

**T.C.  
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ATIK MERMER TOZU KULLANILARAK ÜRETİLEN  
KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARIN (KYB) BAZI  
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Musaab Mohamed ENBAYA**

**Danışman  
Jüri Üyesi  
Juri Üyesi**

**Dr. Öğr. Üyesi Selçuk MEMİŞ  
Prof. Dr. Hasbi YAPRAK  
Prof. Dr. İlhami DEMİR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**KASTAMONU –2019**

## TEZ ONAYI

**Musaab Mohamed ENBAYA** tarafından hazırlanan "**Atık Mermer Tozu Kullanılarak Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Betonların (KYB) Bazı Özelliklerinin Araştırılması**" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde savunulmuş ve **oy birliği** ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.


Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Selçuk MEMİŞ  
Kastamonu Üniversitesi



Jüri Üyesi

Prof. Dr. Hasbi YAPRAK  
Kastamonu Üniversitesi



Jüri Üyesi

Prof. Dr. İlhami DEMİR  
Kırıkkale Üniversitesi



02/12/2019

Enstitü Müdürü

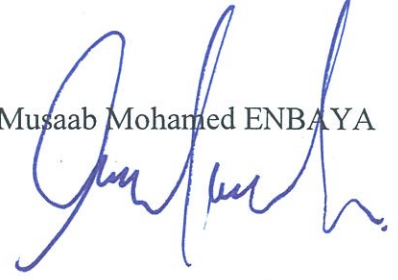
Doç. Dr. Nur BELKAYALI



## TAAHHÜTNAME

Tezdeki tüm bilgilerin etik davranış ve akademik düzenlemeler çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildirir ve taahhüt ederim.

Musaab Mohamed ENBAYA



# ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

## ATIK MERMER TOZU KULLANILARAK ÜRETİLEN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARIN (KYB) BAZI ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Musaab Mohamed ENBAYA

Kastamonu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Selçuk MEMİŞ

Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) kendi ağırlığı altında, hiçbir titreşim gerektirmeden ayrışma veya akma olmaksızın, yoğun olarak güçlendirilmiş bölümünün kendi ağırlığı altında yoğunlaştığı ve kalıp içine vibrasyonsuz akabilen, akıcı ve yayılabilir bir beton türüdür. KYB betonunun benzersiz özelliği ise, parçalanma veya ayrışma olmadan bütünlüğüne dayanmasını sağlayan mükemmel deforme olabilirlik ve işlenebilirliktir. Hem mermer tozu (MP) hem de uçucu kül (FA) kullanılarak farklı karışımlar için basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve sıcaklık altındaki yüksek yangın dayanımı elde edilerek yüksek kalitede bir KYB elde etmek mümkündür. Bu çalışmada endüstriyel bir atık olan FA ve MP katkısının KYB üzerindeki etkileri araştırılmıştır. KYB'nin tüm bileşen yapısı sabit tutularak ve sadece MP ve FA oranını değiştirerek, on iki KYB karışım grubu oluşturulmuş, bunlar toplam dört parti MP oranı (%0, %5 ve %10) ve FA oranı (%0, %2,5, %5 ve %7,5) ile dökülmesi ile karışımlar oluşturulmuştur. Bu tezin amacı, çimento yerine bu ince malzemelerin (dolgu maddesi) en iyi oranını kullanmak ve belirlemek, kendiliğinden yerleşen betonun tazelik ve sertleşme özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmektir. Bu amaçla hazırlanan tez kapsamında KYB karışımlarının bazı mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Su çimento oranı, seçilen karıştırma derecesi ve ilave süper akışkanlaştırıcı değerleri ise sabit tutulmuştur. Taze beton üzerinde yapılan deneysel analiz iyi bir yayılma çapı ve fiziksel değerlere ulaşılmasını sağlamıştır. Sertleşmiş betonda elde edilen sonuçlar, yüksek bir basınç ve yarmada çekme sonucunu da ortaya çıkarmıştır. Yangın dayanımı numuneleri için ölçülen basınç dayanımı, numunelerin 900°C dereceye kadar ısıtıldığı durumlar haricinde iyidir. Hesaplanmış olan boşluk yüzdeleri de göz önünde bulundurulduğunda, fiziksel özelliklerin ölçümü, yoğunluk, su emme yüzdesi ve ortalama su emme değeri %2,9, ortalama birim hacim ağırlığı 2,5 gr/cm<sup>3</sup> olarak ölçülmüştür. Test edilen tüm numunenin ortalama beton geçirgenliği 0,045 mm/dak'dan daha az değerlerde olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** KYB, basınç dayanımı, çekme dayanımı, yüksek sıcaklık direnci, mermer tozu, uçucu kül.

**2019, 56 Sayfa**

**Bilim Kodu: 91**

## ABSTRACT

MSc. Thesis

### INVESTIGATION OF SOME PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE (SCC) PRODUCED USING WASTE MARBLE DUST

Musaab Mohamed ENBAYA

Kastamonu University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Material Science and Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Selçuk MEMİŞ

**Abstract:** Self-compacting concrete (SCC) is a type of flowable and spreadable concrete, under its own weight, without separation or flowing, requiring no vibration, where the density reinforced section is concentrated under its own weight and can flow into the mold without vibration. The unique feature of SCC concrete is its excellent deformability and machinability, which allows it to withstand its integrity without fragmentation or decomposition. By using both marble powder (MP) and fly ash (FA), it is possible to obtain a high quality SCC for different mixtures by obtaining compressive strength, splitting tensile strength and high fire resistance under temperature. In this study, the effects of fly ash (FA) and marble dust (MP), an industrial waste, on SCC were investigated. By keeping the entire component structure of the SCC constant and changing only the MP and FA ratio, twelve SCC mix groups were formed, which included a total of four batch MP ratios (0%, 5% and 10%) and FA ratio (0%, 2.5%, 5% and 7.5%). The aim of this thesis is to use and determine the best ratio of these thin materials (filler) instead of cement and to evaluate the effects of self-compacting concrete on freshness and hardening properties and to investigate some mechanical and physical properties of SCC mixtures. The water-cement ratio, the selected mixing degree and the additional superplasticizer values were kept constant. Experimental analysis on fresh concrete provided good flow diameter and physical values. The results obtained in the hardened concrete also resulted in high pressure and shrinkage in splitting. The measured compressive strength for fire resistance samples is good, except in cases where the samples are heated to 900 °C. Considering the calculated void percentages, the measurement of physical properties, density, percentage of water absorption and mean water absorption value were 2.9% and the average unit volume weight was 2.5 g / cm<sup>3</sup>. The average concrete permeability of the whole tested sample was found to be less than 0.045 mm / min.

**Key Words:** SCC, compressive strength, split tensile strength, elevated temperature, marble powder, fly ash.

**2019, 56 Page**

**Science Code: 91**

## TEŞEKKÜR

Bana bu çalışmayı bitirmek için sağlık, şans, sabır ve anlayış veren Allaha hamd ü senalar olsun. Onun tüm salat ve selamı Muhammed Mustafanın (SAV) üzerine olsun.

Tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Selçuk MEMİŞ'e bana verdiği ilham, teşvik, dikkat çekici yardım ve sürekli destek için, derin şükran ve takdirle teşekkürlerimi sunuyorum. Bu süreçte onunla çalışmak benim için mükemmel bir öğrenme ve tecrübe kazanma şansı oldu. Aynı zamanda Prof. Dr. Hasbi YAPRAK ve Prof. Dr. İlhami DEMİR hocalarıma da araştırmalarım da yaptığı rehberlik, verdiği teknik destek ve önerileri için içten teşekkürlerimi iletmek istiyorum.

Lütfü GÖKDERE, Uğur SARIKAYA yanı sıra KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ asistanlarına ve yakın arkadaşlarım Haytham Alhanghari, Mohamed Zarrog, Mohamed Masoud, Abdulhadi Alammar ve deneysel çalışmamda bana yardım eden ve destek veren yapısal mekanik laboratuvarı kadromuza da özel teşekkürlerimi iletmek istiyorum.

Kariyerim boyunca sürekli duaları, yönlendirmeleri, teşvikleri ve destekleri için aileme, abilerime ve kız kardeşime teşekkür etmek istiyorum. Onlar bana güç, ilham ve güven kaynağı oldular.

Son olarak, tezimi hazırlamamda bana yardımcı olan herkese içten şükranlarımı sunarım.

Musaab Mohamed ENBAYA  
Kastamonu, 2019

## İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI.....	ii
TAAHHÜTNAME.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
TABLolar DİZİNİ .....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
2.1. Kendinden Yerleşen Beton (KYB).....	3
2.2. KYB Üretiminin Temel Yöntemleri.....	7
2.3. KYB'nin Avantajları ve Dezavantajları.....	9
2.4. Literatüre Ait Bazı Çalışmalar .....	11
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	14
3.1. KYB Üretiminde Kullanılan Malzemeler .....	14
3.1.1. Portland Çimentosu.....	14
3.1.2. Mermer Tozu.....	16
3.1.3. Uçucu Kül .....	18
3.1.4. Agregalar.....	21
3.1.5. Su.....	23
3.1.6. Süper Akışkanlaştırıcı (SP) .....	23
3.2. Karışım Tasarımı.....	24
3.3. Yöntem .....	26
3.3.1. Yayılma Testi .....	26
3.3.2. Kılcal Su Emme Deneyi.....	28
3.3.3. Yoğunluk Testi.....	30
3.3.4. Su Emme Testi .....	30
3.3.5. Basınç Dayanımı Testi .....	31
3.3.6. Yangın Dayanım Testi .....	31
3.3.7. Yarmada Çekme Dayanımı Testi .....	32
4. TARTIŞMA VE BULGULAR .....	34
4.1. Fiziksel Özelliklerin Analizi .....	34
4.2. Mekanik Özelliklerin Analizi.....	39
4.2.1. Basınç Dayanımı Sonuçları.....	39
4.2.2. Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçları.....	42
4.2.3. Yangına Dayanıklılık Sonuçları .....	44
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	49
5.1. Sonuçlar.....	49
5.2. Öneriler.....	50
KAYNAKÇA.....	51
ÖZGEÇMİŞ .....	56

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 KYB'nin yerleştirilmesi sırasında akışkanlık ve ayrışma direnci.....	5
Şekil 2.2 KYB üretiminin temel yöntemleri .....	7
Şekil 2.3 Kendinden sıkışmaya hazırlama süreci.....	8
Şekil 3.1 Mermer tozu (MP) .....	18
Şekil 3.2 Uçucu külün farklı sınıflandırmaları.....	20
Şekil 3.3 Çalışmada kullanılan ince ve kaba agrega.....	22
Şekil 3.4 Kullanılan agregaya ait elek analizi.....	22
Şekil 3.5 Agregaya karışımlarına ait optimum elek analizi sonucu.....	22
Şekil 3.6 Çalışmada kullanılan süperakışkanlaştırıcı.....	24
Şekil 3.7 Kılcal su emme deneyi.....	29
Şekil 3.8 Basınç testi altındaki beton küp .....	31
Şekil 3.9 Yangın dayanımı sonrası numune kırımı .....	32
Şekil 3.10 Çekme dayanımı testi.....	33
Şekil 4.1 KYB numunelerinde birim hacim ağırlık değişimleri .....	35
Şekil 4.2 Mermer tozunun yayılma çapına etkisi.....	35
Şekil 4.3 Uçucu külün yayılma çapına etkisi .....	36
Şekil 4.4 FA ve MP'nin yayılma çapına etkisi. ....	37
Şekil 4.5 Su emme oranının MP ve FA oranına bağlı değişimi.....	38
Şekil 4.6 FA ve MP varyasyonlarına göre geçirgenlik sonuçları.....	38
Şekil 4.7 Gözenekliliğin MP ve FA oranına göre değişimi .....	39
Şekil 4.8 Testin her aşamasına göre basınç dayanımı derecesi dağılımı. ....	41
Şekil 4.9 FA ve MP katkısının 28 günlük basınç dayanımına etkisi .....	42
Şekil 4.10 Yarmada çekme dayanımı sonuçlarının FA'ya göre değişimi.....	43
Şekil 4.11 Basınç dayanım sonuçlarının değişen ısı değerlerine göre dağılımı.....	45
Şekil 4.12 300°C'de FA ve MP değişimlerinin basınç dayanımına etkisi.....	46
Şekil 4.13 600°C'de FA ve MP değişimlerinin basınç dayanımına etkisi.....	46
Şekil 4.14 900°C'de FA ve MP değişimlerinin basınç dayanımına etkisi.....	47



## TABLULAR DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 2.1 Çimento ve çimento içermeyen beton türleri.....	4
Tablo 3.1 Çimentonun fiziksel özellikleri.....	15
Tablo 3.2 Çimentonun kimyasal özellikleri .....	16
Tablo 3.3 MP'nin fiziksel özellikleri .....	17
Tablo 3.4 MDP'nin kimyasal bileşenleri .....	18
Tablo 3.5 ASTM'ye göre Uçucu külün fiziksel ve kimyasal gereksinimleri .....	20
Tablo 3.6 Kullanılan uçucu külün kimyasal özellikleri. ....	21
Tablo 3.7 İnce ve kaba agregaların özellikleri. ....	23
Tablo 3.8 Karışımlarda kullanılan değişkenler ve oranları .....	25
Tablo 3.9 Beton karışımı için kullanılan miktar oranları (kg/m <sup>3</sup> ).....	25
Tablo 4.1 KYB betonlardaki bazı fiziksel özellikler .....	34
Tablo 4.2 Basınç dayanım test sonuçları.....	40
Tablo 4.3 Yarmada çekme dayanımı sonuçları .....	43

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Kisaltmalar

CA	İri agrega
CRD	Kırma taş tozu
CS	Basınç dayanımı
F <sub>Ag</sub>	İnce agrega
FA	Uçucu kül
FI	Akış endeksi
FS	Eğilme mukavemeti
MP	Mermer tozu
OPC	Sıradan Portland çimentosu
KYB	Kendiliğinden yerleşen beton
SP	Akışkanlaştırıcı
W/C	Su/Çimento oranı
W/P	Su/Toz oranı

## 1. GİRİŞ

Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB), titreşim gerektirmeyen yerleştirme ve sıkıştırma için yenilikçi bir betondur. Ağır çelik donatı ile sıkışık ve dar alanlarda bile kendi ağırlığı altındaki akışı ile kalıbı tamamen doldurabilir ve böylece tam sıkıştırma elde edilebilir (Agarwal & Gulati, 2006). KYB daha az kaba agrega kullanımı ve çimento yerine normal tozdan ince karışımın değiştirilmesi ile konvansiyonel betondan daha farklı bir boyut kazanmaktadır. KYB'nin yoğun donatılı alanlardaki geçirme kabiliyeti ile titreşimi zor yerlerdeki dökümü sayesinde avantaj sağlayan bir betondur. KYB üretiminde yüksek mukavemet, akışkanlık, dayanıklılık ve ayrışma olmamasını sağlamak için silis dumanı, cüruf, uçucu kül, mermer tozu ve süper akışkanlaştırıcı gibi mineral katkı tozları da kullanılmaktadır. Bu ince malzemelerin kullanılması, normal beton karışımında kullanılan yüksek portland çimentosu miktarını azaltarak maliyetin düşürülmesine de katkıda bulunur. Bu mineral katkıların türü ve oranı, KYB'nin mekanik ve fiziksel özelliklerini etkilemekte ve uyumluluğunu da artırmaktadır (Reda, 2018).

Kendinden Yerleşen Beton (KYB) Profesör Hajime Okaruma tarafından 1986 yılında Japonya'da geliştirilmiştir (Fahim ve Esko, 2015). Bu tür akıcı beton, atık malzemenin kullanılması ve ürün bazında endüstriyel kullanım ile verimliliği önemli ölçüde artırır ve avantaj sağlar. Genellikle KYB çimento, su, ince malzemeler (filler malzemeler), kum, kaba agrega ve süper akışkanlaştırıcı kullanılarak yapılan bir betondur. İnce malzemeler, karışımda gerekli olan çimentonun yerine geçerek aynı görevi görür bu da geleneksel betona kıyasla ekonomik olarak büyük avantaj sağlar. Vibrasyona az gerek duyulması veya hiç kullanılmaması inşaat için harcanan zamanda da azalmaya neden olur. İşçiliği en aza indirerek üretim maliyetini düşürmesinin yanı sıra, şantiyedeki düşük gürültü ve artan güvenlik durumu da avantaj olarak görülmektedir. KYB'nin akışkanlık özelliğinin yanı sıra, kendi ağırlığı altında ayrılmaya karşı yeterli bir direnç göstermesi de gerekmektedir (Matos vd. 2018).

Endüstriyel atıkların beton karışımında kullanılması, atıkların geri dönüşüm yoluyla azaltılarak çevrenin korumasına katkıda bulunulması gibi ekstra olumlu sonuçları da bulunmaktadır. Son zamanlara kadar, KYB yaygın olarak kentsel altyapılarda,

pompalama kabiliyeti özelliklerinin gerekli olduğu yüksek gökdelenlerde, çok yönlü uygulamalarda ve zor inşaat konfigürasyonlarında kullanılmaktadır.

Kaliteli bir betonun iyi mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olması gerekir. Çalışılan normal mekanik özellikler, normal ve yüksek sıcaklıktaki basınç dayanımı ile ilgilidir. Çimento, mermer tozu ve uçucu kül, ince ve kaba agrega, su ve süper yumuşatıcı ilave edilerek mikserlerde taze beton hazırlanmaktadır. Basınç mukavemeti, bir küpün eksenel olarak yüklendiğinde kırılmadan önce dayanabileceği maksimum basınç kuvvetidir. Çekme dayanımı, silindirik bir numunenin kırılmadan önce, yüklendiğinde, uzunluğu boyunca iken dayanabileceği maksimum basınç kuvvetidir. Beton doldurula birlik ölçümleri, taze beton üzerinde yapılan bir test aparatı ile değerlendirilmektedir. Betonun fiziksel kalitesi, karışımlarının başarısının ve laboratuvar testlerinin mekanik sonuçlarının iyi bir ölçütüdür. Bu özellikler taze betonun yoğunluğu, su emme oranı, su emme yüzdesi ve boşluk yüzdesi veya geçirgen gözeneklerin hacminin yüzdeleriyle ifade edilmektedir (Alyamaç ve İnce 2009).

Bu çalışmanın amacı, kendiliğinden yerleşen betonun hazırlanmasında çimentonun yerini alabilecek optimum mermer tozu ve uçucu kül oranını değerlendirmek ve tanımlamaktır. Taze ve sertleşmiş KYB karışımının özellikleri üzerindeki bu değişikliklerin etkisinin test edilmesi ve analizi de değerlendirilmiştir. Karışımda yer alan materyallerin iyi seçilmiş, önceden test edilmiş ve sağlam teknik bilgilerle hazırlanmış olması gerekmektedir. Mermer tozu ve uçucu kül gibi ince malzemelerin farklı oranlarda çimento ile yer değiştirilmesinden toplanan veriler ve kümülatif bilginin KYB teknolojisine büyük fayda sağlayacaktır. Bu amaçla hazırlanan küp ve silindir numunelerin test edilmesinden elde edilen mekanik ve fiziksel sonuçlar incelenmiştir. Araştırmada CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılmış, azaltılan çimento miktarın yerine mermer tozu ve uçucu kül yüzde olarak değişen oranlarda doğal ince mermer tozu ve uçucu kül dolgu maddesi olarak karışıma eklenmiştir. Karışımlarda %2,9'luk bir ticari süper akışkanlaştırıcı (CHRYSO Optima 286) kullanılarak hazırlanan karışımlara %0, %5 ve %10 oranlarında mermer tozu ve %0, %2,5, %5 ve %7,5 oranlarında ise uçucu kül ilave edilerek gruplar oluşturulmuştur. Hazırlanan karışımların bazı fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

### 2.1. Kendinden Yerleşen Beton (KYB)

Beton, inşaat sektöründe kullanılan yapı elemanlarının önemli bir bileşeni olup, inşaat mühendisliğinin hızla gelişen bu beton teknolojisindeki uzmanlığı her geçen gün yeni özellikleri incelenen malzemelerin iyi anlaşılması ile mümkündür. Bu malzemenin sahip olduğu bazı avantajlara rağmen bazen de dezavantajlara sahip olduğu bilinmektedir. Bu dezavantajlardan birisi kalın ya da ağır takviyeli bölümlerin oluşturulmasında karşılaşılan betonarme işçiliği sorununu aşmada betonun geliştirilmesi ihtiyacının artmasıdır. Bu durum çevre dostu bir inşaat yapı malzemesi oluşturulması için çok önemlidir (Alyamaç ve İnce, 2009). Geliştirilmesi gereken ve atıkların bertaraf edilmesinde kullanılmak suretiyle çevre dostu olabilen beton, kelime kökeni olarak incelendiğinde; kompakt ve/veya yoğunlaştırılmış anlamına gelen Latince “concretus” kelimesinden türemiş olan bir yapı malzemesine verilen isimdir (Muthen vd., 1998). Tarihi net olarak bilinmemesine rağmen geçmiş medeniyetlerde kullanıldığı ile ilgili bazı kayıtların olduğu görülmektedir. Örneğin Mısırlıların ve Romalıların piramit tuğlalarını birleştirmek için beton benzeri yapı malzemeleri (alçı, kireç vb.) kullandıkları bilinmektedir (Sutradhar vd., 2015).

Esas olarak beton, bir bağlayıcı ortam ve agrega parçacıklarından oluşan birçok biçime sahip bir kompozit malzemedir. Beton türleri sıra dışı özelliklere sahip veya sıra dışı tekniklerle üretilmiş olan ve betonun kullanımını, özelliğini ve durumunu tanımlayacak şekilde isimlendirilmiş olup, bazı beton tipleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

KYB’nin geliştirilmesi ve tanıtılmasının nedenlerinden biri, beton kalitesini artırmak, inşaat sahalarındaki çalışma koşullarını gürültüsüz, az titreşim gerektiren ve mükemmel güvenli bir hale getirilerek geleneksel betona bir alternatif sunma isteğidir. Kuzey Amerika’da kendinden konsolide beton olarak adlandırılan kendiliğinden yerleşen beton (KYB), 1986’da Profesör Hajime Okaruma tarafından Japonya’da geliştirilmiştir (Fahim vd., 2015).

Tablo 2.1. Çimento ve çimento içermeyen beton türleri

Portland çimentolu özel beton çeşitleri		
Mimari beton	Ağır beton	Geri dönüşümlü beton
Gaz beton	Yüksek-erken dayanımlı beton	Silindire sıkıştırılmış beton
Kolloidal beton	Yüksek performanslı beton	Talaş betonu
Renkli beton	Yüksek mukavemetli beton	Kendiliğinden yerleşen beton
Kontrollü yoğunluklu dolgu	Yalıtım betonu	Koruyucu beton
Polimerle modifiye edilmiş beton	Lateks çamurlu beton	Püskürtme beton
Korumasız- agrega betonu	Düşük yoğunluklu beton	Büzülme-telafi edici beton
Ferrocement	Kütle betonu	Silika-beton
Lifli beton	Yarı taşıyıcı hafif beton	Toprak çimento
KYB	Kaymaz beton	Mühürlü beton
Uçucu küllü beton	Hazır beton	Agrega yüzeyli beton
Geçirimli beton	Öngerilmeli beton	Tremi beton
Geopolimer	Reaktif pudra betonu	Vakumlu beton

Bu akıcı beton tipi, atık malzeme ve endüstriyel yan ürün kullanımıyla inşaat işlerinde verimlilik için önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bu tip beton, kalıpları titreşimsiz olarak tamamen doldurmaktadır. Bu beton ağırlıkları ile güçlendirilmiş, dar ve derin bölümlere yerleşebilme avantajına da sahiptir (Bahar, 2010). Bu durum, stabilite sağlamak ve taze bir karışımın homojenlik kaybı olmadan ayrışmasına karşı direnç göstermesini sağlamaktadır. KYB' nin geliştirilmesinden bu yana yüksek akışkanlığa, asgari çevre rahatsızlığı ve girişime karşı kendi kendine uyumluluğa sahip betona olan talep artmıştır. İyi sıkıştırma yapılmaması ve düşük kalite kontrolü özellikle ağır takviyeli yerlerde kullanıldığında düşük kaliteli konvansiyonel beton üretimine sebep olmaktadır. Betonun kalıpta yüksek çökme değerine bağlı olarak betonun aşağıya doğru düşmesine olan ihtiyacının artması, kapalı ve sıkışık alanların ayrılmadan akıp geçebilmesi ve taşınmasında, yerleştirilmesinde hem de doldurulmasında homojen kalmasının sağlanması KYB gelişiminin tetikleyicilerindedir. KYB, mermer tozu, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi malzemelerin eklenmesiyle birlikte çimento, ince ve iri agregalar, su ve katkı maddelerinden oluşan bir harç karışımıdır. Belirtilen ince malzemeler (filler malzeme) karışımda kullanılan çimento miktarının yerini almaktadır. Böylece bu ekleme ile KYB, Şekil 2.1'de görüldüğü gibi titreşimsiz kendi ağırlığı altında yerleştirme sırasındaki akışkanlığı, deforme olabilirliği ve

ayrışmaya karşı yüksek direnci ile normal betondan farklı ve avantajlı bir karışım haline gelmektedir (Gencil vd., 2012).



Şekil 2.1. KYB'nin yerleştirilmesi sırasında akışkanlık ve ayrışma direnci.

Geleneksel betondaki yüksek çimento harcı genellikle beton ürünün fiziksel ve mekanik özelliklerini etkileyen büzölmeye ve yüksek hidrasyon ısısı oluşumuna sebep olmaktadır. KYB' deki çimentolu harcın azaltılması ve yerine konulan malzemelerin düşük maliyeti aynı zamanda ekonomik anlamda da avantaj sağlamaktadır. Yukarıda bahsedilen KYB özellikleri, karışımındaki iri agreganın sınırlandırılması ve diğer malzemelerin eklenmesi ile elde edilmiştir. KYB Japonya'da geliştirildikten sonra bütün dünyada kabul görmeye başlamıştır. Bu betonun bulunmasından sonra yapılan araştırmaların çoğu KYB fiziksel ve mekanik özelliklerine ve karışımada kullanılan bileşen malzemelerin karışıma etkisi üzerine yoğunlaşmıştır (Gencil vd., 2012).

Karışımlarında önemli bir yere sahip olan çimento ise farklı formlarda bulunmasına rağmen, temel olarak kireç ve kalsiyum silikat karışım olup, suyla karıştığında bağlayıcılık özelliği kazanan bir beton bileşeni haline gelmektedir (Siegel vd., 2013). Beton karışımındaki kimyasal reaksiyon ve hidrasyon süreci, agrega malzemelerinin zaman içinde beton katılırken birbirine bağlanmasını sağlamaktadır (Pasetto ve Buko, 2011)

Uçucu kül ve mermer tozunun çimento yerine ikame bir malzeme olarak kullanılması, birçok araştırmacının basınç dayanımı, çekme dayanımı ve KYB'nin akışkanlık özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek için çalışmalar yapmasını sağlamıştır. Literatür incelendiği zaman farklı oranlarda tek başına uçucu kül kullanımı oranı %50'ye ulaştığı görülmektedir (Kovler ve Russel., 2011). Diğer çalışmalarda beton hamurundaki çimento kütlelerinin yerine %60'a kadar uçucu kül kullanıldığı da görülmektedir (Yu Zheng vd., 2018; Zeyad vd., 2017). Yüksek uçucu kül hacmi, işlenebilirliği ve akışkanlığı artırır, reolojik özellikleri iyileştirir, bu da betonda çatlak oluşumuna neden olan hidratasyon ısısını düşürür (Madhavi vd., 2014). Ayrıca, dolgu malzemesi uçucu kül olarak daha küçük hacimde kullanıldığında çimento hamurunun yapışmasını artırabilir, ancak yüksek hacimde kullanımın KYB'nin akmaya karşı direncini de artıracığı göz önünde bulundurulmalıdır. Bunun aksine, düşük basınç dayanımı, KYB karışımındaki çimentonun yerine tek başına eklenen yüksek hacimli uçucu külden kaynaklanmaktadır (Khayat, 1999).

Mermer kesim endüstrisi, çok miktarda toz mermer atığı üretmektedir. Mermerlerin kesilmesi işleminde, yüksek miktarda bulamaç halinde toz üretilmekte ve bu malzeme betonda ince agregaların yerini alabilmektedir. Araştırmalar, taş ocağı işletmelerinde toplam mermer tozunun yaklaşık %30-40'ının üretildiğini göstermektedir. Bu mermer atıklarının bertaraf edilmesi veya depolanması çevreye önemli tehditler getirmekte ve bu nedenle, bu atıkların önemini ve değerlendirilmesi gerektiğini belirten çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Mermer tozu, bu durumlar da göz önünde bulundurulduğunda beton yapımında özellikle KYB'larda dolgu maddesi olarak kullanılacak en iyi malzemelerden biridir (Tayeb vd., 2011).

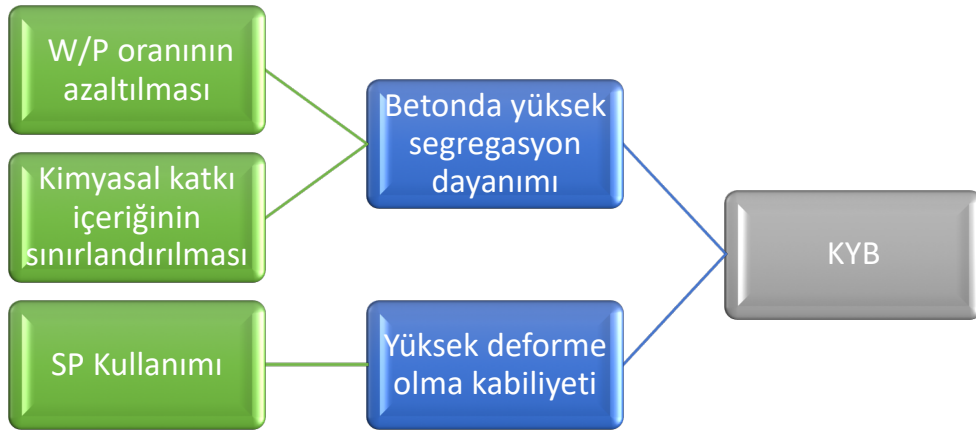
Uçucu kül ve mermer tozu gibi endüstriyel atıkların kullanımı, çevre içerisindeki atıkların geri dönüşüm yoluyla azaltılarak çevrenin korunmasına da yardımcı olmaktadır (Binici vd., 2007). Beton üretiminde, inşaat sektörünün büyüklüğü de göz önüne alındığında çok pahalı olan büyük miktarda çimento kullanıldığı aşikardır. Mermer tozu ve uçucu kül gibi endüstriyel atıkların (dolgu maddesi olarak) kullanılması, çimento ve kimyasal katkıların içeriğini azaltarak kendiliğinden yerleşen betonun üretimine yardımcı olmaktadır; dolayısıyla toplam üretim maliyetini



düşürmek ve kendi ağırlığı altındaki akışkanlığı nedeniyle işçilik maliyetini azaltmak gibi avantajlar da sağlamaktadır.

## 2.2. KYB Üretiminin Temel Yöntemleri

KYB, aynı normal beton üretiminde kullanıldığı gibi çimento, su, katkı ve agrega gibi temel bileşenleri içermektedir. KYB' de kullanılan yüksek dozlarda süper akışkanlaştırıcılar (SP), sıvı limitlerini azaltmak ve işlenebilirliği arttırmak için kullanılmaktadır. Eklenen yüksek toz miktarı, kaba agregalar (CA) için bir yağlayıcı olarak çalışmakta ve beton karışımındaki beton viskozitesini artırma işlevi görmektedir (JSCE, 1992). Süper akışkanlaştırıcılar şekil değiştirebilirliği arttırırken; su toz oranı (W/P) ayrışma direncini arttırmaktadır. Şekil 2.2' de gösterildiği üzere (Dehn vd., 2000), KYB karışımının temel prensiplerini üç özelliğe bağlı olduğu belirlenmiştir. Kısaca KYB, büyük ölçüde geleneksel betondan elde edilen agregaların değiştirilmesiyle elde edilen, çimento ve dolgu formunda yüksek miktarda tozdan yapılmaktadır (Le vd., 2012).



Şekil 2.2. KYB üretiminin temel yöntemleri

Kendiliğinden yerleşen betonu elde etmek, yüksek oranda deforme olabilen harç ve kaba agregaların harçtan ayrılma direncini gerektirir. Çünkü beton, sınırlı alanlarda (inşaat demiri vb.) kapalı alanların içinde akmak durumundadır. Bu bakımdan, düşük su - toz (W/P) oranının ve süper akışkanlaştırıcıların (SP) kullanımı için agrega içeriği

azaltılmalıdır. Kullanılan prosedür, Okamura ve Ouchi (2003) tarafından şematik olarak sunulmuştur ve model, aşağıdaki Şekil 2.3'te özetlenmiştir (Prarthitaet vd., 2018).



Şekil 2.3. Kendinden sıkışmaya hazırlama süreci

Kendiliğinden yerleşen betonun farklı şekillerde malzeme oranları olabilmektedir; Ancak, farklı malzeme oranları olmasına rağmen genel olarak sadece iki ana teknik ile üretimi yapılmaktadır. İlk yöntemde, SP ve çok miktarda ince agreganın bir kombinasyonunun kullanılması şeklindedir. İkinci yöntemde ise SP ve viskozite düzenleyici malzemelerin (VMA) eklenmesini içeren yöntemdir (Hewlett ve Liska, 2019).

Kendiliğinden yerleşen betonlar, harç bileşimleri bakımından üç tipte sınıflandırılmaktadır:

1. Toz tipi,
2. Kombinasyon tipi,
3. Viskozite değiştirici madde / dengeleyici tipi.

İstenilen harç hacmini üreten ince malzeme oranlarında daha yüksek oranlarda olan toz tipi, sabitleyici tip ise ince taneli içeriğin titreşimli beton için kabul edilebilir aralık içinde kalmasını sağlar (Brito ve Saikia, 2013). Stabilizatör kullanılarak ayarlanan ve

kontrol edilen ayrılmayı önlemek için karışımda ihtiyaç duyulan viskozite elde edilir. Kombinasyon tipi, üretim prosesi sırasında nem dengesini korumak için az miktarda stabilizatör eklenerek oluşturulur. Sonuç olarak, yerleştirilirken ve kürlenme esnasında konsolidasyon (uygun oranlama), bakım gerektirmeyen, güçlü, pratik olarak sızdırmaz ve dayanıklı inşaat malzemeleri elde edilir.

### **2.3. KYB'nin Avantajları ve Dezavantajları.**

Yeni beton teknolojilerinin geliştirilmesi ile KYB üretiminin belli avantaj ve dezavantajları olacağı bilinmektedir. Bu avantaj ve dezavantajlı durumları anlamak teknolojinin doğru uygulanması kullanımı da arttıracaktır. Avantaj ve dezavantajlara aşinalık ise, kendiliğinden yerleşen betonu kullanarak doğru uygulama yapmak için en iyi senaryoyu hazırlamada fayda sağlayacaktır. Bu nedenle, herhangi bir malzemede olduğu gibi KYB'nin de avantajları ve dezavantajları, uygulanmadan önce araştırılmalı ve anlaşılmalıdır. Bu açıdan incelendiğinde avantajları kısaca aşağıdaki gibidir.

- a) KYB materyallerinin küresel olarak her yerde kolayca bulunur olması.
- b) KYB, doğal taşlara kıyasla eksiklik ve kusurlardan arındırılmış durumdadır.
- c) KYB daha hızlı yerleştirme olanağı sağlar ve istenen güçte üretilebilir.
- d) KYB oldukça dayanıklıdır.
- e) KYB, herhangi bir biçimde dökülebilmektedir.
- f) KYB, çalışma sahalarında dökülebildiğinden oldukça ekonomiktir.
- g) KYB'yi üretmenin maliyeti çok düşüktür.
- h) KYB yangına dayanıklı bir inşaat malzemesidir.
- i) KYB aşırı sıcaklıklara dayanabilir.

j) KYB, rüzgar ve suya dayanıklıdır; dolayısıyla fırtına barınaklarında da uygulanabilir.

k) KYB'nin sınırlı erişimdeki ince duvarlı elemanlara yerleştirilmesi kolaydır.

l) KYB'nin yerleştirme kolaylığı maliyet tasarrufu sağlar, işçilik ve ekipman maliyetini düşürür.

m) KYB, takviye etrafında daha iyi konsolide olmaktadır.

n) KYB, atık ve endüstriyel yan ürün malzemelerinin kullanılmasıyla çevre dostudur.

KYB'nin yukarıda sayılan avantajlarının yanı sıra aşağıda sayılan dezavantajlara sahip olduğu da unutulmamalıdır. Bu dezavantajlar;

a) Çekme dayanımı, diğer inşaat malzemelerinin aksine nispeten düşüktür.

b) KYB, toplam değişikliklere ve neme karşı duyarlıdır.

c) KYB normal betona göre daha az yumuşaktır.

d) İnce içeriğin artırılması, büzülme çatlama karşı hassasiyeti artırır.

e) KYB, gücünden daha ağırdır.

f) Hammadde ve süper akışkanlaştırıcı maliyeti fazladır.

g) Artan kalite kontrol gereklilikleri dezavantaj sağlar.

h) KYB'nin bileşenleri göz önüne alındığında, çiçeklenmeye neden olabilecek bazı çözünür tuzlar içerebilmektedir.

## 2.4. Literatüre Ait Bazı Çalışmalar

Kumar vd., (2015), beton karışımına mermer tozu ve uçucu kül ekleyerek yaptıkları deneysel çalışma literatürde önemli bir çalışmadır. Yaptıkları çalışmada, çimentoların ve ince agregaların yerine kullandıkları ince malzemeler, betonun basınç, eğilme ve ayrışma kuvvetlerini üzerinde etkilerini göstermişlerdir. Çalışma esnasında çimento 0.35'lik sabit bir su/çimento (W/C) oranında uçucu kül ve mermer tozu ile değiştirilmiştir. Gözlemlere göre, W/C oranındaki bir artışın beton kuvvetinde bir azalmaya neden olduğu belirtilmiştir. Basınç dayanımı 7 günde %35'e ulaşmıştır ve ince agregalar için oransal ikame olarak mermer tozu miktarı artmıştır.

Mermer tozu ve uçucu kül kullanarak KYB' nin mukavemet özelliklerini geliştirmek için yürütülen diğer deneysel bir çalışmada ise, M30 dereceli KYB karışımı için, çimento oranını çeşitli oranlarda mermer tozu (%10, %15, %20 ve %25) ve %30'a sabitlenmiş uçucu kül oranı ile değiştirmek suretiyle yapılmıştır. Bu deneyin temel amacı, nihai dayanım arttırmak için çimento yerine kullanılacak bu malzemelerin (uçucu kül ve mermer tozu) en iyi oranını belirlemektir. Basınç dayanımı testlerinden elde edilen sonuçlar, %10'a kadar mermer tozu ve %30 uçucu külün kontrol karışımına kıyasla çimentoya nispeten daha yüksek dayanımlar sağladığını göstermiştir. Yarmada çekme dayanımı için de sonuçlar yukarıda belirtilen miktarlar KYB'de 28 ve 56 gün sonra kontrol karışımı ile aynı özellikleri gösterdiği gibidir. Mermer tozunun haddinden fazla olarak eklenmesi sonucunda çekme dayanımında bir azalmaya neden olmaktadır (Singh vd., 2017).

Darzi Musaib ve Shivkumar (2016), yaptıkları çalışmada çevreci bir beton üretimi için çimento ve kumun uçucu kül ve mermer ile kısmen değiştirilmesinin etkilerine odaklanmışlardır. Deneysel çalışmada mermer tozu %5, %10 ve %15 oranlarında çimento yerine ikame edilmiş, uçucu kül ise %20, %40 ve %60 oranlarında ince agrega ile değiştirilmiştir. Amaç, geleneksel betonda en yüksek basınç dayanımını elde etmek için basınç ve yarmada çekme dayanımını incelemek ve analiz etmek ve optimum değişim oranını belirlemek olmuştur. İncelemede, elde edilen en yüksek dayanım değerinin mermer tozu %10 iken ve %40-50 arasında uçucu kül kullanıldığında olduğu sonucuna varılmıştır.

KYB karışımında mermer tozu ve uçucu kül kullanımı ile ilgili bir diğer deneysel çalışmada ise %10 mermer tozu ve %25 uçucu küm kullanımının işlenebilirlik üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığı, yayılma akışını arttırdığı ve 28 günde test edilen KYB için hem basınç hem de yarmada çekme dayanımı değerlerinin en yüksek değerde olduğu görülmüştür (Pala vd., 2015).

Mermer tozu veya granüllerinin KYB işlenebilirliği ve basınç dayanımı üzerindeki etkisini değerlendirmek için yapılan diğer deney de ise, kullanılan mermer granüllerinin oranı %0, %5, %10, %15 ve %20 olduğunda, mermer yüzdesi %15 iken elde edilen optimum basınç dayanımı değerinin, mermer yüzdesi %20 iken azaldığını ortaya koymuştur (Rai vd., 2011).

Türkmenoğlu vd., (2016), kendiliğinden yerleşen hafif beton (SCLWC) üretiminde mermer tozunun kullanımı üzerine bir araştırma yürütmüşlerdir. İnce agrega yerine %5, %7,5 ve %10 oranlarda atık mermer agregaları kullanılarak üretilen SCLWC da yayılma akışı 560 mm (%5'te) ile 570 mm (%10'da) arasında ve T50 zaman değerlerinin 4s ve 9s arasında olduğu görülmüştür. Bu nedenle, %7.5 oranında mermer tozu kullanımı KYB'yi olumlu etkilemiştir. Ayrıca işlenebilirlik ve sıkıştırma kuvvetleri kısmi nehir kumu ile birlikte 7.11 oranında artmaktadır.

Gulden ve Artin (2015) çalışmalarında mermer tozunun çimento veya ince agrega yerine kullanılmasının hem sertleşmiş beton hem de taze betonun özelliklerinde iyileşmeye neden olduğunu belirtmişlerdir. Çalışma, %10 mermer tozu ve %25 uçucu kül kombinasyonu kullanıldığında mermer tozu kullanımının, doldurma kabiliyetini, geçme kabiliyetini, basınç ve eğilme mukavemetini arttırdığı sonucuna varmıştır.

Hameed vd, (2012) araştırmalarında, kendiliğinden yerleşen beton üretimi sırasında mermer çamuru tozunun yanı sıra ezilmiş kaya tozlarının kullanılmasının düşük maliyetli ve avantajlı olduğu sonucuna varmışlardır. Mermer tozunun kullanılması, betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinde iyileştirmeler olduğu sonucunu vermiştir. Elde edilen bulgulara dayanarak yapılan çalışmada, doğal kumun %85 kırılmış kaya tozu ile değiştirilmesinin ve KYB'de yaklaşık %15 mermer çamur tozunun kullanılmasının dayanım gücünü artıracığı öne sürülmüştür.

SiO<sub>2</sub>'nin mermer tozundaki aktif bileşenin, kimyasal olarak stabil ve yapısal olarak yoğun olan ikincil kalsiyum silikat hidrat üretmek üzere betonlarda Ca(OH)<sub>2</sub> ile başarılı bir şekilde reaksiyona girdiği doğrulanmıştır. Bu nedenle değişimin KYB'nin basınç dayanımı üzerinde büyük etkisi vardır (Ergün, 2011). Diatomit ve mermer tozu yan ürünlerinin, çimento yerine kısmi ikame olarak kullanılmasının KYB'nin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri de ayrıca incelemiştir. Mermer tozunun boşlukları doldurmadaki dolgu etkisi ve betondaki gözenekliliği azalttığı da ayrıca görülmüştür.



### **3. MATERYAL VE YÖNTEM**

#### **3.1. KYB Üretiminde Kullanılan Malzemeler**

KYB üretmek için farklı malzemeler kullanılabilir. Portland çimentosu, dolgu maddesi, kum, ince ve kaba agregalar, su ve süper akışkanlaştırıcı ve uçucu kül bu malzemelerin başlıca kullanılanları arasındadır. Bu malzemelerin uygunluklarını değerlendirmek ve beton karışımının bir kısmını alarak kimyasal ve fiziksel özelliklerini anlamak için test yapılması bir zorunluluktur (Li, 2011). Kendiliğinden yerleşen taze beton için, akışkanlık, doldurulma kabiliyeti ve ayrışma olmadan işlenebilirlik verilerinin iyi olması için karışım tasarımının iyi olması gerekmektedir. KYB en azından standartlarda verilen değerleri karşılamalıdır (Okamura ve Ouchi, 2003).

##### **3.1.1. Portland Çimentosu**

Çimento, malzemeleri birbirinden bağımsız olarak ayarlayan, sertleştiren ve bağlayan bir bağlayıcı olarak işlev görmektedir. Çimento çoğunlukla doğal ve yapay agregaların normal çevre koşullarında güçlü ve dayanıklı yapı malzemeleri oluşturmak amacıyla harç ve beton üretiminde kullanılmaktadır (Kodeboyina, 2018). Çimento, kireçtaşından üretilen toz benzeri bir malzemedir. Günümüzde dünyada kullanılan çimentoların çoğu, Portland Çimentosu (OPC), Sülfata Dayanıklı Çimento ve Yüksek Alümina Çimento olarak bilinen çimentolardır (Loukili, 2013).

Yüksek kalitede çimentolar, uygun şekilde homojen ve saf bileşimler olan hammaddeler gerektirir. İnşaat sırasında çimento, harç ve beton yapmak için orantılı olarak agrega ile birleştirilir. Çimento kalsiyum, silikon ve alüminyum oksitlerin bir bileşimidir (Reda, 2018). OPC su ile karıştırıldığında, bileşenleri betonun sertleşmesini sağlamak için çeşitli kimyasal reaksiyonlara girer. Ayrıca, OPC'nin fiziksel özellikleri, özellikle KYB için performansı büyük ölçüde etkilemektedir. KYB için kullanılan çimento cinsi, suyla karıştırıldığında erken sertleşmeden dolayı yapay ortamda bulunmayan beton akışkanlığını geliştirebilmeli ve süper akışkanlaştırıcılar, kür



bileşenleri ve polietilen glikoller gibi kimyasal katkılarla uyum göstermelidir (Collepari, 2010).

Bu nedenle KYB üretiminde topaksız tip çimento kullanılmalıdır. Kesin olarak, çimento düzgün bir şekilde kontrol edilmiş olmalı, gereken inceliği göstermeli, hidrasyon sırasında betondaki hacim değişikliklerini düzenlemek için düşük / orta dereceli ısı üretmelidir. Çimento miktarı, gereken dayanıklılık ve basınç dayanımı ile ilişkilendirilmelidir. Aksi takdirde çok fazla maliyet çıkacak, kuruma büzülme süresi artacaktır (Su vd., 2001).

Bu çalışmada kullanılan Portland çimentosu TS EN 197-1 standartlarına uygun CEM II / B-L 42,5R çimento olup, özgül ağırlığı 3,15 gr/cm<sup>3</sup> ve Blaine değeri 4414 cm<sup>2</sup>/g'dır. Bu deneyde kullanılan çimentonun ayrıntılı fiziksel ve kimyasal özellikleri, Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'de gösterilmektedir.

Tablo 3.1. Çimentonun fiziksel özellikleri

<b>Çimentonun Fiziksel Özellikleri</b>	<b>Sonuç</b>	<b>Standart Limitler (TS:8112-1989)</b>
Özgül Ağırlık	3,15	3,10 – 3,15
Standart/Normal Kıvam	%32	30 – 35
Priz başlangıcı	34 dk.	30 dk.
Priz sonu	178 dk.	600 dk.
Basınç Dayanımı – 3 gün	20 N/mm <sup>2</sup>	-
Basınç Dayanımı – 7 gün	40,5 N/mm <sup>2</sup>	42,5 N/mm <sup>2</sup>
Basınç Dayanımı – 28 gün	60,5 N/mm <sup>2</sup>	62,5 N/mm <sup>2</sup>

Tablo 3.2. Çimentonun kimyasal özellikleri

İsmi ve Kompozisyonu	Kütle İçeriği (%)
CaO	61,3
SiO <sub>2</sub>	20,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,51
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,51
MgO	1,0
SO <sub>3</sub>	3,0
Na <sub>2</sub> O+0,658 K <sub>2</sub> O	1,1
C <sub>2</sub> S, C <sub>3</sub> S, C <sub>3</sub> A, C <sub>4</sub> AF	24-26, 48-52, 7-8, 11-20%

Çimento miktarı genellikle gerekli basınç dayanımı ve dayanıklılık özellikleri ile belirlenir. Çalışma için EN 206 standardında verilen farklı çevre koşulları ve maruz kalma sınıfları için minimum çimento içeriği seçilmiştir. KYB uygulamaları için, akıcılığı artırmak ve kendiliğinden yerleşmeyi kolaylaştırmak için yüksek miktarda çimento malzemesi gereklidir. Ancak, çok fazla çimento kullanımı kuruma sırasında büzülme ve malzeme maliyetini artırır. Bu sebeple, uçucu kül, kireçtaşı tozu, silika dumani, cüruf gibi çimentolu malzemeler ayrışma direncini arttırmak ve beton maliyetini düşürmek için KYB'de kullanılmaktadır.

### 3.1.2. Mermer Tozu

Mermer atık tozu veya mermer tozu pudrası, araştırmacılar tarafından mermer tozuna (MP) atıfta bulunarak aynı malzemeyi tanımlamak için kullanılan farklı adlardır. Taşların çeşitli yöntemlerle bloklar halinde kesildiği mermer ocaklarında bu taşların kesilme sürecinde, mermer blokların yaklaşık %20-30'u atık mermer tozları haline gelmektedir (Patankar vd., 2015). Bol miktarda mermer, dekoratif amaçlar için kesilerek, cilalanarak ve kullanılarak endüstriyel olarak üretilmektedir. Mermer tozunun beton üretiminde katkı maddesi olarak endüstriyel kullanımı yaygın olarak kabul edilmektedir (Tayeb vd., 2011). Atıklar, doğal kaynakların verimli kullanımını artırmak için katkı maddesi olarak kullanılmak üzere geri dönüştürülebilir ve yeni ürünler halinde üretilebilirler. İnşaat endüstrisinde, mermer tozu genellikle diğer

işlerin yanı sıra döşeme ve kaplama gibi farklı amaçlar için de kullanılmaktadır (Prarthitaet vd., 2015).

Türkiye, dünyadaki toplam mermer rezervinin yaklaşık %40'ına sahiptir. Türkiye'de yılda 7 milyon ton mermerin üretildiği bilinmektedir. Bu durum, çok sayıda işleme tesisinin büyük miktarda mermer tozu ürettiği anlamına gelmektedir ve bu bir mühendislik sorunu oluşturmaktadır (Alyamaç ve Ince, 2009). Çalışmamızda kullanılan mermer tozu, büyük mermer blokların yerel tesislerde işlenmesi, parçalanması ve şekillendirilmesi sürecinden elde edilmiştir. Mermer tozunun fiziksel ve kimyasal bileşimleri aşağıdaki tablo 3,3 ve 3,4'te özetlenmiştir. Malzeme toz beton karışımına çimento için yararlı bir kısmi ikame bileşen olarak uygulanmıştır. Beton karışımına farklı miktarlarda mermer tozu uygulanmıştır. Bu malzeme tek başına veya uçucu kül kompanzasyonu ile harca eklenmiştir. MP, farklı yüzdelerle kullanılarak (%0, %5 ve %10 oranında) çimentoyu kısmen değiştirmiştir.

*Tablo 3.3. MP'nin fiziksel özellikleri*

<b>Özellikleri</b>	<b>Sonuç</b>
Özgül Ağırlık	2.63
Renk	Beyaz
Form	Pudra
Koku	Kokusuz
Nem Oranı (%)	0,60
Elek büyüklüğü	0,90mm
Sertlik	3 (Mohr's ölçeği)
Su Emme Oranı	0,97%

Tablo 3.4. MDP'nin kimyasal bileşenleri

Kimyasal Bileşenler	Kütle İçeriği (%)	Doğal Çimentonun Standart İçeriği (%)
CaO	55,09	31 – 57
SiO <sub>2</sub>	0,48	22 – 29
MgO	0,40	1.5 – 2.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,12	1,5 – 3,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,17	5,2 – 8,8
Na <sub>2</sub> O	0,20	-
K <sub>2</sub> O	0,06	-
SO <sub>3</sub>	0,06	-
LOI (%)	43,48	-



Şekil 3.1. Mermer tozu (MP)

### 3.1.3. Uçucu Kül

Uçucu kül (FA), KYB'nin özelliklerini geliştirmek için çimentoya ikame edilerek farklı yüzdeler olarak eklenen puzolanik özelliklere sahip ince bir inorganik yapı malzemesidir. Bu deneyde kullanılan uçucu kül, ASTM C618-93'e ile uyumlu özelliklerdedir. Uçucu küller, çimento parçacıklarından daha ince (0.1µm-150 µm)

olan camsı ve küresel şekillidir. Uçucu kül parçacıkları, karışımın serbestçe akmasına olanak sağlayan küresel forma sahiptir. Puzolanik özelliği, karışıma su eklendiğinde uçucu külün serbest kireçle reaksiyona girmesini sağlamaktadır. Uçucu kül, uzun süreli hidrasyon ve puzolanik reaksiyon yoluyla yüksek termal gradyanların kontrolü ve mikro yapısal gelişme sayesinde betonun dayanıklılığını arttırmaktadır.

Lamond ve Pielert (2006), uçucu kül kullanımının, kalite iyileştirme, daha düşük hidrasyon ısı, sülfat saldırılarına karşı direnç, düşük büzülme ve gözenekliliği azaltma özelliklerine yararlarını kendi çalışmalarında vurgulamışlardır. ASTM, doğal puzolanları ve uçucu külleri ASTM C 618-93'e göre aşağıdaki üç kategoride sınıflandırmaktadır:

*N Sınıfı Uçucu kül:* Ham veya kalsine edilmiş ortak pozzolonlar, örneğin, bazı diatomlu topraklar, opal çentik malzeme, volkanik ateşli kalıntılar ve pomza bu sınıflandırmaya dahildir. Kalsine kaolin çamuru ve laterit pozzolonları da bu sınıflandırmaya girmektedir.

*F Sınıfı Uçucu kül:* Bu sınıflandırmada, yanan antrasit veya bitümlü kömürden düşen uçucu tozlar mevcuttur. Bu uçucu toz sınıfı, puzolanik özelliği gösterir, ancak zaman zaman kendi özelliğine karşı çimento özelliği de taşırlar.

*C Sınıfı Uçucu kül:* Genellikle linyit veya hafif bitümlü kömürden elde edilen uçucu toz, bu sınıfa dahil ana malzemedir. Bu uçucu cüruf sınıfı hem puzolanik hem de değişken seviyelerde kendiliğinden çimentolu özelliklere sahiptir. (Çoğu C sınıfı uçucu ateşli kalıntı %15'den fazla CaO içerir. Ancak bazı C sınıfı uçucu küllerde bu oran %10'a kadar düşmektedir. Uçucu kül sınıfları, şekil 3.2'de gösterilen bileşim varyasyonlarına bağlı olarak farklı renklere sahiptir. ASTM C 618-93'ed Portland çimentosu ile yapılan betonda mineral katkı olarak kullanılmak üzere kullanılan uçucu kül ve doğal puzolan gereksinimlerini sınıflandırılmıştır.



Şekil 3.2. Uçucu külün farklı sınıflandırmaları.

Tablo 3.5. ASTM'ye göre Uçucu külün fiziksel ve kimyasal gereksinimleri

Gereksinimler	FA Sınıflandırması		
	N	F	C
<b>Kimyasal Gereksinimler</b>			
SiO <sub>2</sub> + AlO <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , min%	70	70	70
SO <sub>3</sub> , max%	4	5	5
Nem İçeriği, max%	3	3	3
LOI, max%	10	6	6
<b>Fiziksel Gereksinimler</b>			
Islak elemde elekte kalan miktar 450 mm. (%)	34	34	34
28 günde portland çimentosu ile pozzolanik aktivite indeksi, min kontrol %	75	75	75
Kireç ile pozzolanik aktivite indeksi, 7 günde, min. (MPa)	5.5	5.5	-
Su gereksinimi, max kontrol %	115	105	105
Otoklav genişleme veya daralma, max %	0.8	0.8	0.8
Özgül ağırlık, ortalamaya göre max. fark	5	5	5
Yüzde 45 elek üzerinde tutulan yüzde, maksimum sapma ve ortalama puan	5	5	5

F Sınıfı ve özgül ağırlığı 2,39 olan uçucu kül Türkiye'deki bir termal santralden alınmış ve deneyde kullanılmıştır (Çatalağzı, Zonguldak). Malzemenin kimyasal özellikleri Tablo 3.6'da ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Tablo 3.6. Kullanılan uçucu külün kimyasal özellikleri.

Oxide	%	EN 450-1	ASTM C618	
			F	C
SiO <sub>2</sub>	61,81			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,58			
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,01			
CaO	1,77			
MgO	2,56			
SO <sub>3</sub>	0,31	<3	<5	<5
K <sub>2</sub> O	0,99			
Na <sub>2</sub> O	2,43			
S+A+F	88,36		>70	>50
LOI	2,2	<5	<12	<6

### 3.1.4. Agregalar

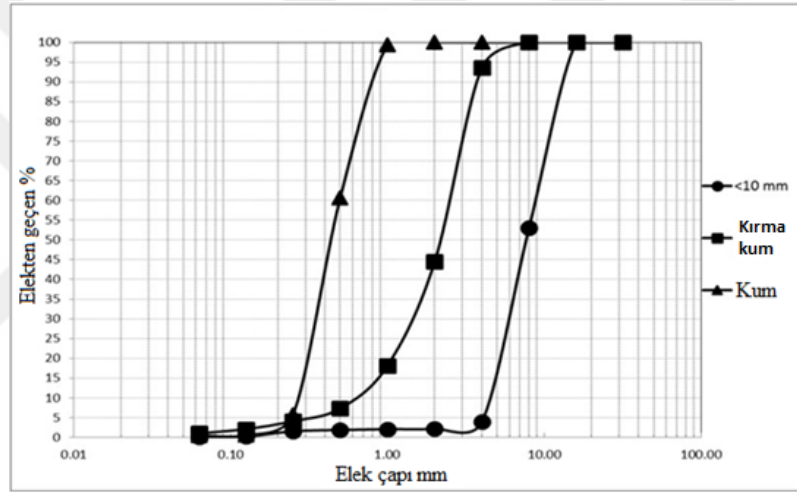
Normal beton hacminin %70-80'i agregalardan ibarettir ve bu agregalar beton özellikleri üzerinde güçlü etkiye sahiptirler. Agregalar, doğal kayadan (örneğin, kırma taş / doğal çakıllar) ve kumdan elde edilen granül malzemelerdir (Junaid vd., 2015). Cüruf gibi genişletilmiş kil / şeyl ve diğer sentetik malzemeler de hafif beton üretmek için belirli bir dereceye kadar kullanılmaktadır. Bu malzemeler üretimde bir denge ve aşınma direnci sunarlar. Ayrıca, karışım tasarımının büyük ölçüde agregaların bileşimine bağlı olduğu ve beton dayanımını belirlediği de bilinmektedir (Lee vd., 2016). Sert ve güçlü, istenmeyen kirlilik içermeyen ve kimyasal olarak kararlı agregalar, yüksek beton kalitesi için çok önemlidir. Agregalar hem ince kum (4,75 mm) hem de kurşundan (4,75 mm-12,5 mm) ve çakıl (12,5 mm) kullanılarak elde edilirler.

Nehir kumu, ASTM C33-01 gereksinimlerini karşılayan ve ayrıca 2 derecede kullanılan iyi bir agrega türüdür. Bu kum büyük boyutlu parçacıkların elimine edilmesi için özellikle, 4,75 mm'lik elekten geçirilerek elenmelidir. Bunun aksine bu çalışmada kullanılan kaba agrega (CA), ASTM C33-01 için de geleneksel olan standart boyutlu (10-20 mm) pürüzlü yüzeyli agregadır. Genellikle, CA ortalama beton içeriğinin %70-80'ini kapsamaktadır, ancak KYB kaba agrega olarak sadece %50'lik kısmı içermektedir. Araştırmada kullanılan ince ve kaba agregaları Şekil 3.4 ve bu agregalara

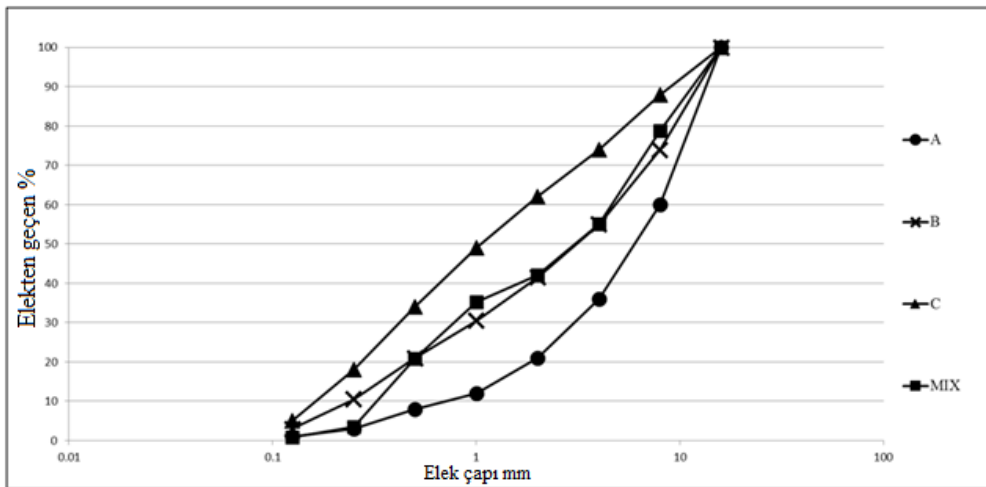
ait elek analizi sonuçları Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 da verilmiştir. Kullanılan agregaların genel özellikleri Tablo 3.7'de özetlenmiştir.



Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan ince ve kaba agrega.



Şekil 3.4. Kullanılan agregaya ait elek analizi



Şekil 3.5. Agrega karışımlarına ait optimum elek analizi sonucu



Tablo 3.7. İnce ve kaba agregaların özellikleri.

Özellik	İnce Agrega	Kaba Agrega	
		20 mm altı	10 mm altı
İncelik Modülü	3,35	7,54	3,19
Özgül Ağırlık	2,38	2,76	2,69
Su Emme %	1,20	1,83	1,35
Kütle Yoğunluğu	1753	1741	1711

### 3.1.5. Su

Su, betonun önemli bir bileşenidir çünkü çimento ile kimyasal reaksiyona girmesini sağlamaktadır. PH değeri 6-8 olan su, KYB karışımı için uygun şekilde onaylanmıştır. Karışımı oluşturan tüm malzemelerin miktarı belirlenen karışım kalitesi için önem arz etmektedir. Şebeke suyu genellikle beton yapımında kokuya neden olan maddelerinin bulunmaması nedeniyle tercih edilmektedir (Pepe vd., 2016). Bu nedenle, suyun yanı sıra su kalitesi de dikkatlice kontrol edilmelidir. Deney boyunca Kastamonu Üniversitesinde kullanılan normal şebeke suyu tüm karışımlarda karışım suyu ve kür olarak kullanılmıştır.

### 3.1.6. Süper Akışkanlaştırıcı (SP)

Betonun işlenebilirliğini artırmak için üst düzey su azaltıcı katkıları kullanılmaktadır. Esas olarak beton yapımında kullanılan SP katkı maddeleri, sülfürlü naftalin polimerlerine dayanan klorür içermeyen malzemelerdir. Malzeme genellikle suda derhal dağılabilen kahverengi bir çözelti halindedir. Betonun işlenebilirliğini ve mukavemetini arttırmak için üst düzey su azaltıcı katkı çalışmamızda da kullanılmıştır. Araştırmada kullanılan ticari marka, CHRYSO'dur ve Şekil 3.6'da gösterildiği gibi optima 286 olarak sınıflandırılmaktadır. Kullanılmış olan bu SP, işlenebilirliğin artırılması ve uçucu kül ile uyumlu olması bakımından uygundur.



Şekil 3.6. Çalışmada kullanılan süperakışkanlaştırıcı.

### 3.2. Karışım Tasarımı

Önceki çalışmaların gözden geçirilmesi, KYB'nin işlenebilirlik, doldurma ve geçme kabiliyetine ilişkin temel özelliklerini elde etmek için ve ayrışma olmadan doldurma ve geçirme kabiliyetinin artması açısından KYB karışımının önemli olduğunu bilinmektedir (EFNARC, 2002). Kullanılan malzemelerin oranını ve miktarlarını kapsayacak iyi bir karışım tasarımının geliştirilmesi bir zorunluluktur. İncelenen literatürden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış, MP ve FA'nın KYB'yi nasıl etkilediği araştırılmıştır ve ön deneme çalışmaları yapılarak etkileri gözlemlenmiştir. Mermer tozunun çimentoyla kısmi olarak kullanılması hem tazeliği hem de betonun sertleşmiş özelliklerini önemli ölçüde etkilediği literatür ve ön deneme çalışmaları ile belirlenmiştir (EFNARC, 2002). Deney boyunca, aşağıdaki şartnameye uygun malzemeler kullanılmıştır.

- Su toz oranı hacimsel olarak 0,8-1,1 seviyesinde olmakla birlikte kütle olarak toplam toz miktarı 400-600 kg/m<sup>3</sup> olarak kullanılmıştır.
- Kaba agrega içeriği: toplam kütle için %28-%35'i olarak kullanılmıştır.
- Su ve çimento oranı ise TS EN 206 standardına göre tasarlanmıştır. Kullanılan su miktarı metreküp başına 200 litreden az olmak zorundadır ve kum miktarının oranı diğer malzemelere iyi oranlanmalıdır.
- TS EN 206-1, 2002 standardına uygun, CEM I 42.5 R kodlu Portland çimentosu, mermer tozu ve uçucu kül kullanarak yüksek dayanımlı beton

karışım tasarımları için en iyi oranları seçmek için bir kılavuz olarak kullanılmıştır

Ayrıca bu çalışma KYB'de mermer tozu ve uçucu külün uygunluğuna odaklandığından, beton karışımına % 0, % 5 ve %10 oranlarında, %5 oranındaki çimento oranının değiştirilmesi ile farklı oranlarda mermer tozu katılması yoluna gidilmiştir. Her adımda %0, %2,5, %5 ve %7,5 oranı ile de uçucu kül ilavesi de yapılarak karışım değişkenleri (Tablo 3.8) belirlenmiştir.

Tablo 3.8. Karışımlarda kullanılan değişkenler ve oranları

DEĞİŞKEN	(%)	KARIŞIM KODU
Mermer Tozu	0 5 10	MP
Uçucu Kül	0 2.5 5 7.5	FA

M150 sınıfı beton için karışım tasarımı, çimento ağırlığına göre oranları çeşitli miktarlarda değişmek üzere mermer tozu (%0, %5 ve %10) ve uçucu kül (%0, %2,5, %5 ve %7,5) ile karışımları olarak hazırlanmıştır. Araştırmada bir metre küp beton için kullanılan karışım oranları Tablo 3.9'da listelenmiştir.

Tablo 3.9. Beton karışımı için kullanılan miktar oranları ( $kg/m^3$ )

Kod	Çimento (gr)	Uçucu Kül (gr)	Mermer Tozu (gr)	Kum (gr)	Kaba Agregat (0-5) (gr)	Kaba Agregat (5-15) (gr)	Su (ml)	SP (gr)
FA0MP0	23629	0	0	25634	12375	23311	7086	685
FA0MP5	22447		1181					
FA0MP10	21265		2363					
FA2.5MP0	23038	591	0					
FA2.5MP5	21857		1181					
FA2.5MP10	20675		1390					
FA5MP0	22447	1181	0					
FA5MP5	21266		1181					
FA5MP10	20084		2363					
FA7.5MP0	21856	1772	0					
FA7.5MP5	20675		1181					
FA7.5MP10	19494		2363					

Karışımlarda bölgede bulunan ve bilinen kalitede yerel agrega (Şekil 3.7) kullanılmıştır. Karışım tasarımı boyunca, su, kum ve kaba agrega için kullanılan yüzde miktar değeri sabit tutulmuş, sadece çimento içeriği 0%, 2.5%, 5% ve 7,5% oranında uçucu kül ve 0%, 5% ve 10% oranında mermer tozu ile değiştirilerek karışımlar (Tablo 3.9) hazırlanmıştır. Karışımların hazırlanmasında çalışma 4 farklı karışıma ayrılmıştır; ilk karışım 0% uçucu kül 0%, 5% ve 10% mermer tozu karıştırılarak elde edilmiştir. İkinci, üçüncü ve dördüncü karışımda ise 2,5%, 5% ve 7,5% oranda uçucu kül ve üç ayrı oranda mermer tozu kullanılmıştır. Hazırlanan karışımlar 15x30 cm silindir numunelere dökülmüş ve prizini alması beklenilmiştir. Prizini tamamlayan numuneler ilgili deney gününe kadar 20 °C de kirece doygun suda küre tabi tutulmuştur



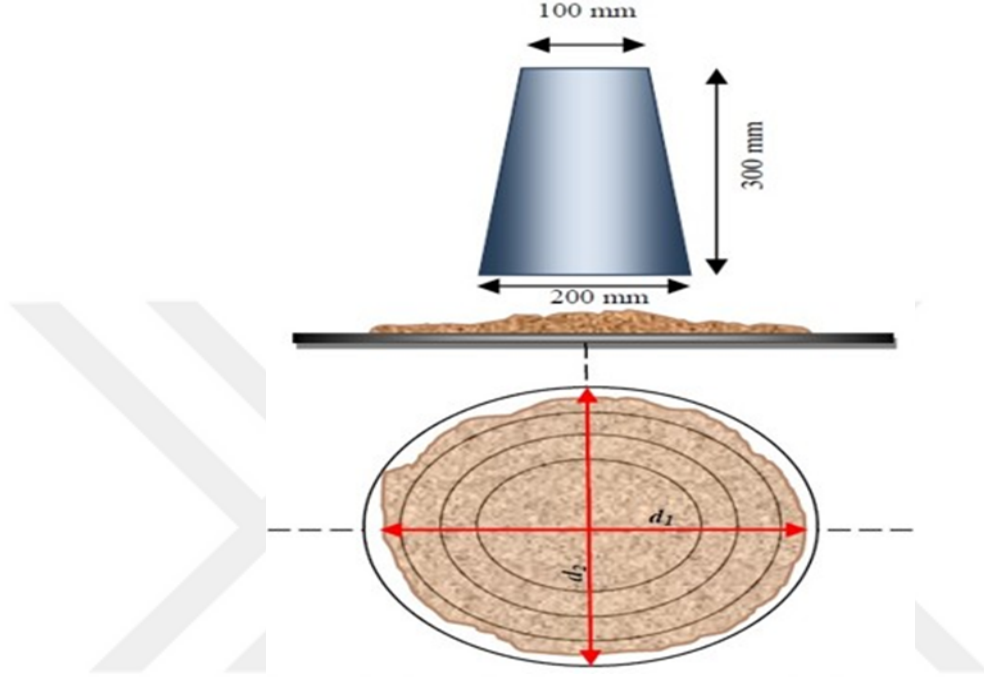
Şekil 3.7. KYB için kullanılan malzemeler

### 3.3. Yöntem

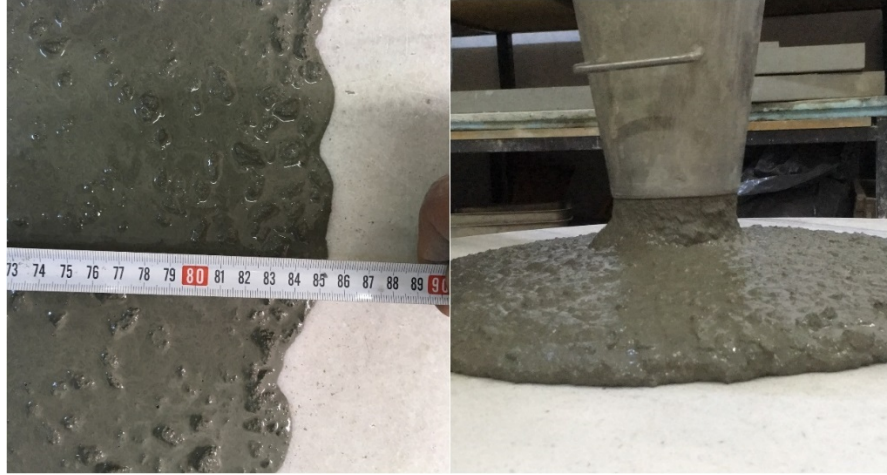
#### 3.3.1. Yayılma Testi

Yayılma testi, KYB, engellerin olmadığı durumlarda kolayca akabileceği dolum yeteneğinin değerlendirilmesi için yapılan hızlı bir testtir. Tipik Abrams konisi tabanı temizledikten ve nemlendirdikten sonra, dikey olarak yerleştirilmeli ve aygıt Şekil 3.8'de gösterildiği gibi sıkıca tutulmalıdır. Koni, tahribatsız bir kepçe ile doldurulmalı ve kabartma betonu çıkarmak için çekilmelidir. Koni dikey olarak yukarı kaldırıldıktan sonra betonun serbestçe akmasına izin verilmelidir. Beton dolum kabiliyeti değerlendirmesi için son akış çapı ve 500 mm akışa ulaşma süresi ölçülmelidir. 3-7 saniye arasından daha kısa süre, daha iyi bir akış yeteneği için iyi bir gösterge anlamına gelmektedir. Yayılma çapı değeri ne kadar yüksekse, kalıbı kendi ağırlığı altında doldurma kabiliyeti o kadar büyüktür. KYB için en az 650 mm'lik bir değer gereklidir. Kaba agreganın çoğu merkezde kalırsa, bu, beton akışının ciddi bir ayrışmaya sahip

olacağı anlamına gelmektedir. KYB için tipik akış 650-800 mm arasındadır. 16 mm'den az maksimum agrega büyüklüğü ( $d_{max}$ ) kullanan çok sıkışık donatı için daha yüksek değerler (760-850 mm) gereklidir (EFNARC, 2002). Şekil 3.9, araştırma laboratuvarında yapılan çökme – yayılma çapı testinin ayrıntılarını göstermektedir.



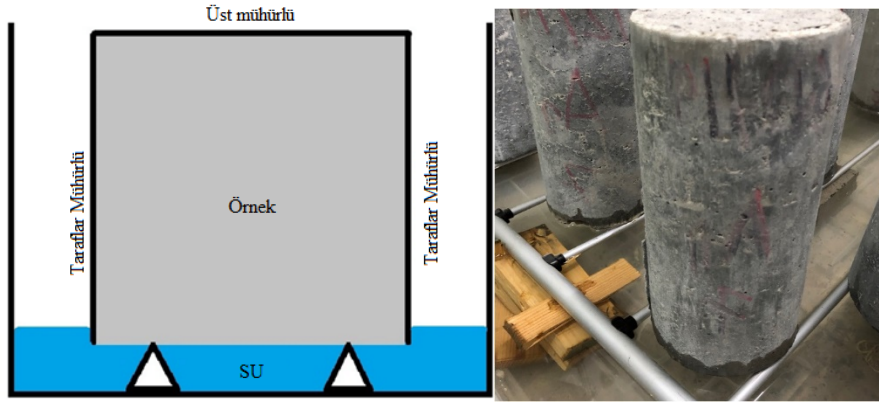
Şekil 3.8. Yayılma çapı testinin uygulaması



Şekil 3.9. Araştırma laboratuvarında yapılan yayılma çapı testi

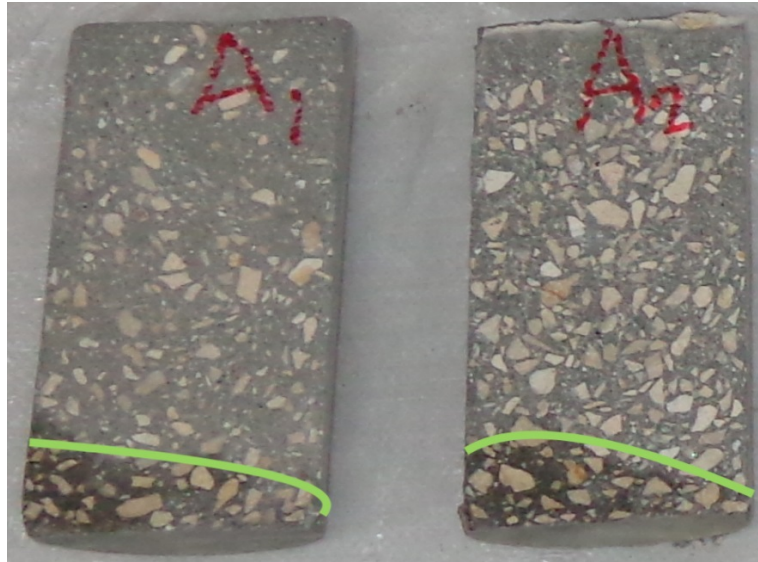
### 3.3.2. Kılcal Su Emme Deneyi

Geçirgenlik veya su emme, numunede kılcal basıncın yükselmesi nedeniyle suyun gözenek sisteminden girmesine izin veren zamanın bir fonksiyonu olarak beton tarafından su emme oranını tanımlar. ASTM C1585-04 (2004) standardına göre, kılcal su emme, numunenin bir yüzünün suya maruz kaldığı zamana göre emiliminin bir sonucu olarak kütle artışının bir fonksiyonudur. Maruz kalacak yüzün hazırlanmasından ve numunenin başlangıç kütlelerinin ölçülmesinden sonra, diğer tüm yüzlere bir parafin uygulanır. Bu önlem, numuneye yukarı doğru tek yönlü su akışı sağlamak için yapılmaktadır. Numunenin ilk kütlelerinin ölçülmesinden sonra, suyun test edilen yüzeye eşit şekilde maruz kalmasını sağlamak için su kabının tabanına bir cam elyaf türü filtre malzemesi yerleştirilmektedir. Numune kütleleri, ASTM standardına göre farklı aralıklarla sudan çıkarıldıktan sonra sonuçlar kaydedilmiştir. Su seviyesi, deney boyunca her zaman sabit kalmak zorundadır. İyi ve kaliteli beton, gözenek alanlarının sayısındaki azalmadan kaynaklanan düşük kılcal su emme geçirgenlik değeri ile temsil edilir. Numune tarafından emilen su, test numunesinin kesit alanının ürünü ve suyun yoğunluğuna bölünen kütle değişikliği olarak hesaplanmaktadır (Ho ve Chirgwin, 1996). Beton yüzeyinin su emilimi, karışımın oranına ve kalitesine ve kullanılan kimyasal katkılarına da bağlıdır. Bu çalışmada geçirgenlik testi tüm deneme karışımları (A1 ile A12 olarak temsil edilen 12 silindir) ile yapılmış ve örnekler alt yüzeyleri 1 cm suya daldırılmış ve Şekil 3.10'de gösterildiği gibi birkaç günlük kürlenme için gözlemlenmiştir. Örnek sudan çıkarıldıktan sonra 110°C sıcaklıkta etüvde kurutulmuş ve çevre yüzeylerdeki akış emici olmayan malzeme kullanılarak kapatılmıştır. 24 saatlik süre zarfında, her 30 dakikada bir her bir numune 0,1 g ağırlığındaki terazide tartılarak emilen su miktarı kayda alınmıştır. Geçirgenlik, gözenekli malzemenin kılcallık yoluyla su emme ve iletme eğilimini gösteren bir özelliktir.



Şekil 3.10. Silindirik örneklerle yapılan geçirgenlik testi

Silindirlerin 24 saat boyunca su kabında bekletilmesiyle bu örneklerin su emme oranları belirtilen zaman içinde ölçülmüştür. Gözenek boşluklarından numunelere suyun girmesi, geçirgenlik olduğu anlamına gelmektedir ve Şekil 3.11, araştırma laboratuvarında test edilen bir örneği göstermektedir. Diğer taraftan ASTM C642-13, (2013) sertleştirilmiş bir betonun kuru bir örneği tarafından emilebilecek maksimum su miktarını tahmin etmek için kullanılmıştır ve bu vasıtaıyla yoğunluk, emilim yüzdesi ve boşluk oranı yüzdesinin bir ölçümü de sağlanmıştır.



Şekil 3.7. Kılcal su emme deneyi

### 3.3.3. Yoğunluk Testi

ASTM C 642-13 (2013) 'e göre, fırında kurutulmuş numunenin havadaki kütlesi, fırın kurutma döngülerinden en düşük değeri aldıktan sonra gram cinsinden ölçülmelidir. Bu safhada kütle A olarak adlandırılır. Beton numunenin doymuş kütlesi (B), 48 saat boyunca suya batırıldıktan sonra tartılır ve yüzey kurutulur. Kütle (C), daldırma ve kaynama sonrasında havadaki kuru yüzey numunesinin kütlesidir. Numune suya batırıldıktan ve kaynama noktasına getirildikten sonra, her numune için görünen kütle (D) ölçülmelidir. Örnek elektronik terazinin taban kancasından asılmak suretiyle su kovasının içine daldırılarak işlem gerçekleştirilmiştir.

$$\text{Kuru Yoğunluk } (g_1) = [A / (C-D)] \rho \quad (3.1)$$

$$\text{Yoğunluk } (g_2) = [A / (A-D)] \rho \quad (3.2)$$

$$\text{Boşluk Hacmi (\%)} = (g_2 - g_1) / g_2 \times 100 \quad \text{veya} \quad (C-A) / (C-D) \times 100 \quad (3.3)$$

Yoğunluk ve dayanım arasındaki ilişki betonun mekanik ve fiziksel özelliklerini etkilemektedir. Daha yoğun bir beton daha az boşluk ve gözeneklilik, düşük geçirgenlik ve daha yüksek mukavemet anlamına gelmektedir. Az sayıdaki boşluk, beton numunenin su için daha az geçirgen olmasını ve çözünür elemanlara daha az su emilmesini sağlamaktadır. Bu, beton numunenin daha iyi bir dayanıklılığa sahip olması anlamına gelmektedir (Neville, 2005).

### 3.3.4. Su Emme Testi

Su emme testi silindir numune (100mm x 50mm) kullanılarak yapılmıştır. Örnek iki günden az olmamak üzere döküm ve kürlenmeden sonra ve sabit bir kütle elde edilene kadar 110°C'lik bir sıcaklıkta 24 saat boyunca fırın üzerinde sistematik olarak kurutulmuştur. Ölçümler daha sonra W1 olarak alınmıştır. Örnek daha sonra suya daldırılmış ve en az üç buçuk saat kaynatılmıştır. Kurutulduktan sonra, silindirlerin W2 ağırlığı alınmıştır. Hesaplama aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir;

$$\text{Su emme oranı (\%)} = [(W2 - W1) / W1] \times 100 \quad (3.4)$$



W1 = Silindirlerin kuru fırın ağırlığı, gr,

W2 = Silindirlerin gram cinsinden ıslak ağırlığı, gr.

### 3.3.5. Basınç Dayanımı Testi

Basınç dayanımı bir küp veya silindir beton numunesini kırmak için gereken basınçtır. Dökümden sonra, numuneler gerekli test süresi ve tarihine kadar kür havuzunda tutulur ve kürlerini tamamlamaları beklenir. Kür sürelerini tamamlayan örnekler, Şekil 3.12'de gösterildiği gibi bir deney presinde yüke tabi tutularak testi edilmiştir. Basınç testleri, belirtilen test süresi ve tarihinde her karışımdan seçilen üç numuneden oluşan partiler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Seçilen küpler, dökümden 3, 7 ve 28 gün sonra test edilmişlerdir. Küplerin basınç dayanımı,  $C=F/A$  olarak hesaplanmıştır; burada C, (MPa) basınç dayanımını, F, Newton (N) 'deki kırılma noktasında örnek üzerinde uygulanan toplam yükü ve A, enine kesiti belirtmektedir. Teste tabi tutulan numunelerin alanı (mm<sup>2</sup>) cinsinden verilmiştir.



Şekil 3.8. Basınç testi altındaki beton küp

### 3.3.6. Yangın Dayanım Testi

Bu testin amacı dökülmüş numunelerin basınç dayanımının bir ısıya maruz kaldığında nasıl etkilendiğini anlamaktır. Başka bir deyişle, beton numunelerin yangına ne kadar direnç gösterdiği ve bunun beton basınç dayanımını nasıl etkilediğini öğrenmek için bu test uygulanmaktadır. On iki farklı grubu temsil edecek şekilde seçilen numuneler fırına koyulmaktadır. Örnekler, 300°C'lik artışlarla sırasıyla 300°C, 600°C ve 900°C'nin sıcaklıklarda ısıtılmıştır. Örnekler fırından çıkarıldıktan sonra ve testten

önce ortam sıcaklığında gözlenip test edilmiştir (Husem vd. 2006). Daha sonra numunelerin renk ve çatlaklarında değişiklikler olup olmadığı analiz edilmiştir. Şekil 3.13, sıkıştırma yükü altında başarısız olan ısı direnci örneklerini göstermektedir.



Şekil 3.9. Yangın dayanımı sonrası numune kırımı

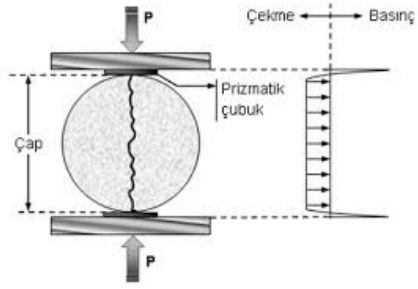
### 3.3.7. Yarmada Çekme Dayanımı Testi

Çekme dayanımı (ayrıca nihai çekme gerilimi olarak da bilinir), bir pres makinesi kullanarak ve yükü numunenin uzunluğu boyunca uygulayarak beton numunenin çekme dayanımının ölçülmesi sürecidir. Test edilecek silindirik numuneler, 3, 7 ve 28 gün boyunca sertleştirilmektedir. Test edilecek silindiriklerin ebadı 15 mm çapında ve 300 mm yüksekliğindedir. Sertleştikten sonra numunenin yüzeyindeki su silinmeli ve eksenel yerlerini doğrulamak için çap çizgileri işaretlenmelidir (ASTM C 496). Yapılan testte, yük numunenin iki zıt kenarı boyunca uygulanmıştır. Düzgün bir yük dağılımı için, numune ile sıkıştırma yükünü uygulayan çelik plakalar arasında, numunenin üstüne ve altına olmak üzere iki adet kontrplak şerit yerleştirilmiştir.

Çekme Dayanımı testi aşağıdaki formül esasında yapılmıştır;

$$\text{Çekme Dayanımı Gücü} = \frac{2P}{\pi DL} \quad (3.5)$$

P, N cinsinden uygulanan maksimum yükü, D mm olarak numune çapını L ise yine mm cinsinden numune boyunu belirtmektedir. Şekil 3.14 teste tabi tutulan silindirik numuneyi göstermektedir.



Şekil 3.10. Çekme dayanımı testi



## 4. TARTIŞMA VE BULGULAR

### 4.1. Fiziksel Özelliklerin Analizi

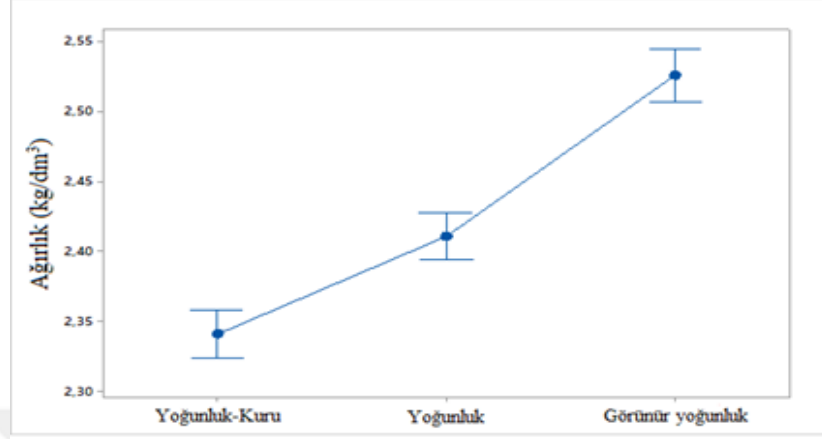
Döküm karışımları için ölçülen fiziksel özellikler; yayılma çapı, kütle yoğunluğu, su emme oranı, geçirgenlik ve gözeneklilik değerleridir. Karışımlarda kullanılan dolgu maddesi farklı oranlarda uçucu kül ve mermer tozunun bir kombinasyonu olarak kullanılmıştır. Farklı oranlarda kullanılan uçucu kül ve mermer tozunun KYB'nun bazı fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. KYB betonlardaki bazı fiziksel özellikler

Kod	Yayılma Çapı (mm)	Geçirgenlik (mm/dk.)	Kuru Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Boşluk oranı (%)	Su emme oranı (%)
FA0MP0	800	0,068	2,29	2,50	8,20	3,3
FA0MP5	810	0,051	2,38	2,57	7,56	3,0
FA0MP10	870	0,045	2,33	2,52	7,59	3,1
FA2.5MP0	800	0,056	2,39	2,55	6,24	2,5
FA2.5MP5	840	0,058	2,34	2,56	8,40	3,2
A2.5MP10	840	0,065	2,34	2,53	7,25	3,0
FA5MP0	850	0,045	2,34	2,51	6,73	2,8
FA5MP5	820	0,068	2,36	2,55	7,42	3,2
FA5MP10	830	0,049	2,33	2,46	5,16	2,7
FA7.5MP0	840	0,038	2,34	2,53	7,46	2,9
FA7.5MP5	830	0,057	2,34	2,52	7,12	3,0
FA7.5MP10	850	0,031	2,31	2,51	8,00	3,1

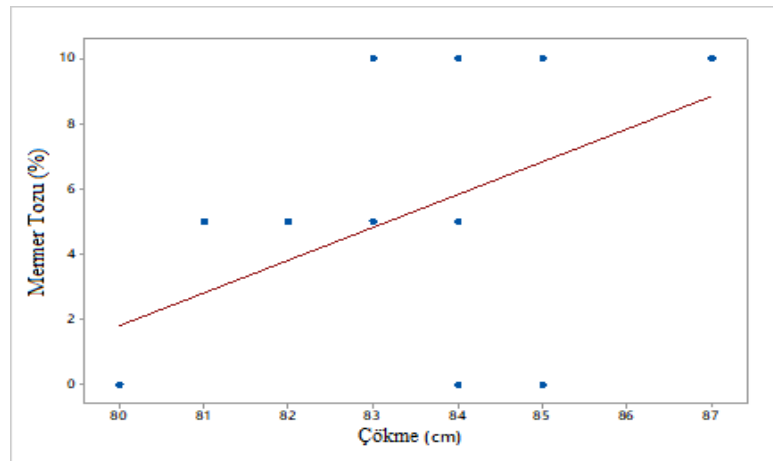
Kendiliğinden yerleşen beton için yapılan test sonuçları, homojen, dayanıklı ve uygulanabilir bir beton karışımını ortaya çıkarmada önemli bir parametredir. Doldurma-yerleşme testi sonuçları da bunu açıkça göstermiştir. Taze betonun yayılma testi sonuçları, iyi bir işlenebilirlik ve doldurma kabiliyetinin bir göstergesidir. Tablo 4.1 incelendiğinde; kullanılan maksimum agrega boyutu 15 mm olmakla birlikte, yayılma testi sonucu değeri 800 mm ile 870 mm arasında, kuru birim hacim ağırlık 2,29 - 2,39 kg/dm<sup>3</sup> arasında ve birim hacim ağırlıkta 2,46 kg/dm<sup>3</sup> ile 2,57 kg/dm<sup>3</sup>

arasında değişim göstermiştir. Su emme oranı ise %3'ler seviyelerinde olduğu belirlenmiştir.



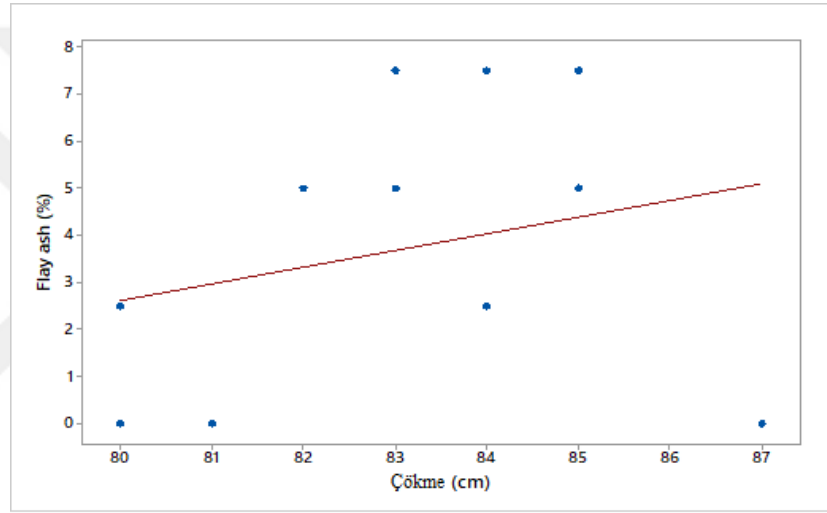
Şekil 4.1. KYB numunelerinde birim hacim ağırlık değişimleri

Yayıma tablası testi sırasında eğer kaba agreganın çoğu merkezde kalıyorsa bu, beton akışının ciddi bir segregasyona sahip olacağı anlamına gelmektedir. Agreganın merkezinden akış halkasının dış halkasına kolayca aktığından ve merkezde kalmadığından karışımında ayrışma işareti görülmemiştir. Birim hacim ağırlık sonuçları incelendiğinde (Şekil 4.1), ağırlıklı genel değişimin kuru birim hacim ağırlıkta  $2,34 \text{ kg/m}^3$ , birim hacim ağırlığın  $2,41 \text{ kg/m}^3$  ve özgül ağırlıkların ise  $2,54 \text{ kg/m}^3$  ortalamalarında olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.2. Mermer tozunun yayılma çapına etkisi

İstatistiksel ortalamalara bakıldığında sadece MP ilavesinin, MP oranı arttıkça pozitif yönde bir eğim ile yayılmayı artıran doğrusal bir artış gösterdiği belirlenmiştir. Şekil 4.2 incelendiğinde, mermer tozunun bir dolgu maddesi olarak kullanılmasının artan toz oranına bağlı olarak bir miktar yayılma oranında artışa neden olduğu ve bu durumun KYB üzerindeki etkisine ilişkin literatür verileri ile de paralellik gösterdiği görülmüştür. Ayrıca ince toz malzemelerin KYB'nun akışkanlık üzerindeki etkisi, yayılma çapı değerinin 800 mm'den 870 mm'ye varan değerlerde yükselme olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca uçucu kül oranının %0'dan yaklaşık %10'a varan değişimi ile elde edilen sonuçlar Şekil 4.3'de verilmiştir.

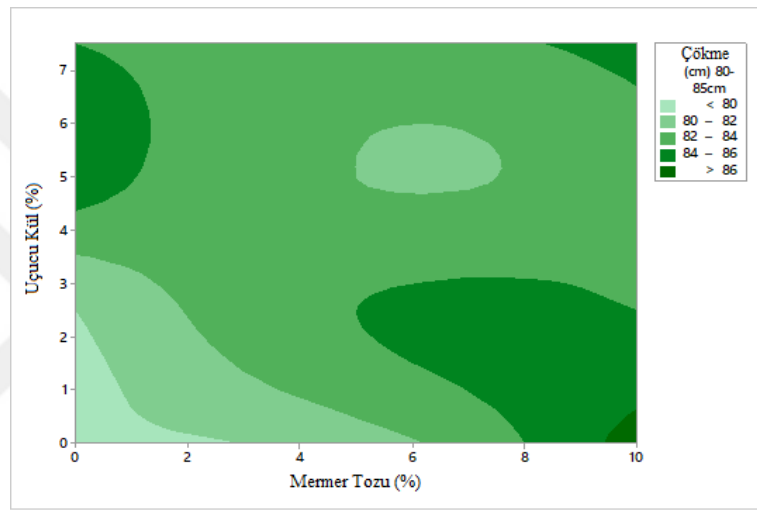


Şekil 4.3. Uçucu külün yayılma çapına etkisi

Şekil 4.3 incelendiğinde istatistiki ortalamalar bakımından uçucu kül katkısı ile üretilen KYB'ler maksimum yayılmanın 850 mm çapa kadar arttığı belirlenmiştir. Bu durumda mermer tozu bakımından uçucu kül katkısının yayılmaya çapına etkisi daha fazla olduğu sonucuna varılabilir.

Uçucu kül oranının arttırılarak %2.5'e sabitlendiği, MP'nin değeri azaltıldığında ise, yayılma çapı ve diğer fiziksel özelliklerde küçük iyileşmelerin fark edildiği gözlemlenmiştir. Yayılma çapı değerleri, Tablo 4.1'de belirtildiği gibi 800 mm'den 840 mm'ye çıkmıştır. Uçucu kül yüzdesi %5'e yükselirken, neredeyse hiçbir önemli değişiklik olmazken, karışımdaki uçucu kül yüzdesi %7.5'e ve mermer tozu sırasıyla %0'dan %5'e ve %10'a yükseltildiğinde, yayılma çapı derecesini ifade eden akış değeri yükselmektedir. Bu sonuç, kullanılan çimentoya alternatif olarak kullanılan dolgu

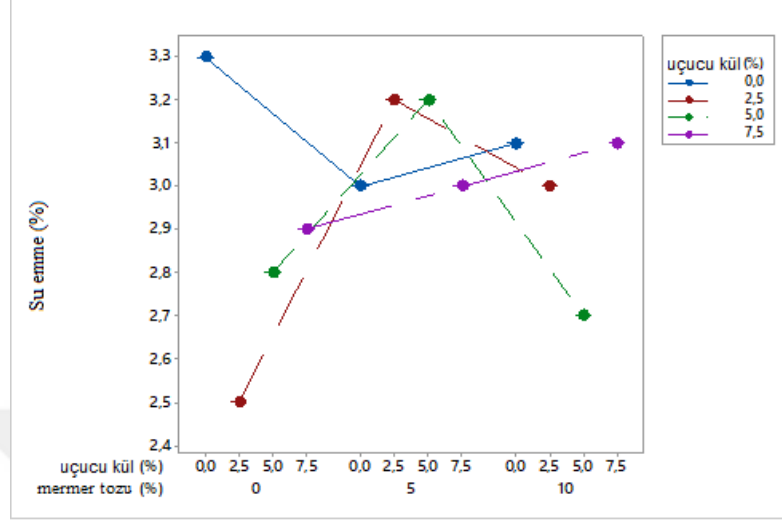
malzemelerinin karışıma eklenmesinden kaynaklanmıştır. Ayrıca EFNARC, (2002)'de de ifade edilen KYB için en az 650 mm'lik bir değerin gerekli olduğu bilinmektedir. Çok sıkışık donatı için daha yüksek değerler de (760-850 mm) gerekebilmektedir (EFNARC, 2002). MP ve FA katkısının yayılma çapına etkisi değerlendirildiğinde (Şekil 4.4), MP oranının %6 üzerinde kullanımında FA oranının %3'ü geçmemesi şartıyla bu çalışmada elde edilen yüksek yayılma çapı değerlerinin elde edilebileceği aksi takdirde ortalama oran kullanımlarında yayılma çapı değerinin 82-84 cm arasında olacağı öngörülmektedir.



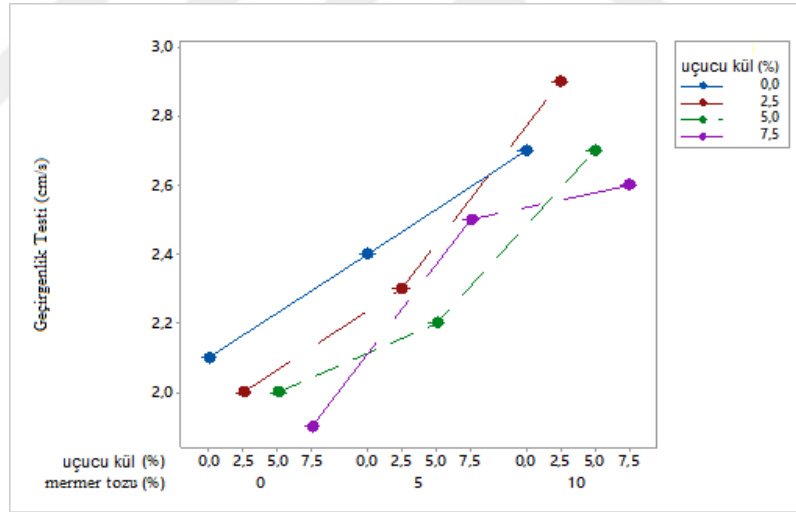
Şekil 4.4. FA ve MP'nin yayılma çapına etkisi.

KYB karışımlarında su emme oranına katkıların etkisi incelendiğinde (Şekil 4.5), UK ve MP tozu değişimlerinin bir fonksiyonu olarak su emme yüzdesindeki değişim artan oranlara bağlı olarak değişkenlikler göstermektedir. Sonuçlardan da anlaşıldığı üzere, su emme oranının en düşük değerinin, düşük mermer tozu ve düşük miktarda uçucu kül kullanımı sonucunda oluştuğu, en yüksek emilim değerinin ise uçucu külün, mermer tozu kullanılmadan %2.5 ve %5 miktarında kullanıldığı zaman elde edilmiştir. Genel olarak, uçucu kül ve mermer tozu ilavesi, kontrol karışımına kıyasla su emme oranını arttırmaktadır. MP kullanılmadan FA kullanılarak üretilen örneklerde su emme oranının en yüksek değeri %0 MP ve FA değerinde belirlenirken, artan FA değerine bağlı olarak bu oran bir miktar artış meydana getirmiştir. Bu durum %10 MP kullanımında da benzerlik göstermesine rağmen, %5 MP kullanımında FA kullanımındaki değişme miktarı %0 oranından fazla su emme oranının artış meydana

gelmesine sebep olduğu belirlenmiştir. Bu durum ideal oranın aşıldığı ve toplam ince malzeme miktarındaki değişim ile açıklanabilir.



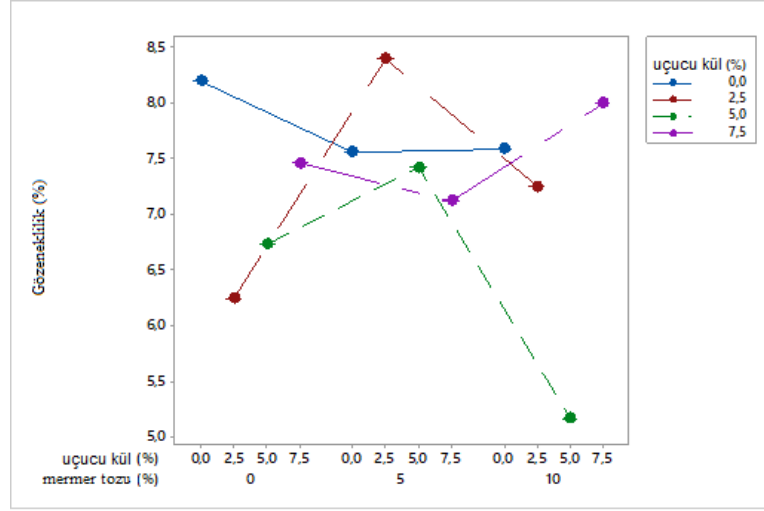
Şekil 4.5. Su emme oranının MP ve FA oranına bağlı değişimi



Şekil 4.6. FA ve MP varyasyonlarına göre geçirgenlik sonuçları

Şekil 4.6' incelendiğinde geçirgenlik sonuçlarının, FA oranına bağlı olarak (MP katkısız) su geçirgenlik değerinin azaldığı görülmüştür. MP oranı % 5 oranında kullanıldığında su geçirgenlik değeri artmasına rağmen, bu artış aynı MP oranında artan FA oranı ile ters orantılı olarak olumlu bir azalış olarak gerçekleşmiştir. Ancak %10 MP kullanımında su emme oranında karşılaşılan bu azalışta önce artış sonra artan FA oranına bağlı olarak azalış olarak gerçekleşmiştir.





Şekil 4.7. Gözenekliliğin MP ve FA oranına göre değişimi

FA ve MP kombinasyonunun gözeneklilik üzerine etkisi Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Geçirgenlik, gözenekli maddelerin kılcallık yoluyla su emme ve iletme eğilimini gösteren bir özelliktir. Gözenek boşluklarından numunelere suyun girmesi geçirgenlik olarak bilinmektedir. Geçirgenlik, betonun yüzey yapısının kalitesine duyarlıdır (Ho ve Chirgwin, 1996). Bu çalışmada gözeneklilik etkisinin sadece FA kullanıldığında artan orana göre artış olmasına rağmen hiç MP ve FA kullanılmayan gruba göre daha düşük gözenek yapısı oluşmasına neden olmuştur. Ancak MP'deki artışın gözeneklilikde fazla bir değişime neden olmayıp, beraber kullanılan FA oranındaki artışa bağlı olarak genel anlamda gözenek miktarında azalışa neden olmuş ve bu ideal azalışa ait oranın %5 FA kullanarak gerçekleştiği görülmüştür. Kısaca açıklamak gerekirse, en düşük gözeneklilik değeri, kontrol karışımına kıyasla karışıma eklenen yüksek miktarda uçucu kül ve mermer tozunun bir sonucudur. En yüksek gözeneklilik değeri ise her iki malzemeden eşit ve az miktarda karışıma eklenmesiyle gerçekleşmiştir.

## 4.2. Mekanik Özelliklerin Analizi

### 4.2.1. Basınç Dayanımı Sonuçları

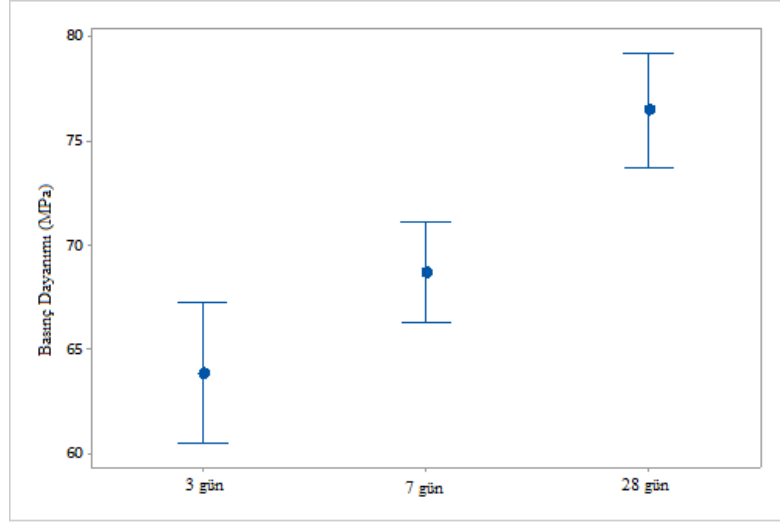
Sertleşmiş betonun mekanik özelliklerini incelemek amacıyla bir dizi test gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı, yangın dayanımı ve yarmada çekme dayanımı bu karışımların bileşiminin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır ve bu testler

bileşim kompozisyonunun işlevidir. Tablo 4.2, tüm karışımlar için farklı kürlenme zamanlarında gerçekleştirilmiş basınç dayanımı testi sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 4.2. *Basınç dayanım test sonuçları*

<b>Karışım No.</b>	<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>		
	<b>3. gün</b>	<b>7. gün</b>	<b>28. gün</b>
FA0MP0	68,19	70,06	79,32
FA0MP5	67,14	75,81	79,53
FA0MP10	67,31	71,63	72,17
FA2.5MP0	69,78	69,51	78,79
FA2.5MP5	66,89	71,89	77,48
FA2.5MP10	54,68	66,69	71,66
FA5MP0	70,82	71,98	79,19
FA5MP5	61,69	65,46	75,97
FA5MP10	57,82	63,32	71,17
FA7.5MP0	64,87	67,64	80,61
FA7.5MP5	58,24	66,27	81,88
FA7.5MP10	59,56	63,67	71,44

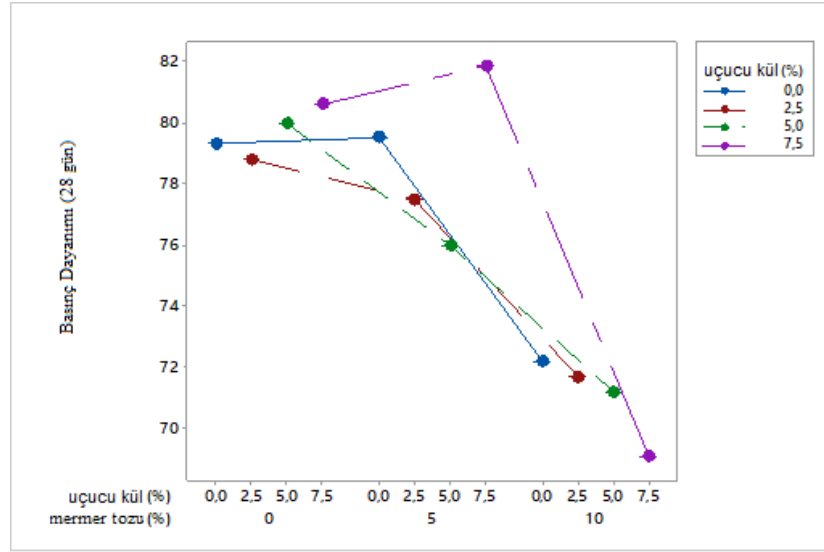
Basınç dayanımı testinden elde edilen sonuçları incelendiğinde, 82 MPa'a varan dayanımlara ulaşıldığı görülmüştür. İstatistiki olarak ortalamalara göre zamansal değişim Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8. Testin her aşamasına göre basınç dayanımı derecesi dağılımı.

Şekil 4.8 incelendiğinde ortalamalar açısından %18 e varan oranda dayanımlarda artış olduğu belirlenmiştir. Basınç dayanımı değerlerinde istatistiksel açıdan 64 MPa dayanımlar elde edilirken, bu durum 7 günlük ortalamalar açısından yaklaşık 70 MPa ve 28 günlük dayanımlarında 76 MPa dayanımlara ulaştığı görülmüştür. Dayanımlar açısından endüstri atığı olarak bu çalışmada kullanılan MP ve FA katkısının dayanımlarda olumsuz bir katkısının olmadığı, aksine belirli oranlarda kullanılması ile azalan çimento oranı sayesinde çevreye olumlu bir katkısının olduğu da görülmüştür.

Uçucu külün karışımlardaki katkısı araştırıldığında (Şekil 4.9), artan MP oranlarında, FA katkısındaki artışa rağmen basınç dayanımı değerlerindeki değişim birbirine yakın olmuştur. Özellikle karışımdaki FA yüzdesinin maksimum seviyede olduğu ve MP'nin %5 civarında ya da daha az kullanıldığı zaman, basınç dayanımlarında yüksek sonuçlar verdiği görülmüştür. Diğer taraftan, MP'nun FA katkısından daha yüksek olduğunda, basınç dayanımı değerinin daha düşük olduğu belirlenmiştir. FA katkısının basınç dayanımının artışına önemli bir katkısı vardır ve ayrıca mermer tozu ise karışımın dolun kabiliyetini ve akışkanlığını ve mukavemeti arttırmaktadır.



Şekil 4.9. FA ve MP katkısının 28 günlük basınç dayanımına etkisi

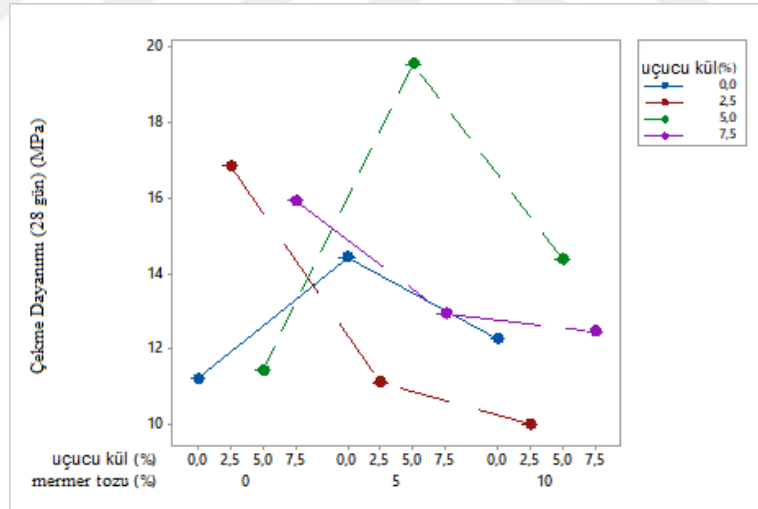
Hem MP hem de FA bileşenlerinin karıştırılması, basınç dayanımı için elde edilen yüksek sonuca katkıda bulunmuştur. FA7.5 MP5 karışımı ve FA5 MP5 karışımı ile en iyi basınç dayanımı değeri elde edilmiştir. Mermer tozu yüzdesi uçucu kül yüzdesine göre yükseldikçe ise basınç dayanımı FA5 MP10 ve FA7.5 MP10 karışımlarında da görüldüğü gibi azalmıştır.

#### 4.2.2. Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçları

Karışımlardan elde edilen yarmada çekme dayanımı sonuçları Tablo 4.3’de verilmiştir. Tablo 4.3 incelendiğinde 20 MPa varan çekme dayanımı sonuçları elde edilmiştir. Ancak karışımlara ilave edilen MP ve FA katkısına bağlı olarak çekme dayanımlarındaki artışlar değişkenlik göstermiştir. Çalışmaya konu olan ve 28. gün içinde test edilen tüm numuneler için yarmada çekme dayanımı sonuçları, Şekil 4.10’da gösterilmektedir. 28 günde en yüksek yarmada çekme dayanımı değeri, çimentonun %5 uçucu kül ve %5 mermer tozu ile değiştirildiği karışımda gözlemlenmiştir. En düşük değer ise çimentonun %2,5 uçucu kül ve %10 mermer tozu ile değiştirilerek hazırlanmış karışım örneğinde görülmüştür. KYB’de mermer tozu katkısı miktarını arttırmak yarmada çekme dayanımını artıracaktır. Mermer tozu içeriğindeki artışla birlikte, ince malzemelerin spesifik alanı artar, yüksek kılcallık katsayısı elde edilir ve bu sıkıştırma ve gerilme mukavemeti azaltır (Haddadou vd., 2015).

Tablo 4.3. Yarmada çekme dayanımı sonuçları

Grup No.	Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçları (MPa)		
	3. gün	7. gün	28. gün
FA0MP0	9,12	11,77	11,20
FA0MP5	10,23	7,50	14,42
FA0MP10	10,68	9,87	12,26
FA2.5MP0	15,33	14,00	16,85
FA2.5MP5	7,55	12,69	11,10
FA2.5MP10	11,66	8,79	10,00
FA5MP0	11,66	14,51	11,43
FA5MP5	11,59	8,62	19,56
FA5MP10	9,27	10,64	14,37
FA7.5MP0	12,05	12,75	15,93
FA7.5MP5	11,08	13,10	12,93
FA7.5MP10	7,19	9,88	12,46



Şekil 4.10. Yarmada çekme dayanımı sonuçlarının FA'ya göre değişimi

Normal beton, çekme dayanımı bakımından zayıftır ve uçucu kül (FA) ve mermer tozunun (MP) çimento yerine karışıma ilavesiyle bu bağlamda bir miktar iyileşme sağlanmıştır. Bu işlem, poroziteyi en aza indirmekte ve matris içindeki boşlukları azaltmaktadır. Bilindiği gibi bu kusur veya boşluklar, gerilim yükü devam ettikçe ve daha sonra bir açıklık çatlak meydana gelmesine sebep olmaktadır. Her iki tozun da

bahsedilen boşluklar için dolgu maddesi olarak kullanılması, yarmada çekme dayanımı değerlerinde artış sağlamıştır.

#### 4.2.3. Yangına Dayanıklılık Sonuçları

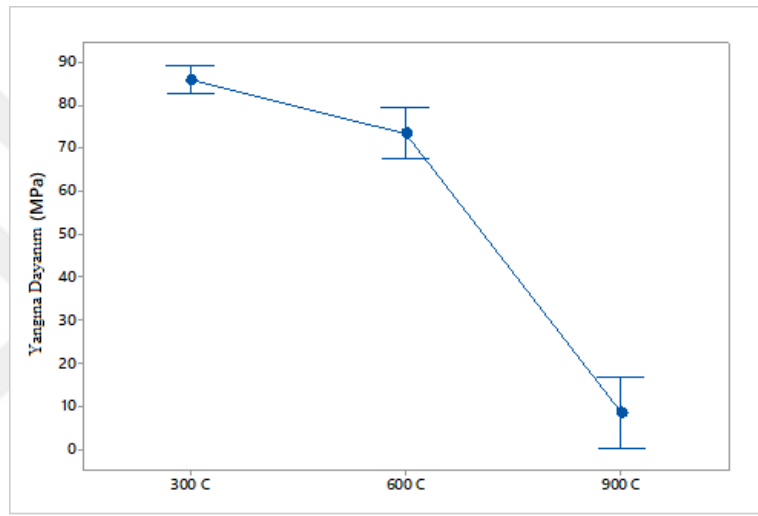
Beton örneği 28 günlük basınç dayanımından önce fırında ısıtılmış ve sonrasında işleme tabi tutulmuştur. Tüm örnekleri kapsayan basınç dayanımı testi sonuçları aşağıdaki Tablo 4.4.'de sunulmuştur.

Tablo 4.4. Yangın dayanımı sonuçları

Grup No.	300°C	600°C	900°C
	Yangın dayanımı (MPa)	Yangın dayanımı (MPa)	Yangın dayanımı (MPa)
FA0/MP0	86,97	65,42	0,0
FA0/MP5	87,47	83,57	0,0
FA0/MP10	88,76	60,00	0,0
FA2.5/MP0	90,05	81,24	27,34
FA2.5/MP5	83,69	89,30	0,0
FA2.5/MP10	76,83	64,23	0,0
FA5/MP0	88,55	76,75	0,0
FA5/MP5	77,56	65,90	0,0
FA5/MP10	90,71	62,33	0,0
FA7.5/MP0	80,52	78,62	28,05
FA7.5/MP5	91,12	78,41	29,29
FA7.5/MP10	88,59	75,91	19,04

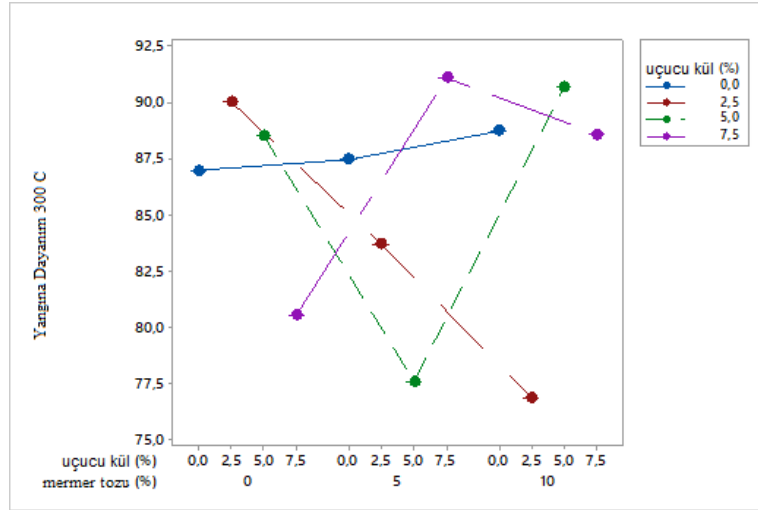
Yangın dayanımı değerleri incelendiğinde (Tablo 4.3), 300°C, 600°C ve 900°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin sıcaklığa bağlı olarak dayanımlarında genel olarak dayanım kaybı yaşadıkları görülmüştür. Ancak 300°C de tüm gruplarda MP ve FA oranına göre değişmekle birlikte dayanımda artışlar tespit edilmiştir. Sıcaklığın 300°C den 600°C'ye çıkarılması durumunda ilk grupta %25'varan dayanım kaybı olmasına rağmen karışıma ilave edilen MP ve FA'nın olumlu etkisi sonucu dayanımlardaki değişimin miktarı çok az miktarda olduğu görülmüştür. Ayrıca

istatistiki ortalamaların değişimini veren Şekil 4.11 incelendiğinde ise özellikle dayanımların 900°C de çok düştüğü görülmüştür. Bu değişimde 900°C sıcaklık etkisine maruz kalan grupların çoğunda dayanımın ölçülememesi etkili olmuştur. Kısaca mukavemet düşüşünün dönüm noktası ise 600°C civarındadır, bundan sonra uygulanan ısı çimento tabanını parçalamakta ve küp numunesinin herhangi bir yüklemeye dayanma kabiliyetinin kalmamasına neden olmaktadır. Bu örneğin dayanım başarısızlığı (parçalanması) 900°C sıcaklığa ulaşıldığında açıkça görülmüştür.



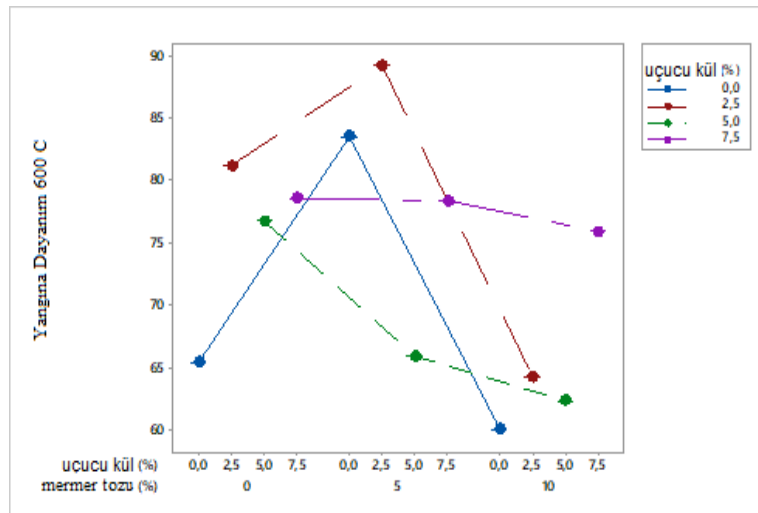
Şekil 4.11. Basınç dayanım sonuçlarının değişen ısı değerlerine göre dağılımı

Yangın dayanımı sonuçları, doğası ve ısıya dirençli bileşimi nedeniyle uçucu kül katkısı açısından analiz edilmiştir. Şekil 4.12'de gösterildiği gibi 300°C'de test edilen örnekler için uçucu kül (FA) miktarı arttıkça yangın dayanımı da artış göstermiştir.



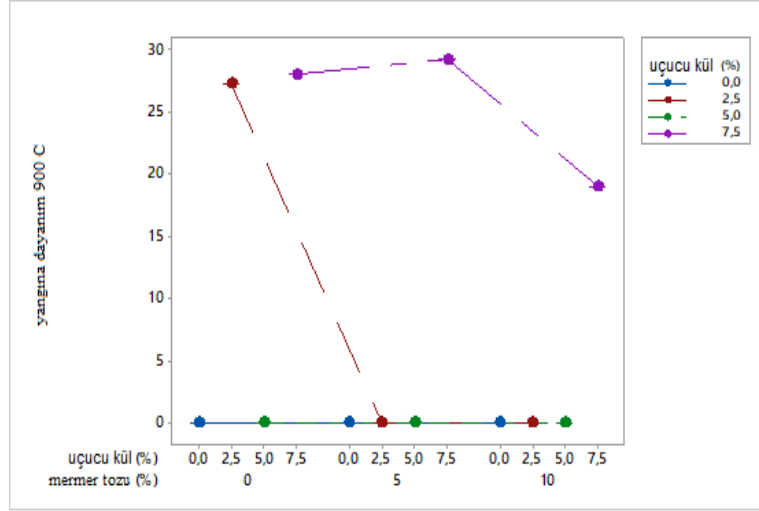
Şekil 4.12. 300°C’de FA ve MP değişimlerinin basınç dayanımına etkisi

Kontrol edilen karışımın sıfır uçucu kül oranında mermer tozu ilave edildiği zaman karşılaştırılmasıyla mukavemet değerinin arttığı görülmüştür. Ancak karışımlardaki mermer tozu (MP) arttıkça, dayanım sonuçlarındaki dayanım değerleri düşüş göstermektedir. FA5MP5 ve FA2.5MP10 karışımları 300°C’de ısıtıldığında ve test edildiğinde en düşük dayanım değerlerini göstermiştir. Daha yüksek miktarda uçucu kül içeren karışımlar, yüksek bir basınç dayanımı göstermiştir. Elde edilen en iyi sonucun FA7.5 MP5 karışımında olduğu görülmüştür.



Şekil 4.13. 600°C’de FA ve MP değişimlerinin basınç dayanımına etkisi





Şekil 4.14. 900°C'de FA ve MP değişimlerinin basınç dayanımına etkisi

Sıcaklık derecesi arttıkça (Şekil 4.13, Şekil 4.14) 600°C'de ölçülen yangına dayanım değerinin düşüş eğilimi gösterdiği görülmektedir. Şekil 4.13, 600°C'de yangına dayanım gösteren numuneler için, uçucu kül ve mermer tozu miktarı değişimine bağlı basınç dayanımı değişimini göstermektedir. Uçucu kül (FA) ve mermer tozu (MP) kullanılmayan kontrol karışımı düşük dayanım değerleri göstermektedir. Mermer tozu %5 ve altındaki miktarda kullanıldığı zaman sıkıştırma kuvvetinin artma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Bu miktardan sonra ise yüzdedeki değişimden bağımsız olarak, mermer tozunun dayanım gücünde azalma meydana getirdiği görülmektedir.

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 incelendiğinde mermer tozunun %5 tutulduğu ve uçucu külün değiştiği durumda dayanımdaki minimal değişimler ve yine 300°C ve 600°C'deki değişimler gösterilmektedir. Mermer tozunun %10 seviyesine yükseltilmesi halinde değişimlerin genişlediği görülmüştür.

KYB gruplarında %7.5 oranında uçucu kül (FA) içeren numunelerde basınç dayanımında artış görülmektedir ki, bu mermer tozu oranının yükseltilmesinde de aynıdır. Bu durum mermer tozunun ısıya dayanıklı yapısından kaynaklanmaktadır. Genellikle bütün numuneler 300°C ila 600°C arasında ısıtıldığında yaklaşık %30 oranında basınç dayanımı kaybetmektedirler ve 600°C'nin üstünde hemen hemen hiç basınç toleransı kalmamaktadır. İlk aşamadaki dayanıklılık artışının sıcaklık artışı 600°C'ye çıktığında azaldığı açıkça görülmektedir. Birçok araştırmacı beton tepkimesini yüksek sıcaklıkta test etmiş ve sıcaklığın başlangıç aşamasında (400°C'ye

kadar) dayanımda bir artış olduğunu ve daha sonra düşüş eğilimi olduğunu gözlemlemiştir (Phan vd., 2001). Mermer tozu ilavesinin KYB'nin basınç dayanımında sadece asgari bir kazanç sağladığı görülmüştür.

Yangın dayanım altındaki basınç dayanımı sonuçlarının analizi, uçucu kül ve/veya mermer tozu ile yapılan toz değiştirme miktarının sertleşmiş beton özelliklerinde iyileşme doğurduğunu ortaya koymuştur. Yangına dayanıklılık, beton numuneler 300°C'ye kadar ısıtıldığında basınca dayanımda artışa neden olur. Mermer tozu ve uçucu külün eklenmesi, kendiliğinden yerleşen betonun doldurulma kabiliyeti ve işlenebilirliği ile ilgili iyi bir sonuç vermekte ve ortam ve yüksek sıcaklıktaki basınç dayanımına bir değer kazandırmaktadır. Ekonomik ve çevresel olarak bu malzemelerin çimentoyla değiştirilebilir bir dolgu tozu olarak kullanılması, kendiliğinden yerleşen beton üretim teknolojisinde büyük bir kazanç olarak görülmektedir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Bu araştırmada elde edilen verilere dayanarak, KYB yapımında çimentonun bir bileşeni olarak uçucu kül (FA) ve mermer tozunun (MP) eklenmesi ile ilgili deneysel araştırmalardan aşağıdaki önemli sonuçları çıkarılmıştır.

- Tüm KYB karışımları, doldurulma kabiliyeti ve işlenebilirlik açısından tatmin edici bir performans göstermiştir. Ölçülen yayılma çapı değerleri EFNARC (2002)'de verilen kriterleri karşılamaktadır
- Mermer tozu (MP) ve uçucu kül (FA) kullanımının KYB'nin işlenebilirliği üzerinde olumsuz bir etki yaratmadığı görülmüştür.
- Uçucu kül (FA) ve mermer tozu (MP) karışımlarının KYB karışımına eklenmesinin etkisi, betonun yayılma değerleri, yoğunluğu, su emme oranı ve boşluk oranlarıyla ilgili olarak çıkan sonuçların hepsinde olumludur. Bu değerler ve yorumlar 24 saat boyunca test edilen geçirgenlik sonuçlarına da yansımıştır.
- Basınç dayanımı değeri, mermer tozunun tek başına %5'e kadar olduğu durumda bir artış göstermesine sebep olduğu ve mermer tozunun %10'a yükseldiği diğer durumlarda dayanımda azalmaya neden olduğu belirlenmiştir.
- Uçucu külün tek başına eklenmesi basınç dayanımını arttırmaktadır.
- Optimum karışıma hem uçucu külün hem de mermer tozunun %5 oranında olduğu ve çimentoyla ikame edildiği durumda ulaşılmıştır. Ayrıca 28 günlük süredeki en yüksek basınç dayanımı da 81.88 MPa ile 7.5% uçucu kül ve 5% mermer tozu kullanımında ortaya çıkmıştır.
- Yangın dayanımı mermer tozu (MP) ilaveli numunelerde basınç dayanımı artışı 300°C'ye kadar gerçekleştiği ancak sıcak kuru hava ile mukayese edilen yangın dayanımın değerlerinde dayanım düşüşü 600°C'den sonra görülmektedir. Sadece uçucu kül ilavesi ile yapılan karışımlar da basınç dayanımı artış ve azalışında aynı eğilimleri göstermektedir. En yüksek yangın

dayanımı basınç direnci 300 °C derecede, %7.5 uçucu kül ve %5 mermer tozlu karışım için 91.12 MPa olarak gözlemlenmiştir.

- 900°C'ye kadar ısıtılan örnekler, özellikle düşük uçucu kül ve mermer tozu kombinasyonuna sahip olanlar basınca dayanım gösterememiştir. Sadece yüksek miktarda uçucu külün kullanıldığı örnekler de çok düşük bir basınç dayanımı göstermiştir.
- 28 günde test edilen yarmada çekme dayanımı sonuçları, uçucu kül ilavesi olmadan mermer tozu arttıkça artış göstermiştir. Diğer taraftan, bu değerler uçucu kül arttıkça ve mermer tozu ilave edildikçe azalma eğilimi göstermiştir. %7.5 uçucu külün ve %5 mermer tozunun kullanıldığı karışım kendinden yerleşen betonun mekanik özellikleri üzerinde daha olumlu sonuçlar doğurmuştur.
- Sonuçlar, 28 günlük kürlemeden sonra KYB'nin tazelik ve sertleştirilme özelliklerinde önemli bir gelişme olduğunu göstermektedir.
- Sürdürülebilir gelişme için çevre dostu yapı malzemesi olan mermer atıkları ve uçucu kül, doğru oranlarda uygulanan bir çimento ikame malzemesi olarak kullanılabilir olduğu görülmüştür.

## 5.2. Öneriler

- Çalışma, kendiliğinden yerleşen betonda kullanılan çimentonun yerine yukarıda verilen yüzde ve oranlarda uçucu kül ve mermer tozu kullanılmasını önermektedir. Bu araştırmada, bahsedilen malzemelerin eklenmesini KYB'nin tazelik ve sertleştirilme özelliklerine ve sürekliliği ve sınırlandırılmayı ne şekilde etkilediğine odaklanılmıştır.
- Ayırışma ve işlenebilirliği araştırmak ve sağlamak için taze karışım üzerinde ileri derece fiziksel testler yapılması önerilmektedir.
- Çimentonun yerine karışıma uçucu kül ve mermer tozu dışındaki malzemelerin de eklenip eklenememesi konusunun araştırılması önerilmektedir.
- Uygun karışım dizaynının belirlenmesi ile sertleşmiş beton özelliklerinin yangına dayanımına etkisi daha detaylı incelenmelidir.

## KAYNAKÇA

- Agarwal, S. K., & Gulati, D. (2006). Utilization of industrial wastes and unprocessed micro-fillers for making cost effective mortars. *Construction and Building Materials*, 20(10), 999-1004.
- Alyamaç, K. E., & Ince, R. (2009). A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. *Construction and building materials*, 23(3), 1201-1210.
- ASTM, C. (2004). 1585-04. Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes. *ASTM International*.
- ASTM, C. (2013). Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. C642-13.
- Bahar D., (2010), "The effect of the using waste marble dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete," *International Journal of the Physical Sciences*, 5 (9), pp 1372-1380.
- Binici, H., Kaplan, H., & Yilmaz, S. (2007). Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete. *Scientific Research and Essays*, 2(9), 372-379.
- Brito, J., & Saikia, N. (2013). Recycled aggregate in concrete: *Use of industrial, construction and demolition waste*. London: Springer.
- Colleparidi, M. (2010). The new concrete. Castrette di Villorba: *Grafiche Tintoretto*.
- Darzi Musaib, A., & Shivkumar, B. (2016). Review paper on "Effective partial replacement of cement and sand with fly-ash and marble powder to make green concrete" *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, e-ISSN: 2395-0056, p-ISSN: 2395-0072. Volume, 3, 1408-1410.
- Dehn, F., Holschemacher, K., & Weiße, D. (2000). Self-compacting concrete (SCC) time development of the material properties and the bond behaviour. *Selbstverdichtendem Beton*, 5, 115-124.
- EFNARC, (2002) (European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures), "*Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*".
- Ergün, A. (2011). Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. *Construction and building materials*, 25(2), 806-812.
- Gencel, O., Ozel, C., Koksall, F., Erdogmus, E., Martínez-Barrera, G., & Brostow, W. (2012). Properties of concrete paving blocks made with waste marble. *Journal of Cleaner Production*, 21(1), 62-70.

- Haddadou, N., Chaid, R., Ghernouti, Y. & Bouzoualegh, M., (2015), 'Fresh and hardened properties of self-compacting concrete with different mineral additions and fibers." *Journal of building materials and structures* 41-50 [crossRef.]
- Hameed, M. S., Sekar, A. S. S., Balamurugan, L., & Saraswathy, V. (2012). Self-compacting concrete using marble sludge powder and crushed rock dust. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(6), 980-988.
- Hewlett, P., & Liska, M. (Eds.). (2019). *Lea's chemistry of cement and concrete. Butterworth-Heinemann.*
- Ho, D. W. S., & Chirgwin, G. J. (1996). A performance specification for durable concrete. *Construction and Building Materials*, 10(5), 375-379.
- Husem, M. (2006). The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete. *Fire Safety Journal*, 41(2), 155-163.
- JSCE, (1992). Japan Society of Civil Engineers. Recommendations for design and construction of an anti-washout underwater concrete. *Cem. Concr. Res.* 36, 89.
- Junaid, M. T., Kayali, O., Khennane, A., & Black, J. (2015). A mix design procedure for low calcium alkali activated fly ash-based concretes. *Construction and Building Materials*, 79, 301-310.
- Khayat, K. H., (1999), "Workability and performance of self-consolidating concrete", *Material Journal* vol.96, pp. 346-353
- Kodeboyina, G. B. (2018). *High Performance Self-Consolidating Cementitious Composites. Boca Raton, FL: CRC Press.*
- Kovler, K., & Roussel, N. (2011). Properties of fresh and hardened concrete. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 775-792.
- Kumar, M. L., & Bhadoriya, G (2015). Effect of partial replacement of cement by fly ash and fine aggregate by marble dust, *stone dust on concrete properties*
- Kumar, R., & Kumar, S. K. (2015). Partial replacement of cement with marble dust powder. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 5(8), 106-114.
- Lamond, J. F., & Pielert, J. H. (2006). Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials. *West Conshohocken, PA: ASTM.*
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G., & Thorpe, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and structures*, 45(8), 1221-1232.

- Lee, K. W., Brayton, T. E., Mueller, M., & Singh, A. (2016). Rational mix-design procedure for cold in-place recycling asphalt mixtures and performance prediction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(6), 04016008.
- Li, Z. (2011). Introduction to concrete. *Advanced Concrete Technology*, John Wiley and Sons.
- Loukili, A. (Ed.). (2013). *Self-compacting concrete*. John Wiley & Sons.
- Madhavi, T. C., Raju, L. S., & Mathur, D. (2014). Polypropylene fiber reinforced concrete-a review. *International journal of emerging technology and advanced engineering*, 4(4), 114-118.
- Matos, A. M., Maia, L., Nunes, S., & Milheiro-Oliveira, P. (2018). Design of self-compacting high-performance concrete: Study of mortar phase. *Construction and Building Materials*, 167, 617-630.
- Muthen, K. M. (1998). Foamed asphalt mixes-mix design procedure. *Transportation Research Record*, 898, 290-296.
- Neville, A. M. (1996). Properties of concrete. 4th and final ed. England: Addison Wesley Longman Limited, 631-3.
- Neville, A.M., (2005). Properties of concrete. 4th ed. Pearson Education Ltd.
- Okamura H. & M. Ouchi, (2003). Self-Compacting Concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, No. 1, pp. 5-15.
- Omar, O. M., Abd Elhameed, G. D., Sherif, M. A., & Mohamadien, H. A. (2012). Influence of limestone waste as partial replacement material for sand and marble powder in concrete properties. *HBRC Journal*, 8(3), 193-203.
- Pala, P. K, Dhandha, K. J.& Nimodiya, P. N., (2015). "Use of marble powder and fly ash in self compacting concrete", *International Journal for Innovative Research in Science & Technology (IJIRST)* vol.1, issue 12, pp 475 -479.
- Pansiniya, M., Mathakiya, S., Garnara, P., & Odedra, P. (2015). Study on self compacting concrete using industrial waste materials. Retrieved from <http://vvpedulink.ac.in/wp-content/uploads/2015/05/sahil-mathakiya-8th-sem-2011-2015.pdf>
- Pasetto, M., & Baldo, N. (2011). Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3458-3468.
- Patankar, S. V., Ghugal, Y. M., & Jamkar, S. S. (2015). Mix design of fly ash based geopolymer concrete. *In Advances in Structural Engineering* (pp. 1619-1634). Springer, New Delhi.

- Pepe, M., Toledo Filho, R. D., Koenders, E. A., & Martinelli, E. (2016). A novel mix design methodology for Recycled Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials*, 122, 362-372.
- Phan, L. T., Lawson, J. R., & Davis, F. L. (2001). Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling, and residual properties of high performance concrete. *Materials and structures*, 34(2), 83-91.
- Prarthitaet, B. A. S. U., Gupta, R. C., & Agrawal, V (2018). Mix design of self-compacting concrete—A new approach.
- Reda, T. M. M. (2018). International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC 2018): Polymers for resilient and sustainable concrete infrastructure. Cham, Switzerland: Springer.
- Rai, B., Naushad, K. H., Abhishek, K., Rushad, T. S., & Duggal, S. K. (2011). Influence of Marble powder/granules in Concrete mix. *International journal of civil and structural engineering*, 1(4), 827.
- Siegel, J. A., Mirakovits, J. A., & Hudson, B. (2013). Concrete mix design, quality control and specification. *CRC Press*.
- Singh, V., Gajjar, P., & Nimodiya, P. (2017, November). Experimental study to enhance the strength properties of self compacting concrete using waste marble dust and fly ash. Retrieved from November 2017, Volume 4, Issue 11 JETIR (ISSN 2349 5162. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)* www.jetir.org
- Su, N., Hsu, K. C., & Chai, H. W. (2001). A simple mix design method for self-compacting concrete. *Cement and concrete research*, 31(12), 1799-1807.
- Sutradhar, D., Miah, M., Chowdhury, G. J., & Sobhan, M. A. (2015). Effect of using waste material as filler in bituminous mix design. *American Journal of Civil Engineering*, 3(3), 88-94.
- Tayeb, B., Abdelbaki, B., Madani, B., & Mohamed, L. (2011). Effect of marble powder on the properties of self-compacting sand concrete. *The Open construction and building technology journal*, 5(1).
- TS EN 206-1. (2002). Beton-Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk.
- Türkmenoğlu, Z. F., Türkmenoglu, M., & Yavuz, D. (2016). Using waste marbles in self compacting lightweight concrete. *Tunnel construction*, 5, 6.
- Ulubeyli, G. C., & Artir, R. (2015). Properties of hardened concrete produced by waste marble powder. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 195, 2181-2190.
- Zheng, Y., Chen, D., Zhou, L., Huo, L., Ma, H., & Song, G. (2018). Evaluation of the effect of fly ash on hydration characterization in self-compacting concrete (SCC) at very early ages using piezoceramic transducers. *Sensors*, 18(8), 2489.



Zeyad, A. M., Johari, M. A. M., Tayeh, B. A., & Yusuf, M. O. (2017). Pozzolanic reactivity of ultrafine palm oil fuel ash waste on strength and durability performances of high strength concrete. *Journal of Cleaner Production*, 144, 511-522.



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Musaab Mohamed ENBAYA  
Doğum Yeri ve Yılı : IDAHO, ABD / 16.10.1989  
Medeni Hali : Bekar  
Yabancı Dili : İngilizce, Arapça ve İtalyanca  
E-posta : tdallby@gmail.com



### Eğitim Durumu

Lise : Bayt Almuqadass Lisesi, 2007  
Lisans : Yüksek Mühendisler Enstitüsü, İnşaat mühendisliği. 2011  
Libya  
Sertifika : Wisconsin-Madison Üniversitesi'nde Yoğun Akademik Program, 2015  
Sertifika : Madison Area Technical College'de Mühendislik Yönetimi, Madison WI, 2017

### Yayınlar

ENBAYA Musaab, MEMİŞ Selçuk, KAPLAN Gökhan, YAPRAK Hasbi (2019). Use of Marble Powder and Fly Ash in Self-Compacting Concrete. ICELIS 2019, 1, 485-488. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)