

**KARAMANOĞLU MEHMETBEY ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PLASTİK ATIKLARDAN ÜRETİLMİŞ FİBER TAKVİYELİ**  
**SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Fadim Defne BENYARAR**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**OCAK 2023**



**KARAMANOĞLU MEHMETBEY ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PLASTİK ATIKLARDAN ÜRETİLMİŞ FİBER TAKVİYELİ**  
**SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Fadim Defne BENYARAR**  
**(190801043)**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Sadık Alper Yıldız**  
**Eş Danışman: Doç. Dr. Gizem Mısı**

**OCAK 2023**



## TEZ ONAYI

Fadim Defne Benyarar tarafından hazırlanan Plastik Atıklardan Üretilmiş Fiber Takviyeli Silindirle Sıkıştırılmış Beton adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman:  
*Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL*

Eş Danışman:  
*Doç Dr. Gizem MISIR*

Jüri Üyeleri

İmza:

*Doç. Dr. Gökhan KAPLAN*

*Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL*

*Dr.Öğr.Üyesi Yağmur DİKİCİAŞIK*

Tez Savunma Tarihi: 31/01/2023

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Doç. Dr. Ahmet KAYABAŞI**  
**Enstitü Müdürü**



## **BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK**

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

**Fadim Defne BENYARAR**





**Bu alışma, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri  
Koordinatörlüęü (BAP) tarafından 02-YL-21 numaralı proje ile  
desteklenmiřtir.**



## ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışmasını hazırladığımız süreç içerisinde her konuda her daim desteklerini esirgemeyen, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşmaktan asla çekinmeyen, her daim yanımda hissettiğim değerli hocam ve danışmanlarım Doç. Dr. Sadık Alper Yıldızlı'ya, Doç. Dr. Gizem Mısırlı'ya ve Arş. Gör. Gökhan Çalış'a en içten saygı ve şükranlarımı sunuyorum. Bu süreçte yanımda olan annem, ablam ve tüm arkadaşlarıma minnettarım.

Ocak 2023

Fadim Defne Benyazar



## İÇİNDEKİLER

## Sayfa

|                                                                                         |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ÖNSÖZ.....                                                                              | ix        |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                       | xi        |
| KISALTMALAR .....                                                                       | xiii      |
| SEMBOLLER .....                                                                         | xv        |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                                                    | xvii      |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                                      | xix       |
| ÖZET.....                                                                               | xxi       |
| ABSTRACT.....                                                                           | xxiii     |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                                                   | <b>1</b>  |
| 1.1 Tezin Amacı.....                                                                    | 2         |
| 1.2 Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) Tanımı .....                                   | 3         |
| 1.2.1 SSB'nin kullanım alanları.....                                                    | 3         |
| 1.2.2 SSB'nin özellikleri.....                                                          | 7         |
| 1.2.3 SSB tasarım yöntemleri .....                                                      | 7         |
| 1.2.3.1 Yüksek bağlayıcı yöntemi (High paste method).....                               | 7         |
| 1.2.3.2 Amerikan mühendisler topluluğu yöntemi (Corps of engineers method).....         | 9         |
| 1.2.3.3 Maksimum yoğunluk yöntemi (Maximum density method) .....                        | 9         |
| 1.2.3.4 Silindirle sıkıştırılmış baraj/Japon yöntemi(Roller compacted dam methods)..... | 9         |
| 1.2.4 Silindirle sıkıştırılmış beton karışım tasarımı .....                             | 10        |
| 1.2.4.1 Bağlayıcı malzeme.....                                                          | 10        |
| 1.2.4.2 Agregas.....                                                                    | 11        |
| 1.2.4.3 Su .....                                                                        | 11        |
| 1.2.4.4 Kimyasal katkıları .....                                                        | 11        |
| 1.3 Plastik Atıklar .....                                                               | 12        |
| 1.3.1 Plastik atıkların geri dönüşümü ve beton içerisinde kullanımı.....                | 12        |
| <b>2. MATERYAL VE METOD.....</b>                                                        | <b>15</b> |
| 2.1 Deneyde Kullanılan Malzemeler .....                                                 | 15        |
| 2.2 Yöntem.....                                                                         | 17        |
| <b>3. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI .....</b>                                                 | <b>19</b> |
| 3.1 Betonda Kompaksiyon.....                                                            | 19        |
| 3.1.1 Standart kompaksiyon deneyi .....                                                 | 19        |
| 3.1.2 Plastik fibersiz karışım numunesinin hazırlanması ve basınç deneyi ....           | 20        |
| 3.1.3 Plastik fiber katkılı karışım numunelerinin hazırlanması ve basınç deneyi.....    | 23        |
| <b>4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....</b>                                                    | <b>27</b> |
| 4.1 Deneysel Sonuçlar.....                                                              | 27        |
| <b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>                                                        | <b>31</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                                  | <b>33</b> |



## KISALTMALAR

|              |                                              |
|--------------|----------------------------------------------|
| <b>SSB</b>   | : Silindirle Sıkıştırılmış Beton             |
| <b>BSK</b>   | : Bitümlü Sıcak Karışım                      |
| <b>PVC</b>   | : Polivinil Klorür                           |
| <b>PE</b>    | : Polietilen                                 |
| <b>PP</b>    | : Polipropilen                               |
| <b>PET</b>   | : Polietilen Telefat                         |
| <b>HDPE</b>  | : High Denstiy Polyethylene                  |
| <b>LDPE</b>  | : Low-Density Polyethylene                   |
| <b>ASTM</b>  | : American Society for Testing and Materials |
| <b>TS EN</b> | : Türk Standartları – Avrupa Normu           |
| <b>ACI</b>   | : American Concrete Institute                |
| <b>ABD</b>   | : Amerika Birleşik Devletleri                |
| <b>RPPF</b>  | : Polipropilen Fiber Katkısı                 |
| <b>SEM</b>   | : Daraltılmış Elektronik Mikroskobu          |
| <b>RSM</b>   | : Response Surface Method                    |
| <b>RCC</b>   | : Reinforced Concrete Compacted              |
| <b>m</b>     | : Metre                                      |
| <b>cm</b>    | : Santimetre                                 |
| <b>dk</b>    | : Dakika                                     |
| <b>mm</b>    | : Milimetre                                  |
| <b>kg</b>    | : Kilogram                                   |
| <b>ml</b>    | : Mililitre                                  |



## SEMBOLLER

|                                    |                       |
|------------------------------------|-----------------------|
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | : Demir Oksit         |
| <b>CaO</b>                         | : Kalsiyum Oksit      |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | : Alüminyum Oksit     |
| <b>SO<sub>3</sub></b>              | : Kükürt Trioksit     |
| <b>MgO</b>                         | : Magnezyum Oksit     |
| <b>cm<sup>2</sup>/g</b>            | : Özgöl Yüzey Alanı   |
| <b>kg/m<sup>3</sup></b>            | : Birim Hacim Ağırlık |
| <b>m<sup>3</sup></b>               | : Metre Küp           |
| <b>m<sup>2</sup></b>               | : Metre Kare          |
| <b>MPa</b>                         | : Megapaskal          |
| <b>g/m<sup>3</sup></b>             | : Yoğunluk            |
| <b>%</b>                           | : Yüzde Sembolü       |
| <b>°C</b>                          | : Santigrat Derece    |
| <b>FA</b>                          | : İnce Agrega         |
| <b>CA</b>                          | : İri Agrega          |



## ÇİZELGE LİSTESİ

|                                                             | <u>Sayfa</u> |
|-------------------------------------------------------------|--------------|
| Çizelge 2.1 : Agreganın malzeme özellikleri .....           | 15           |
| Çizelge 2.2 : Çimento fiziksel ve kimyasal özellikler ..... | 16           |
| Çizelge 2.3 : Plastik fiberlerin malzeme özellikleri.....   | 17           |





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|            |                                                               |    |
|------------|---------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1  | : SSB üretim tablosu(Calis and Yıldız 2019) .....             | 3  |
| Şekil 2.1  | : Agregaların birleşik derecelendirme eğrileri .....          | 16 |
| Şekil 2.2  | : Geri dönüştürülmüş plastik fiberler .....                   | 17 |
| Şekil 3.1  | : Sıkışmamış ve sıkışmış toprak temsili .....                 | 19 |
| Şekil 3.2  | : Proktor deney harç malzemeleri.....                         | 20 |
| Şekil 3.3  | : Standart proktor deneyi yapımı.....                         | 20 |
| Şekil 3.4  | : Silindir numune kalıbı.....                                 | 21 |
| Şekil 3.5  | : Hazırlanan taze beton karışımı.....                         | 21 |
| Şekil 3.6  | : Numune kalıplama .....                                      | 22 |
| Şekil 3.7  | : Hilti (1870 vuruş/dk).....                                  | 22 |
| Şekil 3.8  | : 4 Katman yerleştirip sıkıştırılması tamamlanmış numune..... | 23 |
| Şekil 3.9  | : 28 Günlük basınç deneyi.....                                | 23 |
| Şekil 3.10 | : Tüm silindir numuneler.....                                 | 24 |
| Şekil 3.11 | : Basınç testi yapılan plastik katkılı numune.....            | 24 |
| Şekil 3.12 | : Kırımı tamamlanmış numune parçası .....                     | 25 |
| Şekil 4.1  | : Karışımların Vebe süreleri .....                            | 27 |
| Şekil 4.2  | : Optimum su içeriği ve yoğunluk etkileşim grafiği .....      | 28 |
| Şekil 4.3  | : Su emme testi sonuçları .....                               | 28 |
| Şekil 4.4  | : Basınç dayanımı test sonuçları.....                         | 29 |
| Şekil 4.5  | : Eğilme dayanımı test sonuçları .....                        | 29 |
| Şekil 4.6  | : SEM örneğinin görüntüsü .....                               | 30 |
| Şekil 4.7  | : Basınç dayanımı için tepki yüzey grafiği .....              | 30 |
| Şekil 4.8  | : Eğilme mukavemetleri için tepki yüzey grafiği .....         | 30 |



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### PLASTİK ATIKLARDAN ÜRETİLMİŞ FİBER TAKVİYELİ SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON

Fadim Defne BENYARAR

Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL  
Eş Danışman: Doç. Dr. Gizem MISIR

Ocak 2023

Dünya dengesini korumak için ekolojik dengeyi sağlamak en başta gelen faktörlerden biridir. Bu denge içinde atık yönetiminin yeri oldukça önemlidir. Atıkların doğada kaybolma sürelerine göre en uzun süreli olan plastikler için farklı çalışmalar yapılmaktadır. Ülkemizde 2017 yılında başlayıp halen devam eden “Sıfır Atık Projesi” kapsamında plastik atık çalışmaları ile desteklenmektedir. Her sektörde olduğu gibi inşaat sektöründe de plastik kullanım alanları çeşitlilik göstermektedir.

SSB, standart normal beton ile aynı malzemelerden fakat farklı miktarlardan oluşan çökme miktarının sıfıra yakın olması beklenen bir beton çeşididir. Silindirle sıkıştırılmış beton; farklı alanlarda kullanımı, ekonomik ve hızlı üretime sahip özellikleri ile öne çıkarak günden güne kullanımı artmaktadır.

Bu araştırmada hacimce %0, %2,5, %5, %7,5 ve %10 plastik fiber belirlenen reçete doğrultusunda karışıma eklendi. Sıkışma için şartnameye uygun hilti kullanıldı. Her bir karışım için standart proktor deneyi, Vebe deneyi, basınç ve çekme deneyi uygulandı. Elde edilen veriler doğrultusunda silindirle sıkıştırılmış betonun içerisinde plastiğin etkisine bakıldı. RSM yöntemiyle betonda basınç ve eğilme dayanımları için tepki yüzey grafikleri incelendi. Plastik fiber katkılı silindirle sıkıştırılmış beton için basınçta plastik olumsuz bir etkisi olduğu tespit edilmemiştir.

Bu tez sonucunda plastiklerin inşaat alanlarında değerlendirilmesi için farklı bir pencere açması sağlanmış ve gelecek diğer projelere ışık tutması sağlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Plastik atık, plastik fiber katkısı, silindirle sıkıştırılmış beton, geri dönüşümde beton



## **ABSTRACT**

**Ms Thesis**

### **FIBER REINFORCED ROLLER COMPACTED CONCRETE MADE FROM PLASTIC WASTE**

**Fadim Defne BENYARAR**

**Karamanoğlu Mehmetbey University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering**

**Supervisor: Assoc.Prof.Dr. Sadık Alper YILDIZEL  
Co-Supervisor: Prof.Dr. Gizem MISIR  
January 2023**

Providing ecological balance is one of the foremost factors in order to maintain the balance of the world. In this balance, the place of waste management is very important. Different studies are carried out for plastics, which have the longest duration according to the loss of waste in nature. It is supported by plastic waste studies within the scope of the "Zero Waste Project", which started in 2017 and still continues in our country. As in every sector, plastic usage areas vary in the construction sector.

Roller Compacted Concrete (RCC) is a type of concrete that is expected to have close to zero slump, which consists of the same materials but different amounts of conventional concrete. roller compacted concrete; It stands out with its use in different areas, economical and fast production features and its use is increasing day by day.

In this study, 0%, 2.5%, 5%, 7.5% and 10% plastic fiber by volume was added to the mixture in accordance with the prescribed recipe. The hilti conforming to the specification was used for jamming. Standard proctor test, Vebe test, pressure and tensile test were applied for each mixture. Response surface graphs for compressive and flexural strengths of concrete were examined by RSM method. In line with the data obtained, the effect of plastic in the roller compacted concrete was examined. For roller compacted concrete with plastic fiber additives, it has not been determined that there is a plastic negative effect on pressure.

As a result of this thesis, it has been provided to open a different window for the evaluation of plastics in construction sites and to shed light on other future projects.

**Keywords:** Plastic waste, plastic fiber additive, roller compacted concrete, recycled concrete



## 1. GİRİŞ

Dünya dengesini korumak için ekolojik dengeyi sağlamak oldukça önemlidir. Ekolojik dengeyi korumak için atık yönetimi ve geri dönüşüm sağlanmalıdır. Tarım, gıda, sanayi sektörlerinde olduğu gibi inşaat sektöründe de atık malzemelerin değerlendirilmesi ekolojik dengeyi korumaya yönelik çalışmalardan biridir. Atık malzemelerin seçilmesi için yeterli mekanik ve kimyasal koşullara sahip olması değerlendirmeyi kolaylaştıran unsurlardandır.

Plastiklerin çoğu üretilip kullanıldıktan sonra doğadan kaybolmamaktadır. Bu tür plastikler; atık olarak değerlendirilip geri dönüşüm endüstrisinde tekrar kazanılmaktadır. Tekstil ve ambalajın hammaddesine sahip olan plastik, yapı sektöründe de dış cephe, yalıtım, tesisat gibi oldukça yaygın kullanım alanlarına sahiptir. 2017 yılında Science Advances dergisinin yayımladığı bir araştırmaya göre üretilen plastiklerin 2015 yılında %55'i çöpe atıldı, %25,5'i enerji üretim tesislerinde yakılmakta olup %19,5'i ise geri dönüştürüldüğü tespit edilmiştir. Çin'in 2018 yılında plastik atık ithalatına sınırlandırma getirmesiyle Malezya, Tayvan, Hindistan, Vietnam, Endonezya, Tayland ve Türkiye'de ithalat miktarları oldukça artmıştır. Türkiye 2019 yılında AB ülkelerinden 582.296 bin ton plastik atık alarak dünyada en fazla plastik atık ithal eden ülke olmuştur. Atıkların alınmasındaki temel amaç geri dönüşüm olmakla birlikte bazı araştırmacılar bu ithalatın ekolojik tehdit oluşturduğunu belirtmektedir. Ülkemizde "Sıfır Atık Projesi" Eylül 2017'de başlayıp günümüzde halen devam etmekte olup özellikle plastik atıkları hedef alan çalışmalar devamlılığını sağlamaktadır.

Silindirle sıkıştırılmış beton, taze halde çökme değerleri sıfır olup, daha ekonomik ve hızlı inşa edilecek barajlar, yollar ve havaalanları için tasarlanarak geliştirilmiştir. SSB'nin geleneksel betondan farkı aynı çimento miktarında fakat daha düşük su/çimento oranı kullanılmasıdır. Silindirle sıkıştırılmış betonların, geleneksel betonlara göre üretim tekniğinin hızlı, dayanıklılığının daha iyi ve maliyetinin düşük olması gibi özellikleriyle birlikte üretiminde atık madde kullanım oranı yüksek

olduğundan SSB kullanımını öne çıkarmaktadır. Plastik atık, SSB'nin mekanik özelliklerinin gelişimi, sürdürülebilirlik ve ekolojik dengeye önem kazandırmaktadır.

## 1.1 Tezin Amacı

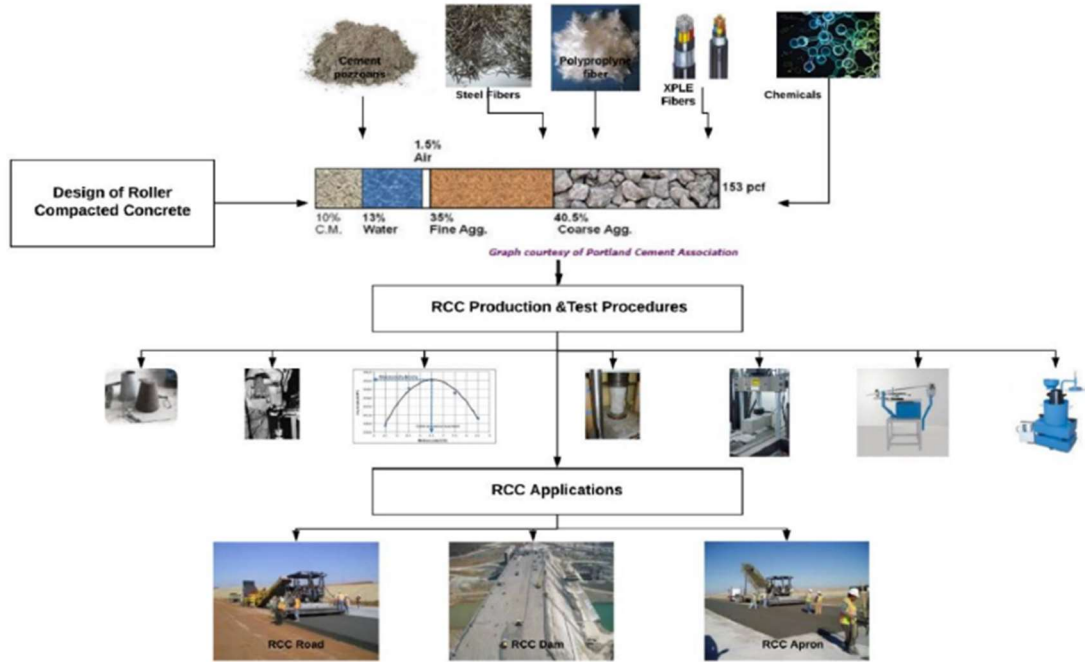
Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB), normal betonla aynı malzemeler içermekte fakat farklı miktarlardan oluşmakta olup çökme miktarının sıfıra yakın olması beklenen bir beton çeşididir. Geleneksel betona göre daha düşük çimento miktarı içerdiği için genellikle altyapı inşaatlarında ve baraj dolgu kütlelerinde kullanılan SSB, tasarımında bilinen yöntemler şunlardır;

- Amerikan ordusu mühendisler birliği (Corps of engineers methods)
- High Pasta Methodu
- Silindirle sıkıştırılmış baraj yöntemi
- Maksimum yoğunluk yöntemidir. Bu yöntem en çok kullanılan yöntemlerdendir.

Geleneksel betonda gerçekleştirilen yerleştirme, sıkıştırma ve konsolidasyon uygulamalarının yavaş olması sebebiyle inşaat projelerinde silindirle sıkıştırılmış beton kullanılması özellikle baraj inşaatlarında önemli değişiklikler ortaya çıkarmıştır. Dünyada ilk olarak kaya dolgu barajlarda kullanılmasının ardından inşaat yapımını daha hızlı hale getirerek inşaat süresini kısalttığı gözlemlenmiştir. Özellikle üstyapı kaplamalarında son yıllarda silindirle sıkıştırılmış beton kullanımının önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Silindirle sıkıştırılmış betonun inşaat maliyeti asfaltla karşılaştığında daha düşük olmakla birlikte inşaat süresi daha hızlıdır. SSB'nin basınç dayanımının yüksek, daha yüksek dayanıklılık, düşük bakım maliyeti ve geleneksel betona göre daha uzun hizmet ömrü açısından diğer yüksek performanslı asfalt kaplamalara göre daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir. Düşük hız ve ağır yüke maruz alanlarda/yollarda daha yaygın uygulandığı görülmüştür. Böylelikle, son yıllarda silindirle sıkıştırılmış betonun otoyol ve sokak gibi kentsel alanlarda kullanımı arttığı bilinmektedir (Calis and Yıldız 2019). Bu tezde atıkların değerlendirilmesi, geri dönüşümün yararı ve SSB'nin özelliklerinin iyileştirilmesi için projede fiber olarak granüler plastik atığın SSB içerisindeki durumlarının incelenmesi amaçlanmıştır.

## 1.2 Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) Tanımı

Silindirle Sıkıştırılmış Beton; geleneksel beton ile aynı malzemelere sahip genellikle asfalt finişeri ile yerleştirilip gerekli yoğunluğu ve sıkışmayı sağlamak için geleneksel vibrasyonlu silindirler ile sıkıştırılan sıfır çökmeye sahip bir katı-kuru karışımdır. SSB'nin geleneksel beton ile arasındaki en temel fark düşük su/çimento oranıdır. SSB'nin dayanım özelliği ise üstyapılarda kullanılan rijit karışımlar ile benzerlik göstermektedir. SSB'nin geleneksel betona göre düşük maliyet, iyi dayanım ve hızlı üretim tekniği gibi özellikleri ile dünyada kullanım oranı yıllar geçtikçe artmaktadır. SSB geleneksel betona göre kullanılan ince agrega miktarı da fazladır. Bunun nedeni yeterli sıkışma ve su muhtevasına ulaşılması ile güçlü bir dayanım elde etmektir.



Şekil 1.1 : SSB üretim tablosu(Calis and Yıldız 2019).

### 1.2.1 SSB'nin kullanım alanları

Silindirle sıkıştırılmış betonun en yaygın ve önemli kullanım alanları yollar, barajlar, havaalanları ve endüstriyel sanayilerdir. 1940'lı yıllarda silindirle sıkıştırılmış beton yol uygulaması ilk kez Amerika Birleşik Devletleri'nde Washington eyaletinde bulunan havaalanının pistinde gerçekleştirilmiştir (Lav ve Lav, 2004). Dünyada 1970'li yıllarda yaşanan petrol kriziyle birlikte bitümlü bağlayıcı maliyetleri beklenmedik bir şekilde artarak SSB yolları gündeme getirmiştir ve SSB yol uygulamalarında Kanada ve Amerika öncülük etmiştir. 1976'lı yıllarda beton yolun

uygulamaları İspanya’da rastlanmaktadır. Günümüzde ise gelişmiş ve ekonomik refah düzeyleri yüksek ülkelerde SSB yol miktarı fazla olmakla birlikte Ekvator ve Güney Afrika bölgelerinde uygulama miktarlarına oldukça az rastlanmaktadır.

Baraj yapımı için 1960’larda başlanmış olup SSB genellikle barajlarda dolusavak, batardo gibi yerlerde kullnılmaya başlanmış olup dünyada tamamen SSB kullanılarak yapılan ilk baraj 1982 yılında Amerika’da Willow Creek Barajı ve 1981 yılında Japonya’da Shimajigawa Barajı dünya çapında SSB barajlarına ışık tutmuştur(Söğüt 2014). SSB barajlar uygulama alanında 3 gruba ayrılabilir.bunlar; çimento içeriği  $150 \text{ kg/m}^3$ ’den fazla olan sert hamurlu SSB barajlar, çimento içeriği  $100\text{-}149 \text{ kg/m}^3$  arasında olan orta hamurlu SSB barajlar ve karışım tasarımında  $100 \text{ kg/m}^3$ ’den az çimento içeriğine sahip olan SSB sert dolgu barajlardır.

SSB ile Türkiye dünyadaki diğer ülkelere nazaran biraz daha geç tanışmıştır. SSB, ilk kez 1982-83 yıllarında Karakaya Barajı yapımında kullanılmıştır. Karakaya Barajı’nda 50 m yüksekliğinde memba batardosu inşasında toplam  $46000 \text{ m}^3$  SSB kullanılmıştır. Buna müteakip SSB beton Atatürk, Berke, Kürtün, Sır Barajlarında da kullanılmıştır. SSB, baraj inşaatlarında halen ve sıklıkla kullanılmaya devam etmektedir.

Türkiye’de yolların çoğu BSK yada sathi kaplamadan oluşmaktadır. Beton yol uygulamaları bitümlü kaplamalara göre oldukça geride kalmıştır. Beton yolun esnek üst yapıya göre ilk yapım maliyeti düşünülenin aksine sağlam bir zemin ve trafik hacminin düşük olduğu durumlarda yüksektir. Bakım ve onarım maliyetleri düşünmeden yapılan bu sonuca göre ülkemizde ağır taşıt trafiğinin %40 olması beton yolun zorunluluk gösterdiği ortadadır. Yine ekonomik olarak bakıldığında esnek kaplamalarda taşıtların rijit kaplamalara göre daha çok yıprandığı, sürtünmeye bağlı tekerlek deformasyonu ve yakıt tüketiminin daha çok olduğu görülmüştür. Trafik güvenliği için bakıldığında esnek yapılarda gerçekleşen gece görüşü kısıtlılığı betonun açık renkli olmasıyla görüş mesafesini rahatlatabilmektedir. Rijit kaplamalar esnek kaplamalara göre bozulma oranı daha yüksek olduğu için trafikte sürüş konforu uzun süre korunabilir. Beton yolların asfalt yollara göre kayma sürtünme katsayısı daha yüksek olup kaymaya karşı direnci fazladır. Enine sürtünme katsayısı 0.65 civarında olup boyuna sürtünme katsayısı ise 0.70’lerdedir. Ayrıca ıslak oldukları zaman sürtünme katsayısı azalmaktadır. Yağışlı havalarda yol yüzeyi daha düz olduğundan yüzey suları daha kolay kaplamadan ayrılıp kuruması kolaylaşmaktadır.

Asfalt kaplamaların hammaddesi petrol türevi olan bitümdür. Ülkemizde petrol rezervi konusunda yetersiz olmakla birlikte bitüm çoğunlukla ithal edilmektedir. Beton hammaddesi, bağlayıcısı çoğunlukta çimento olup ülke içerisinde oldukça yoğun üretime sahip olduğu ortadadır. Bu durumda ülke açısından düşünüldüğünde beton yolların tercih edilmesi daha rantabldır.

Türkiye’de beton dökümü için gerekli mevsim şartları çoğunlukla uygundur. Asfalt serimi için zeminin nem oranı en fazla %2 oranı istenmektedir. Fazla nem asfalt kaplamalarda daha hızlı bozunmaya ve kaplama ömrünün azalmasına sebep olmaktadır. Beton kaplamalarda ise böyle bir sorun olmamakla birlikte nemin betonla zemin arasında aderansı arttırdığı bilinerek zeminde nem ve ıslaklık çoğu zaman istenmektedir. Asfalt kaplamalarda sıkılaşıma için 125°C istenmekte olup bu derecenin altında yapılan sıkışmalarda boşluklar oluşmakta olup sağlıklı bir sıkışma gerçekleştirilmemektedir. Beton kaplamalarda ise sıkıştırma işlemi için vibratörlü silindirler gerekli olup herhangi bir sıcaklık söz konusu değildir.

Beton yollar asfalt yollara göre daha çevre dostudur. Esnek üst yapıların oluşumunda alttemel, temel ve bitümlü kaplamaların toplam kalınlığı, beton plak tabaka ve temel tabakasının toplam kalınlığına göre daha fazladır. İki yapısında bütün tabakalarının ana malzemesi agregadır. Asfalt kaplamalar için belirli kalitede agrega gradasyonu olması gerekmektedir. Beton yollarda ise daha düşük kalitede agregalar kullanılmaktadır. Kullanılan malzeme miktarı ile çevreye verilen zarar doğru orantılıdır.

Asfaltın içeriğinde bulunan uçucu kül zamanla kaybolmasıyla zeminin gevrekleşmesine ve sertleşmesine neden olup bu duruma esnek üst yapının yaşlanması denilmektedir. Yaşlanan tabaka zamanla özelliklerini kaybederek daha çabuk bozulmaktadır. Beton kaplamaların içeriğinde ise uçucu kül bulunmamakta olup böyle bir durum söz konusu değildir(THBB Grubu 2003).

Esnek üst yapılarda trafikteki araçlardan dökülen benzin, motorin, yağ gibi maddeler ve hava şartlarından dolayı zeminde biriken tuzun kaplamada kimyasal değişimlere sebep olduğu görülmektedir. Kaplamalarda gerçekleşen bu durum trafiği tehlikeye atmakta olup yol güvenliğini düşürmektedir. Beton yollarda ise böyle bir durum söz konusu olmamakta olup yola dökülen kimyasal maddeler herhangi bir değişmeye sebep olmamaktadır.

Beton yol uygulamalarında ise 4 çeşit tasarım uygulaması görülmektedir. Bunlar;

- Derzli donatısız beton yol,
- Donatılı derzsiz beton yol,
- Donatılı derzli beton yol,
- Silindirle sıkıştırılmış beton yoldur.

Aralarında yapım hızı en yüksek olan ve trafiğe en erken açılan uygulama silindirle sıkıştırılmış beton yoldur. Silindirle sıkıştırılmış beton yol diğer geleneksel beton yollara göre karışımı daha nemli ve yoğun agregaya gradasyonuna sahiptir. Silindirle sıkıştırılmış beton yolun bu özelliği onu diğerlerine göre daha rijit olmasını sağlamaktadır. SSB kaplamada sıkıştırma işlemi betonun sertleşmeye başlamadan önce ilk 60 dakika içerisinde silindirle gerçekleştirilmesi beklenir. Geleneksel beton yollar ise başlangıçta taze betonun içerisindeki havanın yüzey tipi vibratörlerle çıkarılması ile finişherden dökülen betonun agregaya ve çimentosunun çökmesiyle suyun yüzeye doğru çıkması sağlanarak silindirle sıkıştırma işleminin gerçekleşmesi beklenir. SSB yolların diğer geleneksel beton yollardan bir diğer farkı da donatı ve derz içermemesidir. Fakat yapısal davranışları diğer geleneksel beton yollarla eşdeğer nitelik taşımaktadır. Kalınlık belirleme prosedürleri de aynıdır. Kalınlık belirlenirken limitler arasında tutulmaya çalışılarak tekerlek yüklerinden kaynaklı eğilme gerilmesi ve yorulmalar dikkate alınır. Beton yol kaplamalarında kalınlık için, beklenen yükler, zemin özellikleri ve beton dayanımı göz önünde bulundurulmalıdır. SSB kaplamalarda tek katman yerleştirilmesi maksimum 25 cm kalınlığında olmalı ve en az ise 10 cm olmalıdır(Yaman and Ceylan 2013).

2009 yılında SSB yol ilk olarak, Antalya ve Denizli’de şehir içi bazı yollarda uygulanmıştır. Antalya Büyükşehir Belediyesi’nin belirlediği Necip Fazıl Kısakürek Caddesi’nde 150 m boy ve 8.6 m genişliğinde yapılan bu uygulamada eski yol tamamen kaldırılarak 20 cm kalınlığında temel, 10 cm kalınlığında alttemel, 19 cm kalınlığında SSB ve en üste aşınma tabakası olarak 4 cm asfalt tabaka uygulaması gerçekleştirilmiştir. Denizli’de ise Antalya’nın pilot bölge uygulamasından sonra Pamukkale Üniversitesinin hazırlamış olduğu tasarımla karışımda yaklaşık 20 kg çelik tel ve 300 kg çimento kullanılarak maksimum agregaya dane boyutu 15 mm belirlenmiştir. Karışımın 28 günlük eğilme dayanımının 3.5 MPa’nın üzerinde olması

beklenilmiştir. O dönemde Denizli’de 500.000 m<sup>2</sup> SSB yol uygulamasında kullanılmıştır(Engin et al. 2019).

### **1.2.2 SSB’nin özellikleri**

- Geleneksel betona göre daha kuru kıvamda olup çökme (slump) değeri sıfıra yakındır.
- Geleneksel beton ile aynı malzeme içeriğine sahip olup maliyet açısından daha ekonomiktir.
- Geleneksel betona göre dayanımı daha yüksek ve uzun ömürlüdür.
- Geleneksel betona göre kullanım alanları farklılık göstererek yol inşaatı için kullanılabilir.
- Donatı ve derzli beton yollara göre daha ekonomik ve trafiğe çabuk açılabilir.
- Asfalt yollar gibi inşa edilebilir olup asfalt yollara göre bakım masrafı daha azdır.
- Geleneksel beton barajlara göre SSB barajların inşa hızı daha yüksek olup zamandan neredeyse %30 tasarruf sağlanmaktadır.
- Geleneksel beton barajlarda beton kütle boyutları kalıba dökülerek yapılır ve sınırlıdır. SSB barajda ise yerleştirme ve sıkıştırma işlemi yatay yapılarak tabakanın sıkıştıktan sonra genellikle 30 cm olması beklenir(Sürmeli 2002).
- SSB barajların geleneksel beton barajlara göre en büyük riski ise zemin koşullarından ötürü kayma ve devrilmedir. Şimdiye kadar hiçbir ağırlık beton barajların yıkıldığı görülmesede tasarımında zemin koşulları dikkate alınmalıdır.
- SSB barajların geleneksel beton barajlara göre termal çatlama potansiyeli daha azdır. Bunun en temel sebebi çimento miktarının az olmasıdır.

### **1.2.3 SSB tasarım yöntemleri**

#### **1.2.3.1 Yüksek bağlayıcı yöntemi (High paste method)**

Bu yöntem “United States Bureau of Reclamation” tarafından Upper Stillwater Barajı tasarımı esnasında geliştirilmiştir. Yüksek bağlayıcı yöntem ile tasarlanan karışımlar

genellikle yüksek miktarda puzolan, yüksek oranda bağlayıcı malzeme, temiz ve iyi gradasyonlu agrega içermelidir aynı zamanda karışımlar işlenebilir olmalıdır. SSB'ler tabaka olarak yerleştirildiği için bu yöntemde asıl amaç tabakalar arası bağlantı yerlerinde yani derzlerde bağ dayanımını (joint bond strength) yüksek ve buna ek olarak derz geçirimsizliğinin (joint permeability) düşük olması gereklidir. Bu özellikleri iyileştirebilmek için karışımda hamur fazının optimum miktarda olmalıdır. Karışımda bağlayıcı malzeme miktarının yüksek olması halinde sıcaklık miktarının artışından dolayı oluşan hacimsel farklılıklar kontrol altına alınması gereklidir. Bunu gerçekleştirmek için çimentonun bir kısmı yerine diğer puzolanik malzemeler ilave edildiği bilinmektedir(Hansen ve Reinhardt, 1991).

Silindirle sıkıştırılmış beton karışımlarının sıkıştırma işleminde maksimum yoğunluğa sahip olabilmesi için karışımdaki daneler arası boşlukların minimum ve yeterli miktarda hamur ile dolması beklenir. Yeterli miktarda karışım hamuru içermeyen, boşluklara sahip ve sıkışmayan karışımın dayanımı az, geçirgenliğinin fazla olması beklenir.

Bu yöntemde silindirle sıkıştırılmış beton karışımlarının tasarımı 3 farklı kademelerin oluşması beklenir;

- Optimum sıkıştırma enerjisi miktarı altında en az boşluk hacmine sahip agrega dane büyüklüğü dağılımı tercih edilmesi,
- İşlenebilirlikte istenilene sahip olabilmek için agregaların arasında bulunan boşluk hacmi dikkate alınarak en uygun hamur hacminin tespit edilmesi,
- İstenilen dayanımı elde etmek için karışımda bulunan puzolanik malzeme içeriği, su/bağlayıcı oranı ile çimento miktarının tercih edilmesi (Portland Cement Association, 2004).

Yüksek bağlayıcı yönteminde, belirli bir dayanım hızı ve değerine sahip olmak için puzolan/çimento ve su/çimento oranları tespit edilir. Silindirle sıkıştırılmış beton karışımlarında Ve-Be süresi 10-30 saniye arasında olacak şekilde su, iri agrega ve ince agrega oranlarının en uygun değerleri belirlenir. Belirlendikten sonra karışımda bulunan birim hacimdeki puzolan, çimento, agrega ve suyun hacimlerine göre karışımda bulunan hava içeriği miktarı hesap edilir(Scanlon et al. 1999).

### **1.2.3.2 Amerikan mühendisler topluluğu yöntemi (Corps of engineers method)**

Bu yöntem su/çimento oranına ve dayanım ilişkilerine göre tasarlanmış bir yöntem çeşididir. Karışımdaki istenen Vebe zamanına bağlı olarak su ihtiyacı ve maksimum agrega tane boyutu farklılık göstermektedir. Ayrıca karışımdaki ince agrega miktarının toplam agrega miktarına oranı, iri agrega özellikleri ve maksimum agrega boyutuna bağlıdır. Genellikle silindirle sıkıştırılmış beton barajında 1 senelik elde edilen beton dayanımı, proje tasarım dayanımı olarak belirlenir. 1 yıllık dayanım tahmini ancak 90 veya 180 günlük dayanımlar dikkate alınarak elde edilebilir ve buna göre tasarım gerçekleştirilebilir(Mardani-Aghabaglou et al. 2020).

### **1.2.3.3 Maksimum yoğunluk yöntemi (Maximum density method)**

Bu yöntem ABD’de geliştirilen bir yöntemdir. Bu yöntem, maksimum agrega tane boyutu küçük ve bağlayıcı miktarı daha yüksek olan silindirle sıkıştırılmış beton karışımları için daha uygundur(Scanlon et al. 1999). Bundan dolayı SSB kullanılan yollarda yaygın olarak kullanılan bir metottur(Mardani-Aghabaglou et al. 2020).

Maksimum yoğunluk yöntemiyle gerçekleştirilen uygulamalarda farklı su/bağlayıcı oranlarını içeren karışımlar oluşturularak bağlayıcı malzeme miktarı genelde 120 kg/m<sup>3</sup>’ten az olacak şekilde toplam kuru ağırlığın %12-17’si arasında değişken olabilmektedir. Mineral katkı olarak ayrıca çimento miktarının %40’ına yakın uçucu kül eklenebilir. Normal betonda tasarım faktörü olarak belirlenen su/bağlayıcı oranı silindirle sıkıştırılmış beton karışımlarında ise başlıca tasarım faktörü olarak kabul edilmemektedir. Silindirle sıkıştırılmış beton karışımlarında su miktarı proje kriterlerine, karışımların maksimum yoğunluğuna ve karışımda kullanılan kimyasal katkılara göre farklılık gösterebilmektedir(Üte 2008).

### **1.2.3.4 Silindirle sıkıştırılmış baraj/Japon yöntemi(Roller compacted dam methods)**

Japon mühendisler ortaya koyduğu bu yöntemde bağlayıcı miktarı 120-140 kg/m<sup>3</sup> aralığında olup çimento miktarının %30’u kadar uçucu kül eklenebileceği tespit edilmiştir(Hansen ve Reinhardt, 1991; Koichi ve Yajima, 1991) . Silindirle sıkıştırılmış baraj yönteminde silindirle sıkıştırılmış beton tasarımı için 2 kriter belirtilmiştir;

- Çimento miktarı, istenilen dayanımı elde etmek şartıyla olabildiğince düşük tutulmalıdır. Karışımın hidrasyon ısını azaltmak için ise uçucu kül kullanılması tercih edilmelidir.
- Segregasyonu azaltmak için ve sıkışmanın en ideal olabilmesi için kum/agrega oranı standart kütle betonu oranına göre daha fazla olması gereklidir.

Silindirle sıkıştırılmış baraj yönteminde, Ve-Be deney aparatına benzer özelliklere sahip kıvam ölçer aletleri kullanılmakta olup karışımın üst yüzeyinde harç görünene kadar vibrasyon işlemi uygulanmaktadır. Bu yöntemin tasarımında, yapımında kullanılan kıvam test cihazlarının diğer cihazlara benzer olmamasından dolayı Japonya haricinde fazla uygulanmamakta olup genellikle Japonya tarafından kullanılan yöntemdir. Bu yüzden bu yönteme bazı kaynaklarda Japon yöntemi de denilmektedir.(Scanlon et al. 1999).

#### **1.2.4 Silindirle sıkıştırılmış beton karışım tasarımı**

Daha önce belirtildiği gibi silindirle sıkıştırılmış beton tıpkı geleneksel beton gibi iri ve ince agregası, bağlayıcı malzeme, su ve gerektiği zaman kimyasal katkı malzemeleri kullanılarak üretilmektedir. Geleneksel betonda olduğu gibi silindirle sıkıştırılmış beton karışımı için doğru içerik seçilmesi oldukça önemlidir. Silindirle sıkıştırılmış beton geleneksel betona göre daha az çimento ve su içermekte olup aksine hacimce daha fazla agregası içermektedir. SSB karışım malzemeleri aşağıda detaylı bir şekilde verilmiştir.

##### **1.2.4.1 Bağlayıcı malzeme**

Silindirle sıkıştırılmış betonda bağlayıcı malzeme olarak çimento, TS EN 197-1'e uygun çimento tiplerinden herhangi biri ile yapılacağı iklim ve inşaat koşulları dikkate alınarak uygulanmaktadır. Geleneksel beton gibi çoğunlukla CEM I ve CEM II tipi çimentolar kullanılmakta olup beton üretim tesislerinde mineral katkıları özellikle çimentoya ikame olarak uçucu kül, cüruf gibi malzemelerde kullanılabilmektedir. Kullanılan bu mineral katkıları beton dayanımını artırmakta olup uçucu külün betonda işlenebilirliği olumlu yönde etkilediği bilinmektedir.

Geleneksel betonda olduğu gibi SSB karışımlarında da uçucu kül dışında silis dumanı ve cüruf da kullanılmaktadır. Silis dumanı da tıpkı cüruf ve uçucu kül gibi betonun işlenebilirliğini azaltarak dayanımını arttırmaktadır. Fakat silis dumanı betonun

işlenebilirliğini azalttığı için zor bir sıkışma sağladığından SSB için kullanımı genellikle önerilmemektedir.

#### **1.2.4.2 Agregalar**

Silindirle sıkıştırılmış betonun hacimce %85'ini iri ve ince agregalar oluşturur. Bu sebeple agreganın kalitesi ve dağılımı; SSB'nin işlenebilirliği, dayanımı gibi önemli özelliklerini etkilediğinden oldukça önemlidir. Taze betonun en rijit kısmını agrega fazı oluşturmaktadır. SSB karışımında genelde maksimum dane boyutu 19 mm ile 25 mm arasında tercih edilmektedir. SSB'nin ayrışmasını azaltmak ve sıkışmayı arttırmak için geleneksel betona göre daha ince agrega kullanılabilir. SSB'de kullanılan bu ince agregalar, agrega kenetlenmesini artırarak agregalar arası sürtünmeyi arttırmaktadır. Bu durum SSB'de dayanım açısından olumlu etki sağlandığı düşünülmektedir.

#### **1.2.4.3 Su**

Geleneksel betonda olduğu gibi SSB karışımında da suyun bazı kimyasallardan ve minerallerden arındırılmış olması gerekmektedir. SSB karışımı için gerekli olan su TS EN 1008 standardına uygun olmalıdır. SSB; kalıp gerektirmeden serilecek ve ağır silindirler altında formunu koruyarak sıkışacak kadar kuru, homojen dağılıma sahip bir beton elde edilecek kadar da ıslak olmalıdır. SSB'de sıkıştırılmalı konsolidasyon için kuvvet doğrudan betona uygulandığı için su miktarının çok olması beklenmez. Geleneksel beton taze halinde ise aksine vibratörlü konsolidasyonda betonun homojenliği ve içerisinde bulunan hava kabarcıklarının absorbe edilmesi gerektiğinden su miktarının çok olması gerekmektedir. Dolayısıyla geleneksel betona göre SSB daha az miktarda su içermektedir(Öztürk 2018).

#### **1.2.4.4 Kimyasal katkıları**

Beton karışımının oranına ve ihtiyacına göre kullanılacak kimyasal katkıları seçilmektedir. SSB geleneksel betona göre daha kuru ve sert kıvama sahip olduğu için genellikle kimyasal katkı kullanılması gerekmektedir. SSB hamurunun slump değeri düşük olduğu için işlenebilirlik süresi bir saatten az olması beklenmektedir(Öztürk 2018). Uygulamalarda işlenebilirliği arttırmak için akışkanlaştırıcılar kullanılmaktadır. Chhorn ve Lee (2017b) yaptıkları çalışmada silindirle sıkıştırılmış betonda süperakışkanlaştırıcı katkı malzemesi kullanarak işlenebilirlik süresini 50 dakikadan 4 saate çıkabildiğini tespit etmiştir. Geleneksel betonda olduğu

gibi SSB’de de priz geciktiriciler kullanarak sıkıştırma süresi arttırılabilmektedir. Priz hızlandırıcılar ise soğuk hava döküm şartlarında ve yapının kullanıma daha hızlı açılmasında kullanıldığı bilinmektedir. Silindirle sıkıştırılmış beton donma-çözülme direnci uygun olduğundan hava sürükleyici katkıları genellikle kullanılmaz.

### **1.3 Plastik Atıklar**

Plastikler yenilemeyen bir kaynak olan hammaddesi petrole dayalı bir malzemedir. Dünya üzerinde üretilen plastikler genellikle tek kullanımlık üretilirken yaklaşık yarısı atık olarak çöpe gitmektedir. Bir plastik atığın doğada kaybolma süresi 1000 yıl kadar sürmektedir. Atıkların çevreye, doğaya verdiği tahribat gereği değerlendirilmesi gerekir. Plastik atıklar yakılarak, topraklanarak ve geri dönüştürülerek değerlendirilebilir. Üretimde maliyet ve ekonomik olmasından dolayı geri dönüşüm oldukça önemli olmakla birlikte ekolojik dengeyi korumak ve sürdürülebilirliği sağlamak için hammadde ihtiyacını gidererek atıkların geri dönüşümü ve kazanılması önemlidir. Ülkemizde 2018 yılından itibaren “Sıfır Atık” projesi (<https://sifiratik.gov.tr/>) kapsamında çalışmalar yapılarak atıkların değerlendirilmesi açısından önemli projeler hayata geçmiştir.

#### **1.3.1 Plastik atıkların geri dönüşümü ve beton içerisinde kullanımı**

Plastik atıkların geri dönüşümü için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Atık plastiklerin geri kazanımında her sektörün etkisi olduğu gibi inşaat ve yapı sektöründe de kullanımı için araştırmalar yapılmaktadır. Plastikler kendi içerisinde PVC, polietilen (PE), polipropilen (PP), polietilen tereftalat (PET) ve naylon gibi çeşitlere ayrılmaktadır.

Shilpi et al, inşaatte geri dönüştürülmüş malzemelerde PET şişelerin kullanılmasıyla, çok düşük maliyetli konutlarda termal konforun sağlanabileceği ve ısıtma ve soğutma sistemlerini satın almaya ve çalıştırmaya gücü yetmeyenler için konut sakinlerine fayda sağlayabileceği sonucuna varmıştır.

Harini ve Ramana (2015), beton karışımlarında sırasıyla ince agrega ve çimento olarak plastik atık ve silis dumanının değiştirilmesinin etkisini incelemiştir. Plastik atık betonda ağırlıkça %5, %6, %8, %10, %15, %20 ve silis dumanı ağırlıkça %5, %10, %15 oranlarında değiştirilmiştir. Tüm ikame seviyelerinde işlenebilirlik derecesinin yüksek olduğunu bildirmişlerdir. İnce agrega olarak plastik atıkların tüm ikame

seviyelerinde, kontrol karışımına kıyasla basınç dayanımında yaklaşık %10'luk marjinal bir azalma gösterdiği belirtilmiştir(Ananthi 2017).

Salemi ve Behfarnia, polipropilen (PP) lifler ve nano malzemeler, yani silika ve alümina içeren beton kaplamanın donma direncini ve basınç dayanımını değerlendirdi. Test sonuçlarına göre, nano malzemelerin eklenmesi, beton kaplamanın donma direncini iyileştirmede PP fiberlere kıyasla daha etkiliydi.

Patil et al. (2016), % 1, % 2 ve % 3 oranında çimento içeren plastik atık lifler içeren beton numunelerini basınç dayanımı, yarma çekme dayanımı ve eğilme dayanımı açısından test etmiştir. Basınç dayanımında %13 artış olurken, ayırık çekme ve eğilme dayanımı sırasıyla %38 ve %65 arttı.

Peliser et al. (2015), betonun farklı hacim fraksiyonlarını değiştirmek için farklı uzunluktaki PET lifleri kullanmış ve 28 günlük kütleme ile tokluk indeksinin %0.18 ve %0.3 arttığını bulmuştur.

Tharini ve Nishanthi (2018), ince agregayı %5 ila %15 betonla, %2,5 artışla HDPE ve LDPE ile ve çimentoyu %2 polipropilen liflerle değiştirerek deney yaptılar. %10 ince agrega ikamesi için hem HDPE hem de LDPE'de basınç dayanımında, yarık çekme dayanımında ve eğilme dayanımında maksimum artış gözlemlenmiştir.

Ananthi et al. (2017) beton numunelerini %0,3, %0,6, %0,9 ve %1,2 plastik liflerle basınç dayanımı ve çekme dayanımı açısından test etmiştir. Plastik lifler, plastik kapların ince dikdörtgen şeritler halinde elle kesilmesiyle yapılmıştır. %0.9 plastik lifler için mukavemette maksimum artış gözlemlendi. 28 günün ardından basınç dayanımı %28.5, çekme dayanımı %54,4 arttı.

Subramani ve Pugal (2015), geleneksel iri agrega yerine plastik atık kullanımının beton karışımlarının fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirdiğini bildirmiştir. Betonun basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarma çekme dayanımının %15 ikame seviyesinde kontrol betona göre %8, %5 ve %3 oranında arttığı bildirilmiştir.

Irvan et al. (2013) atık PET şişelerden %0,5, %1 ve %1,5 öğütülmüş PET lifleri ekleyerek beton numuneleri hazırlamıştır. %1.5 PET lifleri için, 28 gün sonra basınç dayanımı %17.65 azaldı, ancak çekme dayanımı %23.6 arttı.

Kandasamy ve Murugesan (2011), çimento ağırlığına göre %0,5 oranında polietilen lif ilavesinin betonun basınç ve çekme dayanımı üzerindeki etkisini gözlemlemişlerdir.

Normal betonun kontrol numunesine kıyasla basınç dayanımı %5,12, çekme dayanımı ise sadece %1,63 artmıştır(Patel et al. 2014).



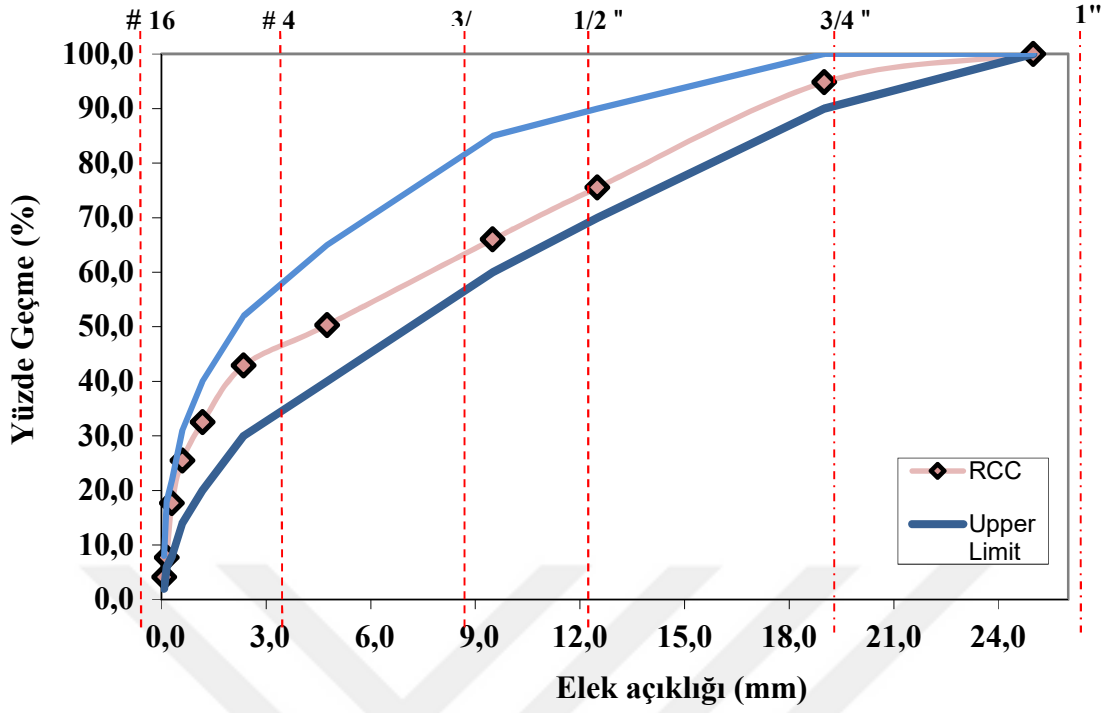
## 2. MATERYAL VE METOD

### 2.1 Deneyde Kullanılan Malzemeler

Silindirle sıkıştırılmış betonda kullanılacak malzemeler geleneksel beton ile çoğunlukla benzer olup agrega gradasyonunda farklılıklar içerebilmektedir. Bu çalışmada iri agrega olarak kalker taneli kırmataş, ince agrega olarak nehir kumu kullanılmıştır. Ayrışmayı önlemek için maksimum agrega boyutu 26 mm olarak belirlenmiştir. Agregalar karışıma eklenmeden önce mutlaka hava kurutma işlemiyle organik bileşenlerinden ayrılacaktır. Çizelge 2.1 ve Şekil 2.1’de agregaların malzeme özelliklerini ve birleşik gradasyon eğrilerini göstermektedir.

**Çizelge 2.1 : Agreganın malzeme özellikleri.**

| Malzeme Özelliği                    | İnce Agrega (FA) | İri Agrega (CA) |
|-------------------------------------|------------------|-----------------|
| İncelik modülü                      | 2,63             | -               |
| Spesifik yer çekimi                 | 2,64             | 2,74            |
| Hacim, %                            | 7,6              | -               |
| Silt İçeriği, %                     | 0,75             | -               |
| Su emme (ASTM C138), %              | 1,1              | 2,4             |
| Los Angeles aşınması (ASTM C131), % | 21               | 24              |
| Toplam Nem, %                       | 0,12             | 0,38            |



**Şekil 2.1 : Agregaların birleşik derecelendirme eğrileri.**

Beğleyici malzeme olarak EN 197 standardına uygun CEM I tipi portland çimentosu kullanılacaktır. Çimentoya ait olan fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 2.2’de verilmiştir.

**Çizelge 2.2 : Çimento fiziksel ve kimyasal Özellikler.**

| Kimyasal Özellikler                   | Fiziksel Özellikler |
|---------------------------------------|---------------------|
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>        | 3,52                |
| CaO                                   | 60,24               |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>        | 4,39                |
| SO <sub>3</sub>                       | 2,64                |
| MgO                                   | 2,39                |
| Serbest CaO                           | 1,73                |
| Kızdırma Kaybı                        | 2,92                |
| Özgül Ağırlık                         | 3,11                |
| Özgül Yüzey Alanı, cm <sup>2</sup> /g | 3675                |
| Priz süresi<br>(başlangıç,bitiş),dk   | 175-225             |

Geri dönüştürülmüş atıklardan poliropilen hammaddeli yaklaşık 2-3 mm aralıklarında plastik fiberler kullanılacaktır. Plastik fiberlere ait malzeme özellikleri ve görüntüsü Çizelge 2.4 ve Şekil 2.2’de verilmiştir. Karışımda kullanılacak olan su ise içilebilir su olarak belirlenmiştir.

**Çizelge 2.3 : Plastik fiberlerin malzeme özellikleri.**

| Özellik                       | Değeri                              |
|-------------------------------|-------------------------------------|
| Plastik türü                  | Polipropilen                        |
| Geri dönüşüm prosedürü        | Eridikten sonra fibere bölüm işlemi |
| Uzunluk (mm)                  | 2-3                                 |
| En-Boy Oranı                  | 14                                  |
| Plastiğin kökeni              | -                                   |
| Şekil                         | Karaman, Türkiye                    |
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | 0,93                                |
| Erime Noktası (C°)            | 165-175                             |
| Çekme mukavemeti (MPa)        | 345-395                             |



**Şekil 2.2 : Geri dönüştürülmüş plastik fiberler.**

## 2.2 Yöntem

Tüm karışımlarda yapılan standart proktor deneylerine göre 5,47 kg çimento ve 2,19 kg su sabit tutularak su/çimento oranı 0,4 olarak belirlenmiştir. Agrega miktarı 39,48 kg olarak sabit alınmıştır. Plastik fiberler ise karışım başlangıcı %0 olarak başlayarak her bir karışımda sırası ile %2,5, %5, %7,5, %10 şeklinde belirlenmiş ve karışıma eklenmiştir. Basınç dayanımının belirlenmesinde “TS EN 12390-3 Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3:Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini” standardı kullanılmıştır. Eğilme dayanımında ise “TS EN 12390-5 Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri Bölüm 5- Deney Numunelerinde Eğilme Dayanımının Tayini”

kullanılmıştır. Karışım sırasında mikser hızı 250 devir/dk olarak sabitlenip homojen bir karışım elde edilmesine dikkat edilmiştir. Tüm mekanik testler 28 gün sonundaelde edilen veriler ile en uygun karışım sonucu elde edilen değerler tartışmaya açılmıştır.

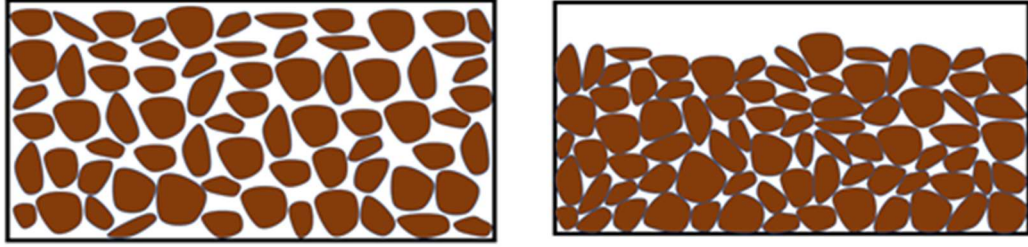


### 3. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

#### 3.1 Betonda Kompaksiyon

Kompaksiyon; genellikle dolgu yapımına ihtiyaç duyan yapıların oturabileceği zemini iyileştirmek için su içeriği değiştirilmeden sıkıştırılarak hava boşluğunun minimum seviyeye indirilme işlemidir. Bir başka deyişle mekanik yük etkisi altında maksimum yoğunluk elde ederek dayanımı arttırmaktır. Bu yöntem ile yapı için ihtiyaç duyulan zemin oluşturulmuş olmaktadır.

Kompaksiyon, yapılan zeminin dayamıklılığını ve yük taşıma kapasitesini arttırmaktadır. Hacim değişikliklerini önleyerek, hidrolik geçirgenliği ve zemin oturma problemlerini azaltmaktadır.



**Şekil 3.1 : Sıkışmamış ve sıkışmış toprak temsili.**

Beton için Çine Barajı gibi önemli çalışmaları sunan Ernest Scharder 1992 yılında gerçekleştirdiği araştırma neticesinde SSB için maksimum sıkışma %98 olması gerektiğini sunmuş fakat daha sonraki yaptığı çalışmalarda %96'nın yeterli olabileceğini söylemiştir(Yetim and Yılmaz 2016).

SSB sıkışması genellikle önce lastik tekerlekli silindirler ile taze betonu titreşime hazırlayarak sıkıştırılır. SSB için iyi bir sıkışma iyi bir mukavemet demektir. Daha sonra ise vibrasyonlu çelik tamburlu silindirler ile sıkışma işlemine devam edilir. SSB için sıkışma işlemi BSK kaplamalar ile benzerdir.

##### 3.1.1 Standart kompaksiyon deneyi

Laboratuvar ortamında kompaksiyon deneyi için standart proktor deneyi yapılır. Standart proktor deneyi, zeminin en ideal su muhtevasını ve buna karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlığını hesaplamada kullanılan bir deneydir. Standart

proktor deneyi, 2,5 kg proktor çekici ile 1000 ml hacmindeki kaba 3 katman olacak şekilde her bir katmanda bulunan numuneye 30 cm yükseklikten homojen bir şekilde 25 vuruş darbe ile yapılmaktadır.



Şekil 3.2 : Proktor deney harç malzemeleri.



Şekil 3.3 : Standart proktor deneyi yapımı.

### 3.1.2 Plastik fibersiz karışım numunesinin hazırlanması ve basınç deneyi

Proktor Deneyi sonucu belirlenen su içeriğine ve SSB prosedürlerini (ACI 211.3R, ACI 207.5R ve ACI 325.10R) dikkate alarak karışım reçetesi hazırlanmıştır. Hazırlanan bu reçete kapsamında karışım %0 fiber için numune 30 cm x 15 cm silindir numune kabına yerleştirilmiştir.



**Şekil 3.4 :** Silindir numune kalıbı.



**Şekil 3.5 :** Hazırlanan taze beton karışımı.



**Şekil 3.6 : Numune kalıplama.**

Bu çalışmada istenilen sıkışmayı sağlamak için 1870 vuruş/dk'lık hilti ile katman şeklinde uygulanmıştır.



**Şekil 3.7 : Hilti (1870 vuruş/dk.).**



**Şekil 3.8 :** 4 Katman yerleştirip sıkıştırılması tamamlanmış numune.

Sıkıştırılması tamamlanmış 4 silindirik numune priz alması için 28 gün bırakılmış ve her numune 28 gün sonunda basınç dayanımı için teste tabi tutulmuştur.



**Şekil 3.9 :** 28 Günlük basınç deneyi.

### **3.1.3 Plastik fiber katkılı karışım numunelerinin hazırlanması ve basınç deneyi**

Çimento, su ve agrega miktarını sabit tutup her bir deneyde plastik fiber miktarını %2,5 (0,137 kg), %5 (0,273 kg), %7,5 (0,410 kg) ve %10 (0,547 kg) miktarı alıp karışıma eklenmiştir. Her bir karışımdan 4 silindirik numune alınmıştır.



**Şekil 3.10 : Tüm silindir numuneler.**

28 gün sonucunda ise tüm numunelere basınç testi yapılarak plastik fiberin basınç etkisi tartışılmıştır.



**Şekil 3.11 : Basınç testi yapılan plastik katkılı numune.**



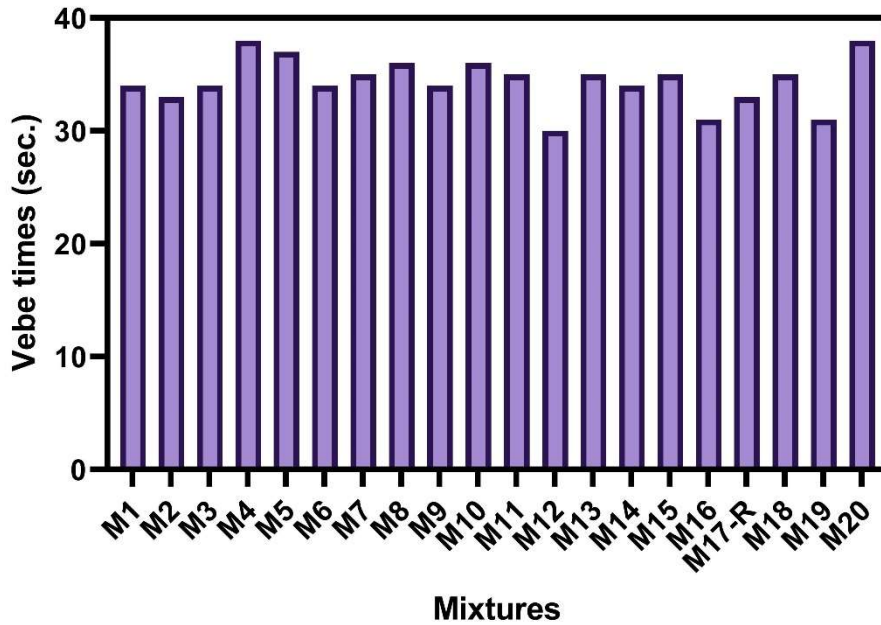
**Şekil 3.12 : Kırımı tamamlanmış numune parçası.**



## 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

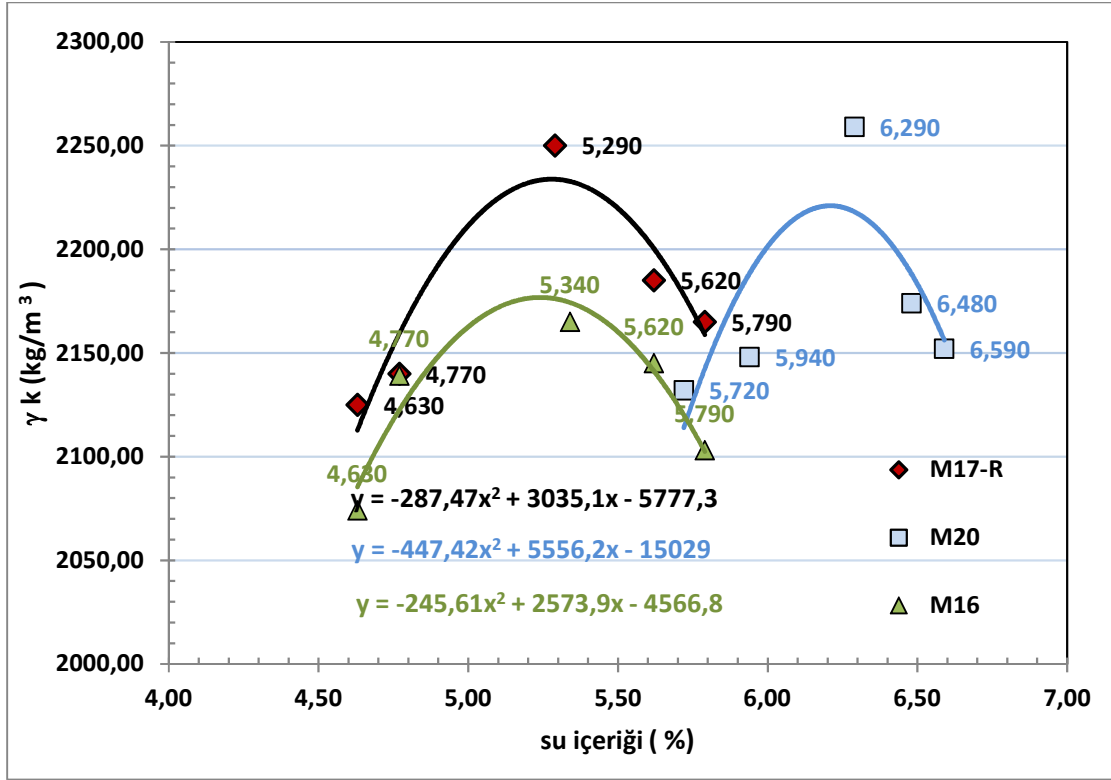
### 4.1 Deneysel Sonuçlar

SSB karışımlarının Vebe testi sonuçları Şekil 4.1’de görülmektedir. Tüm karışımlar ASTM C1170 standardına göre kabul edilebilir sonuçlara sahip çıkmıştır. Sonuçlardan görüldüğü gibi betona plastik fiber eklenmesi şaşırtıcı olmayan bir şekilde fiberlerin karışımların kıvamını olumsuz etkilemesi nedeniyle Ve-be süresini önemli ölçüde arttırmaktadır(Rooholamini, Hassani, and Aliha 2018). Plastik fiber içeriği %0 olan referans numune örneği, çökme olmayan karışımlar için uygun ve en iyi performansı göstermektedir.



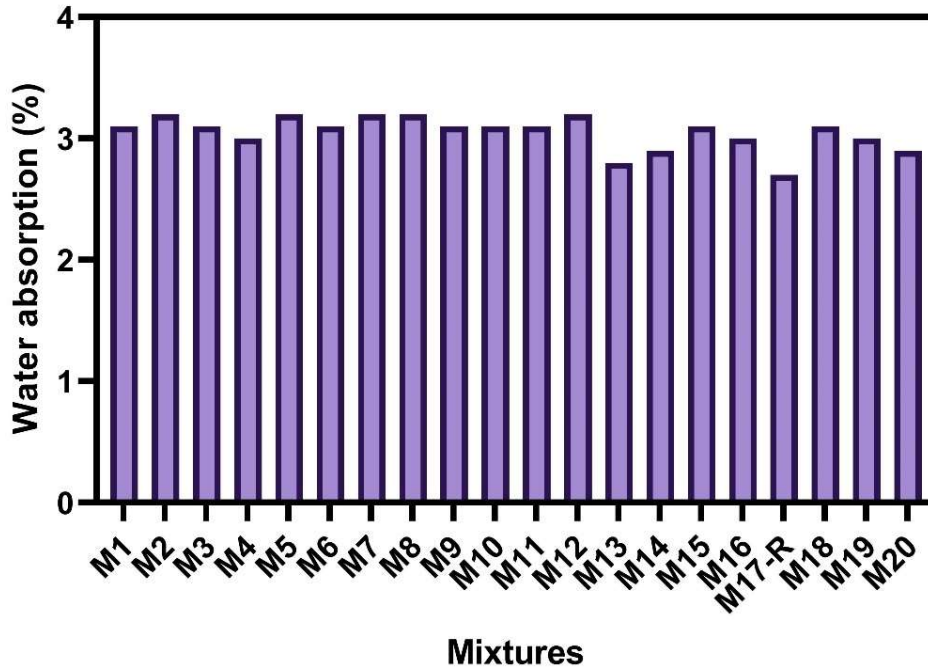
Şekil 4.1 : Karışımların Vebe süreleri.

SSB karışımlarının optimum su içeriği ve kuru yoğunluk etkileşimleri Şekil 4.2’de sunulmaktadır. Fiberin en iyi sonuçlarını anlamak için M16, M17-R ve M20 örnekleri seçilmiştir. Proctor deney test yöntemine göre test sonuçları %5,29 ile %6,27 arasında değişmektedir. Sonuç olarak elde edilen verilerin ACI 207’ye göre kabul edilebilir limitler içerisinde olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.2 : Optimum su içeriği ve yoğunluk etkileşim grafiği.

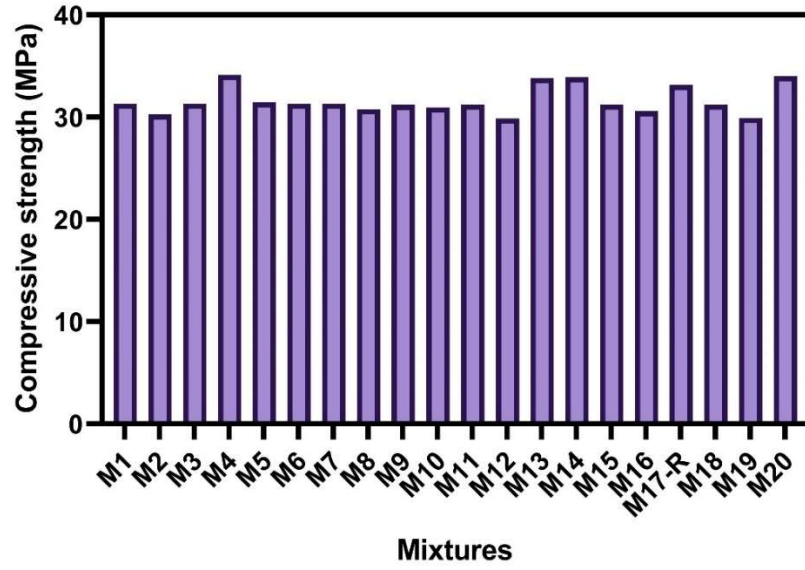
Şekil 4.3’de karışımların su emme oranlarını göstermektedir. Görüldüğü üzere M17-R (referans) numunesi Vebe deneyleri sonucunda %2.7 absorpsiyon oranı ile en iyi performansı göstermektedir.



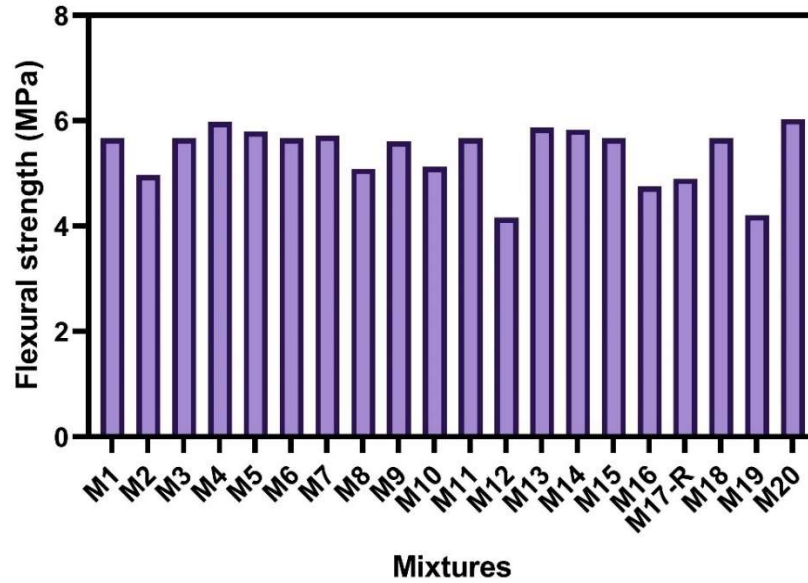
Şekil 4.3 : Su emme testi sonuçları.

28 günlük numuneleri basınç ve eğilme mukavemeti testi sonuçları Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de sunulmaktadır. SSB karışımlarda plastik fiber kullanımı referans katkısız SSB’ye göre hacimce %1.0’a kadar plastik fiber kullanımının basınç dayanımını olumsuz etkilediği görülmektedir.

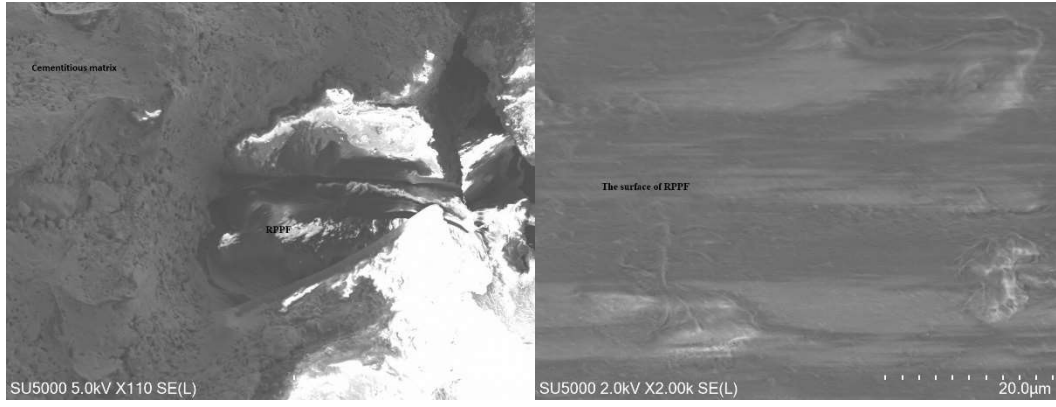
28 günde, eğilme mukavemeti testi sonuçları ise 4.16 MPa ile 6.03 MPa arasında değiştiği görülmüştür. Plastik fiber katkılı numuneler beklendiği gibi eğilme mukavemetlerini %23’e kadar arttırdı. Ayrıca %1.0’a kadar plastik fiber eklenmesi sonucunda eğilme mukavemetlerinde herhangi bir azalma gözlenmemiştir. Bu durum fiber uzunluğunun etkisiyle olduğu söylenebilir. 50 ve 60 mm uzunluğunda plastik fiberler kullanıldığında fiber içeriği %0’dan %1’e yükseldiğinde betonun eğilme dayanımı büyük ölçüde değiştirmedeği görülmüştür.



Şekil 4.4 : Basınç dayanımı test sonuçları.



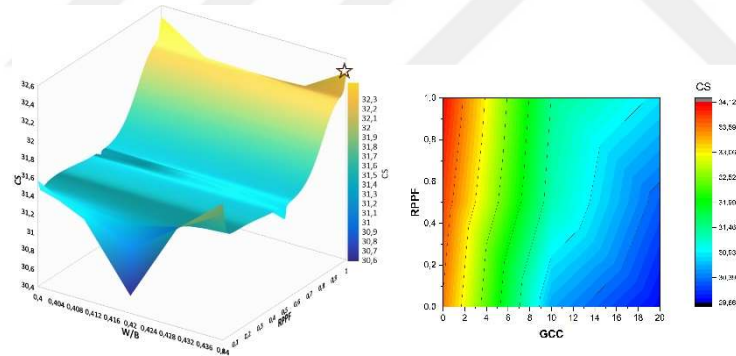
Şekil 4.5 : Eğilme dayanımı test sonuçları.



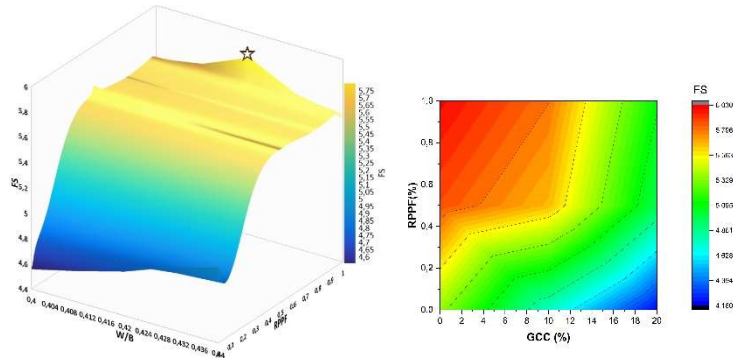
**Şekil 4.6 :** SEM örneğinin görüntüsü.

Şekil 4.6’da SEM görüntüsü gösterilmektedir. Plastik fiber(RPPF), iyi ankraja sahip beton matris ile belirgin bir etkileşim göstermektedir.

RSM yönteminin sonuçlarına göre beton basınç ve eğilme dayanımları için yüzey tepki çizimleri Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de verilmiştir. Bu diyagramda mavi bölgelerin düşük mukavemeti, kırmızı bölgelerin yüksek mukavemeti, turuncu yıldızın maksimum mukavemet noktalarını gösterdiği ilgili mukavemet tepkileri üzerindeki etkileşimlerin varyasyonlarını gösterir. Artan plastik fiber(RPPF) içerikleri ile basınç dayanımı ve eğilme mukavemetinin arttığı gözlemlendi.



**Şekil 4.7 :** Basınç dayanımı için tepki yüzey grafiği.



**Şekil 4.8 :** Eğilme mukavemetleri için tepki yüzey grafiği.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada atıkların plastiklerin fibere dönüştürülerek SSB içerisindeki mekanik davranışları incelenmiştir. Ayrıca su/çimento oranı plastik fiberin etkileri de RSM tabanlı bir optimizasyon aracıyla değerlendirilmiştir. 28 günlük basınç ve eğilme dayanımları değerlendirilerek plastik fiberin yapmış olduğu katkı değerlendirilmiştir. Buna göre;

- Plastik fiber eklenmesi SSB karışım içerisinde su ihtiyacını arttırmadığı tespit edilmiş ve işlenebilirliğe çok fazla değiştirmedeği görülmüştür olmadığı gözlemlenmiştir.
- Plastik fiber ilaveleri matristeki fiber ağ oluşumları nedeniyle silindirle sıkıştırılmış beton karışımlarında Vebe deney sürelerini uzattığı tespit edilmiştir.
- Hacimce %1'e varan plastik fiber katkısı silindirle sıkıştırılmış beton (RCC) karışımlarının basınç dayanımını iyileştirdiği tespit edilmiştir.

SSB içinde basınç dayanımı en etkileyen fiber çelik olup, plastik fiberinde kullanılabileceği öngörülmüştür. Maliyet açısından değerlendirilirse plastiğin çeliğe göre daha kolay erişimi ve uygun maliyeti sayesinde SSB için bir tercih nedeni olabildiği görülmektedir.

SSB gelişmiş ülkelerde diğer ülkelere göre kullanımı öne çıkmakta olup daha az çimento ve maliyet ile yol, baraj, havaalanı gibi yapılarda kullanıldığı bilinmektedir. Çevre dostu olan SSB'nin geri dönüşümün ve sürdürülebilirliğin en ön malzemelerinden olan plastik kullanımı ile pekiştirilerek daha yaygınlaşması gerektiği görülmektedir.

Elde edilen veriler doğrultusunda atık plastik yönetiminde geri dönüşüm için iyi bir reçete elde edilerek plastiklerin yerinde silindirle sıkıştırılmış betonda kullanılabileceğini rahatlıkla söyleyebiliriz.



## KAYNAKLAR

- ACI 207.5R-11. (2011). *Report on Roller-Compacted Mass Concrete*.
- Adresi, M., Lacidogna, G. (2021). Investigating the micro/macro-texture performance of roller-compacted concrete pavement under simulated traffic abrasion. *Applied Science*. <https://doi.org/10.3390/app11125704>.
- Ahmadi, M., Shafabakhsh, G. A., Hassani, A. (2021). Fracture and mechanical performance of Two-Lift Concrete Pavements made of Roller Compacted Concrete and Polypropylene Fibers. *Construction Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121144>.
- Ananthi ve Arunachalam. (2017). Utilization of Waste Plastics as a Fiber in Concrete. *International Journal of Concrete Technology*. <https://www.researchgate.net/publication/321049688%0AUtilization>.
- Algin, Z. ve Gerginci, S. (2020). Freeze-thaw resistance and water permeability properties of roller compacted concrete produced with macro synthetic fibre. *Construction Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117382>.
- ASTM C131-12. (2012). *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large -Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine* <https://doi.org/10.1520/C0131>.
- ASTM:C138. (2013). ASTM C138: Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric), *ASTM C1435/C1435M – 20: Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer*.
- ASTM C1170/C1170M- 14, ASTM C1170. (2014). *Standard Test Method for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table 1* <https://doi.org/10.1520/C0138>.
- ASTM D1557. ASTM, D1557-12, (2012). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort, ASTM International*.
- ASTM C131-12. (2012). *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large -Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine* <https://doi.org/10.1520/C0131>.
- ASTM:C138. (2013). ASTM C138: Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric), *ASTM C1435/C1435M – 20: Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer*.
- ASTM C1170/C1170M- 14, ASTM C1170. (2014). *Standard Test Method for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table 1* <https://doi.org/10.1520/C0138>.

- ASTM D1557. ASTM, D1557-12, (2012). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort*, ASTM International.
- ASTM-C642. ASTM C642-13. (2013). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*.
- Bayqra, S. H., Mardani, A., Aghabaglou, Ramyar, K. (2022). Physical and mechanical properties of high volume fly ash roller compacted concrete pavement. *Construction Building Materials*.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125664>.
- Benouadah, A., Beddar, M., Meddah, A. (2017). Physical and mechanical behaviour of a roller compacted concrete reinforced with polypropylene fiber. *Journal Fundamentals Applied Science*.  
<https://doi.org/10.4314/jfas.v9i2.1>.
- Calis, G., Yıldız, S.A., (2019). Investigation of Roller Compacted Concrete: Literature Review. *Challenge Journal of Concrete Research Letters*.
- Calis, G., Yıldız, S. A., Erzin, S., Tayeh, B. A. (2021). Evaluation and optimisation of foam concrete containing ground calcium carbonate and glass fibre (experimental and modelling study). *Case Studies Construction Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00625>.
- Daou, H., Rapahel, W. (2021). Identifying the weight of factors affecting creep of concrete using factorial anova. *Engineering Materials*.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.872.21>.
- Debbarma, S., Ransinchung, G.D. (2021). Achieving sustainability in roller compacted concrete pavement mixes using reclaimed asphalt pavement aggregates—state of the art review. *Journal Cleaner Production*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125078>.
- Engin, Y., Gökalp, İ., Önkol, E., Ağaç, H., Ekim, H. (2019). Türkiye’de Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yol Uygulamaları.
- Ertan, Y. ve Yılmaz, D. (2016). *Beton Yollar ve Silindirle Sıkıştırılmış Betonun Türkiye’deki Yeni Uygulama Alanı*.
- Fraternali, F., Ciancea, V., Chechile, R., Rizzano, G., Feo, L., Incarnato, L. (2021). Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete. *Composite Structures*.  
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.03.025>.
- Fu, S. Y., Lauke, B., Mäder, E., Yue, C. Y., Hu, X. (2000). Tensile properties of short-glass-fiber- and short-carbon-fiber-reinforced polypropylene composites. *Composite Part A Apply Science Manufacturing*.  
[https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00068-3](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00068-3).
- Gao, L., Adesina, A., Das, S. (2021). Properties of eco-friendly basalt fibre reinforced concrete designed by Taguchi method. *Construction Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124161>.
- Gertsakis, J., Lewis, H. (2003). Sustainability and the Waste Management Hierarchy. *EcoRecycle Victoria*.
- Gu, L., Ozbakkaloglu, T. (2016). Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management*.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.005>.

- Han, C. G., Hwang, Y. S., Yang, S. H., Gowripalan, N. (2005). Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement. *Cement Concrete Research*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.013>.
- Hansen, K.D., Reinhardt, W.G. (1991). Roller-Compacted Concrete Dams. New York: McGraw-Hill.
- Hesami, S., Modarres, A., Soltaninejad, M., Madani, H. (2016). Mechanical properties of roller compacted concrete pavement containing coal waste and limestone powder as partial replacements of cement. *Construction Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.116>.
- Karahan, O., Atiş, C.D. (2011). The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. *Materials Des.* <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.07.011>.
- Karadelis, J. N., Lin, Y. (2015). Flexural strengths and fibre efficiency of steel-fibre-reinforced, roller-compacted, polymer modified concrete. *Construction Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.059>.
- Koichi, U. ve Yajima, K. (1991). Miyagase Dam to Employ Innovative RCD Methods. *Water Power & Dam Construction*.
- Kim, S. B., Yi, N. H., Kim, H. Y., Kim, J. H. J., Song, Y.C. (2010). Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. *Cement Concruction Composition*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.11.002>.
- LaHucik, J., Dahal, S., Roesler, J., Amirkhanian, A.N. (2017). Mechanical properties of roller-compacted concrete with macro-fibers. *Construction Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.212>.
- Lee, S., Jeon, M. J., Cha, S. S., Park, C. G. (2017). Mechanical and permeability characteristics of latex-modified fiber-reinforced roller-compacted rapid-hardening-cement concrete for pavement repair. *Applied Science*. <https://doi.org/10.3390/app7070694>.
- Lertwattanaruk, P., Makul, N. (2021). Influence of ground calcium carbonate waste on the properties of green self-consolidating concrete prepared by low-quality bagasse ash and rice husk ash. *Materials (Basel)*. <https://doi.org/10.3390/ma14154232>.
- Li, L. G., Zhao, Z. W., Zhu, J., Kwan, A. K. H., Zeng, K. L. (2018), Combined effects of water film thickness and polypropylene fibre length on fresh properties of mortar, *Construction Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.259>.
- Li, Y., Liu, X., Yuan, J., Wu, M. (2015). Toughness improvement of epoxy resin mortar by incorporation of ground calcium carbonate. *Construction Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.054>.
- Lü, Z. Z., Zhao, J., Yue, Z. F. (2007). Advanced response surface method for mechanical reliability analysis. *Apply Matherials Mechanical*. <https://doi.org/10.1007/s10483-007-0103-x>.

- López-Buendía, A. M., Romero-Sánchez, M. D., Climent, V., Guillem, C. (2013). Surface treated polypropylene (PP) fibres for reinforced concrete. *Cement Concrete Research*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.08.004>.
- Marchand, J., Hornain, H., Diamond, S., Pigeon, M., Guiraud, H. (1996). The microstructure of dry concrete products. *Cement Concrete Research*. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(96\)85030-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(96)85030-7).
- Mardani-Aghabaglou, A., Andiç-Çakir, Ö., Ramyar, K. (2013). Freeze-thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method. *Cement Concrete Composite*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.009>.
- Mardani-Aghabaglou, A., Bayqra, S. H., Özen, S., Altun, M. G., Faqırı, Z. A., Ramyar, K. (2020). Silindirle Sıkıştırılmış Beton Karışımlarının Tasarım Yöntemleri ve Yapılan Çalışmalar. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*.
- Martínez-Barrera, G., Ureña-Núñez, F., Gencel, O., Brostow, W. (2011). Mechanical properties of polypropylene-fiber reinforced concrete after gamma irradiation. *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.01.016>.
- Maruti, S. V., Krishna, R., Mounesh, M. (2020). Properties of Geopolymer Cement Mortar and Blocks with Calcium Carbonate. *Materials Today Proceeding*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.471>.
- McDonald, L. J., Carballo-Meilan, M.A., Chacartegui, R., Afzal, W. (2022). The physicochemical properties of Portland cement blended with calcium carbonate with different morphologies as a supplementary cementitious material. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130309>.
- McDonald, L. J., Afzal, W., Glasser, F. P. (2022). Evidence of scawtite and tilleyite formation at ambient conditions in hydrated Portland cement blended with freshly-precipitated nano-size calcium carbonate to reduce greenhouse gas emissions. *Journal Building Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2021.103906>.
- Meddah, M. S., Bencheikh, M. (2009). Properties of concrete reinforced with different kinds of industrial waste fibre materials. *Construction Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.017>.
- Minhas, S., Jain, R. (2014). Review on Use of Waste Material in Concrete. *International Journal For Technological Research In Engineering*.
- Modarres, A., Hesami, S., Soltaninejad, M., Madani, H. (2018). Application of coal waste in sustainable roller compacted concrete pavement-environmental and technical assessment. *International Journal Pavement Engineering*. <https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1205747>.
- Moon, H. Y., Jung, H. S., Choi, D. S., Kim, S. S. (2002). Experimental study on using the ground calcium carbonate as a concrete admixture. *Geosystem Engineering*. <https://doi.org/10.1080/12269328.2002.10541190>.
- Nili, M., Afroughsabet, V. (2010). The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete.

- Construcion Building Materials.*  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.025>.
- Ochi, T., Okubo, S., Fukui, K. (2007). Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement Concrete Composite*.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.02.002>.
- Omran, A., Harbec, D., Tagnit-Hamou, A., Gagne, R. (2017). Production of roller-compacted concrete using glass powder: Field study, *Construction Building Materials*.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.099>.
- Öztürk, O. (2018). Mixture Desing and Mechanical Properties of Synthetic Fiber Reinforced Roller Compacted Concrete For Pavements. Istanbul Technical University.
- Rao, S., Sravana, P., Rao, T. C. (2016). Experimental studies in Ultrasonic Pulse Velocity of roller compacted concrete pavement containing fly ash and M-sand Studies in Ultrasonic Pulse Velocity of Roller compacted concrete pavement. *International Journal Pavement Resarch Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.08.003>.
- Rooholamini, H., Hassani, A., Aliha, M. R. M. (2018). Fracture properties of hybrid fibre-reinforced roller-compacted concrete in mode I with consideration of possible kinked crack. *Construction Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.177>.
- Rooholamini, H., Hassani, A., Aliha, M. R. M. (2018). Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology. *Construction Building Materials*.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.002>.
- Scanlon, John M, Glenn S Tarbox, John R Hess, and Allen J Hulshizer. (1999). American Concrete Institute, ACI 207.5R: Roller Compacted Mass Concrete Tilte No. 85-M44; *ACI Materials Journal Committee Report*.
- Scorza, D., Luciano, R., Mousa, S., Vantadori, S. (2021). Fracture behaviour of hybrid fibre-reinforced roller-compacted concrete used in pavements. *Construction Building Materials*.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121554>.
- Sok, T., Kim, Y. K., Park, J. Y., Lee, S. W. (2022). Evaluation of early-age strains and stresses in roller-compacted concrete pavement. *Journal Traffic Transporation Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.04.007>.
- Song, P.S., Hwang, S., Sheu, B.C. (2005) Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes. *Cement Concrete Result*.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.033>.
- Söğüt, S. (2014). State of the Art in Roller Compacted Concrete (RCC) Dams: Design and Construction. Middle East Technical University.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biochi.2015.03.025>  
<http://dx.doi.org/10.1038/nature10402>  
<http://dx.doi.org/10.1038/nature21059>  
<http://journal.stainkudus.ac.id/index.php/equilibrium/article/view/1268/1127>  
<http://dx.doi.org/10.1038/nrmicro2577>

- Suji, D., Natesan, S. C., Murugesan, R. (2007). Experimental study on behaviors of polypropylene fibrous concrete beams. *J. Zhejiang University Science Article*. <https://doi.org/10.1631/jzus.2007.A1101>.
- Sürmeli, A. S. (2002). Silindirle Sıkıştırılmış Ağırlık Beton Barajlar ve Bunların Ağırlık Beton Barajlarla Karşılaştırılması. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Tavakoli, D., Fakharian, P., Brito, J de. (2021). Mechanical properties of roller-compacted concrete pavement containing recycled brick aggregates and silica fume. *Road Materials and Pavement Desing*. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1924236>.
- THBB Beton Yollar Teknik Çalışma. (2003). Beton Yollar.
- Üte, A. Atacan. (2008). Uçucu Kül ve Polipropilen Lif Kullanımının Silindirle Sıkıştırılmış Betonun Özelliklerine Etkisi. Ege Üniversitesi. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7130/1/LUZARDO-BUIATRIA-2017.pdf>.
- Vahedifard, F., Nili, M., Meehan, C. L. (2010). Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement. *Construction Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.003>.
- Vahidi, E. K., Malekabadi, M. M., Rezaei, A., Roshani, M. M., Roshani, G. H. (2017). Modeling of mechanical properties of roller compacted concrete containing RHA using ANFIS. *Computers and Concrete*. <https://doi.org/10.12989/cac.2017.19.4.435>.
- Yaman, İsmail, Ö., Ceylan, H. (2013). Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yollar. *T.H.B.B Hazır beton dergisi*.
- Yazici, Ş. Mardani-Aghabaglou, A., Tuyan, M., Üte, A. A. (2015). Mechanical properties and impact resistance of roller-compacted concrete containing polypropylene fibre. *Magazine of Concrete Research*. <https://doi.org/10.1680/mac.14.00242>.
- Yildizel, S.A., Timur, O., Ozturk, A.U. (2018), Abrasion Resistance and Mechanical Properties of Waste-Glass-Fiber-Reinforced Roller-compacted Concrete. *Mechanical Composite Materials*. <https://doi.org/10.1007/s11029-018-9736-6>.
- Qian, X., Wang, J., Wang, L., Fang, Y. (2019). Enhancing the performance of metakaolin blended cement mortar through in-situ production of nano to sub-micro calcium carbonate particles. *Construction Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.134>.