

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**YOL ÜSTYAPISINDA YARI RİJİT KAPLAMA DİZAYNINDA
KULLANILACAK HARÇ TİPİNİN BELİRLENMESİ**

Mansor NAZARY

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2019

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**YOL ÜSTYAPISINDA YARI RİJİT KAPLAMA DİZAYNINDA
KULLANILACAK HARÇ TİPİNİN BELİRLENMESİ**

Mansor NAZARY

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2019

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YOL ÜSTYAPISINDA YARI RİJİT KAPLAMA DİZAYNINDA
KULLANILACAK HARÇ TİPİNİN BELİRLENMESİ

Mansor NAZARY
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 18/07/2019 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / ~~Oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Sevil KÖFTECİ

Prof. Dr. Serkan TAPKIN

Doç. Dr. İbrahim AYDOĞDU

ÖZET

YOL ÜSTYAPISINDA YARI RİJİT KAPLAMA DİZAYNINDA KULLANILACAK HARÇ TİPİNİN BELİRLENMESİ

Mansor NAZARY

Yüksek Lisans, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Sevil KÖFTECİ

Temmuz 2019; 51 sayfa

Karayollarında her geçen gün araç sayısı artmaktadır, araç sayısının artmasıyla birlikte trafik yoğunluğu da artmakta olup bu durum yol üst yapısında aşırı miktarda zorlamaya neden olmaktadır. Bu sebeple yol yapım çalışmalarında daha dayanıklı, uzun ömürlü ve maliyeti daha etkin yeni yöntem ve teknikler araştırılmaktadır. Asfaltın ve çimento harcın birleşimiyle oluşan yarı rijit kaplama, Marshall karışım dizaynına göre %25-30 hava boşluğu içeren poroz asfalt karışımındaki boşlukların, akışkan çimento harcı ile doldurulması yöntemi ile inşa edilmektedir.

Bu deneysel tez çalışmasının birinci aşamasında, maksimum agrega çapı 0,6 mm olan harç numunelerine, bağlayıcı olarak CEM 1 42.5 R çimentosu kullanılmıştır. İki farklı süperakışkanlaştırıcı kullanılarak iki farklı su/çimento oranlarında harç karışımları üretilmiştir. Üretilen harçların işlenebilirlik, mekanik mukavemet vb özellikleri ayrı ayrı ölçülerek, her bir harç kombinasyonunun özellikleri belirlenmiştir. Bu özelliklere göre en uygun karışım seçilmiştir. İkinci aşamada ise belirlenen en uygun karışım ile poroz asfaltın boşlukları doldurularak, Yarı rijit kaplamanın performansı araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, önerilen harç karışımının poroz asfaltın boşluklarına nüfuz edebilme kabiliyetine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca Yarı rijit kaplama tipi kaplamalar yaygın olarak kullanılan Bitümlü sıcak karışıma göre daha dayanıklı ve daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olduğu kanısına varılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Akışkanlık, Basınç dayanım, Büzülme, Harç, Süperakışkanlaştırıcı Yarı rijit kaplama.

JÜRİ: Doç. Dr. Sevil KÖFTECİ

Prof. Dr. Serkan TAPKIN

Doç. Dr. İbrahim AYDOĞDU

ABSTRACT

DETERMINATION OF CEMENTITIOUS GROUTS FOR SEMI-RIGID PAVEMENTS

Mansor NAZARY

MSc Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sevil KÖFTECİ

July 2019; 51 pages

With the increasing traffic flow and traffic loads, the traditional asphalt pavement and concrete pavement cannot satisfy the pavement requirement in the long term. Therefore, researchers have been looking for new techniques and methods to develop durable and cost-effective pavement structures. The semi-rigid pavement is a composite pavement that is composed of a porous asphalt mixture with air voids between 25-30% and cementitious grout with high fluidity.

This laboratory investigation aims at developing cementitious grout as well as evaluating its contribution in the resultant semi-rigid pavement. In the first phase of this research, different cementitious grout mixtures prepared with the maximum particle size of 0.6mm sand, cement, two types of superplasticizer and two water-cement ratios. Four laboratory tests, including fluidity test, compressive strength test, flexural strength test and drying shrinkage test, were adopted to evaluate the workability and mechanical properties of cementitious grouts. According to these properties, the most suitable mixture is proposed for semi-rigid pavement. In the second phase, the performance of semi-rigid pavement is investigated by applying the proposed cementitious grout to 65 mm porous asphalt specimens. The research concludes that the grout mixture proportion proposed in this study, has good grouting ability and the semi-rigid pavement have superior performances.

KEYWORDS: Cementitious grout, Compressive strength, Drying shrinkage, Fluidity, Semi-rigid pavement, Superplasticizers.

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Sevil KÖFTECİ

Prof. Dr. Serkan TAPKIN

Assoc. Prof. Dr. İbrahim AYDOĞDU

ÖNSÖZ

Türkiye karayolları, yol üst yapısında genellikle bitümlü sıcak karışım kaplamalar uygulanmaktadır. Ancak bitümlü sıcak karışım kaplamalarda yol üst yapısında birçok bozulma meydana gelmektedir. Bu bozulmaların önlenmesi için daha dayanıklı bir kaplama yapılması gerekmektedir. Yapılan tez çalışmasında yeni bir kaplama tipi olan YRK karışımlarda, kullanılan harcın özelliklerinin belirlenmesi konusunda deneyim ve uzmanlık kazanılmasına büyük katkı sağlanacaktır.

Yüksek lisans tez konumun belirlenmesi, yürütülmesi ve tezin yazımı esnasında çalışmalarımı ilgi ile izleyip yön veren, değerli fikir ve katkılarıyla çalışmalarına ışık tutan, bana her türlü desteği sağlayan değerli danışman hocam, Doç. Dr. Sevil KÖFTECİ'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneylerin yapılmasında ve tezin yazımı boyunca yardımlarından dolayı arkadaşlarım Azad DİNLER'e, Dürdane YILMAZ'a Osman SAFAROV'a, Tayfun GÜRCAN'a ve Ahmad Khaled MASBAH'a teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve hep yanımda olan canım aileme yürekten sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	iv
AKADEMİK BEYAN	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	3
2.1. Yarı Rijit Kaplamaların Tarihçesi	3
2.2. Yarı Rijit Kaplamaların Özellikleri	4
2.3. Yarı Rijit Kaplamanın Bileşenleri	5
2.3.1. Poroz asfalt	6
2.3.2. Çimento harcı.....	7
2.4. Yarı Rijit Kaplamaların Avantajları	8
2.5. Literatür Çalışmaları.....	9
3. MATERYAL VE METOT	12
3.1. Yarı Rijit Kaplama Harcının Dizaynı.....	12
3.1.1. Kullanılan malzemeler.....	12
3.1.1.1. Çimento	12
3.1.1.2. Agregas	13
3.1.1.3. Mermer, seramik ve uçucu kül.....	13
3.1.1.4. Karışım suyu	15
3.1.1.5. Kimyasal katkı	15
3.1.2. Metot.....	16
3.1.2. Uygulanan deneyler	18
3.1.2.1. Harç akışkanlık deneyi (Grout flow cone test)	18
3.1.2.2. Basınç dayanımı deneyi	19
3.1.2.3. Eğilme dayanımı	20
3.1.2.5. Büzülme deneyi.....	21
3.2. Yarı Rijit Kaplamanın Dizayn Edilmesi.....	22

3.2.1. Materyal ve metot	22
3.2.2. Yarı rijit kaplamalar üzerinde uygulanan performans deneyleri	23
3.2.2.1. Marshall stabilite ve akma deneyi.....	24
3.2.2.2. İndirekt çekme deneyi	25
3.2.2.3. Basınç dayanım deneyi	25
3.2.2.5. Donma-çözülme deneyi	26
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	27
4.1. Harç Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	27
4.1.1. Akışkanlık deneyi sonuçları.....	27
4.1.2. Basınç dayanım sonuçları	29
4.1.3. Eğilme dayanım sonuçları	34
4.1.4. Büzülme deneyi sonuçları.....	38
4.2. Yarı Rijit Kaplama Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi	41
4.2.1. Harcın boşluklara nüfuz edebilme kabiliyeti	41
4.2.2. Yarı rijit kaplamada harcın marshall stabilite ve akma değerleri üzerine etkisi	42
4.2.3. Yarı rijit kaplamada harcın basınç dayanımı üzerine etkisi.....	43
4.2.4. Yarı rijit kaplamada harcın indirekt çekme dayanımı üzerine etkisi	43
4.2.5. Yarı rijit kaplamada harcın donma-çözülme etkisi altında davranışı	44
5. SONUÇLAR	45
6. KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yol Üstyapısında Yarı Rijit Kaplama Dizaynında Kullanılacak Harç Tipinin Belirlenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

18/07/2019

Mansor NAZARY



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

N : Newton

KN : Kilonewton

KPa : Kilopascal

MPa : Megapascal

S : Saniye

dk : Dakika

ml : Mililitre

mm : Milimetre

m² : Metrekare

m³ : Metreküp

Gr : Gram

Kg : kilogram

°C : Santigrat derece

Kısaltmalar

ASTM : American Society for Testing and Materials

BSK : Bitümlü Sıcak Karışım

KTŞ : Karayolları Teknik Şartnamesi

YRK : Yarı Rijit Kaplama

SHRP : Strategic Highway Research Program

S / Ç : Su /Çimento oranı

K /Ç : Katkı / Çimento oranı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Yarı rijit kaplama yollar (Randy 2007).	1
Şekil 2.1. Poroz asfalt kaplama yol yüzeyi (Randy 2007).....	6
Şekil 2.2. Yarı rijit kaplamada kullanılan akışkan harç (Randy 2007).....	8
Şekil 3.1. Kullanılan atık tozlarının XRD grafikleri; a) mermer; b) seramik.....	14
Şekil 3.2. Harç numuneleri	16
Şekil 3.3. Harç karıştırma mikseri	18
Şekil 3.4. Huninin şematik gösterimi.....	18
Şekil 3.5. Harcın akışkanlık deney aşamaları; a); b) boşalması; c); d) orifisten akış aşaması.....	19
Şekil 3.6. Basınç deneyi; a) Kullanılan pres makinesi; b) Numune kırıldıktan sonra; c) 50 mm küp numuneler	20
Şekil 3.7. Eğilme deneyi; a) numune kırılmadan önce; b) numune kırıldıktan sonra...21	
Şekil 3.8. Boy değişimi ölçümünde kullanılan düzenek ve numuneler.....	22
Şekil 3.9. YRK deney numuneleri	24
Şekil 3.10. Marshall stabilite ve akma deneyi	24
Şekil 3.11. İndirekt çekme deney düzeneği	25
Şekil 3.12. Basınç dayanımı tayini deney düzeneği; a) başlık yapımı; b) deney aşaması	26
Şekil 3.13. Donma- çözülme deneyinde kullanılan düzenek; a) donma-çözülme kabini; b) donmuş numune; c) Donma çözülme çevrimi.....	26
Şekil 4.1. Akışkanlık deney sonuçlarının kıyaslaması.....	28
Şekil 4.2. Numunelerde kuma ve segregasyon.....	28
Şekil 4.3. Harç karışımlarının kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkıların dozajına bağlı olarak akış süreleri.....	29
Şekil 4.4. 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin X markalı süperakışkanlaştırıcı katkı dozajı ile değişimi	31
Şekil 4.5. X markalı süperakışkanlaştırıcı içeren karışımların basınç dayanımı değerlerinin zamanla değişimi	31

Şekil 4.6. 3, 7 ve 28-günlük basınç dayanımı değerlerinin Y markalı süperakışkanlaştırıcı katkı dozajı ile değişimi	32
Şekil 4.7. Y markalı süperakışkanlaştırıcı içeren karışımların basınç dayanımı değerlerinin zamanla değişimi	33
Şekil 4.8. Mermer, seramik ve uçucu kül kullanılan karışımların basınç dayanımı değerlerinin zamanla değişimi	33
Şekil 4.9. 3, 7 ve 28-günlük eğilme dayanımı değerlerinin X markalı süperakışkanlaştırıcı katkı dozajı ile değişimi	35
Şekil 4.10. X markalı süperakışkanlaştırıcı içeren karışımların eğilme dayanımı değerlerinin zamanla değişimi	35
Şekil 4.11. 3, 7 ve 28-günlük eğilme dayanımı değerlerinin Y markalı süperakışkanlaştırıcı katkı dozajı ile değişimi	36
Şekil 4.12. Y markalı süperakışkanlaştırıcı içeren karışımların eğilme dayanımı değerlerinin zamanla değişimi	37
Şekil 4.13. Mermer, seramik ve uçucu kül kullanılan karışımların basınç dayanımı değerlerinin zamanla değişimi	37
Şekil 4.14. X markalı süperakışkanlaştırıcı kullanılan karışımların büzölmeleri	39
Şekil 4.15. Y markalı süperakışkanlaştırıcı kullanılan karışımların büzölmeleri	39
Şekil 4.16. Büzölme değerlerinin süperakışkanlaştırıcı katkı dozajı ile değişimi	40
Şekil 4.17. Mermer, seramik ve uçucu kül kullanılan karışımların büzölmeleri	40
Şekil 4.18. Mermer, seramik ve uçucu kül kullanılan karışımların büzölme değerlerinin süperakışkanlaştırıcı katkı dozajı ile değişimi	41
Şekil 4.19. Akışkan harcın poroz asfaltın boşluklarına nüfuz etmesi; a) A6/X0.25 - 0.70 kodlu harç karışımı; b) B4/Y0.5 - 0.70 kodlu harç karışımı.....	42
Şekil 4.20. YRK numunelerin 3, 7 ve 28 günlük Marshall stabilite ve akma değerleri..	42
Şekil 4.21. YRK numunelerin 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları	43
Şekil 4.22. YRK numunelerin 3, 7 ve 28 günlük indirekt çekme değerleri.....	44
Şekil 4.23. YRK numunelerin 3 ve 5 çevrim sonunda indirekt çekme değerleri	44

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Bazı ülkelerin 1990 yılında YRK üretim miktarları (Jean Lefebvre Enterprise 1990)	4
Çizelge 2.2. YRK özelliklerinin diğer kaplama tipleriyle karşılaştırılması (Wu vd. 2011)	5
Çizelge 2.3. Poroz asfaltın içinde kullanılacak kaba agregası özellikleri (KTŞ 2013)	7
Çizelge 2.4. Poroz asfaltın içinde kullanılacak ince agregası özellikleri (KTŞ 2013)	7
Çizelge 3.1. Kullanılan çimentonun özellikleri	12
Çizelge 3.2. Kullanılan agreganın elek analizi	13
Çizelge 3.3. Uçucu külün kimyasal özellikleri	13
Çizelge 3.4. Mermer ve seramik atığının kimyasal özellikleri (XRF analiz sonuçları)	15
Çizelge 3.5. Kullanılan kimyasal katkıları özellikleri	16
Çizelge 3.6. Deneyler için hazırlanan numunelere ait karışım oranları (kg/m ³)	17
Çizelge 3.7. Poroz asfalt'ta kullanılan bitümüne ait fiziksel özellikler	22
Çizelge 3.8. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri	23
Çizelge 3.9. YRK performans deneylerin, numune sayıları ve standartları	23
Çizelge 4.1. Tüm karışımların akışkanlık deney sonuçları	27
Çizelge 4.2. Numunelerin 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları	30
Çizelge 4.3. Numunelerin 3, 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları	34
Çizelge 4.4. Tüm karışımların büzülme değerleri	38

1. GİRİŞ

Günümüzde ulaşım sektörü; nüfus artışı, teknolojinin gelişmesi ve ekonomik gelişmelere bağlı olarak hızla büyümektedir. Türkiye’de en çok kullanılan ulaşım türü karayolu ulaşımıdır. Karayollarında her geçen gün araç sayısı artmaktadır, araç sayısının artmasıyla birlikte trafik yoğunluğu da artmakta olup bu durum yol üst yapısında aşırı miktarda zorlanmaya neden olmaktadır. Bu sebeple yol yapım çalışmalarında daha dayanıklı, uzun ömürlü ve maliyeti daha etkin kılacak yeni yöntem ve teknikler sürekli geliştirilmektedir. Kompozit bir yapıya sahip olan Yarı Rijit Kaplama (YRK)’lar (Şekil 1.1); asfalt ve beton kaplama yolların iyi özelliklerinin birleştirilmiş halidir. YRK, Marshall karışım dizaynına göre %25-30 hava boşluğu içeren poroz asfalt karışımındaki boşlukların, akışkan çimento harcı ile doldurulması yöntemi ile inşa edilmektedir. Asfaltın ve çimento harcının birleştirmesiyle oluşan kompozit kaplama tipi, yaygın olarak kullanılan Bitümü Sıcak Karışım (BSK)’a göre daha dayanıklı ve daha fazla yük taşıma kapasitesine sahiptir. Bu sayede YRK’lar ile özellikle trafik yükünün ve sıcaklığın yüksek olduğu bölgelerde daha uzun ömürlü, ekonomik ve bakımı daha kolay bir yol üst yapısı elde edilebilmektedir.



Şekil 1.1. Yarı rijit kaplama yollar (Randy 2007)

YRK, bileşenlerinin içerdiği özgün özellikleri bir araya toplayarak daha dayanıklı bir kaplama meydana getirebilmektedir. YRK’nın ilk yol uygulaması Fransa’da bir havaalanında 1960’lı yıllarda yapılmış (Yang ve weng 2008) ve daha sonra ABD, Japonya, Singapur ve İngiltere gibi ülkelerde bu konu ile ilgili ciddi çalışmalar başlamıştır. (Mayer ve Thau 2001; Hassan vd. 2002; Larsen 2002). Bu çalışmalara dayanarak, son yıllarda YRK’lı üstyapılar yapımı, havaalanlarında, otopark sahalarında, terminallerde şehir içi yol ve benzeri yerlerde hızla yaygınlaşmaktadır. YRK yollarının çok geniş bir alanda kullanılmasının nedeni ise inşa esnasında özel bir ekipmana ihtiyaç duyulmaması, asfalt kaplamaların yapımında kullanılan ekipman ile inşa edilmesinden kaynaklanmaktadır. Bunun yanında yüksek dayanım, yüksek sıcaklık dayanımı ve inşa

edildikten sonra beton yollardan daha kısa sürede trafiğe açılabilmesi gibi avantajlara sahiptir.

YRK yolların en önemli etkenlerden biri de kaplamanın bileşiminde yer alan akışkan harcın performansıdır. Bu çalışmada, YRK’da kullanılan akışkan harç, farklı açılardan incelenmiştir. Harcın gerekli dizayn kriterleri sağlandıktan sonra, karışımı poroz asfaltın boşluklarını doldurarak YRK’nın performansı araştırılmıştır.

Bu deneysel tez çalışmasının birinci aşamasında, maksimum agreg a çapı 0,6 mm olan harç numunelerinde, bağlayıcı olarak CEM 1 42.5 R çimentosu kullanılmıştır. Çimento ağırlığının %0.25, %0.5 ve %1 oranlarında iki farklı süperakışkanlaştırıcı kullanılarak iki farklı su/çimento oranlarında harç karışımları üretilmiştir. Üretilen harçların işlenebilirlik ve 7 günlük mekanik özelliklerine göre en uygun karışım seçilerek uçucu kül, seramik atık tozu ve mermer atık tozu farklı oranlarda agreg a ile ikameli olarak kullanılmıştır. Toplam 162 adet (50 x 50 x50) mm küp numuneler ve 216 adet (40 x 40 x 160) mm ayrıtlı prizmatik numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler standart koşullarda kür edilmiştir ve üzerinde 50 günlük büzölme deneyi ile 3, 7 ve 28 günlük basınç ve eğilme dayanım deneyleri yapılmıştır.

İkinci aşamada ise, Marshall yöntemi ile poroz asfalt numuneleri hazırlanmış ve oluşturulan uygun harç karışımı ile boşluklar doldurulmuştur. Numuneler üzerinde Marshall stabilite, akma, indirekt çekme mukavemeti, basınç dayanım ve donma-çözölme deneyleri ile YRK’nın performansı test edilmiştir.

2. KAYNAK TARAMASI

YRK'lar temel olarak birbiri içerisinde çözünmeyen ve birbirinden farklı şekil ile malzeme kompozisyonuna sahip, asfalt karışımı ve çimento harcının birleşmesinden oluşan dayanıklı kompozit bir kaplamadır. YRK tabakasında kullanılan malzemeler hem poroz asfalt hem de akışkan çimento harcı ayrı olarak üretilir ve yerleştirilir. Bu malzemelerin üretim ve karışım gereklilikleri geleneksel yol yapımında kullanılan prosedürlerden biraz farklıdır.

YRK'nın kalınlığı poroz asfaltın kalınlığına bağlıdır ve genelde 5-7 cm olarak tasarlanmaktadır. Poroz asfalt karışımı, standart BSK yol yapım ekipmanı ile inşa edilir ve maksimum 3 tonluk küçük çelik tekerlek silindiri ile sıkıştırılmaktadır. Poroz asfaltın çok sıkıştırılması, boşluk oranını düşürür ve harcın nüfuz etmesini engellemektir.

2.1. Yarı Rijit Kaplamaların Tarihçesi

YRK ilk olarak Fransa'da 1960 yılında aşınmaya karşı dayanıklı yüzey kaplama malzemesi olarak üretilmeye başlanmıştır. YRK Fransız bir inşaat şirketi (Jean Lefebvre) tarafından beton yollarına göre daha uygun maliyetli olduğundan dolayı bir alternatif seçenek olarak geliştirilmiştir. Bu kompozit malzeme Fransa'da başarılı bir şekilde yol uygulamalarında kaplama malzemesi olarak geniş kullanım alanları bulmuştur (Alhrich ve Anderton 1991).

1990'ların sonlarına doğru Jean Lefebvre şirketi Fransa'da yaklaşık 8.3 milyon metrekare YRK üstyapısını başarıyla uygulamıştır. Bu malzeme, Fransa da yol yapım sektöründe standart bir malzeme olarak kabul edilmektedir. (Jean Lefebvre Enterprise 1990).

1970 ve 1980 yılları arasında YRK'nın kullanımı bütün Avrupa ülkelerinde, Afrika ve kuzey Amerika' da yaygınlaşmıştır (Alhrich ve Anderton 1991). 1990 yılına kadar dünyada yirmi beş ülke YRK uygulamasını yapmıştır. Bu ülkeler ve kaplama miktarları Çizelge 2.1'de listelenmiştir (Jean Lefebvre Enterprise 1990). YRK uygulaması, Türkiye'de ve diğer birçok ülkelerde ise henüz oldukça yeni bir teknolojidir ve yeteri kadar yaygın olarak bilinmemekte ve kullanılmamaktadır.

Çizelge 2.1. Bazı ülkelerin 1990 yılında YRK üretim miktarları (Jean Lefebvre Enterprise 1990)

Ülke	YRK (m ² x 1000)
Fransa	8356
Portekiz	962
Japonya	602
İngiltere	307
Amerika Birleşik Devletleri	288
Almanya	282
Danimarka	230
İsveç	221
Norveç	188
İtalya	183
Finlandiya	148
Belçika	119
İsviçre	117
Suudi Arabistan	100
Hollanda	82
Fas	66
Fildişi Sahili	55
Güney Afrika	34
Bahamalar	29
İspanya	22
Lüksemburg	16
Yeni Kaledonya	15
Avusturya	14
Senegal	6
Tahiti	5

2.2. Yarı Rijit Kaplamaların Özellikleri

Yarı rijit kaplama iki farklı bağlayıcı grup ile malzemelerin birleştirilmesiyle, bu malzemelerin en iyi özelliklerini bir araya toplamak ya da ortaya yeni bir özellik çıkartmak amacıyla oluşan bir kompozit tabaka olarak tanımlanabilir.

Yarı rijit kaplama;

- Bağlayıcı malzemeleri, farklı kimyasal yapıya sahip ve birbirleri içerisinde çözünmemiş iki grup bileşenden meydana gelmektedir.

- YRK'ların en önemli özelliği, beton kaplamaların ve bitümlü sıcak karışım kaplamalarının avantajlarını içinde barındırmasıdır.
- YRK özelliklerinin diğer kaplama tipleriyle karşılaştırılması Çizelge 2.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 2.2. YRK özelliklerinin diğer kaplama tipleriyle karşılaştırılması (Wu vd. 2011)

Özellikler	Esnek Kaplamalar	Rijit Kaplamalar	Yarı Rijit Kaplamalar
Tekerlek izi karşısında dayanımı	Zayıf	İyi	İyi
Kayma direnci	İyi	Zayıf	İyi
Yağ, benzin gibi kimyasal malzemelere karşı dayanımı	Zayıf	İyi	İyi
Nem hasarına karşı direnci	Zayıf	İyi	İyi
Bakım ve tamir	Kolay	Zor	Kolay
Ömür süresi	Az	Uzun	Uzun
Genleşme derzi	Gerekli değil	Gerekli	Gerekli değil
İnşaatı ve trafiğe açılması	Saatler içinde	0.5-3 ay	24 saat içinde
İnşaat ve bakım masrafı	İnşaat masrafı: Düşük	İnşaat masrafı: Yüksek	İnşaat masrafı: Düşük
	Bakım masrafı: Yüksek	Bakım masrafı: Düşük	Bakım masrafı: Düşük

Çizelge 2.2'den de anlaşılacağı gibi YRK'ların özellikleri, rijit ve esnek kaplama tiplerine göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

2.3. Yarı Rijit Kaplamanın Bileşenleri

YRK; poroz asfalt ve yüksek performanslı çimento harç olan iki ana malzeme bileşenlerinden oluşur.

2.3.1. Poroz asfalt

Geçirimli Asfalt kaplamalar Poroz asfalt yüksek boşluk oranında %(18-28) tasarlanmaktadır ve genellikle geçirimsiz bir tabaka üzerine inşa edilmektedirler (Şekil 2.1).

Poroz asfalt kaplamalarla ilgili ilk çalışmalar 1960'ların ortasında İngiltere'de başlamıştır. İngiltere'nin ardından Hollanda, Norveç ve Danimarka gibi ülkeler de otoyollarında, sivil ve askeri havaalanlarında bu kaplama türünü kullanmıştır (Hamzah vd. 2012). Bu kaplama; kaba agrega oranı yüksek, ince agrega ve filler oranı az, açık gradasyonlu bir karışımdır.

YRK metodunda poroz asfalt dizaynı yapılırken kaplama tabakasının boşlukları, akışkan bir harç ile doldurulacağından, herhangi bir drenaj uygulamasına ihtiyaç duyulmaktadır. Yani, poroz asfalt YRK dizaynında sadece bir iskelet görevi görmektedir. Kullanılan agrega sağlam, dayanıklı ve temiz daneleri içeren kırma taş, kırma çakıl veya bunların birleşiminden oluşmalıdır. Agrega organik maddeler, kil toprakları ve diğer zararlı maddeler içermemelidir. Agrega seçimi yapılırken agrega performans deneyleri yapılması ve agrega özelliklerinin bu deneylerin limit değerlere uygun olması gerekmektedir. Bu deneylerin standartları Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) 2013'e göre Çizelge 2.3'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Poroz asfalt kaplama yol yüzeyi (Randy 2007)

Çizelge 2.3. Poroz asfaltın içinde kullanılacak kaba agregâ özellikleri (KTŞ, 2013)

Deney	Şartname Limitleri	Deney Standardı
Parçalanma Direnci (Los Angeles), % Kayıp	≤ 25 (LA ₂₅)	TS EN 1907-2 ^a AASHTO T 96
Aşınma Direnci (Mikro-Deval), % Kayıp	≤ 20 (M _{DE 20})	TS EN 1907-1
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, (MgSO ₄ ile kayıp), %	≤ 10 (MS ₁₀)	TS EN 1367-2
Kırılmışlık, ağırlıkça % (Tüm yüzeyi kırılmış-tüm yüzeyi yuvarlak)	$\geq 100 - \leq 0$ (C _{100/0})	TS EN 933-5
Yassılık İndeksi, %	$\leq 20 - \leq 15$ (FI ₁₅)	BS812 – TS EN 933-3
Cilalanma Deneyi, %	≥ 50 (PSV ₅₀)	TS EN 1097-8
Soyulma Mukavemeti (Bitüm Kaplı Yüzey), % (24 saat 60 °C suda bekletmeden sonra)	≥ 80	TS EN 12697-11 (Kısım 403 EK-A)
Su Emme, %	$\leq 2,0$ (WA ₂₄₂)	TS EN 1097-6
Kil Topakları ve Ufalanabilir Daneler, %	Bulunmayacak	ASTM C 142 AASHTO T 112

Çizelge 2.4. Poroz asfaltın içinde kullanılacak ince agregâ özellikleri (KTŞ, 2013)

Deney	Şartname Limitleri	Deney Standardı
Plastisite İndeksi	N.P	TS-1900-1
Organik Madde, %	Negatif	TS EN 1744-1 Madde 15.1
Su Emme, %	≤ 2.0 (WA ₂₄₂)	TS EN 1097-6
Metilen Mavisi, g/kg	İnce agreganın 0/2 mm kısmında ≤ 1.5 (MB _{1.5}) ≤ 3.0 (MB _{3.0})	TS EN 933-9
	Öğütülmüş magmatik agreganın 0/2 mm kısmında ≤ 3.0 (MB _{3.0})	

2.3.2. Çimento harcı

Eriç (1994), harcı şu şekilde tanımlamıştır: bağlayıcı malzeme, kum, su ve gerektiğinde katkı malzemelerinin karıştırılmasından meydana gelen, katılaşma özelliğine sahip karışımlara "harç" denir. Harçlar, bünyelerine giren bağlayıcı malzeme çeşidine göre çimento, kireç, alçı ve kil harçlar olmak üzere, yapıdaki kullanma yerlerine göre ise sıva harçları ve duvar harçları olmak üzere sınıflandırılabilir. Tarihte ilk

kullanılan harç kil harçlarıdır. Bağlayıcı malzeme endüstrisinin gelişmesi ile 19. yüzyılında çimento harçları yapılarda uygulama alanına girmiştir (Eriç, 1994).

Yapılan araştırma ve uygulamalarda, YRK'nın en önemli kısmının kullanılan akışkan harcın performansı olduğu görülmüştür (Hassan vd. 2002). Kullanılan harç, akışkan olmalı, su ve rutubete karşı dayanıklı olmalı, boşluksuz yapıda olmalı ve istenilen düzeyde mukavemetli olmalı. Kullanılan harçlar daha büyük projeler için bir beton santrali tesisinde veya daha küçük projeler için portatif beton mikserleri ile üretilmektedirler (Şekil 2.2). Harcın taşınmadan önce inşaat bölgesindeki iklim koşulları, taşımada kullanılacak araç özellikleri ve malzemenin taşınacağı mesafe dikkate alınmalıdır.



Şekil 2.2. Yarı rijit kaplamada kullanılan akışkan harç (Randy 2007)

2.4. Yarı Rijit Kaplamaların Avantajları

Avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Asfaltın ve çimento harcının birleştirilmesi ile oluşan kompozit kaplama tipi yaygın olarak kullanılan BSK'ya göre daha dayanıklı ve daha fazla yük taşıma kapasitesine sahiptir.
- Yüksek sıcaklık dayanımı
- Her türlü çevresel koşul için uygun olması
- Daha az bakım ve onarım harcamaları
- Yüzeylerde asfalttaki gibi tekerlek izi oluşmaması

2.5. Literatür Çalışmaları

YRK, % 25-30 boşluklu poroz asfaltın boşluklarının çimento harç ile doldurulmasıyla oluşan özel tasarım yol kaplama çeşididir. Asfaltın ve çimento harcının birleşmesiyle oluşan bu kaplama tipi, yaygın olarak kullanılan BSK'ya göre daha dayanıklı ve daha fazla yük taşıma kapasitesine sahiptir (Wu vd. 2011). Bu kaplama çeşidi ile özellikle tekerlek izine ve çatlamalara karşı dayanıklı, durabilitesi yüksek bir kaplama dizaynı oluşturmak mümkündür (Lei 2012).

BSK'nın imalatı beton yola göre daha kolaydır ve daha esnek bir yapıya sahiptir, ancak dayanımı daha düşüktür. Beton yolun ise en büyük avantajı, tekrarlı dingil yükleri karşısında yüksek dayanıma sahip olmasıdır. Ancak imalatı daha zordur. YRK'nın ise hem dayanımı yüksektir hem de imalatı daha kolaydır (Setyawan 2013; Hao vd. 2013).

YRK'larla ilgili literatürde birçok çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmaların bir kısmı bu tip kaplamalarda kullanılacak çimento harcın agrega özellikleri ile ilgilidir <http://www.eapa.org> (2013).

Fang vd. (2016) YRK'nın akışkan kısmını oluşturan harcın içerisinde polikarboksilen esaslı akışkanlaştırıcı kullanarak, bilimsel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada işleme performansının gelişmesini, ayrıca esneklik ve rijitlik karakteristiklerinin de dengelenmesini tespit etmişlerdir.

Bang vd. (2017), yaptığı deneysel bir çalışmada çimento harcın akışkanlık ve basınç dayanımının YRK üzerindeki etkilerini değerlendirmek için mekanik testler yapmışlardır. Test sonuçları, çimento harcın akışkanlığı, YRK'nın mekanik özelliklerinin belirleyen en önemli faktör olduğunu ve harcın akış süresinin minimum 12 saniye olduğunu göstermiştir.

Özen (2016) Yaptığı bir çalışmada harçların farklı değişkenlerle özelliklerinin nasıl değiştiğini incelemiştir. Yapılan deneysel çalışmada su-çimento, polimer-çimento ve fiber çimento oranlarının etkilerinin araştırılması için yüzey yanıt metodu adı verilen bir yöntem kullanılarak matematiksel bir model oluşturulmuştur. Deney sonuçlarına göre en yüksek eğme testi değeri, 6mm'lik yüzey görmüş ve en yüksek basma sonuçları cam fiberli karışımda gözlemlenmiştir. Bunun sebebi yüzey işlemi görmüş cam fiberlerin matrise daha iyi tutunup daha yüksek mekanik özellikler sağladığını saptamıştır. Polimer katkısının belirli bir miktardan sonra harçların mekanik özelliklerine negatif etkide bulunduğunu gözlemlenmiştir.

Bilim ve Atış (2011) ıslak ve kuru olmak üzere iki ayrı ortamda kür edilmiş farklı S/Ç oranlarına sahip olan harçların eğilme ve basınç mukavemetleri üzerinde cürufun etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada cürufun çimento ile ağırlıkça yer değişim oranlarını %0, 20, 40, 60, 80 olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda ıslak kür edilmiş harç numunelerinin, kuru kür edilmiş harç numunelerine göre daha yüksek dayanım gösterdiğini belirlemiştir.

Afonson vd. (2016) bir çalışma kapsamında öğütülmüş atık camı farklı oranlarda çimento harcında kullanarak, harcın performansını araştırmışlar. Çalışmanın neticesinde %30 öğütülmüş cam kullanılması en iyi mekanik performans gösterdiği belirlenmiştir.

Uygunoğlu vd. (2017) bir deneysel çalışmada yüksek fırın cüruf, doğal kum, kireçtaşı ve silis dumanı kullanarak kendiliğinden yerleşen reolojik özelliklerini belirlemek için deneyler yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre yüzey alanı yüksek olan mineral katkıların kullanım oranının artmasıyla harçların işlenebilirliklerini azaldığı görülmüştür.

Anagnostopoulos (2014) Yaptığı bir çalışmada yeni nesil polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı ile polinaftalen süperakışkanlaştırıcı katkıların farklı dozajlarda çimento harcında kullanarak, harçların fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmıştır. Elde eden sonuçlara göre polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı kullanılan karışımların daha akışkan olduğunu ancak bu katkılı karışımlarda kuma olduğunu tespit etmiştir. Bununla birlikte polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı kullanılan karışımların nihai mukavemeti polinaftalen katkı kullanılan karışımlara göre daha yüksek olduğunu saptamıştır.

Felekoğlu ve Baradan (2006) bu çalışmada üç farklı akışkanlaştırıcı katkının mukavemet ile su kesme performansları ilişkileri basınç dayanımı ve yayılma deneyleri ile araştırmışlardır. Testler sonucunda genel olarak basınç dayanımı ile su kesme oranı arasındaki ilişkiyi kimyasal katkı türüne göre değişkenlik gösterdiği görülmüştür.

Türkel ve Flekoğlu (2004) normal, süper ve hiper akışkanlaştırıcı katkıların betonun taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerine etkileri incelenmiştir. Test sonuçlarına göre tüm süper ve hiper katkılı karışımları 1 günde prizini almıştır. Çalışmada katkı dozajı artışı ile çökme değeri her zaman artmayacağı gözlemlenmiştir.

Şimşek vd. (2004) Deneysel çalışmada çimento harçlarında melamin, naftalin ve modifiye lignosülfonat kökenli süper akışkanlaştırıcı kullanılarak harçların normal kıvam, priz süresi ve 90 günlük basınç ile eğilme dayanımları karşılaştırmıştır. Çimento ağırlığının %1.5'i oranında melamin kökenli ve %0.71'i oranında modifiye lignosülfonat kökenli süperakışkanlaştırıcı karışımlar en uygun sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Nawa vd. (1989) yüksek oranda alkali içeren süperakışkanlaştırıcı katkılı çimento harçlarda, hemihidrat yerine dehidrat kullanıldığında akışkanlığın arttığını gözlemlemiştir.

YRK uygulaması son yıllarda ABD ve Avrupa ülkelerinde gelişmiştir. Danimarka, Hollanda ve birçok ülkelerde özellikle ağır taşıt yükünün yoğun olduğu yollarda, kavşaklar gibi yol üst yapısının zorlandığı kesimlerde, havalimanlarında, otobüs terminallerinde, ağır taşıt yüklemelerinin yapıldığı alanlarda yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür. Bu yapılan araştırma ve uygulamalarda YRK'ların en önemli kısmının, kullanılan harcın performansı olduğu görülmüştür <http://www.eapa.org> (2013).

Hao (2013) yaptığı bir deneysel çalışmada yarı rijit ve rijit yol kaplamalarının performansını araştırarak, yarı rijit yol kaplamasının daha düşük sıcaklıklarda kullanılabileceğini saptamıştır.

Lundstrom vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada, rijit, yarı rijit ve esnek kaplamaların performanslarının karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda YRK'ların esnek kaplamalara göre daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir.

Burmister (2004) yaptığı bir çalışmada, İspanya’da genelde kullanılan inşaat malzemelerini, YRK karışımlarında kullanarak tepkilerini araştırmıştır. Çalışma sonucunda tüm malzemelerin YRK karışımlarında homojen, izotropik ve lineer elastik özellikler gösterdiğini belirtmiştir.

Higashiyama vd. (2016) yaptıkları deneysel çalışmada YRK’nın akışkan kısmını oluşturan harcın içerisinde zeolit, uçucu kül, seramik tozu, ultra rapit çimento ve portland çimentosu gibi materyalleri farklı oranlarda kullanarak ayrı ayrı kaplamalar oluşturmuşlardır. Sonuç olarak kullandıkları materyalleri kullanarak YRK’ların daha sıcak yerlerde kullanılabileceğini saptamışlardır.

Hong vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada, YRK’da yüksek dayanımlı harç kullanılarak donma-çözülme özellikleri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda YRK’nın içerisinde yüksek dayanımlı harç kullanımında donmaya karşı dayanıklılık gösterdiği görülmüştür.

Benrazavi vd. (2016), Malezya’da yaptıkları bir deneysel çalışmada tropikal iklim kuşağındaki sıcak bir bölgede, yol kaplaması için ayrı ayrı cilalı granit ve fontana beton kullanarak YRK’lar oluşturmuşlar ve kaplamaların yüzey sıcaklıklarını ölçmüşlerdir. Ölçümler açık alanda, su yakınında ve gölgede olmak üzere üç ayrı ortamda periyodik olarak kızıl ötesi termal görüntüleme kameraları kullanılarak yapılmıştır. Sonuç olarak granitle yapılan yol kaplamasının yüzey sıcaklığının diğer kaplamaların yüzey sıcaklığından 15,5 °C daha düşük olduğunu saptamışlardır.

Ishiguro ve Yamanaka (2016), Bu çalışmada YRK’nın akışkan kısmını oluşturan harcın içerisinde çömlek molozu, cam parçaları, kiremit tozu ve istiridye kabuğu tozu gibi farklı materyaller kullanmışlardır. Bu materyaller ile oluşturdukları kaplamaların sıcaklıklarını ayrı ayrı T-Type thermo couple tipindeki bir termometre ile ölçümler yapılmıştır. Yaptıkları ölçümler sonucunda standart kaplamada yüzey sıcaklığının 63,1 °C olduğu ve bu materyalleri kullanılarak yapılan kaplamanın yüzey sıcaklığının ise 54.3 °C yi geçmediğini görmüşlerdir. Sonuç olarak kaplamalarda farklı materyal kullanımının, yol üst yapısının sıcaklığının düşürülmesinde etkili olduğu görülmüştür.

3. MATERYAL VE METOT

Tez kapsamında uygulanan deneyler iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada YRK’da kullanılması planlanan harcın işlenebilirlik, mekanik mukavemet vb özellikleri ayrı ayrı ölçülerek, her bir harç kombinasyonunun özellikleri belirlenmiştir. İkinci aşamada ise belirlenen en uygun karışım ile poroz asfaltın boşlukları doldurularak, YRK’nın performansı araştırılmıştır.

3.1. Yarı Rijit Kaplama Harcının Dizaynı

3.1.1. Kullanılan malzemeler

3.1.1.1. Çimento

Tez çalışmasında tüm deney numunelerinin üretiminde AS çimento fabrikasından elde edilen CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Taze olarak temin edilen ve uygun koşullarda saklanarak kullanılan çimento, süresi içinde, yani bozulmaya uğramadan tüketilmiştir. Kullanılan çimentoya ait kimyasal ve bazı fiziksel özellikler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kullanılan çimentonun özellikleri

Çimento CEM I 42,5 R			
Kimyasal özellikler		Fiziksel Özellikler	
S(SiO ₂) %	18.85	Yoğunluk(g/cm ³)	3.08
A(Al ₂ O ₃) %	9.94	Özgül yüzey(cm ² /g)	3357
F(Fe ₂ O ₃) %	3.42	Priz başlama süresi(dk)	195
C(CaO) %	62.22	Priz bitiş süresi(dk)	285
MgO %	1.57	Basınç Dayanımı	
SO ₃ %	2.90	2. gün (Mpa)	22.2
Na ₂ O %	0.18	7. gün (Mpa)	38.4
K ₂ O %	0.62	28. gün (Mpa)	54.3
Cl %	0.0135		
Kızdırma kaybı %	4.14		

3.1.1.2. Agreg

Harç numunelerinin hazırlanmasında kullanılan agrega Çizelge 3.2'deki elek aralıklarına göre elenerek kullanılmıştır.

Çizelge 3.2. Kullanılan agreganın elek analizi

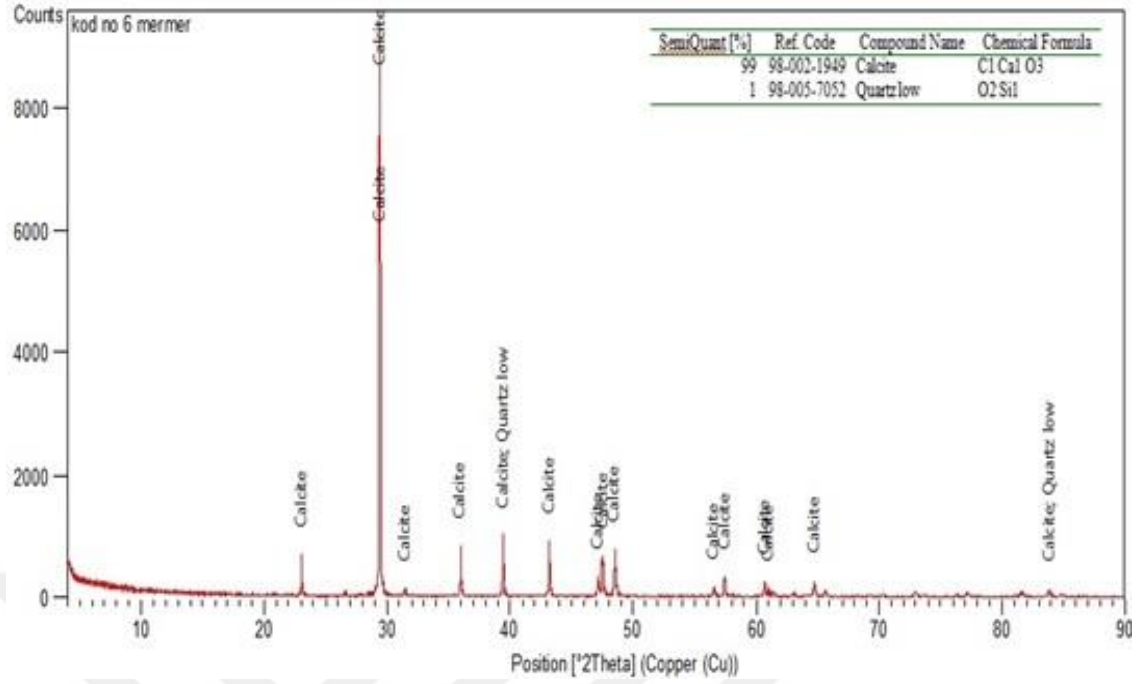
Elek çapı	Elekten geçen
0.6	100
0.425	99.6
0.18	34.2
0.075	1.5

3.1.1.3. Mermer, seramik ve uçucu kül

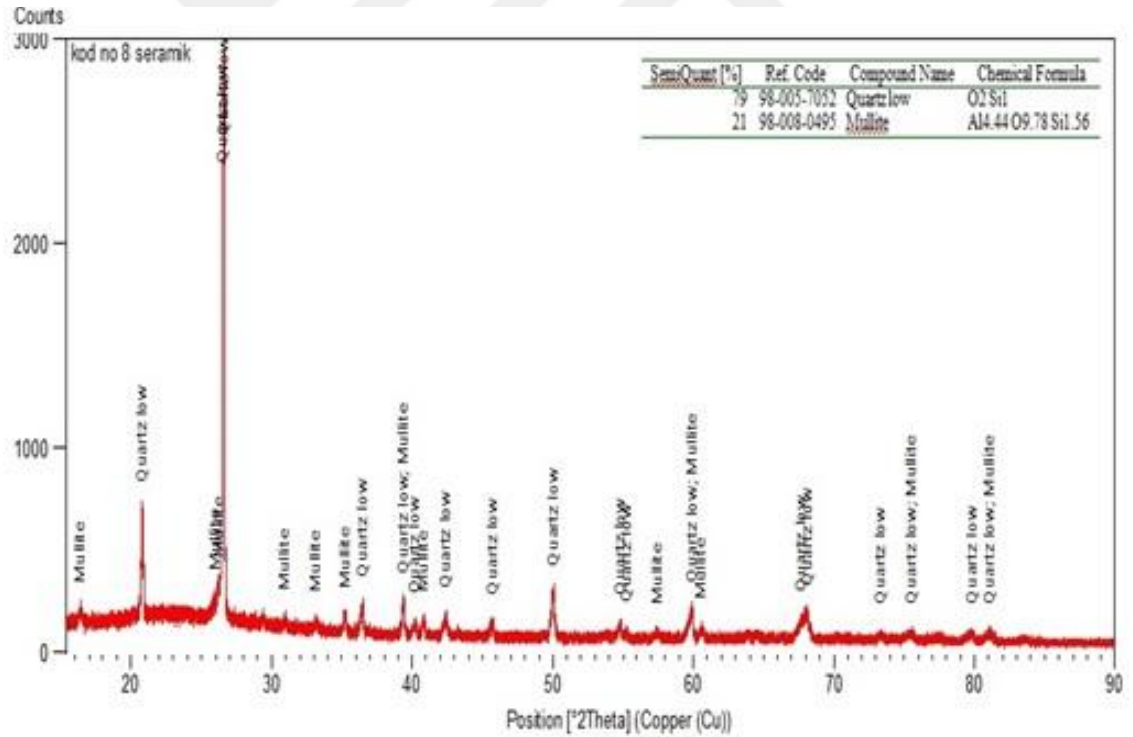
Araştırmada, mermer ve seramik atıkları Antalya bölgesinden temin edilip kırıldıktan sonra toz şeklinde ($<0.18 \text{ mm}$) geri dönüştürülerek kullanılmıştır. Mermer ve seramiğin, YRK'nın harç bileşiminde belli oranlarda agrega yerine kullanılabilirliği araştırılmıştır. Kullanılan atıkların yapısal analizi için X-ışınları difraksiyonu (XRD) tekniği kullanılmıştır. XRD, katı ve toz haldeki malzemelerin faz analizinde kullanılan temel tekniklerden birisidir. Mermer ve seramik malzemelerin XRD spektrumları şekil 3.1a ve 3.1b'de verilmiştir. Kullanılan mermer atığının kalsit, seramik atığı ise kuvarsa ait mineralojik yapıya sahip olduğu görülmüştür. Mermer ve seramik atıklarının kimyasal içerik yüzdelerinin belirlenmesi için X-ışını floresans spektrometre (XRF) analizi yapılarak, Çizelge 3.4'te gösterilmiştir. Ayrıca uçucu kül iki harç karışımında agrega yerine belli oranlarda kullanılmıştır. Kullanılan uçucu külün kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Uçucu külün kimyasal özellikleri

SiO ₂ %	48.44
Al ₂ O ₃ %	22.16
Fe ₂ O ₃ %	9.32
CaO %	9.18
MgO %	0.71
TiO ₂ %	1.01
K ₂ O %	1.87
Na ₂ O %	2.00
SO ₃ %	2.64



(a)



(b)

Şekil 3.1. Kullanılan atık tozlarının XRD grafikleri; **a)** mermer; **b)** seramik

Çizelge 3.4. Mermer ve seramik attığının kimyasal özellikleri (XRF analiz sonuçları)

Bileşimler	Mermer	Seramik
SiO ₂	1.49	70.6
Al ₂ O ₃	0.42	18.5
Fe ₂ O ₃	0.23	2.20
MgO	0.53	0.60
CaO	53.3	1.60
Na ₂ O	0.08	3.60
K ₂ O	0.07	2.10
TiO ₂	0.06	0.20
P ₂ O ₅	-	<0.1
MnO	-	<0.1
Cr ₂ O ₃	-	-
SO ₃	0.09	-
LOI	43.53	-
A.Za	-	0.20
Total	99.95	99.6

3.1.1.4. Karışım suyu

Karışımların dizaynında ve deney numunelerinin üretiminde Antalya şehir şebekesi suyu kullanılmıştır.

3.1.1.5. Kimyasal katkı

Çalışmada kimyasal katkı olarak X ve Y markalı polikarboksilat eter esaslı süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Bu süperakışkanlaştırıcıların birbirinden farkı; X markalı süperakışkanlaştırıcı Y markalı süperakışkanlaştırıcıya göre daha fazla katı madde içermektedir. Bu ürünler yüksek oranda su kullanımının azaltılmasının yanında uzun işlenebilirlik sağlaması sebebiyle tercih edilmiştir. Kullanılan kimyasal katkıların üretici firmadan temin edilen teknik özellikleri Çizelge 3.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. Kullanılan kimyasal katkıları özellikleri

Özellik	Ölçülen Değerler		Standart Değerler	Analiz Yöntemi
	X markalı SA	Y markalı SA		
Homojenlik	Homojen	Homojen	Homojen	Gözle
Görünüm/Renk	Kahverengi	Kahverengi	Kahverengi	Gözle
Yoğunluk (g/cm ³)	1.07	1.1	1.05-1.13	ISO 758
Ph değeri	4.1	4.5	4.0-6.0	ISO4316
Katı madde miktarı (%)	34.54	28.91	Y (27.65-30.36) X (31.33-34.63)	EN 480-8
Suda çözünabilir Klorür (%)	0.02	0.03	<0.1	EN 480-10
Alkali miktarı (%)	Uygun	Uygun	<5	EN 480-12
FT-IR spectrum/ Etkin bileşeni	Uygun	Uygun	Referans IR Spec	EN 480-6

3.1.2. Metot

Çimento ağırlığının %0.25, %0.5 ve %1 oranında iki farklı süperakışkanlaştırıcı kullanılarak iki farklı su/çimento (0.65 ve 0.70) oranında karışımlar üretilmiştir. Üretilen harçların işlenebilirlik ve 3 günlük basınç ve eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerine göre en uygun karışım seçilmiş, daha sonra uçucu kül, seramik ve mermer tozu farklı oranlarda agrega ile ikameli olarak kullanılmıştır. Hazırlanan karışım miktarları ve karışım oranları Çizelge 3.6’da gösterilmiştir. Karışımların bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacı ile yapılan deneyler için gerekli numuneler, istenilen şekilde hazırlanmıştır (Şekil 3.2). Hazırlanan numuneler üzerinde akışkanlık özelliği, büzülme, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı değerlerinin belirlenmesi için deneyler yapılmıştır. Otomatik programlanabilir çimento mikseri (Şekil 3.3) harcın hazırlanmasında kullanılmıştır.

**Şekil 3.2.** Harç numuneleri

Çizelge 3.6. Deneyler için hazırlanan numunelere ait karışım oranları (kg/m³)

Harç kodu	Katkı			S/ Ç	Su	Çimento	Agrega	Mermer	Seramik	Uçucu kül	Birim hacim ağırlığı (kg/m ³)
	Adı	%	Kg								
A1/X1 - 0.65	X-markalı Süperakışkanlaştırıcı	1	7.30	0.65	477	733	735	----	----	----	1952
A2/X1 - 0.70		1	7.30	0.7	496	708	710	----	----	----	1921
A3/X0.5 - 0.65		0.5	3.60	0.65	477	733	735	----	----	----	1949
A4/X0.5 - 0.70		0.5	3.60	0.7	496	708	710	----	----	----	1918
A5/X0.25 - 0.65		0.25	1.80	0.65	477	733	735	----	----	----	1947
A6/X0.25 - 0.70		0.25	1.80	0.7	496	708	710	----	----	----	1916
B1/Y1 - 0.65	Y-markalı Süperakışkanlaştırıcı	1	7.00	0.65	477	733	735	----	----	----	1952
B2/Y1 - 0.70		1	7.00	0.7	496	708	710	----	----	----	1921
B3/Y0.5 - 0.65		0.5	3.50	0.65	477	733	735	----	----	----	1949
B4/Y0.5 - 0.70		0.5	3.50	0.7	496	708	710	----	----	----	1918
B5/Y0.25 - 0.65		0.25	1.75	0.65	477	733	735	----	----	----	1947
B6/Y0.25 - 0.70		0.25	1.75	0.7	496	708	710	----	----	----	1916
C1/30-mer		0.5	3.56	0.7	498	712	496	212	----	----	1922
C2/50-mer		0.5	3.56	0.7	498	712	355	355	----	----	1924
C3/30-ser		0.5	3.54	0.7	496	708	494	----	213	----	1915
C4/50-ser		0.5	3.54	0.7	496	708	353	----	354	----	1915
C5/20-u.kül		0.5	3.50	0.7	496	708	565	----	----	141	1914
C6/30-u.kül		0.5	3.50	0.7	491	702	490	----	----	210	1897



Şekil 3.3. Harç karıştırma mikseri

3.1.2. Uygulanan deneyler

3.1.2.1. Harç akışkanlık deneyi (Grout flow cone test)

YRK’larda kullanılan harcın en önemli özelliklerinden biri boşluklara hızlı bir şekilde nüfuz ederek doldurmaya sahip olmasıdır. Harcın akışkanlığını belirlemek için farklı deneyler kullanılmaktadır. Bu çalışmada taze harcın akışkanlığını tespiti için ASTM C939-10 standardı kullanılmıştır. Harç akış hunisi, harcın akışkanlık özelliğini belirlemek için yaygın kullanılan cihazdır. Cihazın şematik gösterimi Şekil 3.4’te gösterilmiştir.

Mikserde harç karıştırıldıktan sonra, 1725 ml harç karışımı vakit kaybetmeden alt ucu parmakla kapanan huni içine dökülüp daha sonra parmak, huni ucundan kaldırılarak hacim boşalana kadar geçen süre kronometre ile ölçülmüştür (Şekil 3.5). Ölçülen süre o karışımın akış süresi olarak kaydedilmiştir. Bu tez çalışmasında farklı karışımlar için toplam 18 adet akışkanlık deneyi yapılmıştır.



Şekil 3.4. Huninin şematik gösterimi



Şekil 3.5. Harcın akışkanlık deney aşamaları; **a); b)** boşalması; **c); d)** orifisten akış aşaması

3.1.2.2. Basınç dayanımı deneyi

Oluşturulan harcın basınç dayanımının tespit edilmesinde 200 ton kapasiteli, bilgisayarlı sisteme sahip olan otomatik ve manuel tercihli pres makinesi kullanılmıştır. Karışımların basınç mukavemeti deneyleri için her karışımdan 9 adet 50 mm küp numune hazırlanmış, bunlardan üçü üç günlük, üçü yedi günlük ve diğer üçü yirmi sekiz günlük ASTM C109 standardına göre dayanım testine sokulmuştur. Şekil 3.6’de basınç dayanım ölçüm cihazı ve 50 mm küp numuneler gösterilmiştir.

Basınç dayanımı σ , eşitlik (3.1) yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

σ : Basınç dayanımı (N/mm²)

P : Kırılma yükü (N)

A : Yüklemenin yapıldığı kesit alanı (mm²)



Şekil 3.6. Basınç deneyi; **a)** Kullanılan pres makinesi; **b)** Numune kırıldıktan sonra; **c)** 50 mm küp numuneler

3.1.2.3. Eğilme dayanımı

Eğilme dayanımları ASTM C348-18 standardına uygun olarak üç noktalı yükleme yöntemi ile yapılmıştır. Her karışımdan 9’ar adet toplam 162 adet 40x40x160 mm ayrıtlı prizmatik numuneler hazırlanmıştır. Bunların üçü üç gün, üçü yedi gün ve diğer üçü yirmi sekiz gün suda bekledikten sonra Şekil 3.7’de görüldüğü gibi açıklığı 100 mm olan iki mesnet üzerine yerleştirilmiş ve açıklığın tam ortasından saniyede 50 N yük eklenerek deneye tabi tutulmuştur.

Eğilme dayanımı R_f , N/mm² olarak eşitlik (3.2) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$R_f = \frac{1.5x F_f \times L}{b^3} \quad (3.2)$$

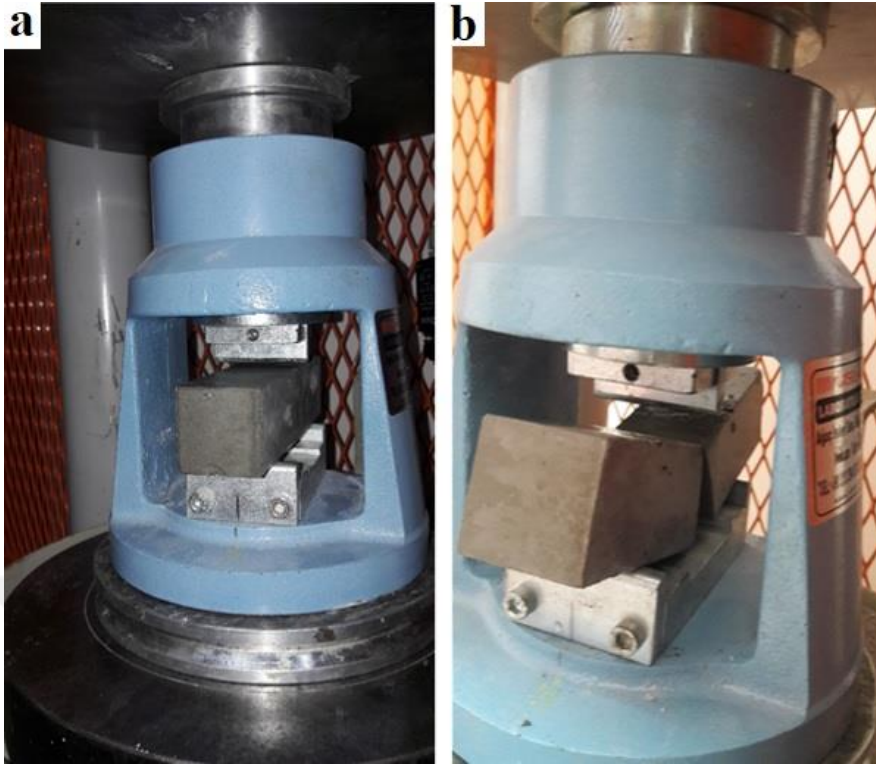
Burada;

R_f = Eğilme dayanımı (N/mm²)

b = Prizma kare kesitinin kenar uzunluğu (mm)

F_f = Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulaya en büyük yük kuvveti (N)

L = Mesnet arasındaki uzaklık (mm).



Şekil 3.7. Eğilme deneyi; **a)** numune kırılmadan önce; **b)** numune kırıldıktan sonra

3.1.2.5. Büzülme deneyi

Bu deney ile hazırlanan numunelerin büzülme miktarı tespit edilmiştir. Bunun amacı harç çok akışkan özelliğe sahip olduğu için büzülme riskinin fazla olduğunun düşülmesidir. Bu deney için 40x40x160 mm boyutunda prizmatik numuneler hazırlanmıştır. Numuneler 48 saat suda bekledikten sonra 23 °C sıcaklıkta 50 gün boyunca muhafaza edilmiş ve düzenli olarak 0,0001 mm hassasiyete sahip dijital boy değişimi ölçüm cihazı ile boy değişimleri ölçülmüştür. Büzülme değerleri numunenin kurumadan önceki boyu ve belirli günlerde ölçüm boyu dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bu deney ASTM C596-09 standardına göre uygulanmıştır. Şekil 3.8’de boy değişimi ölçümünde kullanılan düzenek ve numuneler gösterilmiştir.

Numunelerin büzülme değerleri, eşitlik (3.3) yardımıyla hesaplanmıştır:

$$B = \frac{L_0 - L_f}{160} \times 100 \quad (3.3)$$

B = Büzülme (%)

L_0 = kurumadan önceki boyu (mm)

L_f = kurama esnasında gösterdiği boy (mm)



Şekil 3.8. Boy değişimi ölçümünde kullanılan düzenek ve numuneler

3.2. Yarı Rijit Kaplamanın Dizayn Edilmesi

Poroz asfaltın boşluklarının doldurulmasında kullanılacak harcın oluşturulmasından sonra YRK dizaynı yapılmıştır.

3.2.1. Materyal ve metot

Poroz asfalt karışımında kullanılacak bitüm ve agrega özellikleri kontrol edilerek, çalışmaya uygunluk testleri yapılmıştır. Kullanılan bitüm ve agrega özellikleri Çizelge 3.7 ve 3.8 de gösterilmektedir.

Poroz asfalt karışımında, %30 boşluklu Marshall numuneleri kullanılmıştır. %30 boşluğu yakalamak için, numunelerin sadece bir yüzüne 25 darbe uygulanarak hazırlanmıştır (Masbah 2019).

Çizelge 3.7. Poroz asfalt'ta kullanılan bitümüne ait fiziksel özellikler

Sıra No	Özellikler	Deney Metodu	Şartname Limitleri	Bitüm (50/70)
1	Penetrasyon, 25°C, 0.1mm	TS EN 1426	50-70	54
2	Yumuşama Noktası, °C	TS EN 1427	46-54	52
3	TFOT, İnce film halinde ısıtma deneyi (163°C, 5 saat)	TS EN 12607-2		
3.1	Kütle Değişimi, %		0.5 (max)	0.29
3.2	Yumuşama Noktası, °C	TS 120 EN 1427	48 (min)	50.3
3.3	Kalıcı Penetrasyon, %	TS EN 1426	50 (min)	60
3.4	Yumuşama.Nok. Artış, °C	TS EN 1427	9 (max)	1.7
4	Parlama Nok, °C	TS ISO 2592	230 (min)	280

Çizelge 3.8. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

Özellikler	Standartlar	İri agreg	İnce agreg	Standart Değerler
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	ASTM C127	2.69	2.48	-
Su emme (%)	TS EN 1097/6	0.3	0.33	≤2.5
Aşınma oranı (%)	AASHTO T96	24.5	-	≤30
Yassılık indeksi	BS 812	13.8	-	≤30

3.2.2. Yarı rijit kaplamalar üzerinde uygulanan performans deneyleri

Çalışmada Marshall karışım dizayn yöntemiyle hazırlanan karışım numunelerinin, sıcaklığı 30°C düştükten sonra, gerekli dizayn kriterleri sağlayan akışkan harç ile boşlukları doldurulmuştur (Şekil 3.9). Numuneler üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi, indirekt çekme deneyi, basınç dayanım deneyi ve donma-çözülme deneyi yapılmıştır. Performans deneylerinde kullanılacak numuneler Marshall dizayn yöntemine göre hazırlanmış ve her deney için kullanılan numune sayıları Çizelge 3.9’da verilmiştir.

Çizelge 3.9. YRK performans deneylerin, numune sayıları ve standartları

Karışım Performans Deneyi	Toplam	Kullanılan harç kodu	Standart
Marshall Stabilite ve Akma Deneyi	9	B4/Y0.5 - 0.70	ASTM D6927 -06
İndirekt Çekme Deneyi	9		ASTM D6931 -17
Basınç Dayanım Deneyi	9		ASTM C39 / C39M - 18
Donma Çözülme Deneyi	6		ASTM C 666
Toplam Numune Sayısı	33		



Şekil 3.9. YRK deney numuneleri

3.2.2.1. Marshall stabilite ve akma deneyi

Marshall stabilitesi ve akma deneyi bitümlü karışımların kalıcı deformasyonlara karşı potansiyelini değerlendirmede kullanılan deneylerdendir.

YRK numunelerinin stabilite ve akma değerlerinin tayini için hazırlanan numuneler 60°C suda 40 dakika boyunca bekletilmiştir. Sudan çıkarılan numuneler elektronik Marshall yükleme cihazına yerleştirilmiştir. Akma çubuğu sabitlenerek 51mm/dk'lık sabit deformasyon hızıyla yükleme yapılmıştır (Şekil 3.10). En yüksek değeri ve buna karşılık gelen akma değeri aletin ekranından okunarak kaydedilmiştir. Bu deney için toplam 9 adet numune hazırlanmış, üç gün, yedi gün ve yirmi sekiz gün teste tabi tutulmuştur. Üç numunenin ortalaması Marshall stabilite ve akma değeri olarak alınmıştır.



Şekil 3.10. Marshall stabilite ve akma deneyi

3.2.2.2. İndirekt çekme deneyi

Bu deney karışımın nem, sıcaklık ve yorulmadan dolayı oluşan çekme gerilmelerini karakterize eder.

Marshall karışım dizaynına göre hazırlanan numuneler ASTM D6931 standardına göre bu deneye sokulmuştur. YRK karışım numunesine, dik doğrultuda; sabit bir deformasyon altında bozuluncaya kadar bir basınç yükü uygulanmıştır (Şekil 3.11). Numunenin dayanım göstermiş olduğu en büyük yük indirekt çekme mukavemeti olarak alınmıştır.

İndirekt çekme mukavemeti üstyapı tasarımında ve karışım kalitesinin değerlendirilmesinde kullanılır. İndirekt çekme mukavemeti formül (3.4) ile hesaplanmıştır.

$$St = \frac{2000 \times P}{\pi \times t \times D} \quad (3.4)$$

St = İndirekt çekme mukavemeti, kpa

P = Uygulanan maksimum yük, N

T = Numunenin kalınlığı, mm

D = Numunenin çapı, mm



Şekil 3.11. İndirekt çekme deney düzeneği

3.2.2.3. Basınç dayanım deneyi

Bu deney YRK'nın eksenel basınç yükü etkisi altında gösterebileceği direnme kabiliyetini tespit etmek amacıyla yapılmıştır. Hazırlanan Marshall numuneler üzerinde basınç deneyi ASTM C39 standart yöntemini kullanarak gerçekleştirilmiştir. Marshall numuneleri silindirik olduğundan dolayı, yüzeylerine yükü üniform uygulamak amacıyla, düzgün olmayan yüzeylere alçı hamurundan 5 mm bir kaplama tabaka yapılmıştır (Şekil 3.12.a). Bu deney, hidrolik sistemle çalışan deney presinde yükleme hızı 0.5 mpa / s olarak uygulanmış ve en yüksek kırılma yükü kaydedilmiştir (Şekil 3.12.b). Numuneler

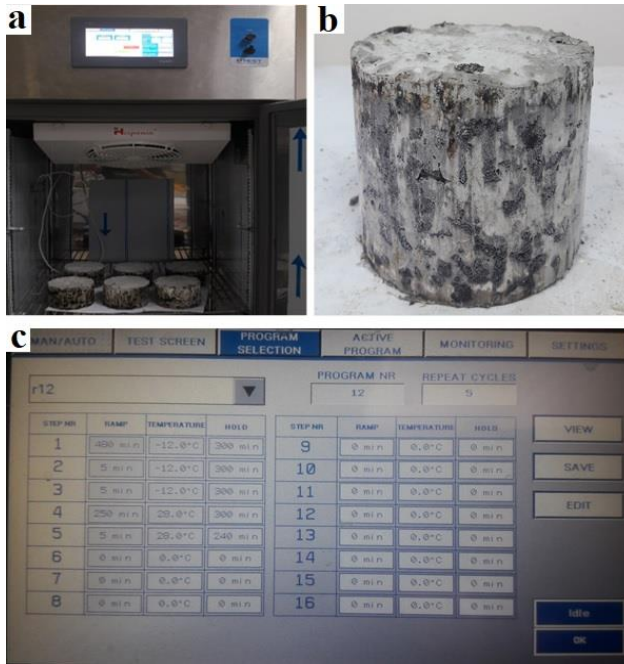
herhangi bir kür yapılmadan, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanım deneyine tabi tutulmuştur. YRK numunelerinin basınç dayanımı eşitlik (3.1)'de verilen denklem ile hesaplanmıştır.



Şekil 3.12. Basınç dayanımı tayini deney düzeneği; **a)** başlık yapımı; **b)** deney aşaması

3.2.2.5. Donma-çözülme deneyi

Bu deney gerçekleştirmek için Şekil 3.13'teki donma-çözülme düzeneği kullanılmıştır. Çalışma kapsamında 6 numune donma-çözülme deneyine tabi tutulmuştur. Bunlardan 3 numuneye 3 çevrim ve diğer 3 numuneye de 5 çevrim sayısı uygulanmıştır. Her bir çevrim, bir donma -12°C de 900 dakika ve bir çözülme $+28^{\circ}\text{C}$ de 540 dakika toplam 1440 dakikadan ibarettir. Numuneler, çevrim sayısı tamamlandıktan sonra indirekt çekme deneyine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.13. Donma- çözülme deneyinde kullanılan düzenek; **a)** donma-çözülme kabini; **b)** donmuş numune; **c)** Donma çözülme çevrimi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Harç Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Bu tez çalışmasında, farklı harç karışımlarına uygulanan deneyler aşağıdaki şekilde değerlendirilmiş ve tartışılmıştır.

Bu çalışma esnasında içerik olarak kullanılan mermer, seramik ve uçucu kül karışım gruplarına karşılaştırma referansı olarak B4/Y0.5 - 0.70 kodlu yani S/Ç oranı 0,7 ve K/Ç oranı %0.5 karışımı kontrol numune olarak seçilmiştir.

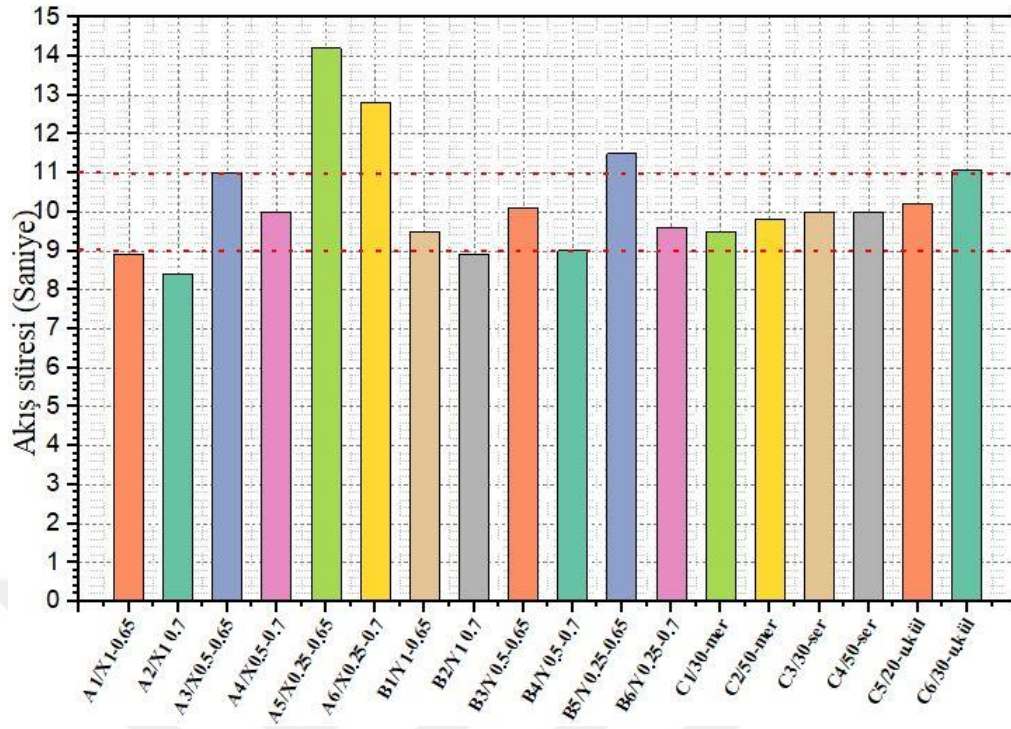
4.1.1. Akışkanlık deneyi sonuçları

YRK'da kullanılan harçlar yeterli akışkanlığa ve aynı zamanda ayrışmaya karşı dirence sahip olduğunda etkili bir işlev görmektedir. Literatür araştırmalarına göre YRK'da kullanılan akışkan harcın ASTM C939-10 standardında kullanılan huniden akış süresinin, hiçbir sıkıştırma ve vibrasyon uygulamadan 9-11 saniye arasında olması gerekmektedir (Al-Qadi vd. 1994; Hu vd. 2008; Luo vd. 2018).

Daha önce yapılan çalışmalara göre S/Ç oranı 0.6-0.75 arasında kullanılmıştır (Randy vd. 2007; Yang and Weng 2015; Anderton 2000). Bu tez çalışmasında tüm harç karışımlarında S/Ç oranı 0.65 ve 0.7 olarak seçilmiş ve çimento miktarı sabit tutulmuştur. Toplam 18 adet akışkanlık deneyi yapılmış ve akış süresi kronometre ile belirlenerek Çizelge 4.1'de verilmiştir. Sonuçlar Şekil 4.1'de kıyaslamalı olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Tüm karışımların akışkanlık deney sonuçları

Karışım kodu	Akış Süresi (s)
A1/X1 - 0.65	8.9
A2/X1 - 0.70	8.4
A3/X0.5 - 0.65	11
A4/X0.5 - 0.70	10
A5/X0.25 - 0.65	14.2
A6/X0.25 - 0.70	12.8
B1/Y1 - 0.65	9.5
B2/Y1 - 0.70	8.9
B3/Y0.5 - 0.65	10.1
B4/Y0.5 - 0.70	9
B5/Y0.25 - 0.65	11.5
B6/Y0.25 - 0.70	9.6
C1/30-mer	9.5
C2/50-mer	9.8
C3/30-ser	10
C4/50-ser	10
C5/20-u.kül	10.2
C6/30-u.kül	11.07



Şekil 4.1. Akışkanlık deney sonuçlarının kıyaslaması

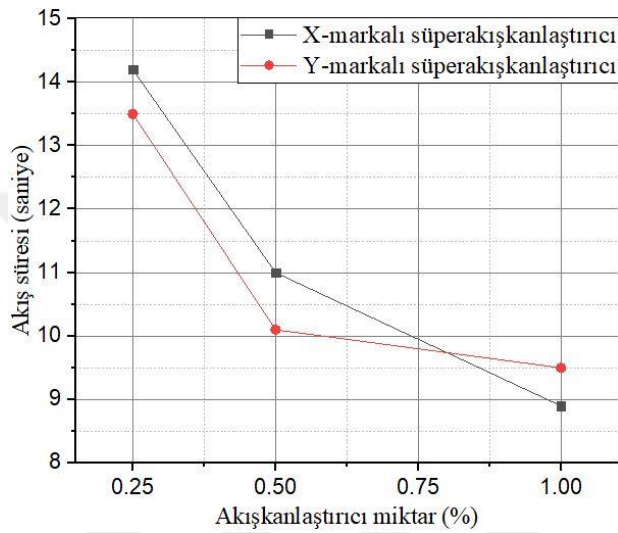
Sonuçlardan da görüldüğü gibi süperakışkanlaştırıcı katkı tipinden bağımsız olarak, katkı kullanım oranının artmasıyla harç karışımlarının akış süreleri beklenildiği gibi azalmıştır.

A2/X1 - 0.70 karışımının (Çimento ağırlığının %1'i X markalı süperakışkanlaştırıcı katkı, S/Ç oranı 0.7) akış süresinin diğer karışımlara göre en düşük olduğu tespit edilmiştir. Ancak bu karışımda aşırı derecede kuma ve segregasyon görülmüştür (Şekil 4.2). Harcın akış hızı ne kadar yüksek olursa, harcın ayrışma riski de o kadar fazla olur (Duyar 2006).



Şekil 4.2. Numunelerde kuma ve segregasyon

Şekil 4.3'te, kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkıların dozaj oranı ile akış süresi arasındaki ilişki görülmektedir. Görüldüğü gibi belli bir dozajın ötesinde akış sürelerinde çok fazla değişiklik gözlemlenmemiştir. Literatüre göre bu noktaya doygunluk noktası denir. Her iki süperakışkanlaştırıcı ile hazırlanan harç karışımlarında doygunluk noktası K/Ç oranının %0.5'inde meydana gelmiştir. Doygunluk noktasındaki akış süreleri dikkate alındığında B4/Y0.5 - 0.70 (Y markalı süperakışkanlaştırıcı, S/Ç oranı 0.7) serisi daha hızlı aktığı anlaşılmıştır. Ancak X markalı süperakışkanlaştırıcı katkı ile hazırlanan harç karışımlarında doygunluk noktasında su kusması gözlenerek harcın homojenliğini kaybettiği belirlenmiştir.



Şekil 4.3. Harç karışımlarının kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkıların dozajına bağlı olarak akış süreleri

Mermer ve seramik atık tozu kullanılan karışımlar akışkanlık açısından kontrol karışımla yaklaşık benzer davranışlar göstermiştir. Bu bağlamda elde edilen sonuçlara göre YRK'da kullanılan akışkan harcın, boşluklara nüfuz edilebilirliğinin sağlanması, kullanılan katkının tipi, K/Ç ve S/Ç oranıyla ilişkilidir. Harcın uygulanması yapılmadan önce, kaliteli su azaltıcı katkı seçimi, uygulamanın başarısı ve uygulanabilirliği açısından son derece önemli olmaktadır.

4.1.2. Basınç dayanım sonuçları

Harç karışımlarının 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.2 de verilmiştir. X markalı süperakışkanlaştırıcı katkı ile hazırlanan karışımların 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının katkı dozajı ile değişimi Şekil 4.4'de, Y markalı süperakışkanlaştırıcı katkı ile hazırlanan karışımların 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının katkı dozajı ile değişimi ise Şekil 4.5'de verilmiştir. Ayrıca basınç dayanımı değerlerinin zamana bağlı değişimini gösteren grafiklerde hazırlanmıştır. Bu kapsamda X markalı süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin basınç dayanımlarının zamanla değişimi Şekil 4.6'da, Y markalı süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin basınç dayanımının

zamanla değişimi Şekil 4.7’de, mermer ve seramik atık tozu ve uçucu kül ile hazırlanan numunelerinin basınç dayanımlarının zamanla değişimi Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Numunelerin 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları

Karışım	Basınç Dayanımı (MPa)		
	3-günlük	7-günlük	28-günlük
A1/X1 - 0.65	14.6	30.5	38.3
A2/X1 - 0.70	13.6	26.9	37.4
A3/X0.5 - 0.65	23.5	32.2	42.4
A4/X0.5 - 0.70	21.1	26.3	34.2
A5/X0.25 - 0.65	24.0	40.3	51.6
A6/X0.25 - 0.70	22.0	36.8	49.3
B1/Y1 - 0.65	20.6	27.1	31.7
B2/Y1 - 0.70	18.3	25.5	31.0
B3/Y0.5 - 0.65	21.1	30.1	34.5
B4/Y0.5 - 0.70	19.8	27.7	33.5
B5/Y0.25 - 0.65	22.0	31.1	36.8
B6/Y0.25 - 0.70	21.0	30.5	35.1
C1/30-mer	24.6	30.0	37.9
C2/50-mer	21.5	30.0	36.7
C3/30-ser	19.1	26.1	38.2
C4/50-ser	21.6	28.6	38.3
C5/20-u.kül	16.3	18.3	36.0
C6/30-u.kül	17.6	22.0	39.5

Deney sonuçlarına göre süperakışkanlaştırıcı/çimento ve su/çimento oranı arttıkça karışımların basınç mukavemeti azalmaktadır.

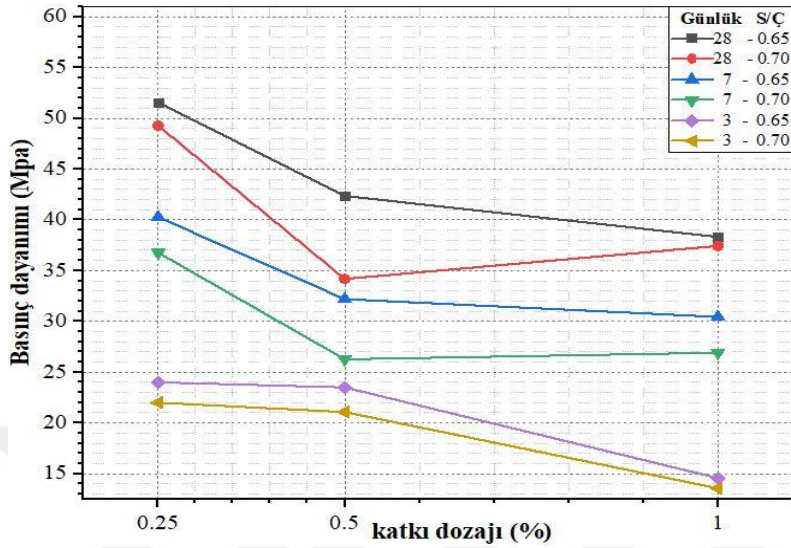
X markalı süperakışkanlaştırıcı katkı dozajı ile 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının değişimine yönelik Şekil 4.4 incelendiğinde, %1 ve %0.5’lik dozajlarda aşırı derecede segregasyona ve kismaya neden olduğundan dolayı dayanımlardaki davranışların düzenli olmadığı sonucuna varılmıştır.

Bu süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları 38.3 MPa ile 51.6 MPa değerleri arasında değişmektedir.

S/Ç oranı değişimi açısından incelendiğinde; %1, %0.5 ve %0.25 katkı dozajlarda S/Ç oranı 0.65 olan karışımların basınç dayanımı, S/Ç oranı 0.7 olan karışımlarına göre sırasıyla %2.4 , %2.3 ve %4.6 oranlarında artmıştır.

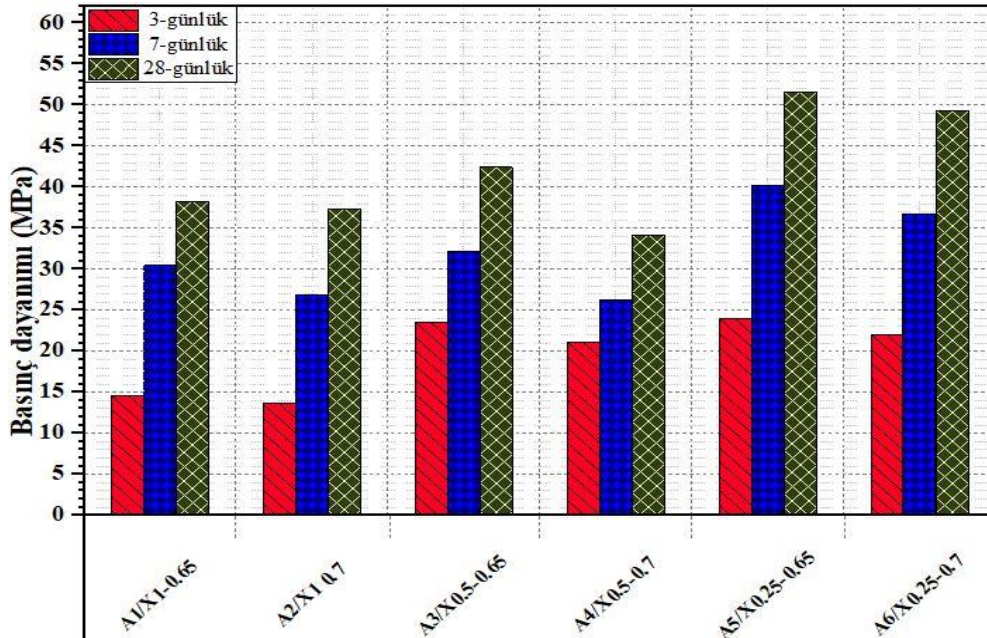
K/Ç oranı değişimi açısından incelendiğinde; S/Ç oranı 0.65 olan karışımların, katkı oranlarının %0.5 ve %0.25’lik dozajlarda basınç dayanımı %1’lik dozaja göre

sırasıyla %10.4 ve 34.7 oranlarında artmıştır. S/Ç oranı 0.7 olan karışımların, %0.5'lik dozajdaki basınç dayanımı %1'lik karışıma göre %8.5 oranında azalmış, ancak %0.25'lik dozajdaki dayanımı %31 oranında artmıştır.



Şekil 4.4. 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin X markalı süperakışkanlaştırıcı katkı dozajı ile değişimi

X markalı süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılan numunelerin basınç dayanımlarının zamana bağlı değişimini gösteren Şekil 4.5 incelendiğinde; tüm dozajlarda basınç dayanımı artışı gözlemlenmiştir.



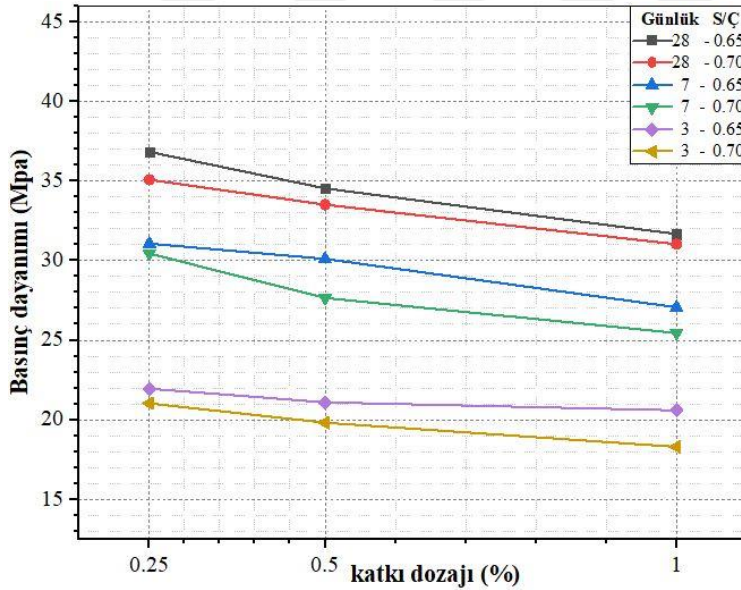
Şekil 4.5. X markalı süperakışkanlaştırıcı içeren karışımların basınç dayanımı değerlerinin zamanla değişimi

Y markalı süperakışkanlaştırıcı katkı dozajı ile 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının değişimine yönelik Şekil 4.6 incelendiğinde; tüm günlerde genel olarak dozaj arttıkça basınç dayanımının azaldığı görülmektedir.

Bu süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılan karışımların 28 günlük en yüksek basınç mukavemet değerini B6/Y0.25 - 0.70 kodlu (%0.25, S/Ç oranı 0.65) serisi alırken, en düşük değerini ise B1/Y1 - 0.65 (%1 Katkı, S/Ç oranı 0.7) serisi almıştır.

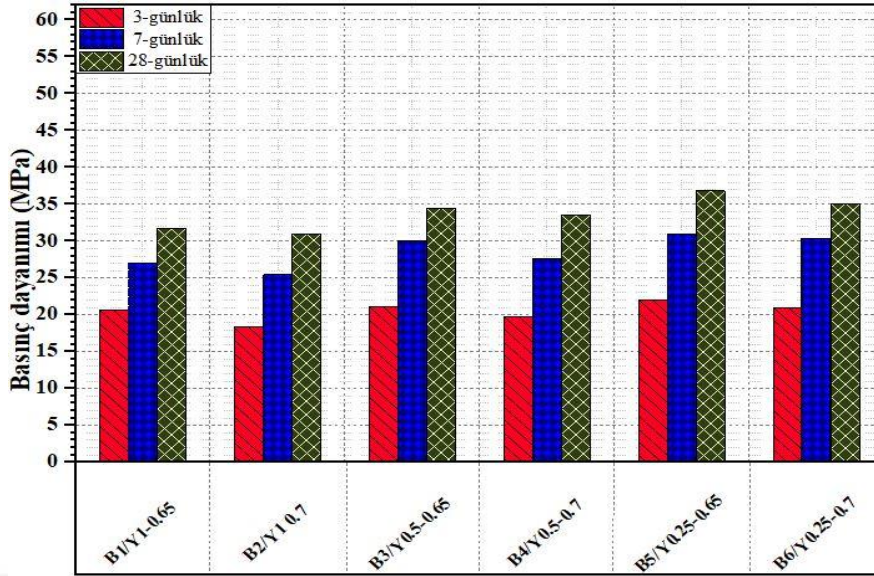
S/Ç oranı değişimi açısından incelendiğinde; %1, %0.5 ve %0.25 katkı dozajlarda S/Ç oranı 0.65 olan karışımların basınç dayanımı, S/Ç oranı 0.7 olan karışımlarına göre sırasıyla %2.2 , %2.9 ve %4.8 oranlarında artmıştır.

K/Ç oranı değişimi açısından incelendiğinde; S/Ç oranı 0.65 olan karışımların, %0.5 ve %0.25'lik dozajlardaki basınç dayanımı %1'lik dozaja göre sırasıyla %8.1 ve %16 oranlarında artmıştır. S/Ç oranı 0.7 olan karışımların ise , %0.5 ve %0.25'lik dozajlardaki basınç dayanımı %1'lik dozaja göre sırasıyla %8 ve %13.2 oranlarında artmıştır. İki S/Ç oranında da katkının dozajı artımı ile basınç dayanımı arasında doğrusala yakın bir ters orantı belirlenmiştir. Sayısal hesaplamalarda referans değer olarak kullanılan 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre %1'lik katkı kullanımında dayanımın %16 ve %13.2 kaybedilmiş olması kayda değer bir durum olarak öngörülmüştür.



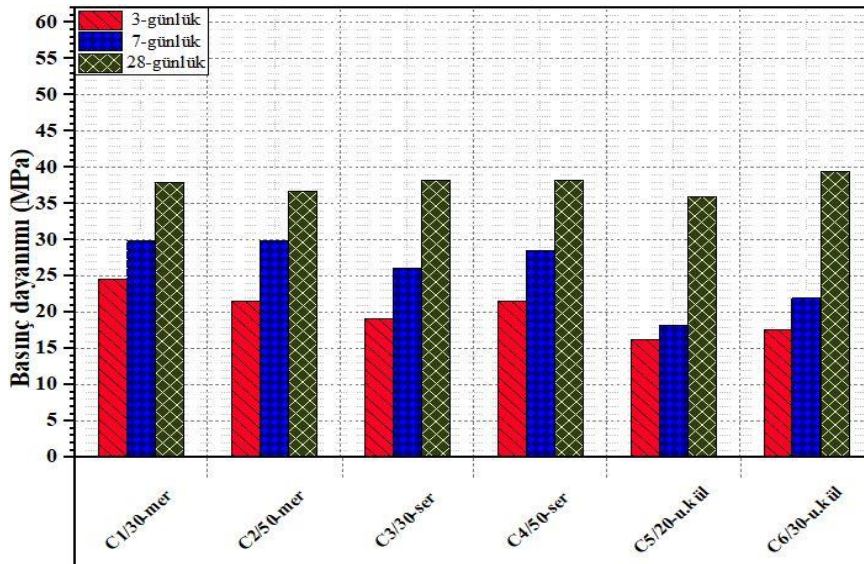
Şekil 4.6. 3, 7 ve 28-günlük basınç dayanımı değerlerinin Y markalı süperakışkanlaştırıcı katkı dozajı ile değişimi

Y markalı süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılan numunelerin basınç dayanımlarının zamana bağlı değişimini gösteren Şekil 4.7 incelendiğinde; tüm dozajlarda 3 gün ile 7 gün arasında sürekli basınç artışı gözlemlendiği, 7 gün ile 28 gün arasında basınç dayanımının artış hızının azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.7. Y markalı süperakışkanlaştırıcı içeren karışımların basınç dayanımı değerlerinin zamanla değişimi

Mermer atık tozu, seramik atık tozu ve uçucu kül kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları 36 MPa ile 39 MPa değerleri arasında değişmektedir. Bu malzemeler kullanılan harçların tamamının 28 günlük basınç dayanımları kontrol karışımına göre artmıştır. Mermer atık tozu kullanılan harçların %30 ve %50 ikame oranlarında basınç dayanımı kontrol karışımına göre sırasıyla %13.3 ve %9.5 oranlarında, seramik atık tozu kullanılan harçların %30 ve %50 ikame oranlarında sırasıyla %14 ve %14.1 oranlarında ve uçucu kül kullanılan harçların ise %20 ve %30 ikame oranlarında sırasıyla %7.5 ve %16 oranlarında artmıştır.



Şekil 4.8. Mermer, seramik ve uçucu kül kullanılan karışımların basınç dayanımı değerlerinin zamanla değişimi

Bu sonuçlara göre K/Ç ve S/Ç oranları harç karışımlarının basınç dayanımını önemli derecede etkilediği tespit edilmiştir.

4.1.3. Eğilme dayanım sonuçları

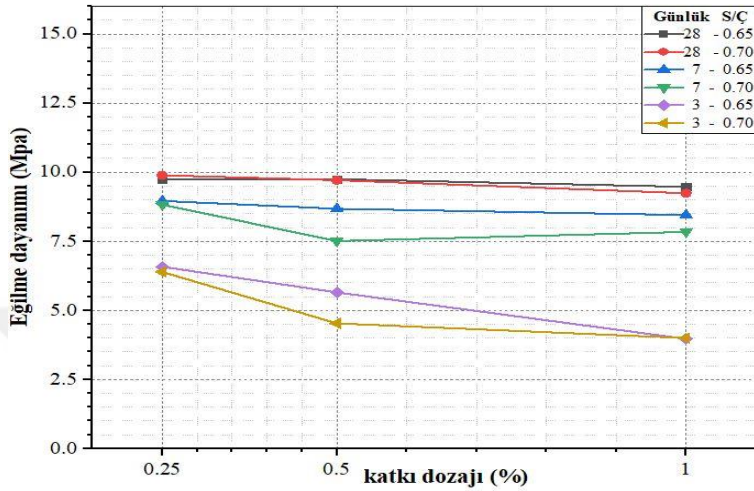
Deneyssel çalışmada elde edilen harç numunelere ait eğilme dayanım değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Numunelerin 3, 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları

Karışım	Eğilme Dayanımı (MPa)		
	3-günlük	7-günlük	28-günlük
A1/X1 - 0.65	4.0	8.5	9.5
A2/X1 - 0.70	4.5	7.8	9.2
A3/X0.5 - 0.65	5.7	8.7	9.8
A4/X0.5 - 0.70	4.5	7.5	9.9
A5/X0.25 - 0.65	6.6	9.0	9.8
A6/X0.25 - 0.70	6.4	8.8	9.7
B1/Y1 - 0.65	4.5	7.3	8,07
B2/Y1 - 0.70	4.2	7.1	8.8
B3/Y0.5 - 0.65	4.9	7.1	10.36
B4/Y0.5 - 0.70	4.5	6.8	10.92
B5/Y0.25 - 0.65	5.1	10.6	11.9
B6/Y0.25 - 0.70	4.9	10.1	11.29
C1/30-mer	2.9	8.3	9.5
C2/50-mer	3.2	8.8	9.2
C3/30-ser	5.8	8.2	9.8
C4/50-ser	5.7	9.0	9.5
C5/20-u.kül	3.4	6.4	8.4
C6/30-u.kül	3.8	5.1	8.4

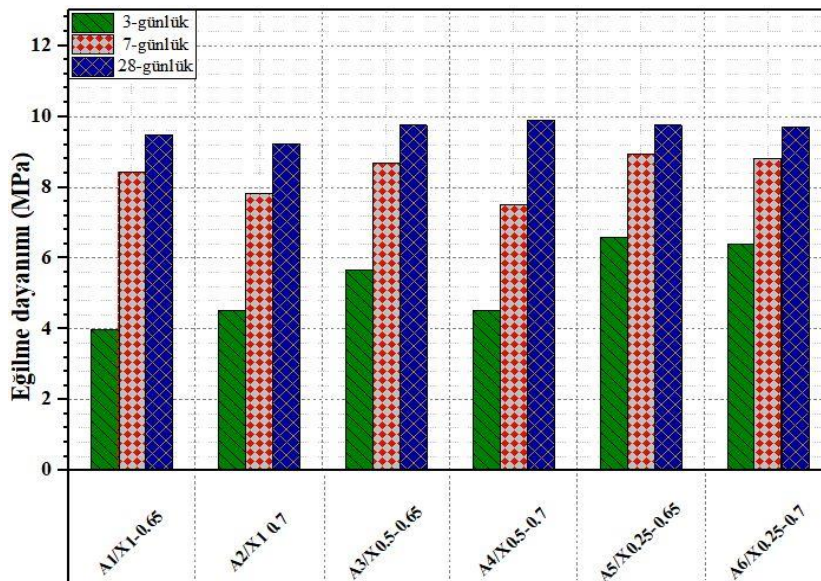
X markalı süperakışkanlaştırıcı katkı dozajı ile 3, 7 ve 28 günlük eğilme dayanımlarındaki değişim (Şekil 4.9 ve Şekil 4.10) incelendiğinde; katkı dozaj oranı arttıkça eğilme dayanımının az da olsa azaldığı görülmektedir.

Bu katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları 9.2 MPa ile 9.9 MPa değerleri arasında değişmektedir. Bu harçların 28 günlük eğilme dayanımlarında yaklaşık %1 ile %2 mertebesinde değişimler gözlemlenmiş olup, bu farklılıkların numunenin heterojen yapısından kaynaklı olduğu düşünülmüştür. Bu nedenle X markalı süperakışkanlaştırıcı katkı dozajı ile eğilme dayanımı arasında bir ilişki bulunmadığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.9. 3, 7 ve 28-günlük eğilme dayanımı değerlerinin X markalı süperakışkanlaştırıcı katkı dozajı ile değişimi

X markalı süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılan numunelerin eğilme dayanımlarının zamana bağlı değişimi Şekil 4.10'da verilmiştir. Şekil 4.10 incelendiğinde; kullanılan tüm katkı dozajlarında 28 günlük dayanımının %95'ni 7 gün içinde aldığı gözlemlenmiştir.



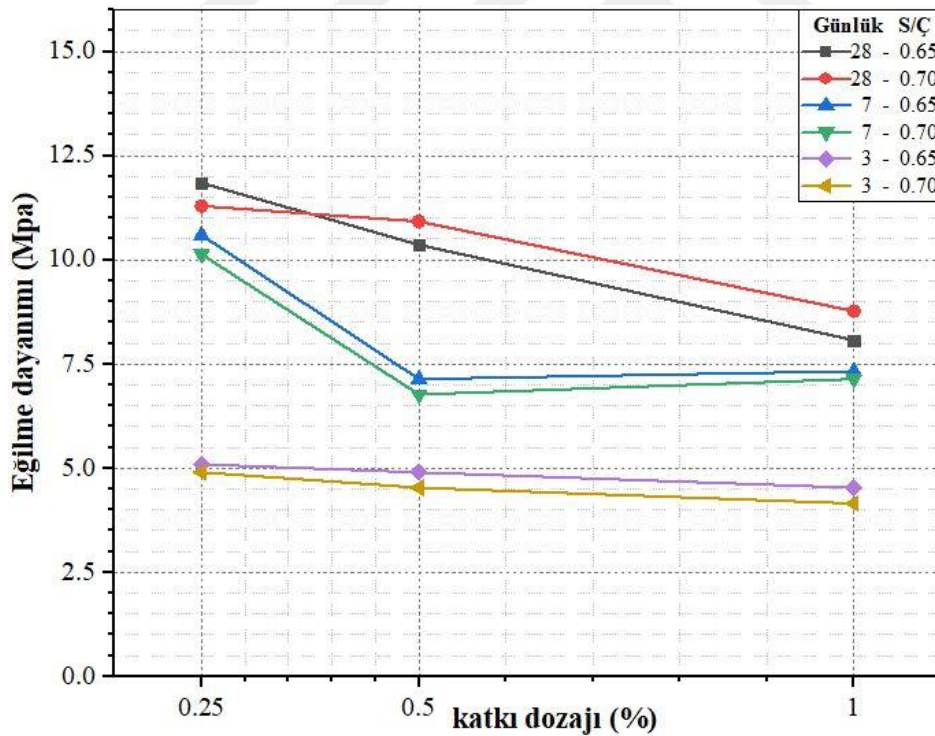
Şekil 4.10. X markalı süperakışkanlaştırıcı içeren karışımların eğilme dayanımı değerlerinin zamanla değişimi

Y markalı süperakışkanlaştırıcı katkı dozajı ile 28 günlük eğilme dayanımlarının değişimi (şekil 4.11 ve şekil 4.12) incelendiğinde; dozaj arttıkça eğilme dayanımının azaldığı görülmektedir.

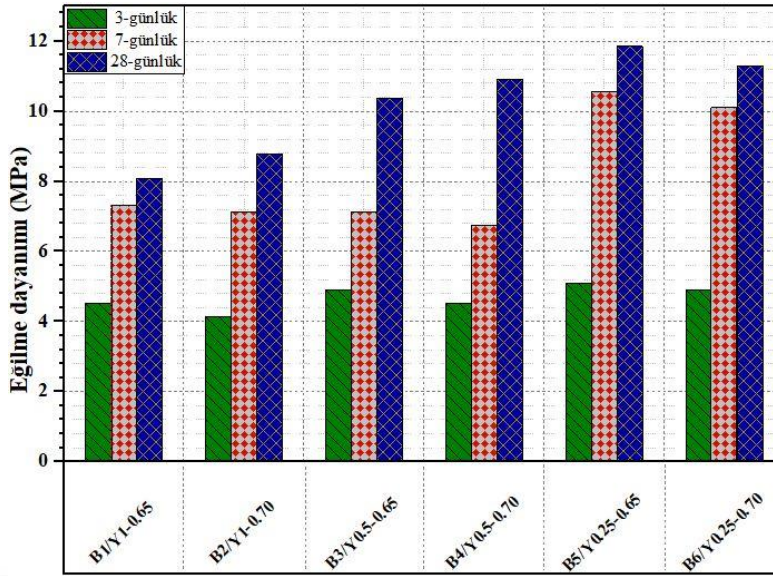
Bu katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 28 günlük en yüksek eğilme dayanımı B5/Y0.25 - 0.65 kodlu numunede yani S/Ç oranı 0.7 ve K/Ç oranı %0.25 olduğu seride belirlenmiştir. En düşük eğilme dayanımı ise B2/Y1 - 0.70 kodlu numunede yani S/Ç oranı 0.7 ve K/Ç oranı %1 olduğu seride görülmüştür.

S/Ç oranı değişimi açısından incelendiğinde; %1 ve %0.5'lik katkı dozajlarda, S/Ç oranı 0.65 olan karışımların basınç dayanımı, S/Ç oranı 0.7 olan karışımlara göre sırasıyla %9 ve %5.4 oranlarında artmış, ancak %0.25'lik dozajda %5.4 oranında azalmıştır.

K/Ç oranı değişimi açısından incelendiğinde; S/Ç oranı 0.65 olan karışımların, %0.5 ve %0.25'lik katkı dozajlarda basınç dayanımı %1'lik dozaja göre sırasıyla %28.3 ve %47.4 oranlarında artmıştır, S/Ç oranı 0.7 olan karışımların ise %0.5 ve %0.25'lik katkı dozajlarda basınç dayanımı %1'lik dozaja göre sırasıyla %24 ve %28.3 oranlarında artmıştır. Bu süperakışkanlaştırıcı katkı malzemesinin karışımında kullanım miktarı ve S/Ç oranının artımı ile eğilme dayanımı arasında doğrusala yakın bir ters orantı belirlenmiştir.

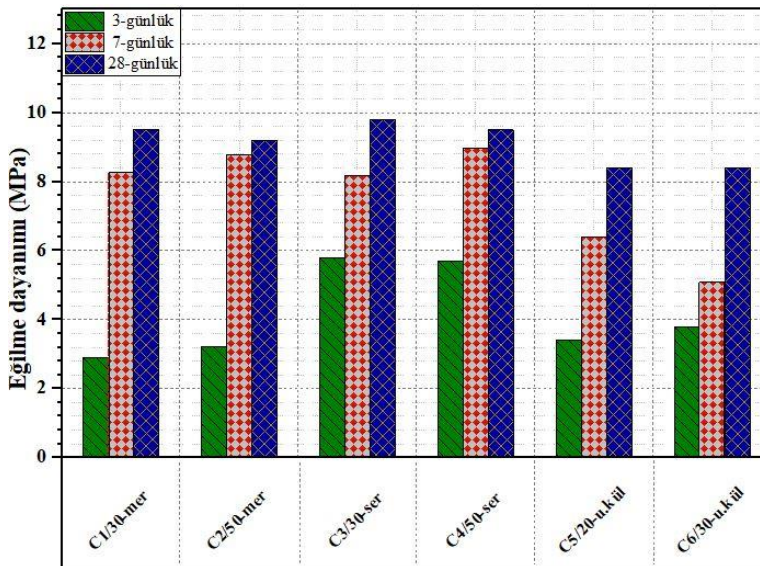


Şekil 4.11. 3, 7 ve 28-günlük eğilme dayanımı değerlerinin Y markalı süperakışkanlaştırıcı katkı dozajı ile değişimi



Şekil 4.12. Y markalı süperakışkanlaştırıcı içeren karışımların eğilme dayanımı değerlerinin zamanla değişimi

Mermer atık tozu, seramik atık tozu ve uçucu kül kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları 8.4 MPa ile 9.8 MPa değerleri arasında değişmektedir. Bu malzemeler, kullanılan harçların tamamının 28 günlük eğilme dayanımları kontrol karışımına göre azaldığı görülmektedir. Mermer tozu kullanılan harçların %30 ve %50 ikame oranlarında eğilme dayanımı kontrol karışımına göre sırasıyla %4.9 ve %18.7 oranlarında, seramik tozu kullanılan harçların %30 ve %50 ikame oranlarında ise sırasıyla %11 ve %14.9 oranlarında azalmıştır. En büyük düşüş %30'luk eğilme dayanımını kaybı ile %20 ve %30 uçucu kül kullanılan karışımlarda görülmektedir.



Şekil 4.13. Mermer, seramik ve uçucu kül kullanılan karışımların basınç dayanımı değerlerinin zamanla değişimi

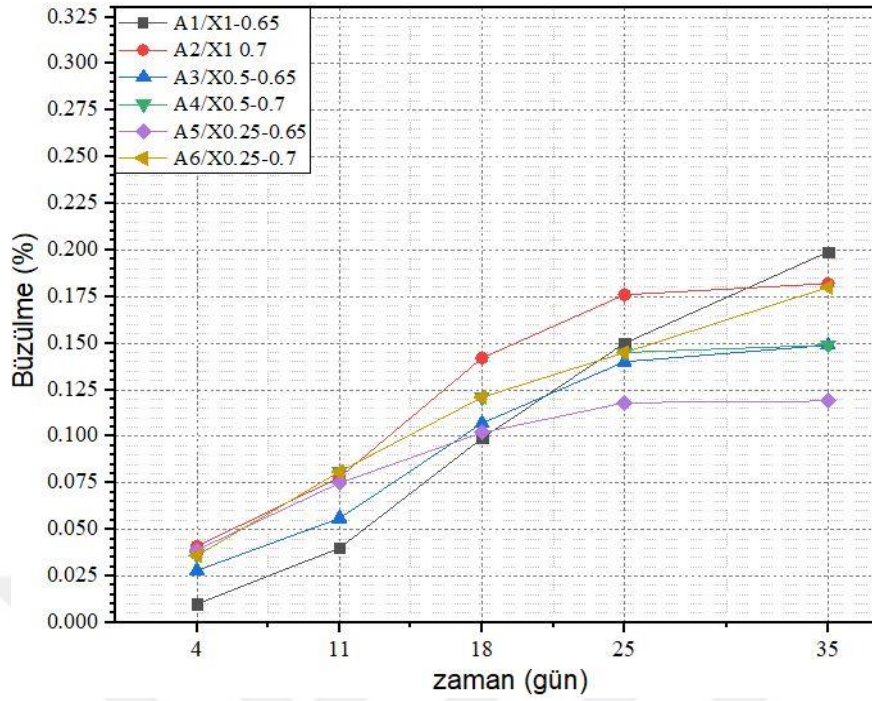
4.1.4. Büzülme deneyi sonuçları

Harç karışımlarının kuruma-büzülme (boy değişimi) değerleri çizelge 4.4'te verilmiştir. Her değer 3 ölçüm ortalamasını ifade etmektedir. Sonuçlardan da anlaşılacağı gibi, iki farklı süperakışkanlaştırıcı katkı ile hazırlanan karışımların ilk günlerde büzülme artış şiddeti yüksek iken zamanla büzülme artış şiddeti azalmıştır.

Çizelge 4.4. Tüm karışımların büzülme değerleri

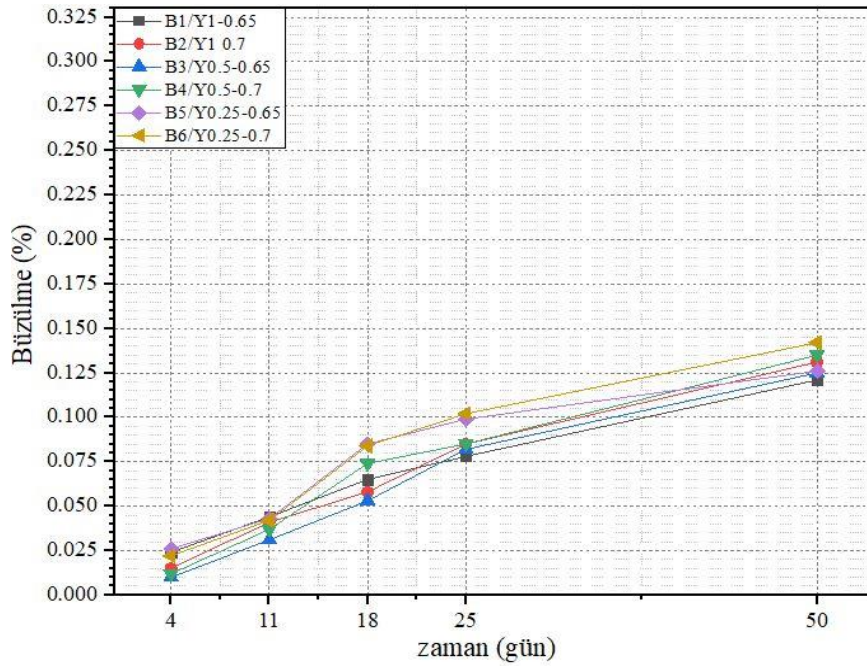
Karışım	Büzülme (boy değişimi) (%)					
	4-günlük	11-günlük	18-günlük	25-günlük	35-günlük	50-günlük
A1/X1 - 0.65	0.01	0.04	0.099	0.15	0.199	---
A2/X1 - 0.70	0.041	0.078	0.142	0.176	0.182	---
A3/X0.5 - 0.65	0.028	0.56	0.107	0.14	0.149	---
A4/X0.5 - 0.70	0.036	0.081	0.121	0.145	0.149	---
A5/X0.25 - 0.65	0.039	0.075	0.102	0.118	0.119	---
A6/X0.25 - 0.70	0.036	0.081	0.121	0.145	0.18	---
B1/Y1 - 0.65	0.024	0.044	0.065	0.078	---	0.121
B2/Y1 - 0.70	0.015	0.041	0.058	0.085	---	0.131
B3/Y0.5 - 0.65	0.01	0.031	0.053	0.082	---	0.125
B4/Y0.5 - 0.70	0.012	0.037	0.074	0.085	---	0.135
B5/Y0.25 - 0.65	0.026	0.043	0.085	0.099	---	0.126
B6/Y0.25 - 0.70	0.022	0.042	0.084	0.102	---	0.142
C1/30-mer	0.023	0.048	0.072	0.096	---	0.128
C2/50-mer	0.014	0.041	0.067	0.085	---	0.126
C3/30-ser	0.023	0.064	0.109	0.131	---	0.151
C4/50-ser	0.04	0.077	0.1	0.12	---	0.126
C5/20-u.kül	0.012	0.03	0.065	0.081	---	0.095
C6/30-u.kül	0.012	0.027	0.051	0.08		0.09

X-markalı süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılan karışımların büzülmelerinin büyük kısmının ilk 25 günde olduğu ve bundan sonra A1/X1 - 0.65 karışım dışındaki tüm numunelerin büzülme eğrilerinin yataylaştığı şekil 4. 14'te görülmektedir. Bu süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılan karışımların, 35 gün süreyle ölçülen kuruma büzülme deney sonuçlarına bağlı A5/X0.25 - 0.65 kodlu karışım numunelerinin büzülme değerleri daha düşük olduğu belirlenmiştir. Buna karşılık A1/X1 - 0.65 kodlu karışım numunelerinin ise büzülme değerleri daha yüksek olduğu gözlenmiştir.



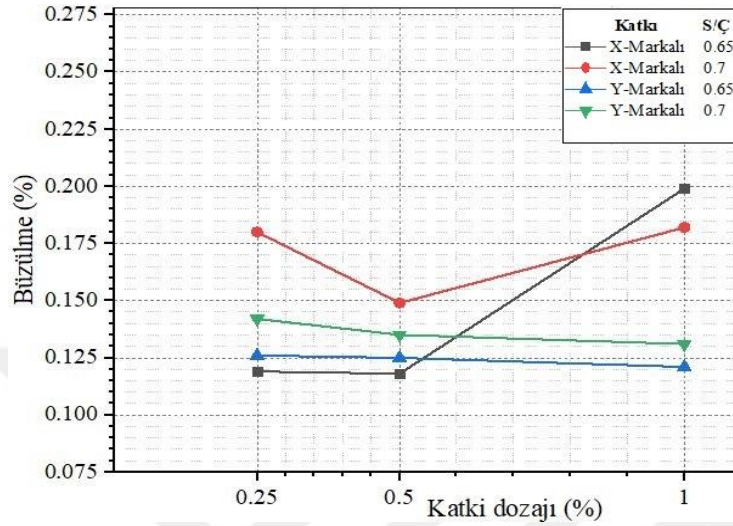
Şekil 4.14. X markalı süperakışkanlaştırıcı kullanılan karışımların büzülmeleri

Şekil 4.15'te Y markalı süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılan numunelerin zamanla boy değişimi gösterilmiştir. Bu Y markalı katkı kullanılan karışımların 50 günlük boy değişim değerleri incelendiğinde; B6/Y0.25 - 0.70 ve B1/Y1 - 0.65 karışımlar, sırasıyla en iyi ve en kötü performans gösteren karışımlar olarak belirlenmiştir.



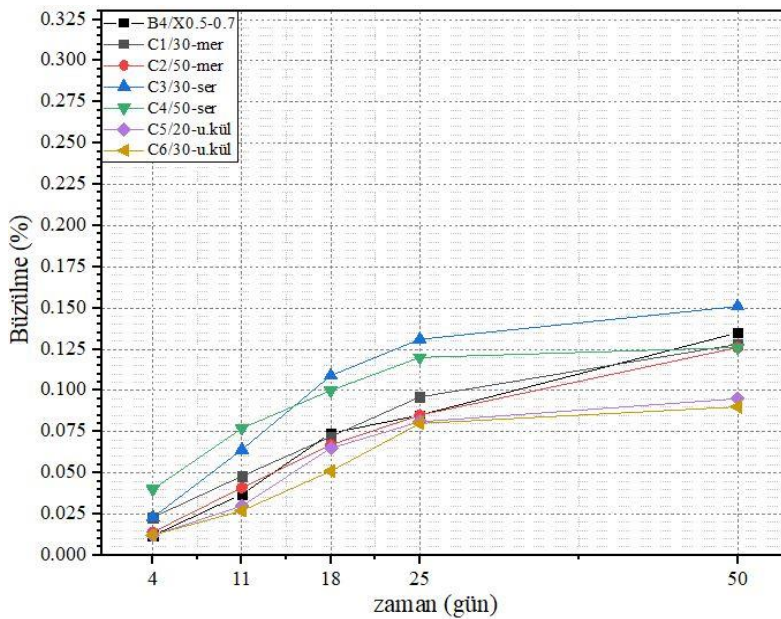
Şekil 4.15. Y markalı süperakışkanlaştırıcı kullanılan karışımların büzülmeleri

Süperakışkanlaştırıcı katkı dozajı ile boy değişim arasındaki ilişkiyi görmek için çizilen Şekil 4.16'daki grafik incelendiğinde; X markalı süperakışkanlaştırıcı katkıda boy değişimi optimum dozajda bir düşüş gözlenmiş, ancak yüksek dozajlarda boy değişim yüzdeleri artmıştır. Y markalı süperakışkanlaştırıcı katkıda ise dozaj arttıkça büzülme değerleri azaldığı görülmüştür.



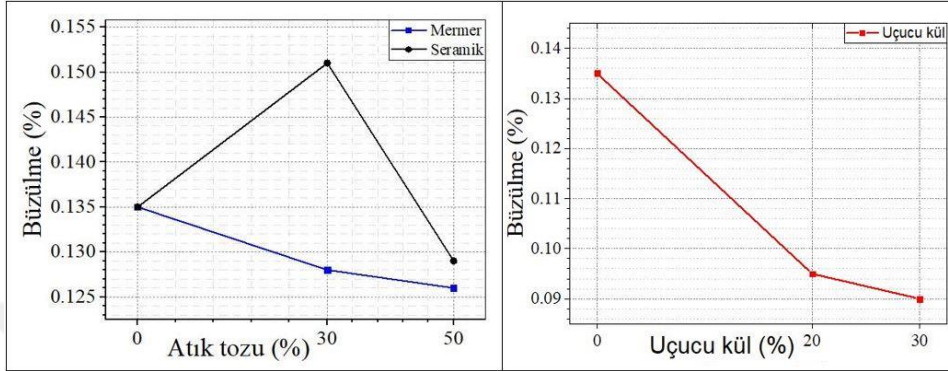
Şekil 4.16. Büzülme değerlerinin süperakışkanlaştırıcı katkı dozajı ile değişimi

Şekil 4.17'de mermer atık tozu ,seramik atık tozu ve uçucu kül ikameli harçların ikame oranına bağlı olarak kuruma büzölmelerini göstermektedir. Bu malzemeleri içeren karışımların 50 günlük boy değişim yüzdeleri incelendiğinde C6/30-u.kül kodlu yani %30 uçucu kül içeren karışım ve C3/30-ser, kodlu yani %30 seramik içeren karışım sırasıyla en iyi ve en kötü performans gösteren karışımlar olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.17. Mermer, seramik ve uçucu kül kullanılan karışımların büzölmeleri

Şekil 4.18 incelendiğinde karışımda uçucu kül kullanımının kuruma büzülmesini belirgin bir şekilde azalttığı görülmektedir. Kou vd. (2008), farklı oranlarda uçucu kullandıkları betonlar üzerinde kuruma büzülmesi ölçümü yapmışlar ve uçucu kül kullanımının kuruma büzülmesini azalttığını gözlemlemişlerdir. Cengiz (2003), ise uçucu küllün büzülmesini azaltıcı etkisini, yapısındaki MgO'nun ve kireç varlığına bağlamışlardır.



Şekil 4.18. Mermer, seramik ve uçucu kül kullanılan karışımların büzülme değerlerinin süperakışkanlaştırıcı katkı dozajı ile değişimi

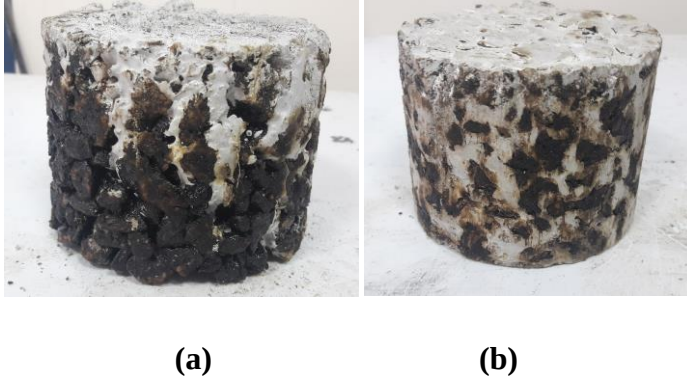
4.2. Yarı Rijit Kaplama Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

DeneySEL çalışmanın bu bölümünde asıl amaç elde edilen en uygun akışkan harç ile poroz asfaltın boşluklarını doldurarak, harç özelliklerinin YRK performansı ile ilişkisini değerlendirmektir.

4.2.1. Harcın boşluklara nüfuz edebilme kabiliyeti

Literatür araştırmalarına göre YRK'nın avantaj sağlayabilmesinin tamamen çimento harcının akışkanlık özelliğine ve poroz asfaltın boşluklarına ait olduğu görülmektedir. Kullanılan harcın boşluklara kendi ağırlığı sayesinde yerçekimi etkisiyle nüfuz edebilmesi son derece önemli olmaktadır. Bu sebeple üretilip kullanılacak harcın laboratuvar şartlarında testleri yapılarak şartlara en uygun tip seçilmelidir. İstenilen akışkanlık özelliğini sağlayabilmek, istenilen işlenebilirliği boşlukları doldurana kadar koruyabilmek, terleme ve katkı kusma durumlarını engellemek harç dizaynının en önemli hedefi olmalıdır. Kullanılan akışkan harç poroz asfaltın boşluklarını %95'nin üzerinde doldurması gerekmektedir (Anderton, 2000; Olivera 2006).

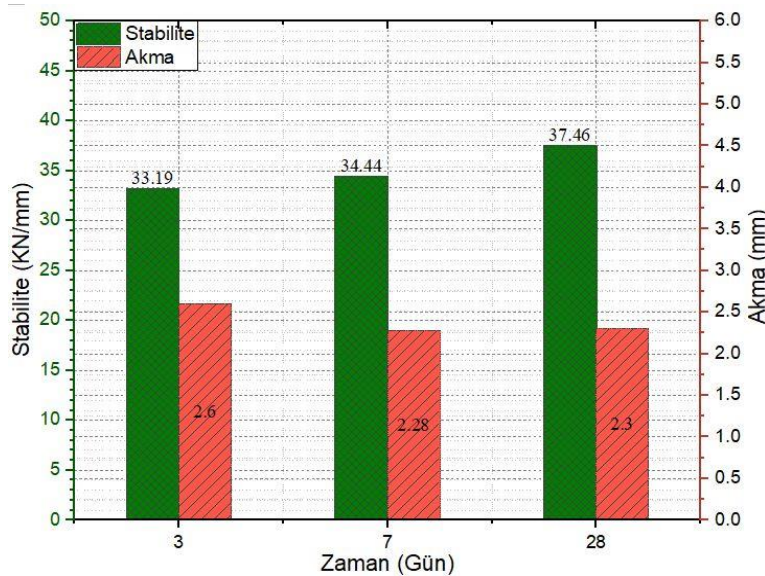
Pei vd.'ne (2016), göre harcın nüfuz edebilme kabiliyetini nüfuz eden harç hacminden ve YRK'nın hava boşluklarından tahmin etmek mümkündür. Bu çalışmada, YRK numuneleri bir günlük hava kürlenmesinden sonra kalıplardan çıkarılmış ve görsel olarak incelenmiştir. İlk denemede A6/X0.25 - 0.70 kodlu harç karışımı seçilerek kullanılmıştır. Şekilde 4. 19-a'da görüldüğü gibi yeterli akışkanlığa sahip olmadığından dolayı boşluklara nüfuz edememiştir. Karşılaşılan bu olumsuz durum nedeniyle bu karışımın kullanılmasından vazgeçilmiştir. İkinci denemede ise B4/Y0.5 - 0.70 kodlu karışım kullanılmıştır. Şekil 4.19-b'de görüldüğü gibi 65 mm kalınlıktaki numunelerin boşluklarını tamamen doldurduğu görülmüştür.



Şekil 4.19. Akışkan harcın poroz asfaltın boşluklarına nüfuz etmesi; **a)** A6/X0.25 - 0.70 kodlu harç karışımı; **b)** B4/Y0.5 - 0.70 kodlu harç karışımı.

4.2.2. Yarı rijit kaplamada harcın marshall stabilite ve akma değerleri üzerine etkisi

Stabilite değeri, kaplamaların yapısal mukavemetini ifade eder. Akma değeri, ise karışımların plastiklik ve esneklik özelliklerini ifade etmektedir. Hazırlanan YRK numuneleri 3, 7 ve 28 günlerde Marshall stabilite ve akma deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçları şekil 4.20’de verilmiştir. Şekilde 4.20’de görüldüğü gibi 28. günde karışımın 37.46 KN Marshall Stabilite değerini verdiği görülmüştür. Yoğun trafik için, Asfalt Enstitüsü (1995), minimum 8KN’lık bir stabilite değeri önermektedir. Benzer şekilde, ERA (2013), çok yoğun bir trafik sınıfı için minimum 9KN stabilite değeri belirlemektedir. Anderton (2000) ABD’nin Karayolu Stratejik Araştırma Programının (SHRP) raporunu hazırlamıştır. Bu rapora göre, YRK’ların 28 günde ortalama 19 KN stabilite değerine sahip olduğu görülmüştür. Deshmukh (2011), yaptığı bir çalışmada YRK’nın maksimum Marshall stabilite değerini 22.7 KN olarak belirlemiştir. Elde edilen yüksek stabilite değerleri, karışım içindeki harcın mekanik özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

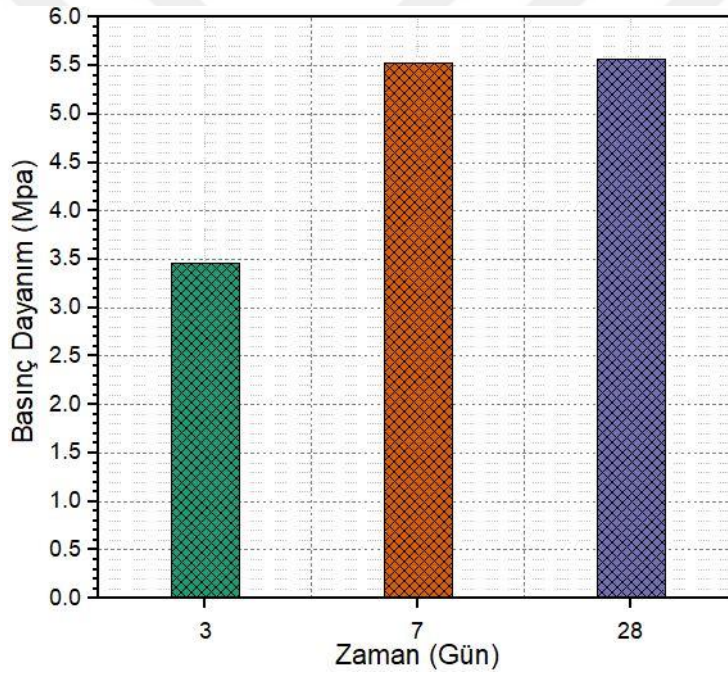


Şekil 4.20. YRK numunelerin 3, 7 ve 28 günlük Marshall stabilite ve akma değerleri

Akma değeri; plastikleşmeye veya kaplamanın trafik altında deforme olmasına karşı mukavemetin bir göstergesidir. Karayolları Teknik Şartnamesi 2013 aşınma tabakasında akma değerlerinin 2-4 mm arasında olmasını istemektedir. Şekil 4.20 incelendiğinde numunelerin akma değerlerinin limit sınırları içinde olduğu görülmektedir.

4.2.3. Yarı rijit kaplamada harcın basınç dayanımı üzerine etkisi

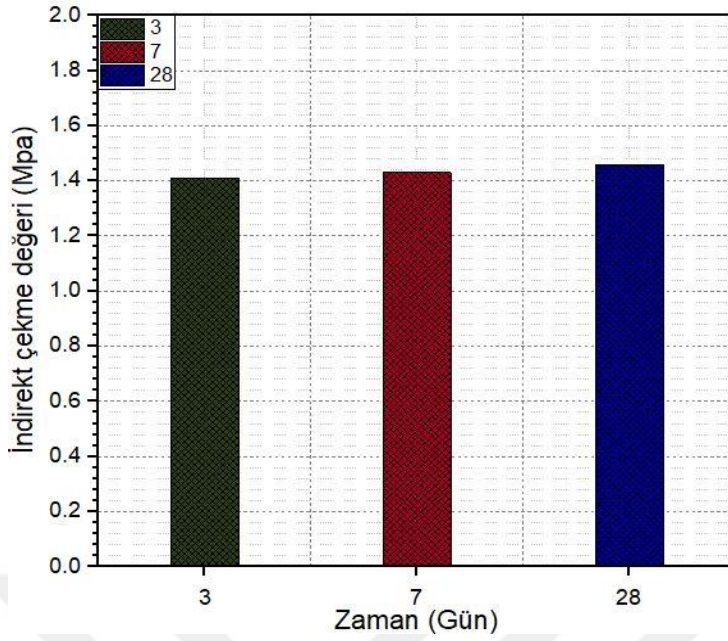
Basınç dayanımı kaplamanın basınç altında dayanabileceği maksimum gerilmedir. Üretilen YRK numuneleri üzerinde 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı deneyi yapılmış ve sonuçları şekil 4.21’de gösterilmiştir. Değerler 3 adet numunenin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Yapılan literatür araştırmalarına göre Densiphalt® ve DuraTough® ticari ürünlerinin 28 günde sırasıyla 7 Mpa ve 5Mpa basınç dayanımı kazandığı belirlenmektedir. Şekil 4.21’de görüldüğü gibi hazırlanan karışımın 28-günlük basınç dayanımı ortalama olarak 5.55 Mpa hesaplanmıştır. Dolayısıyla basınç dayanımı literatüre araştırmalarla kıyaslanınca, numunelerin uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 4.21. YRK numunelerin 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları

4.2.4. Yarı rijit kaplamada harcın indirekt çekme dayanımı üzerine etkisi

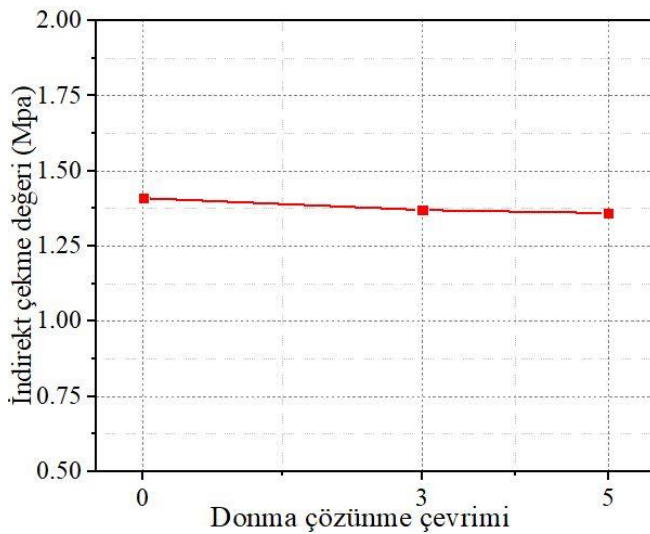
İndirekt çekme deneyi, kaplama karışımların kırılma direncini ve rijitliğini belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. YRK numunelerin 3,7 ve 28 günlük indirekt çekme değerleri şekil 4.22’de görülmektedir. En yüksek indirekt çekme değeri 1.46 Mpa olarak 28 günde elde edilmiştir. Hulala (2007), yaptığı bir çalışmada poroz asfaltın maksimum indirekt çekme değerini 0.18 Mpa belirlemiştir. Bu çalışmada YRK numunelerinde kullanılan akışkan harcın eğilme dayanımı 28 günde 10.92 Mpa tespit edilmiştir. Dolayısıyla YRK’da akışkan harcın kullanılması, kaplamanın çekme gerilmelerine karşı dayanımını arttırdığı gösterilmektedir.



Şekil 4.22. YRK numunelerin 3, 7 ve 28 günlük indirekt çekme değerleri

4.2.5. Yarı rijit kaplamada harcın donma-çözülme etkisi altında davranışı

Soğuk iklim koşullarında rijit kaplamaların erken bozulmasına neden olan en önemli etkenlerden biri donma-çözünme olayıdır. Bu deneydeki esas amaç aşırı don olan hava şartlarında YRK numunelerin özelliklerine etkisini araştırmaktır. Hazırlanan numunelere havada donma-çözülme deneyi uygulanmıştır. Numuneler 3 ve 5 çevrim sonunda indirekt çekme deneyine tabi tutulmuştur. Referans numune ile donma-çözölmeye maruz kalan numunelerin sonuçları kıyaslanarak şekil 4.23'te gösterilmiştir. Deney sonuçlarına dayanarak, numunelerin 3 ve 5 donma-çözölme çevrimlerinden sonra dayanım kayıpları sırasıyla yaklaşık % 2.1 ve % 3.2 oranlarında olduğu görölmektedir.



Şekil 4.23. YRK numunelerin 3 ve 5 çevrim sonunda indirekt çekme değerleri

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasının birinci aşamasında YRK' da kullanılan akışkan harç karışımları farklı açılardan incelenmiştir. Taze harçlarda akışkanlık deneyi, sertleşmiş harçlarda 3, 7 ve 28 günlük basınç ve eğilme dayanımı ve 4, 11, 18, 25, 35 ve 50. günlerde kuruma büzülme deneyi yapılmıştır. Ayrıca agrega yerine farklı oranlarda mermer atık tozu, seramik atık tozu ve uçucu kül ikame edilerek harç performansına etkisi incelenmiştir. İkinci aşamada ise, oluşturulan en uygun harç karışımı ile poroz asfaltın boşlukları doldurularak, YRK'nın performans üzerine harcın etkisi araştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

Birinci aşama sonuçları;

- YRK'da kullanılan harcın uygulanması yapılmadan önce, kaliteli süperakışkanlaştırıcı katkı seçimi, uygulamanın başarısı ve uygulanabilirliği açısından son derece önemli olmaktadır.
- Harç karışımlarına süperakışkanlaştırıcı kullanımı belli bir dozajın ötesinde akış sürelerinde çok fazla değişiklik gözlemlenmemiştir.
- Kullanılan süperakışkanlaştırıcıların kullanım dozajı arttıkça hem eğilme hem de basınç dayanımları azalmıştır.
- Y markalı süperakışkanlaştırıcı kullanılan numunelerin az da olsa boy değişim yüzdeleri artmıştır.
- Mermer atık tozu, seramik atık tozu ve uçucu kül malzemeleri harçların basınç dayanımlarını kontrol karışımına göre artırmış, ancak eğilme dayanımlarını azaltmıştır.
- Harç karışımında uçucu kül kullanılması harcın kuruma büzülmesini belirgin bir şekilde azalttığı görülmüştür.
- YRK'larda kullanılan akışkan harcın en önemli özelliklerinden biri boşluklara hızlı bir şekilde nüfuz ederek doldurmaya sahip olmasıdır. Dolayısıyla kusma ve segregasyon görülmeden en iyi akışkanlığa sahip olan A4/X0.5 - 0.70 kodlu karışım poroz asfaltın boşluklarını doldurmak için kullanılmıştır.

İkinci aşama sonuçları;

- Kullanılan harç karışımının basınç dayanımı ile YRK'nın Marshall stabilitesi ve basınç dayanımı arasında doğrusal bir ilişki bulunmuştur. Harç dayanımı arttıkça YRK'nın da Marshall stabilitesi ve basınç dayanımı artış göstermiştir.
- Kullanılan harç karışımının eğilme dayanımı ile YRK'nın indirekt çekme değeri arasında doğrusal bir ilişki bulunmuştur.

- Donma-çözölmeye maruz kalan numunelerin indirekt çekme dayanımı kaybı kontrol karışımıyla kıyaslanınca az da olsa azalmıştır.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığında bundan sonra yapılacak çalışmalarda farklı çimentolar, farklı çimento oranları, farklı kimyasal katkıları ve farklı atık malzemeleri kullanımının, akışkan harçların ve YRK karışımların performansı üzerindeki etkileri araştırılabilir.



6. KAYNAKLAR

- Afonso, M. L., Almeida, M. D., Oliveira, P., Gomes, J. C., Zoorob, S. E. 2016. Development of a semi-flexible heavy-duty pavement surfacing incorporating recycled and waste aggregates – Preliminary study. *Construction and Building Materials*, 102 (1):155-161.
- Alhrich, R. C. and Anderton, G. L., 1991. Evaluation of Resin Modified Paving Process. Transportation Research Record 1317. National Research Council. Washington, DC.
- Al-Qadi, I. L., Gouru, H. and Weyers, R. E. 1994. Asphalt portland cement concrete composite: Laboratory Evaluation. *Journal of Transportation Engineering*, 120(1): 94-108.
- Anagnostopoulos, C.A. 2014. Effect of different superplasticizers on the physical and mechanical properties of cement grouts. *Construction and Building Materials*, 50: 162-168.
- Anderton, J. L. 2000. Engineering Properties of Resin Modified Pavement for Mechanistic Design Geotechnical Laboratory. U.S. Army Engineer Research and Development Center, March, Vicksburg.
- Asphalt Institute, 1995. The Asphalt Handbook. Manual Series No. 2, 788 p. Lexington, ABD
- ASTM C109 / C109M - 16a, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).
- ASTM C348 – 18, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars.
- ASTM C39 / C39M – 18, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- ASTM C596 – 09, Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement.
- ASTM C666 / C666M – 15, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing.
- ASTM C939 – 10, Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method).
- ASTM D6927 – 06, Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures.
- ASTM D6931 – 12, Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures.
- Bang, J. W., Lee, B. J. And Kim, Y. Y. 2017. Development of a semirigid pavement incorporating ultrarapid hardening cement and chemical admixtures for cement grouts. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017: 3-9.

- Benrazavi, R. S., Dola, K. B., Ujang, N. and Benrazavi, N. S. 2016. Effect of pavement materials on surface temperatures in tropical environment” *Sustainable Cities and Society*, 22: 94-103.
- Bilim, C. ve Atış, C.D. 2011. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu İçeren Harçların Aşınma ve Mukavemet Özellikleri. *Politeknik Dergisi*, 14(2): 101-107.
- Burmister, D.M. 2004. The theory of stresses and displacements in layered systems. *Journal of Applied Physics*, 14(2): 126-144.
- Cengiz, D. A. 2003. High-volume fly ash concrete with high strength and low drying shrinkage. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(2): 153
- Densit ® a/s 2000 Densiphalt Handbook, Aalborg.
- Deshmukh, V. V. 2011. Grouted Macadams online. <http://concretetechnologies.blogspot.com> [01.07.2018].
- DuraTough® 2019. Paving Solutions online. <https://www.lafarge.ca/en/duratough>
- Duyar, O. 2006. Avrupa Kendiliğinden Yerleşen Beton Şartnamesi Işığında Tanımlar, Dizayn Yöntemi, Deney Metotları ve Mühendislik Özellikleri. *THBB Hazır Beton Dergisi*, 75: 46-52.
- EAPA.2003. Airfield uses of asphalt online. <http://www.eapa.org> [05.08.2018].
- ERA. 2013. Ethiopian Roads Authority. Pavement Design Manual Volume I: Flexible Pavements. 68 p. Addis Ababa.Ethiopia.
- Eriç, M. 1994. Yapı Fiziği ve Malzemesi, İstanbul, 376 s
- Fang, W., Tao, X. and Shi, S. 2016. A laboratory study on cement slurry formulation and mechanism for semi-flexible pavement. *Journal of Testing and Evaluation*, 44(2): 907-913.
- Felekoğlu, B., Baradan, B. 2006. Akışkanlaştırıcı Katkıların Harçta Su Kesme Performansı–Mukavemet İlişkisine Etkileri. *İMO Teknik Dergi*, 3869 -3872.
- Hamzah, M. O., Hasan, M. R., Ven, M. V. and Yahaya, A. S. 2012. The effects of initial conditioning and ambient temperatures on abrasion loss and temperature change of porous asphalt. *Construction and Building Materials*, 29: 108-113.
- Hao, P., Chen, L. and Li, L. 2013. Pavement performance of bituminous mixture for semi-flexible pavement. *Journal of Chang'an University*, 23 (2): 1–6.
- Hassan, K.E., Steyawan, A. and Zoorob, S.E. 2002. Effect of cementitious grouts on the properties of semi-flexible bituminous pavement. Proceedings of the 4th European Symposium on Performance of Bituminous and Hydraulic Materials in Pavement, pp.113-120, Nottingham, UK
- Higashiyama, H., Sano, M., Nakanishi, F., Takahashi, O. and Tsukuma, S. 2016. Field measurements of road surface temperature of several asphalt pavements with temperature rise reducing function. *Case Studies in Construction Materials*, 4: 73-80.

- Hong, J., Wang, K., Xiong, Z. and Zhu, H. 2019. Investigation into the freeze-thaw durability of semi-flexible pavement mixtures. *Road Materials and Pavement Design*. DOI: 10.1080/14680629.2019.1599995.
- Hu, S., Huang, S., Ding, Q., and Zhang, R. 2008. Study on the cementitious mortar for semi-flexible pavement. In proceedings of the 1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites. pp 1237-1246. Naging, China.
- Hulala, M. Z. 2017. Laboratory Study on Mixture Design of Grouted Macadam. M. Sc thesis. Addis Araba University, Ethiopia, 102 p.
- Ishiguro, S. and Yamanaka, M. 2016. Control of Pavement-Surface Temperature-Rise Using Recycled Materials. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 10: 37-43.
- Jean Lefebvre Enterprise. 1990. Salviacim - Principal Productions. French and Foreign, Paris, France.
- Karayolu Teknik Şertnamesi. 2013. KGM Yayını, Ankara.
- Kou, S., Poon, C. S. and Chan, D. 2008. Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete. *Materials and Structures*, 41(7): 1191–1201.
- Larsen, P.A. 2002. Reinforced semi flexible pavement. *US Patent Application*. 10/471,846.
- Lei, W. 2012. The design and construction of semi-rigid pavement materials in perfusion type. In proceedings of the International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring, pp 711-715. Mart, Hunan, China.
- Lundstrom, R., Karlsson, R. and Wiman, G. 2011. Evaluation of rutting on flexible semi-rigid and rigid test sections after seven years of service. *Road Materials and Pavement Design*. 10(4): 689-713.
- Luo, S., Yang, X., Zhong, K., and Yin, J. 2018. Open-graded asphalt concrete grouted by latex modified cement mortar. *Road Materials and Pavement Design*, 1–17.
- Masbah, A.K. 2019. Karayollari için yarı rijit kaplama tabakası dizaynı ve performansının belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi (yayınlanmamış), Akdeniz Üniversitesi.
- Mayer, J. and Thau, M. 2001. Jointless pavements for heavy-duty airport application: the semi-flexible approach. *Advancing Airfield Pavements*, 87-100.
- Nawa, T., Eguchi, H. and Fukaya, Y. 1989. Effect of Alkali Sulfate on the Rheological Behavior of Cement Paste Containing Superplasticizer, *American Concrete Institute SP*, 119: 405-424.
- Oliveira, J. R. M. 2006. Grouted Macadam – Material Characterization for Pavement Design. PhD thesis. University of Nottingham. Nottingham. 234 p.

- Özen. 2016. Influence Of Water-Cement, Polymer-Cement and Fiber-Cement Ratios On Properties Of Fiber Reinforced Mortars. M.Sc. Thesis. Istanbul Technical University, 68 p.
- Pei, J., Cai, J., Zou, D., Zhang, J., Li, R., Chen, X. and Jin, L. 2016. Design and Performance validation of high-performance cement paste as a grouting material for Semi-flexible pavement. *Construction and Building Materials*, 126: 206-217.
- Randy, L. Battery, P. E. Jordan, S. and Whittington, E. I. 2007. Construction, testing and performance report: state study no. 137: resin modified pavement demonstration project. National Transportation Library.
- Setyawan, A. 2013. Assessing the compressive strength properties of semi-flexible pavements. *Procedia Engineering*, 54: 863-874.
- Şimşek, O., Dur, A. ve Yaprak, H. 2004. Silis Dumanı ve Süperakışkanlaştırıcı Katkılı Harçların Özellikleri. *Journal of Polytechnic*. 7(2): 169-179.
- Türkel, S. ve Felekoğlu, B. 2004. Aşırı Dozda Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımının Taze ve Sertleşmiş Betonun Bazı özellikleri Üzerine Etkileri. *DEÜ Fen ve Mühendislik Dergisi*. 6(1): 77-89.
- Uygunoğlu, T., Güneş, İ., Ersoy, B ve Evcin, A. 2017. Kendiliğinden yerleşen polimerik harçlarda mineral katkının reolojik özelliklere etkisi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(4): 1365-1377.
- Wu, D. Q., Daud, and Zhang, Y. 2011. The semi-rigid pavement with higher performances for roads and parking aprons. in Proceeding of the 29th Conference of ASEAN Federation of Engineering Organizations-Sustainable Urbanization—Engineering Challenges and Opportunities, pp. 1–7, November, Brunei Darussalam.
- Yang, B. and Weng, X. 2015. The influence on the durability of semi-flexible airport pavement materials to cyclic wheel load test, *Construction and Building Materials*, 98: 171-175.

ÖZGEÇMİŞ

MANSOR NAZARY

Mansor870.nazary@gmail.com



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2017-2019	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya
Lisans 2011-2015	Savitribai Phule Pune Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Pune / Hindistan

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

İnşaat Mühendisi 2016	National Solidarity Program, Samangan / Afganistan
--------------------------	--

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

- 1- Kofteci, S. & Nazary, M. 2018. Experimental study on usability of various construction wastes as fine aggregate in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 185: 369-376. (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.059>).
- 2- Nazary, M. & Kofteci, S. 2018/ Effect of filler types and asphalt penetration grade on properties of asphalt mastic. *Petroleum Science and Technology*, 36(18): 1503-1509 (DOI: 10.1080/10916466.2018.1501385).