlaştırabilir. ASTM C 618 (1994)'e göre uçucu küllerde nem miktarı toplam miktarın %3'ünden fazla olmamalıdır. Uçucu küllerin beton içerisinde kullanılabilmeleri için sahip olmaları gereken fiziksel ve kimyasal özelliklere dair sınır değerler, TS 639, TS EN 450 ve ASTM C 618 nolu standartlarda belirtilmektedir (Erdoğan, 2003).

3.1.2.1.(1) Uçucu Küllerin Beton Özelliklerine Etkileri

Uçucu kül kullanımı ile;

-Taze beton karışımının su ihtiyacı azalır. Karışımda bulunan çimentonun %20-30'u yerine uçucu kül ilave edildiğinde, uçucu küllerin küresel şekilli ve daha az sürtünmeye yol açtıkları için su ihtiyacı %7 azalmaktadır. Fakat çimentolardan 1 birim kesilip, 2 birim kül ilave edilirse bu durum değişebilir ve su ihtiyacı artar zaten pratikteki uygulamada 2. şekilde yapılır ve su ihtiyacı artar.

-Betonda terleme azalır, hidrasyon ısısı azalır, geçirimsizlik azalır, durabilite artar.

-Ekonomiklik ön plana çıkar.

-Uçucu küller özellikle soğuk havalarda prizi geciktirmesinden dolayı sıkıntı yaratabilir.

-İlk dayanımı düşük ve daha uzun süre kür işlemi gerektirir, belli bir işlenebilme için çok fazla miktarda hava sürükleyici katkı maddesinin kullanılmasını gerektiren bir yapısı olması negatif bir özelliktir.

-Uçucu külle yapılan beton daha iyi işlenir. Çünkü uçucu külün yoğunluğu azdır ve belli bir ağırlıktaki çimentoya karşılık gelen külün hacmi daha fazladır. Bu yüzden bağlayıcı madde daha hacim kaplar ve beton çok daha iyi işlenir.

-Uçucu külle betonların terlemesi azdır. Daha komposittir ve çevresel etkilere karşı daha dayanıklıdır (Erdoğan, 2003).

Çizelge 3.5. TS EN 450-1' e Göre Uçucu Kül Özellikleri

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	F sınıfı % min 70	C sınıfı % min 50
SO_3	max % 5	5
Nem max	% 3	3
Kızdırma Kaybı max	% 6	6
MgO	-	-
Na_2O	1,5	1,5
Cl	-	-
-45mm elek üstü kalan max	% 34	34
-Özgül yüzey cm^2/gr	3000	3000
-Dayanım aktivite	75	75
-Su ihtiyacı kontrol numunesin kıyasla max %	% 105	105

3.1.2.2. Silis Dumanı

Silis dumanı silisyum metali veya ferrosilisyum (FeSi) alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli tozdur. Fırınların düşük sıcaklıktaki üst bölümlerinde SiO gazı hava ile temas ederek hızla okside olur ve amorf SiO_2 olarak yoğunlaşarak silis dumanı bileşiminin hemen tamamını oluşturur. Alaşımdaki silisyum içeriğine bağlı olarak silis dumanındaki SiO_2 miktarı da artar. Bu miktar silisyum metalinde %98'e ulaşır. Araştırmalarda ve pratikte kullanılan silis dumanları genellikle %75 ve yukarı oranlarda ferrosilisyum içeren alaşımlardan elde edilmiştir (ACI Committee 234, 2000).

<u>Alaşım türü</u>	<u>Silis dumanındaki SiO_2 (%)</u>
%50 Ferrosilisyum	61 – 84
%75 Ferrosilisyum	84 – 91
Metal silisyum	87 – 98

Silis dumanı çoğunlukla değişik tonlarda gri renktedir. SiO_2 renksiz olduğuna göre rengin koyuluğu karbon miktarına bağlı olarak artar. Demir oksit fazlalığı ise renge hafif kahverengi bir ton verir. Silis dumanının özgül ağırlığı

ortalama 2.20 civarındadır. Bu değer alaşım türüne ve kaynağa göre biraz değişebilmektedir. Silis dumanının gevşek birim ağırlığı 130 - 430 kg/m³ arasında değişir. Genellikle %50 silis dumanı içeren sulandırılmış (bulamaç) halinde bu değer 1300 - 1400 kg/m³ düzeyine kadar yükselebilir. Piyasaya sıkıştırılmış olarak sevkedilen silis dumanında ise birim ağırlık ortalama 550 kg/m³ civarındadır (ACI Committee 234, 2000).

Literatür çalışmalarında verilen sonuçlara göre, genellikle ağırlıkça %40 ile %60 oranlarında su ile kullanılabildiği gibi akışkanlaştırıcılar ile birlikte de kullanılabilir. Gri tonlarında bir renge sahip olan silis dumanı çimentonun rengi ile benzerlik göstermektedir. Fakat içerdiği FeO miktarında normale göre bir fazlalık söz konusu ise kahverengi renkte de görülebilir (Akçaözoğlu, 2007).

Silis dumanı genellikle camsı, düzgün yüzeyli küresel taneciklerden meydana gelir. Çok ince taneli ve hafif olduğundan özgül yüzey bazında inceliği Blaine metodu ile tayin edilememektedir. Bunda cihaz hücresine %50 boşluk oranı ile sıkıştırılmasındaki güçlük rol oynar. Çok ince taneli cisimlerde özgül yüzey Azot Adsorpsiyon (BET) metodu ile tayin edilebilmektedir. Burada özgül yüzey, tanelerin dış yüzeyleri ile içlerindeki açık boşlukların iç yüzeylerinden oluşan alanı 1 molekül kalınlığında bir tabaka ile kaplayacak azot gazı miktarından hesaplanmaktadır. Bu yöntem, taneler arasından hava geçiş hızını esas alan Blaine metodundan farklı olduğundan iki metodla elde edilen sayısal sonuçların doğrudan karşılaştırılması mümkün değildir. Ancak, aşağıdaki değerler gene de silis dumanının inceliği konusunda bir fikir vermektedir (ACI Committee 234, 2000).

	<u>Metod</u>	<u>Özgül yüzey (m²/kg)</u>
Portland çimentosu	Blaine	300- 400
Uçucu kül	Blaine	400- 700
GYFC	Blaine	350- 600
Silis dumanı	Azot (BET)	13 000- 20 000

SD katkılı betonlarda basınç dayanımını oldukça arttırmaktadır. SD'nın betondaki boşlukları doldurma ve puzolanik etki olmak üzere iki işlevi vardır. Bunlardan hangisinin belirleyici olduğu yönünde değişik görüşler vardır. Silis dumanının puzolanik etkisinin betonda en zayıf halka olarak bilinen agrega-çimento hamuru temas yüzeyini güçlendirmede önemli olduğu, mikro yapısal ve mekanik incelemelerle kanıtlanmıştır (Akçaözoğlu, 2007).

Silis dumanı katkısının beton dayanımına olan pozitif etkisinin sebebi, diğer puzolanlar gibi yeni C-S-H jelleri oluşmasını sağlamaları ve ince silis dumanı tanelerinin agrega-hamur arayüzey bölgesini sıkılayıp kuvvetlendirerek beton dayanımını artırmalarından kaynaklıdır. Buna karşın belirli bir işlenebilirlik için su ihtiyacını artırmaları gibi olumsuz etkileri de vardır. Dolayısıyla betondaki optimum silis dumanı miktarı bu etkilerin göreceli değerlerine bağlı olacak ve çimento, agrega, akışkanlaştırıcı katkı tip ve miktarları ile bakım koşulları gibi klasik faktörlerden de etkilenecektir (Jahren, 1983).

Diğer taraftan, silis dumanı kullanımının beton dayanımını artırmasındaki en önemli faktörün daha sıkı ve kaliteli bir çimento hamuru oluşması olduğu da öne sürülmektedir (Cong, 1990).

Silis dumanının beton basınç dayanımına olumlu etkisi erken yaşlarda daha belirgindir. Betonun 28 günlük dayanımını artırmayı amaçlayan çalışmalarda silis dumanın genellikle çimentonun %10-20'si oranında kullanıldığı ve gerekli işlenebilmeyi sağlamak için %10'dan yukarı miktarların süper akışkanlaştırıcı katkılarla birlikte kullanıldığı görülmektedir (Yeğinobalı, 1993).

Silis Dumanının Beton Özelliklerine Olumlu Etkileri:

- Betonda yüksek basınç dayanımı elde edilmesini sağlamaktadır.
- Taze betondaki terlemeyi ve ayrışmayı azaltmaktadır.
- Betonun hidrasyon ısını azaltmaktadır.
- Sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini azaltmaktadır.
- Sertleşmiş betondaki alkali-silika reaksiyonunu azaltmaktadır.
- Sertleşmiş betonun sülfatlara karşı dayanıklılığını artırmaktadır.

Silis Dumanının Beton Özelliklerine Potansiyel Zararlı Etkileri:

-SD kullanılarak üretilen betonların yüksek miktarda karışım suyu ihtiyacı vardır. Bunu telafi edebilmek için su azaltıcı katkılarla birlikte kullanılmaları gerekmektedir.

-SD çok ince taneli olduğundan ve terlemeyi azalttığından, betonun yüzeyinin düzeltilmesi işlemi daha zor olabilmektedir.

-SD kullanılması durumunda, daha çok miktarda plastik büzülme çatlağına yol açabilmektedir.

-SD daha koyu renkli beton elde edilmesine neden olmaktadır (Erdoğan, 2003).

Belirlenen bu orandan daha fazla kullanılan silis dumanı ile betonun su muhtevası doğru orantılı bir şekilde artmaktadır (Wang ve ark. 2020).

Silis dumanı, puzolanik özelliğinden ötürü taze betonda açığa çıkan hidrasyon ısını büyük oranda düşürmeye yardımcı olmaktadır. Ancak silis dumanı kullanımı diğer puzolanik maddelerden farklı olarak başlangıçta ısı artışına neden olabilir. Bu ısı artışına, silis dumanının çimento ile hızlı bir şekilde hidrasyona girmesi neden olarak gösterilebilir. İlerleyen aşamalarda çimentoda ısının yayılma hızını arttırsa da betonun ileri zamanlarında çimentodan ötürü açığa çıkan ısıyı azalttığı çalışmalarda görülmüştür (Topcu ve Canbaz 2001).

Silis dumanı katkısı diğer puzolanlar gibi yeni C-S-H jelleri oluşmasını sağlamaları yanı sıra ince silis dumanı taneleri agrega-hamur ara yüzey bölgesini sıkılayıp kuvvetlendirerek beton dayanımını arttırmırlar. Buna karşın belli bir işlenebilirlik için su ihtiyacını artırmaları gibi olumsuz etkileri de vardır. Dolayısı ile betondaki optimum silis dumanı miktarı bu etkilerin göreceli değerlerine bağlı olacak ve çimento, agrega, akışkanlaştırıcı katkı tip ve miktarları ile bakım koşulları gibi klasik faktörlerden de etkilenecektir (Demir, 2009).

Beton üretiminde silis dumanı kullanımı betonun asit ve sülfat ataklarına karşı direncini olumlu yönde etkiler. Düşük s/b orantılı betonların katkısız, lateksli ve çimentonun %15'i kadar silis dumanı içeren türlerinin çeşitli asitlere karşı

dirençlerini araştırıldığı çalışmada silis dumanlı beton %1 hidroklorik, %5 asetik ve %1 sülfürik asit çözeltilerine karşı diğer iki betondan daha iyi direnç göstermiştir (Mehta, 1985).

Genel olarak kullanılan silis dumanının kimyasal özellikleri Çizelge 3.6.'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Silis Dumanının Yüzde (%) Olarak Genel Kimyasal Kompozisyonu (Yazıcı, 1996)

Bileşen	USA	Norveç	Kanada	Türkiye
SiO ₂	90-93	90-96	89.0-95.0	93-95
C	1.3-2.6	0.5-1.4	2.1-4.2	0.8-1
Fe ₂ O ₃	0.4-0.7	0.2-0.8	0.1-3.1	0.4-1
Al ₂ O ₃	0.5-1.6	0.5-3	0.1-0.7	0.4-1.4
MgO	0.3-0.5	0.5-1.5	0.3-1.0	1-1.5
CaO	0.5-0.8	0.1-0.5	0.1-1.0	0.6-1
Na ₂ O ₃	0.1-0.3	0.2-0.7	0.1-0.2	0.1-0.4
K ₂ O	1-1.2	0.4-1	0.5-1.4	0.5-1
S	0.1-0.2	0.1-0.4	0.1-0.2	0.1-0.3
Kızdırma Kaybı	1.4-2.8	0.7-2.5	2.3-4.4	0.5-1

Silis dumanının ana bileşeni kristalize olmayan amorf haldeki silistir ve genelde, beton içinde katkı olarak kullanılan silis dumanının SiO₂ içeriği %85'in üzerindedir. İkinci ana bileşeni ise yanmamış karbon kalıntılarıdır ve diğer bileşenlerden olan Fe₂O₃ içeriği ise %1 ile %2 civarındadır. Al₂O₃, SO₃, MgO, Na₂O ve K₂O gibi oksitler ise genelde %1'den az miktarda bulunur. Silis dumanının kimyasal özelliği, üretilen metalin ya da alaşımın tipine göre değişebilir ve demir silikon üretiminden elde edilen silis dumanının, demir ve magnezyum içeriği diğer silikon metal üretilen fırınlardan elde edilen silis dumanının demir ve magnezyum içeriğinden daha fazladır (Yazıcı, 1996).

3.1.2.3 Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Cürufur çeşitli metalurji tesislerinden elde edilen atık madde gruplarından birisidir. Kimyasal kompozisyonları ve özellikleri elde edildikleri sanayi

kuruluşlarının ürettiği ana ürün tipine ve üretim yöntemine bağlı olarak birbirinden çok farklılık gösterir. Cürufların çimento ve beton sektörlerinde çok çeşitli kullanım olanakları bulunmaktadır. Konvansiyonel çelik üretim teknikleriyle elde edilen cüruflar kristal yapıya sahip kütleler olarak ortaya çıkar. Bu tür cüruflar ya hiç kullanılmaz ve atılırlar ya da yol malzemesi veya beton agregası olarak kullanılırlar. Buna karşılık, modern teknolojiyle çelik üretimi yapılan tesislerde camsı yapıya ve bir miktar hidrolik özelliklere sahip olan cüruflar elde edilir. Bunları çimentolu sistemlerde kullanmak mümkün olmaktadır. Tüm cüruflar arasında en önemlisi ve en yaygın kullanım alanına sahip olanı yüksek fırın cüruflarıdır (YFC). Ham demir üretiminde atık malzeme olarak elde edilen YFC yüksek fırınlarda, daha hafif olmasından dolayı, ham demirin üstünde yer alır. Demir filizi gangi, kok ve kireçtaşının yanma sonrası artıkları YFC'yi meydana getirirler. Yüksek fırında YFC'nin oluşum sıcaklığı 1400-1600 °C'dir (Tokyay ve Erdoğan, 2011).

YFC yavaş soğutulduğu takdirde kristal bir yapıya sahip olur. Bu haliyle bazalta benzer mekanik özelliklere sahiptir ve beton agregası olarak kullanılabilir. Öte yandan, hızlı soğutma uygulanması sonucunda ise camsı yapıda cüruf elde edilir. Bu tür cüruflar granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) olarak adlandırılırlar. GYFC bir miktar hidrolik özelliğe sahiptir. Erimiş haldeki cüruf yüksek fırından çıktığında hızlı olarak soğutulduğu takdirde akışkanlığındaki ani azalma kristal yapılaşmayı engeller ve camsı yapıda bir katı eriyik elde edilmesini sağlar. Bu, yarı-kararlı camsı malzeme sodyum hidroksit veya kalsiyum hidroksit gibi aktivatörler kullanılarak ya da ince öğütülmek ve portland çimentosunun hidrasyonu ile ortaya çıkan Ca(OH)_2 'yi kullanmak suretiyle, hidrolik özelliğe sahip olur. Aktivasyon sonucunda, kalsiyum silikat hidratlar meydana gelir (Tokyay ve Erdoğan, 2011).

Yüksek fırın cürufundan eriyik olarak çıkarılan cüruf, havada yavaş soğuma işlemine tabi tutulduğu takdirde, kristal yapılı olmaktadır ancak suya dökülerek veya başka bir işlemle çok hızlı soğumaya tabi tutulacak olursa, iri kum

taneleri büyüklüğünde granüle duruma gelmekte ve amorf yapıya sahip olmaktadır. Granüle yüksek fırın cürufu amorf yapıda olduğundan ve yeterli miktarda silika ve alümina içerdiğinden, öğütülerek ince taneli duruma getirildiği takdirde puzolanik özellik gösterebilmektedir (Kocabıyık, 2010).

GYFC'nun Beton Özelliklerine Olumlu Etkileri:

-Taze betondaki işlenebilmeyi artırmaktadır. Taze betonun priz süresini uzatmaktadır.

-Betondaki terlemeyi azaltmaktadır, Betonun hidratasyon ısını azaltmaktadır.

-Sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini azaltmaktadır.

-Sertleşmiş betonun sülfat dayanıklılığını artırmaktadır.

GYFC'nun Beton Özelliklerine Potansiyel Zararlı Etkileri:

- Betonun özellikle soğuk havalarda daha geç priz almasına yol açmaktadır.

- Betonda belirli miktarda sürüklenmiş hava elde edebilmek için daha çok hava sürükleyici katkı maddesine ihtiyaç duyulmaktadır.

- İlk zamanlardaki beton dayanımı artışı daha yavaş tempoda yer almaktadır (Erdoğan, 2003).

Granüle yüksek fırın cürufu demir çelik fabrikalarında demirlerin üretim süreci sonucunda meydana gelen atık malzemedir. GYFC içerisinde kalsiyum-silikat ile alumina-silikattan oluşmaktadır. Elde edilen istenmeyen (atık) bir malzemenin betonların yapılmasında kullanımı, atık malzemelerden kurtulmak için ekonomik alanda ve de çevrenin kirlenmesini önlemesi açısından hayati önem arz etmektedir (Bingöl, 2019)

Genel olarak kullanılan silis dumanının kimyasal özellikleri Çizelge 3.7.'te verilmiştir.

Çizelge 3.7. Yüksek fırın cürufunun yüzde (%) olarak genel kimyasal kompozisyonu (Tokyay ve ark., 2004)

	ABD ve Kanada	Güney Afrika	Avustralya	Türkiye
CaO	29-50	30-40	39-44	34-41
SiO ₂	30-40	30-36	33-37	34-36
Al ₂ O ₃	7-18	9-16	15-18	13-19
Fe ₂ O ₃	0.1-1.5	-	0-0.7	0.3-2.5
MgO	0-19	8-21	1-3	3.5-7
MnO	0.2-1.5	-	0.3-1.5	1-2.5
S	0-2	1-1.6	0.6-0.8	1-2

Yüksek fırın cüruflarının kimyasal bileşimi demir cevherinin bileşimine bağlı olarak değişir. Genel olarak normal portland çimentosuna oranla daha az CaO ve daha fazla SiO₂ ve Al₂O₃ içerir.

Yüksek fırın cüruflarının kendi başlarına suyla reaksiyonu, Portland çimentolarının hidrasyonu ile karşılaştırıldığında oldukça yavaş gelişir ve bu cürufların hidrasyonu cürufun su içinde kısmi olarak erimesiyle C-S-H, hidrate alüminatlar ve hidrate siliko alüminatların çökmesi olarak tanımlanabilir. Cüruf hidrasyonunun başlangıç aşamasında silikat iyonları eriyiğe geçer. Daha sonra, ilk C-S-H çökmesinin ardından, eriyiğin kireç konsantrasyonu artar. Son olarak da alümina konsantrasyonunda, hidrate alüminat kristallerinin oluşumuna kadar artış görülür (Tokyay ve Erdoğan, 1997).

3.1.3 Kimyasal Katkı Maddeleri

Kimyasal katkılar, betonun taze ve/veya sertleşmiş haldeki özelliklerini değiştirmek için karıştırma işlemi sırasında çimentonun %5'ini geçmemek üzere eklenen maddeler olarak tanımlanmaktadır (Akman, 1996).

Kimyasal katkılar; su azaltıcı katkı, yüksek oranda su azaltıcı katkı, su tutucu katkı, hava sürükleyici katkı, priz hızlandırıcı katkı, sertleşmeyi hızlandırıcı katkı, priz geciktirici katkı olmak üzere sınıflara ayrılmaktadır (Akman, 1996).

Literatürde bileşimleri ve dolayısıyla işlevsellikleri birbirinden farklı çok sayıda kimyasal katkı maddesi vardır. Gerek su indirgeyiciler gerekse yüksek

mertebede su indirgeyiciler, su/bağlayıcı oranını düşürmek, suyu ve çimentoyu azaltmak veya su/bağlayıcı oranını değiştirmeksizin betonun işlenebilirliğini iyileştirmek için kullanılırlar. Bu kategoriye giren kimyasal katkıların bir kısmı çimento tanelerince adsorbe edilerek ve suyun yüzey gerilimini etkileyerek çimento-su sistemini etkilemek suretiyle; bir kısmı ise, ilave edilmesinden itibaren birkaç dakikadan birkaç saatlik zaman dilimi içinde iyonik ayrışma sağlamak suretiyle su ile çimento bileşenleri arasındaki kimyasal reaksiyonları etkileyerek etkinliklerini gösterirler. Bu kimyasal katkı maddeleri, esas itibarıyla bir ucu su çekici (hidrofil) diğer ucu su itici (hidrofob) özelliğinde uzun zincir biçiminde organik moleküler yapı gösteren maddelerdir. Su indirgeyicilerin ana bileşenleri linyosülfonatlar, hidroksikarboksilik asitler ve karbonhidratlar; yüksek mertebede su indirgeyicilerin ana bileşenleri sülfone melamin formaldehit ve sülfone naftalin formaldehit polikondansesi ile modifiye linyosülfonat polimerleri; hava sürükleyici katkı maddelerinin ana bileşenleri ağaç reçinesi, sülfone lignin, petrol asitleri ve proteinli maddelerin tuzları, sentetik deterjanlar, sülfone hidrokarbon tuzları ile yağ ve reçineli asit tuzlarıdır (ASTM C 494 Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, A).

Suyun sahip olduğu yüksek yüzey gerilimi, çimento taneciklerinin pozitif ve negatif kısımları arasında meydana gelen çekim kuvvetlerinin etkisi sonucu oluşan topaklaşma isteğiyle birleşince az miktarda su kullanarak iyi ve homojen dağılıma sahip bir su-çimento sistemi elde etmek mümkün olmaz. Su indirgeyici kimyasal katkı maddelerinin kullanıldığı su-çimento sisteminde katkı maddelerinin çimento taneciklerince adsorbe olması sonucu hem suyun yüzey gerilimi azalır hem de çimento taneciklerinin hidrofob özellik kazanması sağlanır ve sonuçta iyi ve homojen dağılıma sahip bir su-çimento sistemi elde edilmiş olur. Hava sürükleyici kimyasal katkı maddeleri de benzer şekilde, bir taraftan suyun yüzey gerilimini azaltırken diğer taraftan sistemde hava kabarcıklarının meydana gelmesini sağlamakta ve aynı zamanda oluşan bu hava kabarcıklarının birleşme eğilimlerini engellemektedir. Sonuçta, hidrofob özellik kazanan çimento

taneciklerinin yüzeyleri tarafından tutulmuş hava, su ile yer değiştirmek suretiyle kabarcıklar halinde çimento taneciklerinin yüzeylerine yapışır ve bu şekilde hava sürükleyicinin etkinliği ortaya çıkmış olur. Normal ve yüksek mertebede su indirgeyicilerin bir kısmı da genellikle betonda hava içeriğinin %1 oranında artmasına neden olabilmektedirler. Su indirgeyici ve yüksek mertebede su indirgeyici sınıflaması betonun karma suyu miktarında sağlanan su kesme ile ilgilidir. Normal dozajlı betonlarda, su indirgeyiciler yaklaşık olarak %5-10 oranında su keserken; yüksek mertebede su indirgeyiciler ile kıvam kaybı olmaksızın %30 oranında su kesmek mümkündür. Çimento miktarında ve su-çimento oranında herhangi bir değişikliğe neden olmaksızın karma suyunda sağlanan önemli miktarda azalma dolayısıyla, su indirgeyiciler “akışkanlaştırıcı” olarak ve yüksek mertebede su indirgeyiciler de genellikle “süperakışkanlaştırıcı” olarak isimlendirilirler (Ersoy, 2001).

Kimyasal katkıların betonun su/çimento oranı veya porozitesine olan etkisi dışında betonun dayanımı üzerinde doğrudan etkisi bulunmamaktadır. Kimyasal katkıları diğer bir etkisini gerek çimentonun hidrasyonunu hızlandırarak gerekse yavaşlatarak dayanım kazanma hızında gösterirler (Erdoğan, 2003).

Katkı Maddelerinin Referans Katkısız Betona Göre Karşılaştırması:

	Su Azaltıcı Priz Geciktiren	Su Azaltıcı Priz Hızlandırıcı	Yüksek Miktarda Su Azaltıcı ve Priz Geciktirici
<u>Su mik. %</u>	95	95	88
		Priz başlama	
En az	1 saat	1 saat	1 saat
En çok	3,5 saat	3,5 saat	3,5 saat
		Priz sona erme	
En az	-	1 saat önce	-
En çok	3,5 saat sonra	-	3,5 saat sonra
		Dayanım	
3 gün	110	125	125
7 gün	110	110	115
28 gün	110	110	110

NOT: Yukarıda bahsi geçen katkıların istenilen kalitede olup olmadığını anlamak için aynı çimento ve çökme değerinde olan katkısız ve katkılı betonların özellikleri (su/çim, dayanım, birim ağırlık v.s.) karşılaştırılır (Erdoğan, 2003).

3.2. Metod

Tez çalışmasında uygulanan tüm deneyler Türk standartlarına ve gelişmiş bazı ülkelerin standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Deney çalışmaları Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemeleri Laboratuvarı, Çukurova Üniversitesi Merkezi Laboratuvarı (ÇÜMERLAB), Çimko Çimento Narlı Şubesi, Çimko Beton Adana Şubesi ve Türkiye Hazır Beton Birliği laboratuvarlarında yürütülmüştür.

3.2.1. Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması

3.2.1.1. Portland Çimentosu

Tez çalışmasında Portland çimentosu olarak TS EN 196-1-2-3 standartlarına uygun olarak üretilmiş CEM I 42,5 R çimentosu kullanılmış olup bu

çimento Çimko Çimento ve Beton San. Tic. A.Ş. Narlı fabrikasından temin edilmiştir. CEM I 42,5 R çimentosunun kimyasal içeriği Çizelge 3.8 'de görülmektedir.

3.2.1.2. Uçucu Kül

Tez çalışmasında kullanılan uçucu kül TS EN 450-1 standardına uygun olup, İskenderun Enerji Üretim ve Ticaret A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Kullanılan uçucu külün kimyasal içeriği Çizelge 3.8 'de görülmektedir.

3.2.1.3. Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Tez çalışmasında TS EN 15167-1 standardına uygun olarak üretilen granüle yüksek fırın cürufu kullanılmış ve Adana Çimento A.Ş. İskenderun firmasından temin edilmiştir. Granüle yüksek fırın cürufunun kimyasal içeriği Çizelge 3.8 'de görülmektedir.

3.2.1.4. Silis Dumanı

Tez çalışmasında TS EN 13263-1 standardına uygun olarak üretilen silis dumanı kullanılmış ve BASF firmasının Gebze tesisinden temin edilmiştir. Silis dumanının kimyasal içeriği Çizelge 3.8 'de görülmektedir.

Çizelge 3.8. Beton Karışımında Kullanılan Bağlayıcı Hammaddelerin Kimyasal Özellikleri

%	İSDEMİR Yüksek Fırın Cürufu	İSKEN Uçucu Kül	ÇİMKO CEM I 42,5 R	BASF Silis Dumanı
SiO ₂	39,41	60,80	19,47	92,79
Al ₂ O ₃	12,05	21,63	4,94	0,71
Fe ₂ O ₃	0,60	7,69	3,31	1,78
CaO	35,73	1,39	62,24	0,54
MgO	6,11	2,05	3,47	0,65
SO ₃	0,14	0,10	2,75	0,29
K.K.	0,71	1,91	2,35	1,43
K ₂ O	0,99	2,64	0,71	0,92
Na ₂ O	0,45	1,14	0,39	0,37
Ç.K.			0,29	
S.CaO			0,91	
TiO ₂	1,31			
Mn ₂ O ₃	1,15			
Cl	0,0042	0,004		0,03
Rutubet	0,36			0,34
Yanmamış Karbon		0,35		
ÖZ.AĞR.	2,9	2,36	3,17	2,3
BLAIN (cm ² /g)	5470	4050	3645	
P.BAŞI (dk.)			165	
P. SONU (dk.)			265	
2 GÜN (N/mm ²)			26,4	
7 GÜN (N/mm ²)	5,52		40,2	
28 GÜN (N/mm ²)			50,6	

3.2.1.5. Su

Tez çalışmasında kullanılan su TS EN 1008 standardına uygun olup Çimko Çimento ve Beton San. Tic. A.Ş. firması Adana Karahan Tesisinden temin edilmiştir. Kullanılan suyun analiz raporu Çizelge 3.9. da görülmektedir.

3. MATERYAL VE METOD

İrfan COŞKUN

Çizelge 3.9. Kullanılan Suyun Analiz Raporu

NUMUNE KODU N-2651/19			TABLO	TS EN 1008 DEĞERLERİ
PARAMETRE	BİRİM	SONUÇ	KULLANILAN METOT	
		8,07	TS EN ISO 10523	pH>4 olmalıdır
iletkenlik	pS/cm	391	TS 9748 EN 27888	
Alkalinite	mg/L	159	SM 2320 B	Max 1500 mg/lt
Çökebilir Katı Madde	ml/L	0	TS 7092	Max 4.mI olmalıdır
Klorür	mg/L	15,5	SM 4500 cı- B	On örmeli beton ve erbeti 'n 500
				Donatı bulunan beton i -n 1000
				Donatı bulunma an beton in 4500
Sülfat	rhg/L	102	SM 4500 SOF- E	Max 2000 mg/lt
Nitrat	mg/L	4,29	EPA 352.1	Max 500 mg/lt
Fosfat	mg/L	0,061	SM 4500 PC SM 4500 P E	Max 100 mg/lt
*Çinko (Zn)	mg/L	0,005	TS EN ISO 17294-1/2	Max 100 mg/lt
*Kurşun (Pb)	mg/L	40,005		Max 100 mg/lt
*Sodyumoksit	mg/L	35,6		
*Potasyumoksit	mg/L	3,78		
*Koku		Yok	TS EN 1008 Bölüm 6.1.1	İçilebilir suya eşdeğer olmalıdır
*Renk		Berrak	TS EN 1008 Bölüm 6.1.1	Açık san veya daha açık
*Sıvı-Katı Yağlar		Yok	TS EN 1008 Bölüm 6.1 .1	Görünür izlerden fazla olmamalıdır
*Deterjan		Yok	TS EN 1008 Bölüm 6.1 .1	Herhangi bir köpük 2 dk da ka bolmalı
*Organik Madde		Oluşan renk uygundur	TS EN 1008 (Bölüm 6.1.2)	NaOH ilavesi sonrası renk açık sarı veya daha açık olmalıdır
*Yoğunluk	g/cm3	0,997	İşletme İçi Metot	

3.2.1.6. Agrega

Tez çalışmasında kullanılan agregalar TS 706 EN 12620 standardına uygun üretilmiş olup Çimko Beton Adana Karahan Tesisinde beton üretiminde kullanılan AYC Madencilik-Karaisalı firmasından temin edilmiştir.

3.2.2. Yürütülen Deneyler**3.2.2.1. Beton Karışım Oranları Hesaplanması**

Beton üretim reçetelerinde kullanılan tüm hammaddelerin özgül ağırlıkları, su emme miktarları ve agregaların granülometri analiz sonuçlarının kullanılmasıyla oluşturulan beton karışım hesaplarında TS 802 standardı esas alınmıştır.

3.2.2.1.(19. İnce Agreganın Özgül Ağırlık ve Su Emme Değerlerinin Hesaplanması)

Kumlardan alınan 1000'er g numune su içerisinde 24 saat bekletildikten sonra ince taneleri kaybolmayacak şekilde suyu süzülerek alınmış ve bir tava içine yayılmıştır. 0,1 g hassasiyetle tartılarak bulunan tava ile ıslak numunenin ağırlığından tavanın ağırlığı çıkarılarak agreganın ıslak ağırlığı bulunarak kaydedilmiştir (M_0). Tava, tablalı ısıtıcı üzerine konarak ve numune sürekli karıştırılarak (doğru yüzey kuru) DYK haline çabuk gelmesi sağlanmıştır. Agreganın DYK durumu TS 3526'ya göre tayin edilmiştir (M_2).

DYK durumundaki agreganın etüv kurusu durumuna getirilmiş ve soğutulmuştur. Soğutulmuş numune 0,1 gr hassasiyetli tartıda tartılmış, kap ağırlığı bu ağırlıktan çıkarılmış ve kuru numune ağırlığı bulunmuştur (M_1). Milimetrik ölçü kabı içerisine 1000 ml çizgisine kadar su doldurulmuş ve su dolu ölçü kabının ağırlığı hassas terazide tartılarak kaydedilmiştir (M_4). Ardından ölçü kabı boşaltılıp içerisine numune boşaltılmış ve numune üzerine bir miktar su konulduktan sonra suyun numune içerisine tam işlemesini sağlayabilmek için kap tabanı düz bir zemine vurulmuş ve yeterince sallanmıştır. Numune içerisindeki hava kabarcıkları ince bir telle şişleme yaparak çıkarılmaya çalışılmıştır. İstenilen durum sağlanınca ölçü kabı 1000 ml işaretine kadar su ile doldurulmuştur ve ölçüm alınmıştır (M_3). Tüm bu işlemler TS EN 1097-6 esas alınarak yapılmıştır.

$$\text{DYK su emme oranı} = ((M_2 - M_1) / M_2) \times 100$$

Kumun Kuru Özgöl Ağırlığı;

$$k = M_1 / (M_2 + M_4 - M_3)$$

Kumun Görünen Özgöl Ağırlığı;

$$g = M_2 / (M_1 + M_4 - M_3)$$

Kumun D.Y.K. Özgöl Ağırlığı;

$$d = M_2 / (M_2 + M_4 - M_3)$$



Şekil 3.4. İnce agreganın özgül ağırlık deney düzeneği

Çizelge 3.10. İnce Agreganın Özgül Ağırlık ve Su Emme Değerleri

Malzemenin Cinsi	0 - 4 mm İnce Kırma Agregası
Numunenin DYK Ağırlığı (gr) M2	500
Boş ölçü kabı 1000 ml ye kadar su ile dolu (gr) M4	1281,5
Aynı malzemenin Etüv kurusu Ağırlığı (gr) M1	489,9
1000 ml ye kadar su dolu kap+numune (gr) M3	1589
Kuru Birim Hacim Ağırlığı $M_1/(M_2+M_4-M_3)$	2,54
DYK Birim Hacim Ağırlığı $M_2/(M_2+M_4-M_3)$	2,60
Görünür Birim Hacim Ağırlığı $M_1/(M_1+M_4-M_3)$	2,69
Su Emme Oranı $\{(M_2-M_1)/M_1\} \times 100$	2,06

3.2.2.1.(2). İri Agregat Özgül Ağırlık ve Su Emme Değerlerinin Hesaplanması

İri agregat numunelerine TS EN 1097-6 'ya göre özgül ağırlık tayini yapmak için, içinde su bulunan bir kaba yerleştirilmiş, daha sonra su süzülerek 0,1 g hassasiyetli terazide tartılmış ve agreganın ıslak ağırlığı hesaplanmıştır (M_0). Numune tanelerinin üzerinde gözle görünebilen su tabakası kalmayınca kadar kurutulmuştur. İri taneler bir kez bez üzerine serilerek tek tek kurutulmuştur. Hızlı bir şekilde bu işlemi daha sonra numunenin daha fazla su kaybetmesini önlemek için 0,1 g hassasiyetli tartıda tartılarak doygun yüzey kuru ağırlığı kaydedilmiştir (M_2). DYK halindeki numune tel sepete konarak içi su dolu kovanın içine yüzeyden en az 5 cm mesafe kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Taneler arasında hava kabarcıkları kalmayacak şekilde tel sepet sallanmış ve tartılmıştır (M_3). Numune etüvde kurutulularak kuru numune ağırlığı kaydedilmiştir (M_1).

$$\text{DYK su emme oranı} = ((M_2 - M_1) / M_2) \times 100$$

Kaba Agreganın Kuru Özgül Ağırlığı;

$$k = M_1 / (M_2 - M_3)$$

Kaba Agreganın Görünen Özgül Ağırlığı;

$$g = M_1 / (M_1 - M_3)$$

Kaba Agreganın D.Y.K Özgül Ağırlığı;

$$D = M_2 / (M_2 - M_3)$$



Şekil 3.5. Tel Sepet Yöntemi ile İri Agregat Özgül Ağırlık Deney Düzenliği

Çizelge 3.11. İri Agregat Özgül Ağırlık ve Su Emme Değerleri

Malzemenin Cinsi	4-11,2 mm İri Kırma Agregat	11,2-22,4 mm İri Kırma Agregat
Numunenin DYK Ağırlığı (gr) M2	3082	3118
Sepet + Numunenin Sudaki Ağırlığı (gr) M3	1927,6	1950,2
Numunenin Etüv Kuru Ağırlığı (gr) M1	3048,7	3094,6
Kuru Birim Hacim Ağırlığı M1/ (M2-M3)	2,64	2,65
DYK Birim Hacim Ağırlığı M2/ (M2-M3)	2,66	2,67
Görünür Birim Hacim Ağırlığı M1/ (M1-M3)	2,72	2,70
Su Emme Oranı $\{ (M2-M1)/M1 \} * 100$	1,09	0,75

3.2.2.1.(3). Agregaların Elek Analizi Deneyi

Granülometrik analiz TS 3530 EN 933-1'e göre yapılmıştır. Bunun için kırma 0-4 mm agregadan, 4-11,2 mm agregadan ve 11,2-22,4 mm agregadan 5000'er g alınarak homojen olacak şekilde karıştırılıp elek sarsma makinesinde elenmiştir. Elek takımı büyükten küçüğe doğru sıralanmış en alta toplama kabı konulmuş ve en üste de kapak takılarak işleme başlanmıştır. Elek sarsma makinesi her 10 saniyede 1/6 tur yapacak şekilde dönme özelliğine sahiptir. Elemanın tamamlanmasından sonra her elek üzerinde kalan numuneler tek tek 0,1 g hassasiyette olan tartı ile tartılmış ve her elekten geçen malzemenin yüzdesi hesaplanıp granülometrik grafiği çizilmiştir.



Şekil 3.6. Agregat elek seti

3.2.2.1.(4). Agrega Granülometri Eğrisi, Beton Karışım Oranlarının Hesaplanması, Numune Hazırlanması ve Kür Şartları

Kullanılan tüm hammaddelerin fiziksel deneyleri tamamlandıktan sonra TS 802 standardına göre beton karışım oranları oluşturulmuştur. Burada öncelikli olarak agrega granülometrisi tasarlanmış ve hacim hesabına dayalı olarak beton reçeteleri elde edilmiştir.

Öncelikle sadece 350 kg saf CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılarak “su/bağlayıcı=0,5” oranı ile beton reçetesi oluşturulmuş ve bu beton referans beton olarak kabul edilmiştir. Sonraki kısımlarda çalışma 3 etapta planlanmıştır.

Çalışmanın 1. etabında çimento ile sadece bir çeşit mineral katkı farklı oranlarda ikame edilmiştir. Toplam 350 kg bağlayıcıdan yine 0,5 sabit “su/bağlayıcı” oranı ile olmak kaydıyla % 5-10-20-30-50-75-90 oranlarında uçucu kül, %5-10-20-30-50-75-90 oranlarında granüle yüksek fırın cürufu, %2,5-5-7,5-10-15-20 oranlarında silis dumanı ikamesi ile reçeteler hazırlanmıştır. Bu etapta ikili kombinasyon reçeteler hazırlanmıştır.

Çalışmanın 2. etabında toplam 350 kg bağlayıcı ile “su/bağlayıcı=0,5” oranı ile %5 silis dumanı sabit iken sırasıyla %10-20-30 yüksek fırın cürufu ve %10-20-30 uçucu kül ikameli beton reçeteleri oluşturulmuştur. Hemen ardından yine 350 kg bağlayıcı miktarı ve 0,5 su/bağlayıcı oranı ile bu sefer %7,5 silis dumanı sabit iken sırasıyla %10-20-30 yüksek fırın cürufu ve %10-20-30 uçucu kül ikameli beton reçeteleri oluşturulmuştur. Bu etapta üçlü kombinasyon reçeteler hazırlanmıştır.

Çalışmanın 3. etabında toplam 350 kg bağlayıcı ile “su/bağlayıcı=0,5” oranı ile %5 silis dumanı sabit iken sırasıyla %5 uçucu kül+%5 yüksek fırın cürufu, %10 uçucu kül+ %10 yüksek fırın cürufu, %15 uçucu kül+ %15 yüksek fırın cürufu, %25 uçucu kül+ %25 yüksek fırın cürufu, %35 uçucu kül+ %35 yüksek fırın cürufu ikameli beton reçeteleri oluşturulmuştur. Hemen ardından %7,5 silis dumanı sabit iken sırasıyla %5 uçucu kül+%5 yüksek fırın cürufu, %10 uçucu

kül+ %10 yüksek fırın cürufu, %15 uçucu kül+ %15 yüksek fırın cürufu, %25 uçucu kül+ %25 yüksek fırın cürufu, %35 uçucu kül+ %35 yüksek fırın cürufu ikameli beton reçeteleri oluşturulmuştur. Bu etapta dörtlü kombinasyon reçeteler hazırlanmıştır.

Oluşturulan tüm reçetelerden 300 dm³ hacminde karışımlar hazırlanmış ve her bir karışımdan 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360. günlerde basınç ve eğilme dayanım testlerine tabi tutabilmek için 15x15x15 cm boyutunda 14 adet küp numune, 15x15x60 cm boyutlarında 14 adet prizma kırış numunesi hazırlanmıştır. Ayrıca sadece 28. günlerde basınç dayanımı testine tabi tutmak için 15x30 boyutlarında 2 şer adet silindir numune alınmıştır. Her bir seriden 30 ar adet olmak üzere çalışma boyunca toplamda 1290 adet numune hazırlanmış kırım günlerine kadar Çimko Hazır Beton'a ait olan, Adana ve Mersin bölgelerinde bulunan 3 farklı hazır beton tesis laboratuvarlarında yaz-kış 20±2 °C'sıcaklıkta, içinde içilebilir musluk suyu ile doldurulmuş olan kapalı alanda bulunan kür havuzlarında bekletilmiştir.

Şekil 3.7. de referans beton numunesi karışım tablosu örneği, Şekil 3.8. de ikili kombinasyon, Şekil 3.9. de üçlü kombinasyon, Şekil 3.10. de ise dörtlü kombinasyon beton numunesi karışım tablosu örnekleri verilmiştir. Çizelge 3.12. de ise TS EN 206-1 beton karışım hesabına göre hazırlanmış olan ikili, üçlü, dörtlü kombinasyon şeklindeki tüm beton reçeteleri verilmiştir.

3. MATERYAL VE METOD

İrfan COŞKUN

		BETON KARIŞIM HESABI				TS EN 206-1		Doküman no			
								Yayın Tarihi			
								Rev. Tarihi		-	
								Rev. No:		-	
BETON SINIFI		:				LAB REF NO		:		1	
ÇİMENTO CİNSİ		:				RAP. TARİHİ		:		16.08.2019	
AGREGA CİNSİ		:									
KİMYASAL KATKI ADI		:				KİMYASAL KATKI CİNSİ:					
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											
KİMYASAL KATKI CİNSİ:											

Şekil 3.7. Referans Numune Beton Karişım Oranı Tablosu

3. MATERYAL VE METOD

İrfan COŞKUN

BETON KARIŞIM HESABI										TS EN 206-1		Doküman no			
										Yayın Tarihi					
										Rev. Tarihi					
										Rev. No:					
BETON SINIFI :										LAB REF NO :		1			
ÇİMENTO CİNSİ : CEM 1/42,5 R										RAP. TARİHİ :		16.08.2019			
AGREGA CİNSİ : Kalker kırma										MINERAL KATKI ADI :		İSKEN UÇUCU KÜL			
KİMYASAL KATKI ADI :										KİMYASAL KATKI CİNSİ :					
Malzeme	Hesaplamalar				Hacim (m³)	D.y.k. Öz. Ag.(Gr)	Ağırlık (Kg)	Mukavemetler N/mm²							
Çimento	Su	175,00	350	Kg	104,9	3,17	332,5	1.KIRIM	2.KIRIM	3.KIRIM	ORT				
Mineral Katkı (SD)	S/C Oranı W/C	0,5			0,0	2,3	0								
Mineral Katkı (UK)					7,4	2,36	17,5								
Mineraki Katkı (YFC)					0,0	2,9	0								
Su	%				175,0	1	175,00								
Hava					15,0										
Kısmi hacim toplamı					302,3										
Agregalar	Agrega hacmi =1000-Kısmi hacim toplamı				A.h=	697,7									
KUM 1	KUM 1 Hacmi %= (A.h. x K 1 /100)				55	383,7	2.600	997,7							
KUM 2	KUM 2 Hacmi %= (A.h. x K 2 /100)				0	0,0	2.660	0,0							
İRİ 1	İRİ 1 Hacmi %= (A.h. x İr.1 /100)				25	174,4	2.660	464,0							
İRİ 2	İRİ 2 Hacmi %= (A.h. x İr.2 /100)				20	139,5	2.670	372,6							
İRİ 3	İRİ 3 Hacmi %= (A.h. x İr.3 /100)				0	0,0	0,000	0,0							
Katkı - = E/m³					Toplam	1000,0		2359,2	ÇEVRESEL ETKİ SINIFI :			XC3			
AGREGALAR										Şartname		Karışımın Düzeltilmiş Tartıları			
Gradasyon										Min.	Max.				
Elek (TSE) mm	İnce		Kaba		Karışım										
	KUM 1	KUM 2	İRİ 1	İRİ 2	İRİ 3										
31,5	100	100	100	100			100	100							
25,0	100	100	100	100		100,0	100	100							
22,4	100	100	100	100	89,4	97,9	84	99							
16,0	100	100	100	27,5		85,5	62	89							
8,0	100	100	60,4	0,6		70,2	38	77							
4,0	98,7	98,7	5,1	0,2		55,6	23	65							
2,0	69,3	69,3	1,0	0,2		38,4	14	53							
1,0	42,9	42,9	1,0	0,2		23,9	8	42							
0,500	31,9	31,9	1,0	0,2		17,8	5	28							
0,250	19,4	19,4	1,0	0,2		11,0	2	15							
Karışım %	55	0	25	20	0	100									
Rutubet Düzeltmesi										Hava Sıcaklığı LAB		Beton Sıcaklığı LAB			
İlk Slump cm: 30 Dk. Sonra	KUM 1	KUM 2	İRİ 1	İRİ 2	İRİ 3	Karışım	Değişen Toplam Su Lt.		Ölçülen hava		LAB				
Rutubet															
Su Emme	2,06	0	1,09	0,75											
Toplam %	-2,06	0	-1,1	-0,75	0										
Toplam Su Lt.	-20,6	0,0	-5,1	-2,8	0,0	-28,4									
KARIŞIM GRONÜLOMETRİSİ										NOT:					

Şekil 3.8. İkili Kombinasyon Beton Karışım Oranları Tablosu (1. Etap)

3. MATERYAL VE METOD

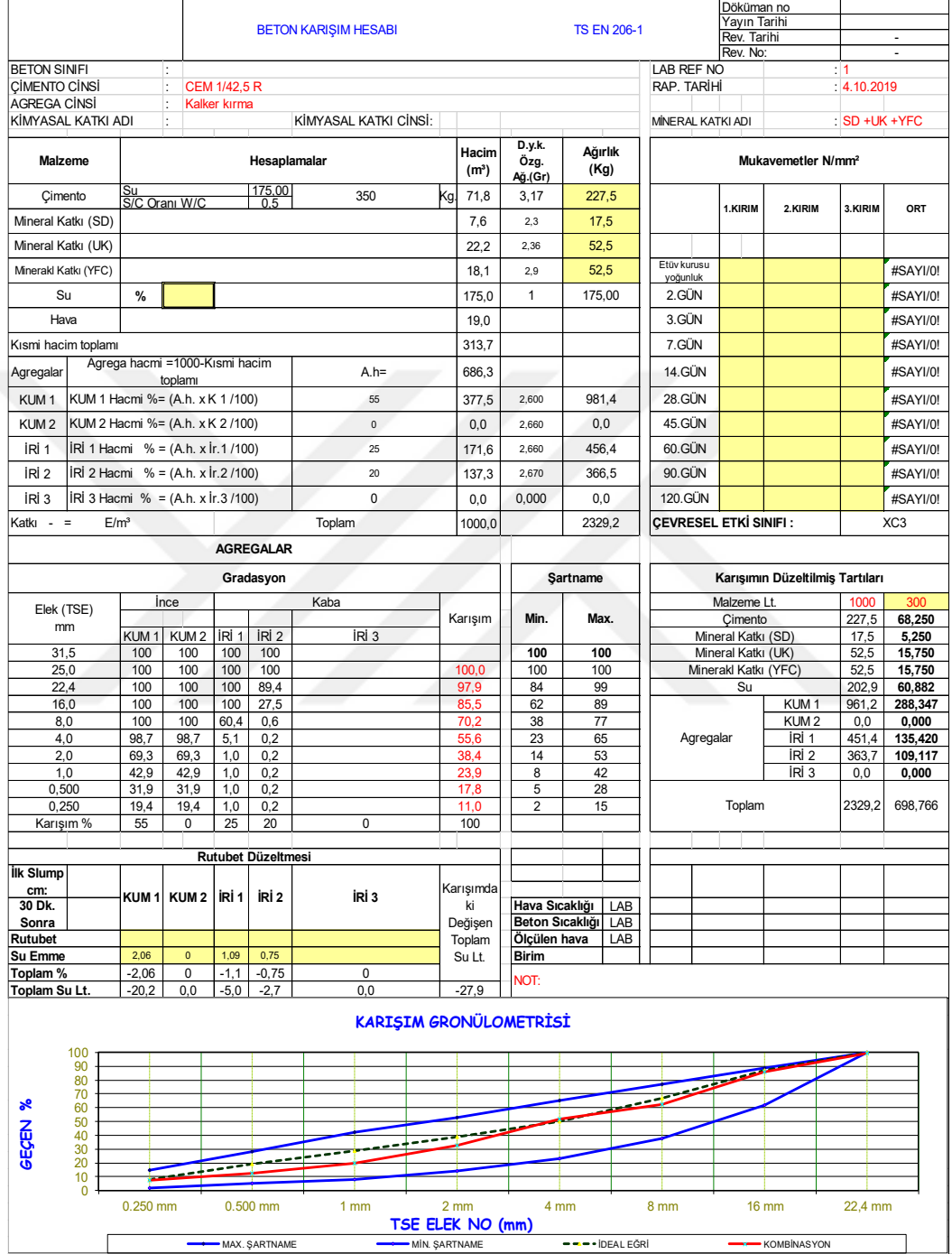
İrfan COŞKUN

BETON KARIŞIM HESABI										TS EN 206-1		Doküman no	
										Yayın Tarihi			
										Rev. Tarihi		-	
										Rev. No:		-	
BETON SINIFI :										LAB REF NO :		1	
ÇİMENTO CİNSİ :										RAP. TARİHİ :		19.09.2019	
AGREGA CİNSİ :										MİNERAL KATKI ADI :		Silis Dumanı + YFC	
KİMYASAL KATKI ADI :										KİMYASAL KATKI CİNSİ :			
Malzeme		Hesaplamalar				Hacim (m³)	D.y.k. Özg. Ağı (Gr)	Ağırlık (Kg)	Mukavemetler N/mm²				
Çimento	Su	175	332,5			93,8	3,17	297,5	1.KIRIM	2.KIRIM	3.KIRIM	ORT	
Mineral Katkı (YFC)	S/C Oranı W/C	0,5				12,1	2,9	35					
Mineral Katkı (SD)						7,6	2,3	17,5					
Su						175,0	1	175					
Kimyasal Katkı	%					0,0	1,15	0,00					
Hava						19,0							
Kısmi hacim toplamı						307,5							
Agregalar						Agrega hacmi = 1000 - Kısmi hacim toplamı							
KUM 1	KUM 1 Hacmi % = (A.h. x K 1 / 100)	55				380,9	2,660	1013,1					
KUM 2	KUM 2 Hacmi % = (A.h. x K 2 / 100)	0				0,0	2,660	0,0					
İrİ 1	İrİ 1 Hacmi % = (A.h. x İr.1 / 100)	25				173,1	2,660	460,5					
İrİ 2	İrİ 2 Hacmi % = (A.h. x İr.2 / 100)	20				138,5	2,670	369,8					
İrİ 3	İrİ 3 Hacmi % = (A.h. x İr.3 / 100)	0				0,0	0,000	0,0					
Katkı - = E/m³						Toplam	1000,0	2368,4	ÇEVRESEL ETKİ SINIFI : XC3				
AGREGALAR										Şartname		Karişımın Düzeltilmiş Tartıları	
Gradasyon										Min. Max.		Malzeme Lt.	
Elek (TSE) mm	İnce		Kaba			Karişım	Min.	Max.	KUM 1		KUM 2		
	KUM 1	KUM 2	İrİ 1	İrİ 2	İrİ 3				İrİ 1	İrİ 2	İrİ 3		
31,5	100	100	100	100		100,0	100	100	297,5	89,250			
25,0	100	100	100	100		97,9	100	100	35	10,500			
22,4	100	100	100	100		85,5	84	99	17,5	5,250			
16,0	100	100	100	27,5		70,2	62	89	203,7	61,099			
8,0	100	100	60,4	0,6		55,6	38	77	0,0	0,000			
4,0	98,7	98,7	5,1	0,2		38,4	23	65	0,0	0,000			
2,0	69,3	69,3	1,0	0,2		23,9	14	53	367,0	110,102			
1,0	42,9	42,9	1,0	0,2		17,8	8	42	0,0	0,000			
0,500	31,9	31,9	1,0	0,2		11,0	5	28					
0,250	19,4	19,4	1,0	0,2			2	15					
Karişım %	55	0	25	20	0	100			Toplam	2368,4	710,510		
Rutubet Düzeltmesi										Hava Sıcaklığı		LAB	
İlk Slump cm:	KUM 1	KUM 2	İrİ 1	İrİ 2	İrİ 3	Karişım	Beton Sıcaklığı		LAB		Ölçülen hava		
30 Dk. Sonra							Değişen Toplam Su Lt.		LAB		Birim		
Rutubet													
Su Emme	2,06	0	1,09	0,75									
Toplam %	-2,06	0	-1,1	-0,8	0								
Toplam Su Lt.	-20,9	0,0	-5,0	-2,8	0,0	-28,7							
NOT:													
KARIŞIM GRONÜLOMETRİSİ													

Şekil 3.9. Üçlü Kombinasyon Beton Karişım Oranları Tablosu (2. Etap)

3. MATERYAL VE METOD

İrfan COŞKUN



Şekil 3.10. Dörtlü Kombinasyon Beton Karışım Oranları Tablosu (3. Etap)

3. MATERYAL VE METOD

İrfan COŞKUN

Çizelge 3.12. Referans, İkili, Üçlü ve Dörtlü Beton Kombinasyonlarının Reçeteleri

	Bağlayıcı							Agrega			Birim Hacim Ağırlık (gr)
	Çimento CEM I 42,5	Silis Dumanı	Uçucu Kül	G. Yüksek Fırın Cürufu	Su	Su/Bağ.	Hava	0-4 mm	4-11,2 mm	11,2-22,4 mm	
1. Etap Beton Reçeteleri	Referans Beton	350			175	0,5	15	1000	465,2	373,6	2378,8
	UK5	332,5		17,5	175	0,5	15	997,7	463,9	372,6	2374,2
	UK10	315		35	175	0,5	15	994,9	462,7	371,5	2369,1
	UK20	280		70	175	0,5	15	989,5	460,2	369,5	2359,2
	UK30	245		105	175	0,5	15	984,1	457,6	367,5	2349,2
	UK50	175		175	175	0,5	15	973,3	452,6	363,4	2329,3
	UK75	87,5		262,5	175	0,5	15	959,7	446,3	358,4	2304,4
	UK90	35		315	175	0,5	15	951,6	442,5	355,4	2289,5
	GYFC5	332,5		17,5	175	0,5	15	999,7	464,9	373,3	2377,9
	GYFC10	315		35	175	0,5	15	999	464,5	373,1	2376,6
	GYFC20	280		70	175	0,5	15	997,6	463,9	372,5	2374
	GYFC30	245		105	175	0,5	15	996,2	463,2	372	2371,4
	GYFC50	175		175	175	0,5	15	993,4	461,9	370,9	2366,2
	GYFC75	87,5		262,5	175	0,5	15	989,8	460,3	369,6	2359,7
	GYFC90	35		315	175	0,5	15	987,7	459,3	368,8	2355,8
	SD2,5	341,25	8,75		175	0,5	15	998,9	464,5	373	2376,4
	SD5	332,5	17,5		175	0,5	15	997,4	463,8	372,5	2373,7
	SD7,5	323,75	26,25		175	0,5	15	995,9	463,1	371,9	2370,9
	SD10	315	35		175	0,5	15	994,4	462,4	371,4	2368,2
	SD15	297,5	52,5		175	0,5	15	991,4	461	370,2	2362,6
	SD20	280	70		175	0,5	15	988,5	459,6	369,1	2357,2
2. Etap Beton Reçeteleri	SD5+GYFC10	297,5	17,5	35	175	0,5	19	1013	460,4	369,8	2387,2
	SD5+GYFC20	262,5	17,5	70	175	0,5	19	1011,5	459,8	369,2	2384,5
	SD5+GYFC30	227,5	17,5	105	175	0,5	19	1010	459,1	368,7	2381,8
	SD5+UK10	297,5	17,5	35	175	0,5	19	1008,7	458,5	368,2	2379,4
	SD5+UK20	262,5	17,5	70	175	0,5	19	1002,9	455,88	366	2368,78
	SD5+UK30	227,5	17,5	105	175	0,5	19	997,1	453,2	363,9	2358,2
	SD7,5+GYFC10	288,75	26,25	35	175	0,5	19	1011,5	459,8	369,2	2384,5
	SD7,5+GYFC20	253,75	26,25	70	175	0,5	19	1010	459,1	368,6	2381,7
	SD7,5+GYFC30	218,75	26,25	105	175	0,5	19	1008,5	458,4	368,1	2379
	SD7,5+UK10	288,75	26,25	35	175	0,5	19	1007,2	457,8	367,6	2376,6
	SD7,5+UK20	253,75	26,25	70	175	0,5	19	1001,4	455,1	365,5	2366
	SD7,5+UK30	218,75	26,25	105	175	0,5	19	995,6	452,5	363,4	2355,5
3. Etap Beton Reçeteleri	SD5+UK5+GYFC5	297,5	17,5	17,5	175	0,5	19	988,2	459,6	369	2360,8
	SD5+UK10+GYFC10	262,5	17,5	35	175	0,5	19	984,8	457,9	367,7	2354,4
	SD5+UK15+GYFC15	227,5	17,5	52,5	175	0,5	19	981,4	456,3	366,5	2348,2
	SD5+UK25+GYFC25	157,5	17,5	87,5	175	0,5	19	974,4	453,1	363,9	2335,4
	SD5+UK35+GYFC35	87,5	17,5	122,5	175	0,5	19	967,6	449,9	361,3	2322,8
	SD7,5+UK5+GYFC5	288,75	26,25	17,5	175	0,5	19	986,7	458,8	368,5	2358
	SD7,5+UK10+GYFC10	253,75	26,25	35	175	0,5	19	983,3	457,3	367,2	2351,8
	SD7,5+UK15+GYFC15	218,75	26,25	52,5	175	0,5	19	979,8	455,6	365,9	2345,3
	SD7,5+UK25+GYFC25	148,75	26,25	87,5	175	0,5	19	972,9	452,4	363,3	2332,6
	SD7,5+UK35+GYFC35	78,75	26,25	122,5	175	0,5	19	966,1	449,2	360,7	2320



Şekil 3.11. Numunelerin Hazırlanıp Kalıplanması

3.2.2.2. Mekanik Deneyler

3.2.2.2.(1). Basınç Dayanımı Deneyi

Betonun basınç dayanımını belirlemek amacıyla numune kalıplarına yerleştirilmesinde TS EN 12390-2 esas alınmıştır. Numune kalıplarının iç tarafı hafif bir yağ tabakası oluşacak şekilde yağlanarak, 15x15x15 cm ebatlarındaki küp kalıplara kürek ile ayrışma olmayacak şekilde iki tabakada yerleştirilmiş, vibratörle sıkıştırılmıştır. Kalıplar yüzeye kadar beton ile doldurulduktan sonra yüzeyi mala ile düzeltilmiş ve numunelerin küre tabi tutulmalarına kadar geçen sürede nem kayıplarını önlemek için numune üzerine ıslak telis bezi örtülmüştür. Bu şekilde 24 saat bekletilen numuneler daha sonra kalıplardan çıkarılmış ve üzerleri

etiketlenerek test tarihine kadar bekletilmek üzere kür havuzlarına yerleştirilmişlerdir.

Basınç dayanımı testleri, 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360 günlük numunelere uygulanmıştır. Basınç presi TS 12390-4'e uygun olarak ayarlanmış ve basınç gerilmeleri tespit edilmiştir. Her beton grubundan 2 şer adet numune alınmış ve ortalama basınç dayanımları hesaplanmıştır. Basınç dayanım testlerinde TS EN 12390-3'te belirtilen kurallar göz önünde tutulmuştur.



Şekil 3.12. 15x15x15 cm lik Numune Üzerinde Basınç Dayanımı Deneyi

3.2.2.2.(2). Eğilme Dayanımı Deneyi

Betonun eğilme dayanımını belirlemek amacıyla 15x15x60 cm ebatlarındaki dikdörtgen prizma kalıplara kürek ile ayrışma olmayacak şekilde iki tabakada yerleştirilerek vibratörle sıkıştırılmıştır. Kalıplar yüzeye kadar beton ile doldurulduktan sonra yüzeyi mala ile düzeltilmiş ve numunelerin küre tabi tutulmalarına kadar geçen sürede nem kayıplarını önlemek için numune üzerine ıslak telis bezi örtülmüştür. Bu şekilde 24 saat bekletilen numuneler daha sonra kalıplardan çıkarılmış ve üzerleri etiketlenerek test tarihine kadar bekletilmek üzere kür havuzlarına yerleştirilmişlerdir.

Eğilme dayanımı testleri, 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360 günlük numunelere uygulanmıştır. Eğilme dayanım testlerinde TS EN 12390-5’de belirtilen kurallar göz önünde tutularak 2 noktadan yükleme testi yapılmıştır.



Şekil 3.13. 15x15x60 cm Boyutlu Numuneler Üzerinde Eğilme Dayanımı

3.2.2.3. Durabilite Deneyleri

Mekanik deney sonuçlarına göre en iyi dayanım performansları yakalanan SD7,5+UK10+GYFC10 ve SD7,5+UK15+GYFC15 numunelerinin hem birbirlerine göre hem de %100 CEM I 42,5 ile yapılan referans numuneye göre bazı durabilite özellikleri incelenmiştir. Bu deneylerin yapılması için Çizelge 3.13.’de belirtildiği üzere farklı ebatlarda üçer adet numuneler hazırlanmıştır.

Çizelge 3.13. Dayanıklılık Deneyleri İçin Hazırlanan Numuneler

Deney adı	Basınç altında su işleme	Klor iyonu difüzyon geçişi	Mg SO ₄ çözeltisine direnç	Na SO ₄ çözeltisine direnç
Referans numune	15x15x15 cm küp	10/20 cm silindir	10x10x10 cm küp	10x10x10 cm küp
SD7,5-UK10-YFC10	15x15x15 cm küp	10/20 cm silindir	10x10x10 cm küp	10x10x10 cm küp
SD7,5-UK15-YFC15	15x15x15 cm küp	10/20 cm silindir	10x10x10 cm küp	10x10x10 cm küp

3.2.2.3.(1). Betonda Magnezyum Sülfat Çözeltisine Karşı Dayanıklılık Deneyi

Betonda magnezyum sülfat çözeltisine karşı dayanıklılık deneyi yapılabilmesi için Merck marka magnezyum sülfat heptahidrat ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) kullanılarak ağırlıkça %5'lik magnezyum sülfat çözeltisi hazırlanmıştır. Deneyde distile su kullanılmıştır.

Hazırlanan 10x10x10 cm beton numunelerinin magnezyum sülfat çözeltisine maruz bırakılması sonucu ağırlık kaybı, dayanım kaybı ve ultrases geçiş hızı testleri yapılmıştır. Numuneler hazırlanan magnezyum sülfat çözeltisinde 56 gün boyunca $25 \pm 5^\circ\text{C}$ ortam şartında çözelti kaplarında bekletilmiştir.



Şekil 3.14. 10x10x10 cm boyutlu numunelerin MgSO_4 çözeltisine direnç deneyi

3.2.2.3.(2). Betonda Sodyum Sülfat Çözeltisine Karşı Dayanıklılık Deneyi

Betonda sodyum sülfat çözeltisine karşı dayanıklılık deneyi yapılabilmesi için Merck marka anhidrus sodyum sülfat (Na_2SO_4) kullanılarak ağırlıkça %5'lik sodyum sülfat çözeltisi hazırlanmıştır. Deneyde distile su kullanılmıştır.

Hazırlanan 10x10x10 cm beton numunelerinin sodyum sülfat çözeltisine maruz bırakılması sonucu ağırlık kaybı, dayanım kaybı ve ultrases geçiş hızı testleri yapılmıştır. Numuneler hazırlanan sodyum sülfat çözeltisinde 56 gün boyunca 25+/-5°C ortam şartında çözelti kaplarında bekletilmiştir.

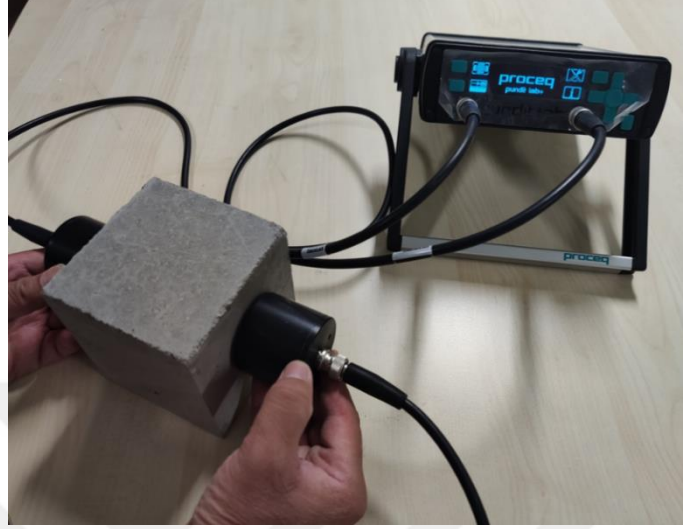


Şekil 3.15. 10x10x10 cm boyutlu numunelerin NaSO₄ çözeltisine direnç deneyi

3.2.2.3.(3). Numunelerin Ultrasonik Dalga Hızı Tayini

Sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltilerine maruz bırakılan R1, L2 ve L3 beton numuneleri, 0. Gün, 14. Gün, 28. Gün ve 56. günlerde çözelti kaplarından çıkarılmış ve 50°C etüv kullanılarak sabit kütleye gelene kadar kurutma işlemi yapılmıştır. Kurutma sonrası ağırlık kaybı ve ultrases geçiş hızı ölçümleri yapılmıştır.

Ultrases deneyinde, Proseq Pandit Lab++ ultrases geçiş hızı test cihazı ile 54 kHz transdüser kullanılmıştır. Ultrases geçiş hızı testi TS EN 12504-4 standardına göre yapılmıştır. Böylece çözeltilere maruz bırakılan ve bırakılmayan numunelerin karşılaştırması yapılmıştır.



Şekil 3.16. Ultrasonik Test Cihazı

3.2.2.3.(4). Betonda Klorür İyonlarının Geçişlerine Karşı Direnç Deneyi

R1, L2, L3 kodlu beton karışımlarının her biri için üçer adet 15/20 cm boyutlarında silindir numuneler hazırlanmış, bu numuneler 28 gün kür havuzunda bekletildikten sonra Türkiye Hazır Beton Birliği Ar-ge Laboratuvarında Deney ASTM C 1202-12 standardına göre klorür iyonlarının geçişine karşı direnç deneyine tabii tutulmuşlardır.



Şekil 3.17. Klorür İyonlarının Geçişlerine Karşı Direnç Deney Düzeneği

3.2.2.3.(5). Numunelerinin Basınç Altında Su İşleme Derinliği Deneyi

R1, L2, L3 kodlu beton karışımlarının her biri için üçer adet 15x15x15 cm boyutlarında küp numuneler hazırlanmış, bu numuneler 28 gün kür havuzunda bekletildikten sonra Türkiye Hazır Beton Birliği Ar-ge Laboratuvarında Deney TS EN 12390-8 standardına göre basınç altında su işleme derinliği deneyine tabii tutulmuşlardır.



Şekil 3.18. 15x15x15 cm Boyutlu Numunelerin Basınç Altında Su İşleme Derinliği Deneyi

3.2.2.4. Mikroyapı Deneyleri

Mekanik deney sonuçlarına göre en iyi dayanım performansları yakalanan SD7,5+UK10+GYFC10 (L2) ve SD7,5+UK15+GYFC15 (L3) içerikli beton numunelerinin ve %100 CEM I 42,5 R (R1=Referans) tipi çimento ile yapılan referans beton numunelerinin SEM-EDS-XRD mikroyapı analizleri yapılmıştır. Bu sayede ilgili beton numunelerinin 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360. günlerde iç yapıları

hakkında bilgi edinilmesi ve aynı zamanda mekanik (dayanım) ve durabilite (dayanıklılık) deney sonuçlarının mikroyapı analiz sonuçları ile ilişkilendirilebilmesi hedeflenmiştir.

3.2.2.4.(1). SEM (Taramalı Elektron Miroskopu) Analizi

Bu analiz Çukurova Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında yapılmıştır. Deneyde Quanta 650 Field Emission marka SEM cihazı kullanılmıştır. Taramalı Elektron Mikroskobu'nda (SEM) sıvı olmayan ve sıvı özellik taşımayan her türlü iletken olan ve olmayan numune incelenebilir. Her çeşit metaller, tekstiller, fiberler, plastikler polimerler, parçacıklar (kum, çakıl, sıvı ihtiva etmeyen biyolojik örnekler gibi) vs. incelenebilir. İletken olmayan numuneler çok ince (yaklaşık 2Å/saniye) iletken malzemeye kaplanarak incelenebilir hale getirilir.

SEM Analizi ile değerlendirilen numune bölgesi, Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) kullanılarak numune bölgesini oluşturan belirli unsurları belirlemek için de analiz edilebilir. EDS, numunenin kimyasal bileşimi hakkında veri sağlar ve SEM mikrograflarında gözlemlenen özellikler hakkında ek veriler sağlar. Bu kombine teknik, SEM-EDS veya SEM-EDX Analizi olarak adlandırılır. SEM-EDS Analizi, parçacık boyutlarını ve temel bileşimi belirlemek için harika bir yöntemdir. Aynı zamanda nano karakterizasyonu gerçekleştirmek için analitik bir tekniktir.

Bu çalışmada kullanılan R1, L2, L3 beton numune örneklerinin SEM analizlerini yapabilmek için günü gelen numunelerden 1-2 cm ebatlarında çok ince (3-5 mm) parçalar kullanılmıştır. Bu parçalar iletken olmadıkları için analiz sırasında görüntü etkilenmeyecek şekilde, üzerleri 45-60 saniye boyunca 1-2 nonometre kalınlığında altın ile kaplanmıştır. Daha sonra cihaz içerisindeki gözlere yerleştirilen numunenin farklı bölgelerinden farklı zoom seçenekleri ile SEM incelemeleri yapılmıştır.



Şekil 3.19. Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope) Deneyi İçin Numuneyi Altın Kaplama Cihazı



Şekil 3.20. Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope) Deney Cihazı

3.2.2.4.(2). XRD (X Işınları Kırınımı) Analizi

Bu analiz SEM analizi gibi Çukurova Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında yapılmıştır. Deneyde Panalytical marka XRD deney cihazı kullanılmıştır. X-Işını Kırınım ölçümü ile (XRD), her bir kristalin fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak, X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır. Her bir kristalin fazı için bu kırınım desenleri

bir nevi parmak izi gibi o kristali tanımlar. X-Işını Kırınım analiz yöntemi, analiz sırasında numuneyi tahrip etmez ve çok az miktardaki numunelerin dahi analizlerinin yapılmasını sağlar. X-Işını Kırınım cihazıyla kayaçların, kristal malzemelerin, ince filmlerin nitel ve nicel incelemeleri yapılabilir.

Bu çalışmada kullanılan R1, L2, L3 beton numune örneklerinin XRD analizlerini yapabilmek için günü gelen numunelerden çok ince parçalar kullanılmıştır. Bu parçalar basit manuel bir öğütücü ile toz haline getirildikten sonra numune tutucu cam levha üzerine yerleştirilerek XRD cihazındaki hazneye sabitlenmiştir. Her bir numune cihazda yaklaşık 30 dakika boyunca analiz edilmiş ve sonuçlar raporlanmıştır.



Şekil 3.21. XRD Deneyinde Kullanılan Manuel Öğütücü ve Numune Tutucu



Şekil 3.22. XRD (X-Işını Difraktometre) Deney Cihazı ve Numune Haznesi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1 Mekanik Deney Sonuçları

4.1.1 Basınç Dayanımları

Bu bölümde referans olarak CEM 1 42,5 R tipi çimento ile yapılan beton numunesine karşılık, CEM 1 42,5 R tipi çimento ile ek olarak farklı oranlarda ve farklı birleşimlerde olacak şekilde uçucu kül (UK), granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) ve silis dumanı (SD) ikame edilerek yapılan betonların basınç dayanımı sonuçları değerlendirilmektedir.

4.1.1.1. Farklı Oranlarda UK İçeren İkili Kombinasyon Betonların Basınç Dayanımlarının Birbirleri ve Referans Numune Dayanımı ile Kıyaslanması

UK ikamesi ile üretilen beton karışımlarının basınç dayanımları Çizelge 4.1.a'da, 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar Çizelge 4.1.b'de, 7-28 ve 28-360 günler arası dayanım gelişimleri Çizelge 4.1.c'de, UK ikameli numunelerin her bir kür süresinde R numunesine göre rölatif dayanımları Çizelge 4.1.d'de verilmektedir. Zaman ile dayanım değeri değişimi Şekil 4.1'de görülmektedir.

Beton numune alımından itibaren takip eden 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360. günlerdeki dayanımları değerlendirilmiştir.

Referans numune 1. günde 20,1 MPa dayanım değeri ile en düşük, 360. günde ise 62,9 MPa ile en yüksek dayanım değerine ulaşmıştır. Çizelge 4.1.a'da görüldüğü üzere UK ikamesi ile yapılan betonlarda en düşük dayanım değeri 0,55 MPa ile UK90 numunesinin 1. gününde, en yüksek dayanım değeri ise 74,1 MPa ile UK20 numunesinin 360. gününde elde edilmiştir.

1, 3, 7. günlerde UK miktarı arttıkça dayanım değerleri R numunesine göre ters orantılı olarak genellikle düşme eğilimindedir. Referans numune ile

kıyaslandığında, UK5 28. günde %1,11, UK10, UK20, UK30 numuneleri 90. günde sırasıyla %5,41, %9,57, %3,43 daha fazla dayanım sağlamıştır. UK ikameli numuneler referans numuneyi geçtikten sonra ikincil puzolanik reaksiyonlar sebebiyle referans numuneye göre dayanım değerleri giderek yükselmeye devam etmiştir. UK50, UK75 ve UK90 numunelerinin referans numuneye kıyasla tüm günlerde dayanım değerleri düşük kalsa bile özellikle UK50 numunesi 28, 90, 180, 360. günlerde sırasıyla 34,7, 47,85, 53,25 ve 60,1 MPa dayanım değerlerine ulaşmıştır. Bu değerlerin tamamı TBDY (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği) 2018'e göre yapısal elemanlarda kullanılabilecek minimum beton sınıflarına (C25/30) uygun değerlerdir. Devam eden puzolanik reaksiyonlara bağlı olarak UK50 numunesinin 360. gün sonrası ilerleyen yaşlarda referans numuneyi yakalayacağı düşünülebilir.

Çizelge 4.1.a. Çimento+UK ile Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları (MPa)

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	20,1	29,2	39,65	49,6	55,4	59,85	62,9
UK5	15,1	24,35	36,2	50,15	55,9	60,8	65,1
UK10	14,2	23,95	32,4	47,55	58,4	64,2	69,8
UK20	11,3	20,6	33,15	44,1	60,7	65,8	74,1
UK30	13,3	20,3	26,35	39,8	57,3	66,65	71,8
UK50	8,15	17,65	22,35	34,7	47,85	53,25	60,1
UK75	2,25	7,15	8,2	13,05	16,75	22,4	28,95
UK90	0,55	0,9	1,95	5,05	6,8	9,2	13,3

Çizelge 4.1.b'de 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar incelendiğinde; 100 kabul edilen 28 günlük R numunesine kıyasla, UK5 numunesi 28. günde %1, UK10, UK20, UK30 numuneleri 90. günde sırasıyla %18-%22-%16, UK50 numunesi 180. günde %7 oranında daha yüksek değere ulaşmışlardır. UK75 ve UK90 numuneleri ise hiçbir günde 28 günlük R numunesinin rölatif değerini yakalayamamışlardır.

Çizelge 4.1.b. 28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	41	59	80	100	112	121	127
UK5	30	49	73	101	113	123	131
UK10	29	48	65	96	118	129	141
UK20	23	42	67	89	122	133	149
UK30	27	41	53	80	116	134	145
UK50	16	36	45	70	96	107	121
UK75	5	14	17	26	34	45	58
UK90	1	2	4	10	14	19	27

Çizelge 4.1.c'ye göre 7-28 günler ve 28-360 günler arasındaki dayanım gelişimleri incelenecek olursa en düşük dayanım gelişimi 7-28 günler arasında %25,09, 28-360 günler arasında %26,81 ile R numunesinde görülmektedir. UK ikame oranı arttıkça dayanım gelişim değerleri R numunesine göre ters orantılı olarak genellikle artma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle UK75 ve UK90 numunelerinin dayanım gelişimleri 28-360 günler arasında sırasıyla %121,84 ve %163,37 ile en yüksek değerlere ulaşmışlardır. Bu durum yüksek oranda UK içeren bu karışımlarda oluşan yoğun ikincil reaksiyonlara bağlanabilir.

Çizelge 4.1.c. 7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri

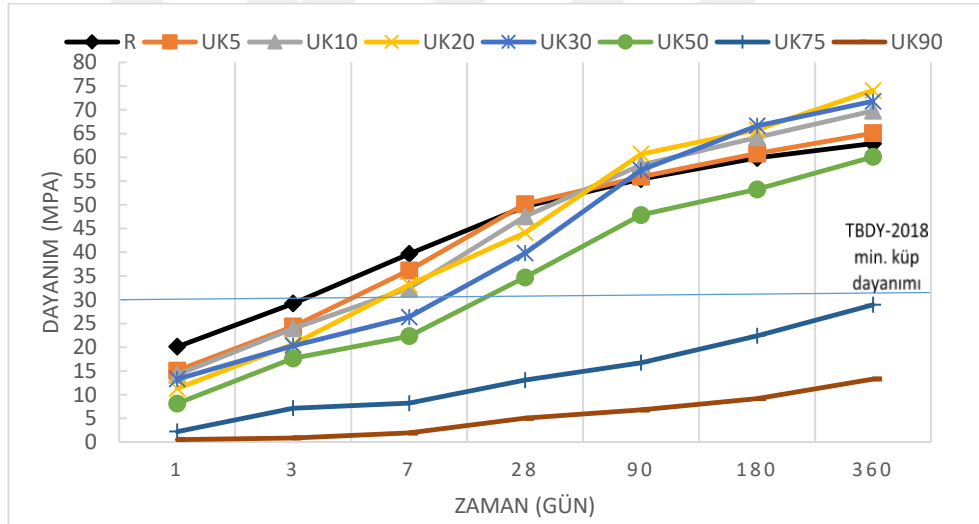
Numune	7- 28 Gün Arası	28-360 Gün Arası
R	%25,09	%26,81
UK5	%38,54	%29,81
UK10	%46,76	%46,79
UK20	%33,03	%68,03
UK30	%51,04	%80,40
UK50	%55,26	%73,20
UK75	%59,15	%121,84
UK90	%158,97	%163,37

Çizelge 4.1.d'de tüm kür sürelerindeki R numunelerine göre rölatif dayanımlar kıyaslandığında, UK5 numunesi 28. günde %1,11, UK10 numunesi 90. günde %5,42, UK20 numunesi 90. günde %9,57, UK30 numunesi 90. günde %3,43 daha fazla dayanım kazanarak referans numuneyi geçmişlerdir. Tüm kür süreleri

içerisinde R numunesine göre maksimum rölatif dayanım artışı %17,81 ile UK20 numunesinin 360. gününde gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.1.d. UK İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Dayanımları

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	100	100	100	100	100	100	100
UK5	75,12	83,39	91,30	101,11	100,90	101,59	103,50
UK10	70,65	82,02	81,72	95,87	105,42	107,27	110,97
UK20	56,22	70,55	83,61	88,91	109,57	109,94	117,81
UK30	66,17	69,52	66,46	80,24	103,43	111,36	114,15
UK50	40,55	60,45	56,37	69,96	86,37	88,97	95,55
UK75	11,19	24,49	20,68	26,31	30,23	37,43	46,03
UK90	2,74	3,08	4,92	10,18	12,27	15,37	21,14



Şekil 4.1. Çimento+Uçucu Kül ile Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları/Zaman Grafiği

UK erken yaşlarda dayanım kaybına sebep olsa da ilerleyen yaşlarda referans betondan daha yüksek dayanımlar vermektedir. Bu çalışmada kullanılan UK, SiO₂ içeriği %60 dolaylarında olduğu için erken dayanımlarının referans numuneyle kıyasla beklenenden yüksek olduğunu görülmektedir. Özellikle 28. günden sonraki dayanım sonuçlarına bakıldığında %30 lara kadar ikame edilen UK

mineral katkısının dayanıma pozitif yönde etkisi olduğu gözlemlenmektedir. Erken yaşlardaki dayanım kaybı, puzolanik reaksiyonların ikincil reaksiyonlar olmasından ve C-S-H üretiminin daha uzun zaman gerektirmesinden kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi, puzolanik reaksiyonlar için önce portland çimentosu hidratasyonundan kalsiyum hidroksit üretilmesi gerekmekte, ardından puzolanlar C-S-H üretimine geçebilmektedir. Bu sebeple, 28. günden sonra puzolanik reaksiyonlar sonucu üretilen C-S-H, referans betonuna göre dayanım artışı sağlamıştır. Buna ilaveten, kullanılan UK, çimentoya göre ince taneli olduğu için, portland çimentosunun hidratasyon ürünleri, puzolanlar ile reaksiyona girerek portland çimentosunun hidratasyon hızını arttırıp dayanıma katkıda bulundukları söyleyenebilir. Puzolan miktarı arttıkça özellikle 90. günden sonra puzolanik etkinin artışından bahsedilebilir (Isaia vd. 2003). Ayrıca, ince taneler boşlukları fiziksel olarak da doldurarak (filler etkisi) hem dayanıma hem de geçirimsizliğe ve dayanıklılığa katkıda bulunabilmektedirler (Isaia vd. 2003). Bu çalışmada da 28. günde UK5, UK10, 90. günde UK20, UK30 betonları dayanım olarak referans betonu yakalamışlardır.

4.1.1.2. Farklı Oranlarda GYFC İçeren İkili Kombinasyon Betonların Basınç Dayanımlarının Birbirleri ve Referans Numune Dayanımı ile Kıyaslanması

GYFC ikamesi ile üretilen beton karışımlarının basınç dayanımları Çizelge 4.2.a'da, 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar Çizelge 4.2.b'de, 7-28 ve 28-360 günler arası dayanım gelişimleri ise Çizelge 4.2.c'de GYFC ikameli numunelerin her bir kür süresinde R numunesine göre rölatif dayanımları Çizelge 4.2.d'de verilmektedir. Zaman ile dayanım değeri değişimi Şekil 4.2'de görülmektedir.

Beton numunelerin alımından itibaren takip eden 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360. günlerdeki dayanımları değerlendirilmiştir.

Referans numune 1. günde 20,1 MPa dayanım değeri ile en düşük, 360. günde ise 62,9 MPa ile en yüksek dayanım değerine ulaşmıştır. Çizelge 4.2.a'da görüldüğü üzere GYFC ikamesi ile yapılan betonlarda en düşük dayanım değeri 1,10 MPa ile GYFC90 numunesinin 1. gününde, en yüksek dayanım değeri ise 75,40 MPa ile GYFC20 numunesinin 360. gününde elde edilmiştir.

1,3,7. günlerde GYFC miktarı arttıkça dayanım değerleri R numunesine göre ters orantılı olarak genellikle düşme eğilimindedir. Referans numuneye kıyasla, GYFC20 28. günde %0,40, GYFC5, GYFC30 90. günde sırasıyla %0,43, %2,35, GYFC10 180. günde %4,26 daha fazla dayanım göstermişlerdir. GYFC ikameli numuneler referans numuneyi geçtikten sonra ikincil puzolanik reaksiyonlar sebebiyle referans numuneye göre dayanım değerleri giderek yükselmeye devam etmiştir. GYFC50, GYFC75 ve GYFC90 referans numuneye kıyasla tüm günlerde mukavemet değerleri düşük kalsa bile özellikle GYFC50 numunesi 28, 90, 180, 360. günlerde sırasıyla 25,06, 40,20, 48,65 ve 57,45 MPa dayanım değerlerine ulaşmıştır. Bu değerlerden 90. gün ve sonrası TBDY (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği) 2018'e göre yapısal elemanlarda kullanılabilecek minimum beton sınıflarına (C25/30) uygun değerlerdir. Devam eden puzolanik reaksiyonlara bağlı olarak GYFC50 numunesinin 360. gün sonrası ilerleyen yaşlarda referans numuneyi yakalayacağı düşünülebilir.

Çizelge 4.2.a. Çimento+GYFC ile Yapılan Betonların Basınç Dayanımları (MPa)

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	20,1	29,2	39,65	49,6	55,4	59,85	62,9
GYFC5	13,35	27,8	36	48,45	55,64	59,1	63,7
GYFC10	11,45	21,05	33,05	46,01	54,8	62,4	68,7
GYFC20	8,75	18,75	32,75	49,8	59,1	66,3	75,4
GYFC30	7,35	15,95	27,35	44,05	56,7	64,6	72,15
GYFC50	3,45	8,85	17,55	25,06	40,2	48,65	57,45
GYFC75	2,1	4,15	10,05	18,65	29,75	37,8	47,25
GYFC90	1,1	3,6	10,15	16,15	20,25	23,4	26,95

Çizelge 4.2.b'ye göre 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar incelendiğinde; 100 kabul edilen 28 günlük R numunesine kıyasla, GFYC20 numunesi 28. günde %0,4, GFYC5, GFYC10, GFYC30 numuneleri 90. günde sırasıyla %12-%10-%14, GFYC50 numunesi 360. günde %16 oranında daha yüksek değere ulaşmışlardır. GFYC75 ve GFYC90 numuneleri ise hiçbir günde 28 günlük R numunesinin rölatif değerini yakalayamamışlardır.

Çizelge 4.2.b. 28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	41	59	80	100	112	121	127
GYFC5	27	56	73	98	112	119	128
GYFC10	23	42	67	93	110	126	139
GYFC20	18	38	66	100	119	134	152
GYFC30	15	32	55	89	114	130	145
GYFC50	7	18	35	51	81	98	116
GYFC75	4	8	20	38	60	76	95
GYFC90	2	7	20	33	41	47	54

Çizelge 4.2.c'ye göre 7-28 günler ve 28-360 günler arasındaki dayanım gelişimleri incelenecek olursa en düşük dayanım gelişimi 7-28 günler arasında %25,09 ve 28-360 günler arasında %26,81 ile R numunesinde görülmektedir. R numunesi saf CEM 1 42,5 R tipi çimento ile üretildiği için dayanım gelişimi reaksiyonlarının önemli kısmını ilk günlerde tamamladığı görülmektedir. GYFC ikame oranı arttıkça dayanım gelişim değerleri R numunesine göre ters orantılı olarak genellikle artma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle GYFC50 ve GYFC75 numunelerinin dayanım gelişimleri 28-360 günler arasında sırasıyla %129,25 ve %153,35 ile en yüksek değerlere ulaşmışlardır. Bu durum yüksek oranda GYFC içeren bu karışımlarda oluşan yoğun ikincil reaksiyonlara bağlanabilir.

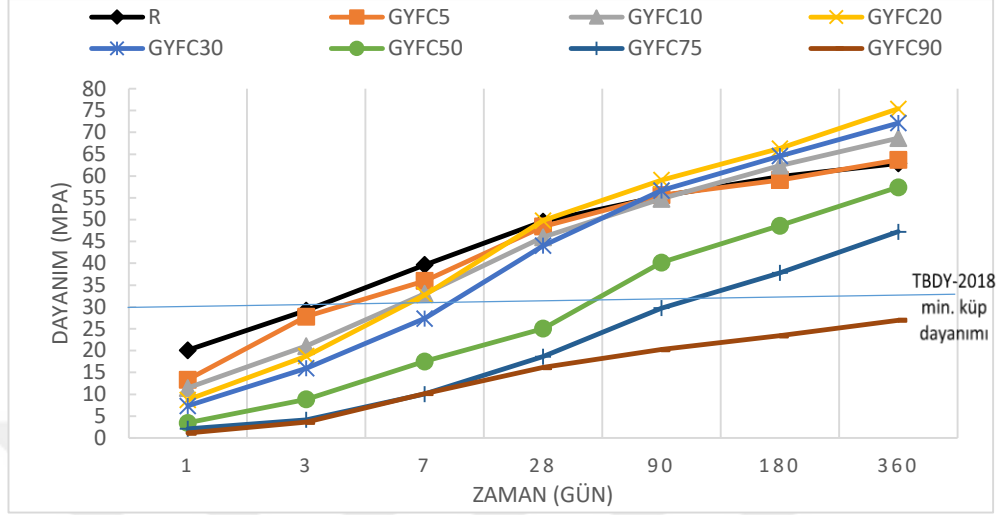
Çizelge 4.2.c. 7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri

Numune	7- 28 Gün Arası	28- 360 Gün Arası
R	%25,09	%26,81
GYFC5	%34,58	%31,48
GYFC10	%39,21	%49,32
GYFC20	%52,06	%51,41
GYFC30	%61,06	%63,79
GYFC50	%42,79	%129,25
GYFC75	%85,57	%153,35
GYFC90	%59,11	%66,87

Çizelge 4.2.d' de tüm kür sürelerindeki R numunelerine göre rölatif dayanımlar kıyaslandığında, GYFC5 numunesi 90. günde %0,43, GYFC10 numunesi 180. günde %4,26, GYFC20 numunesi 28. günde %0,40, GYFC30 numunesi 90. günde %2,35 daha fazla dayanım kazanarak referans numuneyi geçmişlerdir. Tüm kür süreleri içerisinde R numunesine göre maksimum rölatif dayanım artışı %19,87 ile GYFC20 numunesinin 360. gününde gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.2.d. GYFC İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Dayanımları

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	100	100	100	100	100	100	100
GYFC5	66,42	95,21	90,79	97,68	100,43	98,75	101,27
GYFC10	56,97	72,09	83,35	92,76	98,92	104,26	109,22
GYFC20	43,53	64,21	82,60	100,40	106,68	110,78	119,87
GYFC30	36,57	54,62	68,98	88,81	102,35	107,94	114,71
GYFC50	17,16	30,31	44,26	50,52	72,56	81,29	91,34
GYFC75	10,45	14,21	25,35	37,60	53,70	63,16	75,12
GYFC90	5,47	12,33	25,60	32,56	36,55	39,10	42,85



Şekil 4.2. Çimento+GYFC ile Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları/Zaman Grafiği

GYFC mineral katkısı dayanıma uzun vadede katkıda bulunabilen bir mineral katkıdır. Pozolanik reaksiyonlar, ikincil reaksiyonlar olduğu için erken dayanımı düşürebilir. Ancak ikincil pozolanik reaksiyonlar (hidratasyon neticesinde oluşan CaOH_2 istenmeyen ürününün mineral katkılardan gelen silis mineralleri ile tepkime vermesi) sonucu üretilen ekstra CSH (kalsiyum-silika-hidrat) jelleri ileriki yaşlarda, referans beton numunesine göre daha iyi dayanım verebilmektedirler. Burada 90. günden sonraki dönemde özellikle GYFC10, GYFC20, GYFC30 betonlarının ikincil hidratasyon reaksiyonları sayesinde kontrol numunesine göre çok daha iyi dayanım sonuçlarına ulaştıkları gözlemlenmiştir. Ayrıca, daha önce UK için belirtildiği gibi, portland çimentosuna göre daha ince olan GYFC taneleri, portland çimentosunun hidratasyonunu iyileştirerek ve filler etkisi sağlayarak da dayanıma katkıda bulunmaktadır.

4.1.1.3. Farklı Oranlarda SD İçeren İkili Kombinasyon Betonların Basınç Dayanımlarının Birbirleri ve Referans Numune Dayanımı ile Kıyaslanması

SD ikamesi ile üretilen beton karışımlarının basınç dayanımları Çizelge 4.3.a'da, 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar Çizelge 4.3.b'de, 7-28 ve 28-360 günler arası dayanım gelişimleri ise Çizelge 4.3.c'de SD ikameli numunelerin her bir kür süresinde R numunesine göre rölatif dayanımları Çizelge 4.3.d'de verilmektedir. Zaman ile dayanım değeri değişimi Şekil 4.3'te görülmektedir.

Beton numune alımından itibaren takip eden 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360. günlerdeki dayanımları değerlendirilmiştir.

Referans numune 1. günde 20,1 MPa dayanım değeri ile en düşük, 360. günde ise 62,9 MPa ile en yüksek dayanım değerine ulaşmıştır. Çizelge 4.3.a'da görüldüğü üzere SD ikamesi ile yapılan betonlarda en düşük dayanım değeri 11,20 MPa ile SD20 numunesinin 1. gününde, en yüksek dayanım değeri ise 74,20 MPa ile SD7,5 numunesinin 360. gününde elde edilmiştir.

Referans numuneye kıyasla bakıldığında, SD2,5 7. günde %3,28, SD5 ve SD7,5 28. günde sırasıyla %4,64, %0,50 daha fazla dayanıma ulaşmışlardır. SD ikameli numuneler referans numuneyi geçtikten sonra ikincil puzolanik reaksiyonlar sebebiyle referans numuneye göre dayanım değerleri giderek yükselmeye devam etmiştir. SD10, SD15 ve SD20 referans numuneye kıyasla tüm günlerde mukavemet değerleri düşük kalsa bile özellikle 90. günden itibaren ulaştıkları basınç dayanım değerleri TBDY (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği) 2018'e göre yapısal elemanlarda kullanılabilecek minimum beton sınıflarına (C25/30) uygun değerlerdir. Devam eden puzolanik reaksiyonlara bağlı olarak SD10 ve SD15 numunelerinin 360. gün sonrası ilerleyen yaşlarda referans numuneyi yakalayacağı düşünülebilir.

Çizelge 4.3.a. Çimento+Silis Dumanı ile Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları (MPa)

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	20,1	29,2	39,65	49,6	55,4	59,85	62,9
SD2,5	17,8	29,4	40,95	50,8	54,15	59,4	63,9
SD5	17,6	28,9	38,9	51,9	56,4	64,3	70,8
SD7,5	18,1	28,1	39,35	49,85	55,55	66,55	74,2
SD10	17,4	27,65	33,05	40,1	44,25	50,75	58,6
SD15	14,7	23,15	26,5	30,3	33,7	45,6	56,85
SD20	11,2	22,35	25,3	30,5	32,9	41,4	52,15

Çizelge 4.3.b'ye göre 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar incelendiğinde; 100 kabul edilen 28 günlük R numunesine kıyasla, SD2,5, SD5, SD7,5 numunesi 28. günde sırasıyla %2, %5, %1, SD10 numunesi 180. günde %2, SD15, SD20 numuneleri 360. günde sırasıyla %15, %5 oranında daha yüksek değere ulaşmışlardır.

Çizelge 4.3.b. 28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	41	59	80	100	112	121	127
SD2,5	36	59	83	102	109	120	129
SD5	35	58	78	105	114	130	143
SD7,5	36	57	79	101	112	134	150
SD10	35	56	67	81	89	102	118
SD15	30	47	53	61	68	92	115
SD20	23	45	51	61	66	83	105

Çizelge 4.3.c'ye göre 7-28 günler ve 28-360 günler arasındaki dayanım gelişimleri incelenecek olursa en düşük dayanım gelişimi 7-28 günler arasında %24,05 ve 28-360 günler arasında %25,79 ile SD2,5 numunesinde görülmektedir. SD ikame oranı arttıkça özellikle 28-360 günler arasındaki dayanım gelişim değerleri R numunesine göre ters orantılı olarak genellikle artma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle SD15 ve SD20 numunelerinin dayanım gelişimleri 28-360 günler arasında sırasıyla %87,62 ve %70,98 ile en yüksek değerlere

ulaşmışlardır. Bu durum yüksek oranda SD içeren bu karışımlarda oluşan yoğun ikincil reaksiyonlara bağlanabilir.

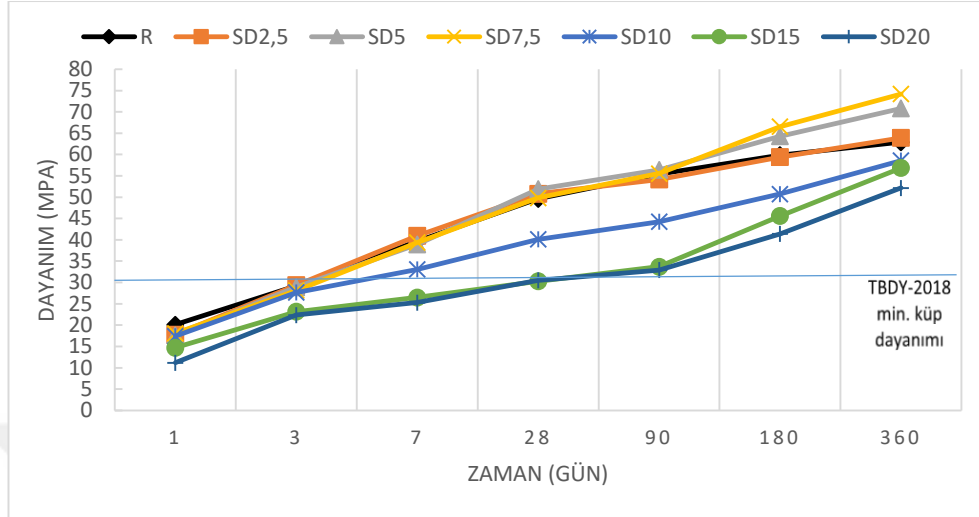
Çizelge 4.3.c. 7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri

Numune	7- 28 Gün Arası	28- 360 Gün Arası
R	%25,09	%26,81
SD2,5	%24,05	%25,79
SD5	%33,42	%36,42
SD7,5	%26,68	%48,85
SD10	%21,33	%46,13
SD15	%14,34	%87,62
SD20	%20,55	%70,98

Çizelge 4.3.d'de tüm kür sürelerindeki R numunelerine göre rölatif dayanımlar kıyaslandığında, SD2,5 numunesi 3. günde %0,68, SD5 numunesi 28. günde %4,64, SD7,5 numunesi 28. günde %0,50 daha fazla dayanım kazanarak referans numuneyi geçmişlerdir. Tüm kür süreleri içerisinde R numunesine göre maksimum rölatif dayanım artışı %17,97 ile SD7,5 numunesinin 360. gününde gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.3.d. SD İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Dayanımları

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	100	100	100	100	100	100	100
SD2,5	88,56	100,68	103,28	102,42	97,74	99,25	101,59
SD5	87,56	98,97	98,11	104,64	101,81	107,44	112,56
SD7,5	90,05	96,23	99,24	100,50	100,27	111,19	117,97
SD10	86,57	94,69	83,35	80,85	79,87	84,80	93,16
SD15	73,13	79,28	66,83	61,09	60,83	76,19	90,38
SD20	55,72	76,54	63,81	61,49	59,39	69,17	82,91



Şekil 4.3. Çimento+Silis Dumanı ile Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları/Zaman Grafiği

SD ince taneli ve yüksek SiO_2 içeriğine sahip olduğu için pozolanik reaksiyonlara daha erken başlayabilen bir mineral katkıdır. Bu sayede erken dayanıma daha çok katkıda bulunabilir. Zaten Çizelge 4.3.a' da daha 3. günde SD2,5 SD5-SD7,5 betonlarının referans numuneyi dayanım olarak yakaladığı görülmektedir. Ayrıca, SD tanelerinin çok ince olması, hem agrega-hamur arayüzeyindeki boşlukları hem de hamur içindeki boşlukları fiziksel olarak da daha iyi doldurabilmesi sayesinde dayanımı artırması da beklenen bir durumdur (ACI Komite 234 Raporu, 1995).

Benzer şekilde, SD'nın ince taneleri, agrega-hamur arayüzeyindeki portlandit ile pozolanik reaksiyonlar gerçekleştirerek, ara yüzeydeki bağı kuvvetlendirip dayanıma önemli katkıda bulunabilir (Shannag, 2000). Bilindiği gibi, betondaki en zayıf bölge agrega-hamur arayüzeyi olduğu için, buranın güçlendirilmesi dayanım için son derece önemlidir.

4.1.1.4. %5 SD ile Farklı Oranlarda GYFC İçeren Üçlü Kombinasyon Betonların Basınç Dayanımlarının, Birbirlerine Göre, Sadece %5 SD İçeren Numuneye ve Referans Numuneye Göre Kıyaslanması

SD+GYFC ikamesi ile üretilen beton karışımlarının basınç dayanımları Çizelge 4.4.a'da, 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar Çizelge 4.4.b'de, 7-28 ve 28-360 günler arası dayanım gelişimleri ise Çizelge 4.4.c'de SD5 ve farklı oranlarda GYFC ikameli numunelerin her bir kür süresinde R numunesine göre rölatif dayanımları Çizelge 4.4.d'de verilmektedir. Zaman ile dayanım değeri değişimi Şekil 4.4'te görülmektedir.

Beton numune alımından itibaren takip eden 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360. günlerdeki dayanımları değerlendirilmiştir.

Referans numune 1. günde 20,1 MPa dayanım değeri ile en düşük, 360. günde ise 62,9 MPa ile en yüksek dayanım değerine ulaşmıştır. Çizelge 4.4.a'da görüldüğü üzere SD+GYFC ikamesi ile yapılan betonlarda en düşük dayanım değeri 8,85 MPa ile SD5+GYFC30 numunesinin 1. gününde, en yüksek dayanım değeri ise 73,45 MPa ile SD5+GYFC20 numunesinin 360. gününde elde edilmiştir.

1,3,7. günlerde SD5+%10-20-30 oranlarında GYFC miktarı toplamı arttıkça dayanım değerleri R numunesine göre ters orantılı olarak genellikle düşme eğilimindedir. Referans numuneye kıyasla bakıldığında, SD5+GYFC10, SD5+GYFC20, SD5+GYFC30 90. günde sırasıyla %6,41, %1,81, %0,63 daha fazla dayanıma ulaşmış ve referans numuneyi geçmişleridir. SD5+%10-20-30 ikameli numuneler referans numuneyi geçtikten sonra ikincil puzolanik reaksiyonlar sebebiyle referans numuneye göre dayanım değerleri giderek yükselmeye devam etmiştir.

Çizelge 4.4.a. Çimento+GYFC ile Yapılan Betonların Basınç Dayanımları (MPa)

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	20,1	29,2	39,65	49,6	55,4	59,85	62,9
SD5	17,6	28,9	38,9	51,9	56,4	64,3	70,8
SD5+GYFC30	12,05	25,1	36,05	47,8	58,95	63,85	71,2
SD5+GYFC30	9,9	23,75	31,9	48,85	56,4	64,2	73,45
SD5+GYFC30	8,85	20,3	30,08	46,65	55,75	62,1	66,3

Çizelge 4.4.b'ye göre 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar incelendiğinde; 100 kabul edilen 28 günlük R numunesine kıyasla, SD5+GFYC10, SD5+GFYC20, SD5+GFYC30 numunesi 90. Günde sırasıyla %19, %14, %12, oranında daha yüksek değerlere ulaşmışlardır.

Çizelge 4.4.b. 28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	41	59	80	100	112	121	127
SD5	35	58	78	105	114	130	143
SD %5+GYFC %10	24	51	73	96	119	129	144
SD %5+GYFC %20	20	48	64	98	114	129	148
SD %5+GYFC %30	18	41	61	94	112	125	134

Çizelge 4.4.c'ye göre 7-28 günler ve 28-360 günler arasındaki dayanım gelişimleri incelenecek olursa en düşük dayanım gelişimi 7-28 günler arasında %25,09 ve 28-360 günler arasında %26,81 ile R numunesinde görülmektedir. SD5+GYFC ikame oranı arttıkça dayanım gelişim değerleri R numunesine göre ters orantılı olarak genellikle artma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle SD5+ GYFC20 numunesinin dayanım gelişimleri 7-28 günler arasında %53,13, 28-360 günler arasında %50,36 ile en yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu durum SD5+GYFC20 karışımının uygun bir reçete olabileceğini göstermektedir.

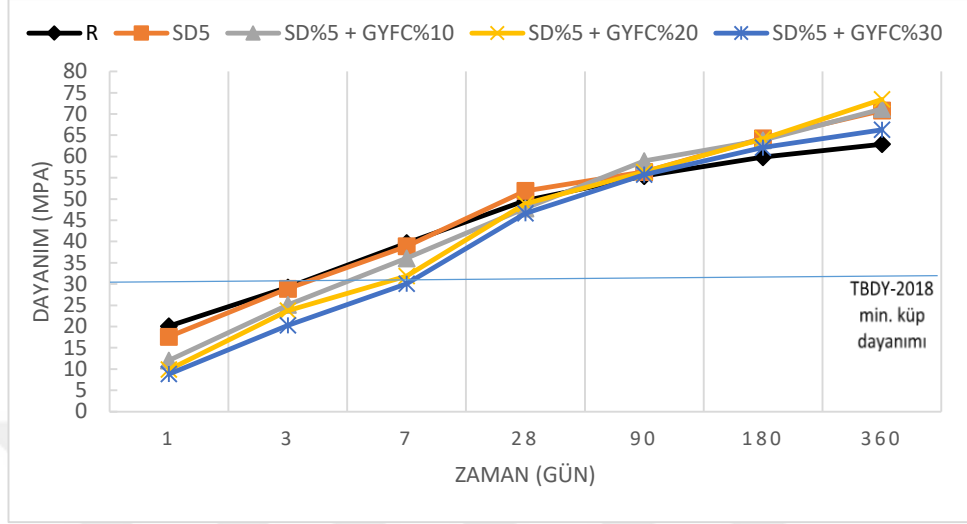
Çizelge 4.4.c. 7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri

Numune	7- 28 Gün Arası	28- 360 Gün Arası
R	%25,09	%26,81
SD5	%33,42	%36,42
SD5+GYFC10	%32,59	%48,95
SD5+GYFC20	%53,13	%50,36
SD5+GYFC30	%55,09	%42,12

Çizelge 4.4.d’de tüm kür sürelerindeki R numunelerine göre rölatif dayanımlar kıyaslandığında, SD5+GYFC10 numunesi 90. günde %6,41, SD5+GYFC20 numunesi 90. günde %1,81, SD5+GYFC30 numunesi 90. günde %0,63 daha fazla dayanım kazanarak referans numuneyi geçmişlerdir. Tüm kür süreleri içerisinde R numunesine göre maksimum rölatif dayanım artışı %16,77 ile SD5+GYFC20 numunesinin 360. gününde gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.4.d. SD5+GYFC İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Dayanımları

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	100	100	100	100	100	100	100
SD5	87,56	98,97	98,11	104,64	101,81	107,44	112,56
SD5+GYFC10	59,95	85,96	90,92	96,37	106,41	106,68	113,20
SD5+GYFC20	49,25	81,34	80,45	98,49	101,81	107,27	116,77
SD5+GYFC30	44,03	69,52	75,86	94,05	100,63	103,76	105,41



Şekil 4.4. Çimento+SD+GYFC ile Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları/Zaman Grafiği

%5 SD ile farklı oranlarda GYFC kullanıldığında erken dayanımlar hem referans betonuna hem de sadece %5 SD kullanılan betona göre düşük kalmış, 28. ve 90. günlerde yakın değerlere ulaşmış, özellikle 90. günden itibaren tüm Çimento+SD+GYFC kombinasyon betonları hem referans betonuna hem de sadece %5 SD kullanılan betona göre yüksek dayanım değerlerine ulaşmışlardır. Bu durum çok ince taneli SD erken dayanımı artırırken, SD ve GYFC sayesinde ikincil reaksiyonlar daha fazla gerçekleşerek dayanım gelişimlerinin artması olarak açıklanabilir. Özellikle ilerleyen yaşlarda, SD ve GYFC katkılarının dayanım gelişimi olarak pozitif bir etki oluşturduğu söylenebilir. Bu durumun mekanik özellikler üzerindeki faydasına dair bulgular, Jianyong ve Pei (1997) tarafından yapılan çalışmayı da teyit etmektedir.

4.1.1.5. %5 SD ile Farklı Oranlarda UK İçeren Üçlü Kombinasyon Betonların Basınç Dayanımlarının Birbirlerine Göre, Sadece %5 SD İçeren Numune ve Referans Numuneye Göre Kıyaslanması

SD+UK ikamesi ile üretilen beton karışımlarının basınç dayanımları Çizelge 4.5.a'da, 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar Çizelge 4.5.b'de, 7-28 ve 28-360 günler arası dayanım gelişimleri ise Çizelge 4.5.c'de SD5 ve farklı oranlarda UK ikameli numunelerin her bir kür süresine göre rölatif dayanımları Çizelge 4.5.d'de verilmektedir. Zaman ile dayanım değeri değişimi Şekil 4.5'te görülmektedir.

Numune alımından itibaren takip eden 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360. günlerdeki dayanımları değerlendirilmiştir.

Referans numune 1. günde 20,1 MPa dayanım değeri ile en düşük, 360. günde ise 62,9 MPa ile en yüksek dayanım değerine ulaşmıştır. Çizelge 4.5.a'da görüldüğü üzere SD+UK ikamesi ile yapılan betonlarda en düşük dayanım değeri 5,4 MPa ile SD5+UK30 numunesinin 1. gününde, en yüksek dayanım değeri ise 68,2 MPa ile SD5+UK20 numunesinin 360. gününde elde edilmiştir.

1,3,7,28. günlerde SD nin sabit olup UK miktarı arttıkça dayanım değerleri R numunesine göre ters orantılı olarak genellikle düşme eğilimindedir. Referans numuneye kıyasla, SD5+UK10 90. günde %1,26, SD5+UK20 180. günde %1,75, SD5+UK30 360. günde %1,91 daha fazla dayanıma ulaşarak referans numuneyi geçmişlerdir.

Çizelge 4.5.a. Çimento+SD+UK ile Yapılan Betonların Basınç Dayanımları (MPa)

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	20,1	29,2	39,65	49,6	55,4	59,85	62,9
SD5	17,6	28,9	38,9	51,9	56,4	64,3	70,8
SD5+UK10	12,1	23,95	35,4	47,5	56,1	61,3	67,5
SD5+UK20	9,1	19,55	33,4	45,2	53,25	60,9	68,2
SD5+UK30	5,4	17,2	28,15	43,4	52,5	58,7	64,1

Çizelge 4.5.b'ye göre 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar incelendiğinde; 100 kabul edilen 28 günlük R numunesine kıyasla, SD5+UK10, SD5+UK20, SD5+UK30 numuneleri 90. günde sırasıyla %13, %7, %6, oranında daha yüksek değere ulaşmışlardır.

Çizelge 4.5.b. 28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	41	59	80	100	112	121	127
SD5	35	58	78	105	114	130	143
SD5+UK10	24	48	71	96	113	124	136
SD5+UK20	18	39	67	91	107	123	138
SD5+UK30	11	35	57	88	106	118	129

Çizelge 4.5.c'ye göre 7-28 günler ve 28-360 günler arasındaki dayanım gelişimleri incelenecek olursa en düşük dayanım gelişimi 7-28 günler arasında %25,09 ve 28-360 günler arasında %26,81 ile R numunesinde görülmektedir. SD5 sabit olup UK ikame oranı arttıkça dayanım gelişim değerleri R numunesine göre ters orantılı olarak genellikle artma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Bu açıklama için SD5+UK30 hariç tutulabilir. Çünkü daha önce de açıklandığı üzere SD5+UK20 beton numunesinin diğer karışımlara göre daha iyi mekanik özellikler gösterdiği gözlemlenmiştir. Özellikle SD5+UK20 ve SD5+UK30 numunelerinin dayanım gelişimleri 28-360 günler arasında sırasıyla %50,88 ve %47,40 ile en yüksek değerlere ulaşmışlardır. Bu durum yüksek oranda SD5+UK içeren bu karışımlarda oluşan yoğun ikincil reaksiyonlara bağlanabilir. Bu karışımların 360.

gün sonrasında R numunesi ile olan dayanım farklarını daha fazla artıracığı söylenebilir.

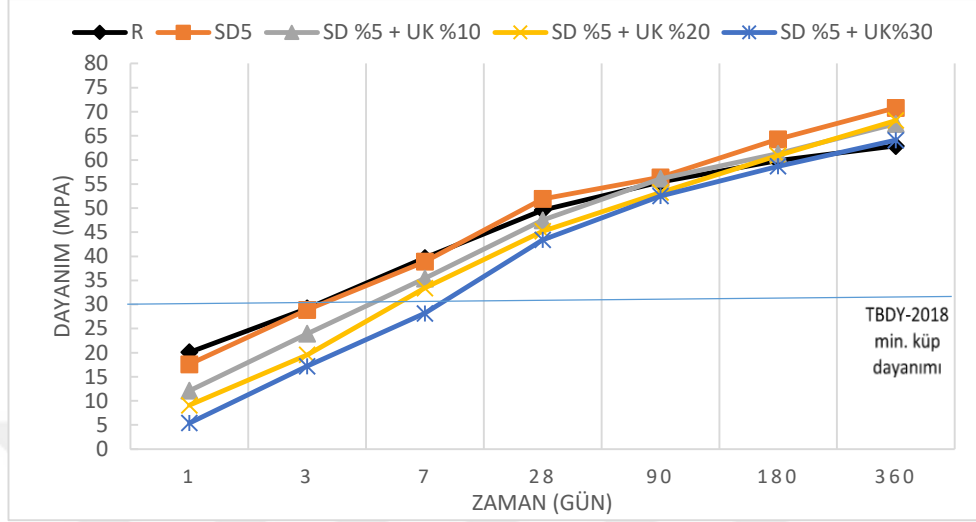
Çizelge 4.5.c. 7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri

Numune	7- 28 Gün Arası	28- 360 Gün Arası
R	%25,09	%26,81
SD5	%33,42	%36,42
SD5+UK10	%34,18	%42,11
SD5+UK20	%35,33	%50,88
SD5+UK30	%54,17	%47,70

Çizelge 4.5.d'de tüm kür sürelerindeki R numunelerine göre rölatif dayanımlar kıyaslandığında, SD5+UK10 numunesi 90. günde %1,26, SD5+UK20 numunesi 180. günde %1,75, SD5+UK30 numunesi 360. günde %1,91 daha fazla dayanım kazanarak referans numuneyi geçmişlerdir. Tüm kür süreleri içerisinde R numunesine göre maksimum rölatif dayanım artışı %8,43 ile SD5+UK20 numunesinin 360. gününde gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.5.d. SD5+UK İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Dayanımları

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	100	100	100	100	100	100	100
SD5	87,56	98,97	98,11	104,64	101,81	107,44	112,56
SD5+UK10	60,20	82,02	89,28	95,77	101,26	102,42	107,31
SD5+UK20	45,27	66,95	84,24	91,13	96,12	101,75	108,43
SD5+UK30	26,87	58,90	71,00	87,50	94,77	98,08	101,91



Şekil 4.5. Çimento+SD+UK ile Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları/Zaman Grafiği

Sadece %5 SD özellikle erken yaşlarda kontrol betonuna yakın sonuçlar verirken, ilerleyen yaşlarda çok daha yüksek dayanımlara ulaşmıştır. UK ise erken yaşlarda sadece SD ye göre dayanım kaybına sebep olabilir. Ancak, UK ilerleyen yaşlarda kontrol betonundan daha yüksek dayanımlar verebilir. Dolayısı ile, SD ve UK uygun oranlarda beraber kullanıldığında, özellikle nihai dayanımlarda, kontrol betonundan daha yüksek, sadece % 5 SD içeren betona ise çok yakın değerler ile daha ekonomik ve çevreci bir reçete elde edilebilir.

4.1.1.6. %7,5 SD ile Farklı Oranlarda GYFC İçeren Üçlü Kombinasyon Betonların Basınç Dayanımlarının Birbirlerine Göre, Sadece %7,5 SD İçeren Numune ve Referans Numuneye Göre Kıyaslanması

SD+GYFC ikamesi ile üretilen beton karışımlarının basınç dayanımları Çizelge 4.6.a'da, 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar Çizelge 4.6.b'de, 7-28 ve 28-360 günler arası dayanım gelişimleri ise Çizelge 4.6.c'de, SD7,5 ve farklı oranlarda GYFC ikameli numunelerin her bir kür süresinde R

numunesine göre rölatif dayanımları Çizelge 4.6.d'de verilmektedir. Zaman ile dayanım değeri değişimi Şekil 4.6'da görülmektedir.

Numune alımından itibaren takip eden 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360 günlerdeki dayanımları değerlendirilmiştir.

Referans numune 1. günde 20,1 MPa dayanım değeri ile en düşük, 360. günde ise 62,9 MPa ile en yüksek dayanım değerine ulaşmıştır. Çizelge 4.6.a'da görüldüğü üzere SD 7,5+GYFC ikamesi ile yapılan betonlarda en düşük dayanım değeri 9,2 MPa ile SD7,5+GYFC30 numunesinin 1. gününde, en yüksek dayanım değeri ise 79,25 MPa ile SD7,5+GYFC20 numunesinin 360. gününde elde edilmiştir.

Referans numuneye kıyasla, SD7,5+GYFC10 28. günde %1,01, SD7,5+GYFC20 ve SD7,5+GYFC30 90. günde sırasıyla %5,02 ve %1,53 daha fazla dayanım ile referans numuneyi geçmişleridir. SD7,5+GYFC ikameli numuneler referans numuneyi geçtikten sonra ikincil puzolanik reaksiyonlar sebebiyle referans numuneye göre dayanım değerleri giderek yükselmeye devam etmiştir.

Çizelge 4.6.a. Çimento+SD+YFC ile Yapılan Betonların Basınç Dayanımları (MPa)

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	20,1	29,2	39,65	49,6	55,4	59,85	62,9
SD7,5	18,1	28,1	39,35	49,85	55,55	66,55	74,2
SD7,5+GYFC10	11,09	26,95	36,4	50,1	60,59	68,25	76,11
SD7,5+GYFC20	12,25	27,15	33	49,2	58,18	69,27	79,25
SD7,5+GYFC30	9,2	24,25	31,45	48,9	56,25	65,76	70,21

Çizelge 4.6.b'ye göre 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar incelendiğinde; 100 kabul edilen 28 günlük R numunesine kıyasla, SD7,5+GFYC10 numunesi 28. Günde %1, SD7,5+GFYC20, SD7,5+GFYC30 numunesi 90. günde sırasıyla %17-%13 oranında daha yüksek değere ulaşmışlardır.

Çizelge 4.6.b. 28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	41	59	80	100	112	121	127
SD7,5	36	57	79	101	112	134	150
SD7,5+GYFC10	22	54	73	101	122	138	153
SD7,5+GYFC20	25	55	67	99	117	140	160
SD7,5+GYFC30	19	49	63	99	113	133	142

Çizelge 4.6.c'ye göre 7-28 günler ve 28-360 günler arasındaki dayanım gelişimleri incelenecek olursa en düşük dayanım gelişimi 7-28 günler arasında %25,09 ve 28-360 günler arasında %26,81 ile R numunesinde görülmektedir. SD7,5 sabit olup GYFC ikame oranı arttıkça dayanım gelişim değerleri R numunesine göre ters orantılı olarak genellikle artma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Fakat SD7,5+GYFC30 numunesinin 28-360 günler arasındaki dayanım gelişimi SD7,5+GYFC20 numunesine göre %43,58 ile daha düşük değer verdiği gözlemlenmiştir. Özellikle SD7,5+GYFC10 ve SD7,5+GYFC20 numunelerinin dayanım gelişimleri 28-360 günler arasında sırasıyla %51,92 ve %61,08 ile en yüksek değerlere ulaşmışlardır. Bu durumdan dolayı SD7,5+GYFC10 ve SD7,5+GYFC20 numunelerinin dayanımları 360. gün sonrasında R numunesi ile farkını daha fazla açacağı söylenebilir.

Çizelge 4.6.c. 7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri

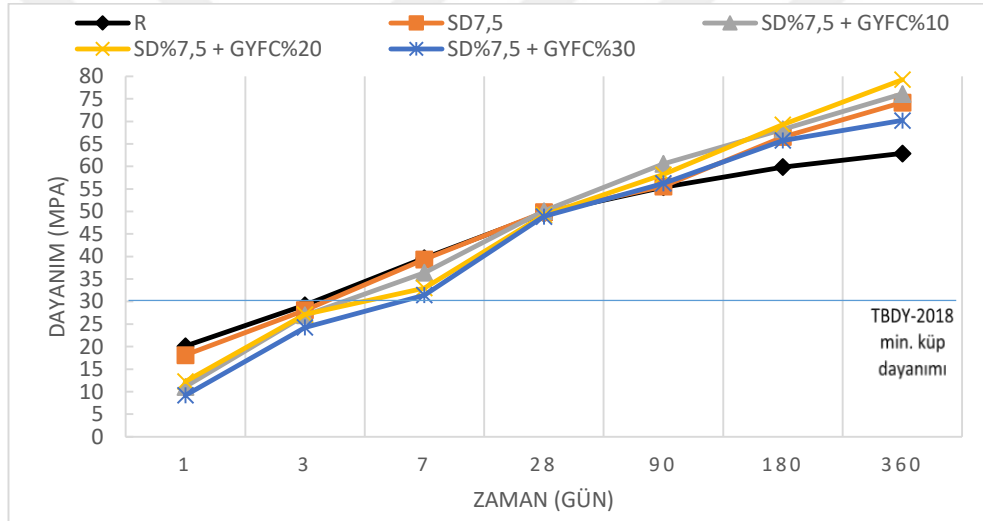
Numune	7- 28 Gün Arası	28- 360 Gün Arası
R	%25,09	%26,81
SD7,5	%26,68	%48,85
SD7,5+GYFC10	%37,64	%51,92
SD7,5+GYFC20	%49,09	%61,08
SD7,5+GYFC30	%55,48	%43,58

Çizelge 4.6.d'de tüm kür sürelerindeki R numunelerine göre rölatif dayanımlar kıyaslandığında, SD7,5+GYFC10 numunesi 28. günde %1,01, SD7,5+GYFC20 numunesi 90. günde %5,02, SD7,5+GYFC30 numunesi 90. günde %1,53 daha fazla dayanım kazanarak referans numuneyi geçmişlerdir. Tüm kür süreleri

içerisinde R numunesine göre maksimum rölatif dayanım artışı %25,99 ile SD7,5+GYFC20 numunesinin 360. gününde gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.6.d. SD7,5+GYFC İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Dayanımları

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	100	100	100	100	100	100	100
SD7,5	90,05	96,23	99,24	100,50	100,27	111,19	117,97
SD7,5+GYFC10	55,17	92,29	91,80	101,01	109,37	114,04	121,00
SD7,5+GYFC20	60,95	92,98	83,23	99,19	105,02	115,74	125,99
SD7,5+GYFC30	45,77	83,05	79,32	98,59	101,53	109,87	111,62



Şekil 4.6. Çimento+SD+GYFC ile Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları/Zaman Grafiği

%7,5 SD ile farklı oranlarda GYFC kullanıldığında erken dayanımlar hem referans betonuna hem de sadece %7,5 SD kullanılan betona göre düşük değerler olsa da özellikle 28. günden itibaren tüm Çimento+SD+GYFC kombinasyon betonları hem referans betonuna hem de sadece %7,5 SD kullanılan betona göre yüksek dayanım değerlerine ulaşmışlardır. Bu durum, %7,5 oranındaki ince taneli SD erken dayanımı artırırken, SD ve GYFC sayesinde ikincil reaksiyonlar daha fazla gerçekleşerek dayanım gelişimlerinin artması olarak açıklanabilir.

Benzer şekilde Erdem, Kırca yaptıkları çalışmada yüksek dayanımlı betonlarda ikili ve üçlü betonların dayanımını araştırmışlar, özellikle silis dumanı ve çimentonun uygun oranlarda karıştırılmasının yanında uygun oranda yüksek fırın cürufu ikamesi ile sadece çimento ile üretilen betona göre daha yüksek dayanımlara ulaşmışlardır (Erdem ve Kırca, 2008).

4.1.1.7. %7,5 SD ile Farklı Oranlarda UK İçeren Üçlü Kombinasyon Betonların Basınç Dayanımlarının Birbirlerine Göre, Sadece %7,5 SD İçeren Numune ve Referans Numuneye Göre Kıyaslanması

SD+UK ikamesi ile üretilen beton karışımlarının basınç dayanımları Çizelge 4.7.a'da, 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar Çizelge 4.7.b'de, 7-28 ve 28-360 günler arası dayanım gelişimleri ise Çizelge 4.7.c'de, SD7,5 ve UK ikameli numunelerin her bir kür süresinde R numunesine göre rölatif dayanımları Çizelge 4.7.d'de verilmektedir. Zaman ile dayanım değeri değişimi Şekil 4.7'de görülmektedir.

Beton numune alımından itibaren takip eden 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360. günlerdeki dayanımları değerlendirilmiştir.

Referans numune 1. günde 20,1 MPa dayanım değeri ile en düşük, 360. günde ise 62,9 MPa ile en yüksek dayanım değerine ulaşmıştır. Çizelge 4.7.a'da görüldüğü üzere SD7,5+UK ikamesi ile yapılan betonlarda en düşük dayanım değeri 6,75 MPa ile SD7,5+UK30 numunesinin 1. gününde, en yüksek dayanım değeri ise 72,22 MPa ile SD7,5+UK20 numunesinin 360. gününde elde edilmiştir.

1,3,7. günlerde SD miktarı sabit UK miktarı arttıkça dayanım değerleri R numunesine göre ters orantılı olarak genellikle düşme eğilimindedir. Referans numuneye göre kıyaslandığında, SD7,5+UK10 28. günde %0,40, SD7,5+UK20 90. günde %1,17, SD7,5+UK30 180. günde %3,86 daha fazla dayanıma ulaşarak referans numuneyi geçmişleridir. SD7,5+UK ikameli numuneler referans

numuneyi geçtikten sonra ikincil puzolanik reaksiyonlar sebebiyle referans numuneye göre dayanım değerleri giderek yükselmeye devam etmiştir.

Çizelge 4.7.a. Çimento+SD+UK ile Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları (MPa)

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	20,1	29,2	39,65	49,6	55,4	59,85	62,9
SD7,5	18,1	28,1	39,35	49,85	55,55	66,55	74,2
SD7,5+UK10	13,95	24,12	35,7	49,8	57,75	64,91	71,48
SD7,5+UK20	9,25	21,2	33,65	48,12	56,05	64,49	72,22
SD7,5+UK30	6,75	16,95	29,85	46,85	53,8	62,16	66,88

Çizelge 4.7.b'ye göre 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar incelendiğinde; 100 kabul edilen 28 günlük R numunesine kıyasla, SD7,5+UK10 numunesi 28. günde %0,4, SD7,5+UK20, SD7,5+UK30 numunesi 90. Günde sırasıyla %13-%8 oranında daha yüksek değere ulaşmışlardır.

Çizelge 4.7.b. 28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	41	59	80	100	112	121	127
SD7,5	36	57	79	101	112	134	150
SD7,5+UK10	28	49	72	100	116	131	144
SD7,5+UK20	19	43	68	97	113	130	146
SD7,5+UK30	14	34	60	94	108	125	135

Çizelge 4.7.c'ye göre 7-28 günler ve 28-360 günler arasındaki dayanım gelişimleri incelenecek olursa en düşük dayanım gelişimi 7-28 günler arasında %25,09 ve 28-360 günler arasında %26,81 ile R numunesinde görülmektedir. SD7,5 sabit kalmak kaydı ile UK ikame oranı arttıkça dayanım gelişim değerleri R numunesine göre ters orantılı olarak genellikle artma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Fakat SD7,5+UK30 numunesinin 28-360 günler arasındaki dayanım gelişimi (%42,75) SD7,5+UK20 numunesine göre daha düşük değer (%50,08) verdiği gözlemlenmiştir.

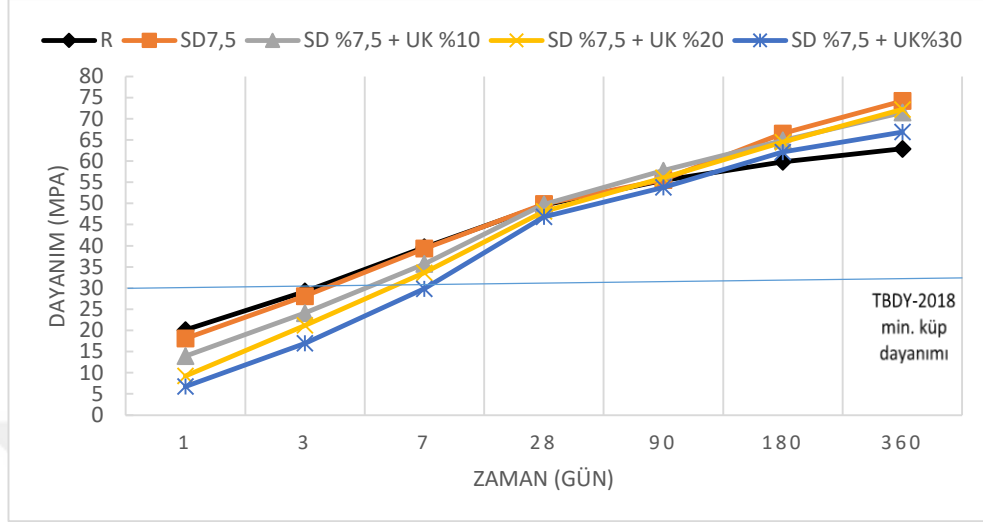
Çizelge 4.7.c. 7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri

Numune	7 - 28 Gün Arası	28 - 360 Gün Arası
R	%25,09	%26,81
SD7,5	%26,68	%48,85
SD7,5+UK10	%39,50	%43,53
SD7,5+UK20	%43,00	%50,08
SD7,5+UK30	%56,95	%42,75

Çizelge 4.7.d'de tüm kür sürelerindeki R numunelerine göre rölatif dayanımlar kıyaslandığında, SD7,5+ UK10 numunesi 28. günde %0,40, SD7,5+ UK20 numunesi 90. günde %1,17, SD7,5+UK30 numunesi 180. günde %3,86 daha fazla dayanım kazanarak referans numuneyi geçmişlerdir. Tüm kür süreleri içerisinde R numunesine göre maksimum rölatif dayanım artışı %14,82 ile SD7,5+ UK20 numunesinin 360. gününde gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.7.d. SD7,5+ UK İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Dayanımları

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	100	100	100	100	100	100	100
SD7,5	90,05	96,23	99,24	100,50	100,27	111,19	117,97
SD7,5+UK10	69,40	82,60	90,04	100,40	104,24	108,45	113,64
SD7,5+UK20	46,02	72,60	84,87	97,02	101,17	107,75	114,82
SD7,5+UK30	33,58	58,05	75,28	94,46	97,11	103,86	106,33



Şekil 4.7. Çimento+SD+UK ile Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları/Zaman Grafiği

Sadece %7,5 SD ile üretilen beton özellikle erken yaşlarda referans betonuna yakın sonuçlar verirken, SD ve UK uygun oranlarda beraber kullanıldığında, 180. günden itibaren referans betonu dayanım olarak geçmiş, sadece %7,5 SD ile üretilen beton ile kıyaslandığında ise daha ekonomik bir reçete ile çok yakın dayanım değerlerine ulaşmıştır.

Betonda portland çimentosuna ilaveten, SD ve UK'nin de beraber kullanıldığı üçlü sistemlerin basınç dayanımı üzerindeki olumlu etkileri, Khatri vd. (1995), Mehta ve Gjorv (1982), Özyıldırım ve Halstead (1994), Erdem ve Kırca (2008) tarafından da kaydedilmiştir.

4.1.1.8. %5 SD ile Farklı Oranlarda UK ve GYFC İçeren Dörtlü Kombinasyon Betonların Basınç Dayanımlarının Birbirlerine Göre, Sadece %5 SD İçeren Numune ve Referans Numuneye Göre Kıyaslanması

SD+UK+GYFC ikamesi ile üretilen beton karışımlarının basınç dayanımları Çizelge 4.8.a'da, 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar Çizelge 4.8.b'de, 7-28 ve 28-360 günler arası dayanım gelişimleri ise Çizelge

4.8.c’de, SD5 ve farklı oranlarda UK ve GYFC ikameli numunelerin her bir kür süresinde R numunesine göre rölatif dayanımları Çizelge 4.8.d’de verilmektedir. Zaman ile dayanım değeri değişimi Şekil 4.8’de görülmektedir.

Beton numune alımından itibaren takip eden 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360. günlerdeki dayanımları değerlendirilmiştir.

Referans numune 1. günde 20,1 MPa dayanım değeri ile en düşük, 360. günde ise 62,9 MPa ile en yüksek dayanım değerine ulaşmıştır. Çizelge 4.8.a’da görüldüğü üzere SD5+UK+GYFC ikamesi ile yapılan betonlarda en düşük dayanım değeri 2,16 MPa ile SD5+UK35+GYFC35 numunesinin 1. gününde, en yüksek dayanım değeri ise 74,53 MPa ile SD5+UK15+GYFC15 numunesinin 360. gününde elde edilmiştir.

1,3. günlerde SD5 sabit miktarda olup, UK ve GYFC miktarları arttıkça dayanım değerleri R numunesine göre ters orantılı olarak genellikle düşme eğilimindedir. Referans numuneye kıyasla, SD5+UK5+GYFC5, SD5+UK10+GYFC10 28. günde sırasıyla %4,54, %0,60, SD5+UK15+GYFC15 90. günde %9,66 daha fazla dayanım ile referans numuneyi geçmişleridir. SD5+UK25+GYFC25 ve SD5+UK35+GYFC35 R numunesine kıyasla tüm günlerde mukavemet değerleri düşük kalsa bile özellikle SD5+UK25+GYFC25 numunesi 28-90-180-360. günlerde sırasıyla 31,05, 45,25, 51,20 ve 59,05 MPa dayanım değerlerine ulaşmıştır. Bu değerler TBDY (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği) 2018’e göre yapısal elemanlarda kullanılabilecek C25/30 beton sınıfına uygun değerlerdir. Devam eden puzolanik reaksiyonlara bağlı olarak SD5+UK25+GYFC25 numunesinin 360. gün sonrası ilerleyen yaşlarda referans numuneyi yakalayacağı düşünülebilir.

Çizelge 4.8.a. SD+UK+GYFC ile Yapılan Betonların Basınç Dayanımları (MPa)

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	20,1	29,2	39,65	49,6	55,4	59,85	62,9
SD5	17,6	28,9	38,9	51,9	56,4	64,3	70,8
SD5+UK 5+GYFC 5	13,78	22,70	33,35	51,85	58,95	66,35	71,05
SD5+UK10+GYFC10	10,50	21,26	34,04	49,90	62,40	67,35	73,68
SD5+UK15+GYFC15	8,90	20,45	29,91	46,55	60,75	66,90	74,53
SD5+UK25+GYFC25	5,01	14,32	21,05	31,05	45,25	51,20	59,05
SD5+UK35+GYFC35	2,16	5,62	9,07	15,75	23,15	29,95	37,90

Çizelge 4.8.b'ye göre 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar incelendiğinde; 100 kabul edilen 28 günlük R numunesine kıyasla, SD5+UK5+GFYC5, SD5+UK10+GFYC10 numuneleri 28. günde sırasıyla %5-%0,6, S5+UK15+GFYC15 numunesi 90. günde %22, SD5+UK25+GFYC25 numunesi 180. günde %3 oranında daha yüksek değere ulaşmışlardır. SD5+UK35+GFYC35 numunesi ise hiçbir günde 28 günlük R numunesinin rölatif değerini yakalayamamıştır.

Çizelge 4.8.b. 28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	41	59	80	100	112	121	127
SD5	35	58	78	105	114	130	143
SD5+UK 5+GYFC 5	28	46	67	105	119	134	143
SD5+UK10+GYFC10	21	43	69	101	126	136	149
SD5+UK15+GYFC15	18	41	60	94	122	135	150
SD5+UK25+GYFC25	10	29	42	63	91	103	119
SD5+UK35+GYFC35	4	11	18	32	47	60	76

Çizelge 4.8.c'ye göre 7-28 günler ve 28-360 günler arasındaki dayanım gelişimleri incelenecek olursa en düşük dayanım gelişimi 7-28 günler arasında %25,09 ve 28-360 günler arasında %26,81 ile R numunesinde görülmektedir. SD5 sabit olup, UK ve GYFC ikame oranı arttıkça 28-360. günler arasındaki dayanım gelişim değerleri R numunesine göre ters orantılı olarak genellikle artma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle SD5+UK25+GYFC25 ve SD5+UK35+GYFC35 numunelerinin dayanım gelişimleri 28-360 günler arasında sırasıyla %90,18 ve

%140,63 ile en yüksek değerlere ulaşmışlardır. Bu durum yüksek oranda UK ve GYFC içeren bu karışımlarda oluşan yoğun ikincil reaksiyonlara bağlanabilir.

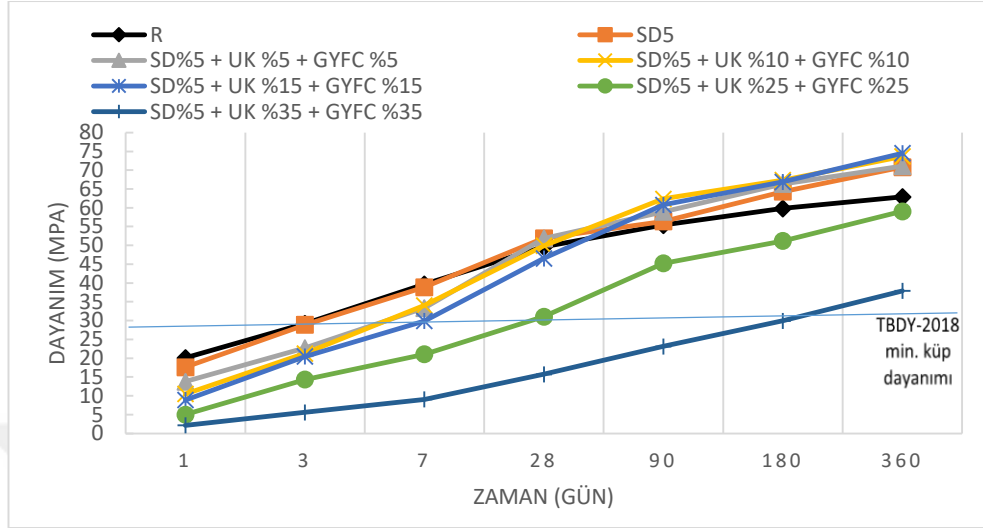
Çizelge 4.8.c. 7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri

Numune	7- 28 Gün Arası	28- 360 Gün Arası
R	%25,09	%26,81
SD5	%33,42	%36,42
SD5+UK 5+GYFC 5	%55,47	%37,03
SD5+UK10+GYFC10	%46,59	%47,66
SD5+UK15+GYFC15	%55,63	%60,11
SD5+UK25+GYFC25	%47,51	%90,18
SD5+UK35+GYFC35	%73,65	%140,63

Çizelge 4.8.d'de tüm kür sürelerindeki R numunelerine göre rölatif dayanımlar kıyaslandığında, SD5+UK5+GYFC5 numunesi 28. günde %4,54, SD5+UK10+GYFC10 numunesi 28. günde %0,60, SD5+UK15+GYFC15 numunesi 90. günde %9,66 daha fazla dayanım kazanarak referans numuneyi geçmişlerdir. Tüm kür süreleri içerisinde R numunesine göre maksimum rölatif dayanım artışı %18,49 ile SD5+UK15+GYFC15 numunesinin 360. gününde gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.8.d. SD5+UK+GYFC İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Dayanımları

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	100	100	100	100	100	100	100
SD5	87,56	98,97	98,11	104,64	101,81	107,44	112,56
SD5+UK 5+GYFC 5	68,56	77,74	84,11	104,54	106,41	110,86	112,96
SD5+UK10+GYFC10	52,24	72,81	85,85	100,60	112,64	112,53	117,14
SD5+UK15+GYFC15	44,28	70,03	75,44	93,85	109,66	111,78	118,49
SD5+UK25+GYFC25	24,93	49,04	53,09	62,60	81,68	85,55	93,88
SD5+UK35+GYFC35	10,75	19,25	22,88	31,75	41,79	50,04	60,25



Şekil 4.8. Çimento+SD+UK+GYFC ile Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları/Zaman Grafiği

Silis dumanı mineral katkısı yüksek puzolanik aktivitesi ve inceliği sayesinde tek başına ikame edildiğinde referans beton dayanımlarını 7. gün gibi erken yaşlarda yakalayabilmektedir. UK ve GYFC mineral katkıları beraber ikame edilerek Çimento+SD+UK+GYFC kombinasyonu oluşturulduğunda puzolanik aktivitesi SD ye göre daha düşük mineral katkıları olan UK ve GYFC mineral katkılarından dolayı erken yaş dayanımları hem referans hem de sadece % 5 SD ile ikame edilmiş betonlara göre düşük olsa da ikincil reaksiyonlar (hidratasyon neticesinde oluşan CaOH_2 istenmeyen ürününün mineral katkılardan gelen silis mineralleri ile tepkime vermesi sonucu oluşan reaksiyon) neticesinde oluşan ekstra C-S-H jelleri ile betonun iç yapısı güçlenmiş ve uzun dönemde yüksek dayanım gelişimi ile hem referans hem de sadece % 5 SD ile ikame edilmiş betonlara göre daha yüksek dayanımlara ulaşmışlardır. Bu reçeteler aynı zamanda daha ekonomik ve atık olan mineral katkıların kullanılmasından dolayı daha çevre dostu reçeteler olarak gözlemlenmiştir. Burada %5 sabit SD yanında farklı oranlarda UK (ince tanecikli olması ile ikincil reaksiyonlara destek verebilecek bir mineral katkı) ve GYFC (içerdiği CaO sayesinde erken dayanıma katkıda bulunabilecek bir mineral

katkı) kullanılarak dayanım ve dayanıklılık (dayanıklılık konusu tezin 4.2 ve 4.3 bölümlerinde detaylı olarak incelenmiştir) yanında ekonomik ve çevreci bir reçete oluşturmak hedeflenmiştir.

4.1.1.9. %7,5 SD ile Farklı Oranlarda UK ve GYFC İçeren Dörtlü Kombinasyon Betonların Basınç Dayanımlarının Birbirlerine Göre, Sadece %7,5 SD İçeren Numune ve Referans Numuneye Göre Kıyaslanması

SD+UK+GYFC ikamesi ile üretilen beton karışımlarının basınç dayanımları Çizelge 4.9.a'da, 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar Çizelge 4.9.b'de, 7-28 ve 28-360 günler arası dayanım gelişimleri ise Çizelge 4.9.c'de, SD7,5 ve farklı oranlarda UK ile GYFC ikameli numunelerin her bir kür süresinde R numunesine göre rölatif dayanımları Çizelge 4.9.d'de verilmektedir. Zaman ile dayanım değeri değişimi Şekil 4.9'da görülmektedir.

Beton numune alımından itibaren takip eden 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360. günlerdeki dayanımları değerlendirilmiştir.

Referans numune 1. günde 20,1 MPa dayanım değeri ile en düşük, 360. günde ise 62,9 MPa ile en yüksek dayanım değerine ulaşmıştır. Çizelge 4.9.a'da görüldüğü üzere SD7,5+UK+GYFC ikamesi ile yapılan betonlarda en düşük dayanım değeri 2,21 MPa ile SD7,5+UK35+GYFC35 numunesinin 1. gününde, en yüksek dayanım değeri ise 77,14 MPa ile SD7,5+UK10+GYFC10 numunesinin 360. gününde elde edilmiştir.

1 ve 3. günlerde SD7,5 sabit miktarda olup, UK ve GYFC miktarları arttıkça dayanım değerleri R numunesine göre ters orantılı olarak düşme eğilimindedir. Referans numuneye kıyasla, SD7,5+UK10+GYFC10 28. günde %2,82, SD7,5+UK5+GYFC5, SD7,5+UK15+GYFC15 90. günde sırasıyla %12,18- %12,98, SD7,5+ UK25+ GYFC25 360. günde %1,34 daha fazla dayanım ile referans numuneyi geçmiştir. SD7,5+UK35+GYFC35 numunesinin dayanım değerleri R numunesine kıyasla tüm günlerde düşük kalmıştır.

Çizelge 4.9.a. Çimento+SD+UK+GYFC ile Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları (MPa)

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	20,1	29,2	39,65	49,6	55,4	59,85	62,9
SD7,5	18,1	28,1	39,35	49,85	55,55	66,55	74,2
SD7,5+UK5+GYFC5	12,4	23,7	32,19	48,4	62,15	67,4	73,95
SD7,5+UK10+GYFC10	9,66	19,98	33,02	51,00	63,51	69,57	77,14
SD7,5+UK15+GYFC15	8,37	18,81	29,31	47,95	62,59	66,26	75,42
SD7,5+UK25+GYFC25	3,75	16,2	23,89	30,93	46,36	55,85	63,74
SD7,5+UK35+GYFC35	2,21	4,79	8,98	18,40	21,28	32,70	39,04

Çizelge 4.9.b'ye göre 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar incelendiğinde; 100 kabul edilen 28 günlük R numunesine kıyasla, SD7,5+UK10+GYFC10 numunesi 28. günde %2, SD7,5+UK5+GYFC5, SD7,5+UK15+GYFC15 numuneleri 90. Günde sırasıyla %25-%26, SD7,5+UK25+GYFC25 numunesi 180. günde %13 oranında daha yüksek değere ulaşmışlardır. SD7,5+UK35+GYFC35 numunesi ise hiçbir günde 28 günlük R numunesinin rölatif değerini yakalayamamıştır.

Çizelge 4.9.b. 28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar

	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	41	59	80	100	112	121	127
SD7,5	36	57	79	101	112	134	150
SD7,5+UK5+GYFC5	25	48	65	98	125	136	149
SD7,5+UK10+GYFC10	19	40	67	103	128	140	156
SD7,5+UK15+GYFC15	17	38	59	97	126	134	152
SD7,5+UK25+GYFC25	8	33	48	62	93	113	129
SD7,5+UK35+GYFC35	4	10	18	37	43	66	79

Çizelge 4.9.c'ye göre 7-28 günler ve 28-360 günler arasındaki dayanım gelişimleri incelenecek olursa en düşük dayanım gelişimi 7-28. günler arasında %25,09 ve 28-360. günler arasında %26,81 ile R numunesinde görülmektedir. Özellikle SD7,5+UK25+GYFC25 ve SD7,5+UK35+GYFC35 numunelerinin dayanım gelişimleri 28-360 günler arasında sırasıyla %106,08 ve %112,17 ile en

yüksek değerlere ulaşmışlardır. Bu durum yüksek oranda UK ve GYFC içeren bu karışımlarda oluşan yoğun ikincil reaksiyonlara bağlanabilir.

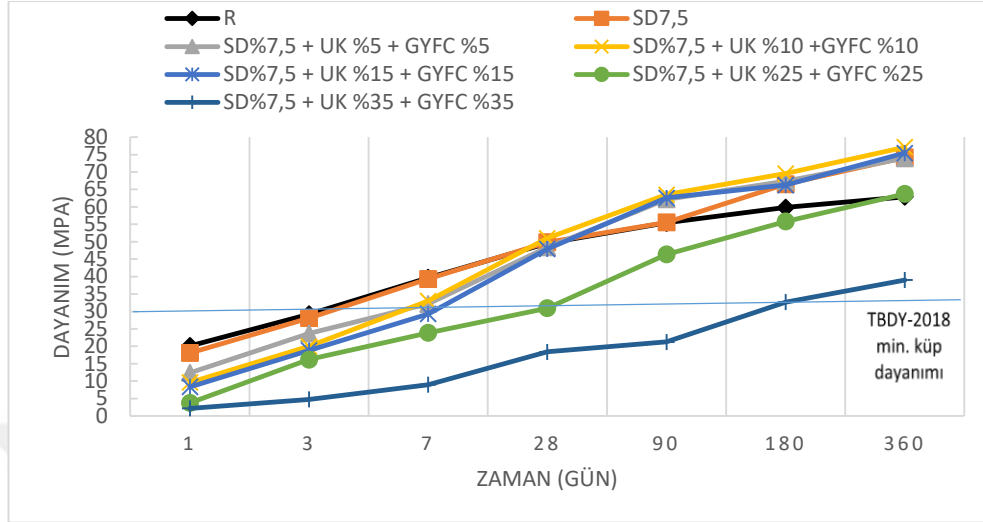
Çizelge 4.9.c. 7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri

Numune	7- 28 Gün Arası	28- 360 Gün Arası
R	%25,09	%26,81
SD7,5	%26,68	%48,85
SD7,5+UK5+GYFC5	%50,36	%52,79
SD7,5+UK10+GYFC10	%54,45	%51,25
SD7,5+UK15+GYFC15	%63,60	%57,29
SD7,5+UK25+GYFC25	%29,47	%106,08
SD7,5+UK35+GYFC35	%104,90	%112,17

Çizelge 4.9.d'de tüm kür sürelerindeki R numunelerine göre rölatif dayanımlar kıyaslandığında, SD7,5+UK5+GYFC5 numunesi 90. günde %12,81, SD7,5+UK10+GYFC10 numunesi 28. günde %2,82, SD7,5+UK15+GYFC15 numunesi 90. günde %12,98, SD7,5+UK25+GYFC25 numunesi 360. günde %1,34 daha fazla dayanım kazanarak referans numuneyi geçmişlerdir. Tüm kür süreleri içerisinde R numunesine göre maksimum rölatif dayanım artışı %22,64 ile SD7,5+UK10+GYFC10 numunesinin 360. gününde gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.9.d. SD7,5+UK+GYFC İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Dayanımları

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	100	100	100	100	100	100	100
SD7,5	90,05	96,23	99,24	100,50	100,27	111,19	117,97
SD7,5+UK5+GYFC5	61,69	81,16	81,19	97,58	112,18	112,61	117,57
SD7,5+UK10+GYFC10	48,06	68,42	83,28	102,82	114,64	116,24	122,64
SD7,5+UK15+GYFC15	41,64	64,42	73,92	96,67	112,98	110,71	119,90
SD7,5+UK25+GYFC25	18,66	55,48	60,25	62,36	83,68	93,32	101,34
SD7,5+UK35+GYFC35	11,00	16,40	22,65	37,10	38,41	54,64	62,07



Şekil 4.9. Çimento+SD+UK+GYFC İle Yapılan Betonlara Ait Basınç Dayanımları/Zaman Grafiği

Bölüm 4.1.1.8'deki tüm yorumlar bu bölüm için de geçerli olup %7,5 sabit SD ile oluşturulan beton numunelerinin özellikle 90. günden itibaren tüm dayanım değerleri %5 sabit SD ile oluşturulan beton numunelerinin dayanım değerlerinden daha yüksek çıkmıştır. Aynı oranlarda ikame edilen UK ve GYFC yanında %7,5 oranında ikame edilen SD, %5 oranında ikame edilen SD na göre daha iyi dayanım sonuçlarına ulaşmıştır.

4.1.2 Eğilme Dayanımları

Bu bölümde referans olarak CEM 1 42,5 R tipi çimento ile yapılan beton numunesine karşılık, CEM 1 42,5 R çimento ile ikame olarak farklı oranlarda ve farklı birleşimlerde olacak şekilde uçucu kül (UK), granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) ve silis dumanı (SD) kombinasyonları ile üretilen betonların eğilme dayanımı sonuçları değerlendirilmektedir.

Burada yapılan tüm değerlendirmeler sadece rasyonel açıklamalar olup basınç dayanımları bölümünde yapılan yorumların tamamı (aynı ikame oranlarındaki beton karışımları için) eğilme dayanımları için de kabul edilebilir.

Çünkü basınç dayanımı ve eğilme dayanımı arasında bölüm 4.1.3 de incelendiği üzere çok yüksek korelasyon katsayısı tespit edilmiştir.

4.1.2.1. Farklı oranlarda UK İçeren İkili Kombinasyon Betonların Eğilme Dayanımlarının Birbirleri ve Referans Numune Dayanımı İle Kıyaslanması

UK ikamesi ile üretilen beton karışımlarının eğilme dayanımları Çizelge 4.10.a'da, 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar Çizelge 4.10.b'de, 7-28 ve 28-360 günler arası dayanım gelişimleri ise Çizelge 4.10.c'de, UK ikameli numunelerin her bir kür süresinde R numunesine göre rölatif eğilme dayanımları Çizelge 4.10.d'de de verilmektedir. Zaman ile eğilme dayanımları değeri değişimi Şekil 4.10'da görülmektedir.

Beton numune alımından itibaren takip eden 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360. günlerdeki eğilme dayanımları değerlendirilmiştir.

Referans numune 1. günde 2,61 MPa dayanım değeri ile en düşük, 360. günde ise 7,9 MPa ile en yüksek dayanım değerine ulaşmıştır. Çizelge 4.10.a'da görüldüğü üzere UK ikamesi ile yapılan betonlarda en düşük eğilme dayanım değeri 0,06 MPa ile UK90 numunesinin 1. gününde, en yüksek eğilme dayanım değeri ise 9,68 MPa ile UK20 numunesinin 360. gününde elde edilmiştir.

Referans numuneye kıyasla, UK20-UK30 90. günde sırasıyla %7,08-%6,94, UK5-UK10 180. günde sırasıyla %5,43-%11,26 daha fazla eğilme dayanımı ile referans numuneyi geçmişleridir. UK ikameli numuneler referans numuneyi geçtikten sonra ikincil puzolanik reaksiyonlar sebebiyle referans numuneye göre eğilme dayanım değerleri giderek yükselmeye devam etmiştir. UK50, UK75 ve UK90 referans numuneye kıyasla tüm günlerde eğilme dayanım değerleri düşük kalsa bile özellikle UK50 numunesi 28, 90, 180, 360. günlerde sırasıyla 5,03, 6,93, 7,2 ve 7,81 MPa eğilme dayanımı değerlerine ulaşmıştır. Devam eden puzolanik reaksiyonlara bağlı olarak UK50 numunesinin 360. gün sonrası ilerleyen yaşlarda referans numuneyi yakalayacağı düşünülmektedir.

Çizelge 4.10.a. UK İçeren Beton Karışımlarının Eğilme Dayanımları (MPa)

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	2,61	3,79	5,15	6,44	7,20	7,55	7,90
UK5	1,67	2,70	4,01	5,55	6,35	7,96	8,52
UK10	1,70	2,80	3,80	5,70	7,00	8,40	9,13
UK20	1,57	2,86	4,60	6,12	8,43	8,60	9,68
UK30	1,95	2,98	3,87	5,85	8,42	8,70	9,37
UK50	1,18	2,55	3,24	5,03	6,93	7,20	7,81
UK75	0,29	0,92	1,06	1,69	2,17	2,92	3,78
UK90	0,06	0,09	0,21	0,55	0,74	1,20	1,74

Çizelge 4.10.b'ye göre 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar incelendiğinde; 100 kabul edilen 28 günlük R numunesine kıyasla, UK10, UK20, UK30, UK50 numuneleri 90. Günde sırasıyla %9, %31, %31, %8, UK5 numunesi 180. günde %24 oranında daha yüksek değere ulaşmışlardır. UK75 ve UK90 numuneleri ise hiçbir günde 28 günlük R numunesinin rölatif değerini yakalayamamışlardır.

Çizelge 4.10.b. 28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	41	59	80	100	112	117	123
UK5	26	42	62	86	99	124	132
UK10	26	43	59	89	109	130	142
UK20	24	44	71	95	131	134	150
UK30	30	46	60	91	131	135	145
UK50	18	40	50	78	108	112	121
UK75	5	14	16	26	34	45	59
UK90	1	1	3	9	11	19	27

Çizelge 4.10.c'ye göre 7-28 günler ve 28-360 günler arasındaki dayanım gelişimleri incelenecek olursa en düşük dayanım gelişimi 7-28 günler arasında %25,04 ve 28-360 günler arasında %22,67 ile R numunesinde görülmektedir. Özellikle UK75 ve UK90 numunelerinin eğilme dayanım gelişimleri 28-360 günler arasında sırasıyla %123,67-%216,36 ile en yüksek değerlere ulaşmışlardır. Bu

durum yüksek oranda UK içeren bu karışımlarda oluşan yoğun ikincil reaksiyonlara bağlanabilir.

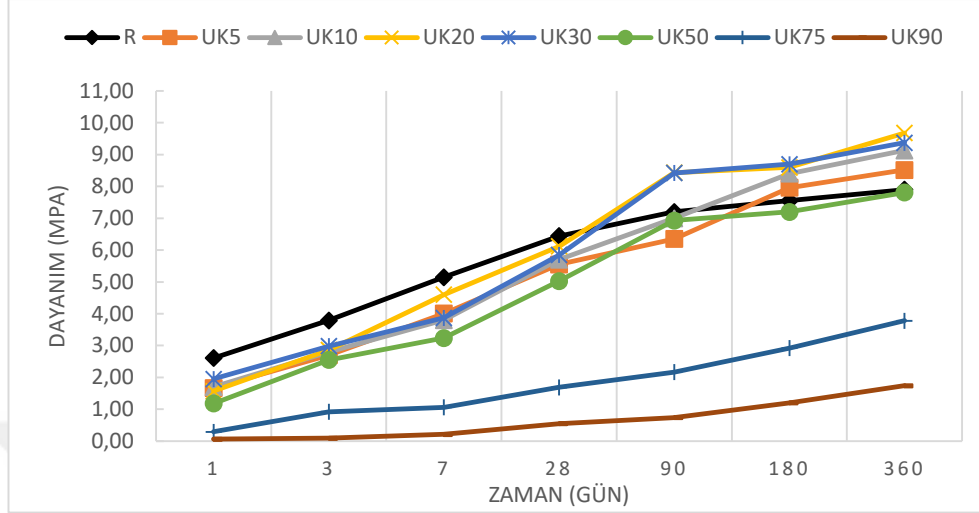
Çizelge 4.10.c. 7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri

Numune	7- 28 Gün Arası	28- 360 Gün Arası
R	%25,04	%22,67
UK5	%38,40	%53,51
UK10	%50,00	%60,18
UK20	%33,04	%58,17
UK30	%51,16	%60,17
UK50	%55,25	%55,27
UK75	%59,43	%123,67
UK90	%161,90	%216,36

Çizelge 4.10.d'de tüm kür sürelerindeki R numunelerine göre rölatif eğilme dayanımlar kıyaslandığında, UK5 numunesi 180. günde %5,43, UK10 numunesi 180. günde %11,26, UK20 numunesi 90. günde %17,08, UK30 numunesi 90. günde %16,94 daha fazla eğilme dayanımı kazanarak referans numuneyi geçmişlerdir. Tüm kür süreleri içerisinde R numunesine göre maksimum rölatif eğilme dayanımı artışı %22,53 ile UK20 numunesinin 360. gününde gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.10.d. UK İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Eğilme Dayanımları

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	100	100	100	100	100	100	100
UK5	63,98	71,24	77,86	86,18	88,19	105,43	107,85
UK10	65,13	73,88	73,79	88,51	97,22	111,26	115,57
UK20	60,15	75,46	89,32	95,03	117,08	113,91	122,53
UK30	74,71	78,63	75,15	90,84	116,94	115,23	118,61
UK50	45,21	67,28	62,91	78,11	96,25	95,36	98,86
UK75	11,11	24,27	20,58	26,24	30,14	38,68	47,85
UK90	2,30	2,37	4,08	8,54	10,28	15,89	22,03



Şekil 4.10. Çimento+UK ile Yapılan Betonların Eğilme Dayanımları/Zaman Grafiği

4.1.2.2. Farklı oranlarda GYFC İçeren İkili Kombinasyon Betonların Eğilme Dayanımlarının Birbirleri ve Referans Numune Dayanımı ile Kıyaslanması

GYFC ikamesi ile üretilen beton karışımlarının eğilme dayanımları Çizelge 4.11.a'da, 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar Çizelge 4.11.b'de, 7-28 ve 28-360 günler arası dayanım gelişimleri ise Çizelge 4.11.c'de, GYFC ikameli numunelerin her bir kür süresinde R numunesine göre rölatif eğilme dayanımları Çizelge 4.11.d'de verilmektedir. Zaman ile eğilme dayanımları değeri değişimi Şekil 4.11'de görülmektedir.

Beton numune alımından itibaren takip eden 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360. günlerdeki eğilme dayanımları değerlendirilmiştir.

Referans numune 1. günde 2,61 MPa dayanım değeri ile en düşük, 360. günde ise 7,9 MPa ile en yüksek dayanım değerine ulaşmıştır. Çizelge 4.11.a'da görüldüğü üzere GYFC ikamesi ile yapılan betonlarda en düşük eğilme dayanım değeri 0,12 MPa ile GYFC90 numunesinin 1. gününde, en yüksek eğilme dayanım değeri ise 9,85 MPa ile GYFC20 numunesinin 360. gününde elde edilmiştir.

Referans numuneye kıyasla bakıldığında, GYFC20, GYFC30 28. günde sırasıyla %7,45-%0,47, GYFC5, GYFC10 180. günde sırasıyla %2,52, %8,08 daha fazla eğilme dayanımı ile referans numuneyi geçmişleridir. GYFC ikameli numuneler referans numuneyi geçtikten sonra ikincil puzolanik reaksiyonlar sebebiyle referans numuneye göre eğilme dayanım değerleri giderek yükselmeye devam etmiştir. GYFC50, GYFC75 ve GYFC90 referans numuneye kıyasla tüm günlerde eğilme dayanım değerleri düşük kalsa bile özellikle GYFC50 numunesi 28, 90, 180, 360. günlerde sırasıyla 3,63, 5,82, 6,32 ve 7,46 MPa dayanım değerlerine ulaşmıştır. Devam eden puzolanik reaksiyonlara bağlı olarak GYFC50 numunesinin 360. gün sonrası ilerleyen yaşlarda referans numuneyi yakalayacağı düşünülebilir.

Çizelge 4.11.a. GYFC İçeren Beton Karışımlarının Eğilme Dayanımları (MPa)

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	2,61	3,79	5,15	6,44	7,20	7,55	7,90
GYFC5	1,48	3,08	3,99	5,37	6,28	7,74	8,34
GYFC10	1,37	2,52	3,97	5,52	6,57	8,16	8,99
GYFC20	1,21	2,60	4,55	6,92	8,21	8,66	9,85
GYFC30	1,08	2,34	4,02	6,47	8,33	8,43	9,42
GYFC50	0,50	1,28	2,54	3,63	5,82	6,32	7,46
GYFC75	0,27	0,53	1,30	2,42	3,86	4,94	6,18
GYFC90	0,12	0,39	1,11	1,77	2,22	3,06	3,53

Çizelge 4.11.b'ye göre 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar incelendiğinde; 100 kabul edilen 28 günlük R numunesine kıyasla, GYFC20, GYFC30 numuneleri 28. Günde sırasıyla %7-%0,5, GYFC10 numunesi 90. günde %2, GYFC5 numunesi 180. günde %20, GYFC50 numunesi 360. günde %16 oranında daha yüksek değere ulaşmışlardır. GYFC75 ve GYFC90 numuneleri ise hiçbir günde 28 günlük R numunesinin rölatif değerini yakalayamamışlardır.

Çizelge 4.11.b. 28 günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	41	59	80	100	112	117	123
GYFC5	23	48	62	83	98	120	130
GYFC10	21	39	62	86	102	127	140
GYFC20	19	40	71	107	127	134	153
GYFC30	17	36	62	100	129	131	146
GYFC50	8	20	39	56	90	98	116
GYFC75	4	8	20	38	60	77	96
GYFC90	2	6	17	27	34	48	55

Çizelge 4.11.c'ye göre 7-28 günler ve 28-360 günler arasındaki dayanım gelişimleri incelenecek olursa en düşük dayanım gelişimi 7-28 günler arasında %25,04 ve 28-360 günler arasında %22,67 ile R numunesinde görülmektedir. Özellikle GYFC50, GYFC75, GYFC90 numunelerinin eğilme dayanım gelişimleri 28-360 günler arasında sırasıyla %105,51-%155,37-%99,44 ile en yüksek değerlere ulaşmışlardır. Bu durum yüksek oranda GYFC içeren bu karışımlarda oluşan yoğun ikincil reaksiyonlara bağlanabilir.

Çizelge 4.11.c. 7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri

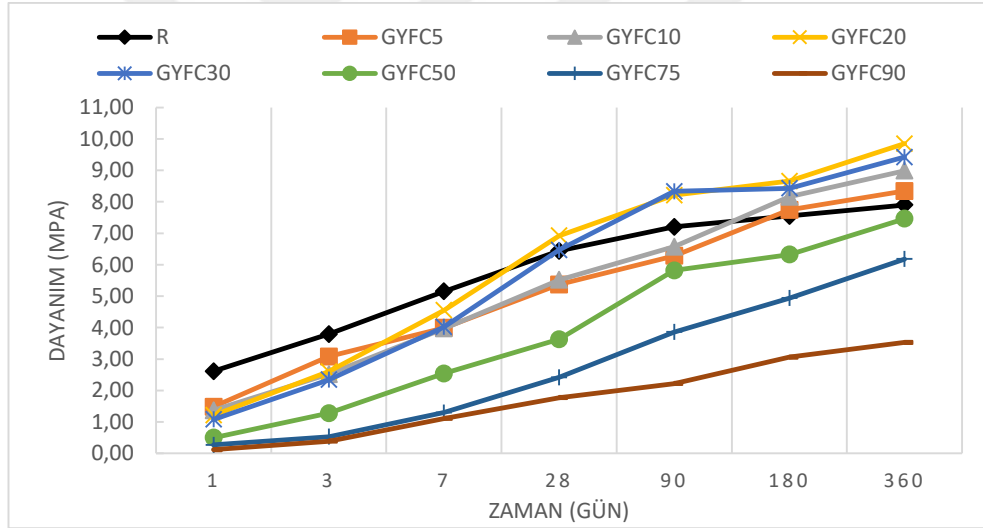
Numune	7- 28 Gün Arası	28- 360 Gün Arası
R	%25,04	%22,67
GYFC5	%34,59	%55,31
GYFC10	%39,04	%62,86
GYFC20	%52,09	%42,34
GYFC30	%60,95	%45,60
GYFC50	%42,91	%105,51
GYFC75	%86,15	%155,37
GYFC90	%59,46	%99,44

Çizelge 4.11.d'de tüm kür sürelerindeki R numunelerine göre rölatif eğilme dayanımları kıyaslandığında, GYFC5 numunesi 180. günde %2,52, GYFC10 numunesi 180. günde %8,08, GYFC20 numunesi 28. günde %7,45, UK30 numunesi 28. günde %0,47 daha fazla eğilme dayanımı kazanarak referans numuneyi geçmişlerdir. Tüm kür süreleri içerisinde R numunesine göre maksimum

rölatif eğilme dayanımı artışı %24,68 ile GYFC20 numunesinin 360. gününde gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.11.d. GYFC İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Eğilme Dayanımları

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	100	100	100	100	100	100	100
GYFC5	56,70	81,27	77,48	83,39	87,22	102,52	105,57
GYFC10	52,49	66,49	77,09	85,71	91,25	108,08	113,80
GYFC20	46,36	68,60	88,35	107,45	114,03	114,70	124,68
GYFC30	41,38	61,74	78,06	100,47	115,69	111,66	119,24
GYFC50	19,16	33,77	49,32	56,37	80,83	83,71	94,43
GYFC75	10,34	13,98	25,24	37,58	53,61	65,43	78,23
GYFC90	4,60	10,29	21,55	27,48	30,83	40,53	44,68



Şekil 4.11. Çimento+GYFC ile Yapılan Betonlara Ait Eğilme Dayanımları/Zaman Grafiği

4.1.2.3. Farklı Oranlarda SD İçeren İkili Kombinasyon Betonların Eğilme Dayanımlarının Birbirleri ve Referans Numune Dayanımı ile Kıyaslanması

SD ikamesi ile üretilen beton karışımlarının eğilme dayanımları 4.12.a'da, 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar Çizelge 4.12.b'de, 7-28 ve 28-360 günler arası dayanım gelişimleri ise Çizelge 4.12.c'de, SD ikameli numunelerin her bir kür süresinde R numunesine göre rölatif eğilme dayanımları Çizelge 4.12.d'de verilmektedir. Zaman ile eğilme dayanımları değeri değişimi Şekil 4.12'de görülmektedir.

Beton numune alımından itibaren takip eden 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360. günlerdeki eğilme dayanımları değerlendirilmiştir.

Referans numune 1. günde 2,61 MPa dayanım değeri ile en düşük, 360. günde ise 7,9 MPa ile en yüksek dayanım değerine ulaşmıştır. Çizelge 4.12.a'da görüldüğü üzere SD ikamesi ile yapılan betonlarda en düşük eğilme dayanım değeri 1,23 MPa ile SD20 numunesinin 1. gününde, en yüksek eğilme dayanım değeri ise 9,69 MPa ile SD7,5 numunesinin 360. gününde elde edilmiştir.

Referans numuneye kıyasla bakıldığında, SD7,5 1. günde %1,91, SD5 3. günde %6,07, SD2.5 180. Günde %2,91 daha fazla eğilme dayanıma ulaşmış ve referans numuneyi geçmişleridir. SD ikameli numuneler referans numuneyi geçtikten sonra ikincil puzolanik reaksiyonlar sebebiyle referans numuneye göre eğilme dayanım değerleri giderek yükselmeye devam etmiştir. SD10, SD15 ve SD20 referans numuneye kıyasla tüm günlerde eğilme dayanım değerleri düşük kalsa bile özellikle SD10 numunesi 28, 90, 180, 360. günlerde sırasıyla 5,81-6,42-6,59 ve 7,61 MPa dayanım değerlerine ulaşmıştır. Devam eden puzolanik reaksiyonlara bağlı olarak SD10 numunesinin 360. gün sonrası ilerleyen yaşlarda referans numuneyi yakalayacağı düşünülebilir. SD15 ve SD20 numuneleri 360. günde sırasıyla 7,43 ve 6,83 MPa eğilme dayanımları ile referans numuneye çok yakın değerler almışlardır. Dolayısıyla ilerleyen zamanlarda devam eden puzolanik

reaksiyonlar neticesinde SD15 ve SD20 numunelerinin de referans numuneyi geçeceği düşünülebilir.

Çizelge 4.12.a. SD İçeren Beton Karışımlarının Eğilme Dayanımları (MPa)

Numune	1.Gün	3.Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	2,61	3,79	5,15	6,44	7,20	7,55	7,90
SD2,5	2,14	3,53	4,91	6,10	6,50	7,77	8,35
SD5	2,45	4,02	5,41	7,21	7,84	8,40	9,25
SD7,5	2,66	4,13	5,78	7,33	8,17	8,69	9,69
SD10	2,52	4,01	4,79	5,81	6,42	6,59	7,61
SD15	1,91	3,01	3,45	3,94	4,38	5,96	7,43
SD20	1,23	2,46	2,78	3,36	3,62	5,42	6,83

Çizelge 4.12.b'ye göre 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar incelendiğinde; 100 kabul edilen 28 günlük R numunesine kıyasla, SD5, SD7,5 numuneleri 28. Günde sırasıyla %12-%14, SD2,5 numunesi 90. günde %1, SD10 numunesi 180. günde %2, SD15-SD20 numuneleri 360. Günde sırası ile %15-%6 oranında daha yüksek değerlere ulaşmışlardır.

Çizelge 4.12.b. 28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	41	59	80	100	112	117	123
SD2,5	33	55	76	95	101	121	130
SD5	38	62	84	112	122	130	144
SD7,5	41	64	90	114	127	135	150
SD10	39	62	74	90	100	102	118
SD15	30	47	54	61	68	93	115
SD20	19	38	43	52	56	84	106

Çizelge 4.12.c'ye göre 7-28 günler ve 28-360 günler arasındaki dayanım gelişimleri incelenecek olursa en düşük dayanım gelişimi 7-28 günler arasında %24,24 ile SD2,5 numunesinde, 28-360 günler arasında %22,67 ile R numunesinde görülmektedir. Özellikle SD15, SD20 numunelerinin eğilme dayanım gelişimleri 28-360 günler arasında sırasıyla %88,58-%103,27 ile en yüksek değerlere

ulaşmışlardır. Bu durum yüksek oranda SD içeren bu karışımlarda oluşan yoğun ikincil reaksiyonlara bağlanabilir.

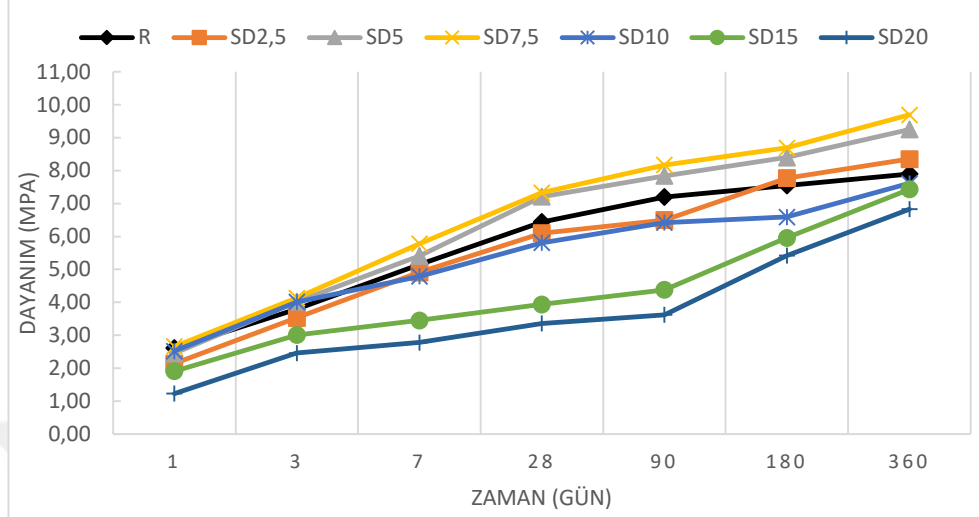
Çizelge 4.12.c. 7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri

Numune	7- 28 Gün Arası	28- 360 Gün Arası
R	%25,04	%22,67
SD2,5	%24,24	%36,89
SD5	%33,27	%28,29
SD7,5	%26,82	%32,20
SD10	%21,29	%30,98
SD15	%14,20	%88,58
SD20	%20,86	%103,27

Çizelge 4.12.d’de tüm kür sürelerindeki R numunelerine göre rölatif eğilme dayanımları kıyaslandığında, SD2,5 numunesi 180. günde %2,91, SD5 numunesi 3. günde %6,07, SD7,5 numunesi 1. günde %1,92, SD10 numunesi 7. günde %5,80 daha fazla eğilme dayanımı kazanarak referans numuneyi geçmişlerdir. Tüm kür süreleri içerisinde R numunesine göre maksimum rölatif eğilme dayanımı artışı %22,66 ile SD7,5 numunesinin 360. gününde gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.12.d. SD İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Eğilme Dayanımları

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	100	100	100	100	100	100	100
SD2,5	81,99	93,14	95,34	94,72	90,28	102,91	105,70
SD5	93,87	106,07	105,05	111,96	108,89	111,26	117,09
SD7,5	101,92	108,97	112,23	113,82	113,47	115,10	122,66
SD10	96,55	105,80	93,01	90,22	89,17	87,28	96,33
SD15	73,18	79,42	66,99	61,18	60,83	78,94	94,05
SD20	47,13	64,91	53,98	52,17	50,28	71,79	86,46



Şekil 4.12. Çimento+SD ile Yapılan Betonların Eğilme Dayanımları/Zaman Grafiği

4.1.2.4. %5 SD ile Farklı Oranlarda GYFC İçeren Üçlü Kombinasyon Betonların Eğilme Dayanımlarının Birbirlerine Göre, Sadece %5 SD İçeren Numune ve Referans Numune Göre Kıyaslanması

SD5 ve farklı oranlarda GYFC ikamesi ile üretilen beton karışımlarının eğilme dayanımları 4.13.a'da, 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar Çizelge 4.13.b'de, 7-28 ve 28-360 günler arası dayanım gelişimleri ise Çizelge 4.13.c'de, SD5+GYFC ikameli numunelerin her bir kür süresinde R numunesine göre rölatif eğilme dayanımları Çizelge 4.13.d'de verilmektedir. Zaman ile eğilme dayanımları değeri değişimi Şekil 4.13'te görülmektedir.

Beton numune alımından itibaren takip eden 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360. günlerdeki eğilme dayanımları değerlendirilmiştir.

Referans numune 1. günde 2,61 MPa dayanım değeri ile en düşük, 360. günde ise 7,9 MPa ile en yüksek dayanım değerine ulaşmıştır. Çizelge 4.13.a'da görüldüğü üzere SD5+GYFC ikamesi ile yapılan betonlarda en düşük eğilme dayanım değeri 1,3 MPa ile SD5+GYFC30 numunesinin 1. gününde, en yüksek

eğilme dayanım değeri ise 9,54 MPa ile SD5+GFYC20 numunesinin 360. gününde elde edilmiştir.

Referans numuneye kıyasla, SD5+GYFC20 28. günde %5,43, SD5+GYFC10 90. günde %3,06, SD5+GYFC30 180. Günde %3,58 daha fazla eğilme dayanıma ulaşmışlardır. SD5+GYFC ikameli numuneler referans numuneyi geçtikten sonra ikincil pozolanik reaksiyonlar sebebiyle referans numuneye göre eğilme dayanım değerleri giderek yükselmeye devam etmiştir.

Çizelge 4.13.a. SD+ GYFC İçeren Beton Karışımlarının Eğilme Dayanımları (MPa)

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	2,61	3,79	5,15	6,44	7,20	7,55	7,90
SD5	2,45	4,02	5,41	7,21	7,84	8,40	9,25
SD5+GYFC10	1,44	3,01	4,32	5,73	7,42	8,04	8,40
SD5+GYFC20	1,37	3,30	4,43	6,79	7,33	8,30	9,54
SD5+GYFC30	1,30	2,98	4,42	6,85	7,02	7,82	8,35

Çizelge 4.13.b'ye göre 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar incelendiğinde; 100 kabul edilen 28 günlük R numunesine kıyasla, SD5+GYFC20, SD5+GYFC30 numuneleri 28. Günde sırasıyla %5-%6, SD5+GYFC10 numunesi 90. günde %15 oranında daha yüksek değere ulaşmışlardır.

Çizelge 4.13.b. 28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	41	59	80	100	112	117	123
SD5	38	62	84	112	122	130	144
SD5+GYFC10	22	47	67	89	115	125	130
SD5+GYFC20	21	51	69	105	114	129	148
SD5+GYFC30	20	46	69	106	109	121	130

Çizelge 4.13.c'ye göre 7-28 günler ve 28-360 günler arasındaki dayanım gelişimleri incelenecek olursa en düşük dayanım gelişimi 7-28 günler arasında %25,04 R numunesinde, 28-360 günler arasında %21,9 ile SD5+GYFC30 numunesinde görülmektedir.

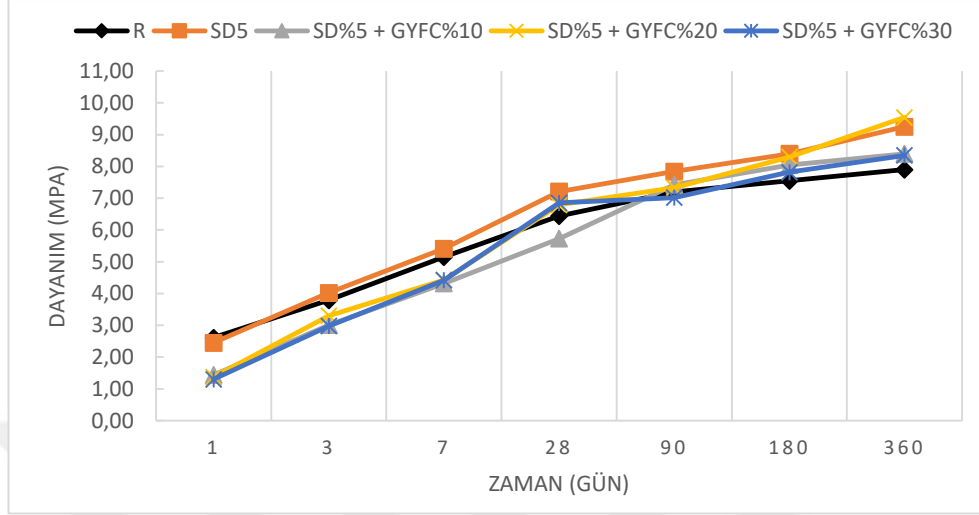
Çizelge 4.13.c. 7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri

Numune	7- 28 Gün Arası	28- 360 Gün Arası
R	%25,04	%22,67
SD5	%33,27	%28,29
SD5+GYFC10	%32,64	%46,60
SD5+GYFC20	%53,27	%40,50
SD5+GYFC30	%54,98	%21,90

Çizelge 4.13.d’de tüm kür sürelerindeki R numunelerine göre rölatif eğilme dayanımları kıyaslandığında, SD5+GFYC10 numunesi 90. günde %3,06, SD5+GYFC20 numunesi 28. günde %5,43, SD5+GYFC30 numunesi 28. günde %6,37 daha fazla eğilme dayanımı kazanarak referans numuneyi geçmişlerdir. Tüm kür süreleri içerisinde R numunesine göre maksimum rölatif eğilme dayanımı artışı %20,76 ile SD5+GYFC20 numunesinin 360. gününde gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.13.d. SD+GYFC İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Eğilme Dayanımları

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	100	100	100	100	100	100	100
SD5	93,87	106,07	105,05	111,96	108,89	111,26	117,09
SD5+GYFC10	55,17	79,42	83,88	88,98	103,06	106,49	106,33
SD5+GYFC20	52,49	87,07	86,02	105,43	101,81	109,93	120,76
SD5+GYFC30	49,81	78,63	85,83	106,37	97,50	103,58	105,70



Şekil 4.13. Çimento+SD+GYFC ile Yapılan Betonlara Ait Eğilme Dayanımları/Zaman Grafiği

4.1.2.5. %5 SD ile Farklı Oranlarda UK İçeren Üçlü Kombinasyon Betonların Eğilme Dayanımlarının Birbirlerine Göre, Sadece %5 SD İçeren Numune ve Referans Numuneye Göre Kıyaslanması

SD5 ve farklı oranlarda UK ikamesi ile üretilen beton karışımlarının eğilme dayanımları 4.14.a'da, 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar Çizelge 4.14.b'de, 7-28 ve 28-360 günler arası dayanım gelişimleri ise Çizelge 4.14.c'de, SD5+UK ikameli numunelerin her bir kür süresinde R numunesine göre rölatif eğilme dayanımları Çizelge 4.14.d'de verilmektedir. Zaman ile eğilme dayanımları değeri değişimi Şekil 4.14'te görülmektedir.

Beton numune alımından itibaren takip eden 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360. günlerdeki eğilme dayanımları değerlendirilmiştir.

Referans numune 1. günde 2,61 MPa dayanım değeri ile en düşük, 360. günde ise 7,9 MPa ile en yüksek dayanım değerine ulaşmıştır. Çizelge 4.14.a'da görüldüğü üzere SD5+UK ikamesi ile yapılan betonlarda en düşük eğilme dayanım değeri 0,78 MPa ile SD5+UK30 numunesinin 1. gününde, en yüksek eğilme

dayanım değeri ise 9,05 MPa ile SD5+UK20 numunesinin 360. gününde elde edilmiştir.

Referans numuneye kıyasla, SD5+UK10 numunesi 90. günde %0,42, SD5+UK20, SD5+UK30 180. günde sırasıyla %3,18-%0,26 daha fazla eğilme dayanıma ulaşmışlardır. SD5+UK ikameli numuneler referans numuneyi geçtikten sonra ikincil puzolanik reaksiyonlar sebebiyle referans numuneye göre eğilme dayanım değerleri giderek yükselmeye devam etmiştir.

Çizelge 4.14.a. SD+UK İçeren Beton Karışımlarının Eğilme Dayanımları (MPa)

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	2,61	3,79	5,15	6,44	7,20	7,55	7,90
SD5	2,45	4,02	5,41	7,21	7,84	8,40	9,25
SD5+UK10	1,33	2,63	3,89	5,22	7,23	7,90	8,70
SD5+UK20	1,18	2,54	4,34	5,87	6,81	7,79	9,05
SD5+UK30	0,78	2,49	4,08	6,29	6,77	7,57	8,26

Çizelge 4.14.b'ye göre 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar incelendiğinde; 100 kabul edilen 28 günlük R numunesine kıyasla, SD5+UK10, SD5+UK20, SD5+UK30 numuneleri 90. günde sırasıyla %12-%6-%5 oranında daha yüksek değere ulaşmışlardır.

Çizelge 4.14.b. 28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	41	59	80	100	112	117	123
SD5	38	62	84	112	122	130	144
SD5+UK10	21	41	60	81	112	123	135
SD5+UK20	18	39	67	91	106	121	141
SD5+UK30	12	39	63	98	105	118	128

Çizelge 4.14.c'ye göre 7-28 günler ve 28-360 günler arasındaki dayanım gelişimleri incelenecek olursa en düşük dayanım gelişimi 7-28 günler arasında %25,04 ve 28-360 günler arasında %22,67 ile R numunesinde görülmektedir. Özellikle SD5+UK10, SD5+UK20 numunelerinin eğilme dayanım gelişimleri 28-360 günler arasında sırasıyla %66,67-%54,17 ile en yüksek değerlere ulaşmışlardır.

Bu durum SD5 oranına ilaveten en fazla UK20 oranında içeren karışımlarda oluşan yoğun ikincil reaksiyonlara bağlanabilir.

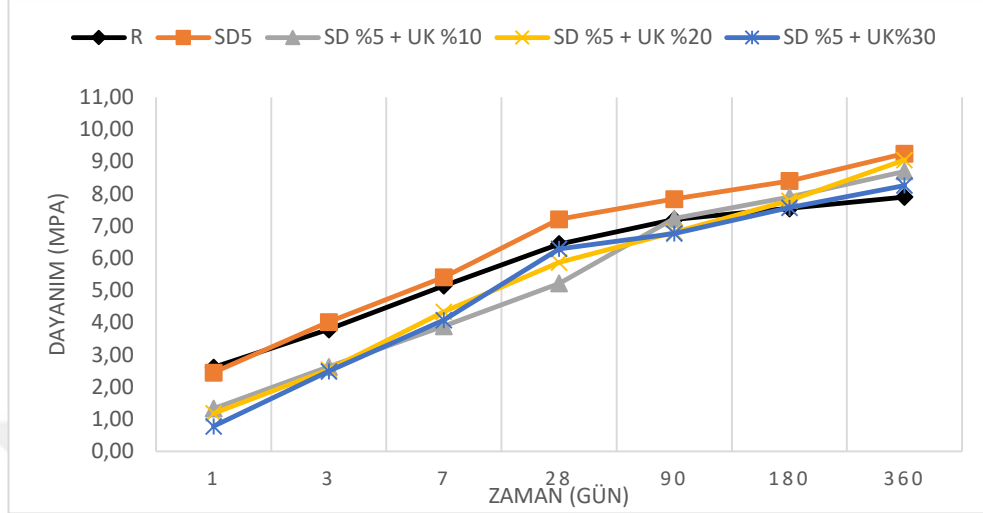
Çizelge 4.14.c. 7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri

Numune	7- 28 Gün Arası	28- 360 Gün Arası
R	%25,04	%22,67
SD5	%33,27	%28,29
SD5+UK10	%34,19	%66,67
SD5+UK20	%35,25	%54,17
SD5+UK30	%54,17	%31,32

Çizelge 4.14.d'de tüm kür sürelerindeki R numunelerine göre rölatif eğilme dayanımları kıyaslandığında, SD5+UK10 numunesi 90. günde %0,42, SD5+UK20 numunesi 180. günde %3,18, SD5+UK30 numunesi 180. günde %0,26 daha fazla eğilme dayanımı kazanarak referans numuneyi geçmişlerdir. Tüm kür süreleri içerisinde R numunesine göre maksimum rölatif eğilme dayanımı artışı %14,56 ile SD5+UK20 numunesinin 360. gününde gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.14.d. SD+UK İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Eğilme Dayanımları

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	100	100	100	100	100	100	100
SD5	93,87	106,07	105,05	111,96	108,89	111,26	117,09
SD5+UK10	50,96	69,39	75,53	81,06	100,42	104,64	110,13
SD5+UK20	45,21	67,02	84,27	91,15	94,58	103,18	114,56
SD5+UK30	29,89	65,70	79,22	97,67	94,03	100,26	104,56



Şekil 4.14. Çimento+SD+UK ile Yapılan Betonlara Ait Eğilme Dayanımları/Zaman Grafiği

4.1.2.6. %7,5 SD ile Farklı Oranlarda GYFC İçeren Üçlü Kombinasyon Betonların Eğilme Dayanımlarının Birbirlerine Göre, Sadece %7,5 SD İçeren Numune ve Referans Numuneyle Kıyaslanması

SD7,5 ve farklı oranlarda GYFC ikamesi ile üretilen beton karışımlarının eğilme dayanımları 4.15.a'da, 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar Çizelge 4.15.b'de, 7-28 ve 28-360 günler arası dayanım gelişimleri ise Çizelge 4.15.c'de, SD7,5+GYFC ikameli numunelerin her bir kür süresinde R numunesine göre rölatif eğilme dayanımları Çizelge 4.15.d'de verilmektedir. Zaman ile eğilme dayanımları değeri değişimi Şekil 4.15'te görülmektedir.

Beton numune alımından itibaren takip eden 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360. günlerdeki eğilme dayanımları değerlendirilmiştir.

Referans numune 1. günde 2,61 MPa dayanım değeri ile en düşük, 360. günde ise 7,9 MPa ile en yüksek dayanım değerine ulaşmıştır. Çizelge 4.15.a'da görüldüğü üzere SD7,5+GYFC ikamesi ile yapılan betonlarda en düşük eğilme dayanım değeri 1,38 MPa ile SD7,5+GYFC30 numunesinin 1. gününde, en yüksek

eğilme dayanım değeri ise 9,9 MPa ile SD7,5+GYFC20 numunesinin 360. gününde elde edilmiştir.

Referans numuneye kıyasla, SD7,5+GYFC10, SD7,5+GYFC20 numuneleri 90. günde sırasıyla %5,97-%0,97, SD7,5+GYFC30 numunesi 180. günde %9,67 daha fazla eğilme dayanımına ulaşmışlardır. SD7,5+GYFC ikameli numuneler referans numuneyi geçtikten sonra ikincil puzolanik reaksiyonlar sebebiyle referans numuneye göre eğilme dayanım değerleri giderek yükselmeye devam etmiştir.

Çizelge 4.15.a. SD+ GYFC İçeren Beton Karışımlarının Eğilme Dayanımları (MPa)

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	2,61	3,79	5,15	6,44	7,20	7,55	7,90
SD7,5	2,66	4,13	5,78	7,33	8,17	8,69	9,69
SD7,5+GYFC10	1,42	3,44	4,65	6,41	7,63	8,60	9,59
SD7,5+GYFC20	1,70	3,77	4,58	6,84	7,27	8,65	9,90
SD7,5+GYFC30	1,38	3,66	4,74	7,38	7,08	8,28	8,60

Çizelge 4.15.b'ye göre 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar incelendiğinde; 100 kabul edilen 28 günlük R numunesine kıyasla, SD7,5+GYFC20, SD7,5+GYFC30 numuneleri 28. Günde sırasıyla %6-%15 oranında, SD7,5+GYFC10 numunesi 90. Günde %18 daha yüksek dayanım değerlerine ulaşmışlardır.

Çizelge 4.15.b. 28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	41	59	80	100	112	117	123
SD7,5	41	64	90	114	127	135	150
SD7,5+GYFC10	22	53	72	100	118	134	149
SD7,5+GYFC20	26	59	71	106	113	134	154
SD7,5+GYFC30	21	57	74	115	110	129	134

Çizelge 4.15.c'ye göre 7-28 günler ve 28-360 günler arasındaki dayanım gelişimleri incelenecek olursa en düşük dayanım gelişimi 7-28 günler arasında

%25,04 ile R numunesinde, 28-360 günler arasında en düşük dayanım gelişimi %16,53 ile SD7,5+GYFC30 numunesinde görülmektedir. Özellikle SD7,5+GYFC10-SD7,5+GYFC20 numunelerinin eğilme dayanım gelişimleri 28-360 günler arasında sırasıyla %49,61, %44,71 ile en yüksek değerlere ulaşmışlardır. Bu durum SD7,5 oranına ilaveten en fazla GYFC20 oranında içeren karışımlarda oluşan yoğun ikincil reaksiyonlara bağlanabilir.

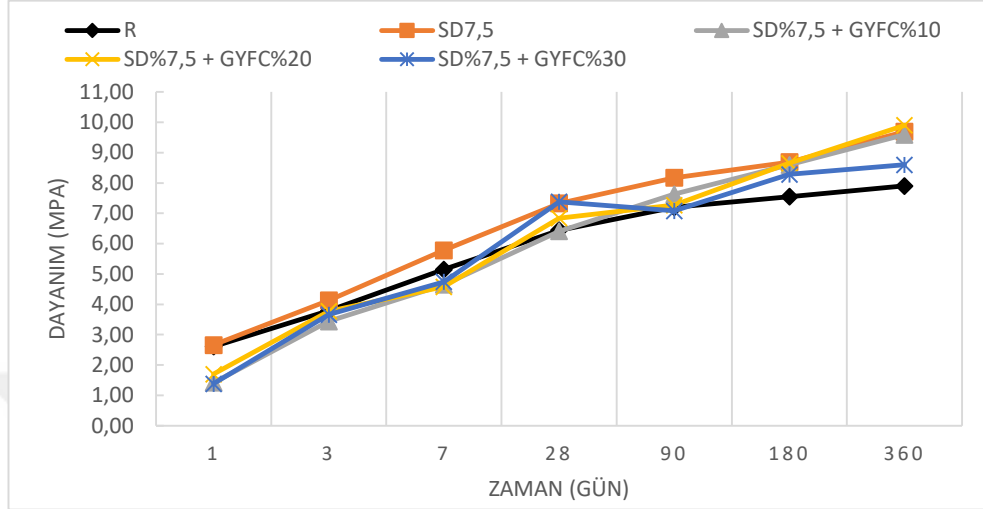
Çizelge 4.15.c. 7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri

Numune	7- 28 Gün Arası	28- 360 Gün Arası
R	%25,04	%22,67
SD7,5	%26,82	%32,20
SD7,5+GYFC10	%37,85	%49,61
SD7,5+GYFC20	%49,34	%44,74
SD7,5+GYFC30	%55,70	%16,53

Çizelge 4.15.d'de tüm kür sürelerindeki R numunelerine göre rölatif eğilme dayanımları kıyaslandığında, SD7,5+GYFC10 numunesi 90. günde %5,97, SD7,5+GYFC20 numunesi 28. günde %6,21, SD7,5+GYFC30 numunesi 28. günde %14,60 daha fazla eğilme dayanımı kazanarak referans numuneyi geçmişlerdir. Tüm kür süreleri içerisinde R numunesine göre maksimum rölatif eğilme dayanımı artışı %25,32 ile SD7,5+GYFC20 numunesinin 360. gününde gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.15.d. SD+ GYFC İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Eğilme Dayanımları

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	100	100	100	100	100	100	100
SD7,5	101,92	108,97	112,23	113,82	113,47	115,10	122,66
SD7,5+GYFC10	54,41	90,77	90,29	99,53	105,97	113,91	121,39
SD7,5+GYFC20	65,13	99,47	88,93	106,21	100,97	114,57	125,32
SD7,5+GYFC30	52,87	96,57	92,04	114,60	98,33	109,67	108,86



Şekil 4.15. Çimento+SD+GYFC ile Yapılan Betonlara Ait Eğilme Dayanımları/Zaman Grafiği

4.1.2.7. %7,5 SD ile Farklı Oranlarda UK İçeren Üçlü Kombinasyon Betonların Eğilme Dayanımlarının Birbirlerine Göre, Sadece %7,5 SD İçeren Numune ve Referans Numuneye Göre Kıyaslanması

SD7,5 ve farklı oranlarda UK ikamesi ile üretilen beton karışımlarının eğilme dayanımları 4.16.a'da, 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar Çizelge 4.16.b'de, 7-28 ve 28-360 günler arası dayanım gelişimleri ise Çizelge 4.16.c'de, SD7,5+UK ikameli numunelerin her bir kür süresinde R numunesine göre rölatif eğilme dayanımları Çizelge 4.16.d'de verilmektedir. Zaman ile eğilme dayanımları değeri değişimi Şekil 4.16'de görülmektedir.

Beton numune alımından itibaren takip eden 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360. günlerdeki eğilme dayanımları değerlendirilmiştir.

Referans numune 1. günde 2,61 MPa dayanım değeri ile en düşük, 360. günde ise 7,9 MPa ile en yüksek dayanım değerine ulaşmıştır. Çizelge 4.16.a'da görüldüğü üzere SD7,5+UK ikamesi ile yapılan betonlarda en düşük eğilme dayanım değeri 1,0 MPa ile SD7,5+UK30 numunesinin 1. gününde, en yüksek

eğilme dayanım değeri ise 9,24 MPa ile SD7,5+UK20 numunesinin 360. gününde elde edilmiştir.

Referans numuneye kıyasla bakıldığında, SD7,5+UK10 numunesi 90. günde %3,33, SD7,5+UK20, SD7,5+UK30 180. günde sırasıyla %9,27-%6,09 daha fazla eğilme dayanıma ulaşmışlardır. SD7,5+UK ikameli numuneler referans numuneyi geçtikten sonra ikincil puzolanik reaksiyonlar sebebiyle referans numuneye göre eğilme dayanım değerleri giderek yükselmeye devam etmiştir.

Çizelge 4.16.a. Çimento+SD+UK İçeren Beton Karışımlarının Eğilme Dayanımları (MPa)

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	2,61	3,79	5,15	6,44	7,20	7,55	7,90
SD7,5	2,66	4,13	5,78	7,33	8,17	8,69	9,69
SD7,5+UK10	1,59	2,74	4,06	5,67	7,44	8,37	9,22
SD7,5+UK20	1,26	2,90	4,61	6,59	7,17	8,25	9,24
SD7,5+UK30	1,00	2,52	4,44	6,98	6,94	8,01	8,43

Çizelge 4.16.b'ye göre 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar incelendiğinde; 100 kabul edilen 28 günlük R numunesine kıyasla, SD7,5+UK20, SD7,5+UK30 numuneleri 28. Günde sırasıyla %2-%8 oranında, SD7,5+UK10 numunesi %16 daha yüksek eğilme dayanımı değere ulaşmışlardır.

Çizelge 4.16.b. 28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	41	59	80	100	112	117	123
SD7,5	41	64	90	114	127	135	150
SD7,5+UK10	25	43	63	88	116	130	143
SD7,5+UK20	20	45	72	102	111	128	143
SD7,5+UK30	16	39	69	108	108	124	131

Çizelge 4.16.c'ye göre 7-28 günler ve 28-360 günler arasındaki dayanım gelişimleri incelenecek olursa en düşük dayanım gelişimi 7-28 günler arasında %25,04 ile R numunesinde, 28-360 günler arasında %20,77 ile SD7,5+UK30 numunesinde görülmektedir. Özellikle SD7,5+UK10, SD7,5+UK20 numunelerinin

eğilme dayanım gelişimleri 28-360 günler arasında sırasıyla %62,61, %40,21 ile en yüksek değerlere ulaşmışlardır. Bu durum SD7,5 oranına ilaveten en fazla UK20 oranında içeren karışımlarda oluşan yoğun ikincil reaksiyonlara bağlanabilir.

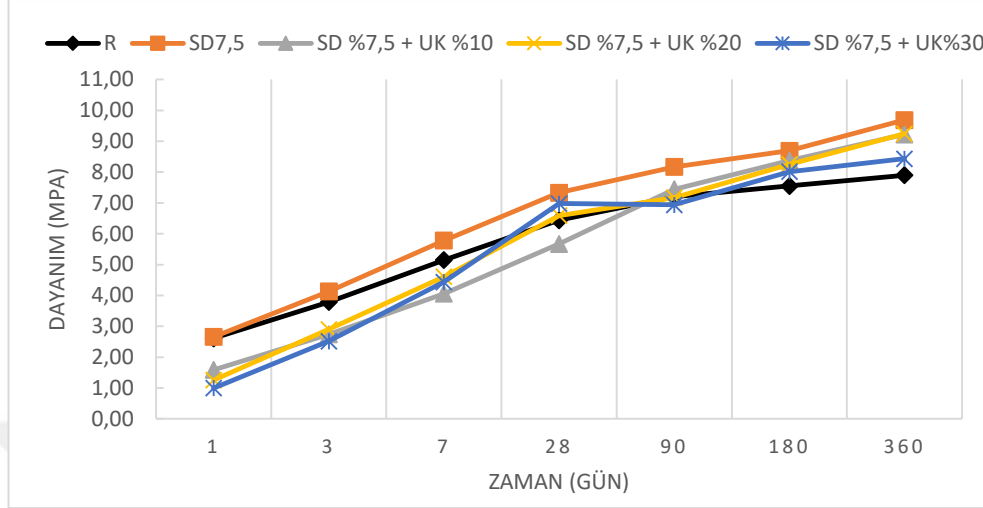
Çizelge 4.16.c. 7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri

Numune	7- 28 Gün Arası	28- 360 Gün Arası
R	%25,04	%22,67
SD7,5	%26,82	%32,20
SD7,5+UK10	%39,66	%62,61
SD7,5+UK20	%42,95	%40,21
SD7,5+UK30	%57,21	%20,77

Çizelge 4.16.d'de tüm kür sürelerindeki R numunelerine göre rölatif eğilme dayanımları kıyaslandığında, SD7,5+UK10 numunesi 90. günde %3,33, SD7,5+UK20 numunesi 28. günde %2,33, SD7,5+UK30 numunesi 28. günde %8,39 daha fazla eğilme dayanımı kazanarak referans numuneyi geçmişlerdir. Tüm kür süreleri içerisinde R numunesine göre maksimum rölatif eğilme dayanımı artışı %16,96 ile SD7,5+UK20 numunesinin 360. gününde gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.16.d. SD+UK İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Eğilme Dayanımları

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	100	100	100	100	100	100	100
SD7,5	101,92	108,97	112,23	113,82	113,47	115,10	122,66
SD7,5+UK10	60,92	72,30	78,83	88,04	103,33	110,86	116,71
SD7,5+UK20	48,28	76,52	89,51	102,33	99,58	109,27	116,96
SD7,5+UK30	38,31	66,49	86,21	108,39	96,39	106,09	106,71



Şekil 4.16. Çimento+SD+UK ile Yapılan Betonlara Ait Eğilme Dayanımları/Zaman Grafiği

4.1.2.8. %5 SD ile Farklı Oranlarda UK ve GYFC İçeren Dörtlülük Kombinasyon Betonların Eğilme Dayanımlarının Birbirlerine Göre, Sadece %5 SD İçeren Numune ve Referans Numuneye Göre Kıyaslanması

SD5 ve farklı oranlarda UK ve GYFC ikamesi ile üretilen beton karışımlarının eğilme dayanımları 4.17.a'da, 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar Çizelge 4.17.b'de, 7-28 ve 28-360 günler arası dayanım gelişimleri ise Çizelge 4.17.c'de, SD5+UK+GYFC ikameli numunelerin her bir kür süresinde R numunesine göre rölatif eğilme dayanımları Çizelge 4.17.d'de verilmektedir. Zaman ile eğilme dayanımları değeri değişimi Şekil 4.17'de görülmektedir.

Beton numune alımından itibaren takip eden 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360. günlerdeki eğilme dayanımları değerlendirilmiştir.

Referans numune 1. günde 2,61 MPa dayanım değeri ile en düşük, 360. günde ise 7,9 MPa ile en yüksek eğilme dayanım değerine ulaşmıştır. Çizelge 4.17.a'da görüldüğü üzere SD+UK+GYFC ikamesi ile yapılan betonlarda en düşük eğilme dayanım değeri 0,27 MPa ile SD5+UK35+GYFC35 numunesinin 1.

gününde, en yüksek eğilme dayanım değeri ise 9,34 MPa ile SD5+UK15+GYFC15 numunesinin 360. gününde elde edilmiştir.

Referans numuneye kıyasla bakıldığında, SD5+UK5+GYFC5 numunesi 1. günde %2,68, SD5+UK10+GYFC10, SD5+UK15+GYFC15 numuneleri 7. günde sırasıyla %3,11-%6,80 daha fazla eğilme dayanıma ulaşmışlardır. SD5+UK+GYFC ikameli numuneler referans numuneyi geçtikten sonra ikincil pozolanik reaksiyonlar sebebiyle referans numuneye göre eğilme dayanım değerleri giderek yükselmeye devam etmiştir. SD5+UK25+GYFC25, SD5+UK35+GYFC35 referans numuneye kıyasla tüm günlerde eğilme dayanım değerleri düşük kalsa bile özellikle SD5+UK25+GYFC25 numunesi 28, 90, 180, 360. günlerde sırasıyla 3,82, 5,83, 6,55 ve 7,26 MPa dayanım değerlerine ulaşmıştır. Devam eden pozolanik reaksiyonlara bağlı olarak SD5+UK25+GYFC25 numunesinin 360. gün sonrası ilerleyen yaşlarda referans numuneyi yakalayacağı düşünülebilir.

Çizelge 4.17.a. Çimento+SD+UK+YFC İçeren Beton Karışımlarının Eğilme Dayanımları (MPa)

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	2,61	3,79	5,15	6,44	7,20	7,55	7,90
SD5	2,45	4,02	5,41	7,21	7,84	8,40	9,25
SD5+UK5+GYFC5	2,68	4,15	5,67	7,02	8,05	8,43	9,09
SD5+UK10+GYFC10	1,68	3,59	5,31	6,49	8,20	8,39	9,04
SD5+UK15+GYFC15	1,46	3,78	5,50	6,84	8,02	8,96	9,34
SD5+UK25+GYFC25	0,75	2,27	3,34	3,82	5,83	6,55	7,26
SD5+UK35+GYFC35	0,27	0,82	1,31	1,94	3,05	3,74	4,35

Çizelge 4.17.b'ye göre 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar incelendiğinde; 100 kabul edilen 28 günlük R numunesine kıyasla, SD5+UK5+GYFC5, SD5+UK10+GYFC10, SD5+UK15+GYFC15 numuneleri 28. Günde sırasıyla %9, %1, %6, SD5+UK25+GYFC25 numunesi 180. günde %2 oranında daha yüksek değere ulaşmışlardır. SD5+UK35+GYFC35 numunesi ise hiçbir günde 28 günlük R numunesinin rölatif değerini yakalayamamışlardır.

Çizelge 4.17.b. 28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	41	59	80	100	112	117	123
SD5	38	62	84	112	122	130	144
SD5+UK5+GYFC5	42	64	88	109	125	131	141
SD5+UK10+GYFC10	26	56	82	101	127	130	140
SD5+UK15+GYFC15	23	59	85	106	125	139	145
SD5+UK25+GYFC25	12	35	52	59	91	102	113
SD5+UK35+GYFC35	4	13	20	30	47	58	68

Çizelge 4.17.c'ye göre 7-28 günler ve 28-360 günler arasındaki dayanım gelişimleri incelenecek olursa en düşük dayanım gelişimi 7-28 günler arasında %14,37 ile SD5+UK25+GYFC25, 28-360 günler arasında %22,67 ile R numunesinde görülmektedir. Özellikle SD5+UK25+GYFC25, SD5+UK35+GYFC35 numunesinin eğilme dayanım gelişimleri sırasıyla 28-360 günler arasında %90,05, %124,23 ile en yüksek değerlere ulaşmışlardır. Bu durum yüksek oranda SD5 oranında karışıma ilaveten UK+GYFC içeren bu karışımlarda oluşan yoğun ikincil reaksiyonlara bağlanabilir.

Çizelge 4.17.c. 7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri

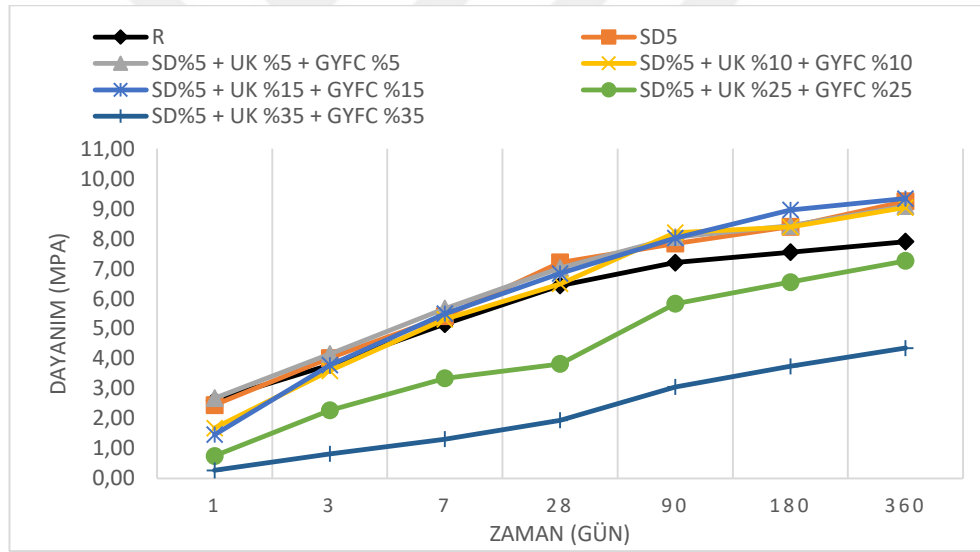
Numune	7- 28 Gün Arası	28- 360 Gün Arası
R	%25,04	%22,67
SD5	%33,27	%28,29
SD5+UK5+GYFC5	%23,81	%29,49
SD5+UK10+GYFC10	%22,22	%39,29
SD5+UK15+GYFC15	%24,36	%36,55
SD5+UK25+GYFC25	%14,37	%90,05
SD5+UK35+GYFC35	%48,09	%124,23

Çizelge 4.17.d'de tüm kür sürelerindeki R numunelerine göre rölatif eğilme dayanımları kıyaslandığında, SD5+UK5+GYFC5 numunesi 1. günde %2,68, SD5+UK10+GYFC10 numunesi 7. günde %3,11, SD5+UK15+GYFC15 numunesi 7. günde %6,80 daha fazla eğilme dayanımı kazanarak referans numuneyi geçmişlerdir. Tüm kür süreleri içerisinde R numunesine göre maksimum

rölatif eğilme dayanımı artışı %18,23 ile SD5+UK15+GYFC15 numunesinin 360. gününde gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.17.d. SD+UK+GYFC İkameli Numunelerinin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Eğilme Dayanımları

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	100	100	100	100	100	100	100
SD5	93,87	106,07	105,05	111,96	108,89	111,26	117,09
SD5+UK5+GYFC5	102,68	109,50	110,10	109,01	111,81	111,66	115,06
SD5+UK10+GYFC10	64,37	94,72	103,11	100,78	113,89	111,13	114,43
SD5+UK15+GYFC15	55,94	99,74	106,80	106,21	111,39	118,68	118,23
SD5+UK25+GYFC25	28,74	59,89	64,85	59,32	80,97	86,75	91,90
SD5+UK35+GYFC35	10,34	21,64	25,44	30,12	42,36	49,54	55,06



Şekil 4.17. Çimento+SD+UK+GYFC İle Yapılan Betonlara Ait Eğilme Dayanımları/Zaman Grafiği

4.1.2.9. %7,5 SD ile Farklı Oranlarda UK ve GYFC İçeren Dörtlü Kombinasyon Betonların Eğilme Dayanımlarının Birbirlerine Göre, Sadece %7,5 SD İçeren Numune ve Referans Numuneye Göre Kıyaslanması

SD7,5 ve farklı oranlarda UK ve GYFC ikamesi ile üretilen beton karışımlarının eğilme dayanımları 4.18.a'da, 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar Çizelge 4.18.b'de, 7-28 ve 28-360 günler arası dayanım gelişimleri ise Çizelge 4.18.c'de, SD7,5+UK+GYFC ikameli numunelerin her bir kür süresinde R numunesine göre rölatif eğilme dayanımları Çizelge 4.18.d'de verilmektedir. Zaman ile eğilme dayanımları değeri değişimi Şekil 4.18'de görülmektedir.

Beton numune alımından itibaren takip eden 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360. günlerdeki eğilme dayanımları değerlendirilmiştir.

Referans numune 1. günde 2,61 MPa dayanım değeri ile en düşük, 360. günde ise 7,9 MPa ile en yüksek dayanım değerine ulaşmıştır. Çizelge 4.18.a'da görüldüğü üzere SD+UK+GYFC ikamesi ile yapılan betonlarda en düşük eğilme dayanım değeri 0,28 MPa ile SD7,5+UK35+GYFC35 numunesinin 1. gününde, en yüksek eğilme dayanım değeri ise 9,76 MPa ile SD7,5+UK10+GYFC10 numunesinin 360. gününde elde edilmiştir.

Referans numuneye kıyasla, SD7,5+UK5+GYFC5 numunesi 3. günde %7,97, SD7,5+UK10+GYFC10 7. günde aynı eğilme dayanım değeri, SD7,5+UK15+GYFC15 numunesi 7. günde %4,66 daha fazla eğilme dayanım değerine ulaşmışlardır. SD7,5+UK+GYFC ikameli numuneler referans numuneyi geçtikten sonra ikincil puzolanik reaksiyonlar sebebiyle referans numuneye göre eğilme dayanım değerleri giderek yükselmeye devam etmiştir. SD7,5+UK25+GYFC25, SD7,5+UK35+GYFC35 referans numuneye kıyasla tüm günlerde eğilme dayanım değerleri düşük kalsa bile özellikle SD7,5+UK25+GYFC25 numunesi 28, 90, 180, 360. günlerde sırasıyla 3,8, 5,98, 7,14 ve 7,84 MPa dayanım değerlerine ulaşmıştır. Devam eden puzolanik

reaksiyonlara bağlı olarak SD7,5+UK25+GYFC25 numunesinin 360. gün sonrası ilerleyen yaşlarda referans numuneyi yakalayacağı düşünülebilir.

Çizelge 4.18.a. Çimento+SD+UK+YFC İçeren Beton Karışımlarının Eğilme Dayanımları (MPa)

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	2,61	3,79	5,15	6,44	7,2	7,55	7,9
SD7,5	2,66	4,13	5,78	7,33	8,17	8,69	9,69
SD7,5+UK5+GYFC5	2,41	4,85	5,95	6,85	7,92	8,67	9,48
SD7,5+UK10+GYFC10	1,54	3,37	5,15	7,14	8,35	8,85	9,76
SD7,5+UK15+GYFC15	1,38	3,48	5,39	7,05	8,26	8,87	9,59
SD7,5+UK25+GYFC25	0,56	2,57	3,79	3,8	5,98	7,14	7,84
SD7,5+UK35+GYFC35	0,28	0,7	1,3	2,26	2,81	4,08	4,49

Çizelge 4.18.b'ye göre 28 günlük R numunesine göre rölatif dayanımlar incelendiğinde; 100 kabul edilen 28 günlük R numunesine kıyasla, SD7,5+UK5+GYFC5, SD7,5+UK10+GYFC10, SD7,5+UK15+GYFC15 numuneleri 28. Günde sırasıyla %6, %11, %9, SD7,5+UK25+GYFC25 numunesi 180. günde %11 oranında daha yüksek değere ulaşmışlardır. SD7,5+UK35+GYFC35 numunesi ise hiçbir günde 28 günlük R numunesinin rölatif değerini yakalayamamışlardır.

Çizelge 4.18.b. 28 Günlük R Numunesine Göre Rölatif Dayanımlar

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	41	59	80	100	112	117	123
SD7,5	41	64	90	114	127	135	150
SD7,5+UK5+GYFC5	37	75	92	106	123	135	147
SD7,5+UK10+GYFC10	24	52	80	111	130	137	152
SD7,5+UK15+GYFC15	21	54	84	109	128	138	149
SD7,5+UK25+GYFC25	9	40	59	59	93	111	122
SD7,5+UK35+GYFC35	4	11	20	35	44	63	70

Çizelge 4.18.c'ye göre 7-28 günler ve 28-360 günler arasındaki dayanım gelişimleri incelenecek olursa en düşük dayanım gelişimi 7-28 günler arasında %0,26 ile SD5+UK25+GYFC25, 28-360 günler arasında %22,67 ile R

numunesinde görülmektedir. Özellikle SD7,5+UK25+GYFC25, SD7,5+UK35+GYFC35 numunesinin eğilme dayanım gelişimleri sırasıyla 28-360 günler arasında %106,32, %98,67 ile en yüksek değerlere ulaşmışlardır. Bu durum yüksek oranda SD7,5 oranında karışıma ilaveten UK+ GYFC içeren bu karışımlarda oluşan yoğun ikincil reaksiyonlara bağlanabilir.

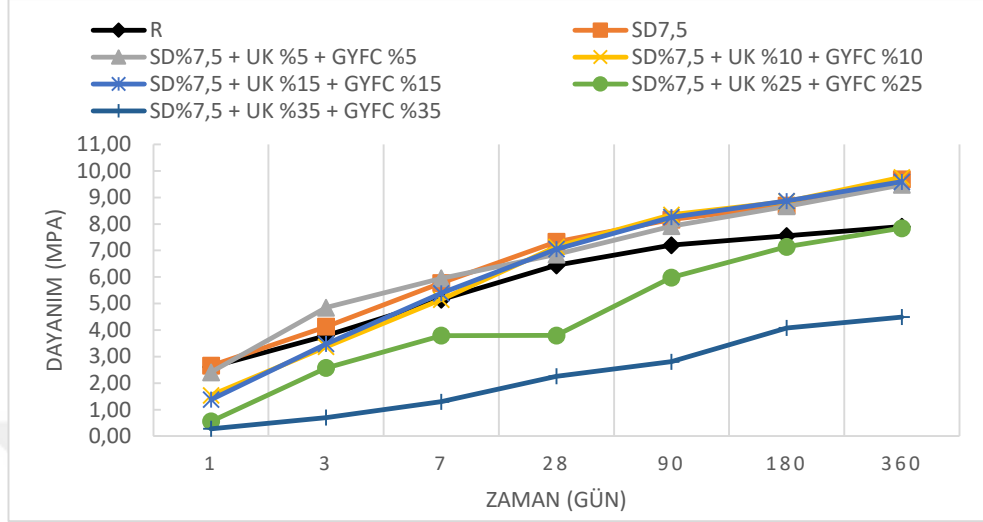
Çizelge 4.18.c. 7-28 ve 28-360 Günler Arası Dayanım Gelişimleri

Numune	7- 28 Gün Arası	28- 360 Gün Arası
R	%25,04	%22,67
SD7,5	%26,82	%32,20
SD7,5+UK5+GYFC5	%15,13	%38,39
SD7,5+UK10+GYFC10	%38,64	%36,69
SD7,5+UK15+GYFC15	%30,80	%36,03
SD7,5+UK25+GYFC25	%0,26	%106,32
SD7,5+UK35+GYFC35	%73,85	%98,67

Çizelge 4.18.d’de tüm kür sürelerindeki R numunelerine göre rölatif eğilme dayanımları kıyaslandığında, SD7,5+UK5+GYFC5 numunesi 3. günde %27,97, SD7,5+UK10+GYFC10 numunesi 28. günde %10,87, SD7,5+UK15+GYFC15 numunesi 7. günde %4,66 daha fazla eğilme dayanımı ile referans numuneyi geçmişlerdir. Tüm kür sürelerinde R’ ye göre maksimum rölatif eğilme dayanımı artışı %27,97 ile SD7,5+UK5+GYFC5 numunesinin 3. gününde gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.18.d. SD+UK+GYFC İkameli Numunelerin Her Bir Kür Süresinde R Numunesine Göre Rölatif Eğilme Dayanımları

Numune	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
R	100	100	100	100	100	100	100
SD7,5	101,92	108,97	112,23	113,82	113,47	115,10	122,66
SD7,5+UK5+GYFC5	92,34	127,97	115,53	106,37	110,00	114,83	120,00
SD7,5+UK10+GYFC10	59,00	88,92	100,00	110,87	115,97	117,22	123,54
SD7,5+UK15+GYFC15	52,87	91,82	104,66	109,47	114,72	117,48	121,39
SD7,5+UK25+GYFC25	21,46	67,81	73,59	59,01	83,06	94,57	99,24
SD7,5+UK35+GYFC35	10,73	18,47	25,24	35,09	39,03	54,04	56,84

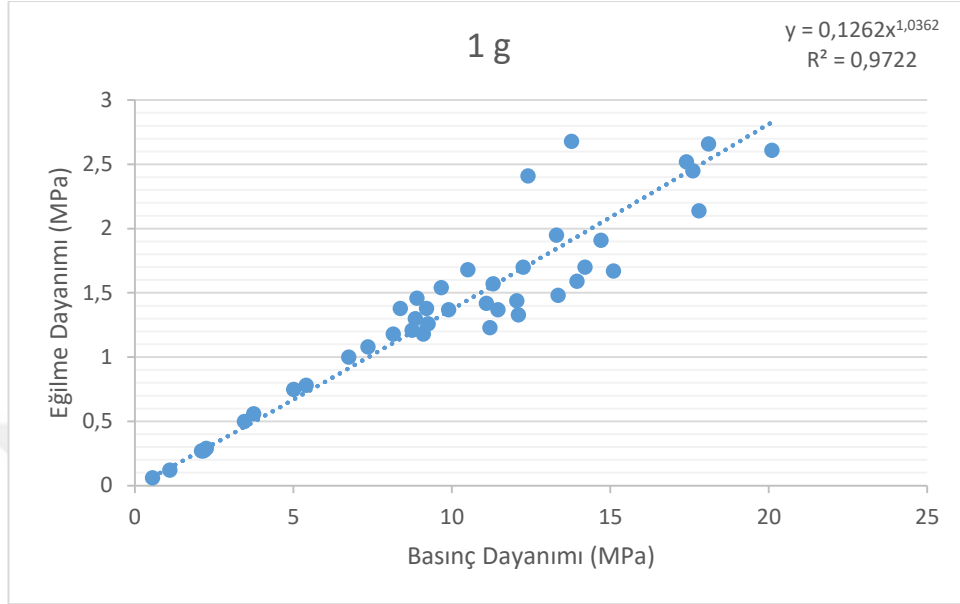


Şekil 4.18. Çimento+SD+UK+YFC ile Yapılan Betonlara Ait Eğilme Dayanımları/Zaman Grafiği

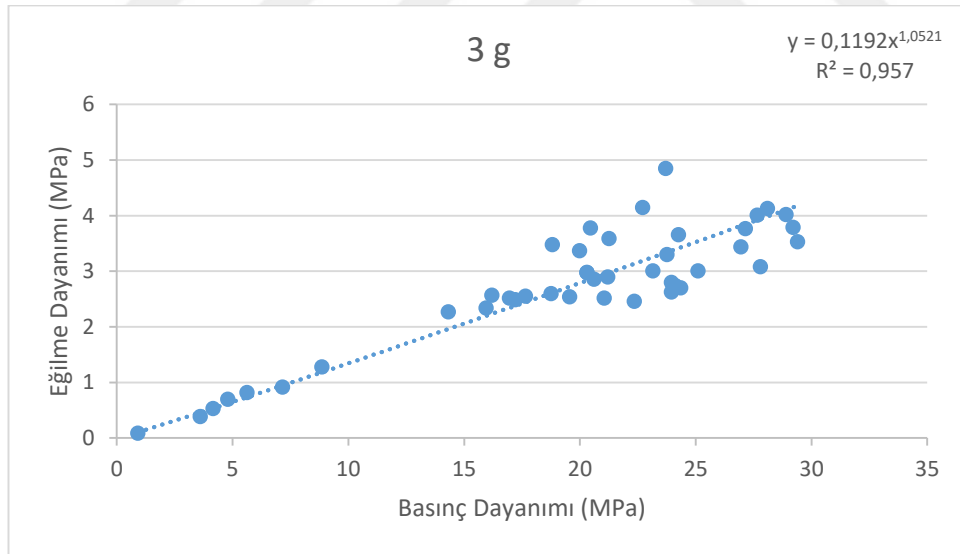
4.1.3. Basınç ve Eğilme Dayanımları Arasındaki İlişkiler

4.1.3.1. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Kür Süresine Göre Oluşan İlişkiler

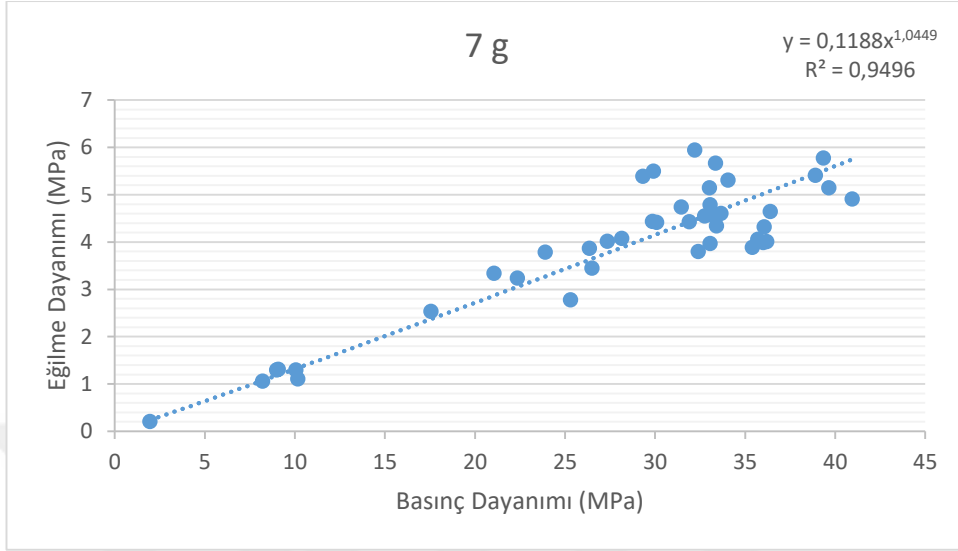
Mekanik deneylerin yapıldığı tüm karışımların 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360. günlerdeki basınç ve eğilme dayanımları sonuçları her bir gün için ayrı ayrı olarak Şekil 4.19 dan Şekil 4.25 e kadar karşılaştırılmış ve her gün için bir üssel bir eğilim çizgisi eklenerek, sonuçlar arasındaki korelasyon araştırılmıştır. Görüldüğü gibi, tüm yaşlar için determinasyon katsayısı (korelasyonun karesi= R^2) oldukça yüksek çıkmıştır. İlk 28 gün için R^2 değeri, 0,8055 ile 0,9102 arasında değişmiştir. Bu değer, 90 gün sonunda 0,9445 olmuştur. 180 gün ve 360 günde ise, R^2 değeri 0,99 mertebesindedir.



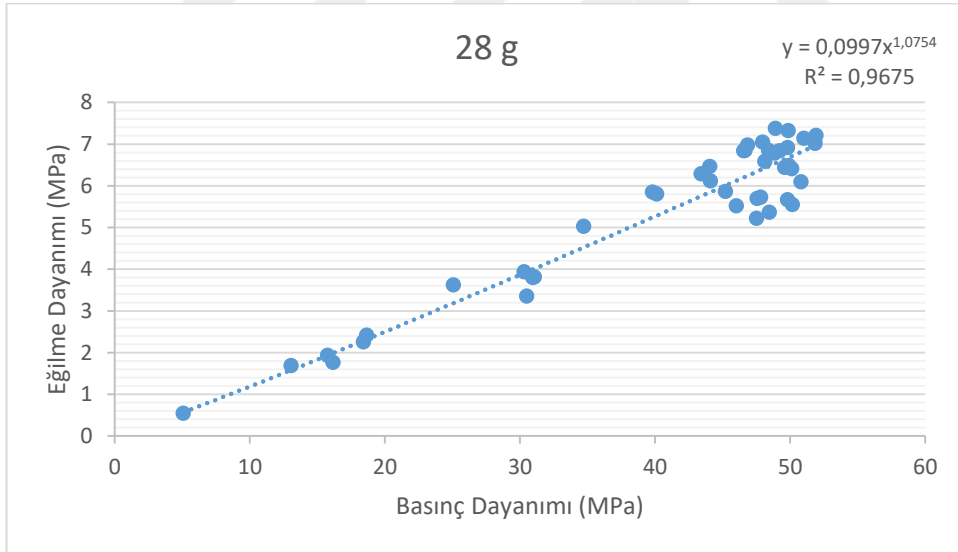
Şekil 4.19. 1. Günde Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Kür Süresine Göre Oluşan İlişkiler



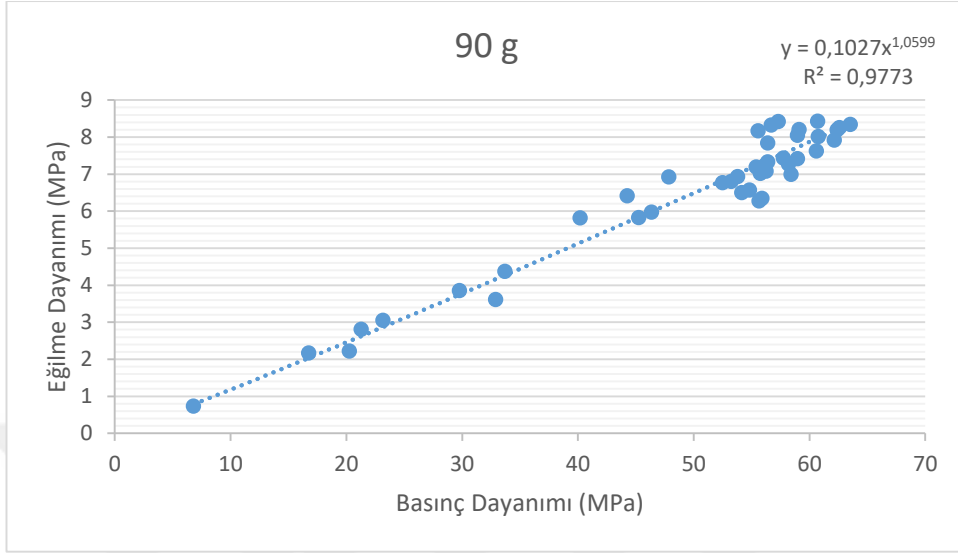
Şekil 4.20. 3. Günde Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Kür Süresine Göre Oluşan İlişkiler



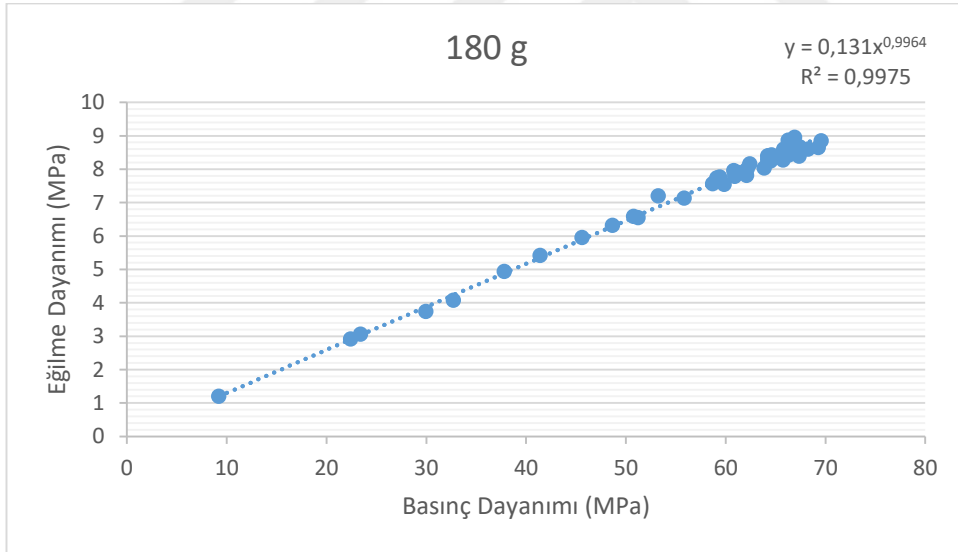
Şekil 4.21. 7. Günde Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Kür Süresine Göre Oluşan İlişkiler



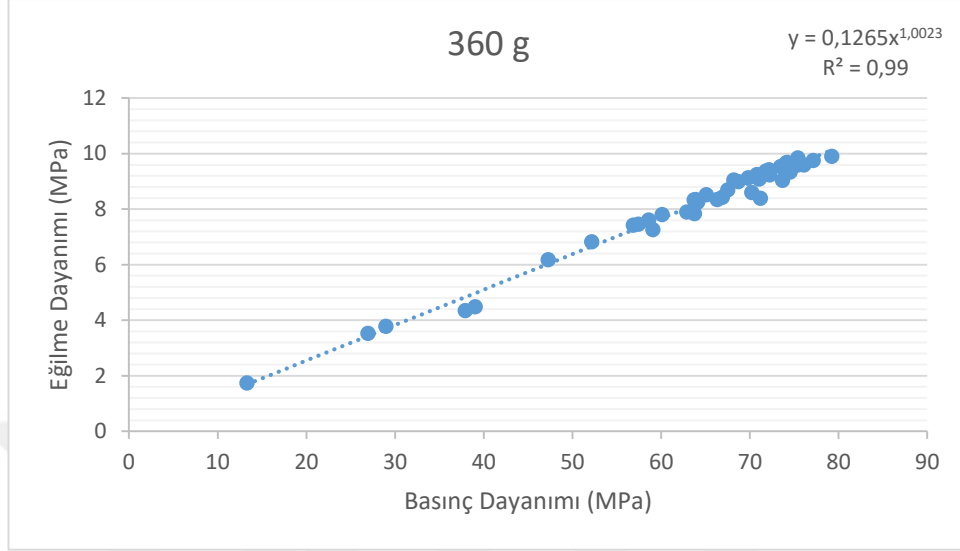
Şekil 4.22. 28. Günde Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Kür Süresine Göre Oluşan İlişkiler



Şekil 4.23. 90. Günde Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Kür Süresine Göre Oluşan İlişkiler



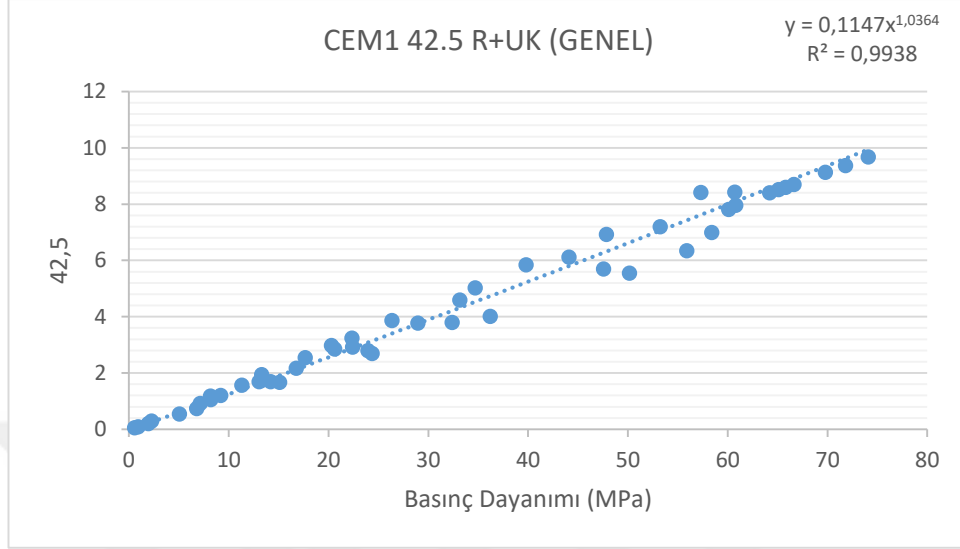
Şekil 4.24. 180. Gün Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Kür Süresine Göre Oluşan İlişkiler



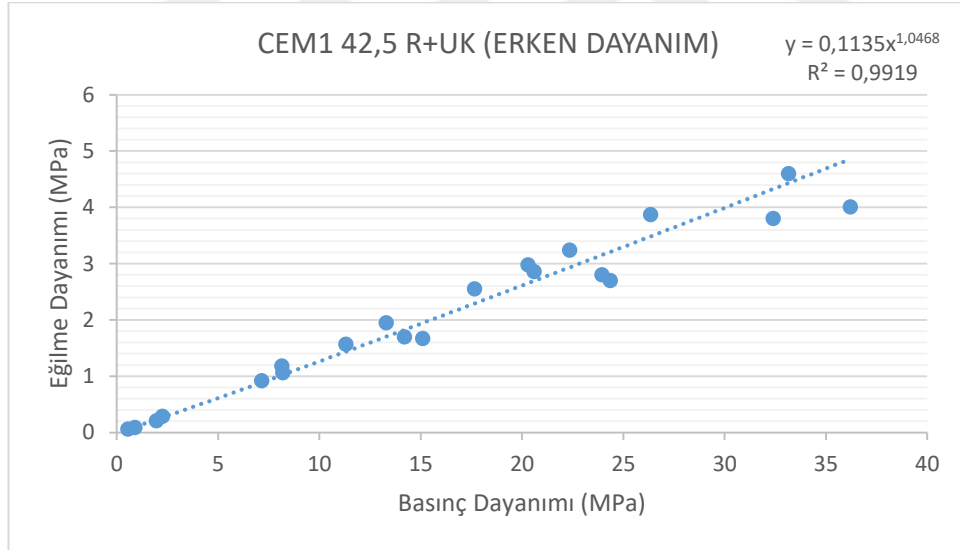
Şekil 4.25. 360. Gün Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Kür Süresine Göre Oluşan İlişkiler

4.1.3.2. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre Olan İlişkiler

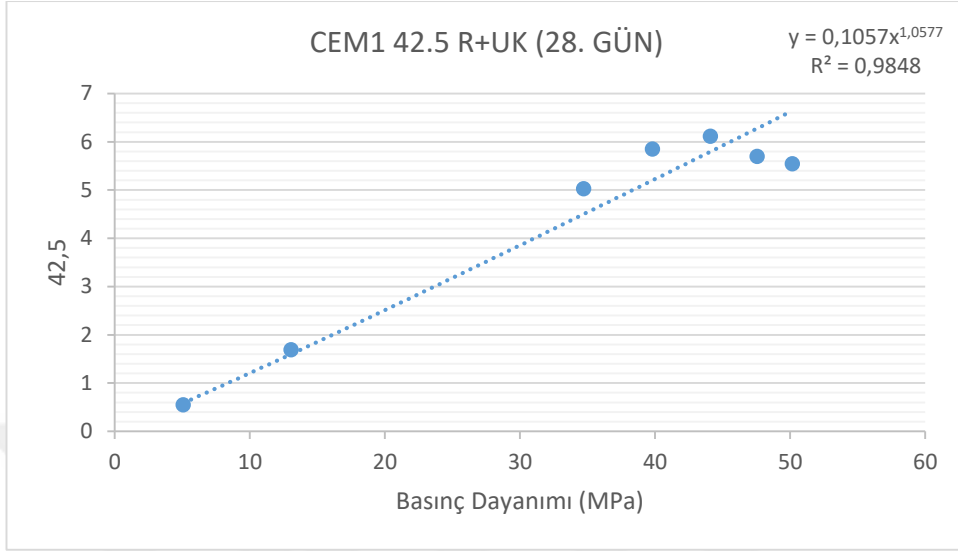
Basınç dayanımı ve eğilme dayanımı arasındaki korelasyon, verileri karışım tiplerine göre ayrılarak da araştırılmıştır. Şekil 4.26 dan Şekil 4.31. kadar ikili, üçlü ve dörtlü bağlayıcı betonlar için basınç dayanımı ve eğilme dayanımı ilişkisi gösterilmektedir. Bütün beton reçeteleri için karışım tiplerine göre genel olarak bulunan determinasyon katsayılarının yanında ayrıca erken dayanım için (1, 3, 7. günler), 28. gün için ve geç dayanım için (90, 180, 360. günler) determinasyon katsayıları bulunmuş ve grafiklerde gösterilmiştir. Genel karışımlar için tüm determinasyon katsayıları (R^2) 0,9686 ile 0,9849 arasındaki değerler olarak bulunmuştur.



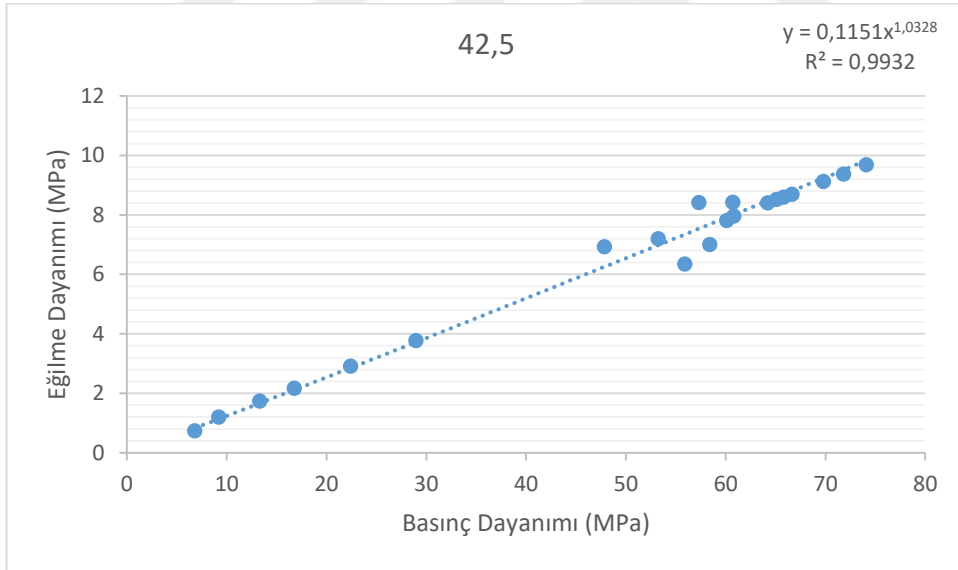
Şekil 4.26. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R+UK) Olan Genel İlişki



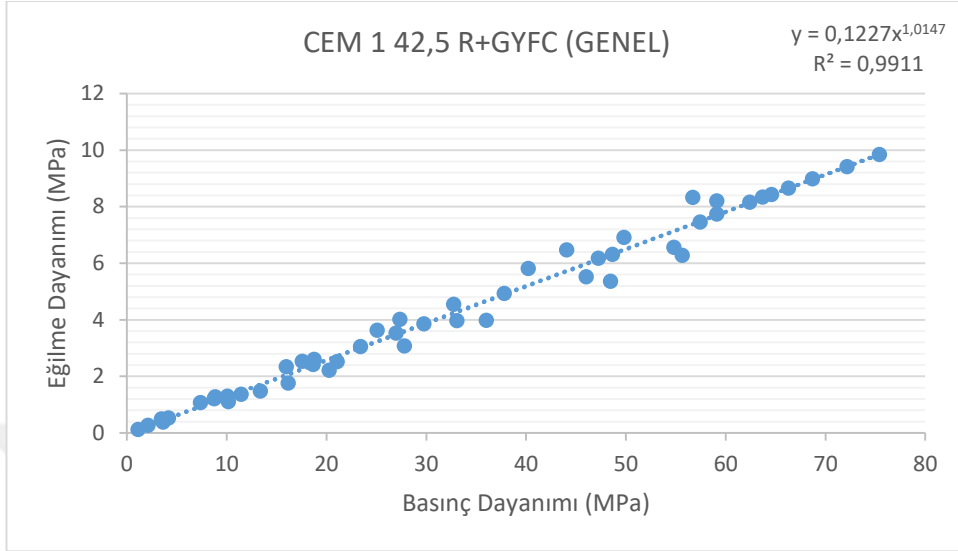
Şekil 4.26.a. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R+UK) Olan Erken Dayanım İlişkisi



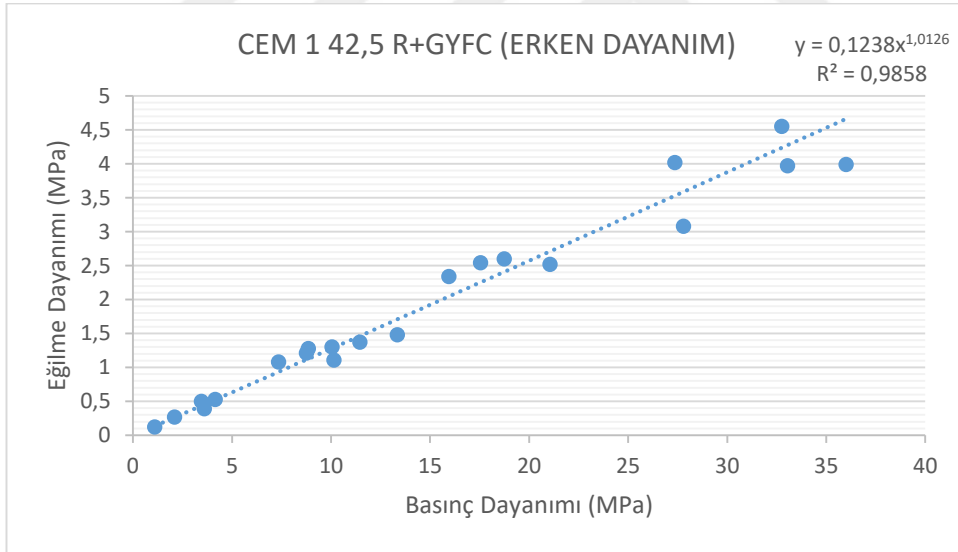
Şekil 4.26.b. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R+UK) Olan 28. Gün İlişkisi



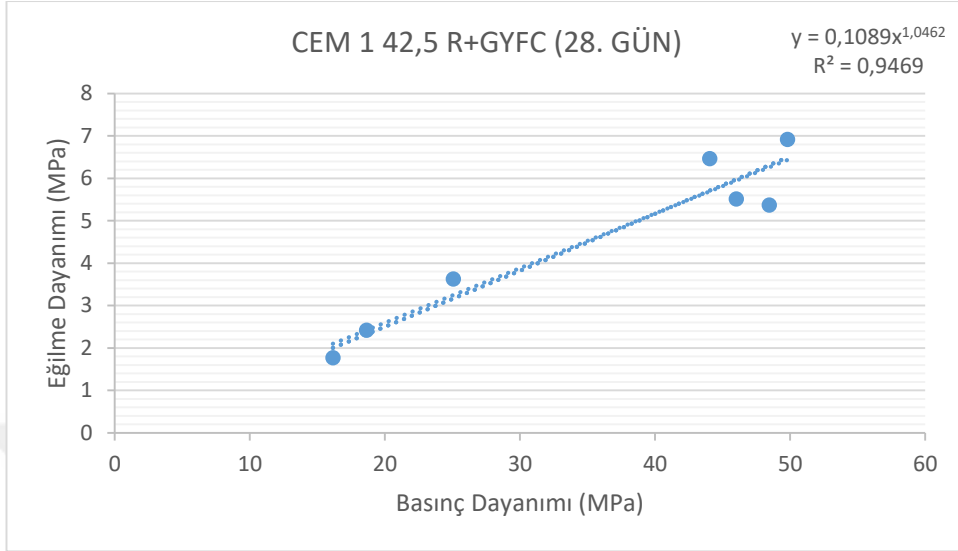
Şekil 4.26.c. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R+UK) Olan Geç Dayanım İlişkisi



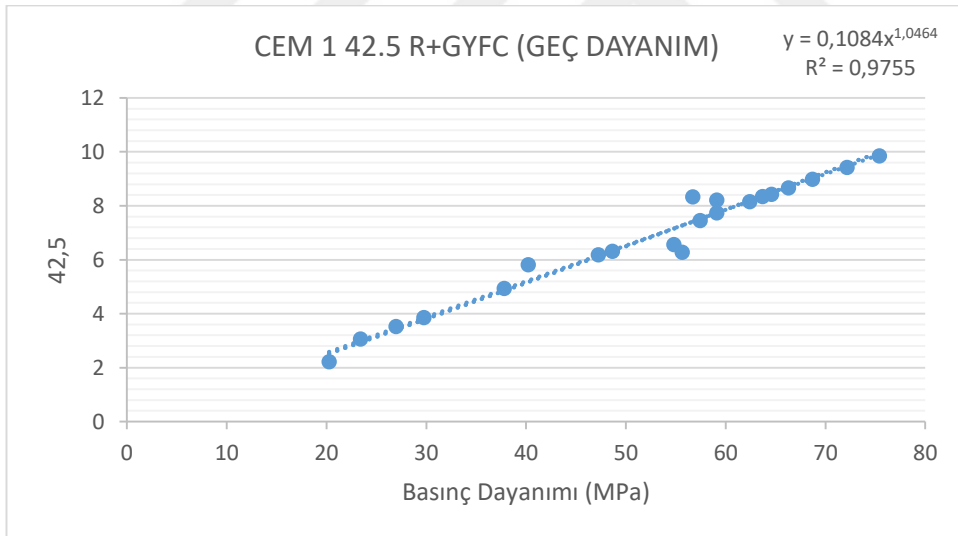
Şekil 4.27. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +GYCF) Olan Genel İlişki



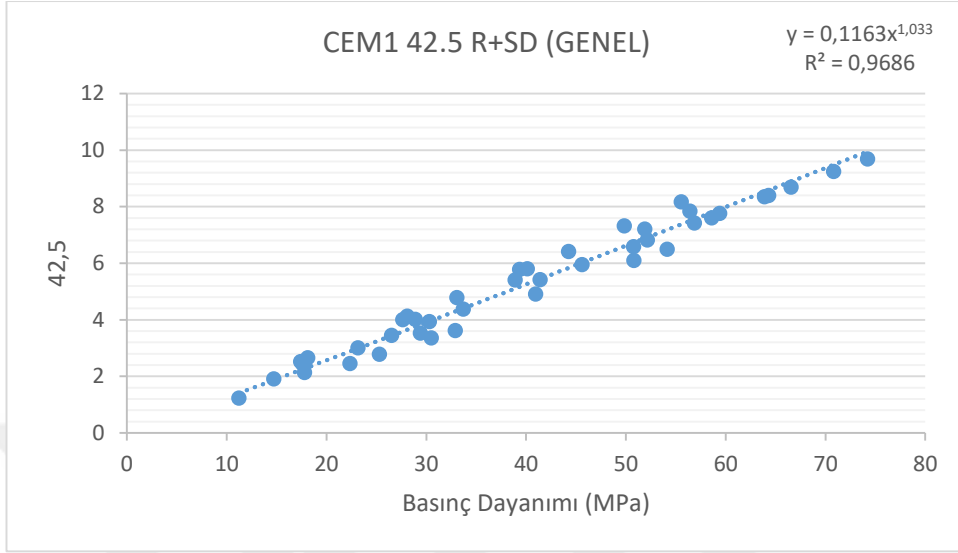
Şekil 4.27.a. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +GYCF) Olan Erken Dayanım İlişkisi



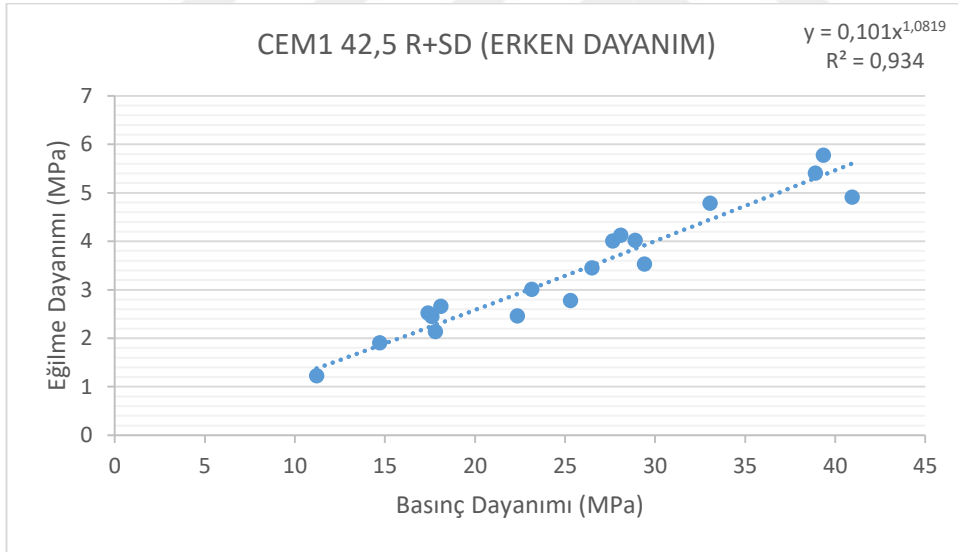
Şekil 4.27.b. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +GYCF) Olan 28. Gün İlişkisi



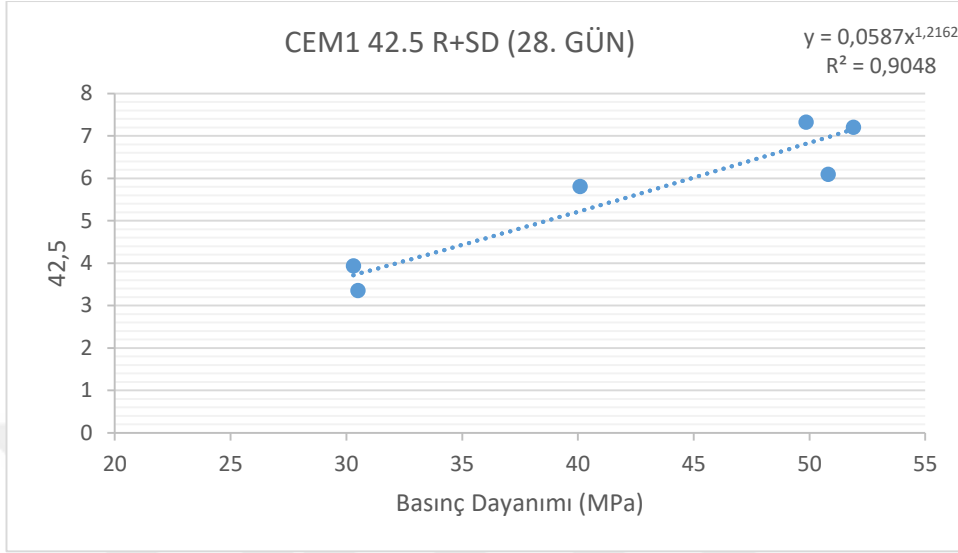
Şekil 4.27.c. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +GYCF) Olan Geç Dayanım İlişkisi



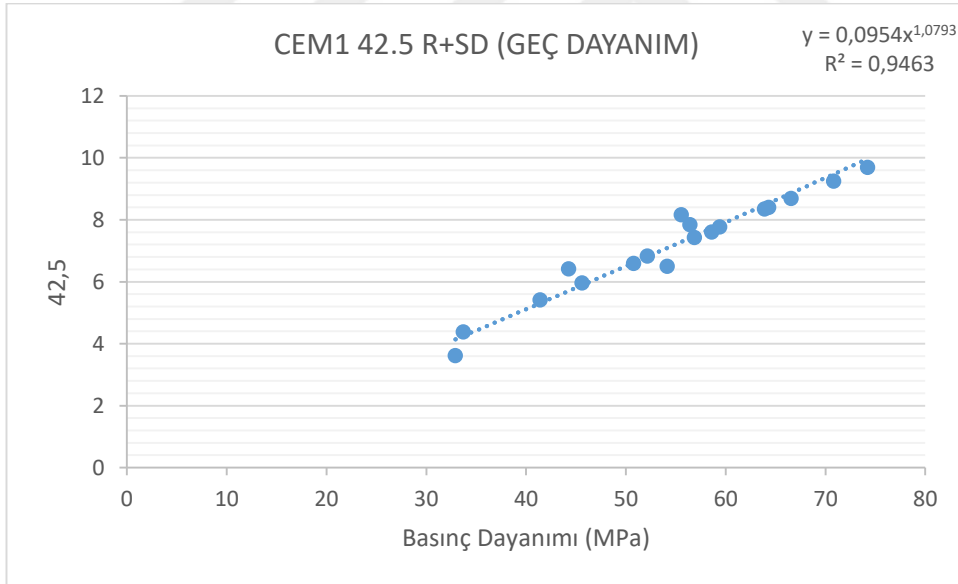
Şekil 4.28. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +SD) Olan Genel İlişki



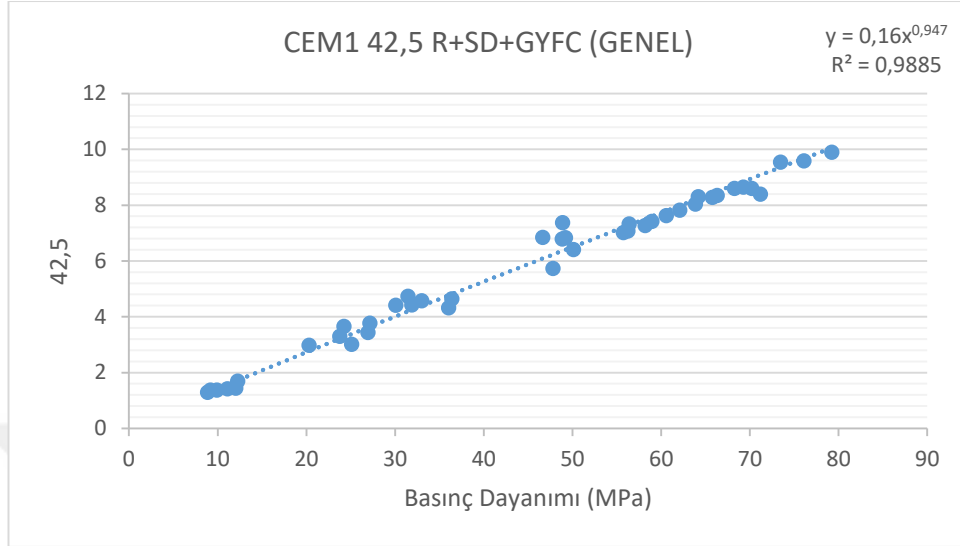
Şekil 4.28.a. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +SD) Olan Erken Dayanım İlişkisi



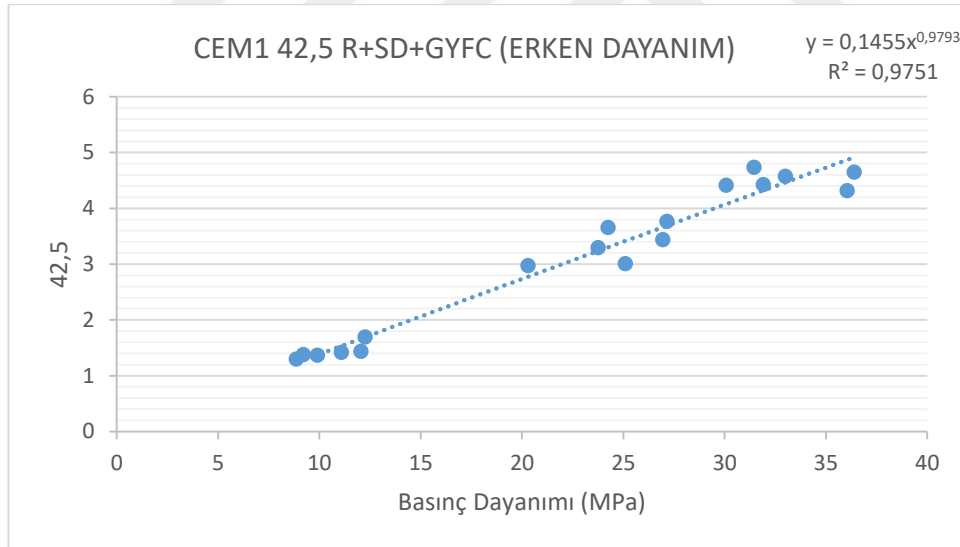
Şekil 4.28.b. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +SD) Olan 28. Gün İlişkisi



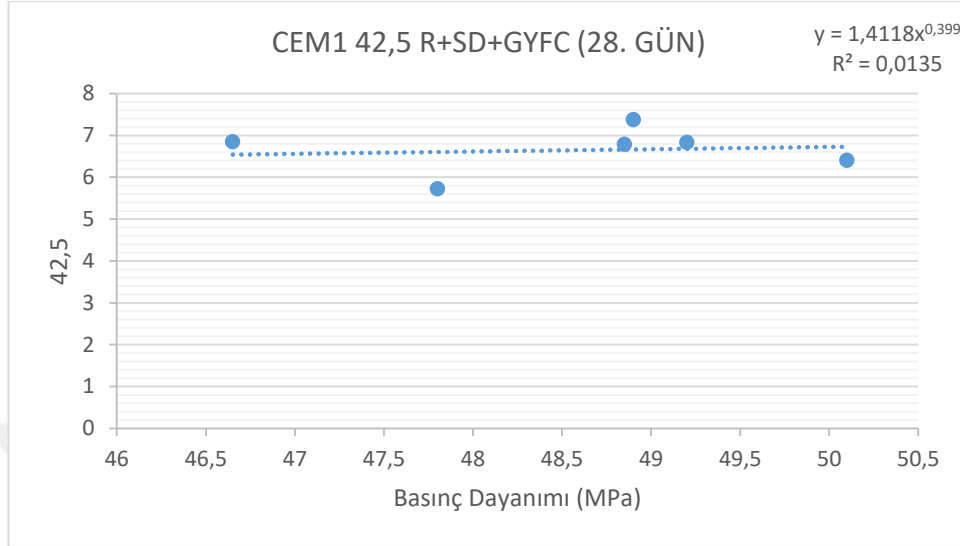
Şekil 4.28.c. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +SD) Olan Geç Dayanım İlişkisi



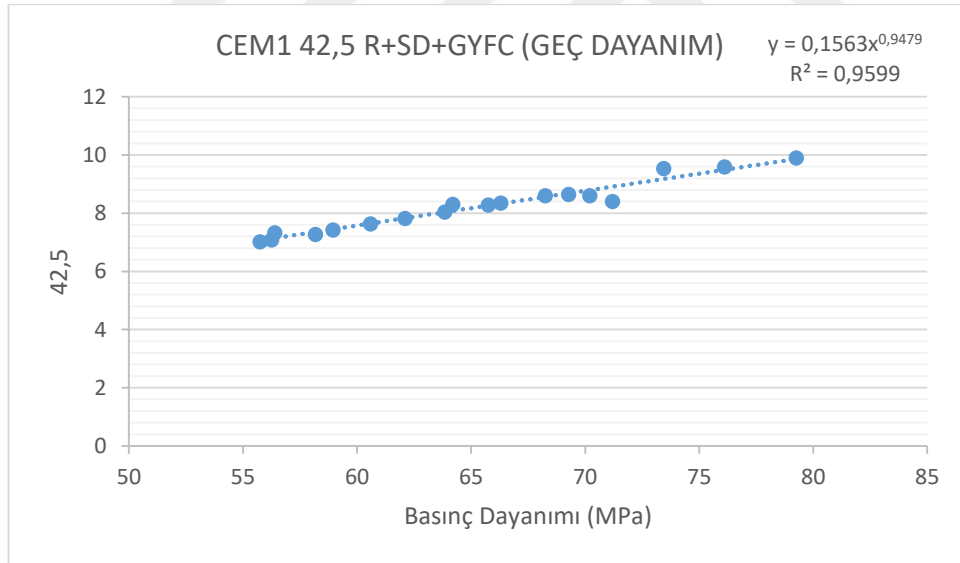
Şekil 4.29. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R+SD+GYCF) Olan Genel İlişki



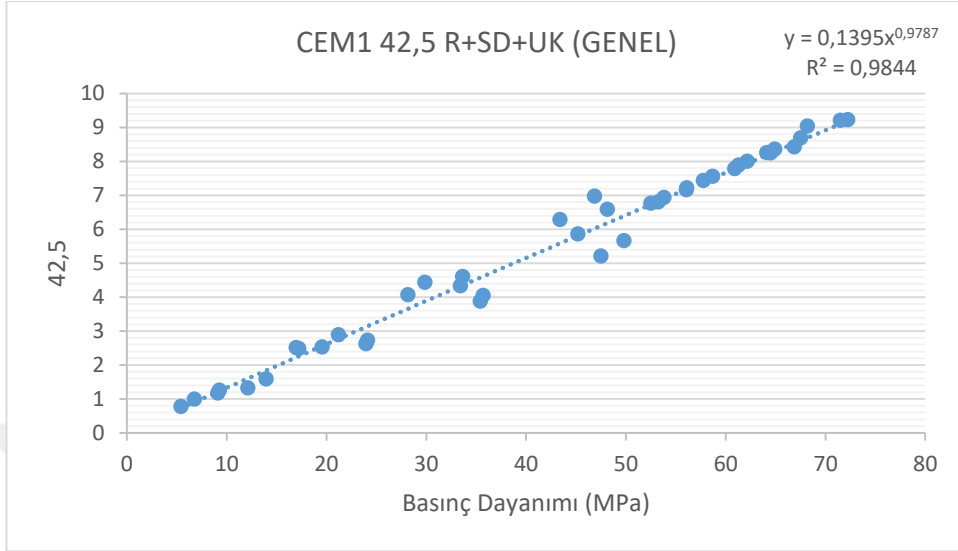
Şekil 4.29.a. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R+SD+GYCF) Olan Erken Dayanım İlişkisi



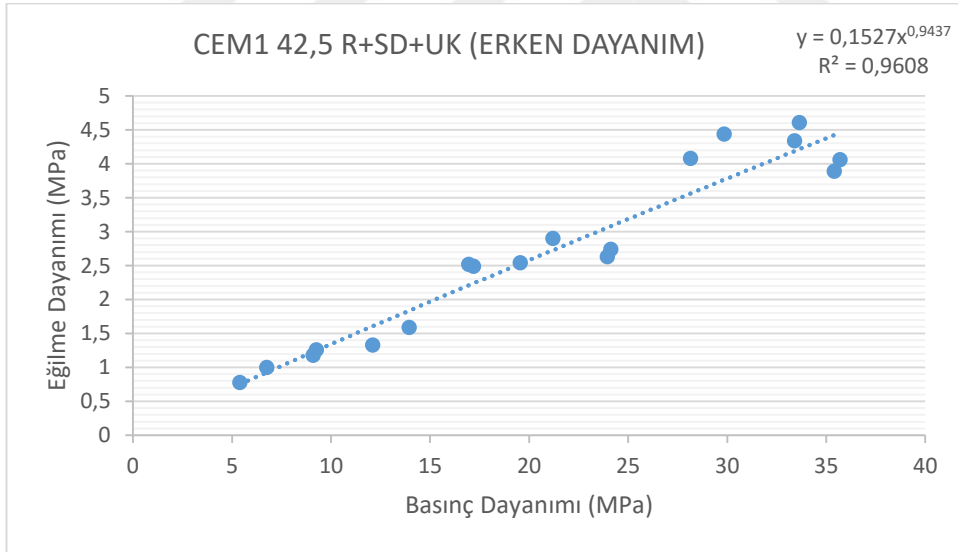
Şekil 4.29.b. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R+SD+GYCF) Olan 28. Gün İlişkisi



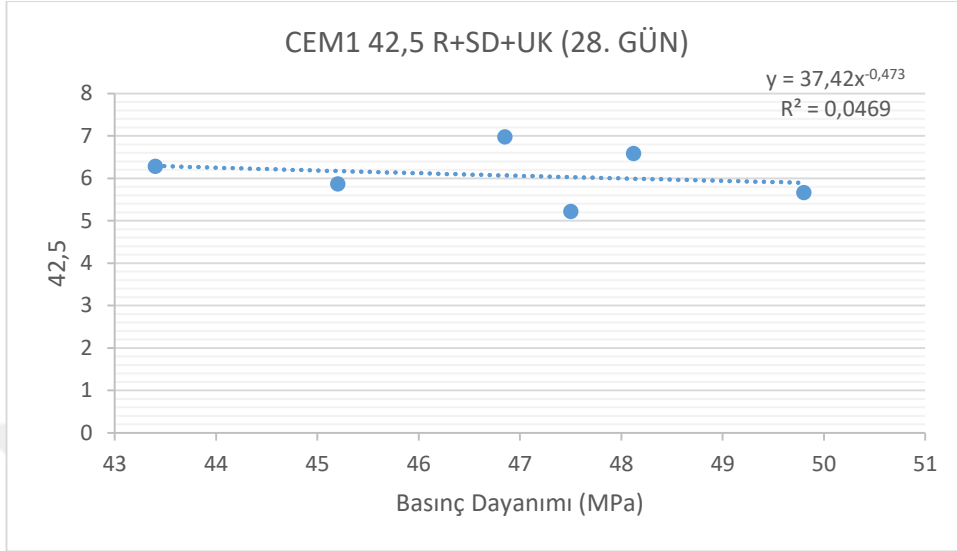
Şekil 4.29.c. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R+SD+GYCF) Olan Geç Dayanım İlişkisi



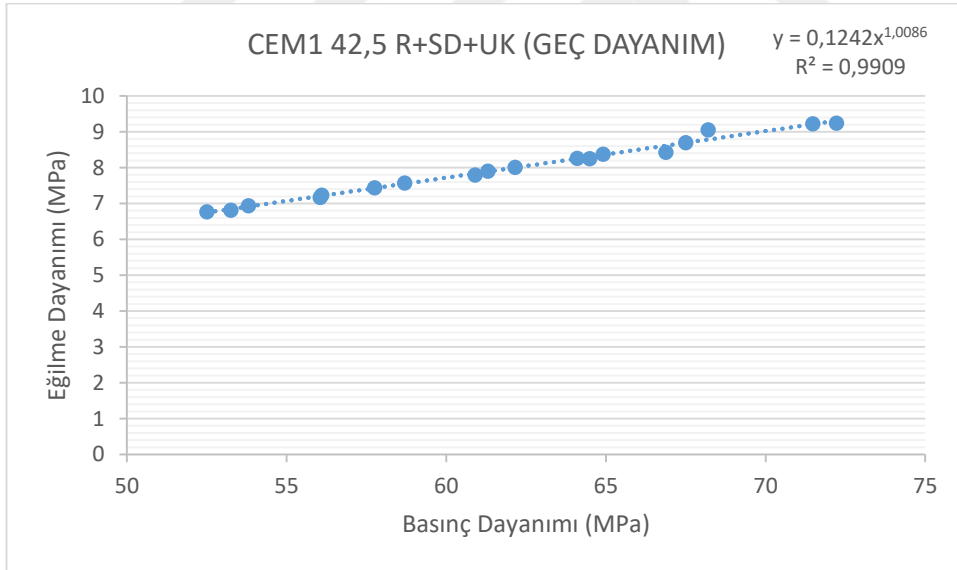
Şekil 4.30. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +SD+UK) Olan Genel İlişki



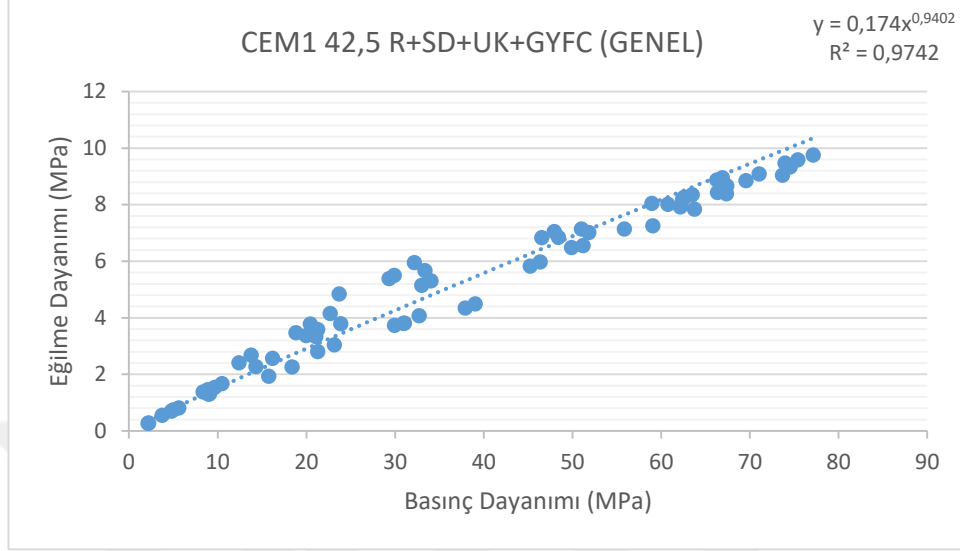
Şekil 4.30.a. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +SD+UK) Olan Erken Dayanım İlişkisi



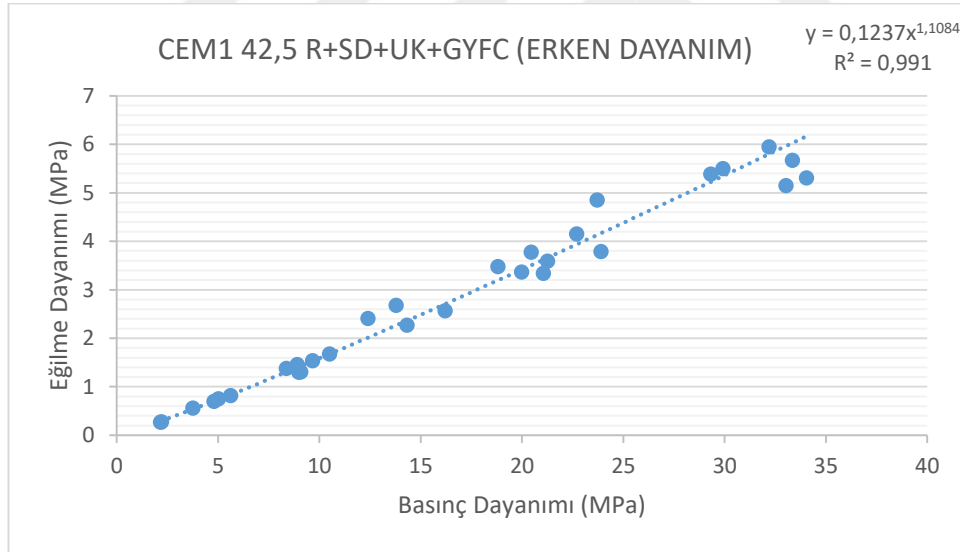
Şekil 4.30.b. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +SD+UK) Olan 28.Gün İlişkisi



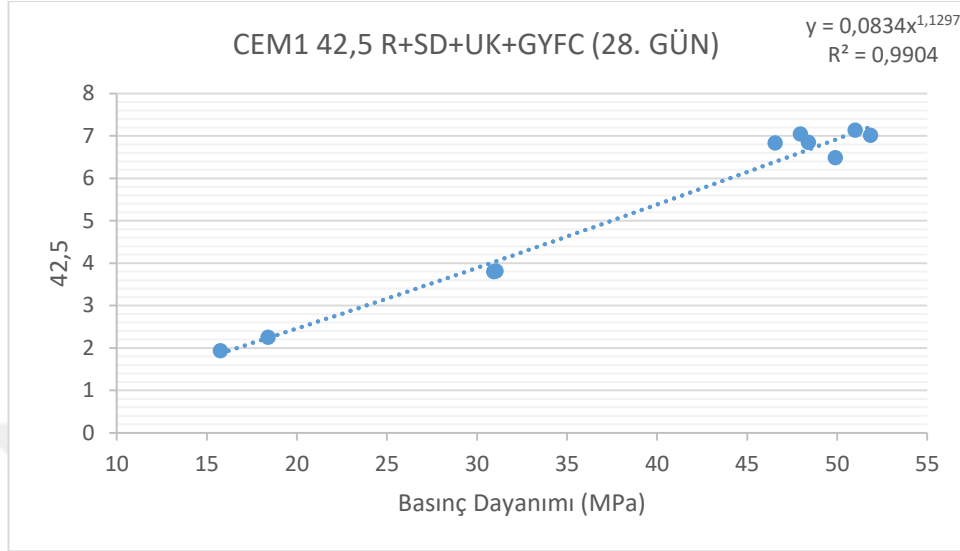
Şekil 4.30.c. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +SD+UK) Olan Geç Dayanım İlişkisi



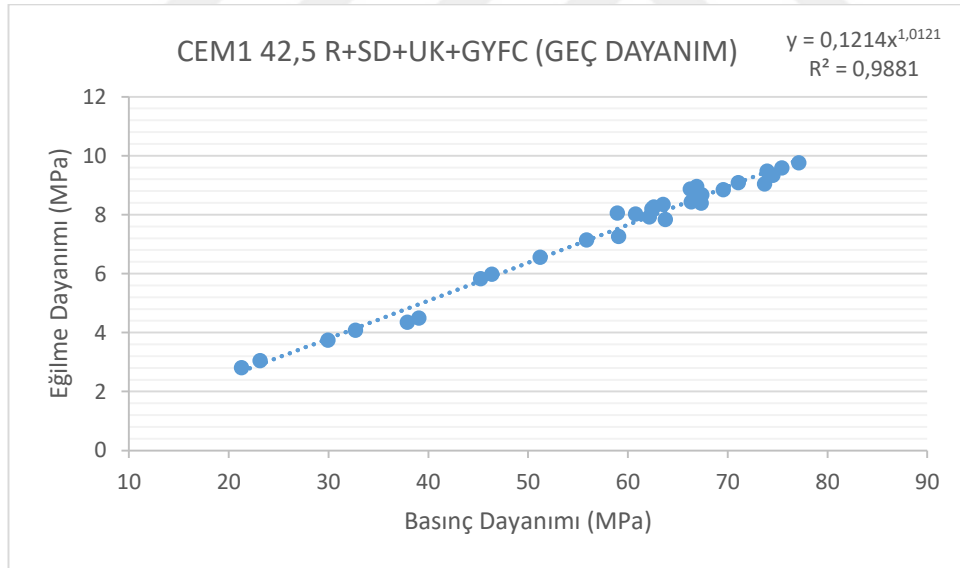
Şekil 4.31. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +SD+UK+GYCF) Olan Genel İlişki



Şekil 4.31.a. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +SD+UK+GYCF) Olan Erken Dayanım İlişkisi



Şekil 4.31.b. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +SD+UK+GYCF) Olan 28. Gün İlişkisi



Şekil 4.31.c. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Bağlayıcı Tipine Göre (CEM1 42,5 R +SD+UK+GYCF) Olan Geç Dayanım İlişkisi

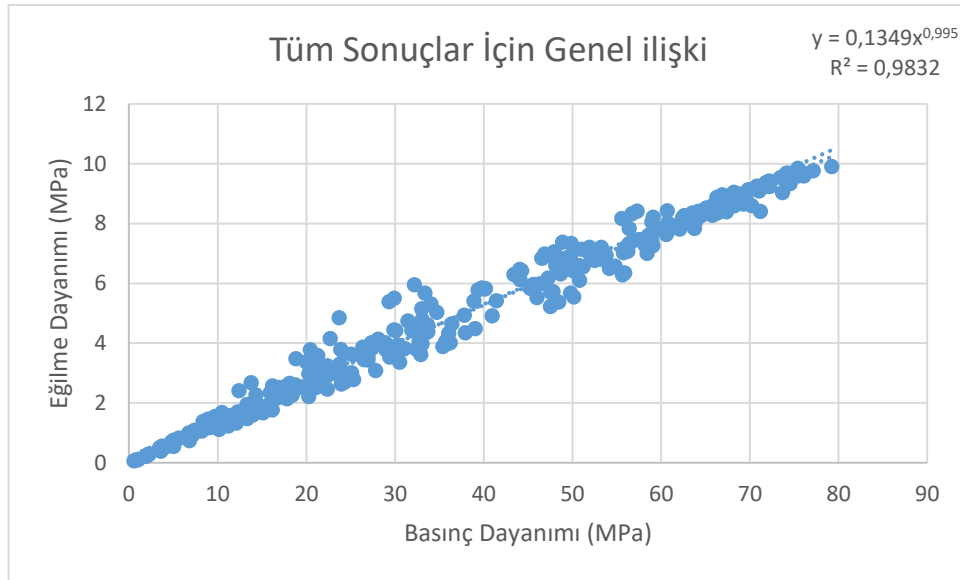
Buna göre, Şekil 4.19. dan Şekil 4.31. e kadar olan tüm genel grafikler karşılaştırıldığında, basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasındaki ilişkinin bağlayıcı tipinden ziyade, kür süresinden daha fazla etkilendiği görülmektedir. Çünkü kür süresine göre bulunan R^2 değerleri daha düşük ve daha değişkendir.

Çizelge 4.19’da bu çalışmada referans alınan tüm karışımların erken (1, 3, 7. gün), 28. gün ve geç (90, 180, 360 gün) kür süreleri için basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişkinin üssel ve doğrusal denklemleri ve R^2 değerleri verilmiştir.

Karışım çeşitleri ve kür süresine göre olan tüm deneysel verilerin tek grafik üzerinde gösterilmesiyle elde edilen üssel eğilim çizgisine göre (Şekil 4.32.a), basınç dayanımı ile eğilme dayanımı (MPa cinsinden) arasındaki ilişki aşağıdaki gibi olmuştur;

$$\text{Eğilme Dayanımı} = 0,1349 * \text{Basınç Dayanımı}^{0,995}$$

Bu ilişkide R^2 değeri ise, 0,976 gibi oldukça yüksek bir değer olup, kuvvetli bir ilişkinin var olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.32.a. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Genel İlişki

Çizelge 4.19. Tüm Karışımların Erken, 28. Gün ve Geç Dayanım Değerlerine Göre Üssel, Doğrusal Denklem ve R² Değerleri

BETON REÇETELERİ	ÜSSEL SONUÇLAR		LİNEER SONUÇLAR	
	DENKLEM	R ²	DENKLEM	R ²
UK (GENEL)	$y = 0,1147x^{1,0364}$	0,9843	$y = 0,1306x + 0,0053$	0,9846
UK (ERKEN DAYANIM)	$y = 0,1135x^{1,0468}$	0,9535	$y = 0,1246x + 0,0811$	0,9562
UK (28. GÜN)	$y = 0,1057x^{1,0577}$	0,9303	$y = 0,1242x + 0,1967$	0,9348
UK (GEÇ DAYANIM)	$y = 0,1151x^{1,0328}$	0,9831	$y = 0,1315x - 0,0128$	0,9834
GYFC (GENEL)	$y = 0,1227x^{1,0147}$	0,9839	$y = 0,1308x - 0,0316$	0,9839
GYFC (ERKEN DAYANIM)	$y = 0,1238x^{1,0126}$	0,9619	$y = 0,1235x + 0,067$	0,9624
GYFC (28. GÜN)	$y = 0,1089x^{1,0462}$	0,9129	$y = 0,1288x + 0,0192$	0,9139
GYFC (GEÇ DAYANIM)	$y = 0,1084x^{1,0464}$	0,9695	$y = 0,1325x - 0,0991$	0,9699
SD (GENEL)	$y = 0,1163x^{1,033}$	0,971	$y = 0,1333x - 0,0499$	0,9714
SD (ERKEN DAYANIM)	$y = 0,101x^{1,0819}$	0,9258	$y = 0,1405x - 0,1945$	0,9262
SD (28. GÜN)	$y = 0,0587x^{1,2162}$	0,8862	$y = 0,1544x - 0,8974$	0,89
SD (GEÇ DAYANIM)	$y = 0,0954x^{1,0793}$	0,9491	$y = 0,1351x - 0,2045$	0,9507
SD+GYFC (GENEL)	$y = 0,16x^{0,947}$	0,9849	$y = 0,1216x + 0,3699$	0,9837
SD+GYFC (ERKEN DAYANIM)	$y = 0,1455x^{0,9793}$	0,9594	$y = 0,1325x + 0,0898$	0,9591
SD+GYFC (28. GÜN)	$y = 1,4118x^{0,399}$	0,0115	$y = 0,0494x + 4,2679$	0,0115
SD+GYFC (GEÇ DAYANIM)	$y = 0,1563x^{0,9479}$	0,9571	$y = 0,1197x + 0,3939$	0,9572
SD+UK (GENEL)	$y = 0,1395x^{0,9787}$	0,9827	$y = 0,128x + 0,0426$	0,9828
SD+UK (ERKEN DAYANIM)	$y = 0,1527x^{0,9437}$	0,9314	$y = 0,1228x + 0,1239$	0,9306
SD+UK (28. GÜN)	$y = 37,42x^{-0,473}$	0,0402	$y = -0,0589x + 8,8607$	0,0426
SD+UK (GEÇ DAYANIM)	$y = 0,1242x^{1,0086}$	0,9892	$y = 0,1299x - 0,0736$	0,9891
SD+UK+GYFC (GENEL)	$y = 0,174x^{0,9402}$	0,9686	$y = 0,1213x + 0,5946$	0,966
SD+UK+GYFC (ERKEN DAYANIM)	$y = 0,1237x^{1,1084}$	0,9718	$y = 0,1767x - 0,098$	0,9749
SD+UK+GYFC (28. GÜN)	$y = 0,0834x^{1,1297}$	0,9817	$y = 0,1509x - 0,5925$	0,9808
SD+UK+GYFC (GEÇ DAYANIM)	$y = 0,1214x^{1,0121}$	0,9859	$y = 0,1295x - 0,1015$	0,9859
Tüm Sonuçlar Genel İlişki	$y = 0,1349x^{0,995}$	0,976	$y = 0,1266x + 0,2001$	0,9759

Marín-Urbe ve Navarro-Gaete 2021 yılında yaptıkları çalışmada farklı çalışmalarda elde edilen eğilme dayanımı ve basınç dayanımı arasındaki ilişkileri üssel ifade ile belirlemiş ve karşılaştırma yapmışlardır. Bu çalışma kapsamında, Ahmed vd. tarafından önerilen ilişki aşağıdaki gibi olmuştur:

Ahmed vd.'ne göre ilişki; Eğilme Dayanımı = $0,45 \cdot (\text{Basınç Dayanımı})^{2/3}$

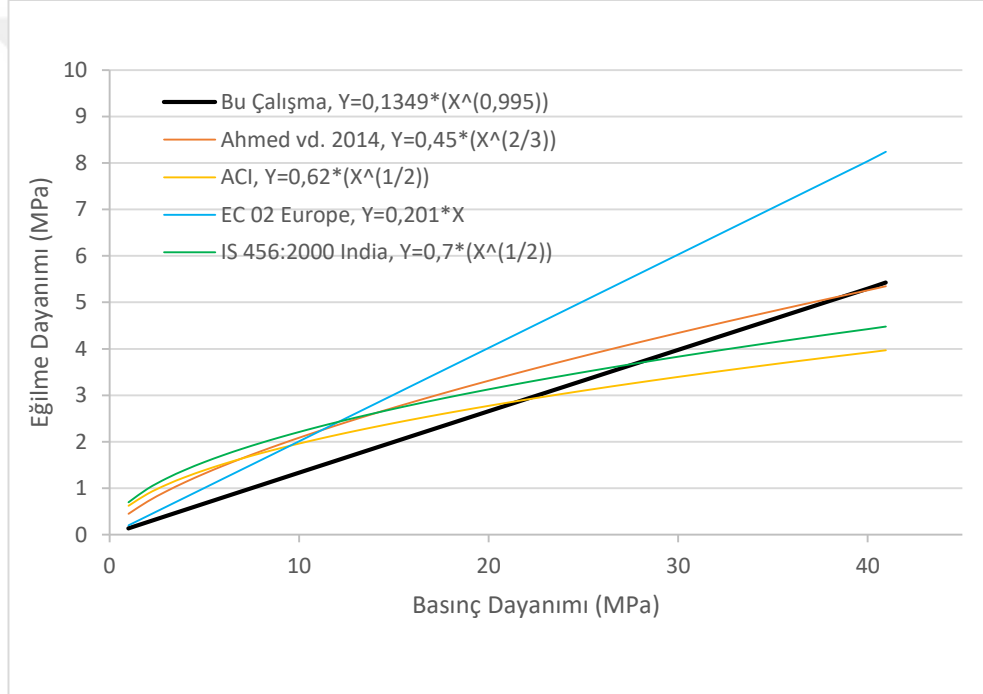
Yusuf vd. 2016 yılında yaptıkları çalışmada Amerikan Beton Enstitüsü (ACI), IS 456:2000 Hindistan Beton ve Betonarme Standartı ve Eurocode 2 Avrupa'ya göre eğilme ve basınç dayanımı arasındaki ilişkileri aşağıdaki gibi belirtmişlerdir.

ACI'ye göre ilişki; Eğilme Dayanımı = $0,62 \cdot (\text{Basınç Dayanımı})^{1/2}$

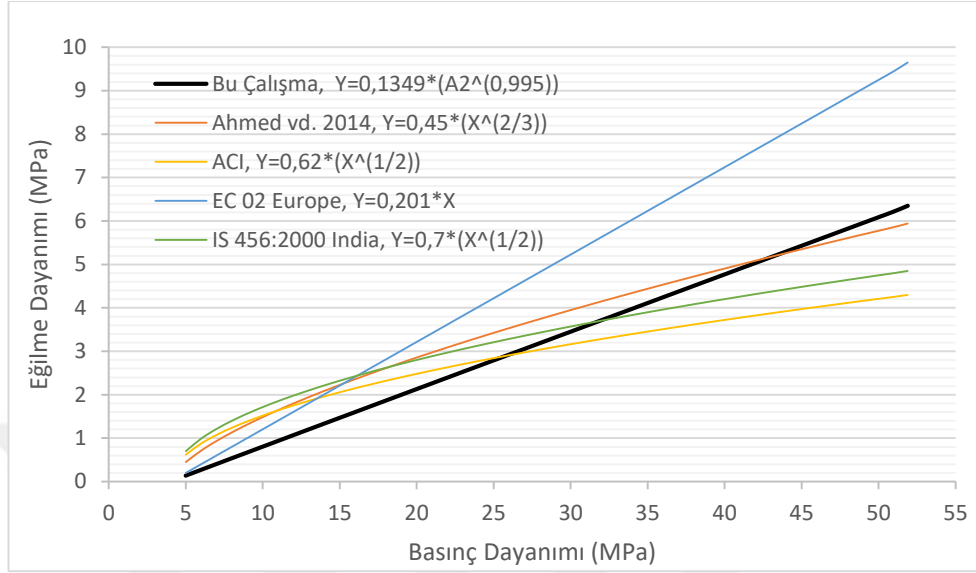
IS 456:2000'e göre ilişki; Eğilme Dayanımı = $0,7 * (\text{Basınç Dayanımı})^{1/2}$

EC 2 Europe'ya göre ilişki; Eğilme Dayanımı = $0,201 * \text{Basınç Dayanımı}$

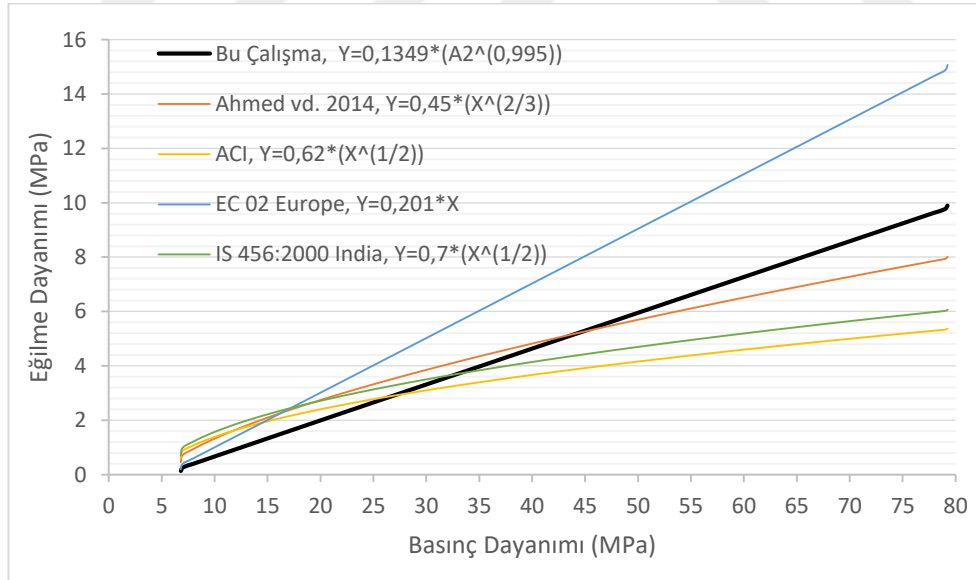
Ahmed vd., ACI, IS 456:2000 ve EC2 Europe tarafından belirtilen ilişkilerle, bu çalışmada bulunan ilişkiyi 1,3,7. günlerde, 28. günde ve 90, 180, 360. günlerdeki farklı zaman periyotlarında karşılaştırmak amacı ile ilgili kür süreleri içerisindeki tüm basınç dayanım değerleri ilişkilerde yerine yazılıp eğilme dayanımlarının bulunması kaydı ile grafikler oluşturulmuştur. Bu grafikler sırasıyla Şekil 4.32.b, Şekil 4.32.c ve Şekil 4.32.d'de gösterilmiştir.



Şekil 4.32.b. 1, 3, 7. Günlerde Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Farklı İlişkilerin Karşılaştırılması

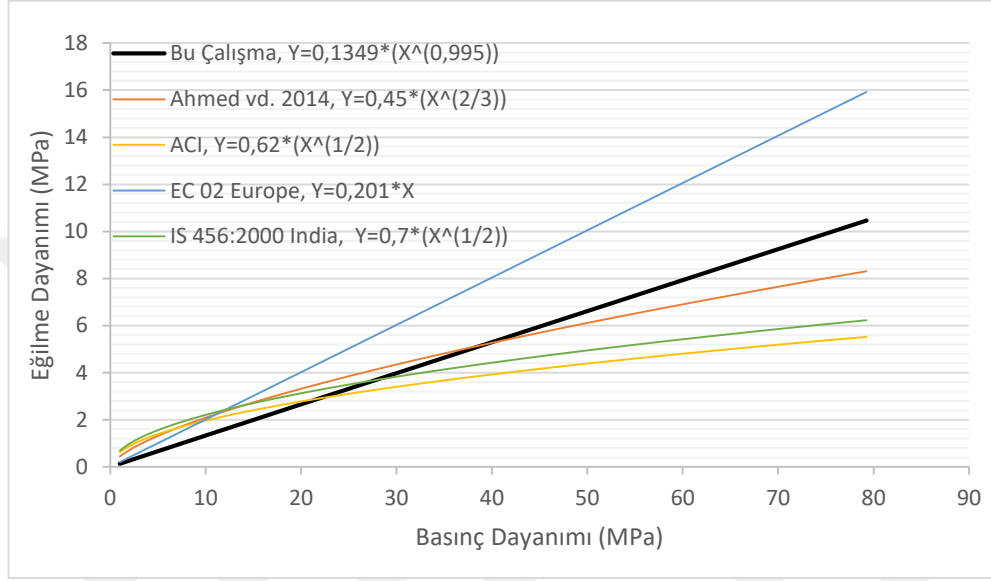


Şekil 4.32.c. 28. Günde Basmaç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Farklı İlişkilerin Karşılaştırılması



Şekil 4.32.d. 90, 180, 360. Günlerde Basmaç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Farklı İlişkilerin Karşılaştırılması

Ayrıca farklı kür süreleri için bulunan tüm basınç dayanımlarının ilişkilerde yerine yazılarak eğilme dayanımlarının bulunması ile elde edilen eğrilerin toplu gösterimi Şekil.4.32. e’de verilmiştir.



Şekil 4.32.e. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Farklı İlişkilerin Genel Karşılaştırılması

Ahmed vd. tarafından bulunan ilişkide, basınç dayanımının yaklaşık 40 MPa' a kadar olan aralıkta eğilme dayanımları bu çalışmada bulunan ilişkinin sonuçlarından maksimum %47 civarında yüksek, basınç dayanımının 40 MPa ile 80 MPa olduğu aralıktaki betonlarda ise bulunan eğilme dayanımları bu çalışma ilişkisi ile bulunan eğilme dayanımlarına göre maksimum %20 civarında düşük değerlere sahip olduğu gözlemlenmiştir.

ACI'ya göre olan ilişkide, basınç dayanımının yaklaşık 20 MPa' a kadar olan aralıkta eğilme dayanımları bu çalışmada bulunan ilişkinin sonuçlarından maksimum %75 civarında yüksek, basınç dayanımının 20 MPa ile 80 MPa olduğu aralıktaki betonlarda ise bulunan eğilme dayanımları bu çalışma ilişkisi ile bulunan

eğilme dayanımlarına göre maksimum %46 civarında düşük değerlere sahip olduğu gözlemlenmiştir.

IS 456:2000 Hindistan Beton ve Betonarme Standartına göre olan ilişkide, basınç dayanımının yaklaşık 25 MPa' a kadar olan aralıkta eğilme dayanımları bu çalışmada bulunan ilişkinin sonuçlarından maksimum %85 civarında yüksek, basınç dayanımının 25 MPa ile 80 MPa olduğu aralıktaki betonlarda ise bulunan eğilme dayanımları bu çalışma ilişkisi ile bulunan eğilme dayanımlarına göre maksimum %39 civarında düşük değerlere sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Eurocode 2 Avrupa'ya göre olan ilişkide, basınç dayanımının yaklaşık 5 MPa' a kadar olan aralıkta eğilme dayanımları bu çalışmada bulunan ilişkinin sonuçları ile çok yakinken, basınç dayanımının 5 MPa ile 80 MPa olduğu aralıktaki betonlarda ise bulunan eğilme dayanımları bu çalışma ilişkisi ile bulunan eğilme dayanımlarına göre maksimum %52 civarında yüksek değerlere sahip olduğu gözlemlenmiştir.

4.2. Dayanıklılık (Durabilite) Deney Sonuçları

Bu bölümde mekanik deney sonuçlarına göre en iyi dayanım sonuçlarına sahip olan SD7,5+UK10+GYFC10 ve SD7,5+UK15+GYFC15 numunelerinin hem birbirlerine göre hem de %100 CEM 1 42,5 R ile yapılan referans numuneye göre bazı durabilite özellikleri karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. %100 CEM 1 42,5 R ile yapılan referans numune R1, SD7,5+UK10+GYFC10 içerikli olan numune L2, SD7,5+UK15+GYFC15 içerikli numune ise L3 olarak sembolize edilmiştir.

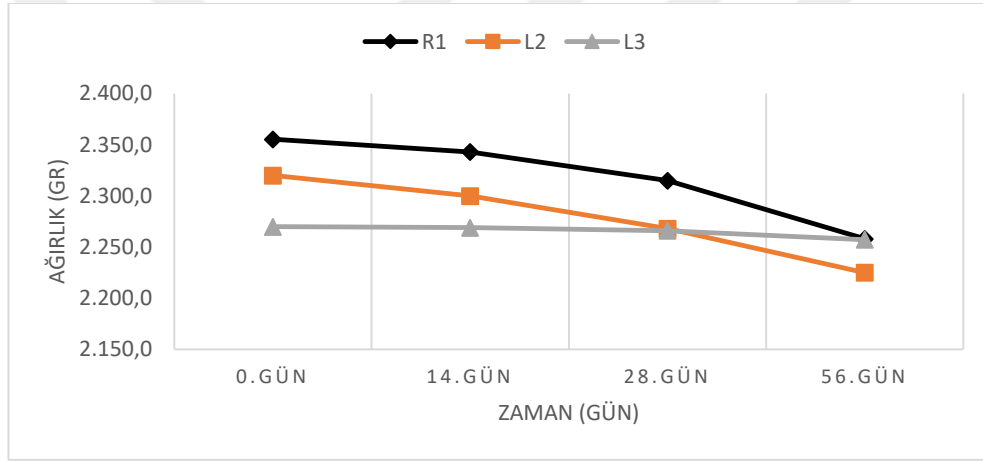
4.2.1. Beton Numunelerinin Magnezyum Sülfat Çözeltilisine Karşı Dayanıklılık Deney Sonuçları ve Sonuçların Kıyaslanması

R1, L2, L3 beton karışımlarının magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilerek elde edilen ağırlık değişimleri Çizelge 4.20'de verilmektedir. Zaman

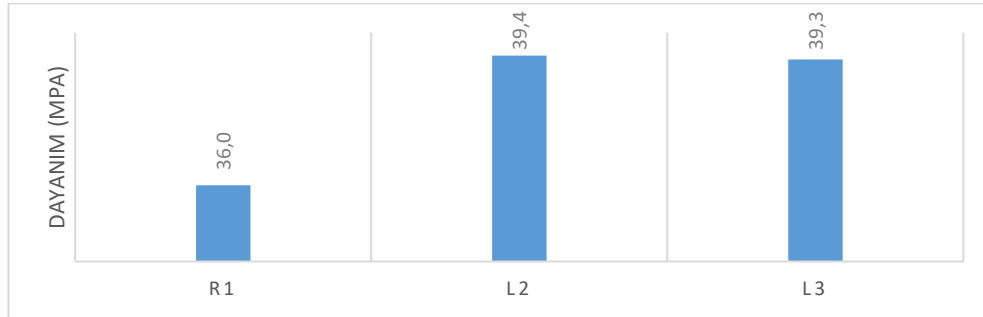
ile ağırlık değişimi grafiği Şekil 4.33.a ve basınç dayanımları Şekil 4.33.b'de verilmektedir.

Çizelge 4.20. Magnezyum Sülfat Çözeltisinde Bekletilen Numunelerin Ağırlık Değişimleri ve Dayanım Değerleri

Numune Adı	0.GÜN	14.GÜN	28.GÜN	56.GÜN	56. GÜN
	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Dayanım (MPa)
R1	2.355,3	2.343,0	2.315,0	2.258,0	36,0
L2	2.320,0	2.300,0	2.268,0	2.225,0	39,4
L3	2.270,0	2.269,0	2.266,0	2.257,3	39,3



Şekil 4.33.a. Magnezyum Sülfat Çözeltisinde Bekletilen Numune Ağırlığı (Gr)/Zaman Grafiği



Şekil 4.33.b. Magnezyum Sülfat Çözeltisinde Bekletilen Numunelerin 56. Gün Basınç Dayanımı Grafiği (MPa)

R1 (%100 CEM 1 42,5 R) beton numunesinde 56. günde ilk ağırlığına kıyasla %4,13 azalma görülmüştür.

L2 (SD7,5+UK10+GYFC10) beton numunesinde 56. günde ilk ağırlığına kıyasla %4,09 azalma görülmüştür.

L3 (SD7,5+UK15+GYFC15) beton numunesinde 56. günde ilk ağırlığına kıyasla %0,56 azalma görülmüştür.

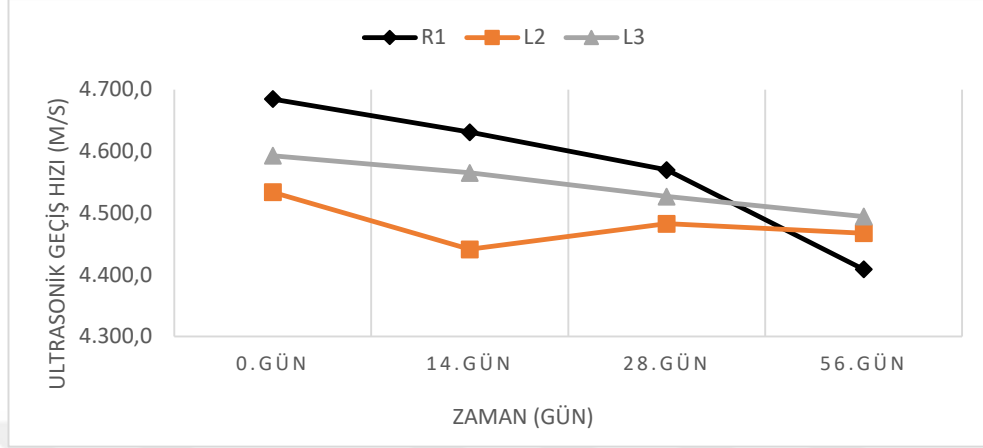
L2 (SD7,5+UK10+GYFC10) beton numunesi, R1 (%100 CEM 1 42,5 R) ve L3 (SD7,5+UK15+GYFC15) beton numunelerine oranla 56. günde daha yüksek basınç dayanımı vermiştir.

4.2.1.1. Magnezyum Sülfat Çözeltisinde Bekletilen Numunelerin Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Değişimi

R1, L2, L3 beton karışımlarının magnezyum sülfat çözeltisinde bekletildikten sonraki ultrasonik atımlı dalga hızı değişimi Çizelge 4.21’de verilmektedir. Zaman ile ultrasonik atımlı dalga hızı değişimi Şekil 4.34’de verilmektedir.

Çizelge 4.21. Magnezyum Sülfat Çözeltisinde Bekletilen Numunelerin Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Değişimleri (m/s)

Numune Adı	0.GÜN	14.GÜN	28.GÜN	56.GÜN	0-56. Günler Arası Hız Değişimi (%)
R1	4.684,7	4.631,0	4.569,7	4.408,7	-5,89
L2	4.533,7	4.441,0	4.482,7	4.467,3	-1,46
L3	4.592,7	4.565,0	4.526,7	4.494,3	-2,14



Şekil 4.34. Magnezyum Sülfat Çözeltisinde Bekletilen Numunelerin Ultra Ses Geçiş Hızı/Zaman Grafiği (m/s)

R1 (%100 CEM 1 42,5 R) beton numunesinde 56. günde ilk ultrasonik atımlı dalga hızına kıyasla %5,89 azalma görülmüştür.

L2 (SD7,5+UK10+GYFC10) beton numunesinde 56. günde ilk ultrasonik atımlı dalga hızına kıyasla %1,46 azalma görülmüştür.

L3 (SD7,5+UK15+GYFC15) beton numunesinde 56. günde ilk ultrasonik atımlı dalga hızına kıyasla %2,14 azalma görülmüştür.

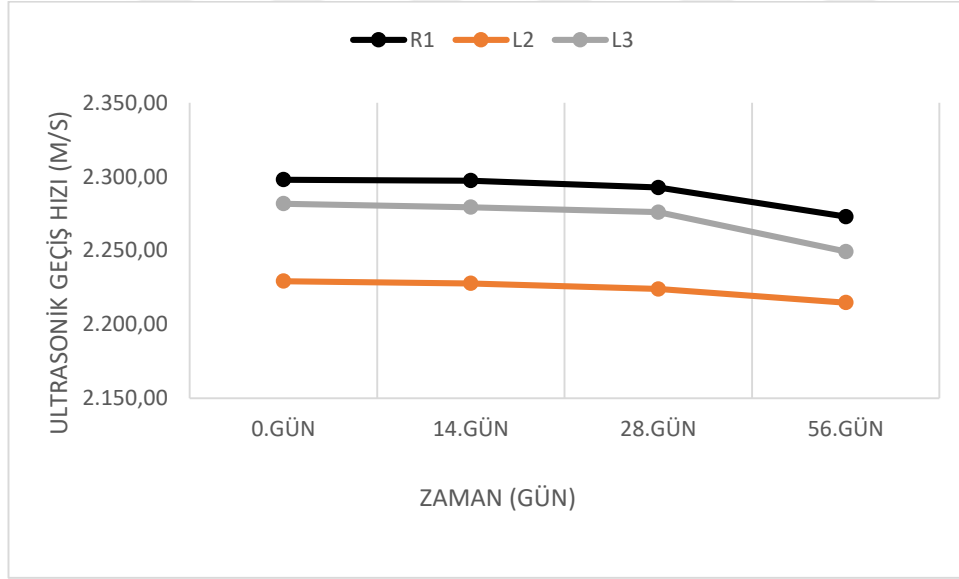
L2 ve L3 beton numuneleri, R1 (%100 CEM 1 42,5 R) beton numunelerine kıyasla ultrasonik atımlı dalga hızına göre magnezyum sülfatlı ortamdan çok daha az etkilendikleri görülmüştür. Yani L2 ve L3 beton numuneleri magnezyum sülfat çözeltisinde bekletildikten sonra içsel olarak en az bozulmaya uğramış numuneler durumundadır. En fazla etkilenen ise beklendiği üzere ultrasonik atımlı hızı en fazla azalan R1 numunesi olmuştur. Bunun sebebi, SD, UK, GYFC gibi mineral katkıların ikamesi ile üretilen betonlarda, ileri yaşlarda puzolanların reaksiyona girmesiyle betonun dayanımı artıran yeni C-S-H jellerinin üretilmesi aynı anda mevcut portlanditin azalması olayının gerçekleşmesi ve böylece betonun daha güçlü bir iç yapı ile dayanım ve dayanıklılığının artması olarak açıklanabilir.

4.2.2. Beton Numunelerinin Sodyum Sülfat Çözeltisine Karşı Dayanıklılık Deney Sonuçları ve Sonuçların Kıyaslanması

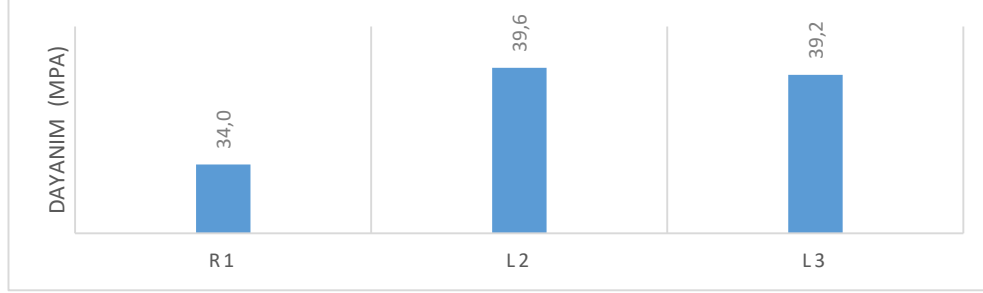
R1, L2, L3 beton karışımlarının sodyum sülfat çözeltisinde bekletilerek elde edilen ağırlık değişimleri Çizelge 4.22’de verilmektedir. Zaman ile ağırlık değeri değişimi grafiği Şekil 4.35.a ve basınç dayanımları Şekil 4.35. b’de verilmektedir.

Çizelge 4.22. Sodyum Sülfat Çözeltisinde Bekletilen Numunelerin Ağırlık Değişimleri ve Dayanım Değerleri

	0.GÜN	14.GÜN	28.GÜN	56.GÜN	56. GÜN
Numune	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (gr)	Dayanım (Mpa)
R1	2.298,0	2.297,3	2.292,7	2.273,0	34,0
L2	2.229,3	2.227,7	2.224,0	2.214,7	39,6
L3	2.281,7	2.279,3	2.276,0	2.249,3	39,2



Şekil 4.35.a. Sodyum Sülfat Çözeltisinde Bekletilen Numune Ağırlığı/Zaman Grafiği (Gr)



Şekil 4.35.b. Sodyum Sülfat Çözeltisinde Bekletilen Numunelerin 56. Gün Basınç Dayanımı Grafiği (MPa)

R1 (%100 CEM 1 42,5 R) beton numunesi 56. günde ilk ağırlığına kıyasla %1.09 azalma görülmüştür.

L2 (SD7,5+UK10+GYFC10) beton numunesi 56. günde ilk ağırlığına kıyasla %0,65 azalma görülmüştür.

L3 (SD7,5+UK15+GYFC15) beton numunesi 56. günde ilk ağırlığına kıyasla %1.42 azalma görülmüştür.

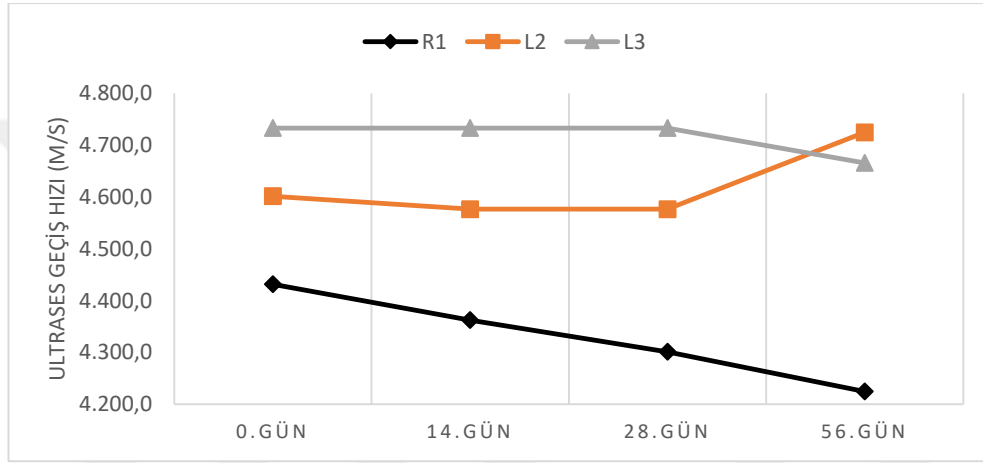
L2 beton numunesi, R1 (%100 CEM 1 42,5 R) ve L3 beton numunelerine oranla 56. gün mukavemeti daha yüksek dayanım vermiştir. L2 numunesinin Sodyum Sülfat Çözeltisinde bekletildikten sonraki %0,65 lik ağırlık kaybı da yüksek dayanımı desteklemektedir.

4.2.2.1. Sodyum Sülfat Çözeltisinde Bekletilen Numunelerin Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Değişimi

R1, L2, L3 beton karışımlarının sodyum sülfat çözeltisinde bekletilerek elde edilen ultrasonik atımlı dalga hızı değişimleri Çizelge 4.23'te verilmektedir. Zaman ile ultrasonik atımlı dalga hızı değişim grafiği Şekil 4.36'da verilmektedir.

Çizelge 4.23. Sodyum Sülfat Çözeltisinde Bekletilen Numunelerin Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Değişimleri (m/s)

Numune Adı	0.GÜN	14.GÜN	28.GÜN	56.GÜN	0-56. Günler Arası Hız Değişimi (%)
R1	4.431,7	4.362,7	4.301,3	4.224,7	-4,67
L2	4.601,7	4.576,7	4.576,7	4.725,0	2,68
L3	4.733,3	4.733,3	4.733,3	4.666,0	-1,42



Şekil 4.36. Sodyum Sülfat Çözeltisinde Bekletilen Numunelerin Ultra Ses Geçiş Hızı/Zaman Grafiği (m/s)

R1 (%100 CEM 1 42,5 R) beton numunesinde 56. günde ilk ultrasonik atımlı dalga hızına kıyasla %4,67 azalma görülmüştür.

L2 (SD7,5+UK10+GYFC10) beton numunesinde 56. günde ilk ultrasonik atımlı dalga hızına kıyasla %2,68 artma görülmüştür.

L3 (SD7,5+UK15+GYFC15) beton numunesinde 56. günde ilk ultrasonik atımlı dalga hızına kıyasla %1,42 azalma görülmüştür.

L2 (SD7,5+UK10+GYFC10) beton numunesinin ultrasonik atımlı dalga hızının ilk güne göre arttığı görülürken, R1 (%100 CEM 1 42,5 R) ve L3 (SD7,5+UK15+GYFC15) beton numunelerinin ultrasonik atımlı dalga hızlarının ilk güne göre azaldığı görülmüştür.

L2 beton numunesinin ultrasonik atımlı dalga hızı 56. günde ilk güne göre %2,68 oranında artmış olduğu (burada deney sırasında bir komplikasyon olmuş

olabilir- bkznz. Bölüm 4.3.2.3) görülmektedir. Hem ağırlık kaybı oranının %0,65 ile en az olması hem de 56. gün basınç dayanımı deney sonuçlarına göre en yüksek dayanımı vermesi gibi sebeplerle, L2 beton numunesi sodyum sülfat çözeltisine karşı dayanıklılığı en yüksek olan numune durumundadır. R1 numunesi ise beklendiği üzere sodyum sülfat çözeltisine maruz kaldıktan sonra hem ultrasonik hız kaybının yükselmesi hem de basınç dayanımının diğer numunelere göre düşük çıkması nedeniyle durabilitesi en düşük beton numunesi durumundadır. Bunun sebebi magnezyum sülfat çözeltisi deneyinde de açıklandığı üzere; SD, UK, GYFC gibi mineral katkıların ikamesi ile üretilen betonlarda, ileri yaşlarda puzolanların devreye girmesiyle bir yandan yeni C-S-H jellerinin üretilmesi bir yandan da portlanditin azalması olayının eş zamanlı olarak gerçekleşmesi ve böylece betonun iç yapısının güçlenmesi olarak açıklanabilir.

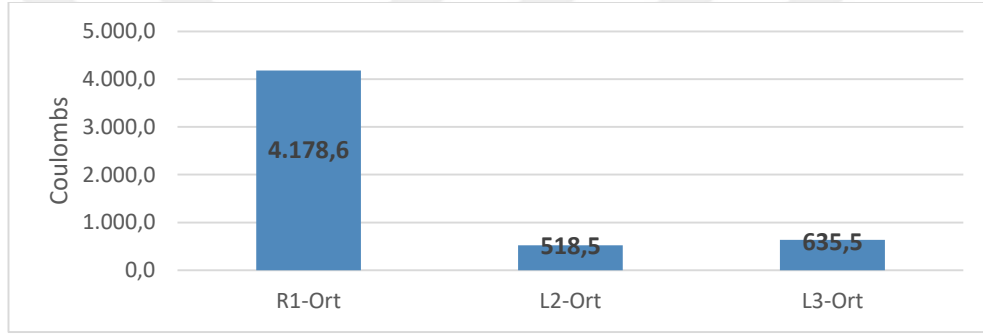
Birden fazla mineral katkı kullanılan betonların sülfat hücumuna karşı, sadece portland çimentosu içeren betonlara göre daha dirençli olmasına dair bulgular, Thomas vd. (1999) tarafından elde edilen bulguları teyit etmektedir.

4.2.3. Beton Numunelerinin Klorür İyonlarının Geçişlerine Karşı Direnç Deney Sonuçları ve Sonuçların Kıyaslanması

R1, L2, L3 beton karışımlarının klorür iyonlarının geçişlerine karşı direnç deney sonuçları Çizelge 4.24'te, grafiksel gösterimi ise Şekil 4.37'de verilmektedir.

Çizelge 4.24. Betonun Klorür İyonu Geçişi Deneyi Ölçüm Sonuçları (Coulombs)

R1 (%100 Cem I 42,5)				
	R1-1	R1-2	R1-3	Ortalama
I ortalama (A)	0,1889	0,2133	0,2312	0,2111
Qs (coulombs)	3748,99	4223,28	4563,6	4178,6
L2 (%7,5 SD+%10 UK+%10GYFC)				
	L2-1	L2-2	L2-3	Ortalama
I ortalama (A)	0,0239	0,0287	0,0265	0,0264
Qs (coulombs)	470,28	563,52	521,8	518,5
L3 (%7,5 SD+%15 UK+%15 GYFC)				
	L3-1	L3-2	L3-3	Ortalama
I ortalama (A)	0,0312	0,0325	0,0330	0,0322
Qs (coulombs)	616,11	640,47	649,84	635,5



Şekil 4.37. Betonun Klorür İyonu Geçişi Deneyi Ölçüm Sonuçları (Coulombs)

L2 (SD7,5+UK10+GYFC10) beton numunesinde, R1 (%100 CEM 1 42,5 R) ve L3 (SD7,5+UK15+GYFC15) beton numunelerine oranla klor iyonu geçiş dirençlerinin daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Bu durum CEM 1 42,5 R tipi çimento ile yapılan betonların, farklı tür ve oranlarda mineral katkı ikamesi ile yapılan betonlara nazaran uzun dönemdeki diğer mekanik ve durabilite özelliklerine paralel olarak klor geçişlerine karşı direncinin az olduğunu göstermektedir.

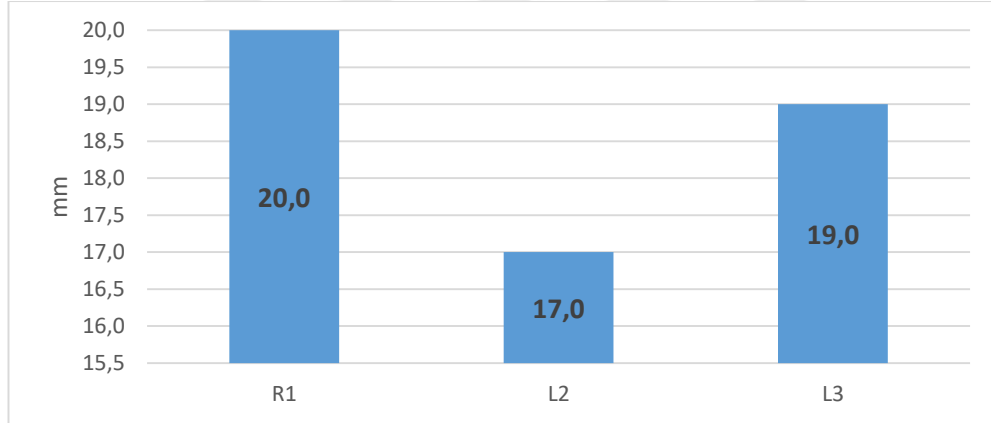
Birden fazla bağlayıcı içeren betonların klor geçirimsizliğinin, tek ve ikili bağlayıcılı betonlara göre daha az olması, Jones vd. (1997) tarafından yapılan çalışmanın bulguları ile de uyumlu görünmüştür.

4.2.4. Beton Numunelerinin Basınç Altında Su İşleme Derinliği Deney Sonuçları ve Sonuçların Kıyaslanması

R1, L2, L3 beton karışımlarının basınç altında su işleme derinliği deney sonuçları Çizelge 4.25'te verilmektedir. Basınç altında su işleme derinliği deney sonuçları grafik ve resim olarak Şekil 4.38.a' ve Şekil 4.38.b'de verilmektedir.

Çizelge 4.25. Basınç Altında Su İşleme Derinlik Kıyaslama Çizelgesi

Numune adı	R1			L2			L3		
Numune boyutlandırması	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Numune anma boyutları (mm)	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Numune basınç yüzey alanı (mm ²)	22.500			22.500			22.500		
Su işleme derinliği (mm)	20			17			19		



Şekil 4.38.a. Basınç Altında Su İşleme Derinlik Grafiği (mm)



Şekil 4.38.b. R1, L2 ve L3 Numunelerinin Basınç Altında Su İşleme Derinlik Grafiği (mm)

R1 (%100 CEM 1 42,5 R) beton numunesi su işleme derinliği 20 mm ile en yüksek değer olarak kaydedilmiştir.

L2 (SD7,5+UK10+GYFC10) beton numunesi su işleme derinliği 17 mm ile en düşük yani en verimli değer olarak kaydedilmiştir.

L3 (SD7,5+UK15+GYFC15) beton numunesi su işleme derinliği ise 19 mm olarak ölçülmüştür.

L2 (SD7,5+UK10+GYFC10) beton numunesinin, R1 (%100 CEM 1 42,5 R) ve L3 (SD7,5+UK15+GYFC15) beton numunelerine göre daha düşük su işleme derinliğine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçta hem mekanik hem de diğer durabilite deney sonuçları ile örtüşmektedir.

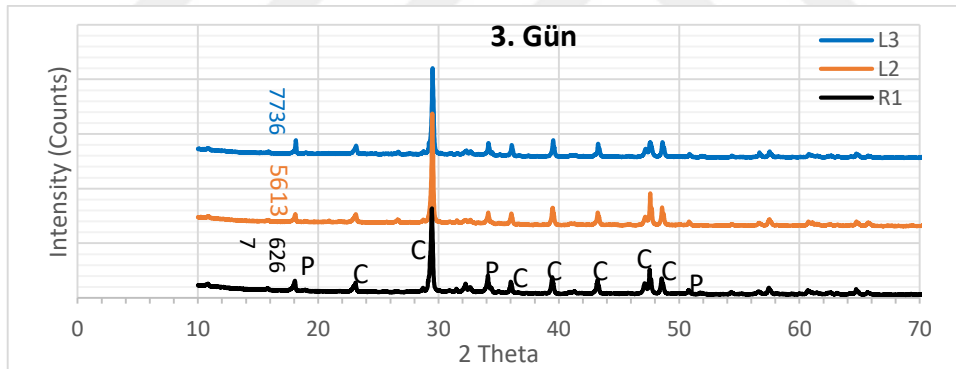
4.3. Mikroyapı (SEM ve XRD) Çalışmaları ve Diğer Deney Sonuçlarının Mikroyapı ile İlişkilendirilmesi

Bölüm 4.2'nin başında da belirtildiği gibi, mekanik deney sonuçlarına göre en iyi mukavemet performanslarını gösteren karışımlar için durabilite ve geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır. Bu betonlar L2 olarak ifade edilen SD7,5+UK10+GYFC10 içerikli karışım ve L3 olarak ifade edilen

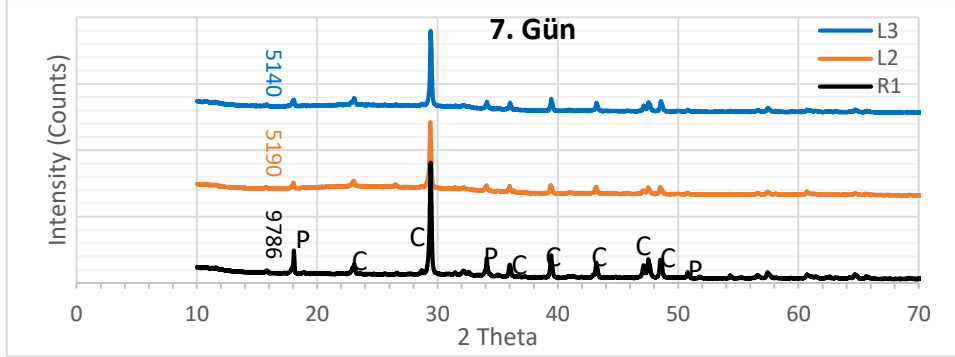
SD7,5+UK15+GYFC15 beton karışımı ve R1 olarak ifade edilen %100 CEM I 42,5 R içerikli referans betondur. Bu üç beton karışımının XRD ve SEM analizleri gerçekleştirilerek, mikroyapıları araştırılmıştır. Elde edilen bulgularla, mekanik deney sonuçları, durabilite deney sonuçları entegre edilerek yorumlanmış ve neden-sonuç ilişkileri kurulmuştur. SEM ve XRD sonuçları ile mikroyapı bulguları birbirini destekler şekilde harmanlanarak sunulmuştur. Ayrıca R1, L2, L3 numunelerinin değişik kür sürelerine göre SEM görüntüleri incelenmiştir.

4.3.1. Mikroyapı (SEM-Taramalı Elektron Mikroskop, XRD-X Işını Kırınımı) ve Mekanik Deney Sonuçları Arasındaki İlişkiler

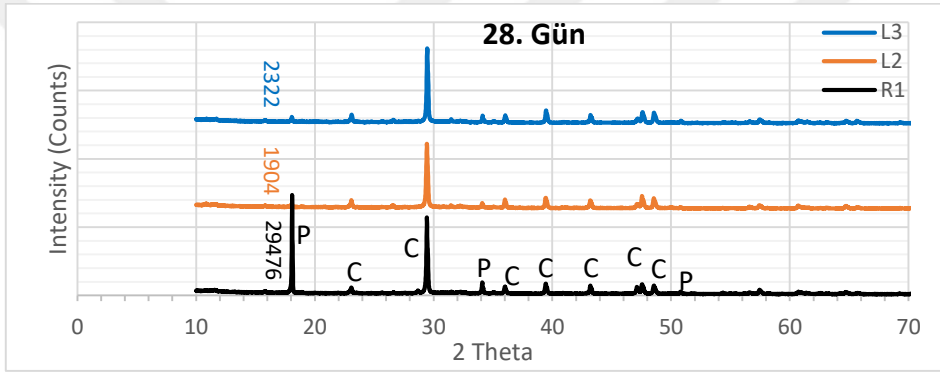
Şekil 4.39'dan Şekil 4.45 e kadar her bir gün için karışımların XRD profilleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. En belirgin kristallerin (P: Portlandit, C: Kalsit) neler olduğu bu grafikler üzerine işaretlenmiştir.



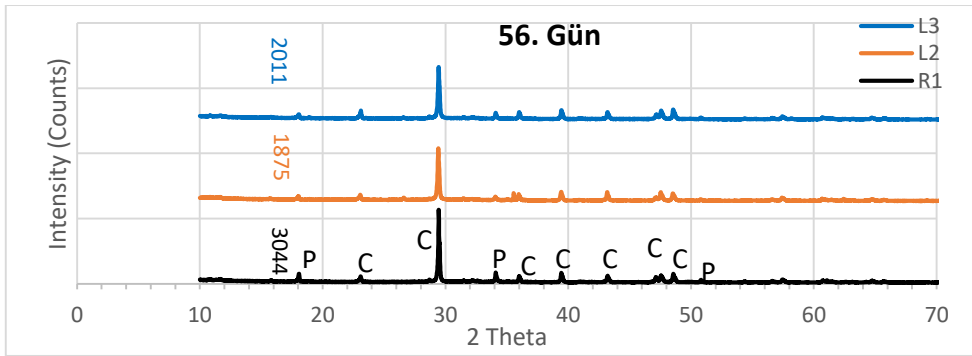
Şekil 4.39. 3 Günlük Karışımların XRD Profilleri (P: Portlandit, C: Kalsit)



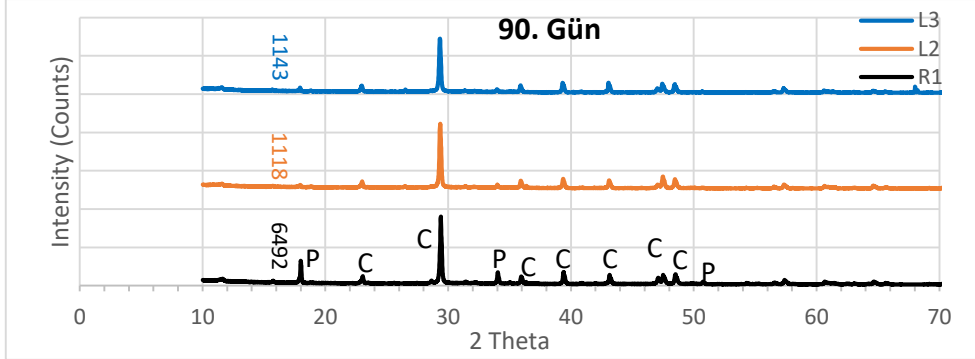
Şekil 4.40. 7 Günlük Karışımların XRD Profilleri (P: Portlandit, C: Kalsit)



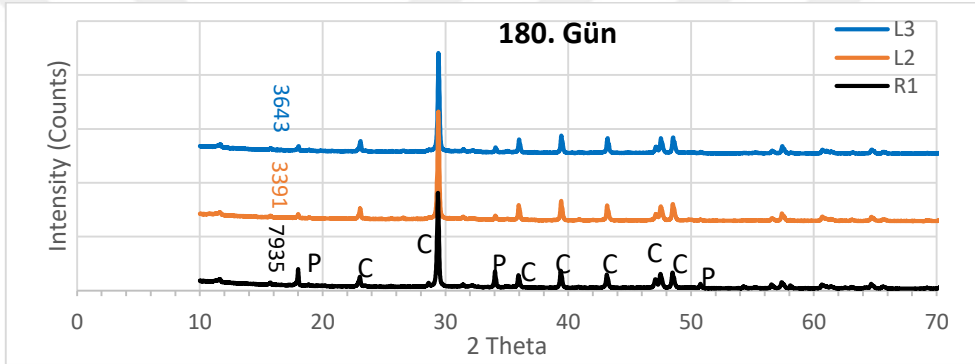
Şekil 4.41. 28 Günlük Karışımların XRD Profilleri (P: Portlandit, C: Kalsit)



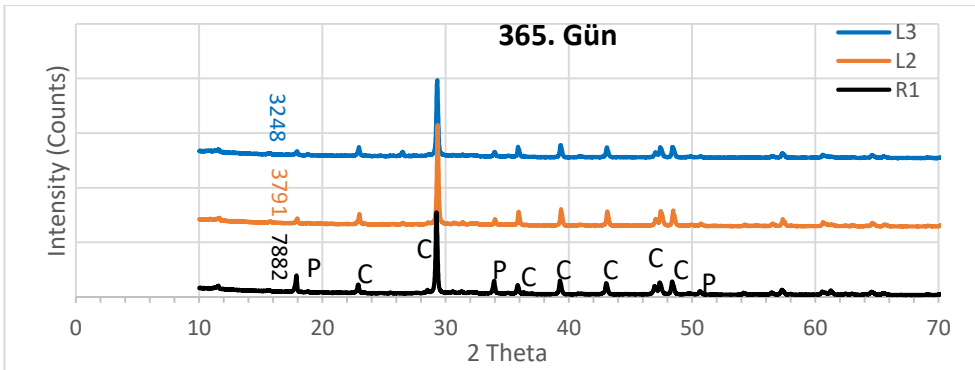
Şekil 4.42. 56 Günlük Karışımların XRD Profilleri (P: Portlandit, C: Kalsit)



Şekil 4.43. 90 Günlük Karışımların XRD Profilleri (P: Portlandit, C: Kalsit)



Şekil 4.44. 180 Günlük Karışımların XRD Profilleri (P: Portlandit, C: Kalsit)

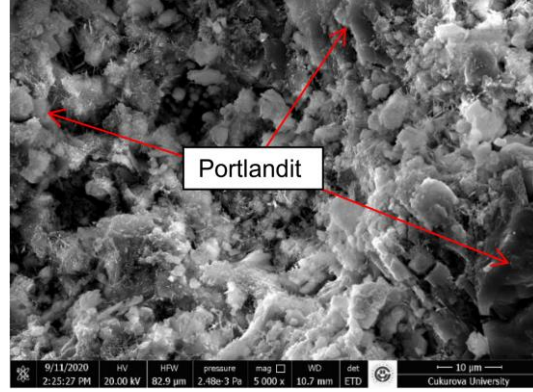


Şekil 4.45. 365 Günlük Karışımların XRD Profilleri (P: Portlandit, C: Kalsit)

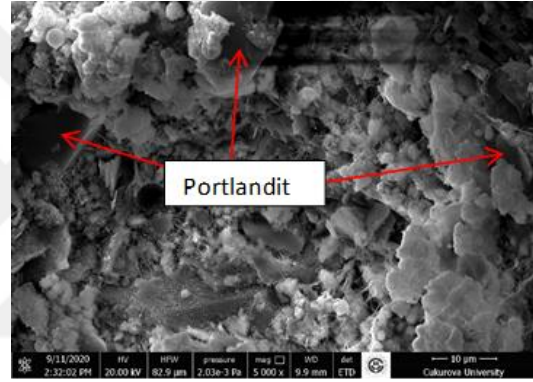
Yukarıdaki XRD grafiklerinden görüleceği gibi en belirgin kristaller portlandit ve kalsit olmuştur. Tüm günlerde ve tüm karışımlarda görülen kalsit,

kireçtaşı agregasından kaynaklanmaktadır. Portlandit ise, portland çimentosunun reaksiyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksittir. Analizlerin yapıldığı en erken yaş olan 3. gün sonunda portlandit piki her üç karışımda da görülmektedir. Bu durum, SEM analizleriyle de desteklenmektedir (Şekil 4.46). Kür süresi arttıkça bağlayıcı olarak sadece portland çimentosu içeren R1 karışımında, özellikle 28. güne kadar, portlandit piki artmış yani kalsiyum hidroksit miktarı daha da yükselmiştir. Sonrasında ise, R1 numunelerinde portlandit piki belirginliğini korumuştur.

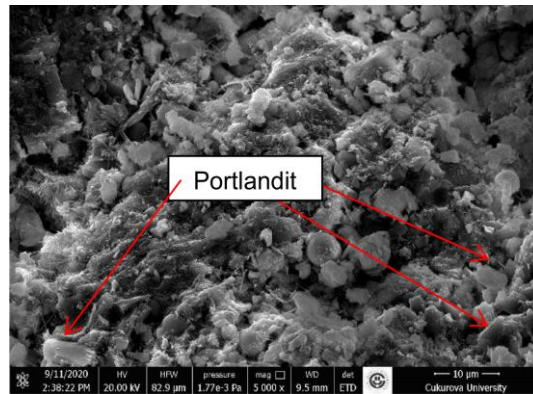




(a)



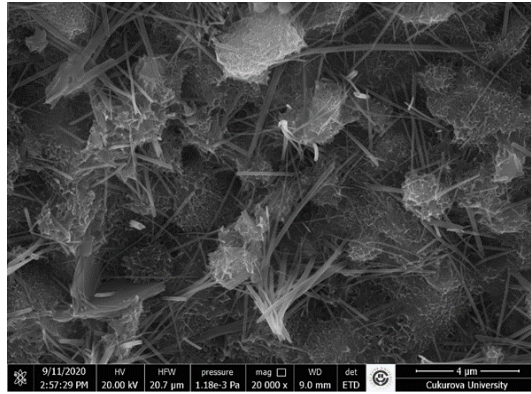
(b)



(c)

Şekil 4.46. 3 Günlük a) R1, b) L2 ve c) L3 Betonlarında Gözlenen Portlandit.

Yine, Şekil 4.39'dan Şekil 4.45 e kadar olan grafiklere göre, 3 günlük numunelerin hepsinde portlandit oluşumu gözlenirken, 7 gün sonunda L3 karışımında portlandit pikinin azaldığı görülmüştür. Buradan, L3 karışımında puzolanik reaksiyonların 7 gün içinde etkin olduğu anlaşılmaktadır. Nitekim, L3 betonuna ait SEM analizlerinde bağlayıcı taneciklerinin (mineral katkı + portland çimentosu) reaksiyona girmeye başladıkları gösterilmiştir (Şekil 4.47). 7 günlük R1 ve L2 numunelerinde ise portlandit pikleri benzer olmuştur. Buna göre, L2 numunelerindeki puzolanik reaksiyonların R1 numunesi ile benzer şekilde 7. gün sonunda hala çok etkin olmadığı anlaşılmaktadır. L2 ve L3 karışımları arasındaki bu farkın, daha fazla mineral katkı içeren L3 karışımlarında, taneciklerin kalsiyum hidroksit bularak puzolanik reaksiyona daha erken girme ihtimalinin artmasıyla ve hızlanmasıyla açıklanabilir. L3 betonunda puzolanik reaksiyonların daha erken başlamasının olumlu bir sonucu, L3 karışımlarında daha az klinker olmasına rağmen, yani daha ekonomik olmasına rağmen, L2 ve L3 numunelerinin benzer basınç dayanımına sahip olmalarıdır. Benzer dayanımların bir başka sebebi de, L3 karışımında erken dayanıma katkı sağladığı bilinen silis dumanının L2 karışımındakine göre daha fazla olması olarak açıklanabilir.

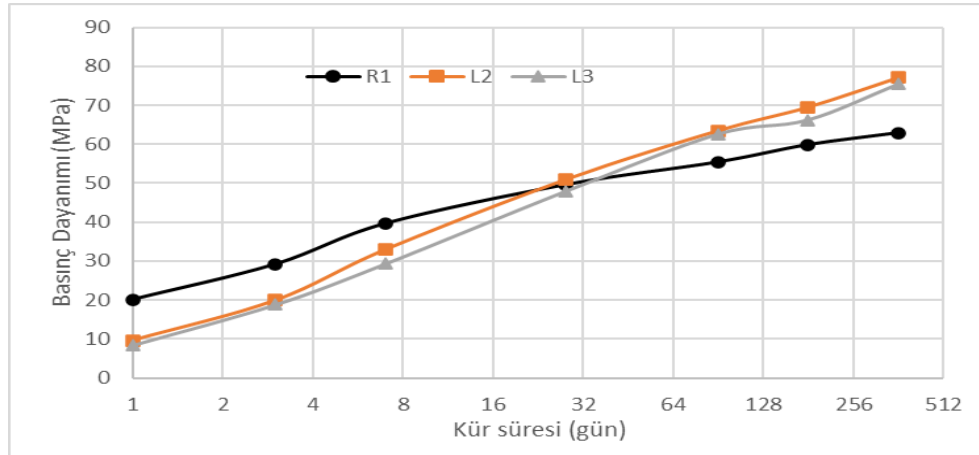


Şekil 4.47. L3 Betonunda 7 Gün Sonunda Başlayan Puzolanik Reaksiyonlar

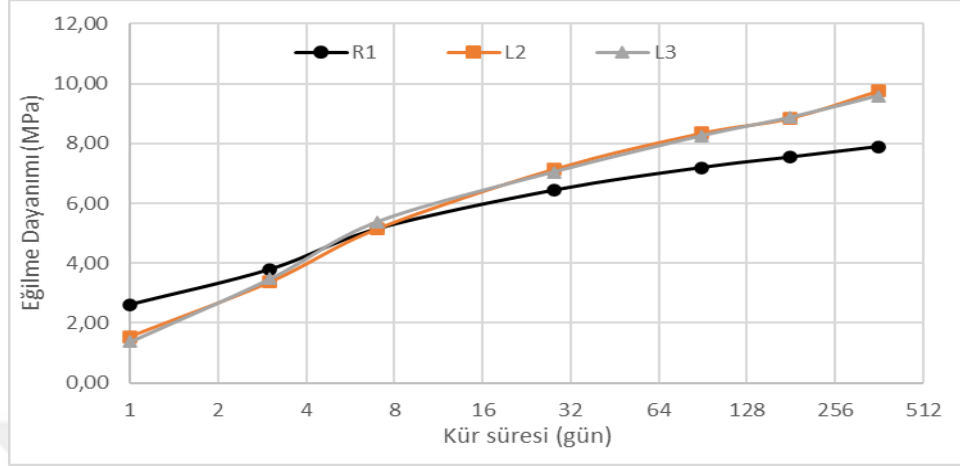
14 günlük kür süresinden itibaren, L2 ve L3 numunelerinde portlandit piki çok küçük olup, puzolanik reaksiyonlar sonucu ortamda kalsiyum hidroksitin çok

az bulunduğuna işaret etmektedir. Bu gözlem ise, Şekil 4.48’de verilen L2 ve L3 numunelerinin basınç dayanımı artış hızının özellikle 7 günden sonra R1’e göre daha fazla olmasını açıklamaktadır (verilerin daha ayrıntılı olarak gözükmesi için yatay ekseninde logaritmik ölçek kullanılmıştır). Böylece, pozolanik reaksiyonlar sayesinde, daha düşük klinker içeriğinden dolayı erken yaşlarda R1’e göre yaşanan dayanım kaybı telafi edilebilmektedir. 28 gün sonunda tüm karışımlar benzer dayanıma ulaşmış, daha sonrasında ise devam eden pozolanik reaksiyonlar, kalsiyum hidroksiti ekstra C-S-H jeline çevirerek, L2 ve L3 numunelerinin R1’e göre daha yüksek dayanımda olmalarını sağlamıştır.

Şekil 4.39’dan Şekil 4.45 e kadar olan XRD grafiklerinden hatırlanacağı üzere, R1 numunelerinde tüm yaşlarda görülen yüksek miktardaki portlandit ise dayanıma katkı sağlayamadığı için, kontrol numunelerinin basınç dayanımı ileri yaşlarda düşük kalmıştır. Buradaki XRD sonuçlarının basınç dayanımı sonuçlarını açıklaması hakkında yapılan yorumlar, eğilme dayanımları için de geçerlidir. Bunun sebebi, basınç dayanımı sonuçları ile eğilme dayanımı sonuçlarının güçlü bir ilişki ile paralellik göstermesidir (Şekil 4.49). R1 numuneleri ile mineral katkı içeren L2 ve L3 numunelerinin eğilme dayanımları yaklaşık 7 günde eşitlenmiş, sonrasında ise L2 ve L3 daha yüksek dayanımlar sağlamıştır.



Şekil 4.48. Karışımların Basınç Dayanımı Gelişimi



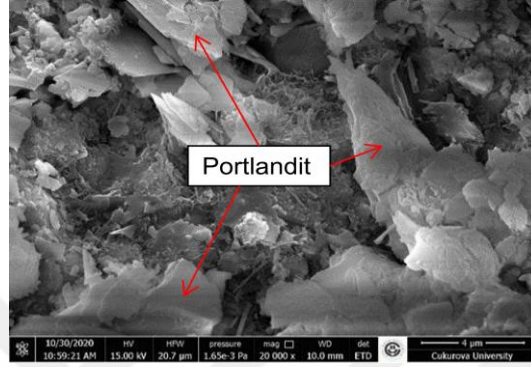
Şekil 4.49. Karışımların Eğilme Dayanımı Gelişimi

4.3.2. Mikroyapı ve Durabilite Deney Sonuçları Arasındaki İlişkiler

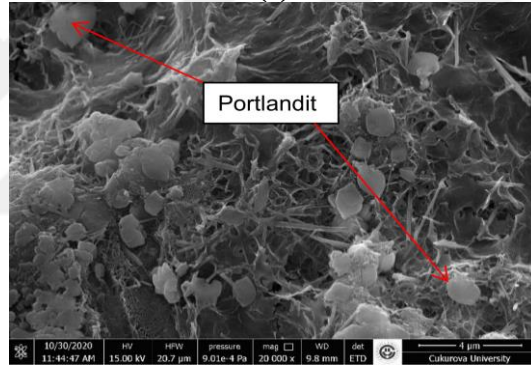
4.3.2.1 Basınç Altında Su Geçirimsizlik Deneyi ve Mikroyapı İlişkisi

Daha önce bahsedildiği gibi, R1 karışımında çok erken yaşlar hariç her yaşta daha fazla portlandit bulunmuştur. Bu bulgu, basınç altında su geçirimsizlik deney sonuçlarını da açıklamaktadır. Portlandit suya karşı dirençli olmayıp suda çözünebilir. Dolayısı ile portlandit içeriği fazla olan betonların geçirimsizliğinin fazla olması beklenebilir. Nitekim, R1 betonunun basınç altındaki su geçirimsizliği, mineral katkılı betonlardan fazla olmuştur. Geçirimsizlik deneylerinin yapıldığı 56. gün sonunda, R1 betonunun, L2 ve L3 betonundan daha fazla portlandit içerdiği Şekil 4.50’de de görülmektedir. Ayrıca, çimento taneciklerinden daha ince olan mineral katkı tanecikleri, hamur içindeki boşlukları daha iyi doldurarak da geçirimsizliği azaltabilir. Buna ilaveten, mineral katkılar ve özellikle silis dumanı, agrega-hamur arayüzünün de boşluklarının azalmasını sağlarlar. Bu etki hem fiziksel olarak boşluğu doldurma ile hem de portlanditin nispeten daha fazla olduğu bu arayüzdeki puzolanik reaksiyonlar ile elde edilir. Şekil 4.39’dan Şekil 4.45 e kadar olan grafiklerden hatırlayacağımız üzere, L2 ve L3 betonlarında portlandit

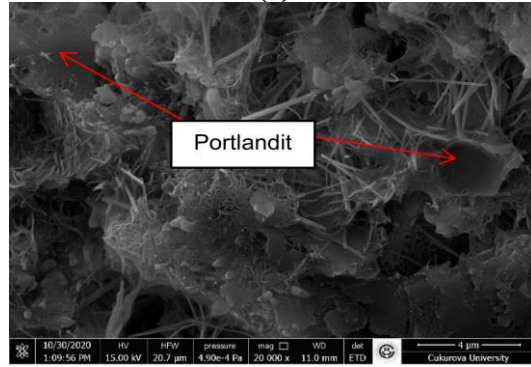
miktarının az olması, gerek hamur fazında gerekse agrega-hamur arayüzündeki pozolanik reaksiyonlar sonucu olup, bu reaksiyonlar basınç altında su geçirimsizliğini de azaltmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.50. 56. günlük, a) R1 Betonu, b) L2 Betonu ve c) L3 Betonlarında Farkli Miktarlarda Bulunan Portlandit

L2 betonunun L3 betonundan daha düşük geçirimsizliğinin olması basınç dayanımı deneyleri ile de uyumludur. Şekil 4.48'e göre, L2 betonları L3 betonlarından bir miktar daha fazla dayanıma sahiptirler. Benzer şekilde, geçirimsizlik deneyinin yapıldığı 56 günlük kür süresi sonunda, hem basınç dayanımı açısından hem de geçirimsizlik açısından en düşük performans, bağlayıcı olarak sadece portland çimentosu içeren R1 betonuna aittir.

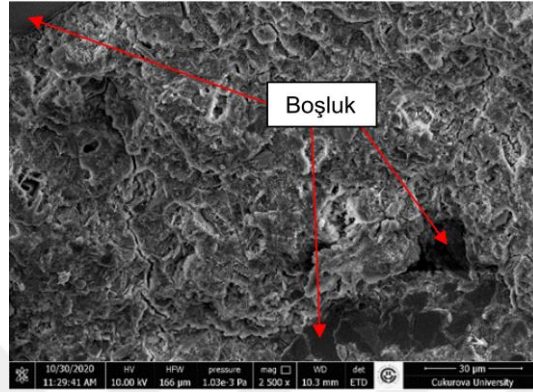
4.3.2.2 Klorür İyonları Geçirimsizliği Deneyi ve Mikroyapı İlişkisi

Klorür iyonları geçirimsizliği deney sonuçları, basınç altında su geçirimsizlik deneyleri ile benzer sonuçlar göstermiştir. Her iki deneyde de en geçirimsiz beton R1 betonu, en geçirimsiz beton L2 betonu olmuştur. Dolayısı ile, basınç altında su geçirimsizlik deneyi ile ilgili yorumlar, klorür iyonları geçirimsizliği deneyi için de yapılabilir. Ayrıca, dikkat çeken başka bir husus, mineral katkı içeren L2 ve L3 betonlarının klorür geçirimsizliği ile kontrol betonu olan R1 betonu arasında çok büyük fark olmasıdır. R1 betonunun, L2 ve L3 betonlarının klorür geçirimsizliğine oranı, sırasıyla, 9,1 kat ve 6,57 kat daha fazla olmuştur. Dolayısı ile, mineral katkı kullanımından kaynaklanan iç yapının etkileri klorür iyonları geçirimsizliği deneyinde daha belirgin ortaya çıkmıştır.

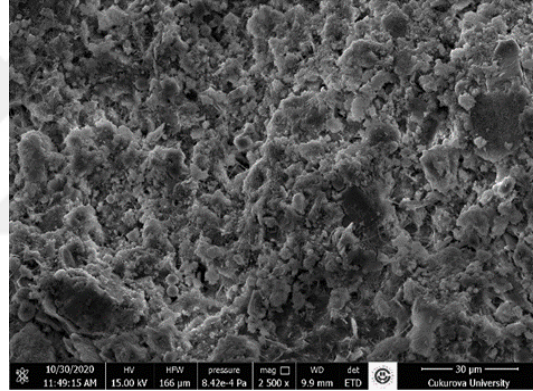
Güneyisi ve arkadaşlarının 2003 yılında yaptıkları çalışmada silis dumanı ve uçucu külü betonda mineral katkı olarak kullanmanın beton klorür geçirimsizliğini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir (Güneyisi vd. 2003). Yine Thomas vd.1999 yılında yaptıkları çalışmada dörtlü kombinasyon harmanlarla üretilen betonun, klorür iyonlarının girişine karşı çok yüksek bir dirence sahip olduğunu göstermişlerdir (Thomas vd., 1999).

Deneylerin yapıldığı 28. gün sonrası numunelerin SEM görüntüleri dikkate alındığında, yukarıda bahsedilen basınç altında su geçirimsizliği ve klorür iyonu geçirimsizliği deneylerinin sonuçlarını teyit eden bulgular elde edilmiştir. Şekil 4.51'den de görüleceği üzere, 56. gün sonunda R1 betonunda, L2 ve L3 betonlarına

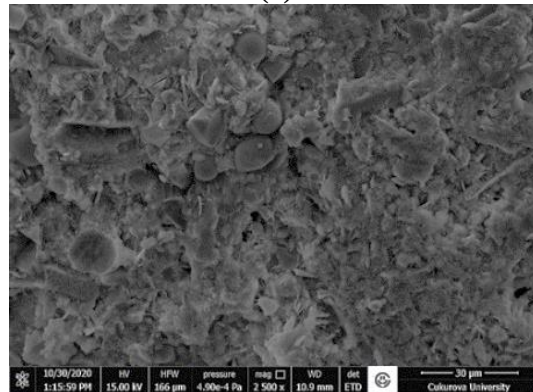
göre daha boşluklu bir içyapı görülmüştür. Hatta 180. gün sonunda bile, R1 betonunun boşluklu ve heterojen içyapısı olduğu Şekil 4.52'den görülmektedir.



(a)

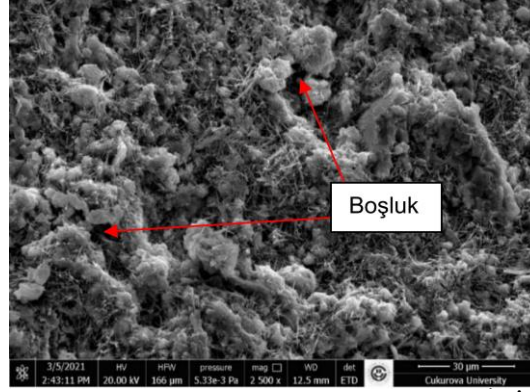


(b)



(c)

Şekil 4.51. 56 günlük, a) R1, b) L2 ve c) L3 Betonlarındaki Boşluk Yapısı



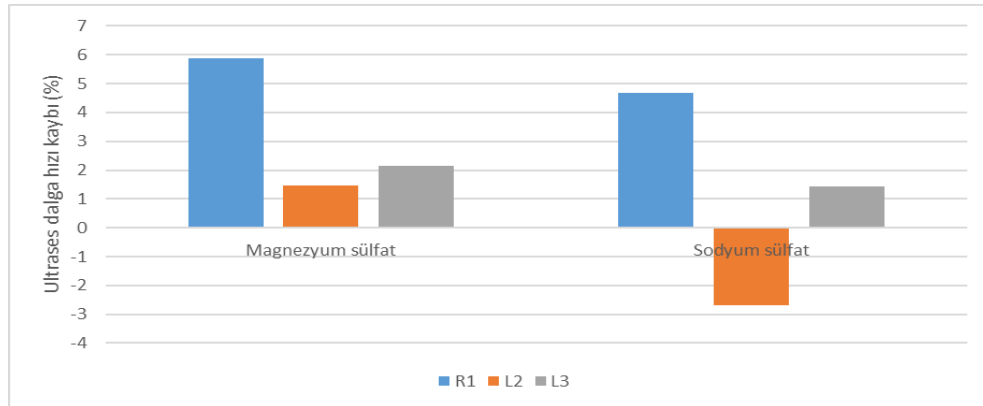
Şekil 4.52. 180 Günlük R1 Betonunun Boşluklu ve Heterojen İç Yapısı

4.3.2.3. Sülfat (Na_2SO_4 - MgSO_4) Direnci Deneyleri ve Mikroyapı İlişkisi

Aynı Su/Bağlayıcı oranına sahip betonların sülfat direncini etkileyecek en önemli parametreler betonların geçirimsizlikleri dışında, bağlayıcıda bulunan C_3A ve portlandit içeriğidir. Bunun sebebi, sülfat hücumu ile oluşacak kalsiyum alumino mono sülfat hidrat ve kalsiyum alumino tri sülfat hidrat (etrenjit) gibi genişlemeye sebep olacak ürünlerin oluşumunda C_3A ve portlanditin yer almasıdır. Mineral katkı kullanımı, bu tezdeki betonlarda portland çimentosu ile ikame şeklinde olmuştur. Dolayısı ile, kontrol betonuna göre daha az portland çimentosu içeren L2 betonu ve L2’den de daha az portland çimentosu içeren L3 betonu, R1 betonundan daha az C_3A içermektedir. Bununla beraber, portland çimentosunun az kullanılması, klinkerden gelen C_2S ve C_3S miktarını ve bunların hidratasyonu sonucu oluşan portlanditin daha az üretilmesini sağlar. L2 ve L3 betonlarında daha az portlandit üretilmesine ilaveten, mineral katkılı bu betonlarda zaten az olan portlandit, ikincil puzolanik reaksiyonlarla tüketilerek daha da azalmaktadır (Mineral katkılı L2 ve L3 betonlarında portlandit miktarının az olduğu Şekil 4.39’dan Şekil 4.45 e kadar olan XRD grafikleri ile ilişkilendirilen daha önceki yorumlarda açıklanmıştır). Özetle, mineral katkılı betonlarda, referans betona nispeten hem daha az C_3A hem de daha az portlandit yer aldığı için, L2 ve L3 betonlarının sülfata karşı daha dirençli olması beklenen bir durumdur. Nitekim,

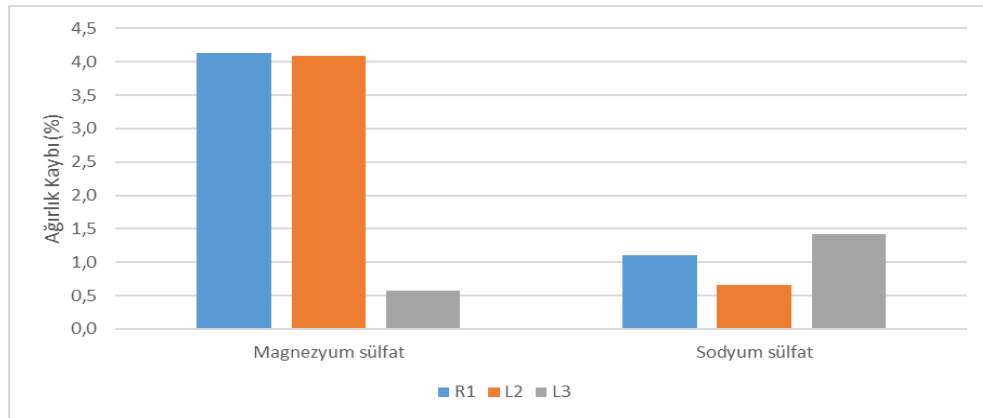
magnezyum sülfata maruz betonların sülfat hücumu sonrası ultrases dalga hızı kayıplarına bakıldığında (Şekil 4.53), L2 ve L3 betonlarının, R1 betonuna göre daha iyi direnç gösterdiği görülmektedir. Ayrıca, L2 ve L3 betonlarının sülfatlara daha dirençli olması yukarıda bahsedildiği gibi bu betonların geçirimsizliklerinin az olması sayesinde de gerçekleşmiştir.

Şekil 4.53’de sodyum sülfata maruz kalmış L2 betonunda görülen negatif kayıp, ultrases dalga hızında artış olduğunu göstermektedir. Ultrases dalga hızı ölçümleri 0, 14, 28 ve 56. gün sonunda yapılmış olup, L2 betonunda 0 günlük yaşa göre 14 ve 28 gün sonunda dalga hızında azalma olmuşken, 56 gün sonunda artış görülmüştür. Şekil 4.36’dan görüldüğü ve daha önce de bahsedildiği gibi, L2 betonunda pozolanik reaksiyonlar nispeten geç başlamıştır ve ultrasonik dalga hızı da sonradan artmıştır. İleriki yaşlarda, sülfat hücumunun hasarının yanında pozolanların devreye girmesiyle bir yandan yeni C-S-H jellerinin üretilmesi ve portlandit azalması da eş zamanlı olarak gerçekleşerek, iç yapıyı güçlendirmiş ve ultrases hızındaki artışı sağladığı düşünülebilir. Benzer etki, aslında L3 betonu için de geçerli olmakla birlikte, 56. gün sonunda ultrases hızında azalma olması, betondaki hasarın pozolanik reaksiyonlar ve çimento hidratasyonu sonucu gerçekleşen iyileşmeden daha baskın olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.53. Sülfat Hücumuna Maruz Betonlarda Ultrases Dalga Hızı Kaybı

Ultrases dalga hızı ölçümleri, cisimlerin içinden geçen dalgaların ne kadar kolaylıkla geçebileceğini değerlendirmek için verimli bir deneydir. Beton gibi yapısında boşluk içeren, sülfat hücumu veya donma-çözülme gibi betonda yeni çatlaklar oluşturan mekanizmaların betona verdiği iç hasarı ölçmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Eğer betonda boşluk/çatlak miktarı fazla ise, dalgalar katı madde üzerinden gitmeyi tercih edecekleri için dalganın ilerleyeceği mesafe uzamakta ve böylece betonlarda dalga hızı yavaşlamaktadır. Dolayısı ile, sülfat hücumunun betonlara verdiği zarar, dalga hızlarındaki azalmanın belirlenmesiyle tespit edilebilmektedir. Sülfat hücumunun verdiği hasar ağırlık kaybının ölçülmesi ile de değerlendirilebilir. Ancak yüzeyden kopma sebebiyle oluşacak ağırlık kaybı, iç yapı hasarı hakkında yeteri kadar bilgi vermeyebilir. Ağırlık kaybı ile meydana gelecek hasar, sülfat hücumuna bu tezde uygulanan deney süresinden (56 gün) daha uzun sürelerde daha belirgin olabilir. Bu sebeple, genel olarak sülfat hücumu karşısında daha önceki bulgular ve literatür ışığında beklenen performans (R1 betonunun, L2 ve L3 betonlarından daha az dirençli olması) gerçekleşse de, bazı istisnalardan dolayı (Şekil 4.54), sülfat hücumunun ultrasonik yöntemle belirlenmesi daha anlamlı bulunmuştur.



Şekil 4.54. Sülfat Hücumuna Maruz Betonlarda Ağırlık Kaybı

Hem Şekil 4.53 hem de Şekil 4.54’de magnezyum sülfatın, sodyum sülfattan daha zararlı olduğu görülmüştür. Bunun sebebi, magnezyum sülfatın sadece kalsiyum alumino mono sülfhidrat ve kalsiyum alumino tri sülfhidrat (etrenjit) üreterek genleşme yoluyla hasar vermeyip, buna ilaveten magnezyum sülfatın, çimentoya bağlayıcılık özelliği veren C-S-H jellerinin de yapısını bozması olarak açıklanabilir.

Bakharev ve ark. (2002), alkalilerle aktive edilmiş cüruf içeren betonların sülfat dayanıklılığını tayin etmek amacıyla yaptıkları çalışmada, sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen numuneler üzerinde yapılan testler, numunelerde meydana gelen mukavemet kayıplarının, alkalilerle aktifleştirilmiş cüruf içeren betonlar için %17, normal portland çimentolu betonlar için ise %25 olduğunu ortaya koymuştur. Magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerde meydana gelen mukavemet kaybı ise daha büyük olup, alkalilerle aktive edilmiş cüruf katkılı betonlarda %23, normal Portland çimentolu betonlarda ise %37’dir (Bakharev ve ark., 2002).

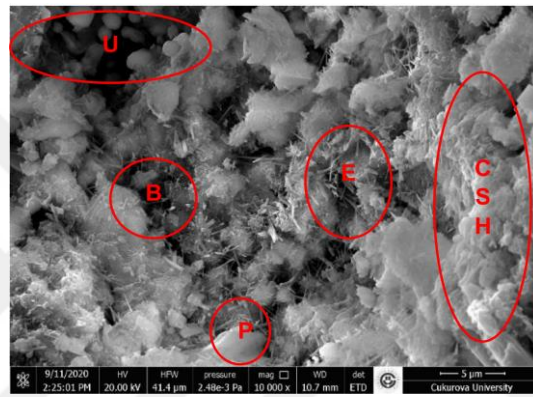
4.3.3. R1, L2, L3 Beton Numunelerinin Değişik Kür Sürelerine Göre SEM Görüntülerinin İncelenmesi

Bu bölümde %100 CEM 1 42,5 R tipi çimento ile üretilen referans R1, SD7,5+UK10+GYFC10 içerikli tasarım olan L2 ve SD7,5+UK10+GYFC10 içerikli tasarım olan L3 numunelerinin 3, 7, 14, 28, 56, 90, 180 ve 365 günlük SEM görüntülerinin değişik kür sürelerine göre gelişimi incelenmiştir.

SEM görüntülerinde; P: Portlandit, E: Etrenjit, B: Boşluk, U: Reaksiyona girmemiş tanecik, CSH: Kalsiyum Silika Hidrat jellerini sembolize etmektedir.

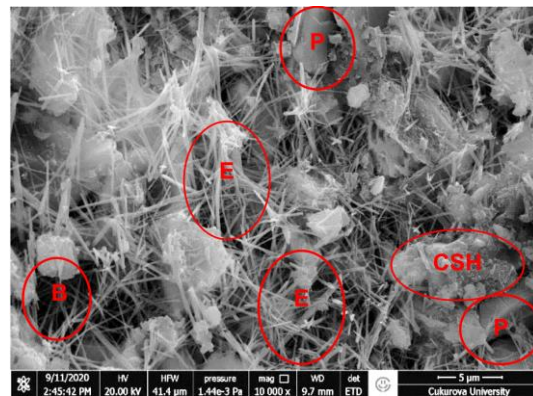
4.3.3.1. R1 Beton Numunelerinin Değişik Kür Sürelerine Göre SEM Görüntülerinin İncelenmesi

R1 betonlarında 3 gün sonunda portlandit ve CSH jellerinin oluşmaya başladığı görülmekle beraber reaksiyona girmemiş pek çok tanecik olduğu da açıkça görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.55'te görüldüğü üzere boşluklu yapı ve etrenjit oluşumu da göze çarpmaktadır.



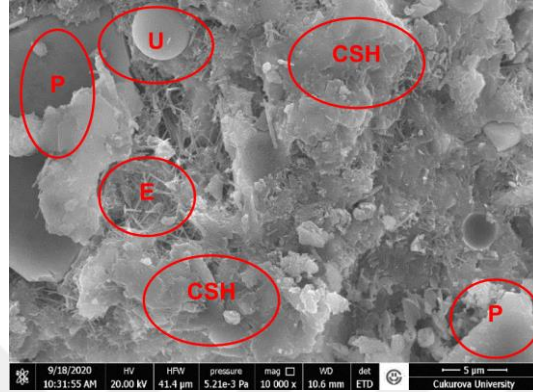
Şekil 4.55. R1 Betonunun 3 Günlük SEM Görüntüsü

Şekil 4.56'da görüldüğü üzere 7 gün sonunda boşluklu yapıya ilaveten yoğun bir şekilde etrenjit oluşmuştur.



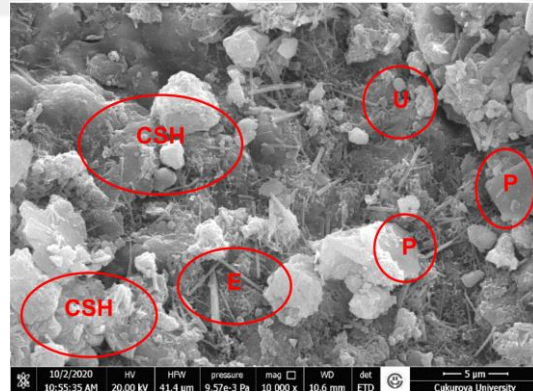
Şekil 4.56. R1 Betonunun 7 Günlük SEM Görüntüsü

Şekil 4.57’de görülen 14 günlük numunede, kalsiyum hidroksit ve CSH daha da artmış, boşluklar daha önceki günlere göre nispeten azalmıştır.



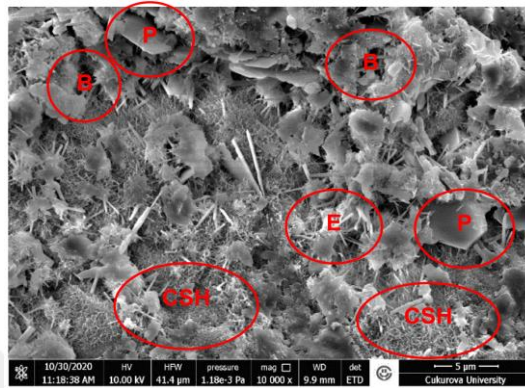
Şekil 4.57. R1 Betonunun 14 Günlük SEM Görüntüsü

Özellikle 28 günden itibaren sertleşmiş çimento hamurunun karmaşık yapısı ve tüm hidratasyon ürünleri (CSH, portlandit, etrenjit) daha da net olarak gözlenmiştir (Şekil 4.58).



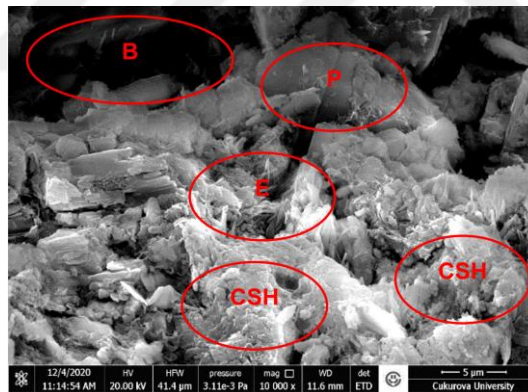
Şekil 4.58. R1 Betonunun 28 Günlük SEM Görüntüsü

56. gün SEM resmi incelendiğinde ortamda portlanditin belirgin şekilde arttığı görülmüştür (Şekil 4.59).



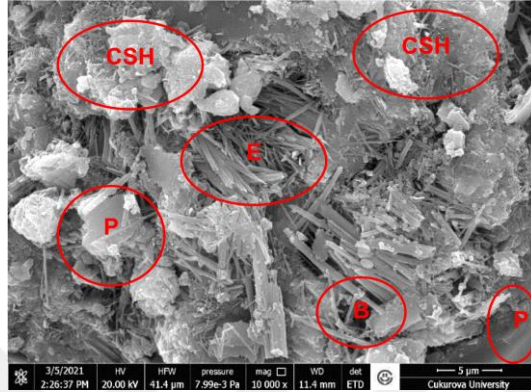
Şekil 4.59. R1 Betonunun 56 Günlük SEM Görüntüsü

Şekil 4.60'ta görüldüğü üzere R1 betonunda, 90. günde heterojen mikro yapının ve yer yer büyük boşlukların halen devam ettiği görülmektedir.



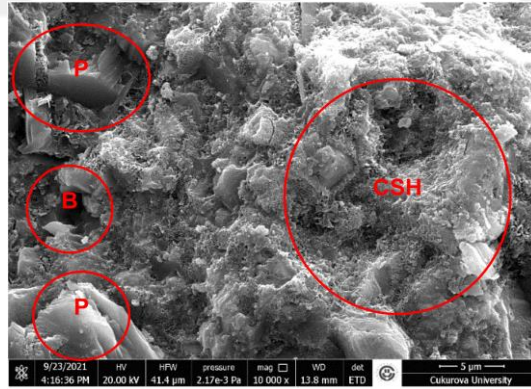
Şekil 4.60. R1 Betonunun 90 Günlük SEM Görüntüsü

180. günde hidratasyonun ilerlediği ve boşlukların nispeten azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.61).



Şekil 4.61. R1 Betonunun 180 Günlük SEM Görüntüsü

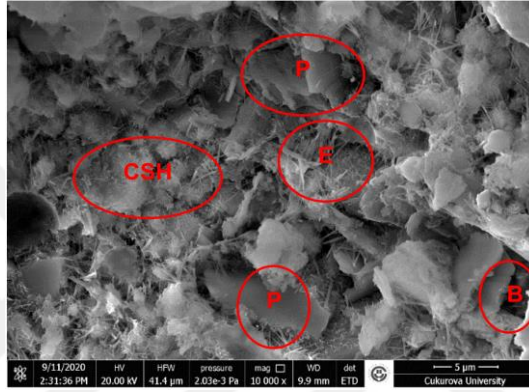
Şekil 4.62 incelendiğinde, 365 günlük numunelerde karmaşık yapı devam etse de hidratasyon ürünleri arasındaki boşlukların önceki günlere nispeten az dolduğu, CSH ve portlandit oluşumunun oldukça arttığı gözlenmiştir.



Şekil 4.62. R1 Betonunun 365 Günlük SEM Görüntüsü

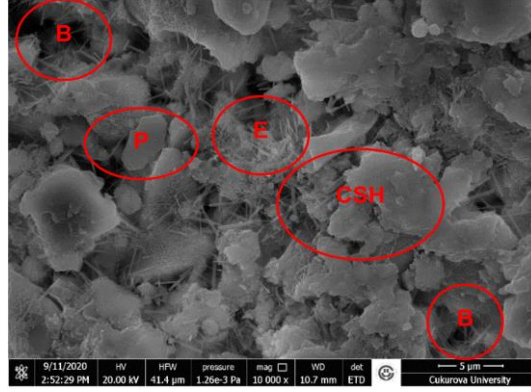
4.3.3.2. L2 Beton Numunelerinin Değişik Kür Sürelerine Göre SEM Görüntülerinin İncelenmesi

L2 betonlarında, R1 betonlarında olduğu gibi, 3 gün sonunda etrenjit, portlandit ve CSH jelleri görülmüştür. Yine R1 betonlarına benzer şekilde mikroyapıdaki boşluklar gözlenmiştir.

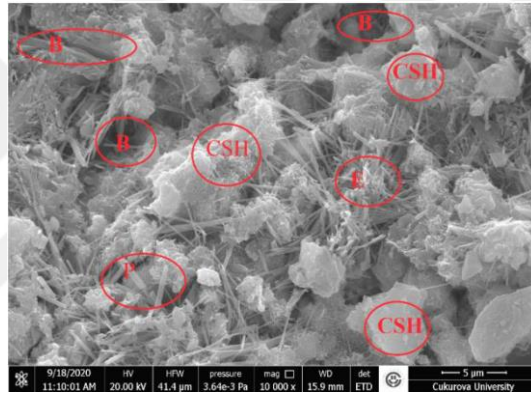


Şekil 4.63. L2 Betonunun 3 Günlük SEM Görüntüsü

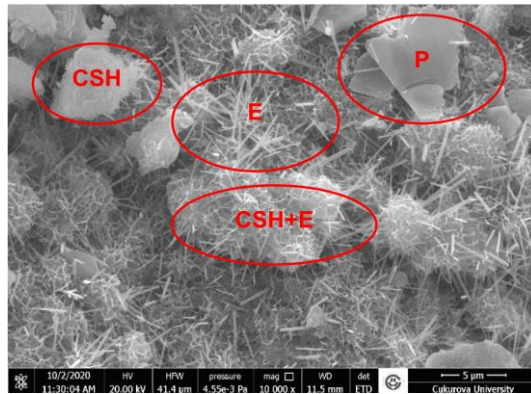
Şekil 4.64'te görüldüğü üzere, 7. gün sonunda portlandit belirgin şekilde artmıştır. Şekil 4.65 de incelenen 14 günlük numunelerde ise portlandit miktarındaki azalma ve Şekil 4.66'da görüldüğü üzere özellikle 28 günden sonra CSH jelindeki artış oranı dikkat çekmiştir. 3, 7 ve 14 günde boşluklu yapı görülürken, 28 günde boşlukların daha önceki kür sürelerine göre daha az olduğu görülmüştür. 28 günlük L2 ve R1 numuneleri kıyaslandığında, R1'de portlanditin daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 4.64. L2 Betonunun 7 Günlük SEM Görüntüsü

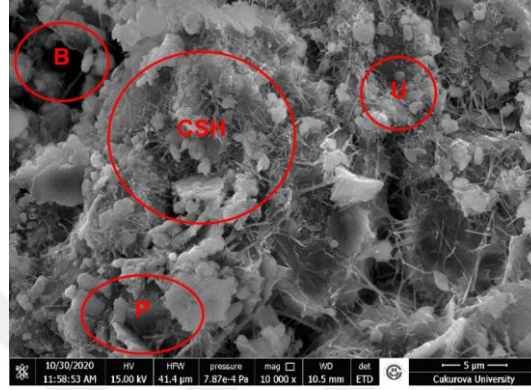


Şekil 4.65. L2 Betonunun 14 Günlük SEM Görüntüsü



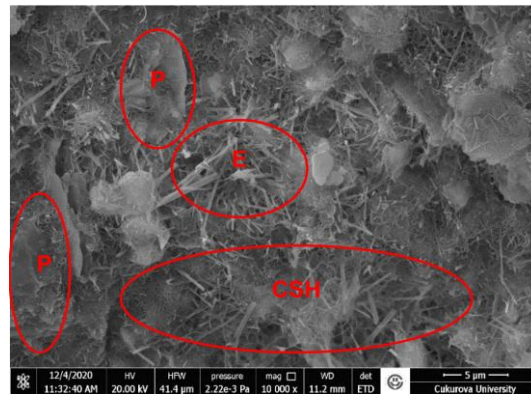
Şekil 4.66. L2 Betonunun 28 Günlük SEM Görüntüsü

L2 numunesi 56. günde incelenen SEM görüntüsünde belli noktalarda boşluklar halen mevcut olsa da R1'e göre daha azdır. Ayrıca portlanditin azaldığı da görülmüştür (Şekil 4.67).

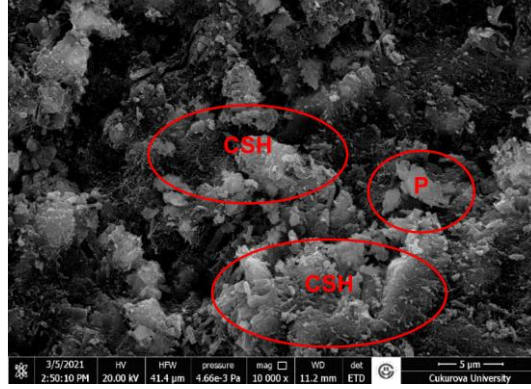


Şekil 4.67. L2 Betonunun 56 Günlük SEM Görüntüsü

Şekil 4.68'de görüntülenen 90 günlük numunelerde CSH artışı devam ederken, reaksiyona girmemiş tanecikler de gözlenmiştir. Büyük boşluklar küçülmüştür. Hem 90 hem de 180 gün sonunda L2 (Şekil 4.69) numunesinde, R1 numunesine göre daha az boşluklu bir yapı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca 180 günlük numunelerde iç yapının önceki yaşlara ve R1'e göre daha homojen olduğu, CSH jellerinin arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.68. L2 Betonunun 90 Günlük SEM Görüntüsü



Şekil 4.69. L2 Betonunun 180 Günlük SEM Görüntüsü

Şekil 4.70'göre 365 gün sonunda L2 numunesinin iç yapının oldukça boşluksuz ve neredeyse tamamen CSH içerdiği görülmüştür.

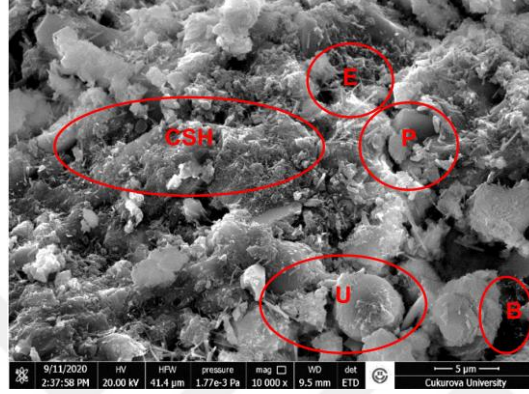


Şekil 4.70. L2 Betonunun 365 Günlük SEM Görüntüsü

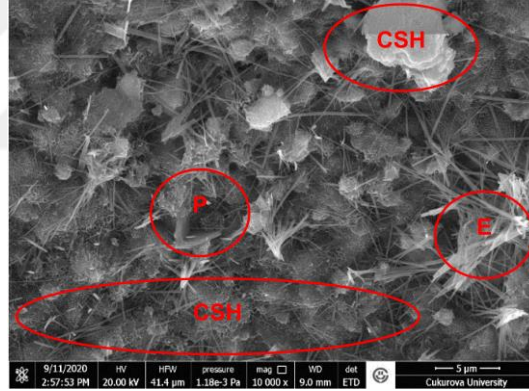
4.3.3.3. L3 Beton Numunelerinin Değişik Kür Sürelerine Göre SEM Görüntülerinin İncelenmesi

L3 betonlarında da hem R1 hem de L2 betonlarında olduğu gibi, 3 gün sonunda etrenjit, portlandit ve CSH jelleri görülmüştür (Şekil 4.71). Hidratasyonun daha az gerçekleşmesi ve puzolanik reaksiyonların da başlamaması nedeniyle, yine R1 ve L2 betonlarına benzer şekilde mikroyapıda boşluklar olduğu gözlenmiştir. Ancak, Şekil 4.72'de görüldüğü üzere, 7. günde, R1 ve L2 betonlarından farklı

olarak L3 betonunda portlanditin nispeten az olduğu ve CSH jellerinin belirgin şekilde arttığı tespit edilmiştir. Dolayısı ile, L3 betonlarında puzolanik reaksiyonların 7. gün numunelerinde etkin olduğu görülmüştür.

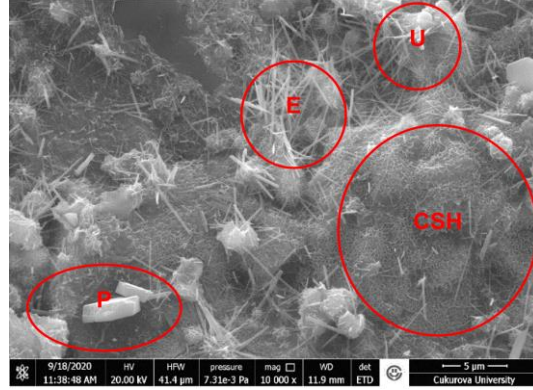


Şekil 4.71. L3 Betonunun 3 Günlük SEM Görüntüsü

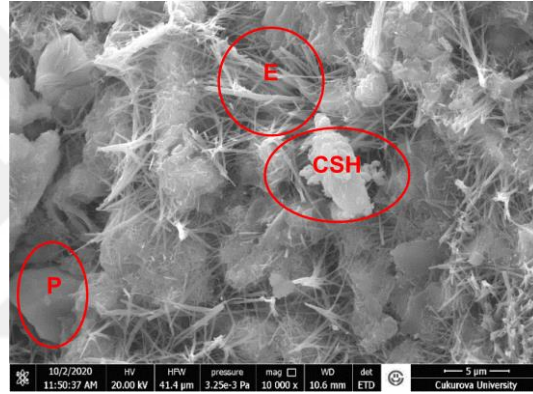


Şekil 4.72. L3 Betonunun 7 Günlük SEM Görüntüsü

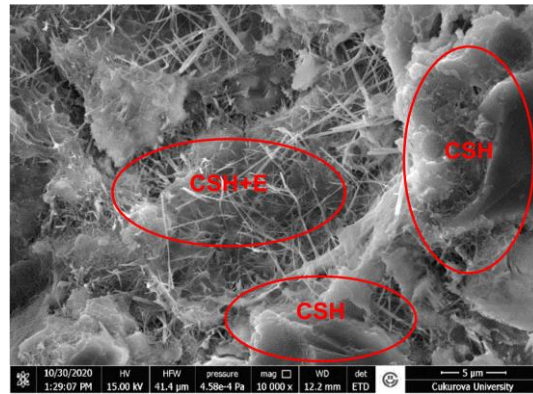
Şekil 4.73 de incelenen 14. gün ve Şekil 4.74 ‘de incelenen 28. günler sonunda CSH jelindeki artma dikkat çekmiştir. L2 betonlarında olduğu gibi, 28 günde ve sonrasındaki kür sürelerinde L3 betonlarında da portlanditin R1’e göre daha az olduğu, 56 günde boşlukların hem önceki yaşlara göre hem de R1’e göre belirgin şekilde azaldığı görülmüştür (Şekil 4.75).



Şekil 4.73. L3 Betonunun 14 Günlük SEM Görüntüsü

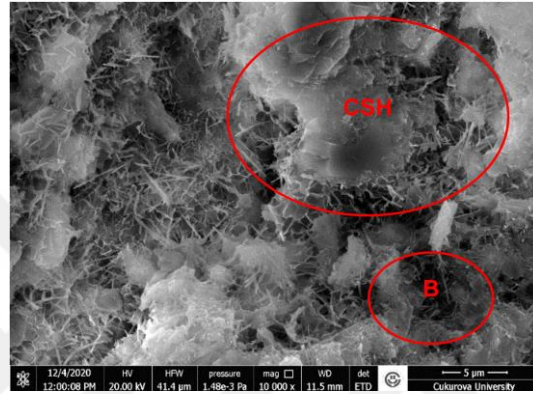


Şekil 4.74. L3 Betonunun 28 Günlük SEM Görüntüsü

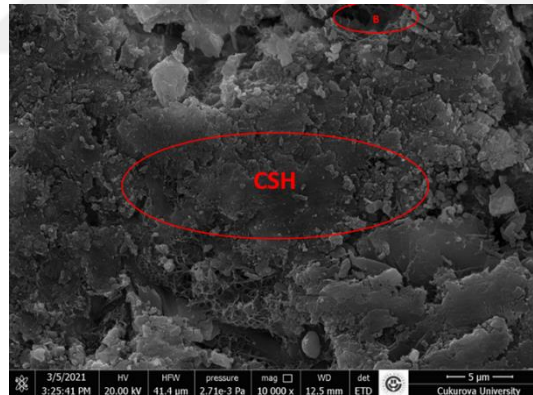


Şekil 4.75. L3 Betonunun 56 Günlük SEM Görüntüsü

Şekil 4.76'da görüldüğü üzere 90. günde CSH jelleri artmaya devam etmiştir. Şekil 4.77'de incelenen 180 günlük kür süresine sahip L3 betonunun iç yapısında CSH oldukça fazlalaşmış ama yer yer boşluklar görülmüş olsa da L3 betonları, hem 90 hem de 180 gün sonunda R1'e göre oldukça boşluksuz bir yapıya sahip olmuştur.

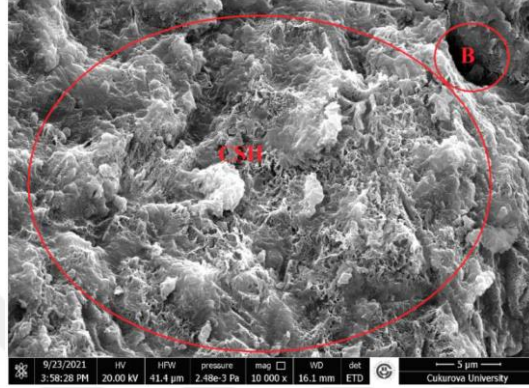


Şekil 4.76. L3 Betonunun 90 Günlük SEM Görüntüsü



Şekil 4.77. L3 Betonunun 180 Günlük SEM Görüntüsü

Şekil 4.78’de incelenen 365 günlük numunelerin az boşluklu, neredeyse hiç portlandit içermeyen, önceki kür sürelerine nispeten daha homojen (çoğunlukla CSH jellerinden oluşan) bir mikroyapıya sahip oldukları gözlenmiştir.



Şekil 4.78. L3 Betonunun 365 Günlük SEM Görüntüsü

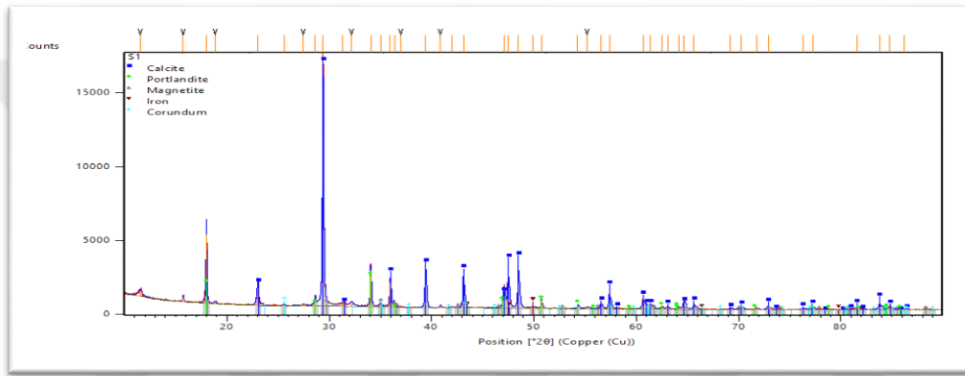
Yapılan tüm SEM incelemeleri göz önüne alındığında L2 ve L3 numunelerinin nispeten benzer yapıda olduğu ve gelişimlerinin benzer şekilde oldukları gözlemlenmiştir.

4.3.4. Diğer SEM (Taramalı Elektron Mikroskop) - XRD (X Işını Kırınımı) Mikroyapı Bulgularının İlişkilendirilmesi

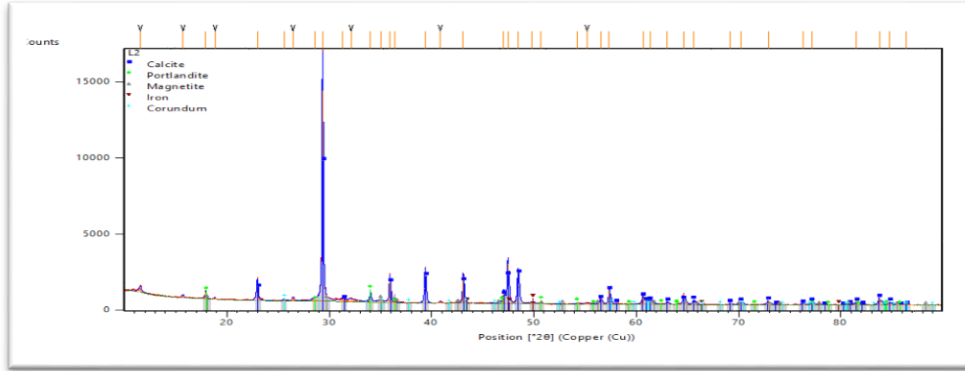
Daha önce belirtildiği gibi, Şekil 4.39 dan Şekil 4.45’e kadar olan grafiklerde sadece en belirgin pikler işaretlenmiştir. Oysaki XRD profilleri detaylı incelenince, Şekil 4.79, 4.80, 4.81, 4.82, 4.83, 4.84’te görülebildiği üzere, grafiklerde Al_2O_3 , Fe_2O_3 gibi oksitlerin de bulunduğu görülmektedir. Bu oksitlerin bir kaynağı agregalardır. Buna ilaveten, bu oksitler kısmen reaksiyona girmemiş portland çimentosu ve reaksiyona girmemiş mineral katkılardan da gelebilir. Bu durumu analiz edebilmek için, Şekil 4.48 ve 4.49’da verilen dayanım grafikleri tekrar incelenmiş ve özellikle L2 ve L3 betonlarında, 90. gün sonrasında bile halen önemli ölçüde dayanım artışı kaydedildiği görülmüştür. Dolayısı ile, grafiklerde belirtilen “corundum” Al_2O_3 , “magnetite” Fe_2O_3 oksitleri, kısmen, reaksiyonların

halen devam ettiğine işaret etmektedir. Reaksiyonların henüz tamamlanmadığına dair bir diğer kanıt ise, 90 günlük SEM analizlerinde görülen, henüz reaksiyona girmemiş taneciklerin varlığıdır (Şekil 4.85).

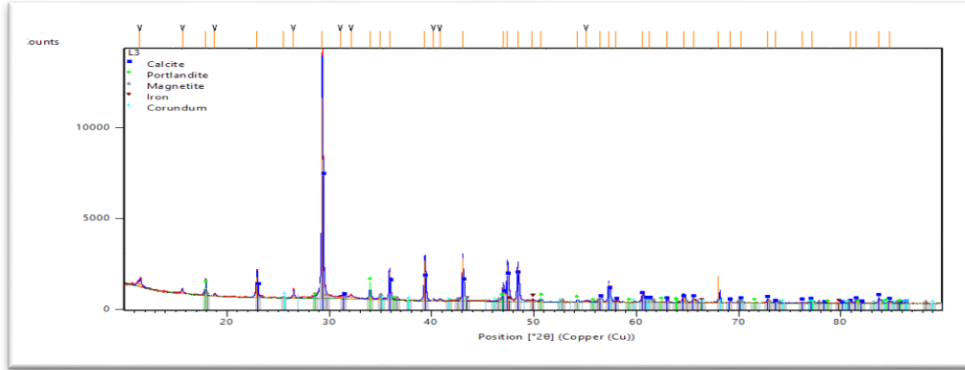
Ayrıca tüm yaşlarda porlandit piklerinin R1 betonunda fazla, L2 ve L3 betonlarında ise ikincil pozolanik reaksiyonlardan dolayı daha az olduğunu görülmektedir.



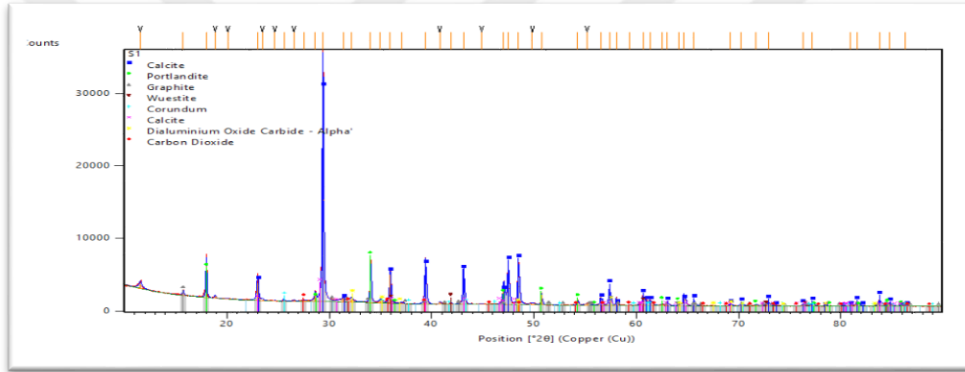
Şekil 4.79. 90 Günlük R1 Betonu XRD Profilleri



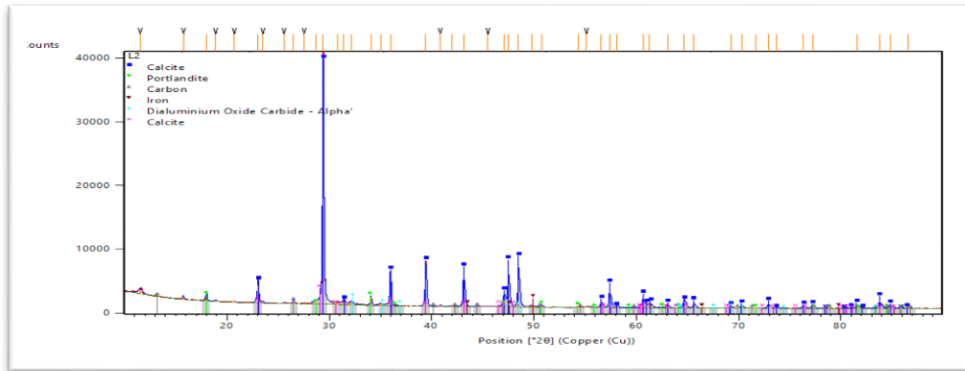
Şekil 4.80. 90 Günlük L2 Betonu XRD Profilleri



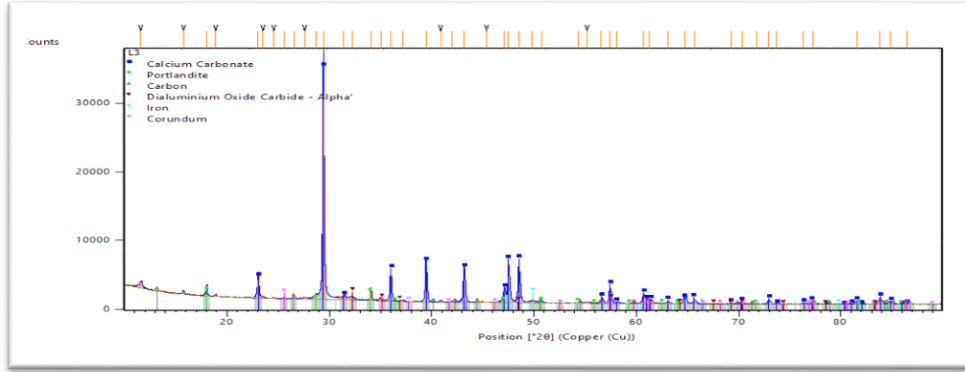
Şekil 4.81. 90 Günlük L3 Betonu XRD Profilleri



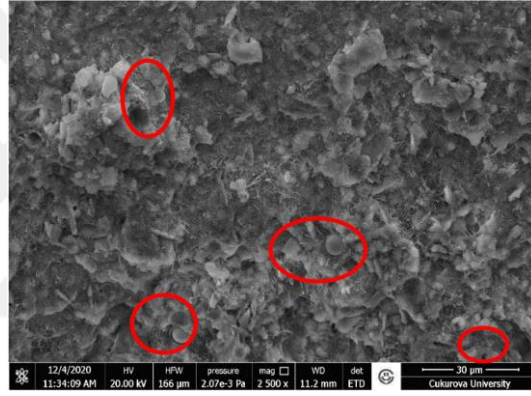
Şekil 4.82. 180 Günlük R1 Betonu XRD Profilleri



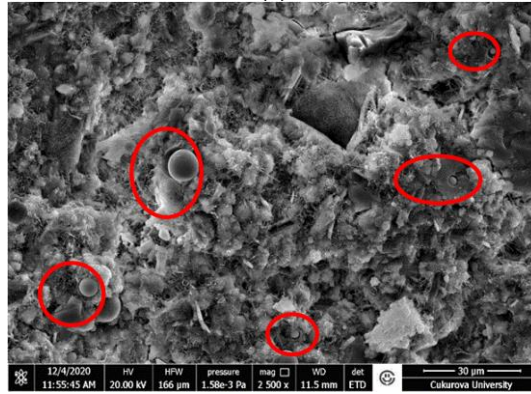
Şekil 4.83. 180 Günlük L2 Betonu XRD Profilleri



Şekil 4.84. 180 Günlük L3 Betonu XRD Profilleri



(a)



(b)

Şekil 4.85. 90. Gün Sonunda a) L2 ve b) L3 Betonunda Reaksiyona Girmemiş Tanecikler

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Mekanik Deney Sonuçları

5.1.1. Basınç Dayanımı

Betonda uçucu kül ikamesi referans numuneye göre erken yaşlarda dayanım kaybına sebep olsa da ilerleyen yaşlarda referans betondan daha yüksek dayanımlar vermektedir. TBDY'ne (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği) göre yapılarda kullanılması uygun olan minimum beton sınıfı C25/30'un 28. gün sonunda %50'ye kadar UK ikamesi olan tüm karışımlarda sağlandığı görülmüştür. 28. günden sonraki dayanım sonuçlarına bakıldığında %30'lara kadar ikame edilen UK mineral katkısının dayanım gelişimine pozitif yönde etkisi olduğu gözlemlenmiştir. % 30'a kadar uçucu kül ikame edilen tüm karışımlar, referans betonun basınç dayanımını 90. gün itibarı ile geçmiştir. Kür süresi ilerledikçe UK ikameli numuneler R1'e göre daha fazla dayanım gelişimi göstermişlerdir. UK katkılı numunelerde erken yaşlardaki dayanım gelişiminin R1'e göre az olması, pozolanik reaksiyonların ikincil reaksiyonlar olmasından ve C-S-H üretiminin daha uzun zaman gerektirmesinden kaynaklanmaktadır.

GYFC (granüle yüksek fırın cürufu), içerdiği CaO sayesinde dayanım gelişimine katkıda bulunabilen bir mineral katkıdır. TBDY'ne (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği) göre yapılarda kullanılması uygun olan minimum beton sınıfı C25/30'un 28. gün sonunda %30'a kadar GYFC ikamesi olan tüm karışımlarda sağlandığı görülmüştür. 90. günden sonraki dönemde özellikle %10 GYFC, %20 GYFC, %30 GYFC ikameli betonlarının ikincil hidratasyon reaksiyonları sayesinde R1'e göre çok daha iyi dayanım gelişimine sahip oldukları ve daha yüksek dayanım değerlerine ulaştıkları gözlemlenmiştir. GYFC50 ve GYFC75 numunelerinin de sırasıyla 90. ve 180. günlerde TBDY'ne göre yapılarda kullanılması uygun olan minimum beton sınıfı C25/30'u geçtiği tespit edilmiştir.

SD (silis dumanı) ince taneli ve yüksek SiO₂ içeriğine sahip olduğu için pozolanik reaksiyonlara daha erken başlayabilen bir mineral katkı olduğu ve bu sayede erken dayanıma daha çok katkıda bulunabildiği gözlemlenmiştir. Zaten Çizelge 4.3’de daha 3. gün gibi erken bir dönemde SD2.5 betonu referans numuneyi dayanım olarak geçtiği, SD5-SD7,5 betonlarının ise çok yaklaştıkları gözlemlenmiştir. Öte yandan henüz 28. günde TBDY’ne göre yapılarda kullanılması uygun olan minimum beton sınıfı C25/30’u tüm SD ikameli numunlerin geçtiği tespit edilmiştir.

Portland çimentosuna göre daha ince olan UK, SD, GYFC taneleri, portland çimentosunun hidrasyonunu iyileştirerek ve ayrıca filler etkisi sağlayarak dayanıma katkıda bulunmaktadır.

Beton karışımlarında CEM 1 42,5 R tipi çimento ile ikame edilerek, %5 SD ile farklı oranlarda GYFC kullanıldığında erken dayanımlar hem referans betonuna hem de sadece %5 SD kullanılan betona göre düşük kalmış, 28. ve 90. günlerde yakın değerlere ulaşmış, özellikle 90. günden itibaren SD5+GYFC10 ve SD5+GYFC20 kombinasyon betonları hem referans betonuna hem de sadece %5 SD kullanılan betona göre yüksek dayanım değerlerine ulaştıkları gözlemlenmiştir. Bu durum çok ince taneli SD erken dayanımı artırırken, SD ve GYFC sayesinde ikincil reaksiyonlar daha fazla gerçekleşerek dayanım gelişimlerinin artması olarak açıklanabilir. Henüz 7. günde TBDY’ne göre yapılarda kullanılması uygun olan minimum beton sınıfı C25/30’u tüm SD+GYFC ikameli numunlerin geçtiği tespit edilmiştir. Özellikle ilerleyen yaşlarda, SD5+GYFC10 ve SD5+GYFC20 beton numunelerinin dayanım gelişiminin SD5+GYFC30 numunesine göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

CEM 1 42,5 R tipi çimento ile sadece %5 SD ikamesi özellikle erken yaşlarda referans betonuna yakın sonuçlar verirken, ilerleyen yaşlarda yüksek dayanım gelişimi sayesinde çok daha yüksek dayanımlara ulaşmıştır. 28. Günde tüm SD+UK ikameli numunelerin dayanımlarının TBDY’ne göre yapılarda kullanılması uygun olan minimum beton sınıfı C25/30’un dayanımını geçtiği tespit

edilmiştir. Öte yandan, UK ikamesi ise R1'e ve sadece SD ikameli betonlara göre erken yaşlarda dayanım kaybına sebep olurken, ilerleyen yaşlarda SD5+UK10 ve SD5+UK20 karışımları R1'e göre daha yüksek dayanımlar vermiştir. Dolayısı ile, SD ve UK uygun oranlarda beraber kullanıldığında, özellikle nihai dayanımlarda, referans betonundan daha yüksek değerlere ulaşırken, sadece % 5 SD içeren betona ise çok yakın değerler ile daha ekonomik ve çevreci bir reçete elde edilebildiği sonucuna varılmıştır.

%7,5 SD ile farklı oranlarda GYFC kullanıldığında erken dayanımlar hem referans betonuna hem de sadece %7,5 SD kullanılan betona göre düşük değerler olsa da özellikle 90. günden itibaren tüm Çimento+SD+GYFC kombinasyon betonları hem referans betonuna hem de sadece %7,5 SD kullanılan betona göre yüksek dayanım değerlerine ulaşmışlardır. 7. günde TBDY'ne göre yapılarda kullanılması uygun olan minimum beton sınıfı C25/30'u tüm SD+GYFC ikameli numunlerin geçtiği tespit edilmiştir. %7,5 oranında ikame edilen ince taneli SD filler etkisi ile erken dayanımı artırırken, GYFC sayesinde ikincil reaksiyonlar daha fazla gerçekleşerek numunelerin dayanım gelişim hızı artmıştır.

Sadece %7,5 SD ile üretilen beton özellikle erken yaşlarda referans betonuna yakın sonuçlar vermiştir. 7. günde TBDY'ne göre yapılarda kullanılması uygun olan minimum beton sınıfı C25/30'u SD7,5+UK10 ve SD7,5+UK20 ikameli numunlerin geçtiği tespit edilmiştir. SD ve UK uygun oranlarda beraber kullanıldığında 28. günden itibaren R1'e göre daha yüksek dayanım gelişimine ulaşmış, 180. günden itibaren referans betonu dayanım olarak geçmiştir. Sadece %7,5 SD ile üretilen beton ile kıyaslama yapıldığında ise SD7,5+UK10 ve SD7,5+UK20 betonları daha ekonomik bir reçete ile çok yakın dayanım değerlerine ulaşmıştır.

Silis dumanı mineral katkısı yüksek puzolanik aktivitesi ve inceliği sayesinde tek başına ikame edildiğinde referans beton dayanımlarına 3. ve 7. gün gibi erken yaşlarda çok yakın değerler verdiği gözlemlenmiştir. 28. günde TBDY'ne göre yapılarda kullanılması uygun olan minimum beton sınıfı C25/30'u

SD5+UK35+GYFC%5 ikameli numune hariç diğer tüm numunelerin geçtiği tespit edilmiştir. UK ve GYFC mineral katkıları beraber ikame edilerek Çimento+SD+UK+GYFC kombinasyonu oluşturulduğunda puzolanik aktivitesi SD ye göre daha düşük olan UK ve GYFC mineral katkılarından dolayı erken yaş dayanımları hem referans hem de sadece %5 SD ile ikame edilmiş betonlara göre düşük olsa da ikincil reaksiyonlar (hidratasyon neticesinde oluşan CaOH_2 istenmeyen ürününün mineral katkılardan gelen silis mineralleri ile tepkime vermesi sonucu oluşan puzolanik reaksiyon) neticesinde oluşan ekstra C-S-H jelleri ile betonun iç yapısı güçlenmiş ve SD5+UK5+GYFC5, SD5+UK10+GYFC10, SD5+UK15+GYFC15 beton numuneleri 90. gün gibi uzun dönemde yüksek dayanım gelişimi ile hem referans hem de sadece % 5 SD ile ikame edilmiş betonlara göre daha yüksek dayanımlara ulaşmışlardır. Bu reçeteler aynı zamanda daha ekonomik ve atık olan mineral katkıların kullanılmasından dolayı daha çevre dostu reçeteler olarak gözlemlenmiştir.

%7,5 SD ikamesi %5 SD ikamesi ile benzer mekanik davranış göstermiş, 28. günde TBDY'ne göre yapılarda kullanılması uygun olan minimum beton sınıfı C25/30'u SD7,5+UK35+GYFC35 ikameli numune hariç diğer tüm numunelerin geçtiği tespit edilmiştir. SD7,5+UK10+GYFC10 ve SD7,5+UK15+GYFC15 karışımları ile üretilen beton numunelerinin, 90. günden itibaren yüksek dayanım gelişimleri sayesinde, basınç dayanım değerleri hem sadece %7,5 SD ile üretilen numunelere hem de referans numuneye göre daha yüksek çıkmıştır.

Ayrıca aynı oranlarda ikame edilen UK ve GYFC yanında %7,5 oranında ikame edilen SD, %5 oranında ikame edilen SD li reçetelere göre daha iyi dayanım sonuçlarına ulaşmıştır.

5.1.2. Eğilme Dayanımı

%20 ve %30 UK ikameli numuneler eğilme dayanımı olarak referans numuneyi 90 günde yakalarken, 180 günde ise %5 ve %10 UK ikameli

numunelerinde referans numuneyi yakaladıkları gözlemlenmiştir. %50, %75, %90 UK ikameli numuneler eğilme dayanımı olarak hiç kür süresinde referans numuneyi yakalayamadıkları tespit edilmiştir.

UK ile benzer şekilde, %20 ve %30 GYFC ikameli numuneler eğilme dayanımı olarak referans numuneyi 90 günde yakalarken, 180 günde ise %5 ve %10 GYFC ikameli numunelerinde referans numuneyi yakaladıkları gözlemlenmiştir. %50, %75, %90 GYFC ikameli numuneler eğilme dayanımı olarak hiç kür süresinde referans numuneyi yakalayamadıkları gözlemlenmiştir.

SD ikameli numunelerden %7,5 SD ikameli numune 1. günde, %5 SD ikameli numune 3. günde, %2,5 SD ikameli numune 180. günde eğilme dayanımı olarak referans numuneyi yakalamışlardır. %10, %15, %20 SD ikameli numuneler 365. güne kadar olan kür sürelerinde referans numuneye yakın değerler verdikleri fakat yakalayamadıkları tespit edilmiştir.

SD ve GYFC ikameli numunelerden SD5+GYFC10 numunesi 90 günden itibaren, SD5+GYFC20 numunesi 28 günden itibaren, SD5+GYFC30 180 günden itibaren eğilme dayanımı olarak referans numuneyi geçmişlerdir.

SD ve UK ikameli numunelerden SD5+UK10 numunesi 90 günden itibaren, SD5+UK20 ve SD5+UK30 numuneleri 180 günden itibaren eğilme dayanımı olarak referans numuneyi geçmişlerdir.

SD ve GYFC ikameli numunelerden SD7,5+GYFC10 numunesi 90 günden itibaren, SD7,5+GYFC20 numunesi 28 günden itibaren, SD7,5+GYFC30 180 günden itibaren eğilme dayanımı olarak referans numuneyi geçmişlerdir.

SD ve UK ikameli numunelerden SD7,5+UK10 numunesi 90 günden itibaren, SD7,5+UK20 ve SD7,5+UK30 numuneleri 180 günden itibaren eğilme dayanımı olarak referans numuneyi geçmişlerdir.

SD, UK ve GYFC ikameli numunelerden SD5+UK5+GYFC5 numunesi 1 günde, SD5+UK10+GYFC10 numunesi 3 günde, SD5+UK15+GYFC15 numunesi 7 günde eğilme dayanımı olarak referans numuneyi geçmişlerdir.

SD5+UK25+GYFC25 ve SD5+UK35+GYFC35 numuneleri hiçbir kür süresinde eğilme dayanımı olarak referans numuneyi yakalayamamışlardır.

SD, UK ve GYFC ikameli numunelerden SD7,5+UK5+GYFC5 numunesi 3 günde, SD7,5+UK10+GYFC10 ve SD7,5+UK15+GYFC15 numuneleri 7 günde eğilme dayanımı olarak referans numuneyi geçmişlerdir. SD7,5+UK25+GYFC25 ve SD7,5+UK35+GYFC35 numuneleri hiçbir kür süresinde eğilme dayanımı olarak referans numuneyi yakalayamamışlardır.

5.1.3. Basınç ve Eğilme Dayanımı Arasındaki İlişkiler

Mekanik deneylerin yapıldığı tüm karışımların 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360. gündeki basınç ve eğilme dayanımları sonuçları her bir gün için ayrı ayrı karşılaştırılmış ve her gün için sonuçlar arasındaki korelasyon üssel olarak araştırılmıştır. Tüm yaşlar için determinasyon katsayısı (R^2) oldukça yüksek çıkmıştır. İlk 28 gün için R^2 değeri, 0,806 ile 0,910 arasında değişmiştir. Bu değer, 90 gün sonunda yaklaşık 0,944 olmuştur. 180 gün ve 360 günde ise, R^2 değeri 0,99 mertebesinde.

Basınç dayanımı ve eğilme dayanımı arasındaki korelasyon, verileri karışım tiplerine göre ayırarak ikili, üçlü ve dörtlü bağlayıcı sistemler için basınç dayanımı ve eğilme dayanımı ilişkisi üssel olarak araştırılmıştır. Tüm determinasyon katsayıları (R^2) 0,969 ile 0,985 arasında bulunmuştur.

Sonuç olarak tüm grafikler karşılaştırıldığında, basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasındaki ilişkinin bağlayıcı tipinden ziyade, kür süresinden daha fazla etkilendiği sonucuna varılmıştır.

Tüm verilerin tek grafik üzerinde gösterilmesiyle elde edilen doğrusal eğilim çizgisine göre (Şekil 4.32), basınç dayanımı ile eğilme dayanımı (MPa cinsinden) arasındaki ilişki aşağıda gibi olmuştur:

$$\text{Eğilme Dayanımı} = 0,1349 * \text{Basınç Dayanımı}^{0,995}$$

Bu ilişkide R^2 değeri ise, 0,976 gibi oldukça yüksek bir değer olup, basınç ve eğilme dayanımları arasında kuvvetli bir ilişkinin var olduğu gözlemlenmiştir. Basınç dayanımı için yapılan tüm sonuç değerlendirmeleri aynı ikame oranındaki reçeteler için olmak kaydıyla eğilme dayanımları içinde geçerlidir.

5.2. Dayanıklılık (Durabilite) Deney Sonuçları ve Mikroyapı İncelemeleri ile Sonuçların Desteklenmesi

L2 (SD7,5+UK10+GYFC10) ve L3 (SD7,5+UK15+GYFC15) beton numuneleri mekanik dayanımlara göre en iyi performans gösteren numuneler olmuşlardır. Bu numuneler ve R1 (%100 CEM 1 42,5 R) olarak sembolize edilen referans numuneler üzerinde dayanıklılık (durabilite) deneyleri yapılmıştır.

5.2.1. Magnezyum Sülfat Çözeltisine Karşı Dayanıklılık Deney Sonuçları ve Sonuçların Kıyaslanması

L2 beton numunesinde, R1 ve L3 beton numunelerine kıyasla ultrasonik atımlı dalga hızında en az etkilenme görülmüştür. Diğer bir ifadeyle, L2 beton numunesi magnezyum sülfat çözeltisinde bekletildikten sonra içsel olarak en az bozulmaya uğramış numune olmuştur. Ayrıca magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen L2 numunesi 56. günde R1 ve L3 numunelerine kıyasla en fazla dayanım değerini kazanan numune olduğu gözlemlenmiştir. En fazla etkilenen ise beklediği üzere ultrasonik atımlı hızı en fazla azalan R1 numunesi olmuştur. Bunun sebepleri; mineral katkı ikameli betonlarda daha az klinker bulunması ile bağlantılı olarak daha az C_3A karma oksitinin bulunması ve SD, UK, GYFC gibi mineral katkıların ikamesi ile üretilen betonlarda, ileri yaşlarda puzolanların reaksiyona girmesiyle betonun dayanımını artıran yeni C-S-H jellerinin üretilmesi aynı anda mevcut portlanditin azalması (portlandit çabuk çözülebilen ve iç yapıyı zayıflatabilen bir hidratasyonu ürünüdür) ve böylece betonun daha güçlü bir iç yapı ile dayanım ve dayanıklılığının artması olarak açıklanabilmektedir.

5.2.2. Sodyum Sülfat Çözeltisine Karşı Dayanıklılık Deney Sonuçları ve Sonuçların Kıyaslanması

L2 beton numunesinin hem ağırlık kaybı oranının %0,65 ile en az olması hem de 56. gün basınç dayanımı deney sonuçlarına göre en yüksek dayanımı vermesinden dolayı, L2 beton numunesi sodyum sülfat çözeltisine karşı dayanıklılığı en yüksek numune olmuştur. R1 numunesi ise beklendiği üzere sodyum sülfat çözeltisine maruz kaldıktan sonra hem ultrasonik hız kaybının yükselmesi hem de basınç dayanımının diğer numunelere göre düşük çıkması nedeniyle durabilitesi en düşük beton numunesi olmuştur. Bunun sebebi magnezyum sülfat çözeltisi deneyinde de açıklandığı gibi; SD, UK, GYFC gibi mineral katkıların ikamesi ile üretilen betonlarda, ileri yaşlarda puzolanların devreye girmesiyle bir yandan yeni C-S-H jellerinin üretilmesi bir yandan da portlanditin azalması olayının eş zamanlı olarak gerçekleşmesi ve böylece betonun iç yapısının güçlenmesi olarak açıklanmıştır.

Elde edilen test sonuçlarına göre magnezyum sülfatın, sodyum sülfattan daha zararlı olduğu görülmüştür. Bunun sebebi, magnezyum sülfatın sadece kalsiyum alumino mono sülfat hidrat ve kalsiyum alumino tri sülfat hidrat (etrenjit) üreterek genleşme yoluyla hasar vermeyip, buna ilaveten magnezyum sülfatın, çimentoya bağlayıcılık özelliği veren C-S-H jellerinin de yapısını bozması olarak açıklanabilir.

5.2.3. Beton Numunelerinin Klorür İyonlarının Geçişlerine Karşı Direnç Deney Sonuçları

L2 beton numunesinde, R1 ve L3 beton numunelerine oranla klor iyonu geçiş dirençlerinin daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Özellikle sadece CEM 1 42,5 R tipi çimento ile yapılan betonların, farklı tür ve oranlarda mineral katkı ikamesi ile yapılan betonlara nazaran uzun dönemdeki diğer mekanik ve durabilite

özelliklerine paralel olarak klor geçişlerine karşı direncinin az olduğu tespit edilmiştir. Deneylerin yapıldığı 56 günlük numunelerin SEM incelemeleri dikkate alındığında, klorür iyonu geçirimsizliği deneylerinin sonuçlarını teyit eden bulgular elde edilmiştir. 56. gün sonunda R1 betonunda, L2 ve L3 betonlarına göre daha boşluklu bir içyapı görülmüştür. Hatta 180. gün sonunda bile, R1 betonuna ait görüntüde boşluklu ve heterojen içyapı tespit edilmiştir.

5.2.4. Beton Numunelerinin Basınç Altında Su İşleme Derinliği Deney Sonuçları

L2 beton numunesinin, R1 ve L3 beton numunelerine göre daha düşük su işleme derinliğine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Klor geçirimsizliği deney sonuçlarına paralel olarak bu sonucunda hem mekanik hem de diğer durabilite deney sonuçları ile örtüştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca SEM analizi ile mikroyapı incelendiğinde, R1 karışımında çok erken yaşlar hariç her yaşta daha fazla portlandit bulunmuştur. Bu bulgu, basınç altında su geçirimsizlik deney sonuçlarını da desteklemiştir. Portlandit suya karşı dirençli olmayıp suda çözünebilir. Dolayısı ile portlandit içeriği fazla olan betonların geçirimsizliğinin fazla olması beklenir.

5.3. Mikroyapısal Sonuçlar

5.3.1. R1 (%100 CEM 1 42,5 R) Beton Numunelerinin Değişik Kür Sürelerine Göre SEM Görüntülerinin İncelenmesi

R1 betonlarında 3 gün sonunda portlandit ve CSH jellerinin oluşmaya başladığı görülmekle beraber reaksiyona girmemiş pekçok tanecik, boşluklu yapı ve etrenjit oluşumu da gözlemlenmiştir. 7 gün sonunda yoğun bir şekilde etrenjit, 14 günlük numunelerde, kalsiyum hidroksit ve CSH daha da artmış, boşlukların daha önceki günlere göre nispeten azaldığı gözlemlenmiştir. Özellikle 28 günden itibaren hidratasyon ürünleri (CSH, portlandit, etrenjit) daha da net olarak

gözlenmiştir. 56 günde ortamda portlanditin belirgin şekilde arttığı görülmüştür. 90 günde mikroyapının heterojen yapısının ve yer yer büyük boşlukların halen devam ettiği görülmektedir. 180 günde hidratasyonun ilerlediği ve boşlukların nispeten azaldığı, 365 günlük numunelerde karmaşık yapı devam etse de hidratasyon ürünleri arasındaki boşlukların önceki günlere nispeten az dolduğu, CSH ve portlandit oluşumunun oldukça arttığı gözlenmiştir.

5.3.2. L2 (SD7,5+UK10+GYFC10) Beton Numunelerinin Değişik Kür Sürelerine Göre SEM Görüntülerinin İncelenmesi

L2 betonlarında, R1 betonlarında olduğu gibi, 3 gün sonunda etrenjit, portlandit ve CSH jelleri ve mikroyapıdaki boşluklar gözlenmiştir. 7 gün sonunda portlandit belirgin şekilde artmıştır. 14 günlük numunelerde ise portlanditteki azalma ve özellikle 28 günden sonra CSH jelindeki artış gözlemlenmiştir. 28 günlük L2 ve R1 numuneleri kıyaslandığında, R1’de portlanditin daha fazla olduğu görülmüştür. 56 günde boşluklar halen mevcut olsa da R1’e göre daha azdır. Ayrıca portlanditin iyice azaldığı da görülmüştür. 90 günlük numunelerde CSH artmaya devam etmiştir. Hem 90 hem de 180 gün sonunda L2 betonları, R1 betonlarına göre daha az boşluklu bir yapı oluşturmuştur. 180 günlük numunelerde iç yapının önceki yaşlara ve R1’e göre daha homojen olduğu, 365 gün sonunda ise iç yapının oldukça boşluksuz ve neredeyse tamamen CSH içerdiği gözlenmiştir.

5.3.3. L3 (SD7,5+UK15+GYFC15) Beton Numunelerinin Değişik Kür Sürelerine Göre SEM Görüntülerinin İncelenmesi

L3 betonlarında da hem R1 hem de L2 betonlarında olduğu gibi, 3 gün sonunda etrenjit, portlandit ve CSH jelleri ve mikroyapıda boşluklar olduğu gözlenmiştir. Ancak, 7 günde ise R1 ve L2 betonlarından farklı olarak bu betonlara nispeten portlanditin az olduğu olduğu ve CSH jellerinin belirgin şekilde arttığı

tespit edilmiştir. Dolayısı ile, L3 betonlarında puzolanik reaksiyonların 7 günlük numunelerde etkin olduğu görülmüştür. 14 ve 28 gün sonunda CSH jelindeki artma dikkat çekmiştir. L2 betonlarında olduğu gibi, 28 günde ve sonrasındaki kür sürelerinde L3 betonlarında da portlanditin R1'e göre daha az olduğu görülmüştür. 56 günde boşlukların hem önceki yaşlara göre hem de R1'e göre belirgin şekilde azaldığı görülmüştür. 90 günde CSH jelleri artmaya devam etmiştir. 180 gün sonunda yapıda CSH oldukça fazlalaşmış, 365 günlük numunelerin az boşluklu, neredeyse hiç portlandit içermeyen, önceki kür sürelerine nispeten daha homojen (çoğunlukla CSH jellerinden oluşan) bir mikroyapıya sahip oldukları gözlenmiştir.

L2 ve L3 numunelerinin nispeten benzer yapıda olduğu ve gelişimlerinin benzer oldukları gözlemlenmiştir.

5.3.4. R1, L2, L3 Numuneleri için XRD (X Işını Kırınımı) Mikroyapı Bulguları

XRD grafikleri incelendiğinde en belirgin kristaller portlandit ve kalsit olmuştur. Tüm günlerde ve tüm karışımlarda görülen kalsit, kireçtaşı agregasından kaynaklanmaktadır. Portlandit ise, portland çimentosunun reaksiyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksittir. Analizlerin yapıldığı en erken yaş olan 3. gün sonunda portlandit piki her üç karışımda da görünmektedir. Bu durum, SEM analizlerinde de görülmüştür. Kür süresi arttıkça bağlayıcı olarak sadece portland çimentosu içeren R1 karışımında, özellikle 28. güne kadar, portlandit piki artmış yani kalsiyum hidroksit miktarı daha da yükselmiştir. İlerleyen yaşlarda R1 numunelerinde portlandit piki belirginliğini korurken L2 ve L3 numunelerinde ileri yaşlarda portlandit pikinin oldukça azaldığı gözlemlenmiştir.

XRD profilleri detaylı incelendiğinde, grafiklerde Al_2O_3 , Fe_2O_3 gibi oksitlerin de bulunduğu görülmektedir. Bu oksitlerin bir kaynağı agregalardır. Buna ilaveten, bu oksitler kısmen reaksiyona girmemiş portland çimentosu ve reaksiyona girmemiş mineral katkılardan da gelebildiği söylenebilir. Dolayısı ile,

grafiklerde belirtilen “corundum” Al_2O_3 , “magnetite” Fe_2O_3 oksitleri, kısmen, reaksiyonların halen devam ettiğine işaret etmektedir. Reaksiyonların henüz tamamlanmadığına dair bir diğer kanıt ise, 90 günlük SEM analizlerinde görülen, henüz reaksiyona girmemiş taneciklerin varlığıdır (Şekil 4.64).

Ayrıca tüm yaşlarda porlandit piklerinin R1 betonunda fazla, L2 ve L3 betonlarında ise ikincil pozolanik reaksiyonlardan dolayı daha az olduğunu görülmektedir.

Çimento yerine SD, GYFC, UK gibi mineral katkı ikame edilerek üretilen betonların, sadece çimento ile üretilen betonlara kıyasla dayanım, dayanıklılık gibi özelliklerinin iyileşmesinin yanında daha ekonomik, çevre dostu, daha az CO_2 salımı yapan ve sürdürülebilir olduğu sonuçlarına varılmıştır.

5.4. Öneriler

Bu çalışmada sabit olarak kabul edilen su/bağlayıcı oranının farklı değerlerine göre çalışma yapılabilir.

Daha düşük su/bağlayıcı oranlarının kullanılması durumunda, akışkanlaştırıcı kimyasal katkıların kullanılması ve kullanılan kimyasal katkıların mineral katkılar ile birlikte oluşturacağı mekanik, durabilite ve mikroyapı özellikleri incelenebilir.

Bu tez çalışması kapsamına alınmayan farklı durabilite özelliklerini kapsayan deneylerin (alkali-silika, donma-çözünme, hidratasyon ısısı ölçümü vb.) mevcut olduğu bir çalışma yapılabilir. Ayrıca, çeşitli durabilite deneylerine (sülfat direnci, donma-çözülme, klor iyonu geçirgenliği, alkali-silika v.b) maruz kalmış numuneler üzerinde de SEM çalışmalarının yapılması faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- ACI Committee 234. Abstract of: guide for the use of silica fume in concrete. ACI Mater J 1995;92(4):437–40.
- ACI Committee 234, “Guide for the use of silica fume in concrete”, American Concrete Institute, Farmington Hills, 2000.
- ACI 211 Committee. (2002). Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete Reported by ACI Committee 211. In American Concrete Institute (Vol. 2, pp. 1-26).
- Adak, D., Sarkar, M., & Mandal, S. (2017). Structural performance of nano-silica modified fly-ash based geopolymer concrete. Construction and Building Materials, 135, 430-439.
- Agar, S. (2009). Farklı Özellikte Puzolan Katkılı Harçların Durabiliteye Etkileri (Doctoral Dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Ahmed, M.; El Hadi, K.M.; Hasan, M.A.; Mallick, J.; Ahmed, A. (2014) Evaluating the co-relationship between concrete flexural tensile strength and compressive strength. Int. J. Struct. Eng. 5 [2], 115–131. <https://doi.org/10.1504/IJSTRUCTE.2014.060902>.
- Akçaözoğlu K., 2007. Silis Dumanı İçeren Yüksek Dayanımlı Harçlarda Numune Boy Değişiminin Basınç Dayanımı ve Birim Kısılma Üzerindeki Etkisi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Adana, 140s.
- Akçaözoğlu K., Güldür Ş.E., Mikronize Kalsit ve Uçucu Kül Katkısının Beton Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2017. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid/issue/43399/524789>
- Akkaya, Y., Bayramov, F., & Taşdemir, M.A. (2003). Betonun Kırılma Mekanik Tasarımda Kullanılan Mekanik Özellikler İle Kırılma Parametreleri Arasındaki Bağlılıklar. Türkiye Mühendislik Haberleri, 1426 - 2003/4, 70-75.

- Akman, M.S., (1996): “Kimyasal Katkıların Betona Uygulanması”, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 4. Ulusal Beton Kongresi.
- Anbuvelan, K., and K. Subramanian. "An empirical relationship between modulus of elasticity, modulus of rupture and compressive strength of M60 concrete containing metakaolin." Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 8.11 (2014): 1294-1298.
- Aruntaş, H. (2006). Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21(1).
- Aydın A.C, Gül R., 2007. Influence of volcanic originated natural materials as additives on the setting time and some mechanical properties of concrete. Construction and Building Materials 21, 1277-1281.
- ASTM. (2005). ASTM C494: Standard specification for chemical admixtures for concrete. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- ASTM C230/C230M-21: Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement.
- ASTM C618-1994: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- ASTM C1437-20: Standard Test Method For Flow Of Hydraulic Cement Mortar.
- ASTM C109/C109M-21: Standard Test Method for Comprehensive Strength of Hydraulic Cement Mortars.
- ASTM, C. (2012). 1202-12. Betonun Klorür İyon Penetrasyonuna Direnme Yeteneğinin Elektriksel Göstergesi için Standart Test Yöntemi,” American Society for Testing and Materials.
- Bakharev, T., Sanjayan, JG ve Cheng, YB (2002). Alkali ile aktive olan cüruf betona sülfat saldırısı. Çimento ve Beton Araştırması, 32 (2), 211-216.
- Baradan, B. 2000. Yapı Melzemesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, No.207, c.2, 221s, İzmir.
- Baradan, B., 2004. Yapı Malzemesi II. DEÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları Yayın No: 207, 221 s. İzmir.

- Baradan B, Yazıcı H. (2012). Beton, (Ed.) S. Aydın, İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, No. 334, 2012, s. 825.
- Barnett, S. J., Soutsos, M. N., Millard, S. G., Bungey, J. H., 2006. Strength Development of Mortars Containing Ground Granulated BlastFurnace Slag: Effect of Curing Temperature and Determination Apparent Activation Energies. Cement and Concrete Research, Vol. 36, pp. 434-440.
- Beeby, AW, Narayanan, RS ve Narayanan, R. (1995). Eurocode 2 için Tasarımcıların El Kitabı: 1. Beton yapıların tasarımı. Thomas Telford.
- Beyazıt, Ö.L., 1988. Beton ve Deneyleri, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Yayınları, DSİ Matbaası, s. 46-60, Ankara
- Bilim, C., 2001. Afşin- Elbistan Uçucu Külünün Beton İçinde Kullanılabilirliği ve Hızlandırılmış Kür Uygulaması. Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Antakya, 128s.
- Bilim, C., Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Çimento Tabanlı Malzemelerde Kullanılabilirliği. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, Türkiye, 2006.
- Bilim, C., & Atış, C. D. (2011). Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu İçeren Harçların Aşınma ve Mukavemet Özellikleri. Politeknik Dergisi, 14(2), 101-107.
- Bingöl, A. F., & Balaneji, H. H. (2019). Determination of sulfate resistance of concretes containing silica fume and fly ash. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 43(1), 219-230.
- Binici H., Eken M., Dinçer A., Silis Dumanı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Betonların Bazı Durabilite Özellikleri, Çukurova Üniversitesi Müh-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2013.
- Binici, H., Mustafa, E., & Dinçer, A. (2013). Silis Dumanı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Betonların Bazı Durabilite Özellikleri. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 28(1), 11-21.

- Çağatay, İ. H., & Günindi, İ. (2008). Yumurtalık Sugözü Uçucu Külü İçeren Betonların Basınç ve Eğilme Dayanımlarının Araştırılması. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 23 (1), 265-273.
- Çağatay, İ. H., & Özdemir, E. Investigation of Early and Later Properties of Mortars with Pc and Ggbfs up to High Volume of Ggbfs. 12 th International Congress on Advances in Advances in Civil Engineering, 2016. Boğaziçi University, İstanbul, Turkey.
- Çağatay, İ. H., & Özdemir, E. PÇ ve Uçucu Kül Mineral Katkısını İçeren Harç Numunelerinin Bazı Özelliklerinin İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 24(1), 2009.
- Çağatay, İ. H., & özdemir, E. PÇ ve Silis Dumanı Mineral Katkısını İçeren Harç Numunelerinin Bazı Özelliklerinin İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 24(1), 2009.
- Çağatay, İ. H., & Özdemir, E. Silis Dumanı, Uçucu Kül veya Granüle Yüksek Fırın Cürufu ve PÇ İçeren Üçlü Karışım Harçlarının Basınç ve Eğilme Dayanımı Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. Yedinci Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, 2006. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Coşkun İ.,Volkanik Cüruf İlave Edilmiş Uçucu Kül Katkılı Betonların Özelliklerinin Araştırılması. Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- Cong, X., Gong, S., Darwin, D., & McCabe, SL (1990). Çimento macunu, harç ve betonun basınç dayanımında silis dumanının rolü. Kansas Üniversitesi Araştırma Merkezi, Inc.
- Delikurt, B. C., & Sevim, U. K. (2015). Sugözü Uçucu Külünün Betonun Mekanik ve Durabilite Özelliklerine Etkisi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 4(1), 47-58.

- Demir İ., Alkali-Silika Reaksiyonu Etkisine Maruz Aynı Oranda Silis Dumanı Ve Uçucu Kül İçeren Harçların Mekanik Özellikleri, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2010.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/gazimmfd/issue/6686/88599>
- Demir İ., Aynı Oranlarda İkame Edilen Silis Dumanı ve Uçucu Külün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi, Int.J.Eng.Research & Development, Vol.1, No.2, June 2009.
- Demir, İ., Savaş, M., Yaprak, H., Doğan, O., Özel, G., 2015. Investigation of effect of sepiolite on the properties of autoclaved aerated concrete. Cement Wapno Beton, 6, 359-365.
- Demirel B., Yazıcıoğlu S., Silis Dumanının Karbon Fiber Takviyeli Hafif Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2007.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/sdufenbed/issue/20782/221828>
- Durmuş G., Yılmaz C., Mineral Katkılı Betonlarda Ultrases Geçiş Hızı İle Su İşleme Derinliğinin Değerlendirilmesi, Engineering Sciences, 2009.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/nwsaeng/issue/19867/212929>
- Ekinci C.E., Yeğinboğalı M.A., Silis Dumanı Katkılı Betonların Donma-Çözülme Dayanımlarının İncelenmesi, Engineering Sciences, 2008.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/nwsaeng/issue/19868/417869>
- Erdem, T.K. ve Kırca, Ö. (2008). Yüksek dayanımlı betonda ikili ve üçlü karışımların kullanımı. (Construction and Building Materials) İnşaat ve Yapı Malzemeleri, 22 (7), 1477-1483.
- Erdoğan, T. Y., & Çimentolar, B. O. M. (1995). Türkiye Hazır Beton Birliği.
- Erdoğan, T. Y., 2003. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık A.Ş. Ankara, 741s.
- Erdoğan, S. Y., & Erdoğan, T. Y. (2006). Soru ve Yanıtlarıyla Beton. *Türkiye Hazır Beton Birliği Yayını*, Sf, 256.

- Ersoy, H.Y., 2001, Kompozit Malzeme, 1. baskı, ss. 227, Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- Esen Y, Barit, Diatomit, Silis Dumanı ve Uçucu Kül Katkılı Betonların Yüksek Sıcaklık Etkisi Altındaki Davranışları, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2017.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/fumbd/issue/29393/314641>
- Fu, Y., Cai, L., & Yonggen, W. (2011). Freeze–thaw cycle test and damage mechanics models of alkali-activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 25(7), 3144-3148.
- Ghasem Pachideh, Majid Gholhaki, Âmin Moshtagh, *Journal of Building Engineering*, Volume 24, July 2019, 100757
- Goldman A, Bentur A. The influence of microfillers on enhancement of concrete strength. *Cement and Concrete Research* 1993;23(4):962–72.
- Gül R., Yavuz M., Aydın A.C., 2010. Predicting the chloride content from the color analysis for various cement-based materials. *Scientific Research and Essays* 5(15) 2004-2015.
- Güneyisi E., Özturan T., Gesoğlu M., Silis Dumanı ve Uçucu Kül Katkılı Betonların Klorür Difüzyon Katsayılarının Belirlenmesi, TMMOB 5. Ulusal Beton Kongresi, Kongre Sempozyum Bildiriler Kitabı, Sy 143-152, 2003.<http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/10596.pdf>
- Hague, M. N. and Kayalı, O. 1998. Properties of High-Strength Concrete Using a Fine Fly Ash. *Cem Concr Res.* 28 (10), 1445-1452.
- Hossain A.B., Shrestha S., Summers J., *Properties of Concrete Incorporating Ultrafine Fly Ash and Silica Fume*, Department of Civil Engineering, University of South Alabama, 2009.
<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.3141/2113-05>
<https://www.betonvecimento.com/cimento/cimento>. (Erişim Tarihi: 05.07.2021)

- Imam A., Srivastava V., Review Study Towards Effect Of Silica Fume On The Fresh And Hardened Properties Of Concrete, *Advances in Concrete Construction* Vol.6 No.2 145-157, 2018.
<http://www.technopress.org/content/?page=article&journal=acc&volume=6&num=2&ordernum=3>
- Isaia GC, Gastaldini ALG, Moraes R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. *Cement and Concrete Composite*, 2003;25(1):69–76.
- Jahren, P. (1983). Use of silica fume in concrete. *Special Publication*, 79, 625-642.
- Jianyong L, Pei T. Effect of slag and silica fume on mechanical properties of high strength concrete. *Cement and Concrete Research*, 1997;27(6):833–7.
- Jones MR, Dhir RK, Magee BJ. Concrete containing ternary blended binders: resistance to chloride ingress and carbonation. *Cement and Concrete Res* 1997;27(6):825–31.
- Karahan O., 2006. Liflerle Güçlendirilmiş Uçucu Küllü Betonların Özellikleri. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Adana, 256s.
- Karthik A., Sudalaimani K., Vijaya Kumar C.T., Investigation on mechanical properties of fly ash-ground granulated blast furnace slag based self curing bio-geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 149, 15 September 2017, Pages 338-349
- Khatri RP, Sirivivatnanon V, Gross W. Effect of different supplementary cementitious materials on mechanical properties of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 1995;25(1):209–20.
- King D., The Effect Of Silica Fume On The Properties Of Concrete As Defined In Concrete Society Report 74, *Cementitious Materials*, 37th Conference On Our World In Concrete & Structures: 29- 31 August 2012, Singapore.
<https://www.semanticscholar.org/paper/THE-EFFECT-OF-SILICAFUME-ON-THE-PROPERTIES-OF-AS-%2C>
 King/20948bdb5ba782f8292281f4f525b7c43dbd51ed?p2df

- Kocabıyık, L. (2010). Yüksek Fırın Cürufu Mineral Katkısının Betondaki Etkinlik Katsayısının Belirlenmesi ve Betonun Kırılma Parametrelerine Etkisinin İncelenmesi (Doctoral Dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Khatib, JM ve Clay, RM (2004). Metakaolin betonunun emme özellikleri. Çimento ve beton Araştırma, 34 (1), 19-29.
- Khayat, K.H., Aïtcin, P.C., 1992, Silica Fume in Concrete, Proc. 4th CANMET/ACI Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, ACISP-132, Editor: Malhotra, V.M., Vol. 2.
- Kuleli, Ö., 2010. Çimento Mühendisliği El Kitabı, TÇMB Yayınları, 48.
- Lam A., Wong Y.L., Poon C.S., Effect of Fly Ash and Silica Fume on Compressive and Fracture Behaviors of Concrete, Cement and Concrete Research Volume 28, Issue 2, Pages 271-283, February 1998.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S000888469700269X>
- Lane DS, Ozyildirim C. Preventive measures for alkali-silica reactions (binary and ternary systems). Cement and Concrete Research 1999;29(8):1281–8.
- Langan B.W., Weng K., Ward M.A., Effect Of Silica Fume And Fly Ash On Heat Of Hydration Of Portland Cement, Cement and Concrete Research Volume 32, Issue 7, Pages 1045-1051, July 2002.
https://www.researchgate.net/publication/223073049_Effect_of_silica_fume_and_fly_ash_on_heat_of_hydration_of_Portland_cement
- Lea, F. M. (1970). The Chemistry of Cement and Concrete, Ed. *Arnold, London*, 243.
- Lkhagva, T. (2006). Uçucu küllerin agrega olarak beton üretiminde kullanılması. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- Li G, Zhao X. Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag. Cement and Concrete Composites 2003;25(3):293–9.

- Luo, R., Cai, Y., Wang, C., Huang, X., 2003. Study of Chloride Binding and Diffusion in Ground Granulated Blast Furnace Slag Concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 1–7.
- Mackerle, J. (1998). Smart materials and structures-a finite-element approach: a bibliography (1986-1997). *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 6(3), 293.
- Malhotra, V. M., & Carrette, G. G. (1983). An efficient material.-silica fume concrete-properties, applications, and limi-tations. *Concrete international*, 5(5), 40-46.
- Mardani-Aghabaglou, A., Sezer, G. İ., & Ramyar, K. (2014). Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point. *Construction and Building Materials*, 70, 17-25.]
- Marín-Urbe, CR ve Navarro-Gaete, R. (2021). Farklı numune konfigürasyonları kullanan üstyapı uygulamaları için geri dönüştürülmüş asfalt malzemesi içeren betonun basınç ve eğilme dayanımı arasındaki ampirik ilişkiler. *Materiales de Construcción*, 71 (342), e249-e249.
- McCarthy, MJ ve Dhir, RK (2005). Beton yapımında kullanılmak üzere yüksek hacimli uçucu kül çimentolarının geliştirilmesi. *Yakıt*, 84 (11), 1423-1432.
- Mehta PK, Gjorv OE. Properties of portland cement concrete containing fly ash and condensed silica fume. *Cement and Concrete Res.*, 1982;12(5):587–95.
- Mehmet Gesoğlu M., Güneyisi E., Özbay E., Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume, *Construction and Building Materials*, Volume 23, Issue 5, May 2009, Pages 1847- 1854
- Mohamed H.A., Effect Of Fly Ash And Silica Fume On Compressive Strength Of Self-Compacting Concrete Under Different Curing Conditions, *Ain Shams Engineering Journal*, 2011.

https://www.researchgate.net/publication/251719713_Effect_of_fly_ash_and_silica_fume_on_compressive_strength_of_selfcompacting_concrete_under_different_curing_conditions

- Murat Öztürk, Muharrem Karaaslan, Oğuzhan Akgöl, Umur Korkut Sevim, Mechanical and electromagnetic performance of cement based composites containing different replacement levels of ground granulated blast furnace slag, fly ash, silica fume and rice husk ash Cement and Concrete Research, Volume 136, October 2020, 106177
- Murlin, J.A., Wilson, C., 1952. Field Practise in Lightweight Concrete, ACI Journal, Proceeding, 49, p.21-36, London.
- Nevman, J., Choo, B. S., 2003. Advanced Concrete Technology. Constituent Materials, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Nehdi, M. ve Hayek, M. (2005). Behavior of Blended Cement Mortars Exposed to Sulfate Solutions Cycling in Relative Humidity. Cement and Concrete Research, 35, p: 731-742.
- Niş A., Mineral Katkılı Betonların Kimyasal Durabilitesinin Toplam Bağlayıcı Miktarı Ve Eşdeğer Su/Çimento Parametreleriyle Beraber İncelenmesi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2019.
<http://fbed.balikesir.edu.tr/index.php/dergi/article/view/882>
- Ortiz, O., Castells, F., & Sonnemann, G. (2009). İnşaat sektöründe sürdürülebilirlik: LCA'ya dayalı son gelişmelerin gözden geçirilmesi. İnşaat ve yapı malzemeleri, 23 (1), 28-39.
- Öner A., Yıldırım T., Öğütölmüş Yüksek Fırın Cürufu İçeren Ve İçermeyen Betonlarda Kırmataş Kumu İçeriğinin Beton Özelliklerine Etkisi, Deprem Sempozyumu, Kocaeli 2005.
http://kocaeli2007.kocaeli.edu.tr/kocaeli2005/deprem_sempozyumu_kocaeli_2005/4_yapi_ve_yerlesimler/d_26_yapi_malzemeleri/ogutulmus_yuksek_firin_curufu_iceren_ve_icermeyen_betonlarda_kirmatas_kumu_iceriginin_beton_ozeliklerine_etkisi.pdf

- Özbolat, M. (2005). 'Sert Agrega ile Üretilen Parketaş Üst Tabakasının Aşınmaya Karşı Dayanımının İncelenmesi. Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Üniversitesi.
- Özcan F., Atış C.D., Silis Dumanı ile Üretilen Harçların Karbonatlaşma Ve Rötire Özellikleri, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2017.
- <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/347324> 4
- Özdemir, E. "PÇ ve Silis Dumanı Mineral Katkısını İçeren Harç Numunelerinin Bazı Özelliklerinin İncelenmesi", Tez (Doktora)- Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- Özkul H., Yamaç S., Silis Dumanı Katkılı Betonda Klorür Etkisinde Korozyon Oluşumu, Tez (Yüksek Lisans)- İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- <https://polen.itu.edu.tr/bitstream/11527/6551/1/10788.pdf>
- Özkul, H., Taşdemir, M.A., Tokyay, M., Uyan, M., Her Yönüyle Beton. Türkiye Hazır Beton Birliği, 1999, İstanbul.
- Öztürk, M., Karaaslan, M., Akgöl, O., & Sevim, U. K. (2020). Mechanical and electromagnetic performance of cement based composites containing different replacement levels of ground granulated blast furnace slag, fly ash, silica fume and rice husk ash. Cement and Concrete Research, 136, 106177.
- Özyıldırım C, Halstead WJ. Improved concrete quality with combinations of fly ash and silica fume. ACI Mater J 1994;91(6): 587–94.
- Popovics, S. (1992). Beton malzemeler: Özellikler, spesifikasyonlar ve testler. William Andrew.
- Postacıoğlu, B., 1975: Yapı Malzemesi Dersleri, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar ve Beton, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.

- Properties of High Strength Concrete'. *Cement and Concrete Research*. 27, 6, 833-837. Li Jianjong, Tian Pei, 1997, 'Effect of Slag and Silica Fume on Mechanical.
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884697000768>
- Qudoos, A., Kim, H. G., & Ryou, J. S. (2018). Influence of the surface roughness of crushed natural aggregates on the microhardness of the interfacial transition zone of concrete with mineral admixtures and polymer latex. *Construction and Building Materials*, 168, 946-957.
- Roy D.M., Arjunan P., Silsbee M.R., Effect Of Silica Fume, Metakaolin, And Low-Calcium Fly Ash On Chemical Resistance Of Concrete, *Cement and Concrete Research* Volume 31, Issue 12, Pages 1809-1813, December 2001.
- https://www.researchgate.net/publication/223644256_Effect_of_silica_fume_metakaolin_and_lowcalcium_fly_ash_on_chemical_resistance_of_concrete
- Sabet F.A., Nicolas A.L., Mohammad S., Mechanical And Durability Properties Of Self Consolidating High Performance Concrete Incorporating Natural Zeolite, Silica Fume And Fly Ash, *Construction and Building Materials* Volume 44, Pages 175-184, July 2013.
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061813001980>
- Safiuddin M., Effects Of Silica Fume And Fly Ash On The Properties Of High Performance Concrete, The 33rd Annual General Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, 2005.
- https://www.researchgate.net/profile/Md_Safiuddin/publication/288707376_Effects_of_silica_fume_and_fly_ash_on_the_properties_of_high_performance_concrete/links/57dcc5d508ae4e6f1846ba3e/Effects-of-silica-fume-and-fly-ash-on-the-properties-of-high-performance-concrete.pdf

- Sevinç, A. H., & Durgun, M. Y. (2020). Properties of high-calcium fly ash-based geopolymer concretes improved with high-silica sources. *Construction and Building Materials*, 261, 120014.
- Shannag MJ. High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume. *Cement and Concrete Composites* 2000;22(6):399–406.
- Siddique, R. (2004). Yüksek hacimli F Sınıfı uçucu kül betonunun performans özellikleri. *Çimento ve Beton Araştırmaları*, 34 (3), 487-493.
- Standard, B. (2004). BS EN 12504-4: 2004: Testing concrete–Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity. London, Reino Unido.
- Subaşı S., İşbilir B., Ercan İ., Uçucu Kül İkameli Çimento Numunelerinin Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklığın Etkisi, *Politeknik Dergisi*, Cilt 14, Sayı 2, Sy 141-148, 2011.
- <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/385590>
- Şengül, Ö., Taşdemir, M.A. ve Yüceer, Z., "Uçucu Kül ve Cüruf İçeren Betonların Klor Geçirimsiliğine Karşı Optimizasyonu", 6. Ulusal Beton Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul, s.181-190, 2005.
- Tan K, Pu X. Strengthening effects of finely ground fly ash, granulated blast furnace slag, and their combination. *Cement and Concrete Research* 1998;28(12):1819–25.
- Tan, D. (2010). “Katkılı betonların donma-çözölmeye karşı Performanslarının incelenmesi”, Tez (Yüksek Lisans)- Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- Temiz, H., & Yeğinoğlu, A. (1995). Uçucu kül ve silis dumanı katkıli çimento hamur ve harçlarının bazı özellikleri. *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Bildiriler Kitabı*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara, 213-225.

- Thanongsak N., Watcharapong W., Arnon C., Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement–fly ash–silica fume concrete Fuel, Volume 89, Issue 3, March 2010, Pages 768-774
- THBB, Hazır Beton Yaşam Döngü Analizi Raporu, 2021.
- Thomas M., Shehata M.H., Hopkins D.S., Cail K., Use Of Ternary Cementitious Systems Containing Silica Fume And Fly Ash in Concrete, Cement and Concrete Research Volume 29, Issue 8, Pages,1207-1214, August 1999.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884699000964>
- TMMOB, 1996, ‘4. Ulusal Beton Kongresi, Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar. İstanbul.
<http://www.imo.org.tr/ekutuphane/index.php?yayinkod=602&belgeadi=4.%20Ulusal%20Beton%20Kongresi>
- Tohumcu İ., Bingöl F., Silis Dumanı ve Uçucu Kül Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Taze Beton Özellikleri Ve Basınç Dayanımları, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 2013.<https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/589012>
- Tokyay, M., Erdoğan, K., 1997. “Cürufklar ve cürufllu cimentolar”, TCMB/ARGE/Y97.2, Ankara.
- Tokyay, M., Erdoğan, K., 2003. Cürufklar ve Cürufllu Çimentolar. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği-Ankara,48s.
https://www.academia.edu/8003465/C%C3%BCrufklar_ve_C%C3%BCrufllu_%C3%87imentolar_TC%C3%BCrkiye_%C3%87imento_M%C3%BCstahsilleri_Birli%C4%9Fi_Yay%C4%B1nlar%C4%B1
- Tokyay, M., Sahmaran, M., Yaman, D., O., 2004. Yeni nesil yüksek akışkanlaştırıcı katkı maddeleri ile yüksek hacimde uçucu kül içeren kendiliğinden yerleşen beton, Beton 2004 Kongresi, THBB, İstanbul,10-12 Haziran, s. 213-225.
- Tokyay, M., Erdoğan, K., “Cürufklar ve cürufllu çimentolar”, TÇMB/AR-GE/Y97.2, Ankara, (1997).

- Topçu İ.B., Kaval M., Hazır Betonda Silis Dumanı Kullanımının Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2000.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ogummf/issue/30404/328396>
- Topçu İ. B., & Canbaz, M. (2001). Uçucu kül kullanımının betondaki etkileri. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 14(2), 11-23.
- Tosun K., Yazıcı H., Yiğiter H., Baradan B., Uçucu Kül İçeren Çimento Harçlarının Sülfat Dayanıklılığının İncelenmesi, TMMOB 5. Ulusal Beton Kongresi, Kongre Sempozyum Bildiriler, Sy:17-26,2003.
<http://www.imo.org.tr/ekutuphane/index.php?yayinkod=547&belgeadi=5.%20Ulusal%20Beton%20Kongresi;>
- Turk Standards Institute. (2009). TS EN 196–1 Methods of testing cement-Part 1: Determination of strength.
- Turk Standards Institute. (2012). TS EN 196–2 Methods of testing cement-Part 2: Chemical analysis of cement.
- TS 707 (1980). Beton agregalarından numune alma ve deney numunesi hazırlama yöntemi.
- TS 3530 EN 933-1 (1999). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini- Eleme metodu.
- TSE. (2010). TS EN 12390-2: Testing hardened concrete–Part 2: Making and curing specimens for strength tests.
- TS EN, B. (2009). 12390-5: 2009: Testing hardened concrete. Flexural strength of test specimens.
- TS EN 197-1 (2012). Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri.
- TS 639 (2011). Uçucu Küller- Çimentoda kullanılan.
- TS EN, T. 196-3.(2017). Çimento deney yöntemleri-Bölüm, 3.

- TS EN, T. 450-1, (2006). Uçucu kül-Betonda kullanılan, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 15167-1 Öğütülmüş yüksek fırın curufu- Beton, harç ve şerbette kullanım için- Bölüm 1: Tarifler, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12504-4, Beton deneyleri- Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 13263-1 Silis dumanı- Betonda kullanılan- Bölüm 1: Tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS 3530 EN 933-1, “Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini- Eleme Metodu”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1999
- TS EN, T. 1008, Nisan 2003. Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN, T. (2002). 3526. Test Method for specific gravity and water absorption of aggregates for concrete, 1980, Turkish Standard. Enstitüsü, T. S.
- TS EN 1097-6. Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm, 6.
- TS EN, B. 12390-8 (2000). Testing hardened concrete-Depth of penetration of water under pressure.
- Türk Standardı, T. S. (2009). 706 EN 12620+ A1. Beton Agregaları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Türk Standardı, T. (1985). TS 802 Beton Karışım Hesapları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Türker, P., Erdoğan, B., Kantaş, F., Yeğınobalı, A., 2004. Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, ARGE Y03.03, Ankara,102 s.

- Engin, Y., (2014). <https://www.betonvecimento.com/cimento/cimento>. (Erişim Tarihi: 05.07.2021)
- Uzbaş B., Aydın A.C., Uçucu Kül ve Silis Duman Katkılı Betonların Mekanik Özelliklerinin XRD İle İncelenmesi, Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2018.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/sinopfbid/issue/40065/407509>
- Uysal, M. (2011). Mineral katkılı betonların donmaçözölme etkisi altındaki davranışının incelenmesi. *THBB Kongresi*.
- Ün, H., Pamukkale Üniversitesi İnşaat Mühendisliğı Bölümü Yapı Malzemeleri Ders Notları, Denizli, 2007.
- Wongkeo, W., Thongsanitgarn, P., Ngamjarurojana, A., & Chaipanich, A. (2014). Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume. *Materials & Design*, 64, 261-269.
- Watcharapong Wongkeo, Pailyn Thongsanitgarn, Athipong Ngamjarurojana, Arnon Chaipanich, *Materials & Design*, Volume 64, December 2014, Pages 261-269.
- Wang, J., Cheng, Y., Yuan, L., Xu, D., Du, P., Hou, P., & Wang, Y. (2020). Nano silikanın çimento esaslı kompozitlerin kimyasal ve hacimsel büzölmesine etkisi. *İnşaat ve Yapı Malzemeleri*, 247, 118529.
- Yalçın, H., Gürü, M. 2006. Çimento ve Beton, Palme Yayıncılık, 216s. ISBN: 9944-341-16-9, Ankara.
- Yazıcı ř, Sezer G.İ., Yüksek Dayanımlı Betonda Aşınma Direncinin Tahmini, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2007.
<https://dergipark.org.tr/en/pub/pajes/issue/20516/218429?publisher=pamukkale>
- Yazıcı, H., Yardımcı, M. Y., Aydın, S., & Karabulut, A. ř. (2009). Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures

- under different curing regimes. Construction and building materials, 23(3), 1223-1231.
- Yazıcı, Ş., 1996. The Mechanical Properties and Durability of High Strength Concrete with Silica Fume and Fly Ash. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir, 115s.
- Yazıcıoğlu S., Bozkurt N., Pomza ve Mineral Katkılı Taşıyıcı Hafif Betonun Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2006.
- <https://app.trdizin.gov.tr/publication/paper/detail/TmpNNE9UYzM>
- Yeğinobalı, M.A., 1993, “Silis Dumanının Betonda Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi”, Endüstriyel Katı Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 18-19 Kasım.
- Yıldız S., Yalınbaş M., Keleştemur O., Silis Dumanı Katkılı Yapı Alçılarında Eğilmede Çekme Dayanımının Araştırılması, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2005.
- <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gazimmfd/issue/6665/88941>
- Yusuf, IT, Jimoh, YA ve Salami, WA (2016). Hurma çekirdeği kabuğu betonunun eğilme dayanımı ve basınç dayanımı arasında uygun bir ilişki. Alexandria Engineering Journal, 55 (2), 1553-1562.
- Zhang P., Quing-Fu Li, Effect Of Silica Fume On Durability Of Concrete Composites Containing Fly Ash, Science and Engineering of Composite Materials 20(1):57-65, 2013.
- <https://www.degruyter.com/view/journals/secm/20/1/article-p57.xml>

ÖZGEÇMİŞ

İrfan COŞKUN, Toros Üniversitesi İnşaat Mühendisliği lisans, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi İnşaat Mühendisliği yüksek lisans, Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliği lisans ve yüksek lisans eğitimlerini tamamlamış, Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında 2018 yılında doktora eğitimine başlamıştır. Ayrıca Çukurova Üniversitesi İşletme Fakültesinden MBA derecesine sahiptir.

16 Yılı Çimko Çimento ve Beton San. Tic. A.Ş.' de olmak üzere çimento-beton sektöründe 19 yıllık tecrübeye sahiptir. Çimko' da sırasıyla K.Maraş-Narlı Hazır Beton Tesis Şefi, Adana Hazır Beton Tesis Şefi, Hazır Betonlar Teknik Müdürlüğü, Hazır Beton Akdeniz-İç Anadolu Bölge Müdürlüğü ve Çimento Satış Müdürlüğü görevlerinden sonra Hazır Beton Direktörü olarak atandığı görevine halen devam etmektedir.

İrfan Coşkun evli ve 1 çocuk babasıdır.