

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**YARI RİJİT KAPLAMA TİPİ ÜSTYAPI DİZAYNINDA KULLANILAN
DOLGU HARCININ UÇUCU KÜL VE SİLİS DUMANI İLE
PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ**

Elmaddin MAHMUDLU

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EYLÜL 2022

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**YARI RİJİT KAPLAMA TİPİ ÜSTYAPI DİZAYNINDA KULLANILAN
DOLGU HARCININ UÇUCU KÜL VE SİLİS DUMANI İLE
PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ**

Elmaddin MAHMUDLU

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EYLÜL 2022

ANTALYA

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

**YARI RİJİT KAPLAMA TİPİ ÜSTYAPI DİZAYNINDA KULLANILAN
DOLGU HARCININ UÇUCU KÜL VE SİLİS DUMANI İLE
PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ**

**Elmaddin MAHMUDLU
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Bu tez
Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından
FYL-2022-5913 nolu proje ile desteklenmiştir.**

EYLÜL 2022

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YARI RİJİT KAPLAMA TİPİ ÜSTYAPI DİZAYNINDA KULLANILAN
DOLGU HARCININ UÇUCU KÜL VE SİLİS DUMANI İLE
PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Elmaddin Mahmudlu
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 08/09/2022 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Sevil KÖFTECİ (Danışman)

Doç. Dr. Rıfat TÜR

Prof. Dr. Serdal TERZİ

ÖZET

YARI RİJİT KAPLAMA TİPİ ÜSTYAPI DİZAYNINDA KULLANILAN DOLGU HARCININ UÇUCU KÜL VE SİLİS DUMANI İLE PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Elmaddin MAHMUDLU

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Sevil KÖFTECİ

Eylül 2022; 82 sayfa

Küreselleşen dünyamızda kentsel gelişimler ile aynı doğrultuda trafik hacmi ve yükü de artmaktadır. Bu artışlardan dolayı yol bakım maliyetlerinin artması ve kullanılan yolların daha kısa ömürlü olması gibi problemler meydana gelmektedir. Ayrıca, asfalt maliyetinin artması da alternatif bir yol üstyapı tipinin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Literatürde Yarı Esnek Kaplama olarak da bilinen Yarı Rijit Kaplama (YRK) tipi yol üstyapısı diğer kaplama tiplerine alternatif bir yol üstyapı dizaynıdır. YRK' ler, %25-35 boşluklu asfaltın içerisine bu kaplama tipi için geliştirilmiş akışkan harcın yerleştirilmesi ile inşa edilir.

Bu tez çalışmasında, YRK inşaatı sırasında boşluklu asfaltın içerisini dolduran CEM I 42,5 R tip çimento bağlayıcılı dolgu harcına uçucu kül ve silis dumanının etkileri deneysel çalışmalarla araştırılmıştır. Bu atık malzeme olan puzolanlarla dizayn edilen harçlar terleme ve akışkanlık deneylerine tabi tutulmuş, kalıplardan çıkarılan numunelere basınç ve eğilme dayanımı ve kuruma büzülmesi deneyleri uygulanmıştır. Öncelikle, kontrol numunesi olarak sadece çimento, agrega, su ve süper akışkanlaştırıcı (SA) kullanılarak optimum karışım oranlarına sahip harç elde edilmiştir. Daha sonra çimentoya farklı oranlarda yapay puzolanlar olan silis dumanı ve uçucu kül ikame edilerek oluşturulan harçların optimum karışım oranları Yanıt Yüzey Metodu (YYM) ile belirlenmiştir. Belirlenmiş olan optimum dolgu harçları büyük kalıp boyutlarındaki boşluklu asfaltın içerisine yerleştirilerek YRK oluşturulmuştur. Oluşturulan YRK' dan karot numuneleri alınmıştır. Elde edilen numuneler, Marshall stabilite, indirekt-çekme dayanımı, basınç dayanımı, Cantabro ve donma-çözünme deneylerine tabi tutulmuştur.

Bütün elde edilen sonuçlara dayalı olarak, ileri yaş dayanımını ve soğuk hava tesirlerine karşı direncini artırdığı ve nem hasarına karşı duyarlılığı azalttığı için optimum silis dumanı oranı %5,9 olarak belirlenmiştir. Diğer bir taraftan kaplamanın ileri yaş dayanımını, soğuk hava tesirlerine karşı direncini ve aynı zamanda stabilite performansını artırdığı için optimum uçucu kül oranı da %12,5 olarak belirlenmiştir.

Bu önerilen oranlarda uçucu kül ya da silis dumanının YRK dolgu harcında çimentoya ikameli olarak ayrı ayrı kullanılmasının, kaplamanın performansını artıracığı deneysel çalışmalar sonucu belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Silis Dumanı, Uçucu Kül, Yanıt Yüzey Metodu, Yarı Esnek Kaplama.

JÜRİ: Doç. Dr. Sevil KÖFTECİ

Prof. Dr. Serdal TERZİ

Doç. Dr. Rıfat TÜR



ABSTRACT

IMPROVEMENT PERFORMANCE OF GROUTING MORTAR WITH FLY ASH AND SILICA FUME FOR SEMI-RIGID PAVEMENTS

Elmaddin MAHMUDLU

MSc Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sevil KOFTECI

September 2022; 82 pages

In our globalizing world, traffic volume and load are increasing in line with urban developments. These increases bring some problems such as increased road maintenance costs and shorter life span of the roads. In addition, the increase cost of asphalt, reveals the necessity of an alternative road pavement type. Semi-Rigid Pavement (SRP) type roads, also known as Semi-Flexible Pavement in the literature, which is an alternative road pavement design to other pavement types. SRP is constructed by placing the fluid mortar which is developed for SRP to %25-30 air void asphalt pavement.

In this thesis, the effects of fly ash and silica fume on the CEM I 42.5 R type cementitious filling mortar that filled the porous asphalt during the construction of SRP were investigated by experimental studies. Mortars, which is designed with this waste material pozzolans, were subjected to bleeding and fluidity tests, compressive and bending strength and drying shrinkage tests were applied to the samples which is removed from the moulds. First, mortar with optimum mixing ratios was obtained by using only cement, aggregate, water, and superplasticizer as control sample. Then, the optimum mixing ratios of the mortars formed by substituting silica fume and fly ash, which are artificial pozzolans at different rates, were determined by the Response Surface Method. SRP was formed by placing the determined optimum filling mortars into the porous asphalt in large mould sizes. Core samples were taken from the formed SRP. The obtained samples were subjected to Marshall stability, indirect-tensile strength, compressive strength, Cantabro and freeze-thaw tests.

Based on all the obtained results, the optimum silica fume ratio was determined as 5.9%, as it increases the advanced age strength and resistance to cold weather effects and reduces the susceptibility to moisture damage. On the other hand, the optimum fly ash rate was determined as 12.5%, as it increases the advanced age resistance of the coating, its resistance to cold weather effects, and its stability performance.

It has been determined by experimental studies that the use of fly ash or silica fume separately in SRP filling mortar in these recommended ratios as a substitute for cement will increase the performance of the coating.

KEYWORDS: Fly Ash, Responses Surface Methodology, Semi-Flexible Pavement, Silica Fume.

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Sevil KOFTECI

Prof. Dr. Serdal TERZI

Assoc. Prof. Dr. Rifat TUR



ÖNSÖZ

Asfalt yolların erken bozulması ve sürekli bakım gerektirmesi alternatif bir yol kaplama tipinin gerekliliğini ortaya koymaktadır. YRK hem dayanıklı hem de ekonomik olması nedeniyle esnek kaplamaya alternatif bir kaplama tipidir. Yapılan bu tez çalışmasında, silis dumanı ve uçucu külün YRK çimento harcına etkisi araştırılmıştır.

Yüksek lisans tezim boyunca tez konumun belirlenmesinde ve tez çalışmalarım sırasında gerek teorik gerek deneysel çalışmalarına bilgi ve görüşleriyle yön veren değerli danışman hocam, Doç. Dr. Sevil KÖFTECİ' ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarında bana yardımlarını sunan Azad DİNLER, Allahverdi GULUYEV ve Hasib Faisal HAFIZI' e teşekkür ederim.

KGM 13. Bölge Müdürlüğüne desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca bana maddi ve manevi desteklerini sunan aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ.....	v
AKADEMİK BEYAN	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	3
3. MATERYAL VE METOD	6
3.1. Materyal	6
3.1.1. Yarı rijit kaplama harcında kullanılan malzemeler	6
3.1.1.1. Çimento	6
3.1.1.2. Agrega	7
3.1.1.3. Su	8
3.1.1.4. Silis Dumanı.....	8
3.1.1.5. Uçucu Kül	9
3.1.1.6. Kimyasal Katkı.....	9
3.1.2. Poroz asfalt dizaynında kullanılan malzemeler	9
3.1.2.1. Bitüm.....	9
3.1.2.2. Agrega	10
3.2. Metot	10
3.2.1. Bitüme uygulanan deneyler	10
3.2.1.1. Penetrasyon deneyi.....	10
3.2.1.2. Yumuşama noktası deneyi	11
3.2.1.3. Düktilite deneyi.....	12
3.2.1.4. Parlama noktası deneyi	12
3.2.1.5. İnce film halinde ısıtma kaybı (TFOT)	13
3.2.2. YRK harcına uygulanan deneyler.....	13
3.2.2.1. Akışkanlık	14
3.2.2.2. Terleme	15

3.2.2.3. Basınç dayanımı	16
3.2.2.4. Eğilme dayanımı	17
3.2.2.5. Kuruma büzülmesi	18
3.2.3. Yanıt Yüzey Metodu.....	20
3.2.4. Karışım oranları	20
3.2.5. Harcın hazırlanması	26
3.2.6. Yarı rijit kaplamaya uygulanan deneyler.....	27
3.2.6.1. Marshal stabilite deneyi	30
3.2.6.2. Nem hasarına karşı direnç deneyi	30
3.2.6.3. Basınç dayanımı deneyi	32
3.2.6.4. Cantabro deneyi	32
3.2.6.5. Donma-çözünme deneyi	33
3.2.6.6. Permeabilite deneyi.....	34
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	36
4.1. Agrega	36
4.2. Bitüm	36
4.3. Dolgu Harcı	37
4.3.1. Akışkanlık	37
4.3.2. Basınç dayanımı	42
4.3.3. Eğilme dayanımı	49
4.3.4. Kuruma büzülmesi	55
4.3.5. Terleme	63
4.4. YYM ile Optimum Karışım Oranlarının Belirlenmesi.....	66
4.4.1. Kontrol numunesi	66
4.4.2. Silis dumanı	68
4.4.3. Uçucu kül.....	69
4.5. Yarı Rijit Kaplamaya Uygulanan Deneyler	70
4.5.1. Marshall Stabilite.....	70
4.5.2. Nem hasarına karşı direnç deneyi.....	72
4.5.3. Basınç dayanımı.....	73
4.5.4. Cantabro.....	74
4.5.5. Donma-çözünme.....	74

4.5.6. Permeabilite	75
5. SONUÇLAR	76
6. KAYNAKLAR	78
ÖZGEÇMİŞ	



AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yarı Rijit Kaplama Tipi Üstyapı Dizaynında Kullanılan Dolgu Harcının Uçucu Kül Ve Silis Dumanı İle Performansının İyileştirilmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

08/09/2022

Elmaddin MAHMUDLU



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

%	: Yüzde
,	: Ondalık Ayırıcı
mm^2	: Milimetrekare
°C	: Derece Santigrat
Cm	: Santimetre
Dak	: Dakika
Gr	: Gram
Kg	: Kilogram
kN	: Kilonewton
kPa	: Kilopaskal
L	: Litre
M	: Metre
m^2	: Metrekare
ML	: Mililitre
Mm	: Milimetre
MPa	: Megapaskal
N	: Newton
San	: Saniye

Kısaltmalar

Ç	: Çimento
HFAP	: Handbook For Asphalt Pavement
İÇM	: İndirekt Çekme Mukavemeti

İÇÖ : İndirekt Çekme Oranı

KGM : Karayolları Genel Müdürlüğü

SA : Süper akışkanlaştırıcı

SD : Silis Dumanı

SRP : Semi Rigid Pavement

UK : Uçucu Kül

YEK : Yarı Esnek Kaplama

YRK : Yarı Rijit Kaplama

YYM : Yanıt Yüzey Metodu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Yarı Rijit Kaplamanın aşamaları	2
Şekil 2.1. Kaplama tipleri	3
Şekil 3.1. Penetrasyon deneyi düzeneği.....	11
Şekil 3.2. Yumuşama noktası deney düzeneği	11
Şekil 3.3. Düktilite deneyi	12
Şekil 3.4. Parlama noktası deneyi.....	13
Şekil 3.5. Akışkanlık deneyi	15
Şekil 3.6. Terleme deneyi için harç yerleştirilmiş beher	16
Şekil 3.7. Basınç dayanımı deney aşamaları.....	17
Şekil 3.8. Eğilme dayanımı deney aşamaları	18
Şekil 3.9. Kuruma büzülmesi deneyi düzeneği.....	19
Şekil 3.10. %25 su/ç oranına ve %1 SA miktarına sahip harç.....	23
Şekil 3.11. Gözlemlenen segregasyon	23
Şekil 3.12 Silis dumanı içeren kuru harç	24
Şekil 3.13. Uçucu kül içeren kuru harç.....	25
Şekil 3.14. Harç mikseri.....	27
Şekil 3.15. YRK'nin oluşturulması.....	29
Şekil 3.16. YRK'den silindir numunelerin alınması.....	29
Şekil 3.17. Karot numunesi.....	30
Şekil 3.18. Marshall deneyi	30
Şekil 3.19. Nem hasarına karşı direnç deneyi	31
Şekil 3.20. YRK basınç dayanımı deneyi	32
Şekil 3.21. Cantabro deneyi	33
Şekil 3.22. Donma-çözünme kabini.....	33
Şekil 3.23. Permeabilite deneyi	34

Şekil 4.1. Kontrol numunesi akışkanlık deney sonuçları yanıt yüzey grafiği	39
Şekil 4.2. Silis dumanı içeren harçların akışkanlık deney sonuçları yanıt yüzey grafiği	41
Şekil 4.3. Uçucu kül içeren harçların akışkanlık deney sonuçları yanıt yüzey grafiği ...	42
Şekil 4.4. Kontrol numunesi 1. ve 3. gün basınç dayanımı deney sonuçları yanıt yüzey grafikleri	44
Şekil 4.5. Kontrol numunesi 7. ve 28. gün basınç dayanımı deney sonuçları yanıt yüzey grafikleri	44
Şekil 4.6. Silis dumanı içeren harçların 1. ve 3. gün basınç dayanımı deney sonuçları yanıt yüzey grafikleri.....	46
Şekil 4.7. Silis dumanı içeren harçların 7., 28. ve 91. gün basınç dayanımı deney sonuçları yanıt yüzey grafikleri.....	46
Şekil 4.8. Uçucu kül içeren harçların 1., 3., 7., 28. ve 91. gün basınç dayanımı deney sonuçları yanıt yüzey grafikleri	48
Şekil 4.9. Kontrol numunesi 1., 3., 7. ve 28. gün eğilme dayanımı deney sonuçları yanıt yüzey grafikleri	51
Şekil 4.10. Silis dumanı içeren harçların 1. ve 3. gün eğilme dayanımı deney sonuçları yanıt yüzey grafikleri.....	53
Şekil 4.11. Silis dumanı içeren harçların 7., 28. ve 91. gün eğilme dayanımı deney sonuçları yanıt yüzey grafikleri.....	53
Şekil 4.12. Uçucu kül içeren harçların 1. ve 3. gün eğilme dayanımı deney sonuçları yanıt yüzey grafikleri.....	55
Şekil 4.13. Uçucu kül içeren harçların 7., 28. ve 91. gün eğilme dayanımı deney sonuçları yanıt yüzey grafikleri.....	56
Şekil 4.14. Kontrol numunesi 7., 14., 21., 28. ve 56. gün kuruma büzülmesi yanıt yüzey grafikleri	58
Şekil 4.15. Silis dumanı içeren harçların 7., 14., 21., 28., 56. ve 91. gün kuruma büzülmesi yanıt yüzey grafikleri	60
Şekil 4.16. Uçucu kül içeren harçların 7., 14., 21., 28., 56. ve 91. gün kuruma büzülmesi yanıt yüzey grafikleri.....	62
Şekil 4.17. Kontrol numunesi terleme miktarı yanıt yüzey grafiği.....	64
Şekil 4.18. Silis dumanı içeren harçların terleme miktarı yanıt yüzey grafiği	65
Şekil 4.19. Uçucu kül içeren harçların terleme miktarı yanıt yüzey grafiği	66

Şekil 4.20. Kontrol numunelerinin YYM ile analizi sonucu belirlenen optimum karışım oranları ve diğer teorik verileri	67
Şekil 4.21. SD numunelerinin YYM ile analizi sonucu belirlenen optimum karışım oranları ve diğer teorik verileri	68
Şekil 4.22. UK numunelerinin YYM ile analizi sonucu belirlenen optimum karışım oranları ve diğer teorik verileri	69



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Deneysel çalışmanın akış şeması.....	6
Çizelge 3.2. Çimento kimyasal özellikleri.....	7
Çizelge 3.3. Çimento mekanik ve fiziksel özellikleri.....	7
Çizelge 3.4. Çimento harcı agrega gradasyonu	7
Çizelge 3.5. Çalışmada kullanılan çimento harcı agrega gradasyonu	8
Çizelge 3.6. Harç için kullanılan agregaya uygulanan deneyler	8
Çizelge 3.7. Silis dumanı kimyasal özellikleri.....	8
Çizelge 3.8. Uçucu kül kimyasal özellikleri	9
Çizelge 3.9. Süper akışkanlaştırıcının teknik bilgileri	9
Çizelge 3.10. Bitüme uygulanan deneyler	10
Çizelge 3.11. Agregalara uygulanan deneyler	10
Çizelge 3.12. YRK dolgu harcına uygulanan deneyler.....	14
Çizelge 3.13. YYM ile optimum harcın belirlenmesi için uygulama aşamaları.....	20
Çizelge 3.14. Literatürde bulunan farklı karışım oranları.....	21
Çizelge 3.15. Maksimum ve minimum SA miktarının ve su/ç oranının belirlenmesi....	22
Çizelge 3.16. Silis dumanı içeren harç için ön deneme	24
Çizelge 3.17. Uçucu kül içeren harç için ön deneme.....	25
Çizelge 3.18. Harç karışım oranları	26
Çizelge 3.19 Yarı Rijit Kaplamaya uygulanan deneyler	28
Çizelge 3.20. Poroz asfalt agrega gradasyonu	28
Çizelge 4.1. Agregalara uygulanan deneylerin sonuçları	36
Çizelge 4.2. Bitüme uygulanan deneylerin sonuçları	37
Çizelge 4.3. Literatürde bulunan farklı akışkanlık deneyi verileri	38
Çizelge 4.4. Kontrol numunesi akışkanlık deney sonuçları.....	39
Çizelge 4.5. Silis dumanı içeren harçların akışkanlık deney sonuçları.....	40

Çizelge 4.6. Uçucu kül içeren harçların akışkanlık deney sonuçları	41
Çizelge 4.7. Farklı çalışmalardan harç basınç dayanımı verileri (MPa).....	43
Çizelge 4.8. Kontrol numunesi basınç dayanımı deney sonuçları	43
Çizelge 4.9. Silis dumanı içeren harçların basınç dayanımı deney sonuçları	45
Çizelge 4.10. Uçucu kül içeren harçların basınç dayanımı deney sonuçları	47
Çizelge 4.11. Farklı çalışmalardan eğilme dayanımı verileri (MPa olarak)	49
Çizelge 4.12. Kontrol numunesi eğilme dayanımı deney sonuçları	50
Çizelge 4.13. Silis dumanı içeren harçların eğilme dayanımı deney sonuçları	52
Çizelge 4.14. Uçucu kül içeren harçların eğilme dayanımı deney sonuçları.....	54
Çizelge 4.15. Farklı çalışmalardan kuruma büzülmesi deneyi verileri (% olarak).....	56
Çizelge 4.16. Kontrol numunesi kuruma büzülmesi deney sonuçları (%)	57
Çizelge 4.17. Silis dumanı içeren harçların kuruma büzülmesi deney sonuçları (%)	59
Çizelge 4.18. Uçucu kül içeren harçların kuruma büzülmesi deney sonuçları (%).....	61
Çizelge 4.19. Farklı çalışmalardan terleme deneyi verileri	63
Çizelge 4.20. Kontrol numunesi terleme deneyi sonuçları (%)	63
Çizelge 4.21. Silis dumanı içeren harçların terleme miktarı (%)	64
Çizelge 4.22. Uçucu kül içeren harçların terleme miktarı (%)	65
Çizelge 4.23. Optimum kontrol numunesi harcının deneysel ve teorik karşılaştırması...67	
Çizelge 4.24. Optimum silis dumanı harcının deneysel ve teorik karşılaştırması.....69	
Çizelge 4.25. Optimum uçucu kül harcının deneysel ve teorik karşılaştırması.....70	
Çizelge 4.26. Literatürde bulunan farklı Marshal Stabilite deneyi sonuçları	70
Çizelge 4.27. Marshal stabilite deney sonuçları	71
Çizelge 4.28. Marshall stabilite deneyi akma değerleri	71
Çizelge 4.29. Nem hasarına karşı direnç deneyi sonuçları	72
Çizelge 4.30. İndirekt-çekme oranları (%)	72

Çizelge 4.31. Literatürde bulunan YRK'ye uygulanmış farklı basınç dayanımı verileri	73
Çizelge 4.32. Basınç dayanımı deney sonuçları	73
Çizelge 4.33. Cantabro deney sonuçları	74
Çizelge 4.34. Donma-çözünme deneyi İÇM sonuçları	75
Çizelge 4.35. Yatay ve düşey permeabilite değerleri	75



1. GİRİŞ

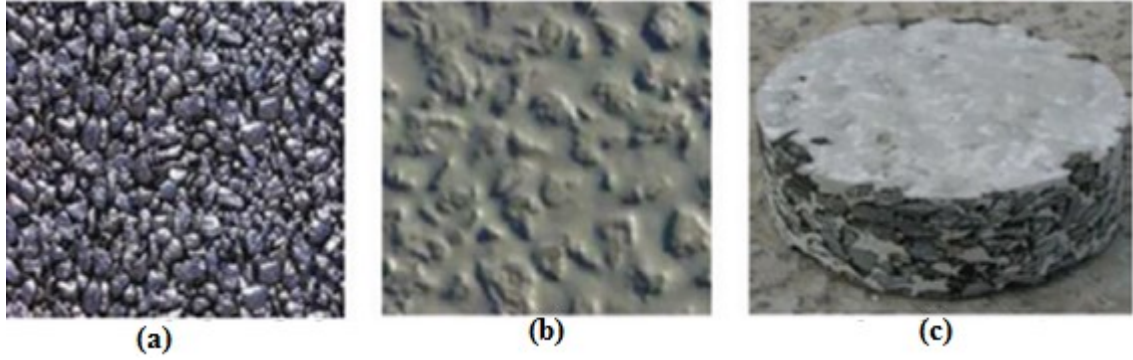
İlk çağlardan itibaren insanlık karadan ulaşım sağlamıştır. Ancak teknolojinin gelişmesi ile su ve havayolu gibi farklı ulaşım yolları da gelişmiştir. Ülkemizde çoğunlukla karayolu taşımacılığı ile ulaşım faaliyeti gerçekleştirilmektedir. Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2018) verilerine göre, ülkemizde yolcu taşımacılığının %88,8' i ve yük taşımacılığının %89,2' si karayolunun payına düşmektedir.

Kentleşme sonucu artan nüfusla aynı doğrultuda trafik yükü de artmaktadır. Artan trafik yükü, yol üstyapısında kalıcı deformasyonlara ve erken yaşlanmaya neden olmaktadır (Moghaddam vd. 2011). Oluşan bu bozulmalar mevcut üstyapı tiplerine alternatif bir üstyapı dizaynının gerekliliğini ortaya koymaktadır. İlk olarak 1960' lı yıllarda Fransa' da geliştirilen YRK diğer kaplama tiplerine alternatif bir üstyapı tipidir. Günümüzde, Almanya, İtalya, Hollanda, Çin ve Singapur gibi ülkeler YRK' yi de alternatif bir yol üstyapı tipi olarak kullanmaktadır (Hassani vd. 2020).

Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) Ocak (2022) verilerine göre, ülkemizdeki yolların %41' i asfalt betonu, %54' ü sathi kaplama ve %5' i ise diğer kaplama tipi yollardan oluşmaktadır. Esnek kaplamalar olan asfalt betonu ve sathi kaplama yollar, genellikle hızlı ve kolay inşa edilmesi, sürüş konforu ve bölgesel tamirlerin kolay ve hızlı bir şekilde yapılabilmesi nedeniyle tercih edilmektedir. Ancak esnek kaplamaların sıcaklığa karşı duyarlılık, yorulma çatlakları ve kalıcı deformasyonlar gibi olumsuz yönleri de bilinmektedir. Esnek kaplamalara alternatif diğer bir kaplama türü olan çimento bağlayıcılı rijit (beton) yollar da avantajlarının yanı sıra farklı dezavantajlara sahiptir. Bunlara, derzler nedeniyle sürüş hızının ve konforunun düşük olması, bölgesel tamirin zorluğu ve inşaat süresinin uzun olması gibi nedenler örnek gösterilebilir (Anlar 2017). Literatürde Yarı Esnek Kaplama (Hassani vd. 2020) ve Grouted Macadam (Shuguang vd. 2015) olarak da bilinen YRK, rijit ve esnek üstyapıların yukarıda bahsi geçen olumsuz yönlerini karşılamaktadır. Bütün bunların yanı sıra sürdürülebilirliğe karayolu inşaatlarında da gerek duyulmaktadır. YRK diğer kaplamalara kıyasla daha uzun servis ömrüne sahip olması ve daha az bakım masraflarına ihtiyaç duyması nedeniyle hem çevresel hem de finansal sürdürülebilirlik açısından elverişlidir.

YRK %25-35 boşluklu (poroz) asfaltın boşluklarının YRK için geliştirilmiş akışkan harç ile doldurulmasıyla oluşur (Şekil 1.1). İlk önce serilen poroz asfalt, YRK' nın kalınlığını belirlemekte ve akışkan harcı desteklemektedir. Daha sonra harcın yerleşmesi için poroz asfaltın boşluklarına kısa sürede yerleşecek hem akışkan hem de ince malzemeye sahip harç kullanılır. Kullanılan harcın özelliklerine göre yolun trafiğe açılma süresi belirlenir.

Tez çalışması kapsamında, atık malzeme ve yapay puzolan olan silis dumanı ve uçucu külün YRK' da kullanılan dolgu harcının terleme performansı, basınç ve eğilme dayanımı, ayrıca kuruma büzülmesine etkileri araştırılmıştır. Boşluklu asfalt betonunun içine yerleştirilen dolgu harcı, çimento, ince agrega, kimyasal katkı ve su bileşenleri ile oluşturulmaktadır. Bu çalışmada dolgu harcı için kullanılan agrega boyutu üst sınırı 0,6 mm' dir ve kullanılan kimyasal katkı, sadece SA' dır.



Şekil 1.1. Yarı Rijit Kaplamanın aşamaları; **a)** Boşluklu asfalt; **b)** Yarı Rijit Kaplama; **c)** YRK karot örneği (Cihackova vd. 2015)

Harç, oldukça dar olan boşluklara yerleştirildikten sonra oluşabilecek büzülmeden doğan çatlaklar kaplamanın bütünlüğüne zarar vermektedir. Çimento bağlayıcılı karışımların kuruma büzülme performanslarını iyileştirmek için genellikle puzolan kullanılmaktadır (Hlail vd. 2020). Ancak kullanılan puzolan, harç içerisinde fazla miktarda olduğu zaman dayanımı olumsuz yönde etkilemektedir, düşük miktarda olduğu zaman ise büzülme performansına yetersiz katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada bahsi geçen optimum karışım oranları farklı su/çimento (su/ç), SA ve çimentoya ikame edilen uçucu kül ve silis dumanı kullanılarak araştırılmıştır. Tez çalışmasındaki hedef, dayanımı maksimum seviyede tutarak terleme ve büzülmeyi mümkün olan minimum seviyeye indirecek optimum karışım oranlarının farklı kombinasyonlar denenerek belirlenmesidir. Çalışma kapsamında ilk olarak kontrol malzemesi olan sadece çimento, agrega, SA ve su ile oluşturulan harcın optimum karışım oranları belirlenmiştir. Daha sonra %5-20 oranlarında silis dumanı ve %5-30 oranlarında uçucu kül çimentoya ikame edilerek farklı su/ç ve SA kombinasyonlarında harç araştırılmıştır. Bu bağlamda, ihtiyaç duyulan harcın bileşenlerinin optimum miktarı YYM ile belirlenmiştir. Deneysel verilere dayalı olan bu istatistiksel hesaplamaların doğruluk yüzdesi, belirlenmiş olan optimum harcın performans testlerine tabi tutularak elde edilen verilerin YYM ile belirlenen performans değerleri ile karşılaştırılmasıyla anlaşılmıştır.

YYM; temelde en küçük kareler yöntemine dayanan farklı değişkenlerden etkilenen yanıtları bu çalışma için 3 boyutlu bir yüzeyde birleştirerek optimum noktayı belirlemekte yardımcı olmaktadır.

Optimum harç belirlendikten sonra, saha koşullarını temsilen 200x50x5 cm ölçülerine sahip kalıplarda 50 mm kalınlığında hazırlanmış poroz asfalta çalışmanın birinci aşamasında belirlenmiş olan optimum karışım oranlarına sahip harçlar yerleştirilerek YRK oluşturulmuştur. Oluşturulan YRK'dan karot numuneleri alınarak, bu numuneler Marshall Stabilité, indirekt çekme dayanımı, permeabilite, donma-çözünme, basınç dayanımı ve Cantabro deneylerine tabi tutulmuştur.

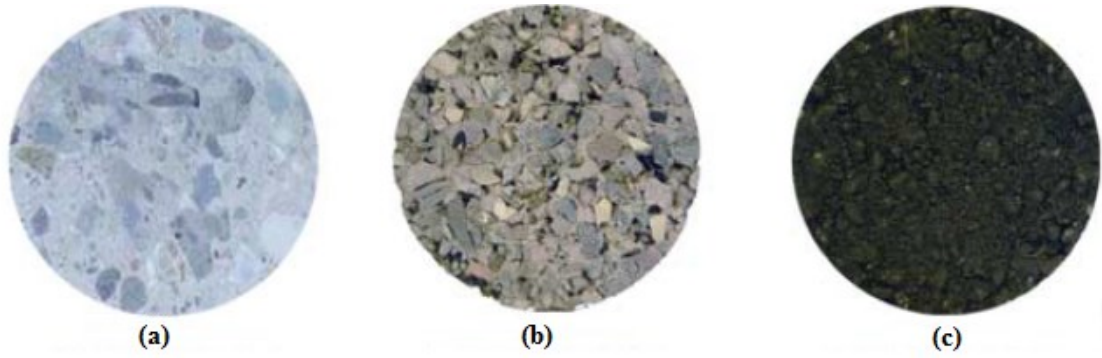
Bu tez çalışmasının ilk kısmında YRK tanıtılmış, ikinci kısmında ise konu ile ilgili olarak literatür çalışması araştırılmış ve özetleri yazılmıştır. Çalışmanın üçüncü kısmında, laboratuvarında gerçekleştirilen deneysel yöntemler materyal ve metot başlığı altında anlatılmıştır. Dördüncü kısımda ise deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve bulgular yorumlanmıştır.

2. KAYNAK TARAMASI

Karayolunda aşınma tabakası olarak tercih edilen YRK, iki aşamada inşa edilir. İlk olarak yüksek boşluğa sahip poroz asfalt serilir daha sonra ise poroz asfaltın boşlukları akışkan harç ile doldurulur. Bu bağlamda gerekli literatür araştırması yapılmıştır. YRK'nin yollarda kullanımının tarihsel gelişimine bakacak olursak, ilk olarak Avrupa ülkelerinde yaygın hale gelmiştir. YRK daha sonra ABD ordusu tarafından da araştırılmıştır (Anderton 2000).

Gond vd. (2022), YRK poroz asfaltının farklı gradasyonlarda ve sıkıştırma seviyelerinde üstyapıya olan etkilerini araştırmışlardır. Agregaların farklı gradasyon ve sıkıştırma seviyelerinde poroz asfaltın farklı boşluklu dağılımına neden olacağını belirtmişlerdir. YRK'nin üstyapı performansı poroz asfalt agregalarının farklı dağılımı ve sıkıştırılmasıyla teorik olarak düzenlenebileceğini ifade etmişlerdir. İnce agrega miktarının artmasıyla Cantabro kaybının düştüğünü ve %19 boşluklu asfalt ile üretilen YRK numunesinin en iyi performans sonuçlarına ulaştığını belirtmişlerdir.

Toraldo (2013), karayolu tünellerinde gerçekleştirilecek yangında dayanıklı olabilecek yol tiplerini araştırmıştır. Araştırma sırasında 3 tip kaplama kullanmıştır; YRK, asfalt ve çimento bağlayıcılı yollar (Şekil 2.1). Kaplama tipi numunelerini önce 850°C fırında 60 dk bekletmiş ve gözlemlemiştir. Ayrıca numuneleri çelik silindirin içerisinde 240 dk boyunca ateşe maruz bırakarak çıkan karbonmonoksit miktarını ölçmüştür. Ayrıca sıcaklığa ve ateşe maruz bırakılan küp şeklindeki numuneler 24 saat 20°C sıcaklıkta bekletildikten sonra 0.50 Mpa/san hızla basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Sonuç olarak, asfalt betonu yanmaya yatkın olduğu için dayanıksız olarak gözlemlenmiştir ve YRK tünellerde kullanılması uygun kaplama tipi olarak belirtilmiştir.



Şekil 2.1. Kaplama tipleri; **a)** Çimento bağlayıcılı kaplama tipi silindir numune; **b)** Yarı Rijit Kaplama tipi silindir numune; **c)** Asfal bağlayıcılı kaplama tipi silindir numune

Sunil vd. (2021), bilinen 3 farklı gradasyonla poroz asfalt dizaynı oluşturmuş ve YRK için bilinen standart harç tipini seçmişlerdir. Daha sonra, bu farklı gradasyonlarla %4,5 bitüm oranında poroz asfalt hazırlamış ve harç yerleştirilerek YRK oluşturulmuştur. Elde edilen 1 ve 28 günlük YRK numuneleri, basınç, eğilme, indirekt-çekme dayanımı,

tekerlek izi ve yorulma deneylerine tabi tutulmuştur. Elde edilen deney sonuçlarına göre YRK' nin alternatif bir üstyapı olabileceği belirtilmiştir.

Sund vd. (2018), YRK harcının performansını farklı katkıları kullanarak araştırmışlardır. Çalışmada katkı olarak polikarboksilat SA, genişletirici ve priz hızlandırıcı kullanılmıştır. Taze harç akışkanlık deneyine ve kuru harç numuneleri ise kuruma büzülmesi ve dayanım testlerine tabi tutulmuştur. Araştırmada 28 günlük kuruma büzülmesi değerleri incelenirken 1,3,7 ve 28 günlük dayanım deneyleri uygulanmıştır. Çalışmanın sonucu olarak, genişleme katkısının kuruma büzülmesi ve erken dayanımda, priz hızlandırıcının erken dayanımda ve bağlayıcı/agrega oranının ise geç dayanımda olumlu yönde etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Wang vd. (2018), yapmış oldukları çalışmada YRK'nin iç çatlama sebeplerini araştırmışlardır. Bu amaçla, dört farklı poroz asfalt dizaynı ile 4 farklı çimento harcı dizaynı birleştirilmiştir. Çimento harcına büzülme ve genişleme şekil değiştirme, asfalt matrisine ise indirekt-çekme dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Sonuçlar sayısal simülasyon ile değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, YRK'deki iç gerilmenin genişmeden ziyade çimento harcının büzülmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir.

Al-Qadi vd. (1994), çalışmalarında YRK'nin performansını araştırmak için YRK oluşturmuşlardır. Çalışmada kullanılan harç; uçucu kül, çimento, kum, su ve SA içermektedir. Çalışmada numunelere, stabilite, indirekt-çekme mukavemeti, basınç dayanımı, esneklik modülü, su hassasiyeti, donma-çözünme ve tuz etkisine karşı dayanım deneyleri yapılmıştır. YRK, asfalt ve çimento bağlayıcılı kaplama tipleriyle karşılaştırılmıştır. YRK'nin, asfalt kaplamadan daha iyi performans değerlerine sahip olduğu ve köprü için etkili bir alternatif kaplama tipi olduğu belirtilmiştir.

Khan vd. (2020), çalışmalarında YYM kullanarak YRK çimento harcının tasarımını ve optimizasyonunu sunmuşlardır. Benzer şekilde, YYM kullanılarak harçların akış ve basınç dayanımı özelliklerini tahmin etmek için istatistiksel modeller geliştirilmişlerdir. Su/ç oranı ve SA iki bağımsız değişken olarak seçilmiş, bunların akış ve basınç dayanımı özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Artan su/ç oranı ile her bir kütleme yaşında harç numunelerinde dayanım düşmüştür ancak artan SA dozajı ile basınç dayanımında kademeli bir değişim gözlemlenmiştir. Deneylerin tasarımı için YYM optimizasyon yönteminin kullanılmasının deneysel çalışma süresini azalttığı belirtilmiştir.

Hassan vd. (2002), YRK için kullanılan akışkan harçları araştırmışlardır. Uçucu kül ve silis dumanı ile çimento bağlayıcılı harç üretilmiştir. Üretilen harç poroz asfaltın içerisine yerleştirilmiştir. 28 günlük kütleme süresine kadar numuneler, basınç dayanımı, sertlik modülü, dinamik kayma direnci, boşluk miktarı, büzülme ve permeabilite deneylerine tabi tutulmuştur. Puzolanik özelliği taşıyan silis dumanı ve uçucu kül ile elde edilen harçlar 28 günde yüksek basınç dayanımına, iyi permeabilite ve büzülme performans değerlerine ulaşmıştır. Oluşturulan YRK' nin geleneksel asfalta göre daha

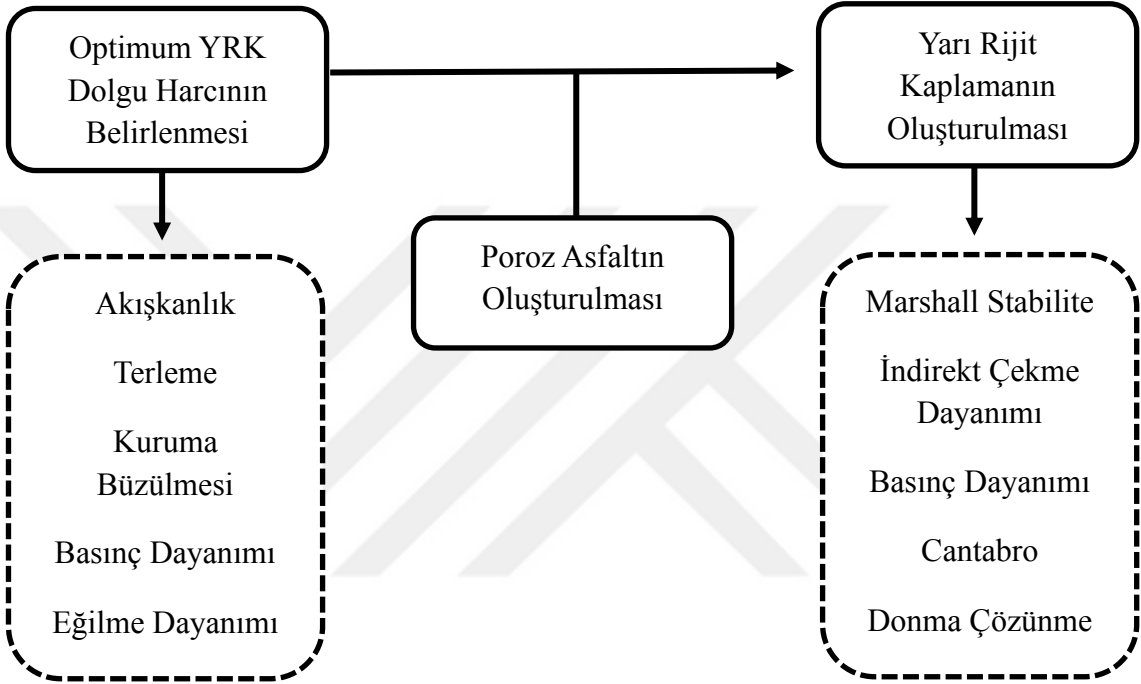
yüksek mukavemet dayanımına ve beton yola göre daha esnek özelliğe sahip olduğu belirtilmiştir.



3. MATERİYAL VE METOT

Tez kapsamında ilk olarak YRK’de kullanılan harcın farklı katkıları kullanılarak performansının yanı sıra YYM ile optimum karışım oranlarının belirlenmesi araştırılmıştır. Daha sonra ise belirlenen optimum karışım oranlarına sahip harç poroz asfalta yerleştirilerek YRK oluşturulmuştur. YRK’den alınan karot numuneleri farklı deneylere tabi tutularak oluşturulmuş YRK’nin performansı araştırılmıştır (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. Deneysel çalışmanın akış şeması



3.1. Materyal

3.1.1. Yarı rijit kaplama harcında kullanılan malzemeler

3.1.1.1. Çimento

Bu tez çalışmasında, Göltaş Çimento fabrikasından elde edilen CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri Çizelge 3.2’de, fiziksel ve mekanik özellikleri ise Çizelge 3.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Çimento kimyasal özellikleri

Çözünmeyen Kalıntı (%)	0,50
Kızdırma kaybı (%)	3,13
CI (%)	0,004
SO ₃ (%)	2,75

Çizelge 3.3. Çimento mekanik ve fiziksel özellikleri

Basınç dayanımı 2 günlük (N/mm ²)	24,3
Basınç dayanımı 28 günlük (N/mm ²)	50,1
Priz başlama süresi (dak)	156
Genleşme (mm)	0,46

3.1.1.2. Agregası

Çalışmada kullanılan agrega Antalya, Döşemealtı bölgesinden elde edilen kalkerdir. Harç numunelerinde kullanılan agrega boyutu temel olarak, Zhang (2019) ve Anderton' a göre (2000) Çizelge 3.4'deki gibi belirlenmiştir.

Çizelge 3.4. Çimento harcı agrega gradasyonu

Elek Açıklığı (mm)	Elekten Geçen (%)
0,6	100
0,075	1

Ancak harç numuneleri arasında 0,6mm ve 0,075 mm aralığındaki agrega boyutu çeşitliliği çok fazladır. Literatür araştırmasında bu iki elek aralığında bulunan bazı elek aralıklarının da gradasyona dahil olduğu görülmüştür (Saboo vd. 2019). Gradasyonu çeşitlendirmenin harçla ilgili deneysel çalışmaya katkı sağlayacağı düşünüldüğü için 0,6 mm ve 0,075 mm elek aralığına ara elekler eklenmiştir ve agrega gradasyonu Çizelge 3.5'deki gibi belirlenmiştir.

Çizelge 3.5. Çalışmada kullanılan çimento harcı agrega gradasyonu

Elek Açıklığı (mm)	Elekten Geçen (%)
0,6	100
0,425	96,4
0,18	47,8
0,075	1

Harç için kullanılan agregaya uygulanan deneyler, Çizelge 3.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. Harç için kullanılan agregaya uygulanan deneyler

Deneyin Adı	Deney Standardı
Elek Analizi	TS EN 933-1
Metilen Mavisi	TS EN 933-9
Organik Madde Tayini	TS EN 1744-1
Özgül Ağırlık	TS EN 1900-1

3.1.1.3. Su

Çalışmada karışım suyu olarak Antalya şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.1.4. Silis Dumanı

Bu tez çalışmasında kullanılan silis dumanı, Antalya Eti Elektrometalurji işletmesinden elde edilmiştir. Bu malzeme, silikon ve ferrosilikon eritme işlemlerinin bir yan ürünüdür (Lewis 2018). Silis dumanının özellikleri Çizelge 3.7’de belirtilmiştir.

Çizelge 3.7. Silis dumanı kimyasal özellikleri

Bileşen	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
%	91	0,58	0,24	0,71	0,33	1,06

3.1.1.5. Uçucu Kül

Bu çalışmada, F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu kül, genellikle fabrikalar ve termik santraller tarafından salınan kömür atığıdır (Ahmaruzzaman 2010). Uçucu külün kimyasal özellikleri çizelge 3.8’de belirtilmiştir.

Çizelge 3.8. Uçucu kül kimyasal özellikleri

Bileşen	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O
%	52,34	18,91	9,3	7,47	5,75	2,25	0,88	2,17

3.1.1.6. Kimyasal Katkı

Çalışmada polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Kullanılan süper akışkanlaştırıcının teknik bilgileri Çizelge 3.9’da belirtilmiştir.

Çizelge 3.9. Süper akışkanlaştırıcının teknik bilgileri

Kimyasal İçerik	Polikarboksilat Esaslı
Yoğunluk	1,07 – 1,13 kg/l
pH	4,0 – 6,0
Renk	Kahverengi
Toplam Klor	Maksimum 0,1%
Alkali İçeriği	<5%

3.1.2. Poroz asfalt dizaynında kullanılan malzemeler

3.1.2.1. Bitüm

Bu deneysel çalışmada 50/70 sınıfı bitüm kullanılmıştır. Bitüme uygulanan deneyler çizelge 3.10’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.10. Bitüme uygulanan deneyler

Deney Adı	Deney Standardı
Penetrasyon	TS EN 1426
Yumuşama Noktası	TS EN 1427
Düktilite	ASTM D113
Parlama Noktası	TS EN ISO 2592
TFOT	TS EN 12607-2

3.1.2.2. Agrega

Bu tez çalışmasında boşluklu asfalt için, Antalya, Döşemealtı bölgesindeki ocaktan temin edilen agregalara kullanılmıştır. Agregalara uygulanan deneyler çizelge 3.11’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.11. Agregalara uygulanan deneyler

Deneyin Adı	Deneyin Standardı
Elek Analizi	TS EN 933-1
Su Emme	TS EN 1097-6
Los Angeles (Aşınma)	ASTM C 131
Yassılık İndeksi	BS 812
Soyulma Mukavemeti	TS EN 12697-11 (Kısım 403 EkA)
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık	TS EN 1367-2
Organik Madde Tayini	TS EN 1744-1
Metilen Mavisi	TS EN 933-9
Özgül Ağırlık	TS EN 1097-6

3.2. Metot**3.2.1. Bitüme uygulanan deneyler****3.2.1.1. Penetrasyon deneyi**

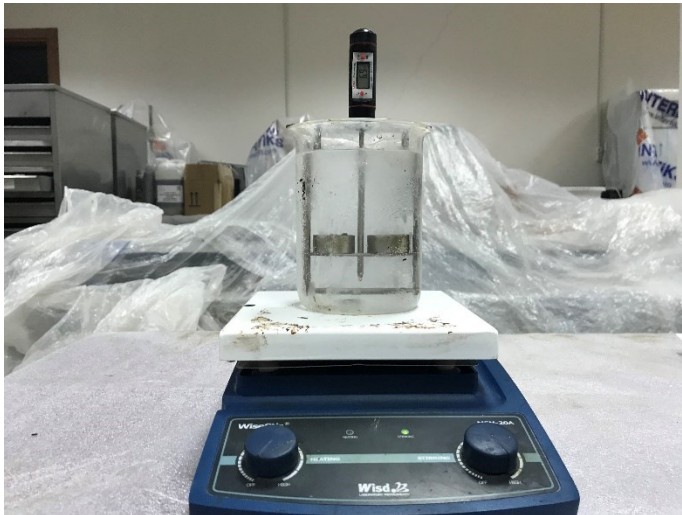
Bitümün kıvamını belirleyen penetrasyon deneyi TS EN 1426 standardına göre yapılmıştır. Kullanılan bitüm 90° C sıcaklığa kadar ısıtılıp daha sonra penetrasyon kabına yerleştirilmiştir. Numune soğuması için oda sıcaklığında bekletildikten sonra 1 saat 25° C sıcaklığa sahip su banyosunda bekletilmiştir. Daha sonra numunenin 25° C sıcaklığını muhafaza etmesi için, numune 25° C sıcaklığa sahip su dolu kabın içerisinde penetrasyon cihazına yerleştirilmiştir. Numunenin yüzeyine temas edecek şekilde yerleştirilen penetrasyon iğnesi 100gr ağırlığa sahip yük ile 5 saniye süresince serbest bırakılmıştır ve iğnenin numuneye batma derinliği penetrasyon cihazından okunmuştur (Şekil 3.1). Deney 3 numuneye 3 kere yapılarak bulunan değerlerin ortalaması alınmıştır.



Şekil 3.1. Penetrasyon deneyi düzeneği

3.2.1.2. Yumuşama noktası deneyi

Bitüm örneğinin 3.5 gr ağırlığındaki çelik bilyeyi taşıyamadığı en yüksek sıcaklık ile belirlenen yumuşama noktası deneyi TS EN 1427 standardına göre yapılmıştır. Deneye başlamadan önce ısıtılmış bitüm, halkalar içerisine taşmayacak şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra oda sıcaklığında 1 saat bekletilen numune, deney düzeneği ile beraber 5°C su ile dolu behere yerleştirilmiştir. Beherdeki su alt ısıtıcı yardımıyla ilk 3 dakikadan sonra her dakikada 5°C yükselecek şekilde ısıtılmıştır. Bitüm sarılı bilyelerin düzeneğin taban yüzeyine değdiği andaki su sıcaklığı ölçülmüştür ve bu sıcaklık yumuşama noktası olarak belirlenmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Yumuşama noktası deney düzeneği

3.2.1.3. Düktilite deneyi

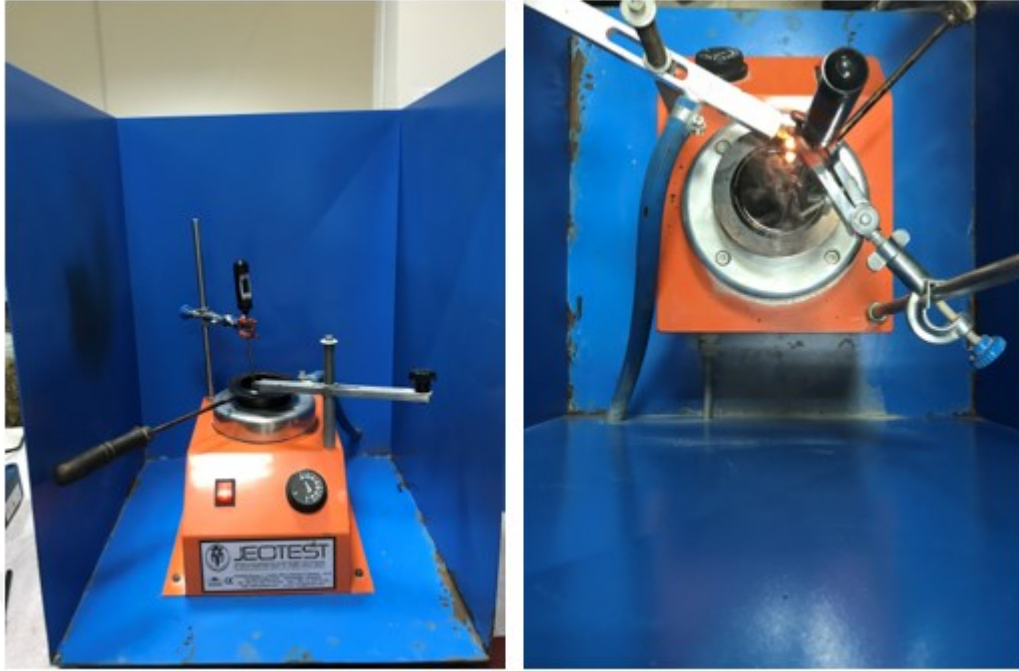
Bitümün uzama kabiliyetini belirleyen düktilite deneyi ASTM D113-17 standardına göre yapılmıştır. Bitüm ısıtılıp 3 düktilite kalıbına yerleştirilmiştir. Daha sonra numuneler oda sıcaklığında 30 dakika bekletildikten sonra 25°C su banyosunda bekletilmiştir. Su banyosundan çıkarılan numune dolu kalıpların göbek kısmı çıkartılıp ve numuneler düktilite cihazına yerleştirilmiş ve 5 cm/dak hızla çalışan düktilite cihazı ile numuneler her iki uçtan çekilmiştir. Numunelerin koptuğu andaki mesafe cihazın yanında bulunan cetvelden ölçülerek deney sonlandırılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Düktilite deneyi

3.2.1.4. Parlama noktası deneyi

Güvenlik amaçlı yapılan parlama noktası deneyi TS 123 EN 22592 standardına göre yapılmıştır. Bitüm 120°C sıcaklığa kadar ısıtıldıktan sonra deney kabına yerleştirilmiştir. Deney sırasında sıcaklığın yükselme hızı 5-17°C/ dak olacak şekilde ayarlanmıştır. Daha sonra sıcak bitümün üzerinden ateş düzenli olarak yavaşça geçirilmiştir. Bitümün parladığı andaki sıcaklığı ölçülerek deney tamamlanmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Parlama noktası deneyi

3.2.1.5. İnce film halinde ısıtma kaybı (TFOT)

İnce film tabakası halindeki bitüme hava ve ısının tesirlerini belirlemek amacıyla yapılan TFOT deneyi TS EN 12607-2 standardına göre yapılmıştır. Öncelikle 50 gr bitüm 140 mm iç çapına sahip metal deney kabına yerleştirilip 30 dak oda sıcaklığında bırakılmış ve ardından tartılmıştır. Daha sonra numuneler uygun sıcaklığa ulaşmış etüvdeki dairesel rafa yerleştirilmiştir. Numuneler etüvde 5 saat kaldıktan sonra etüvden çıkartılarak oda sıcaklığında bekletilmiş ve ağırlıkları ölçülmüştür. Daha sonra fırından çıkan bitüme penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri yapılmıştır.

3.2.2. YRK harcına uygulanan deneyler

YRK dolgu harcına uygulanan deneyler Çizelge 3.12’de gösterilmiştir.

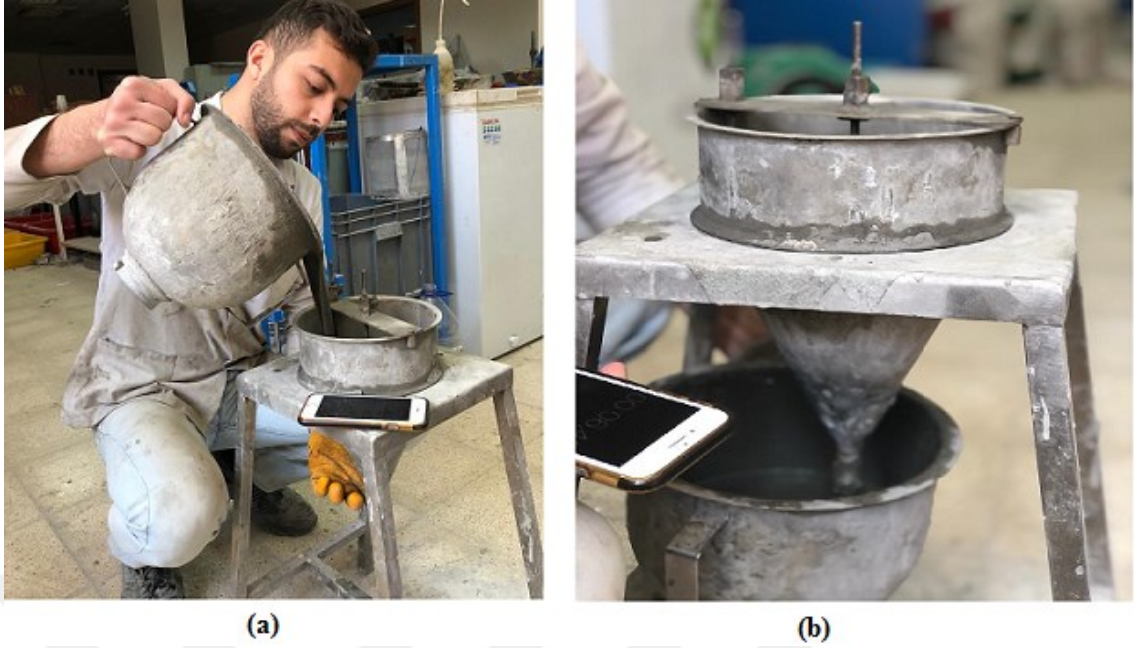
Çizelge 3.12. YRK dolgu harcına uygulanan deneyler

Deney Adı	Deney Standardı
Akışkanlık	ASTM C939-10
Terleme	ASTM C940-98A
Basınç Dayanımı	BS EN 196-1
Eğilme Dayanımı	BS EN 196-1
Kuruma Büzülmesi	ASTM C596-09

3.2.2.1. Akışkanlık

Çimento harcının poroz asfaltın boşluklarına yerleşebilmesi için belirli bir akış standardına sahip olması gerekmektedir. YRK harcının akış performansını inceleyen akışkanlık deneyi, Marsh akış hunisi (Al-Qadi vd. 1994), Malayzian harç akış hunisi (Koting vd. 2014), Leeds akış hunisi (Hou vd. 2016), ve akış hunisi deneyi (Hu vd. 2008) gibi farklı huni tipleriyle yapılabilir. Bu çalışmada harcın akışkanlık kıvamı, ASTM C939-10 standardına uygun olarak akış hunisi deneyi ile belirlenmiştir.

Akışkanlık deneyi akış hunisi yardımı ile yapılmaktadır. Huninin çıkışı kapatıldıktan sonra huniye 1725 ml çimento harcı yerleştirilmiştir. Daha sonra harç serbest bırakılmış ve huniden harcın tamamen boşaldığı süre akış süresi olarak kabul edilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Akışkanlık deneyi; **a)** Harcın huniye yerleştirilmesi; **b)** Akış süresinin belirlenmesi

3.2.2.2. Terleme

Terleme, yeni yerleştirilmiş betonda suyun yüzeye çıktığı ayrışma şeklidir. Bu ayrışmadan dolayı betonda zayıf bölgeler oluşmaktadır (Mubarek 2017). Bu tez çalışmasında terleme miktarı ASTM C940-98A standardına göre deneysel çalışmayla bulunmuştur.

Önceden hazırlanmış 200 ml dolgu harcı bir behere yerleştirilmiştir. Yüzeye çıkan suyun buharlaşmaması için beher kapatılmıştır. 2 saat sonra yüzeye çıkan su ölçülür ve terleme yüzdesi bağıntı (3.2) ile hesaplanır (Şekil 3.6).

$$\text{Terleme Miktarı \%} = \frac{V_w}{V_1} \times 100 \quad (3.2)$$

Burada V_w = yüzeye çıkan su miktarı (ml) ve V_1 = başlangıçtaki harç miktarıdır (ml).



Şekil 3.6. Terleme deneyi için harç yerleştirilmiş beher

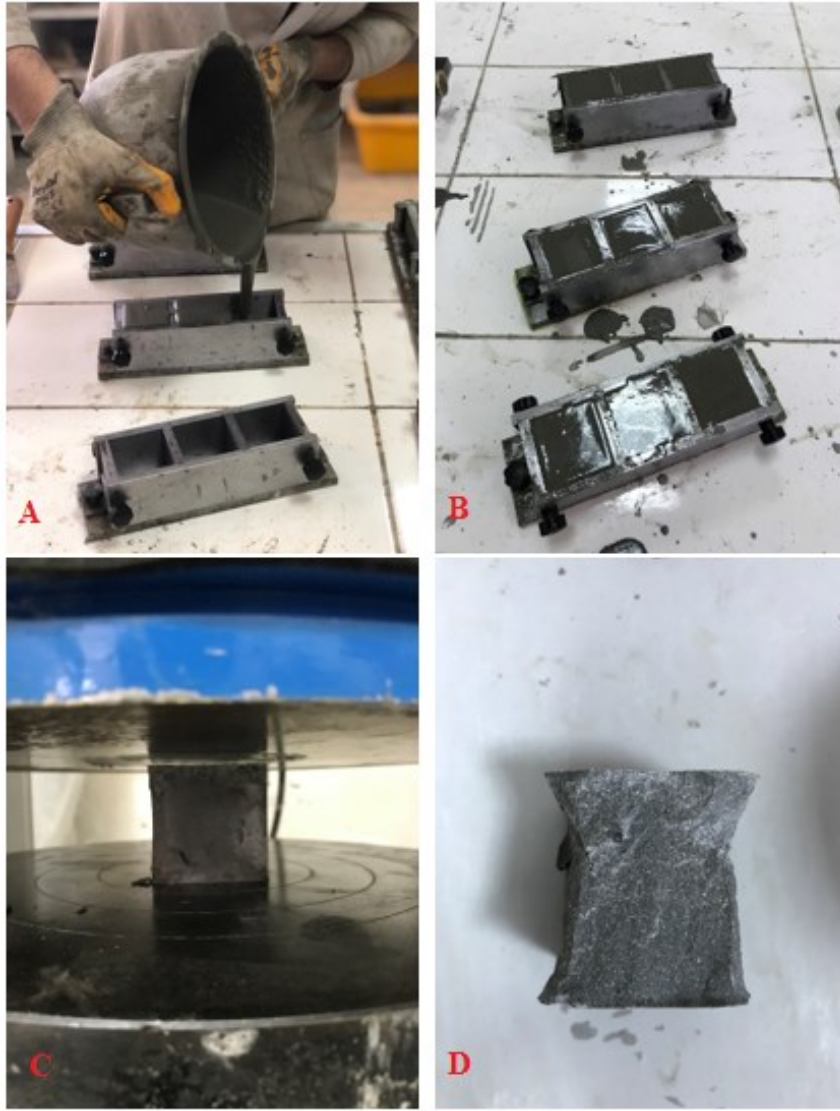
Bu çalışmada terleme için sınır değer, 120 dakikada maksimum %5 olarak kabul edilmiştir.

3.2.2.3. Basınç dayanımı

Bu çalışmada, akışkan dolgu harcının basınç dayanımı deneyi BS EN 196-1 teknik şartnamesine göre yapılmıştır. Önce 50mm kenar uzunluğuna sahip küp kalıplara yerleştirilen harç 24 saat bekletildikten sonra priz alan numuneler kalıptan çıkartılmıştır. Kullanılan katkı maddesinden dolayı kalıba yerleştirildikten 24 saat sonra henüz priz almamış numuneler ise 12 saat daha bekletildikten sonra kalıptan çıkartılmıştır. Kalıptan çıkartılan numuneler, 3,7,28,91 gün yaşa sahip olana kadar 25°C suda küre, 1 günlük numuneler ise kalıptan çıkarıldıktan sonra basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Deney sırasında kullanılan hız, 2400±200 N/Sn'dir. Basınç dayanımı eşitlik 3.3 ile hesaplanmıştır ve deney aşamaları Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

$$fm = \frac{P}{A} \quad (3.3)$$

Burada fm = basınç dayanımı (MPa), P = maksimum yük (N) ve A = küp numune alanı yani bu çalışma için 50x50 mm'dir.



Şekil 3.7. Basınç dayanımı deney aşamaları; **a)** Harcın kalıplara yerleştirilmesi; **b)** Kalıplara yerleştirilmiş harç; **c)** Basınç dayanımı cihazına yerleştirilmiş küp numune; **d)** Basınç dayanımına tabi tutulmuş numune

3.2.2.4. Eğilme dayanımı

Bu tez çalışmasında, eğilme dayanımı deneyi 40x40x160 cm boyutlarında numunelere yapılmıştır. Harç kalıplara yerleştirildikten 24 saat sonra kalıplardan çıkartılmıştır. Henüz priz almamış numuneler ise 12 saat daha bekletildikten sonra kalıplardan çıkartılmıştır. Deney, eğilme başlığına yerleştirilmiş numunelere 50 ± 10 N/sn hızla basınç uygulanarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.8). 1 günlük numuneler kalıplardan çıkartıldıktan sonra, 3,7,28 ve 91 günlük numuneler ise uygun koşullarda kürlendikten sonra eğilme dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Eğilme dayanımı eşitlik 3.4 ile hesaplanmıştır.

$$f_m = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} \quad (3.4)$$

Burada f_m = eğilme dayanımı (MPa), 1.5= katsayı, F_f =numunenin kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (N), l = mesnetleri arası uzaklık (mm) ve b^3 = numunenin kare kesitinin kenar uzunluğudur.



Şekil 3.8. Eğilme dayanımı deney aşamaları; **a)** Harcın deney kalıplarına yerleştirilmesi; **b)** Deney için hazırlanmış kalıplar; **c)** Deney cihazına yerleştirilmiş eğilme dayanımı deney başlığı; **d)** Eğilme dayanımı deneyine tabi tutulmuş numune

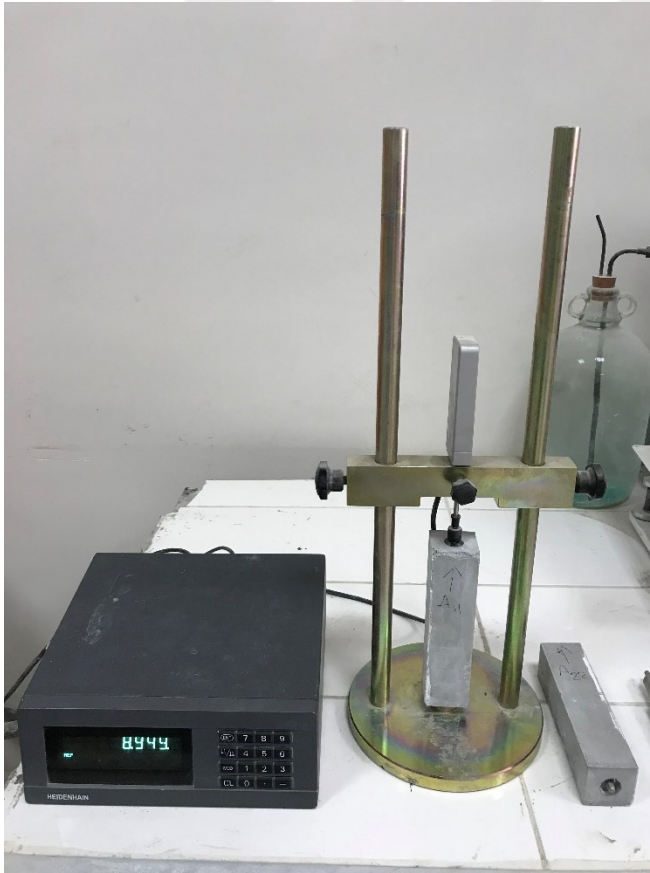
3.2.2.4. Kuruma büzülmesi

Poroz asfaltın içerisine yerleştirilen harçta belirli miktardan fazla büzülme gerçekleştiğinde, poroz asfalt ile dolgu harcı arasında ayrışma gerçekleşebilir. Bu ayrışma nedeniyle kaplamada çatlaklar oluşabilir.

Bu çalışmada büzülme deneyi, ASTM C596-09 standardına göre uygulanmıştır. Harç, 40x40x160 mm ölçülerine sahip büzülme deneyi kalıplarına yerleştirilmiştir. Numuneler kalıplara yerleştirildikten 24 saat sonra, henüz priz almamış numuneler ise 12 saat daha bekletildikten sonra kalıplardan çıkarılmıştır. Kalıplardan çıkarılan numuneler kalıplara yerleştirildikten sonra 72 saati tamamlayacak şekilde suda kürlenmiştir. 72 saatin sonunda numuneler sudan çıkarılmıştır ve numunelerin hassas boy değişim cihazı ile boyları ölçülmüştür (Şekil 3.9). Boy ölçümü sırasında her bir numunenin 2 yüzeyinden ölçüm yapılmış ve bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Daha sonra numuneler 88 gün boyunca 23 ± 2 C° derece ortam sıcaklığına sahip laboratuvarda bekletilmiştir. Bu çalışmada, harç numunelerinin 7,14,21,28,56 ve 91 gün sonundaki büzülme değerleri belirlenmiştir. Büzülme miktarı eşitlik 3.5 ile hesaplanmıştır.

$$\text{Büzülme (\%)} = \frac{L_0 - L_f}{160} \times 100 \quad (3.5)$$

Burada L_0 = numunenin 72 saat sonundaki boyu ve L_f = numunenin kurumadan sonraki boyudur.



Şekil 3.9. Kuruma büzülmesi deneyi düzeneği

3.2.3. Yanıt Yüzey Metodu

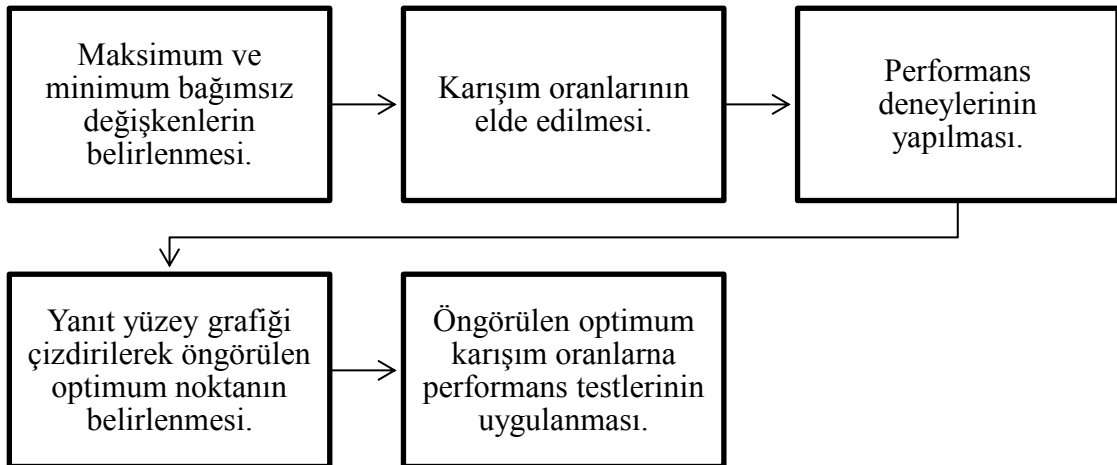
Bu çalışmada, YYM için Design Expert® v13 programı kullanılmıştır. Yanıtlar ikinci dereceden polinomial modelleme ile bağıntı (3.1)'deki gibi hesaplanmıştır.

$$f(x) = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \sum \beta_{ij} X_i X_j \quad (3.1)$$

Burada; $f(x)$ = öngörülen yanıt, β_0 = kesişme, β_i = lineer katsayı, β_{ii} = ikinci dereceden katsayı, β_{ij} = etkileşim katsayısı, X_i, X_j = bağımsız değişkenlerdir.

Bu çalışmada bağımsız değişkenler yani X_i ve X_j uçucu kül katkılı harçlarda uçucu kül miktarı ve su/ç oranı, silis dumanı katkılı harçlarda silis dumanı ve su/ç oranı, puzolan içermeyen harçlarda ise SA ve su/ç oranıdır. Yanıtlar ise, 1,3,7,28 ve 91 günlük basınç ve eğilme dayanımları, 7,14,21,28,56 ve 91 günlük büzülme miktarları, akış süresi ve harcın terleme miktarıdır. Her bir bağımsız değişkenin maksimum ve minimum değerlerini belirledikten sonra bu değerler arasında istenen 9 farklı karışım oranları kombinasyonlarının yanıtlarını, yani basınç ve eğilme dayanımı, akış süresi, büzülme ve terleme miktarı değerlerini deneyler ile elde edip yanıt yüzey grafiği çizdirilmiştir (Çizelge 3.13). Bu değerler arasındaki karışım oranlarını belirleyen, istatistiksel hesaplamayı yapan programdır. Bağımsız değişkenlerin maksimum ve minimum noktalarının belirlenmesi ve karışım oranları için bölüm 3.2.4'e bakınız.

Çizelge 3.13. YYM ile optimum harcın belirlenmesi için uygulama aşamaları



3.2.4. Karışım oranları

Bu tez çalışmasında ilk olarak kontrol numunesi için karışım oranları belirlenmiştir. İlk olarak çimento ve agrega oranları belirlenmiştir. Bunun için, Çizelge 3.11'de bulunan farklı çalışmalar referans olarak alınmıştır. Sonuç olarak kontrol numunesi analizi için, çimento 0,53 ve agrega 0,47 oranlarında belirlenmiştir. Daha sonra

harcın akışkanlığını etkileyen maksimum ve minimum su/ç oranları ve SA miktarları belirlenmiştir.

Çizelge 3.14. Literatürde bulunan farklı karışım oranları

Yazarlar	Karışım Oranları
Momtaz vd. 2020	%32,48 çimento + %32,48 ince agrega + %4,7 silis dumanı + %30,34 su
Hassan, vd. 2002	%65 çimento + %30 uçucu kül + %5 silis dumanı + %28 su/ç
Zoorob vd. 2017	%95 çimento + %5 silis dumanı + %1 SA + su/ç %28
Anderton ve Ahlrich 1994	%36 çimento + %21,5 silis dumanı + 14,3 uçucu kül + %25,2 su + %3 akışkanlaştırıcı
Oliveira 2006	%65 çimento + %30 uçucu kül + % silis dumanı
Al-Qadi vd. 1994	%38,5 çimento + %19,2 uçucu kül + %12,7 kum + %26,8 su + %2,8 akışkanlaştırıcı
Tran vd. 2017	%37 çimento + %16 kum + %11 silis dumanı + %4 uçucu kül + %28 su + %4 SA
Anderton 2000	%34-40 çimento + %16-20 silis dumanı + %16-20 uçucu kül + %22-26 su + %,5-3,5 reçine katkı
Hlail vd. 2020	%95 çimento + %5 silis dumanı + %1 SA + %50 Su/ç
Koting vd. 2014	%95 çimento+ %5 silis dumanı + %2 SA + %30 su/ç
Reddy vd. 2005	%73 çimento + %7 silis dumanı + %20 uçucu kül + %2,5 SA + % 50 su/ç
Wang ve Hong 2018	%80 çimento + %5 silis dumanı + %15 uçucu kül + 12ml/kg SA + 3ml/kg büzülme önleyici

Akışkan harç olan YRK dolgu harcı, su/ç oranı arttıkça daha akışkan hale gelse de mekanik performans düşmektedir (Koting vd. 2014; Bowen vd. 2016; Khan vd. 2020; Ling vd. 2022). Bu nedenle maksimum ve minimum su/ç oranlarının ve SA miktarlarının belirlenmesinde, SA miktarının olabilecek maksimum seviyede tutulmasına dikkat edilmiştir.

Çizelge 3.15. Maksimum ve minimum SA miktarının ve su/ç oranının belirlenmesi

Su/Ç	0,25	0,475	0,5	0,55	0,575	0,75
%0 SA	-	-	-	-	-	8,52 San
%0,5 SA	-	-	13.70 San	10,5 Saniye	-	8 San
%0,6 SA	-	-	13.44 San	-	-	-
%0,65 SA	-	-	-	-	(Segregasyon)	-
%0,9 SA	-	-	12.05 San	-	-	-
%1 SA	-	12,41 San	10,20 San	9,99 San	-	8,55 San (Segregasyon)
%1,5 SA	-		10,97 San (Segregasyon)	-	-	8,10 San (Segregasyon)

Çizelge 3.15'e baktığımız zaman 0,25 su/ç oranı, bağlayıcı için yetersiz kalmıştır (Şekil 3.10). 0,75 su/ç oranına sahip harçlar ise akışkanlık sınırlarının altında kalmıştır (akışkanlık deneyi için bölüm 3.2.2.1'e bakınız). %1'den daha yüksek SA dozajına sahip bütün harçlarda segregasyon gözlemlenmiştir (Şekil 3.11). Bu nedenle maksimum SA miktarı %1 olarak belirlenmiştir. %0,5'ten daha düşük SA miktarına sahip harçlar yüksek oranda su/ç oranına sahip olması gerektiği için minimum SA dozajı %0,5 olarak belirlenmiştir. %57,5 su/ç oranında ve sadece %0,65 SA miktarında segregasyon gerçekleştiği, %55 su/ç oranı ve %1 SA miktarında akış süresi yeterli olduğu için, maksimum su/ç oranı %55 olarak belirlenmiştir. %47,5 su/ç oranında ve %1 SA miktarında akış süresi yeterli olduğu için minimum su/ç oranı %47,5 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.10. %25 su/ç oranına ve %1 SA miktarına sahip harç



Şekil 3.11. Gözlemlenen segregasyon

Çalışmadaki silis dumanı miktarı çimentoya ikameli olarak minimum %5 ve maksimum olarak %20 olacak şekilde belirlenmiştir (Şekil 3.12). %1'in üzerindeki SA

miktarına sahip silis dumanı içeren harçta da segregasyon gözlemlenmiştir (Çizelge 3.16). Bu nedenle silis dumanlı harçlar için SA miktarı %1 olarak sabit tutulmuştur. Harç dizaynında su/ç oranı %50'den daha az olduğunda yeterli akış kıvamı elde edilmediği için minimum su/ç oranı %50, %65'ten daha fazla su/ç oranına ulaşıldığında harç fazla akışkan olduğu için maksimum su/ç oranı da %65 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.16. Silis dumanı içeren harçlar için ön denemeler

Silis Dumanı (%)	Su/Ç	SA %	Akış Süresi
5	0,5	1	13,5 San
5	0,55	1	11,8 San
20	0,65	1	10,31 San
5	0,5	1,2	13,9 San (Segregasyon)
5	0,5	1,5	13,7 San (Segregasyon)
20	0,6	1,2	11,9 San (Segregasyon)



Şekil 3.12. Silis dumanı içeren kuru harç

Çalışmada uçucu kül miktarı %5-%30 olarak belirlenmiştir (Şekil 3.13). Ancak %0,5'ten daha fazla SA kullanıldığı zaman segregasyon gerçekleştiği için SA dozajı %0,5

olarak sabit tutulmuştur. Minimum su/ç oranı %52,5 ve maksimum su/ç oranı %70 olarak belirlenmiştir. Çizelge 3.17’de uçucu kül için yapılmış olan ön deneme çalışmaları gösterilmiştir.

Çizelge 3.17. Uçucu kül içeren harçlar için ön denemeler

Uçucu Kül (%)	SA (%)	Su/ç (%)	Akış Süresi (San)
5	1,1	50	13,6 (Segresayon)
5	1	50	13,2 (Segregasyon)
5	0,8	52,5	12,9 (Segregasyon)
5	0,6	52,5	11,95 (Segregasyon)
5	0,5	52,5	12,2
30	0,5	70	12,3



Şekil 3.13. Uçucu kül içeren kuru harç

Sonuç olarak belirlenmiş olan harç karışım oranları çizelge 3.18’de gösterilmiştir. Bu çizelge K kodu kontrol numunelerini, UK kodu uçucu kül içeren numuneleri ve S kodu silis dumanı içeren numuneleri temsil etmektedir.

Çizelge 3.18. Harç karışım oranları

No	Çimento (%)	Agrega (%)	UK/çimento (%)	SD/çimento (%)	SA (%)	Su/ç (%)
K1	53	47	-	-	0,5	47,5
K2	53	47	-	-	0,75	47,5
K3	53	47	-	-	1	47,5
K4	53	47	-	-	0,5	51,25
K5	53	47	-	-	0,75	51,25
K6	53	47	-	-	1	51,25
K7	53	47	-	-	0,5	55
K8	53	47	-	-	0,75	55
K9	53	47	-	-	1	55
UK1	51	47	5	-	0,5	52,5
UK2	51	47	5	-	0,5	61,25
UK3	51	47	5	-	0,5	70
UK4	44	47	17,5	-	0,5	52,5
UK5	44	47	17,5	-	0,5	61,25
UK6	44	47	17,5	-	0,5	70
UK7	37	47	30	-	0,5	52,5
UK8	37	47	30	-	0,5	61,25
UK9	37	47	30	-	0,5	70
S1	51	47	-	5	1	50
S2	51	47	-	5	1	57,5
S3	51	47	-	5	1	65
S4	47	47	-	12,5	1	50
S5	47	47	-	12,5	1	57,5
S6	47	47	-	12,5	1	65
S7	43	47	-	20	1	50
S8	43	47	-	20	1	57,5
S9	43	47	-	20	1	65

3.2.5. Harcın Hazırlanması

Dolgu harcı Şekil 3.14’de bulunan çimento mikseri ile hazırlanmıştır. Harcın hazırlanması için kullanılan hız, kendi ekseninde 140 devir/dakika dönüş hızıdır. Harç hazırlanırken uygulanan karıştırma aşamaları aşağıdaki gibidir.

1. Harç kuru şekilde 60 saniye karıştırılmıştır.

2. Suyun %80'i harca ilave edilerek karışım 120 saniye karıştırılmıştır.
3. Suyun geri kalan %20'si, SA ile birlikte harca ilave edilerek karışım 120 saniye karıştırılmıştır.
4. Harç karıştırma kabının etrafına yapışan malzeme sıyrılmış ve harç 480 saniye daha karıştırılmıştır.

Harcın karışım suyu bu şekilde kademeli olarak ilave edildiğinde SA daha etkili olmaktadır. (Oliveira 2016; Hassan vd. 2002).



Şekil 3.14. Harç mikseri

3.2.6. Yarı Rijit Kaplamaya Uygulanan Deneyler

Bu tez çalışmasında, YRK 3 farklı harç ile oluşturulmuştur. Bunlardan ilk ikisi puzolan katkı malzemeli olarak daha önce optimum karışım oranları belirlenmiş olan silis dumanı ve uçucu kül içeren harçlardır. Kontrol numunesi olarak da puzolan katkı malzemesiz hazırlanan harç kullanılmıştır. Bu çalışmada silis dumanı içeren harç ile oluşturulmuş YRK numuneleri, YRK-S, uçucu kül için YRK-U ve kontrol numunesi için ise YRK-K olarak belirtilmiştir.

İlk olarak laboratuvar ortamında 200x10x50 cm ölçülerine sahip metal kalıba 50 mm kalınlığında poroz asfalt yerleştirilmiştir. Yerleştirilen poroz asfalt 25° C sıcaklığa sahip

olana kadar beklenmiştir. Daha sonra poroz asfaltın boşlukları dolgu harcı ile doldurulmuştur (Şekil 3.15). Harç yerleştirilmiş YRK, saha koşullarını modellemek amacıyla ıslak jüt bezi ile 72 saat kürlenerek su kaybı engellenmiştir. Harç yerleştirildikten 1,3,7 ve 28 gün sonra kaplamadan 100mm çapında karot numuneleri alınarak bu numuneler performans deneylerine tabi tutulmuştur (Şekil 3.16 ve 3.17). YRK karot numunelerine uygulanan performans deneyleri Çizelge 3.19’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.19. Yarı Rijit Kaplamaya uygulanan deneyler

Deney Adı	Deney Standardı
Marshall Stabilité	ASTM D6927 -06
Nem Hasarına Karşı Duyarlılık	AASHTO T 283
Basınç Dayanımı	ASTM C39
Cantabro	TS EN 12697-17
Permeabilite (Geçirgenlik)	TS EN 12697-19
Donma-Çözünme	ASTM C 666

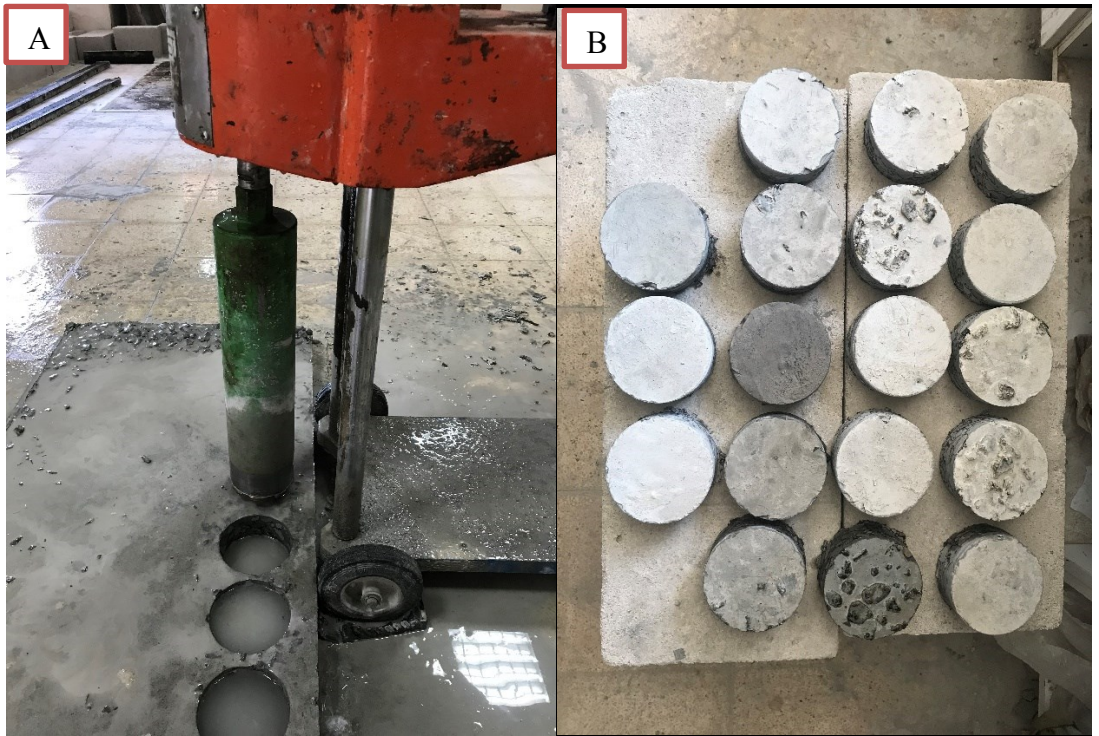
Boşluklu (poroz) asfalt dizaynı Allahverdi GULUYEV’in “Yarı Esnek Kaplama İçin Değişik Gradasyonlu Poroz Asfalt Dizaynı ve Performansının Belirlenmesi” isimli, deneysel çalışmaları henüz devam etmekte olan tez çalışmasından alınmıştır. Kullanılan poroz asfaltın agrega gradasyonu çizelge 3.20’de belirtilmiştir. Karışımda bitüm oranı %4’dür. Ayrıca %0,3 oranında bitümün süzülmesini önleyici fiber kullanılmıştır.

Çizelge 3.20. Poroz asfalt agrega gradasyonu

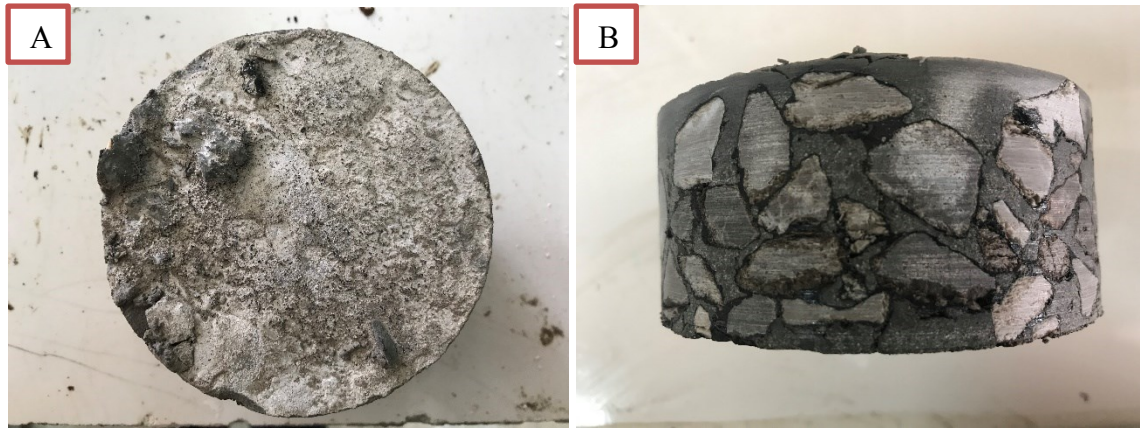
Elek Açıklığı	% Geçen
19	45
16	30
12,5	5
9,5	16,5
4,75	0,5
2,36	0,5
1,18	0,5
0,6	0,5
0,3	0,5
0,15	0,5
0,75	0,5



Şekil 3.15. YRK'nin oluşturulması; **a)** Boşluklu asfalt **b)** Harç yerleştirilmiş boşluklu asfalt



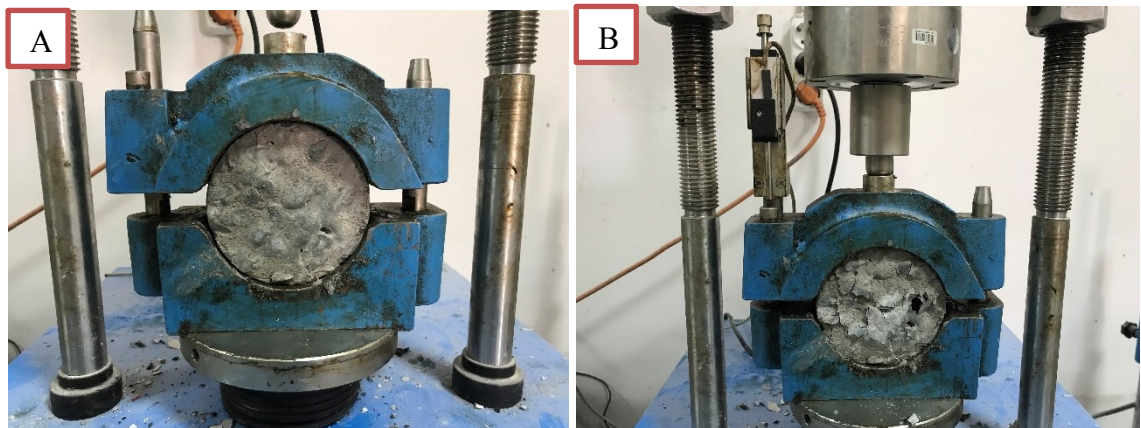
Şekil 3.16. YRK'den silindir numunelerin alınması; **a)** Karot makinası **b)** Silindir numuneler



Şekil 3.17. Karot numunesi; **a)** Numunenin üstten görüntüsü; **b)** Numunenin yandan görüntüsü

3.2.6.1. Marshall stabilite deneyi

Esnek kaplamaya uygulanan, bir tür basınç deneyi olan Marshall Stabilite deneyi ASTM D 6927- 06 standardına göre 1,3,7 ve 28 günlük numunelere uygulanmıştır. Karot alınarak elde edilen 100 mm çapındaki numuneler deneye başlamadan önce 60°C sıcaklığa sahip su banyosunda 40 dakika bekletilmiştir. Daha sonra numuneler deney cihazına yerleştirilerek 51mm/dk hızla kırılmıştır (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. Marshall deneyi; **a)** Deneye başlamadan önce numune; **b)** Deney bittikten sonra numune

3.2.6.2. Nem hasarına karşı direnç deneyi

Nem hasarına karşı direnç deneyi AASHTO T 283 standardına göre kaplamanın çekme dayanımını ölçmek için 3,7 ve 28 günlük numunelere uygulanmıştır. Deneyde 3 şartlandırılmış ve 3 şartlandırılmamış numune grubu oluşturulmuştur. Şartlandırılmış

numuneler öncelikle vakumlu desikatöre yerleştirilmiş ve %70-80 oranında su ile doyurulana kadar desikatörde tutulmuştur. Desikatörden çıkartılan numuneler plastik torbalara yerleştirilmiş ve torbaların içerisine 10 ml su eklenmiştir. Daha sonra numuneler -16°C'de 18 saat, ardından 60 °C suda 24 saat bekletilmiştir. Şartlandırılmamış kuru numuneler ise deney yapılana kadar plastik torbanın içerisinde oda sıcaklığında tutulmuştur. En sonunda şartlandırılmış ve şartlandırılmamış numuneler 25 °C suda 2 saat bekletilip Marshall stabilite cihazında aksel olarak kırılmıştır (Şekil 3.19). Şartlandırılmamış numunelerden elde edilen P değeri, eşitlik 3.6'da yerine konulmuş ve indirekt çekme dayanımı hesaplanmıştır.

$$S_t = \frac{2000 \times P}{\pi \times t \times D} \quad (3.6)$$

Burada S_t = indirekt çekme dayanımı (kPa), P =maksimum yük, t=numune kalınlığı ve D= numune çapıdır.

Şartlandırılmamış ve şartlandırılmış numunelerden elde edilen indirekt çekme dayanımı değerleri kullanılarak eşitlik 3.7 yardımıyla İndirekt çekme oranı (İÇÖ) hesaplanmıştır.

$$İÇÖ = \frac{S_1}{S_2} \quad (3.7)$$

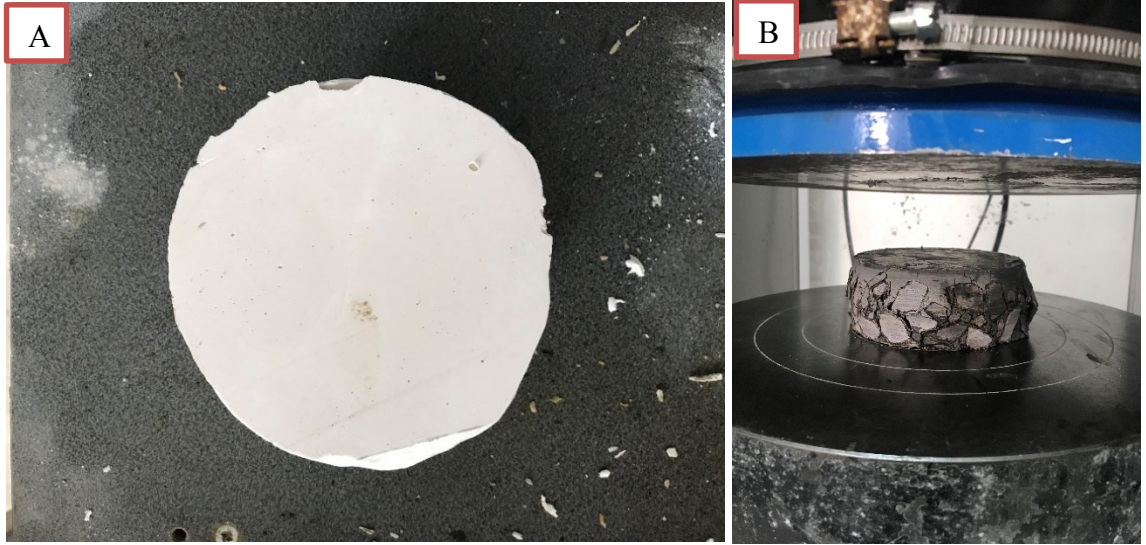
Burada S_1 =şartlandırılmış indirekt çekme dayanımı ve S_2 = şartlandırılmamış indirekt çekme dayanımıdır.



Şekil 3.19. Nem hasarına karşı direnç deneyi; **a)** Desikatör; **b)** Numunenin aksenal olarak kırılması

3.2.6.3. Basınç dayanımı deneyi

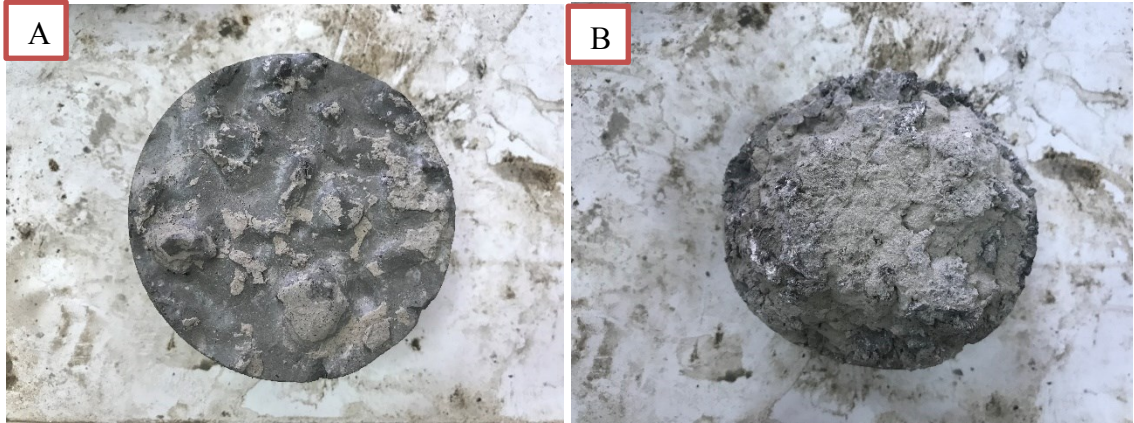
YRK'nin aksenal yük altında gösterdiği direnci gözlemlemek amacıyla basınç dayanımı deneyi ASTM C39 standardına göre yapılmıştır. Elde edilen 1,3,7 ve 28 günlük karot numuneleri basınç dayanımı cihazıyla deneye tabi tutulmuştur. Gelen yükün eşit dağılması için silindir numunelerin yüzeylerine deneye başlamadan önce alçı uygulanmıştır (Şekil 3.20). Deney, 0,25MPa/san hızla yapılmıştır.



Şekil 3.20. YRK basınç dayanımı deneyi; **a)** Yüzeyi alçı ile kaplanmış numune; **b)** Basınç dayanımına tabi tutulmuş numune

3.2.6.4. Cantabro deneyi

Cantabro deneyi Los Angeles cihazı ile ancak bilyesiz olarak TS EN 12697-17 standardına göre yapılmıştır. Cihaza yerleştirilen YRK karot numuneleri cihazda 300 devir döndükten sonra cihazdan çıkarılmıştır (Şekil 3.21). Daha sonra numunelerin ağırlık kaybı hesaplanmıştır. Deney 1,3,7 ve 28 günlük numunelere yapılmıştır.



Şekil 3.21. Cantabro deneyi; **a)** Deneye tabi tutulmadan önce numune **b)** Deneye tabi tutulmuş numune

3.2.6.5. Donma-çözünme deneyi

Kaplamanın farklı sıcaklıklarda ve ağır hava şartlarında gösterdiği direnci ölçmek için yapılan donma-çözünme deneyi ASTM C 666 standardına göre yapılmıştır. Çalışma

kapsamında her bir YRK için 6 numune donma çözünmeye tabi tutulmuştur. 3 numune 3 döngüye ve diğer 3 numune 5 döngüye tabi tutulmuştur. Her bir döngü -16°C 16 saat ve 25°C 8 saat olacak şekilde uygulanmıştır.



Şekil 3.22. Donma-çözünme kabini

3.2.6.6. Permeabilite deneyi

Permeabilite deneyi TS EN 12697-19 standardına göre yatay permeabilite ve dikey permeabilite olarak uygulanmıştır. Deney donma-çözünme döngülerine tabi tutulmuş numunelere yapılmıştır. Dikey permeabiliteyi belirlemek için öncelikle borunun içerisine lastik yerleştirilmiş daha sonra numune ile birlikte cihaza yerleştirilmiştir (Şelil 3.23). Daha sonra numunenin suya doyması için su 10 dakika boyunca serbest bırakılmıştır. 10 dakika sonunda 90 saniye boyunca borudan taşan su tartılarak dikey permeabilite hesaplanmıştır. Yatay permeabilite için ise numunenin altı muma batırılarak kaplanmıştır daha sonra dikey permeabilite deneyindeki aşamalar uygulanmıştır ve yatay permeabilite hesaplanmıştır.



Şekil 3.23. Permeabilite deneyi; **a)** Permeabilite deneyi cihazı; **b)** Numunenin yerleştirildiği boru

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Agregal

Çizelge 4.1’de agregalara uygulanan deneylerin sonuçları standart sınır değerleriyle birlikte belirtilmiştir.

Çizelge 4.1. Agregalara uygulanan deneylerin sonuçları

Deneyin Adı	İri Agregal	İnce Agregal	Standart Değerleri	Deneyin Standardı
Su Emme (%)	0,505	0,50	≤ 2	TS EN 1097-6
Los Angeles (Aşınma) (%)	24,5	-	≤ 27	ASTM C 131
Yassılık İndeksi (%)	13,8	-	≤ 25	BS 812
Soyulma Mukavemeti	80	-	≥ 60	TS EN 12697-11 (Kısım 403 EkA)
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık	1,03	-	≤ 16	TS EN 1367-2
Organik Madde Tayini	-	Negatif	Negatif	TS EN 1744-1
Metilen Mavisi	-	0,5	≤ 3	TS EN 933-9
Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	2,6	2,65	-	TS EN 1097-6

4.2. Bitüm

Çizelge 4.2’de bitüme uygulanan deneylerin sonuçları standart sınır değerleriyle birlikte belirtilmiştir.

Çizelge 4.2. Bitüme uygulanan deneylerin sonuçları

No	Deney Adı	Deney Sonucu	Standart Değerleri	Deney Standardı
1	Penetrasyon (0,1mm)	67	50-70	TS EN 1426
2	Yumuşama Noktası (°C)	46,3	46-54	TS EN 1427
3	Düktilite (cm)	≥100	≥100	ASTM D113
4	Parlama Noktası (°C)	257	230	TS 123 EN ISO 2592
5	İnce Film Halinde Isıtma (163°C’de, 5 Saat)			TS EN 12607-2
5.1	Kütle Değişimi (%)	0,005	≤0,5	
5.2	Kalıcı Penetrasyon (%)	71	≥50	TS EN 1426
5.3	Yumuşama Noktası (°C)	48,95	-	TS EN 1427
5.4	Yumuşama Noktası Yükselmesi (°C)	2,65	≤9	

4.3. Dolgu Harcı

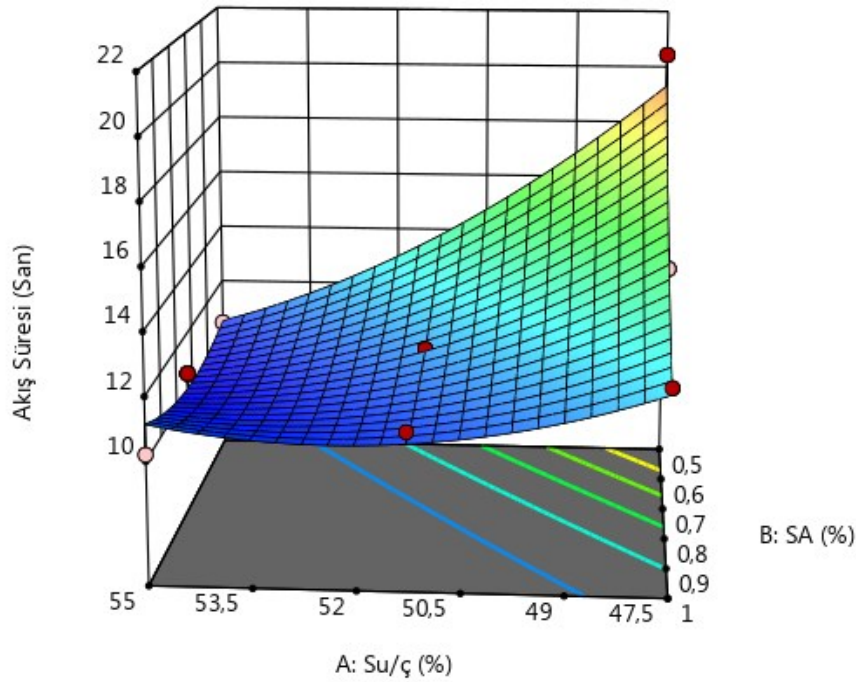
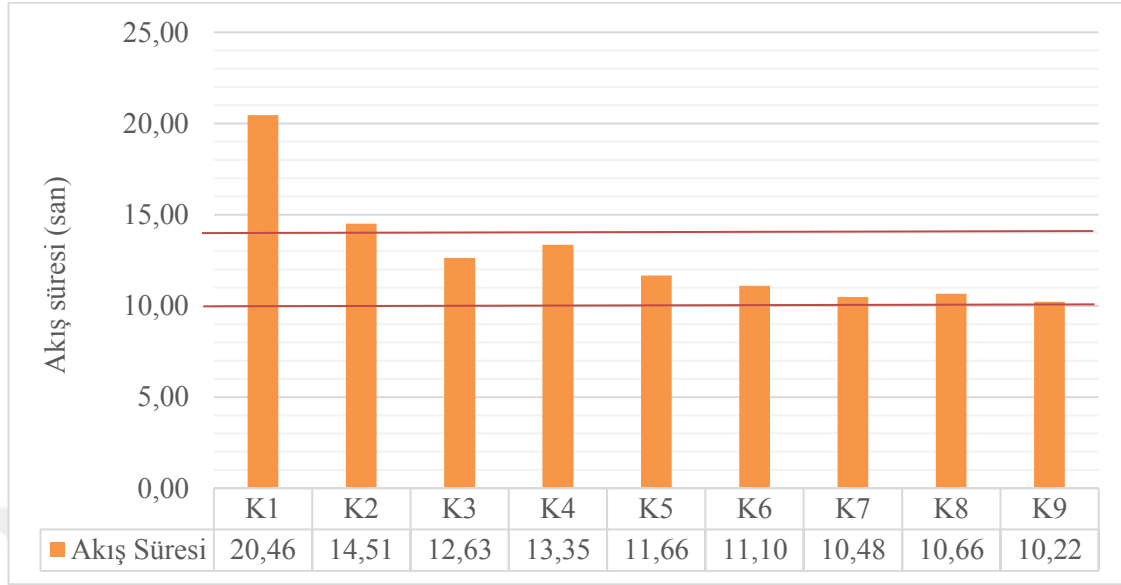
4.3.1. Akışkanlık

Çizelge 4.3’de literatürde bulunan farklı akışkanlık deneyi verileri vardır. Bu bilgiler doğrultusunda bu çalışmada akış süresi sınır değerleri 10-14 saniye olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.3. Literatürde bulunan farklı akışkanlık deneyi verileri

Yazarlar	Akış Süresi (San)	Deney Yöntemi	Harcın Hacmi (ml)
Al-Qadi vd. 1994	7-9	Marsh akış hunisi	1000
Anderton 2000	8-10	Marsh akış hunisi	1000
Momtaz vd. 2020	8-16	Marsh akış hunisi	1000
Koting vd. 2014	11-16	Malaysian harç akış hunisi	1000
Husain vd. 2014	11-16	Malaysian harç akış hunisi	1000
Hou vd. 2016	9-11	Leeds akış hunisi	1000
Zoorob vd. 2017	9-11	Akış hunisi deneyi	1725
Hu vd. 2008	11-14	Akış hunisi deneyi	1725
HFAP	10-14	-	-
Hlail vd. 2020	11-16	Akış hunisi deneyi	1725
Hassani vd. 2020	11-16	Akış hunisi deneyi	1725
Fang vd. 2020	10-16	Akış hunisi deneyi	1725

Çizelge 4.4’de kontrol numunesi akışkanlık deney sonuçları, Şekil 4.1’de ise YYM ile çizdirilmiş akışkanlık süresi yanıt yüzey grafiği belirtilmiştir.

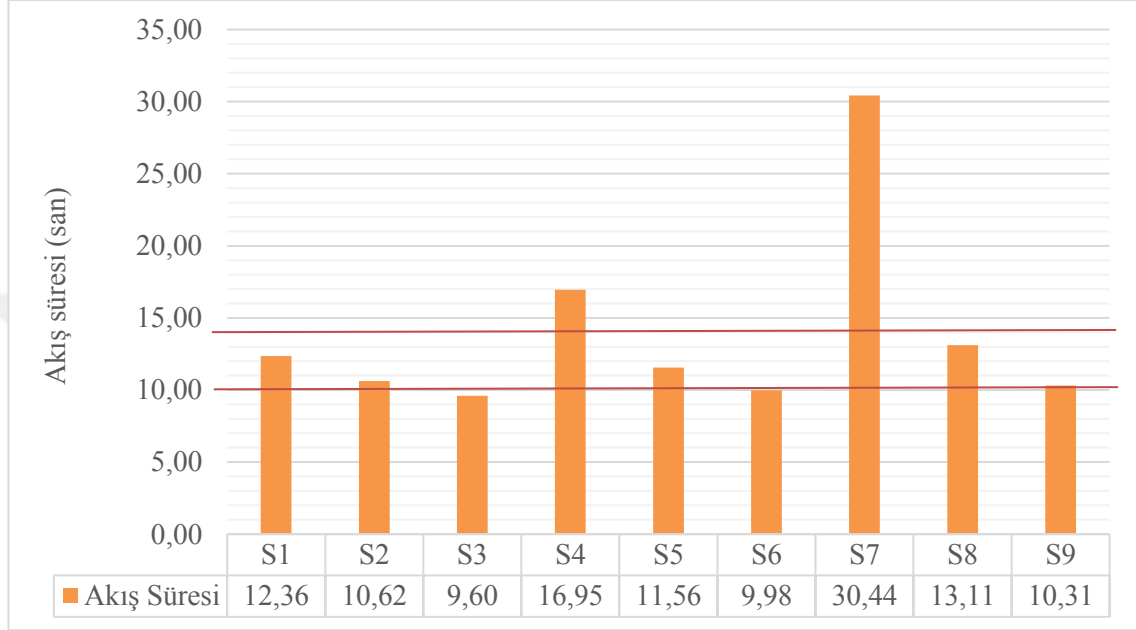
Çizelge 4.4. Kontrol numunesi akışkanlık deney sonuçları**Şekil 4.1.** Kontrol numunesi akışkanlık deney sonuçları yanıt yüzey grafiği

Elde edilen sonuçlara baktığımız zaman aynı su/ç oranında SA dozajı arttıkça ve aynı SA dozajında su/ç oranı arttıkça harç daha akışkan olmuştur. K3, K4, K5, K6, K7, K8 ve K9 numuneleri akış süresi sınır değerleri içerisinde. %47,5 su/ç oranına sahip harçlarda yani K1, K2 ve K3 numunelerinin SA dozajının %0,25 artması akış süresini

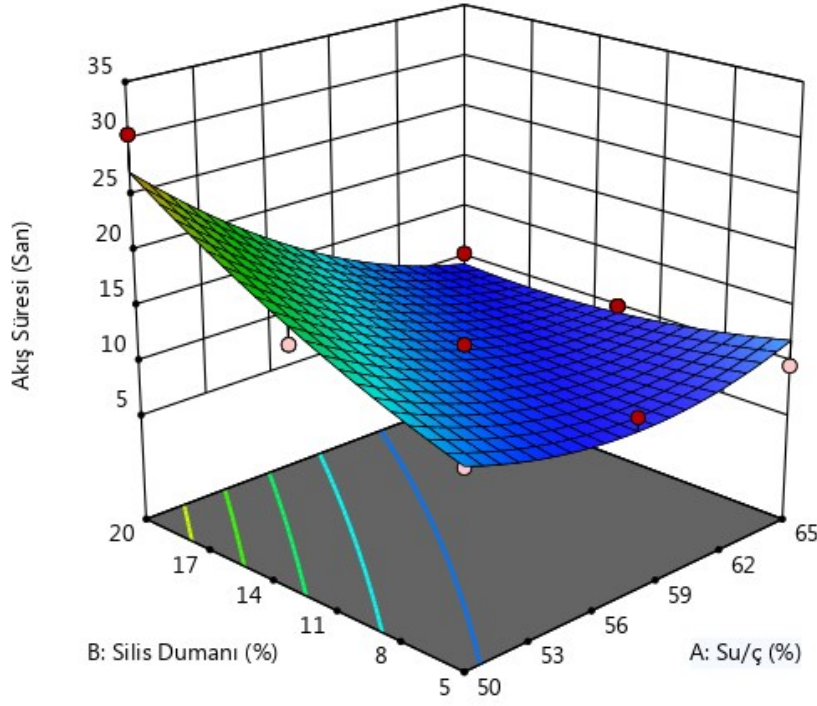
önemli ölçüde etkilemiştir. Ancak daha yüksek su/ç oranına sahip harçlarda yani K4, K5, K6, K7, K8 ve K9 numunelerinde aynı SA dozajı artışı akış süresini daha az etkilemiştir.

Silis dumanı içeren harçların akışkanlık deney sonuçları Çizelge 4.5’de, YYM ile çizdirilmiş akışkanlık süresi yanıt yüzey grafiği ise Şekil 4.2’ de belirtilmiştir.

Çizelge 4.5. Silis dumanı içeren harçların akışkanlık deney sonuçları



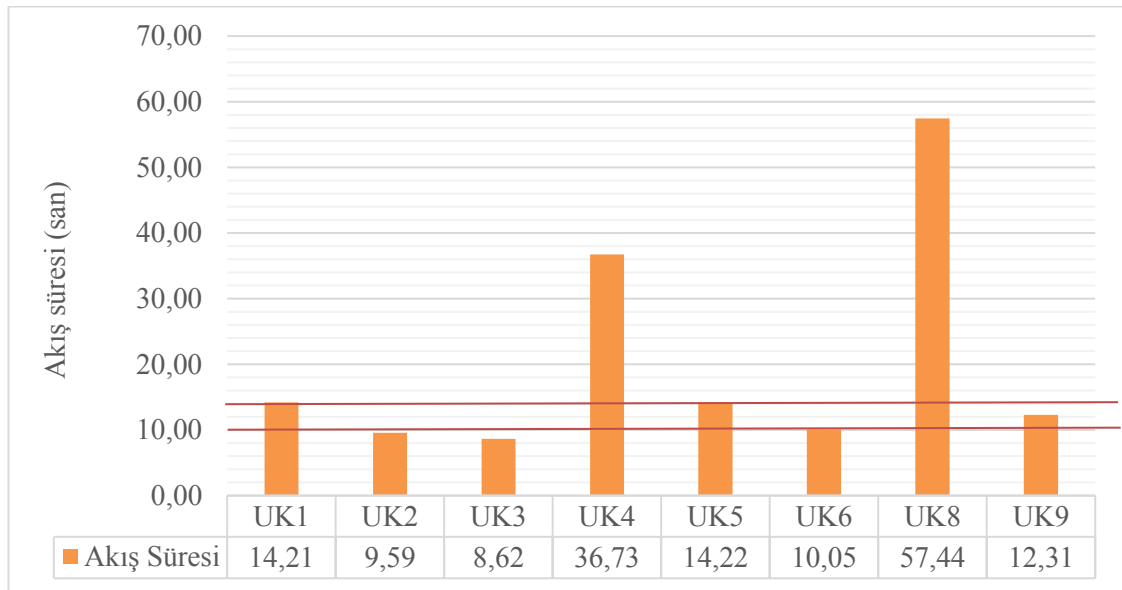
Deney sonuçlarına baktığımız zaman aynı silis dumanı miktarında su/ç oranı arttıkça harç daha akışkan hale gelmiştir. Ayrıca aynı su/ç oranında silis dumanı miktarı arttıkça harcın akışkanlığı artmıştır ancak yüksek su/ç oranlarında bu değişim miktarı daha azdır. S1,S2,S5,S8 ve S9 numuneleri akış süresi sınır değerleri içerisinde kalmıştır. S3 ve S6 numuneleri fazla akışkan olup 10 san olan akış süresi sınır değerinin altında tamamlanmıştır. SD numuneleri kontrol numunesinden farklı olarak aynı akış süresi sınır şartlarını daha yüksek su/ç oranlarında karşılamıştır.

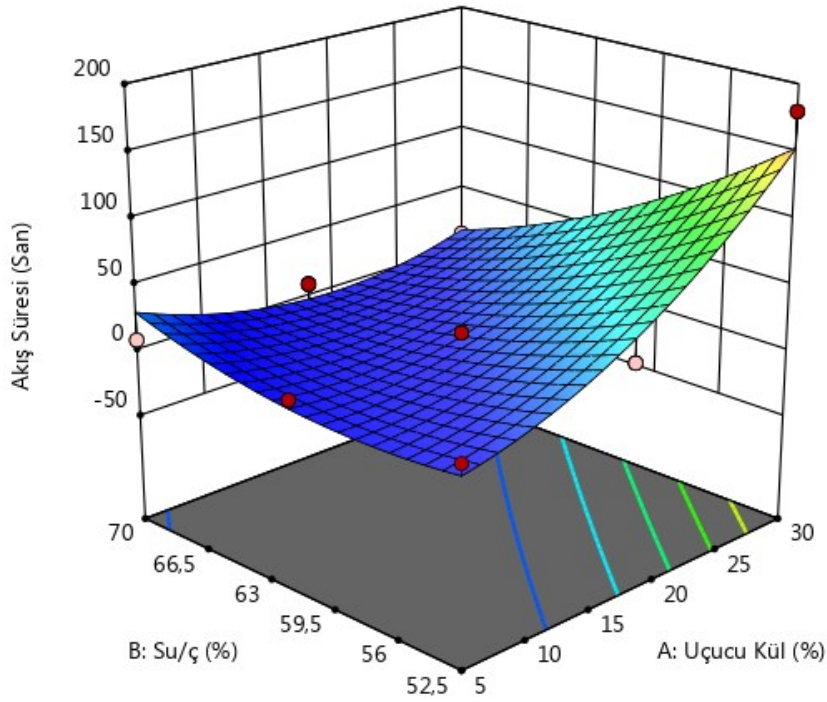


Şekil 4.2. Silis dumanı içeren harçların akışkanlık deney sonuçları yanıt yüzey grafiği

Uçucu kül içeren harçların akışkanlık deney sonuçları Çizelge 4.6’da, YYM ile çizdirilmiş akışkanlık süresi yanıt yüzey grafiği ise Şekil 4.3’ de belirtilmiştir. UK7 numunesinin akış süresi harcın katı olması nedeniyle ölçülememiştir.

Çizelge 4.6. Uçucu kül içeren harçların akışkanlık deney sonuçları





Şekil 4.3. Uçucu kül içeren harçların akışkanlık deney sonuçları yanıt yüzey grafiği

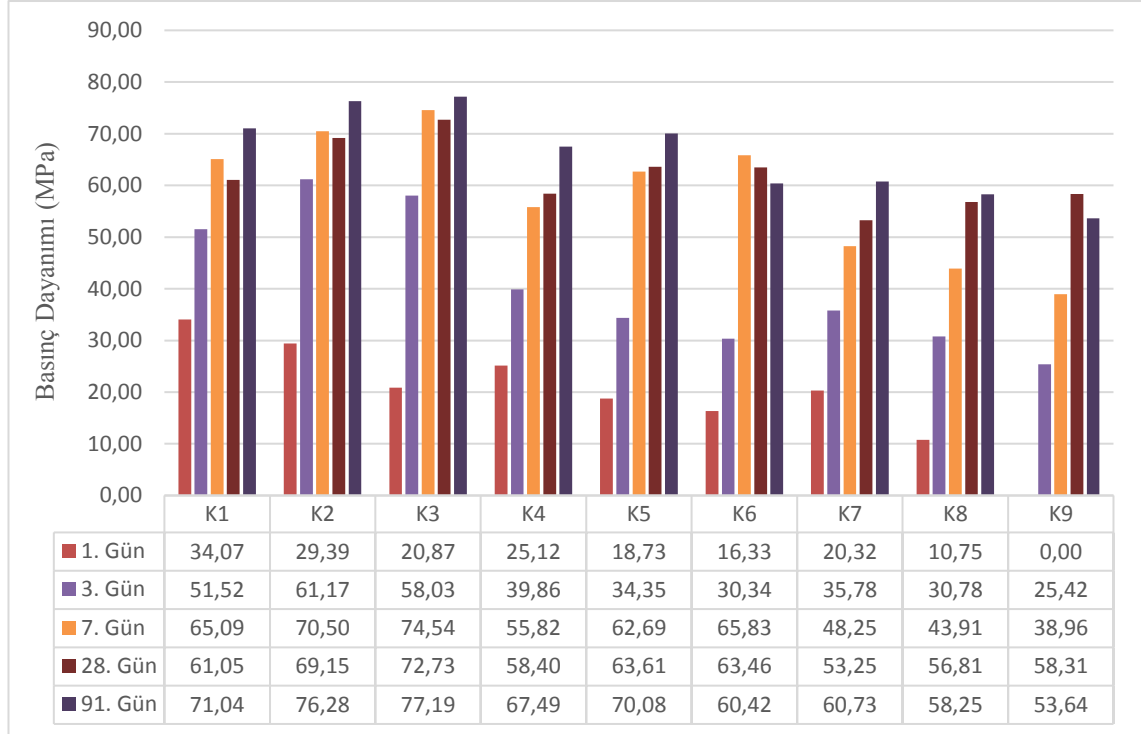
Elde edilen deney sonuçlarına göre aynı UK miktarında su/ç oranı arttıkça harç daha akışkan hale gelmiştir, aynı su/ç oranında UK miktarı arttıkça ise harcın akışkanlık kıvamı azalmıştır. UK6 ve UK9 numuneleri akış süresi deneyi sonuçları sınır değerleri içerisinde. UK2 ve UK3 numuneleri fazla akışkan olduğu için akış süresi deneyi sonuçları 10 san olan sınır değerinin altındadır. UK7 numunesi akışkan olmadığı için akış süresi deneyi sonuçlanmamıştır. UK numuneleri, SD ve kontrol numunelerine kıyasla aynı akış süresi sınır şartlarını daha yüksek su/ç oranlarında karşılamıştır.

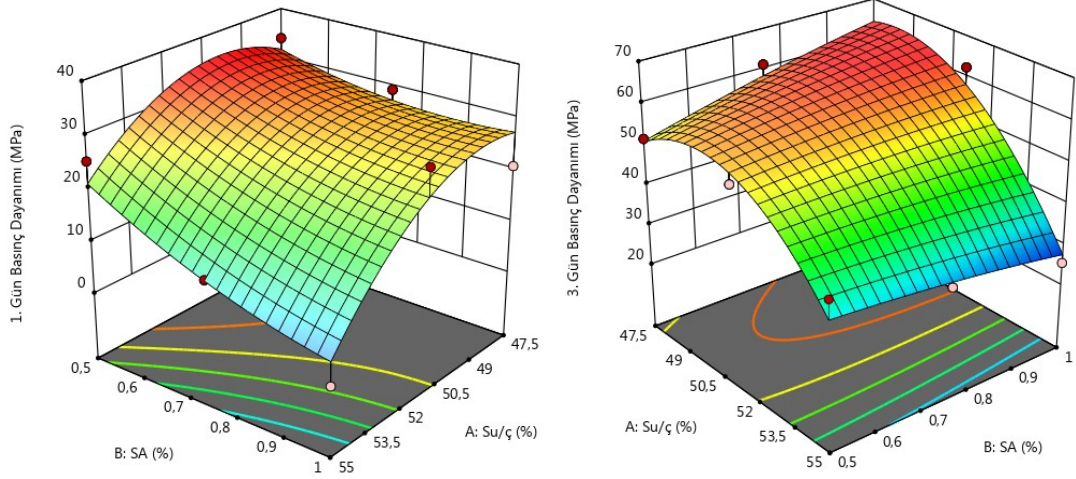
4.3.2. Basınç dayanımı

Çizelge 4.7’de literatürde bulunan farklı harç basınç dayanımı deneyi verileri vardır. Bu tez çalışmasında minimum basınç dayanımı 3 günlük numune için 25 MPa olarak kabul edilmiştir. Çizelge 4.8’de kontrol numunesi basınç dayanımı deney sonuçları, Şekil 4.4’de 1. ve 3.gün, Şekil 4.5’de ise 7. ve 28. gün YYM ile çizdirilmiş basınç dayanımı yanıt yüzey grafikleri gösterilmiştir.

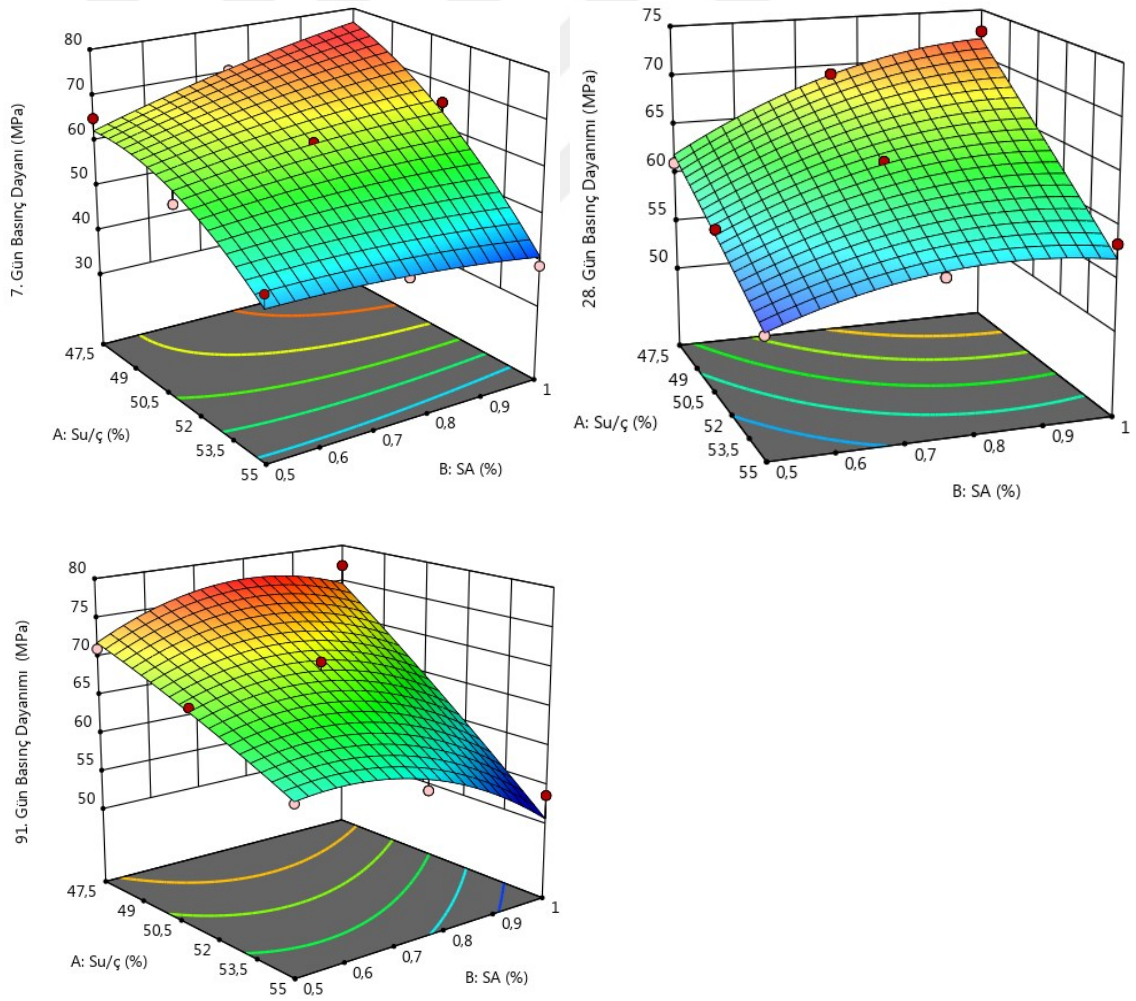
Çizelge 4.7. Farklı çalışmalardan harç basınç dayanımı verileri (MPa)

Yazarlar	Kürleme Süreleri			
	1 Gün	3 Gün	7 Gün	28 Gün
Wang ve Hong 2018	19	21,5	26	-
Al-Qadi vd. 1994	17,4	-	26,94	37
Koting vd. 2014	57,5	-	-	92,5
Wang vd. 2018	-	-	20,76	31,43
Hlail vd. 2020	15	23	27	34
Zhang vd. 2019	-	10,4	-	30,7
Anderton 2000	-	-	-	21,8
Hassan vd. 2002	57	-	98	118
Zhang ve Wu 2020	≥40	-	-	≥90
Setyawan 2013	8,82	-	10,76	13,82
Khan vd. 2020	20,8	-	51,49	57,91
Koting vd. 2011	55,4	-	-	91,7
Gong vd. 2022	≥15	≥25	-	-
HFAP	-	-	9,8-29,4	-

Çizelge 4.8. Kontrol numunesi basınç dayanımı deney sonuçları



Şekil 4.4. Kontrol numunesi 1. ve 3. gün basınç dayanımı deney sonuçları yanıt yüzey grafikleri

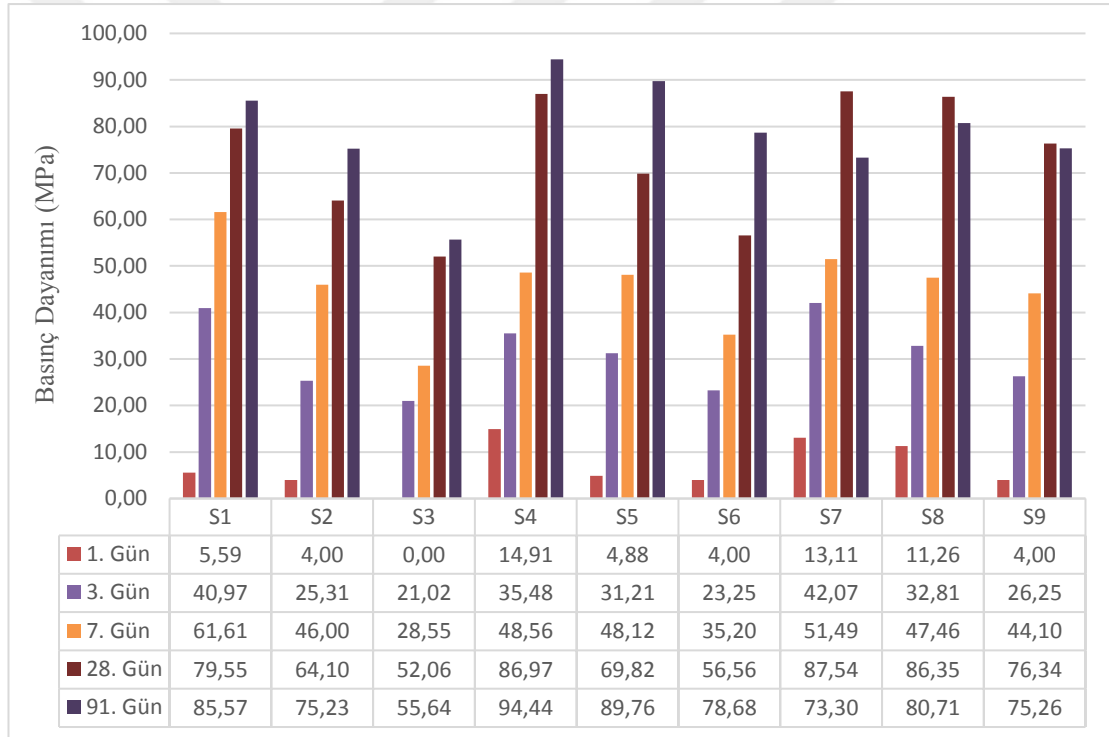


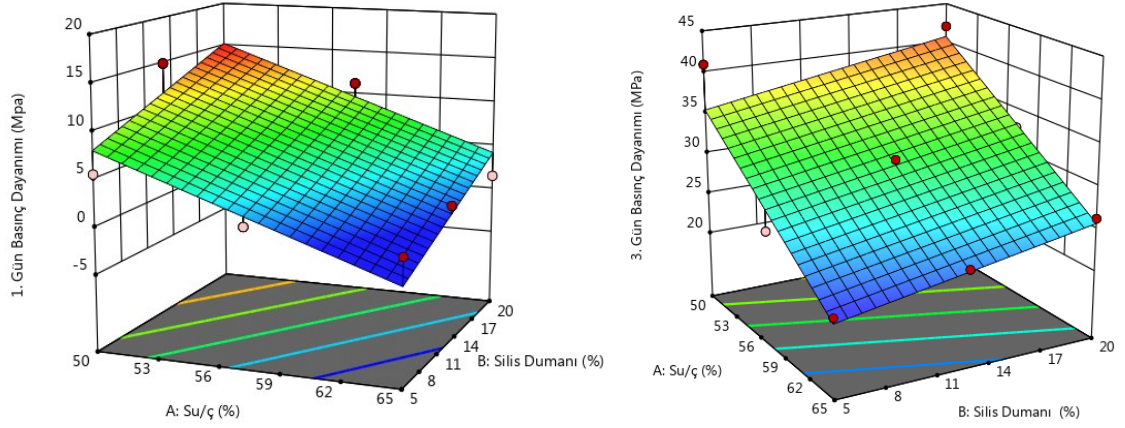
Şekil 4.5. Kontrol numunesi 7. ve 28. gün basınç dayanımı deney sonuçları yanıt yüzey grafikleri

Akışkanlık deneyi sınır şartları içerisinde sonuçlanan numunelere baktığımız zaman 1. gün basınç dayanımı deney sonuçlarında, numuneler arasından K4 numunesi en yüksek akış süresine sahip olduğu gibi en yüksek basınç dayanımına da ulaşmıştır. En düşük basınç dayanımı değeri ise en yüksek su/ç oranına ve SA dozajına sahip en akışkan harç numunesi K9, 24 saatin sonunda henüz priz almadığı için 0 MPa'dır. 3. gün basınç dayanımı deney sonuçlarına göre, %51,25 su/ç oranına ve %1 SA dozajına sahip K6 numunesi en yüksek basınç dayanımına ulaşmıştır. 7. ve 28. günlerde ise K3 numunesi en yüksek basınç dayanımına ulaşmıştır. 28. gün K3 ve K6 numunelerinin basınç dayanımları, 7. güne kıyasla sırasıyla %2 ve %4 düşmüştür.

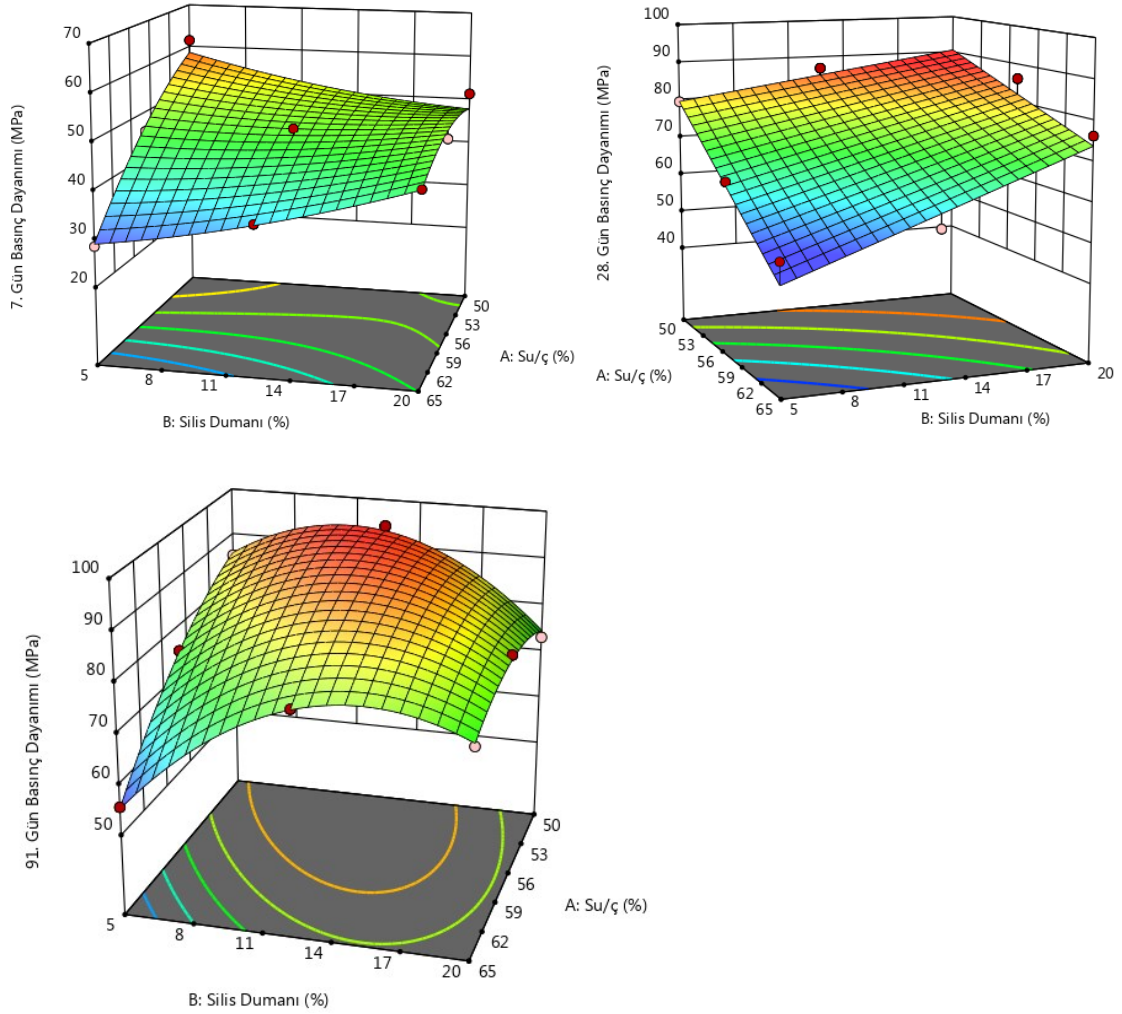
Çizelge 4.9'da silis dumanı basınç dayanımı deney sonuçları, Şekil 4.6'da 1. ve 3.gün, Şekil 4.7'de ise 7. 28. ve 91. gün YYM ile çizdirilmiş basınç dayanımı yanıt yüzey grafikleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. Silis dumanı içeren harçların basınç dayanımı deney sonuçları





Şekil 4.6. Silis dumanı içeren harçların 1. ve 3. gün basınç dayanımı deney sonuçları yanıt yüzey grafikleri



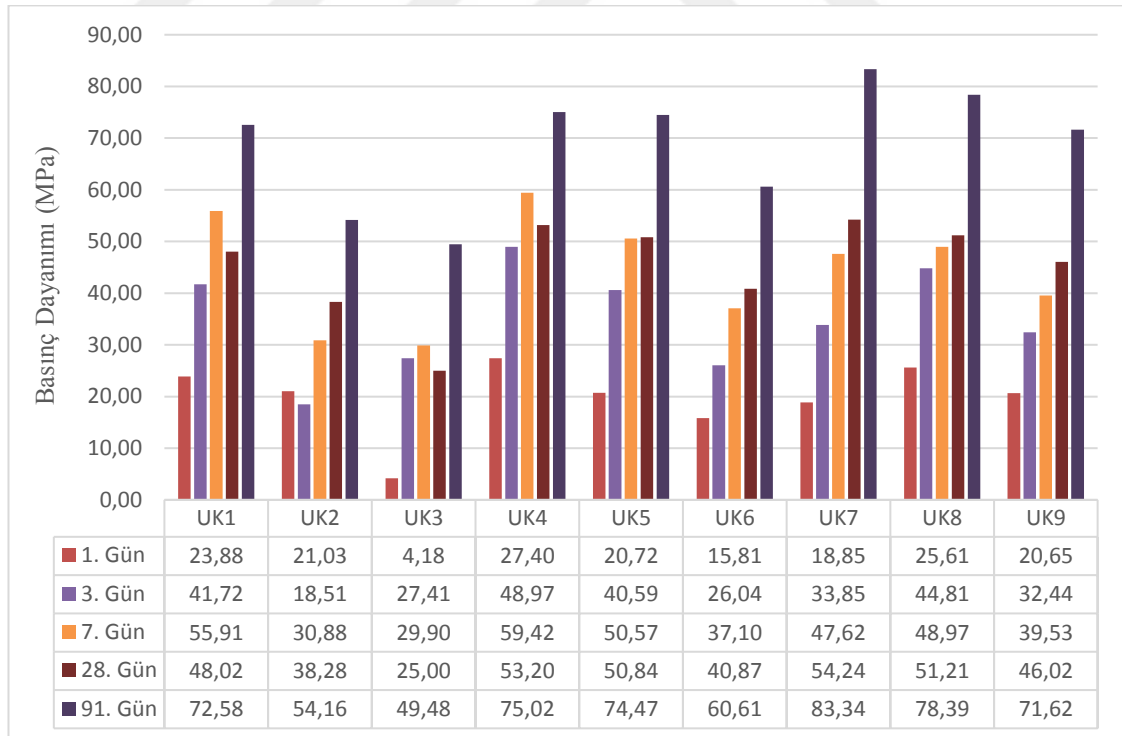
Şekil 4.7. Silis dumanı içeren harçların 7., 28. ve 91. gün basınç dayanımı deney sonuçları yanıt yüzey grafikleri

Akışkanlık deneyi sınır şartları içerisinde sonuçlanan numunelere baktığımız zaman 1. gün basınç dayanımı deney sonuçlarında, numuneler arasından %20 silis dumanına sahip S8 numunesi en yüksek akış süresine sahip olduğu gibi en yüksek basınç dayanımına da ulaşmıştır. 3. ve 7. günlerde %5 silis dumanına sahip S1, 28. gün S8, 91. gün ise %12,5 silis dumanına sahip S5 numuneleri en yüksek basınç dayanımı değerlerine ulaşmıştır. Aynı su/ç oranlarında silis dumanı miktarı arttıkça 91. gün hariç diğer günlerde numunelerin basınç dayanımları yükselmiştir. 91. gün basınç dayanımı değerlerinin %12,5 silis dumanı içeren harçlarda her zaman diğerlerinden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Kontrol numunesi ile silis dumanı içeren harçların en yüksek basınç dayanımları ayrı ayrı kıyaslandığı zaman silis dumanı içeren harçlar, 1. gün için %64, 3. gün için %34, 7. gün için %17 daha düşük ve 28. gün için ise %19 daha yüksek basınç dayanımı ile sonuçlanmıştır. %57,5 su/ç oranına sahip SD içeren harçların basınç dayanımları aynı SA dozajına ve %55 su/ç oranına sahip K9 numunesinin basınç dayanımı değerlerinden daha yüksektir.

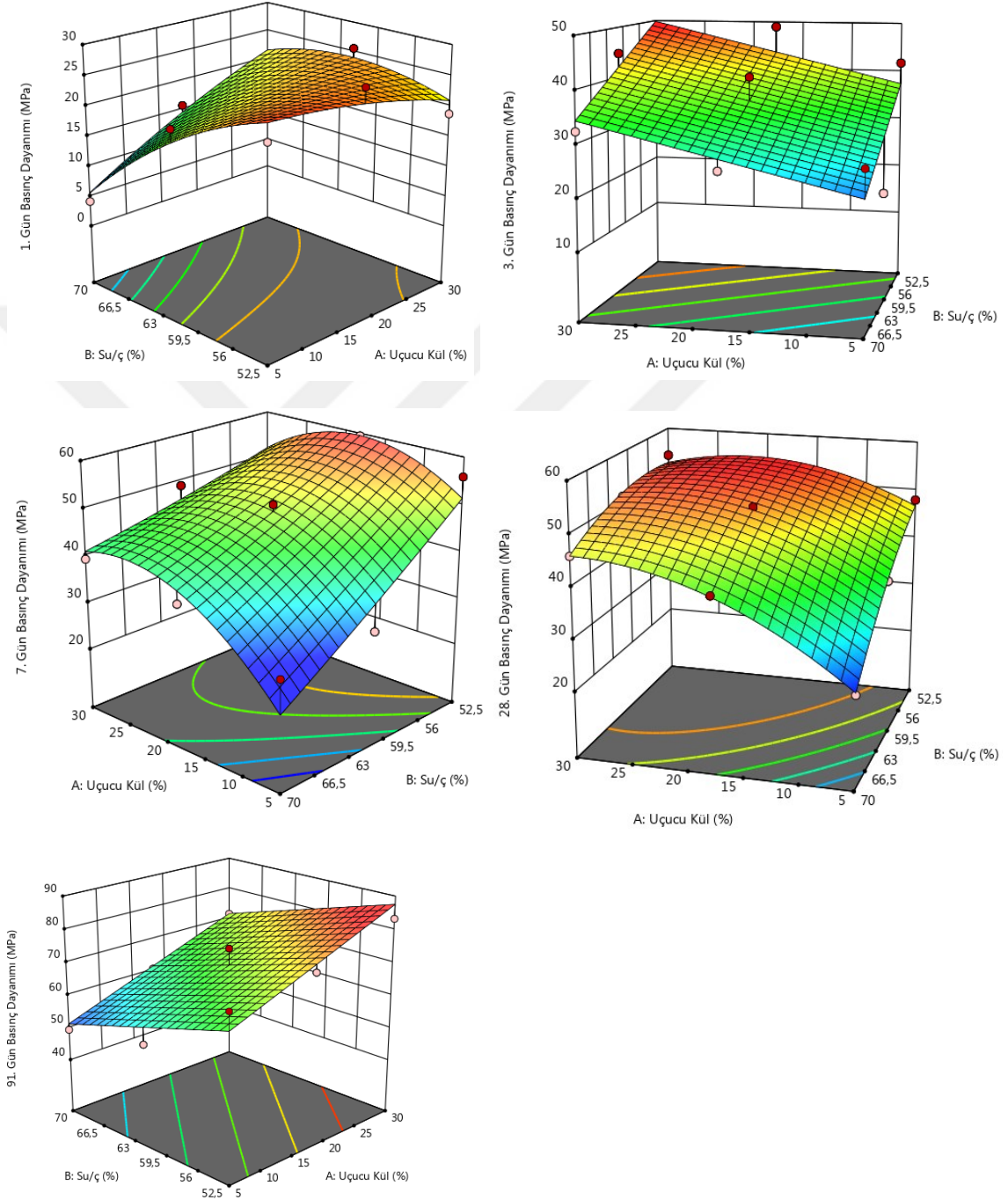
Çizelge 4.10'da uçucu kül basınç dayanımı deney sonuçları, Şekil 4.8'de 1., 3., 7., 28. ve 91. gün YYM ile çizdirilmiş basınç dayanımı yanıt yüzey grafikleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.10. Uçucu kül içeren harçların basınç dayanımı deney sonuçları



Akışkanlık deneyi sınır şartları içerisinde sonuçlanan numunelere baktığımız zaman %30 UK ve %70 su/ç oranına sahip UK9 numunesi bütün kürleme sürelerinde en

yüksek basınç dayanımına ulaşmıştır. Ayrıca UK9 numunesi, silis dumanı içeren ve kontrol numunelerinin en yüksek basınç dayanımlarından bütün kütleme sürelerinde daha düşük basınç dayanımına sahiptir.



Şekil 4.8. Uçucu kül içeren harçların 1., 3., 7., 28. ve 91. gün basınç dayanımı deney sonuçları yanıt yüzey grafikleri

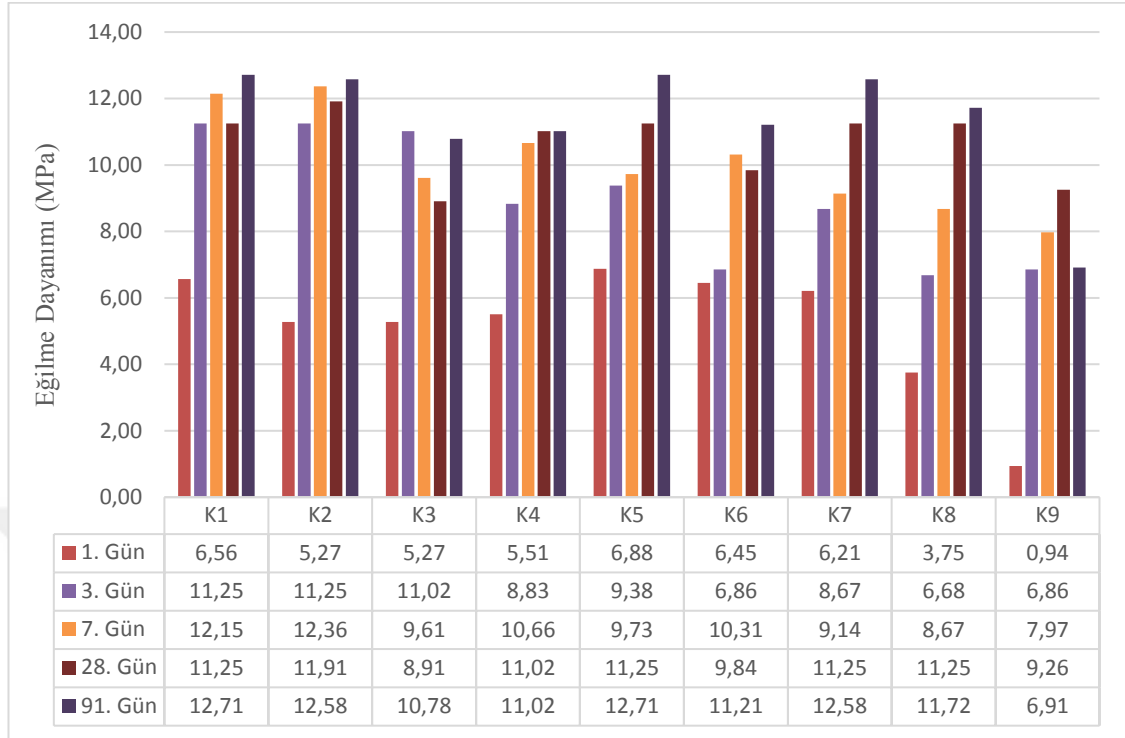
4.3.3. Eğilme dayanımı

Çizelge 4.11’de literatürde bulunan farklı harç eğilme dayanımı deneyi verileri vardır. Bu tez çalışmasında eğilme dayanımı 7 günlük numune için minimum 2 MPa olarak kabul edilmiştir.

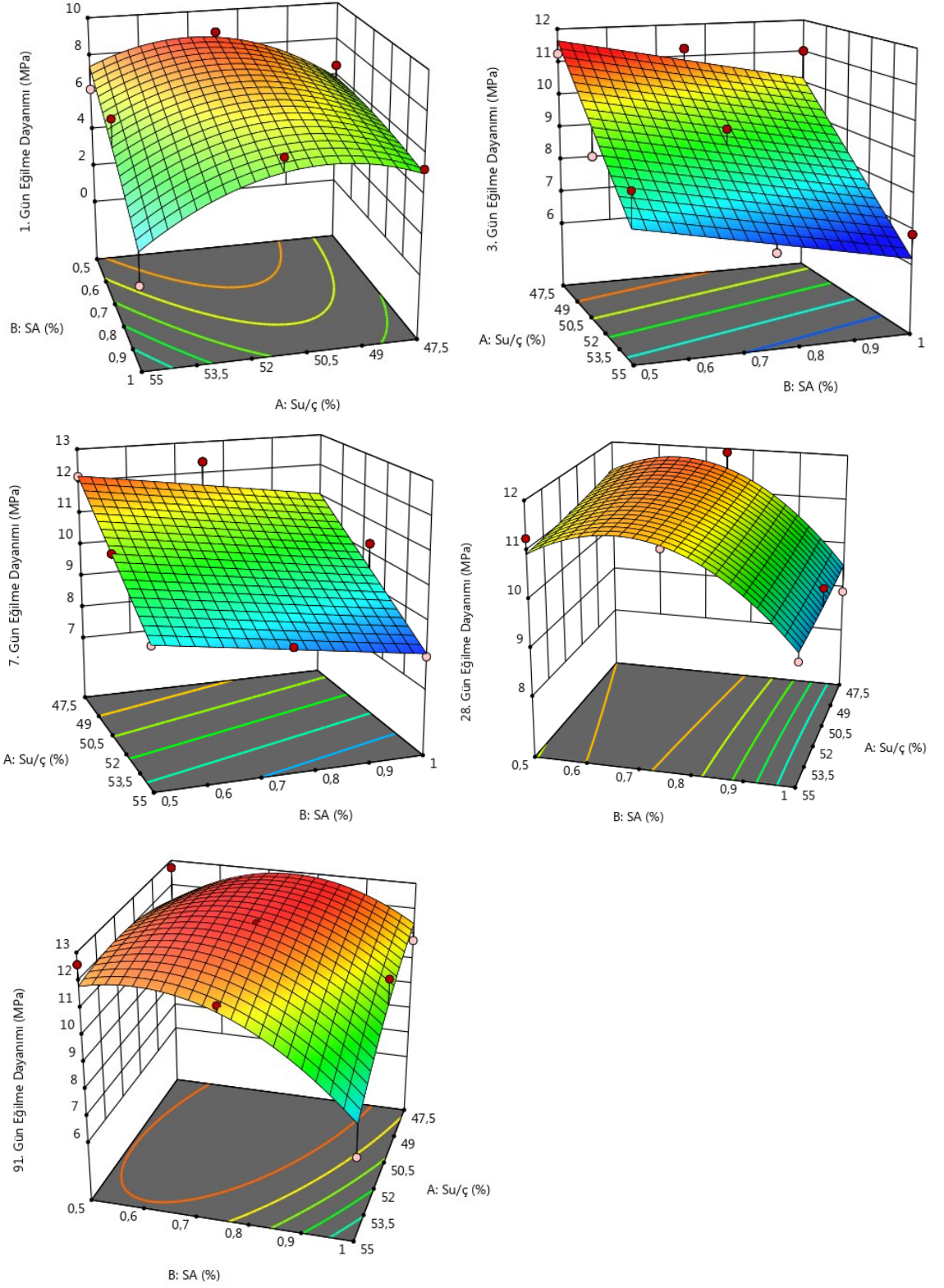
Çizelge 4.11. Farklı çalışmalardan eğilme dayanımı verileri (MPa olarak)

Yazarlar	Kürleme Süreleri			
	1 Gün	3 Gün	7 Gün	28 Gün
Wang ve Hong 2018	3,9	4,8	5,25	-
Koting vd. 2014	-	-	6,7	9,1
Zhang ve Wu 2020	-	-	-	6-8
Pei vd. 2016	-	-	5,8	6,3
Wand vd. 2018	-	-	4,95	6,23
Hlail vd. 2020	-	-	-	11,63
Oliveira 2006	-	-	-	7,4
Koting vd. 2011	-	-	6,7	9,1
HFAP	-	-	≥ 2	-

Çizelge 4.12’de kontrol numunesi eğilme dayanımı deney sonuçları, Şekil 4.9’da ise 1., 3., 7. ve 28. gün YYM ile çizdirilmiş eğilme dayanımı yanıt yüzey grafikleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.12. Kontrol numunesi eğilme dayanımı deney sonuçları

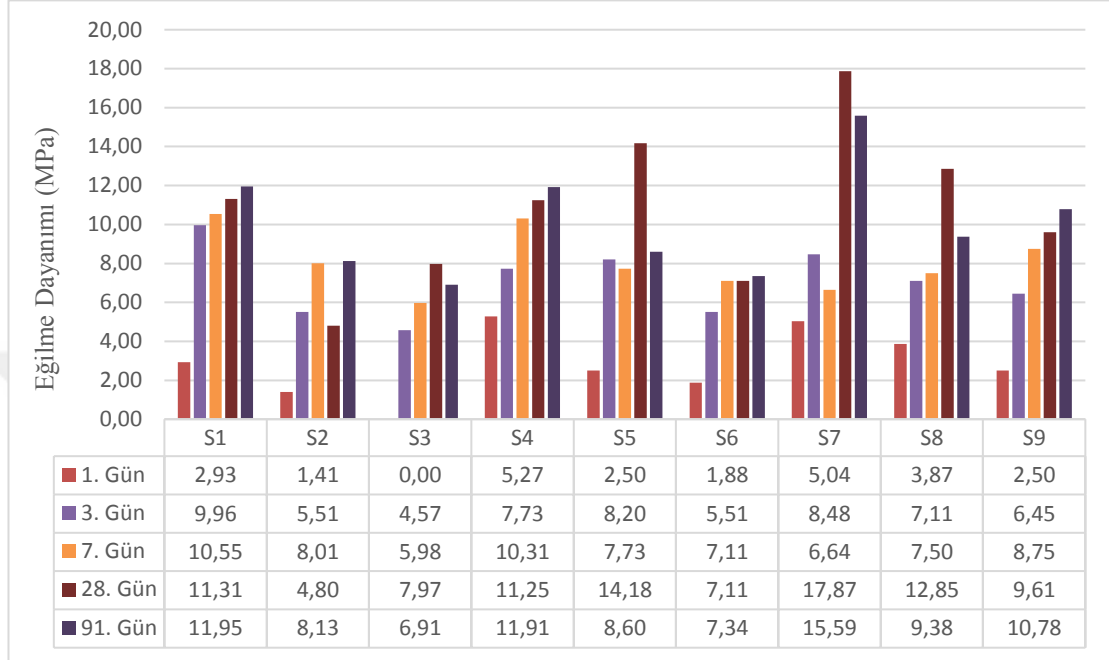
Aynı su/ç oranlarında SA dozajı arttıkça ve aynı SA dozajlarında su/ç oranları arttıkça genellikle eğilme dayanımı değerleri düşmüştür.



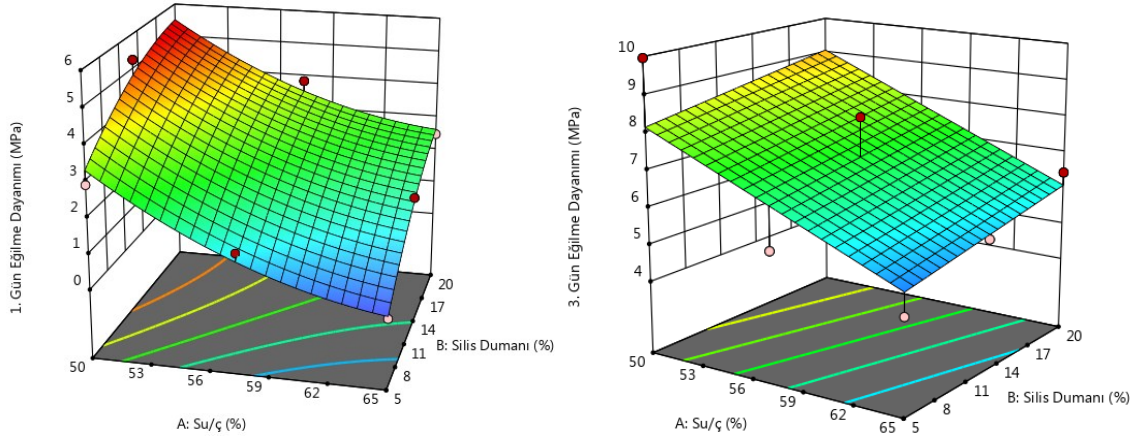
Şekil 4.9. Kontrol numunesi 1., 3., 7., 28. ve 91. gün eğilme dayanımı deney sonuçları yanıt yüzey grafikleri

Çizelge 4.13’de silis dumanı içeren harçların eğilme dayanımı deney sonuçları, Şekil 4.10’da 1. ve 3. gün, Şekil 4.11’de ise 7., 28. ve 91. gün YYM ile çizdirilmiş eğilme dayanımı yanıt yüzey grafikleri gösterilmiştir.

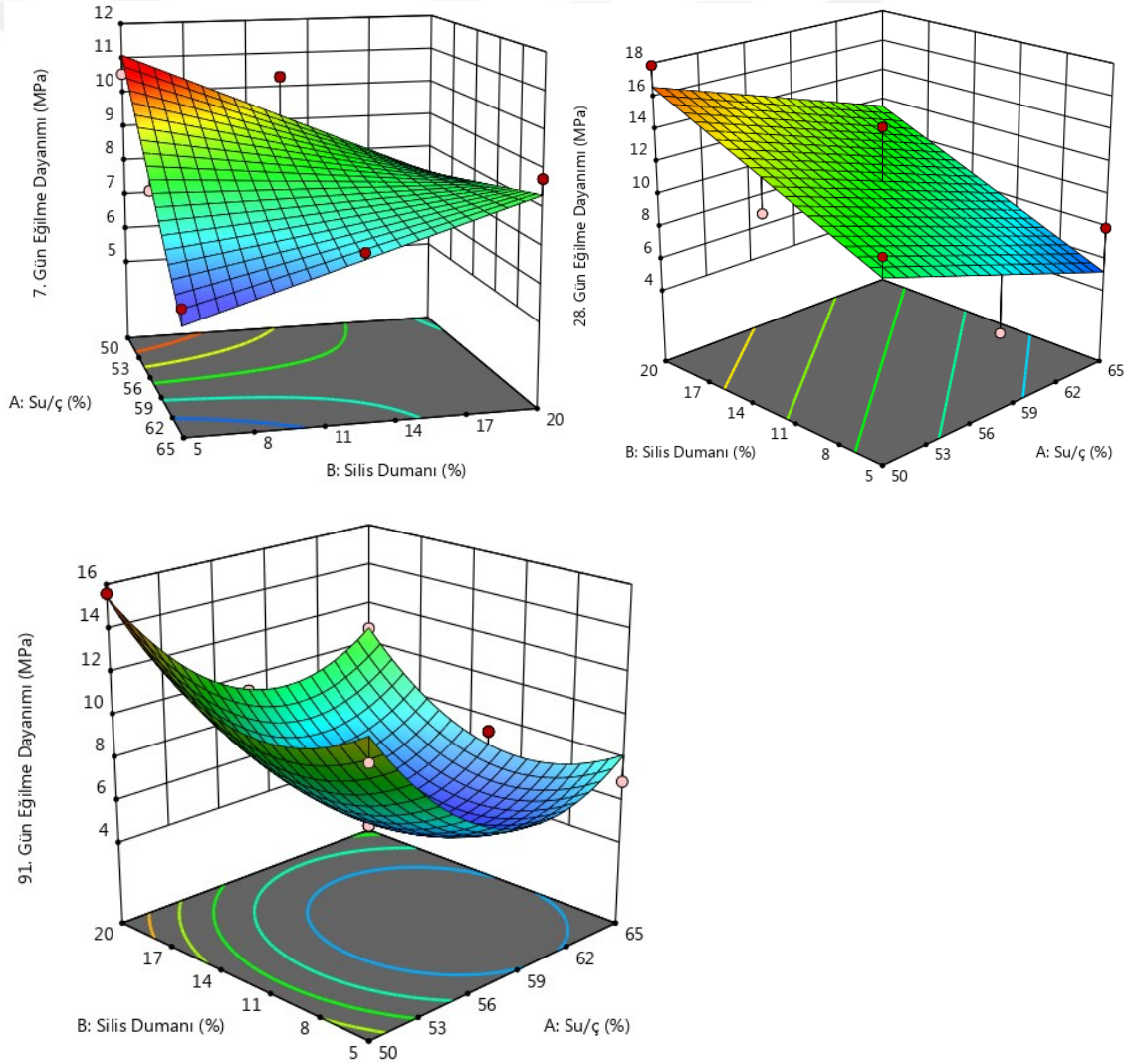
Çizelge 4.13. Silis dumanı içeren harçların eğilme dayanımı deney sonuçları



Deney sonuçlarına baktığımız zaman S3, S5, S6, S7 ve S9 numunelerinin 28. güne kıyasla 91. gün eğilme dayanımları düşmüştür. Aynı su/ç oranlarında SD miktarı arttıkça eğilme dayanımları yükselmiştir. Aynı SD miktarlarında su/ç oranı arttıkça eğilme dayanımları azalmıştır. Akışkanlık deneyi sınır şartları içerisinde kalan kontrol numuneleriyle karşılaştırdığımız zaman 28. gün için, S1 numunesi eğilme dayanımı kontrol numunesine göre daha yüksektir.



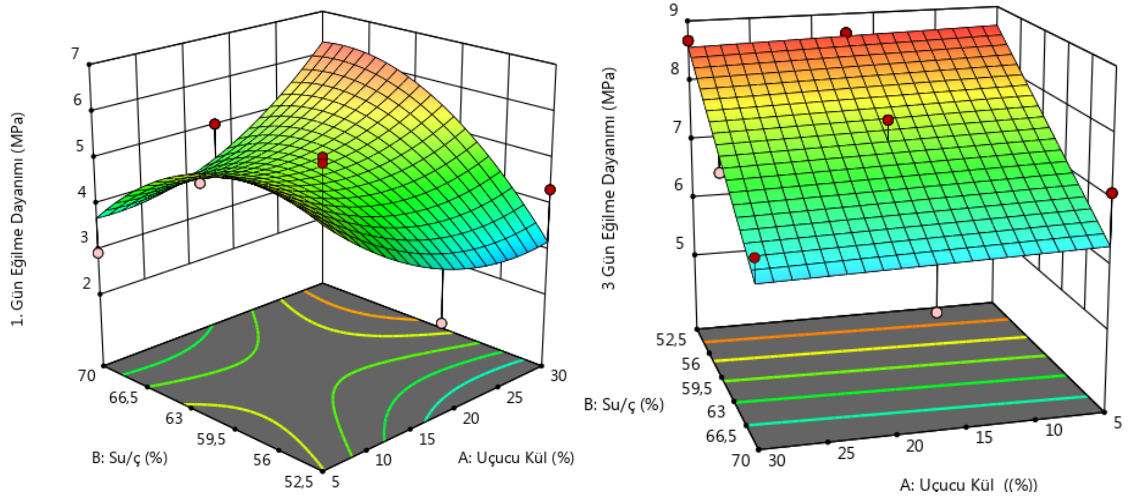
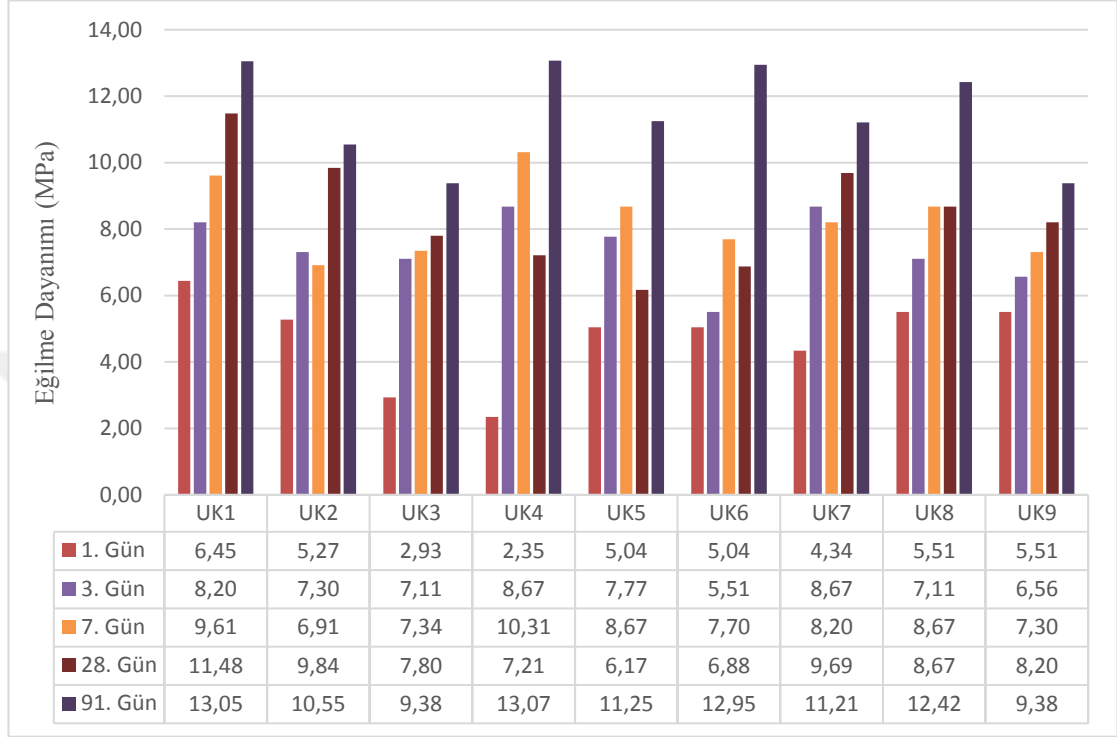
Şekil 4.10. Silis dumanı içeren harçların 1. ve 3. gün eğilme dayanımı deney sonuçları yanıt yüzey grafikleri



Şekil 4.11. Silis dumanı içeren harçların 7., 28. ve 91. gün eğilme dayanımı deney sonuçları yanıt yüzey grafikleri

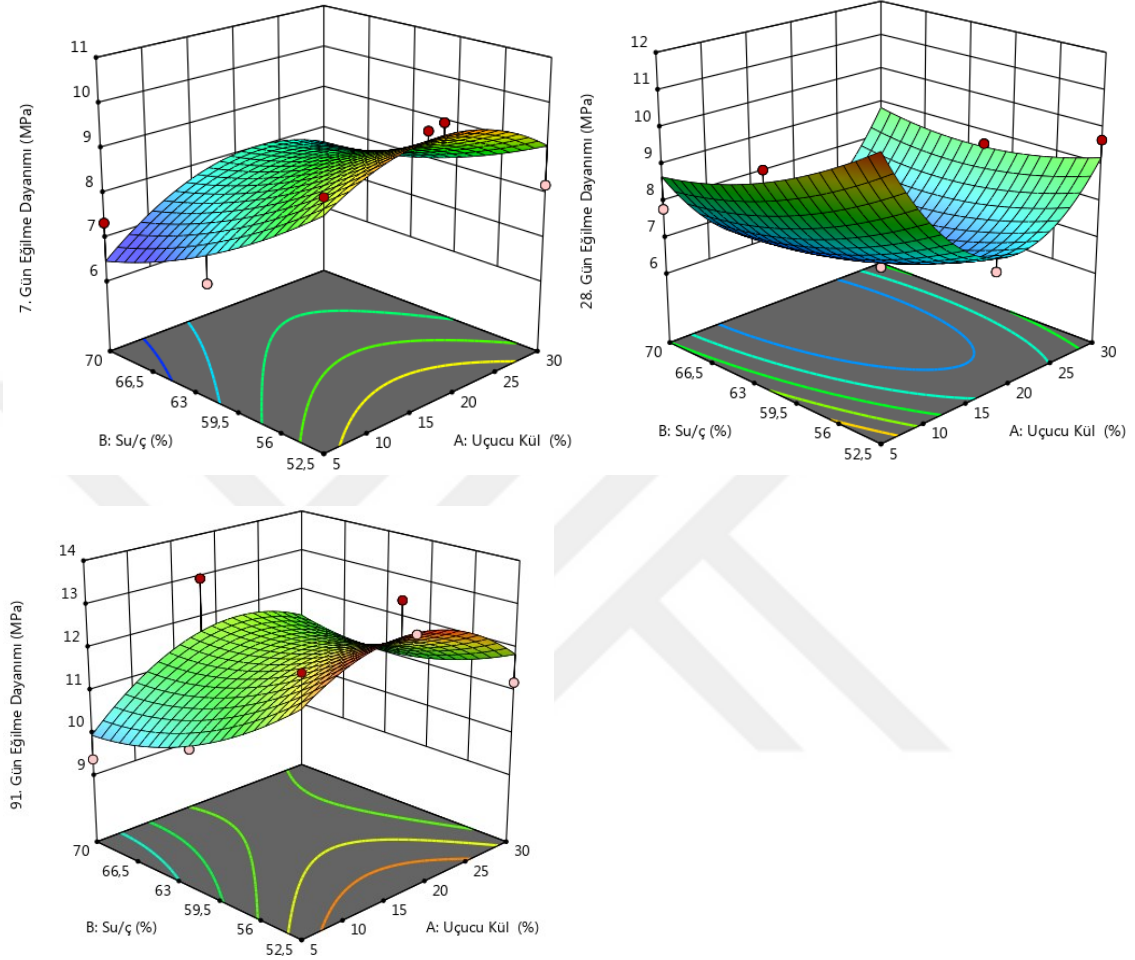
Çizelge 4.14’de uçucu kül içeren harçların eğilme dayanımı deney sonuçları, Şekil 4.12’de 1. ve 3. gün, Şekil 4.13’de ise 7., 28. ve 91. gün YYM ile çizdirilmiş eğilme dayanımı yanıt yüzey grafikleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.14. Uçucu kül içeren harçların eğilme dayanımı deney sonuçları



Şekil 4.12. Uçucu kül içeren harçların 1. ve 3. gün eğilme dayanımı deney sonuçları yanıt yüzey grafikleri

Elde edilen sonuçlara baktığımız zaman, aynı UK miktarlarında su/ç oranı arttıkça eğilme dayanımları düşmüştür.



Şekil 4.13. Uçucu kül içeren harçların 7., 28. ve 91. gün eğilme dayanımı deney sonuçları yanıt yüzey grafikleri

4.3.4. Kuruma büzülmesi

Çizelge 4.15’de literatürde bulunan farklı harç kuruma büzülmesi deneyi verileri vardır. Bu tez çalışmasında kuruma büzülmesi sınır değeri 28 günlük numune için maksimum %0,3 olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.15. Farklı çalışmalardan kuruma büzülmesi deneyi verileri (% olarak)

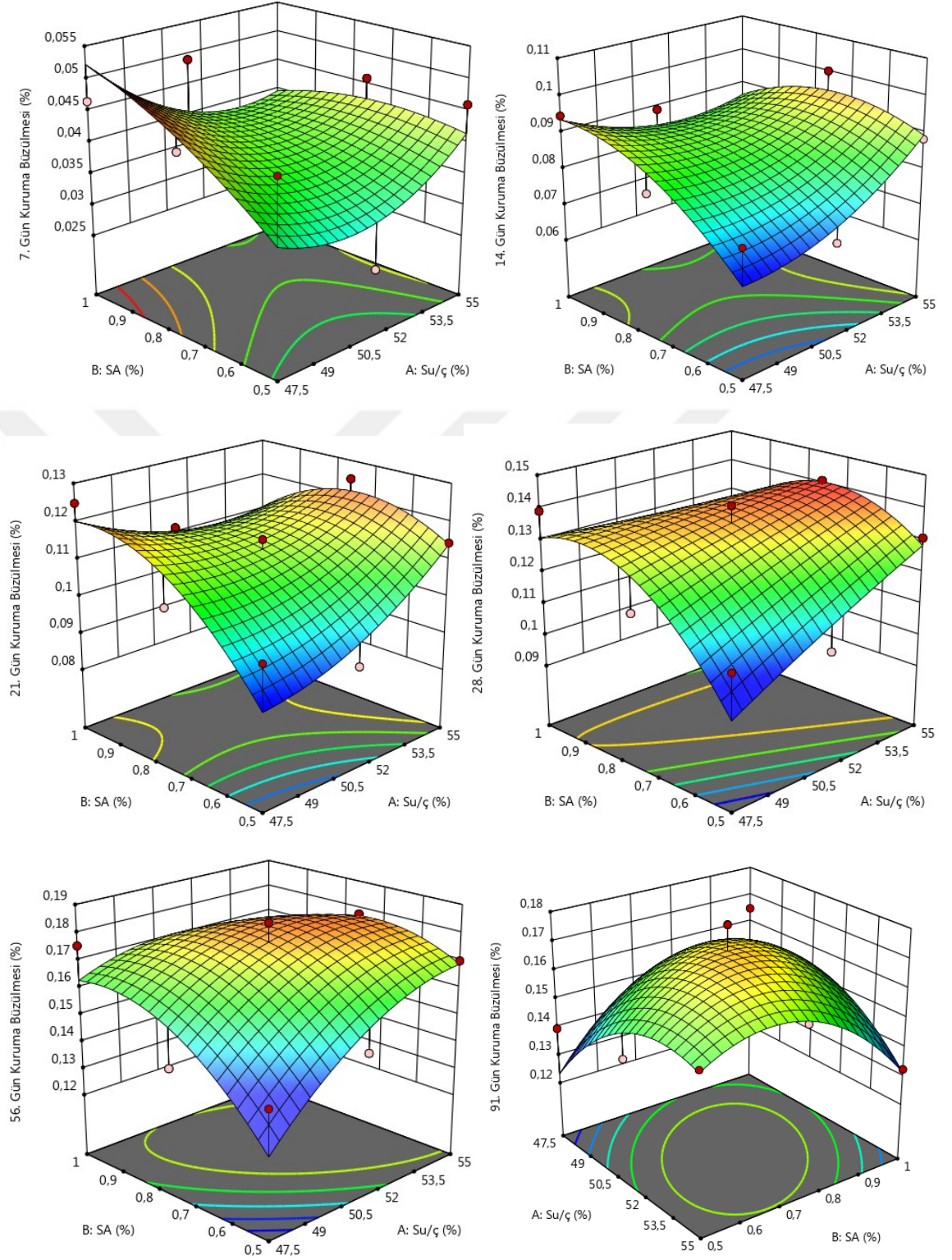
Yazarlar	Kürleme Süreleri		
	7 Gün	28 Gün	56 Gün
Zoorob vd. 2002	-	0,16	-
Zhang vd. 2021	0,27	-	-
Gong vd. 2022	-	≤0,3	-
Hassan vd. 2002	-	0,05	-
Davoodi vd. 2021	0,15	0,25	0,29

Çizelge 4.16’da kontrol numunesi kuruma büzülmesi deney sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 4.16. Kontrol numunesi kuruma büzülmesi deney sonuçları (%)

Elde edilen sonuçlara baktığımız zaman, aynı su/ç oranında SA dozajı arttıkça ve aynı SA dozajında su/ç oranı arttıkça kuruma büzülmesi artmıştır. Akışkanlık deneyi sınır şartları içerisinde kalan ve en iyi kuruma büzülmesi performansını gösteren numune, en az SA dozajına ve su/ç oranına sahip K4 numunesidir. Bütün numuneler kabul edilen sınır şartlarını sağlamıştır.

Şekil 4.14’de kontrol numunesi 7., 14., 21., 28. ve 56. gün YYM ile çizdirilmiş kuruma büzülmesi yanıt yüzey grafikleri gösterilmiştir.



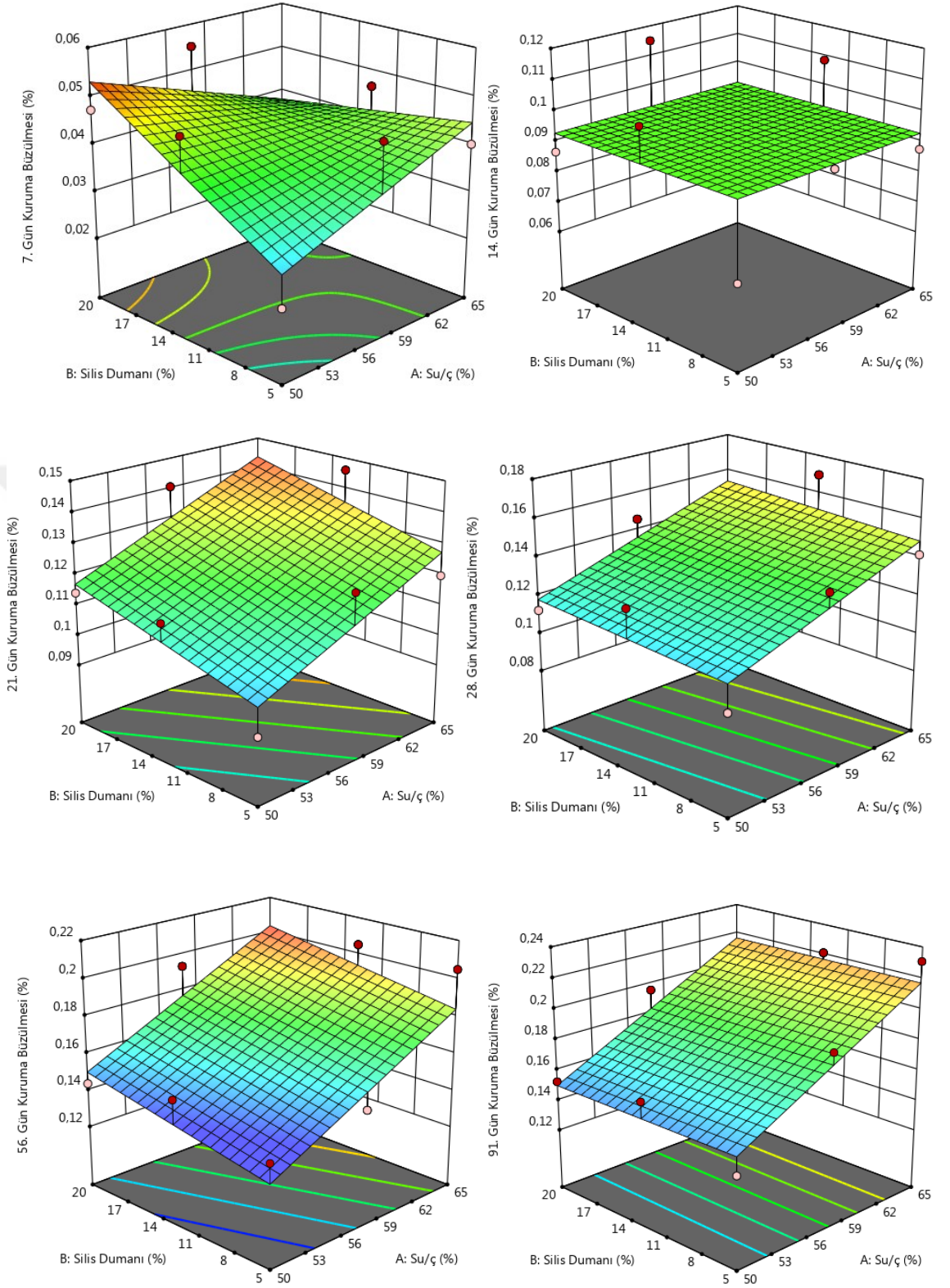
Şekil 4.14. Kontrol numunesi 7., 14., 21., 28. ve 56. gün kuruma büzülmesi yanıt yüzey grafikleri

Çizelge 4.17’de silis dumanı içeren harçların kuruma büzülmesi deney sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 4.17. Silis dumanı içeren harçların kuruma büzülmesi deney sonuçları (%)



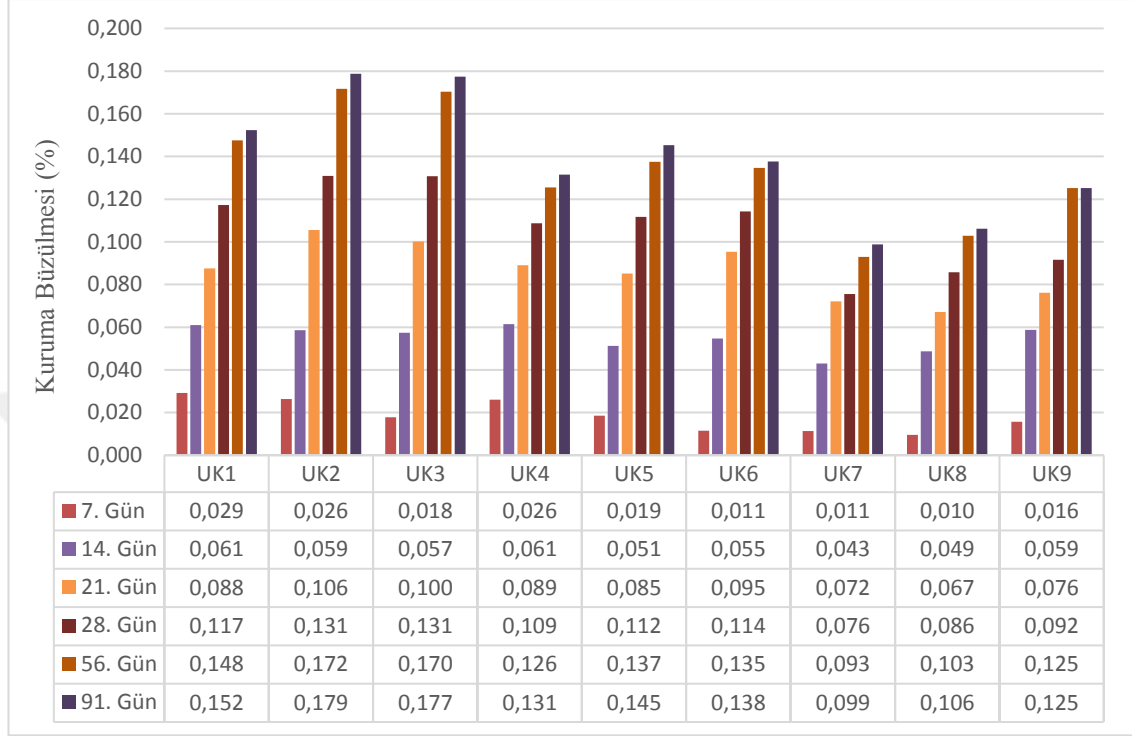
Bütün numuneler kabul edilen sınır şartlarını sağlamıştır. SD içeren harçlarının kontrol numunelerine göre su/ç oranları yüksek olsa da kuruma büzülmesi performansının daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.15’de silis dumanı içeren harçların kuruma büzülmesi yanıt yüzey grafikleri gösterilmiştir.



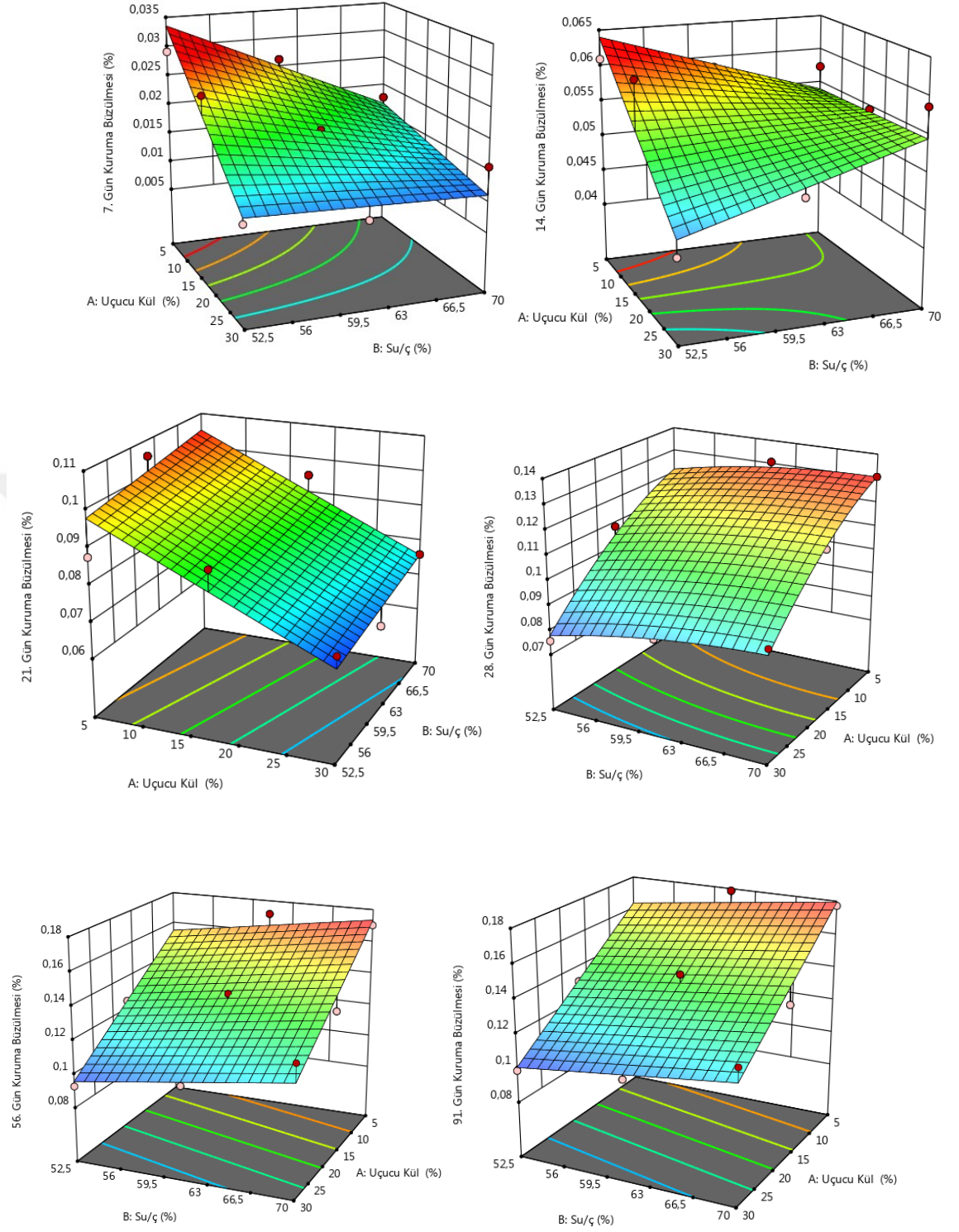
Şekil 4.15. Silis dumanı içeren harçların 7., 14., 21., 28., 56. ve 91. gün kuruma büzülmesi yanıt yüzey grafikleri

Çizelge 4.18’de uçucu kül içeren harçların kuruma büzülmesi deney sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 4.18. Uçucu kül içeren harçların kuruma büzülmesi deney sonuçları (%)



Sonuçlara baktığımız zaman, aynı su/ç oranlarında UK miktarı arttıkça büzülme miktarı azalmıştır. Ayrıca UK numuneleri, daha fazla su/ç oranına sahip olmasına rağmen kontrol numunesi ve silis dumanı içeren harçlara göre daha az büzülmüştür. Şekil 4.16’da uçucu kül içeren harçların kuruma büzülmesi yanıt yüzey grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Uçucu kül içeren harçların 7., 14., 21., 28., 56. ve 91. gün kuruma büzülmesi yanıt yüzey grafikleri

4.3.5. Terleme

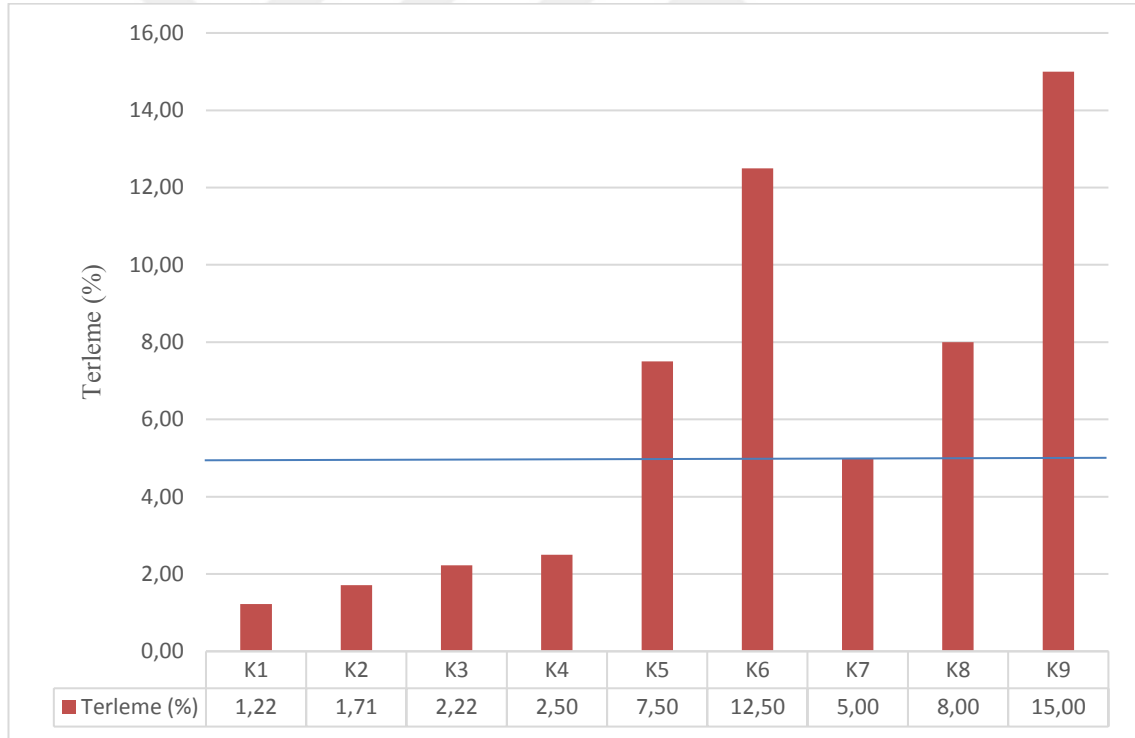
Çizelge 4.19’da farklı çalışmalardan terleme deneyi verileri vardır. Bu bağlamda çalışmada terleme deneyi sınır değeri 120 dak için maksimum %5 olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.19. Farklı çalışmalardan terleme deneyi verileri

Yazarlar	Deney Süresi	Sonuç
Mubarek 2017	120 Dak	$\leq \%5$
Gond vd. 2022	24 Saat	%1
Tan vd. 2005	120 Dak	$\leq \%5$

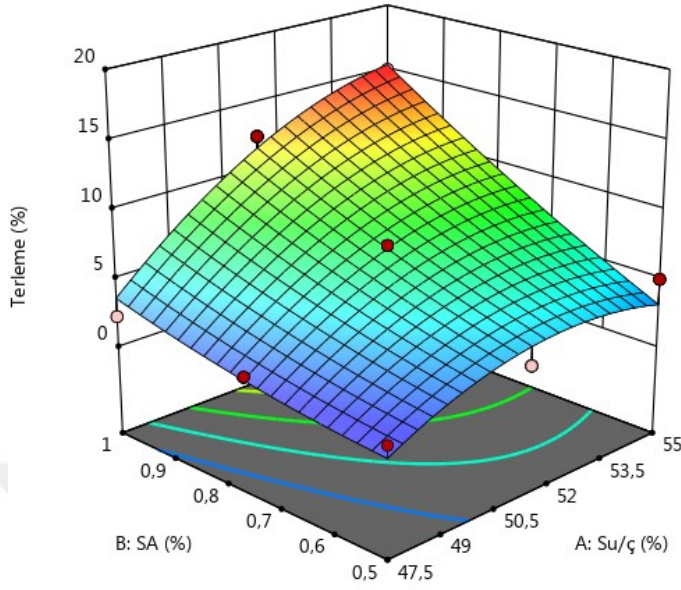
Çizelge 4.20’de kontrol numunesi terleme deneyi sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 4.20. Kontrol numunesi terleme deneyi sonuçları (%)



Sonuçlara baktığımız zaman aynı su/ç oranında SA dozajı arttığı zaman terleme miktarındaki artış miktarı aynı SA dozajında su/ç oranı arttıkça gerçekleşen artıştan daha fazladır. En akışkan yani en çok su/ç oranına ve SA dozajına sahip harç, en yüksek terleme miktarına ulaşmıştır. Deneyler sırasında terleme miktarı ile segregasyon arasında

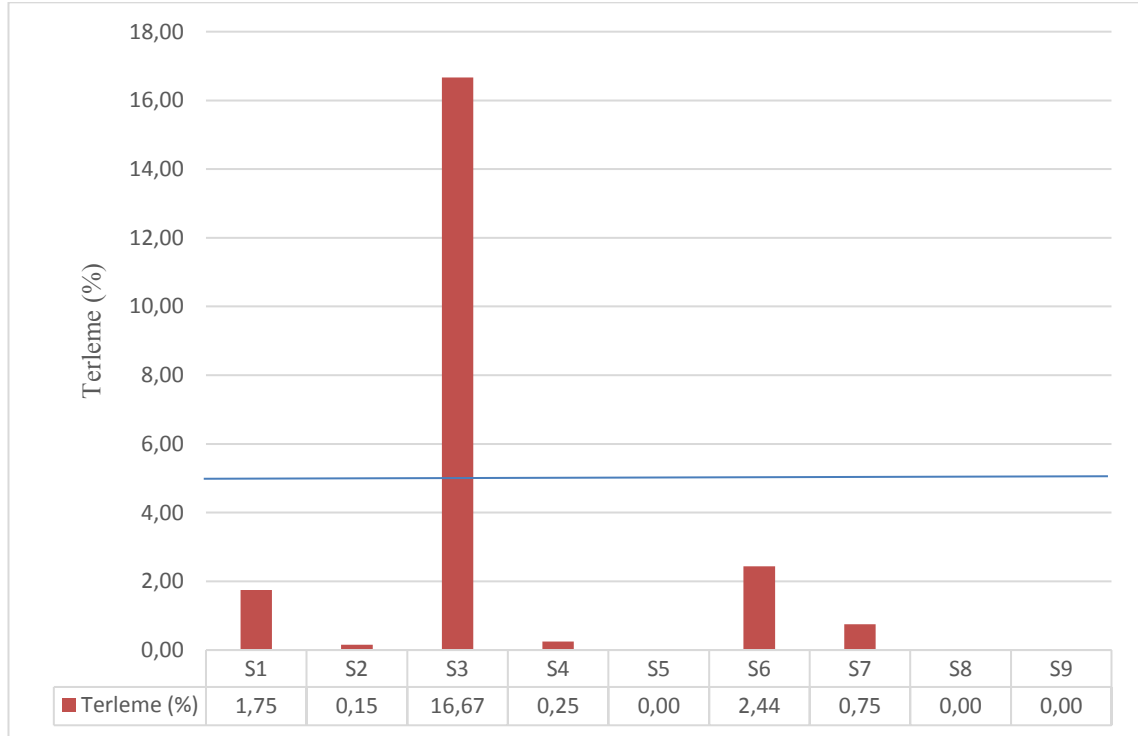
doğrusal bir bağlantı olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.17’de kontrol numunesi terleme miktarı yanıt yüzey grafiği gösterilmiştir.



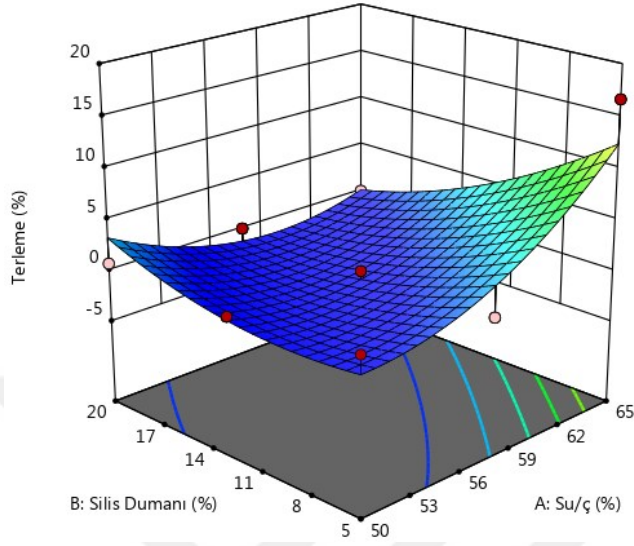
Şekil 4.17. Kontrol numunesi terleme miktarı yanıt yüzey grafiği

Çizelge 4.21’de silis dumanı içeren harçların terleme miktarı belirtilmiştir.

Çizelge 4.21. Silis dumanı içeren harçların terleme miktarı (%)



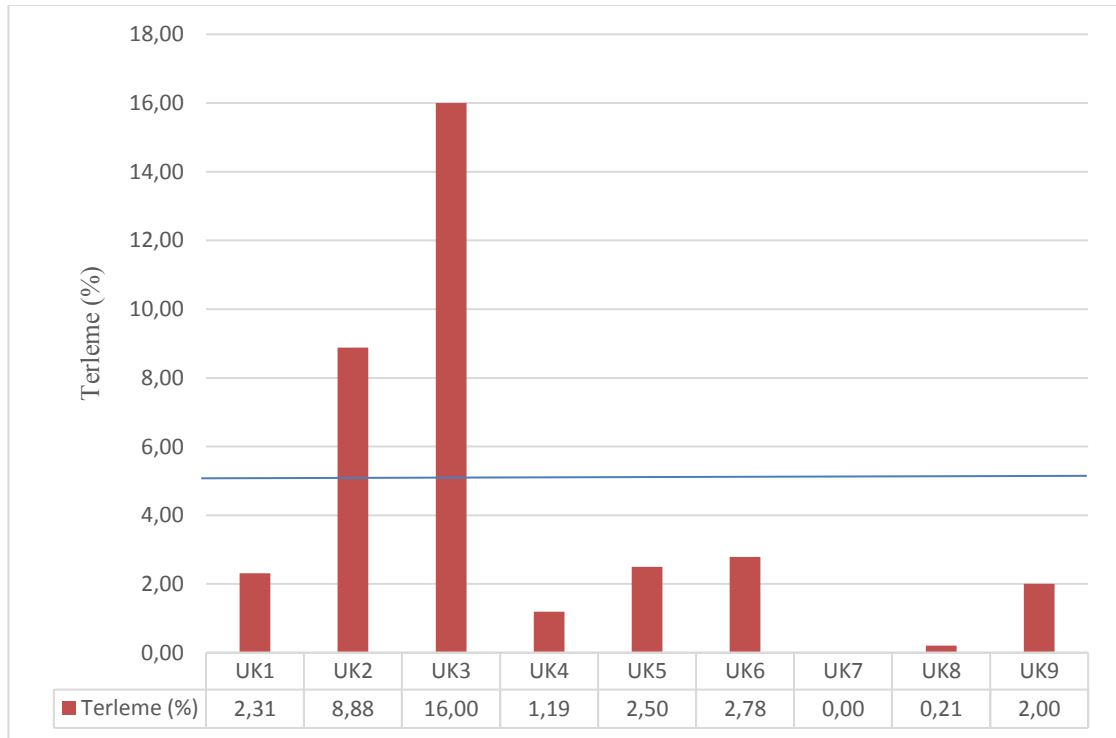
Elde edilen sonuçlara baktığımız zaman silis dumanı miktarı arttıkça terleme miktarı azalmıştır. Kontrol numunesinden daha çok su/ç oranına sahip olmasına rağmen SD harçlarında terleme miktarı düşüktür. Şekil 4.18’de silis dumanı içeren harçların terleme miktarı yanıt yüzey grafiği gösterilmiştir.



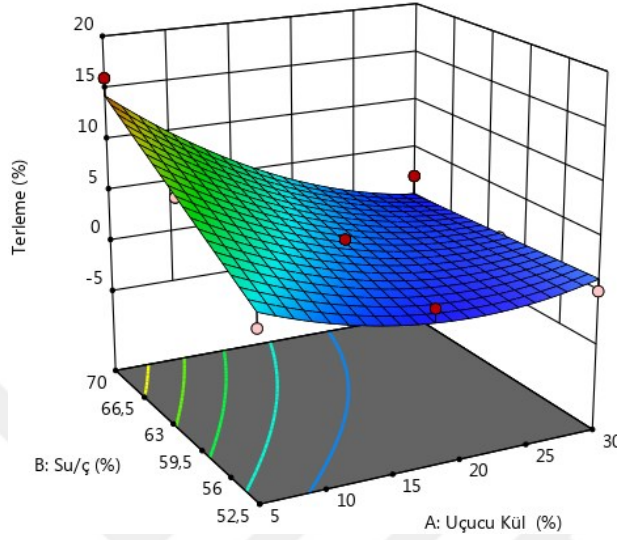
Şekil 4.18. Silis dumanı içeren harçların terleme miktarı yanıt yüzey grafiği

Çizelge 4.22’de uçucu kül içeren harçların terleme miktarı belirtilmiştir.

Çizelge 4.22. Uçucu kül içeren harçların terleme miktarı (%)



Kontrol numuneleriyle karşılaştırdığımız zaman UK numuneleri daha fazla su/ç oranına sahip olmasına rağmen terleme miktarları daha azdır. Ancak SD numunelerine göre UK numuneleri daha fazla terleme miktarlarına ulaşmıştır. Ayrıca aynı UK miktarlarında su/ç oranı arttıkça terleme miktarı da artmıştır. Şekil 4.19’da uçucu kül içeren harçların terleme miktarı yanıt yüzey grafiği gösterilmiştir.

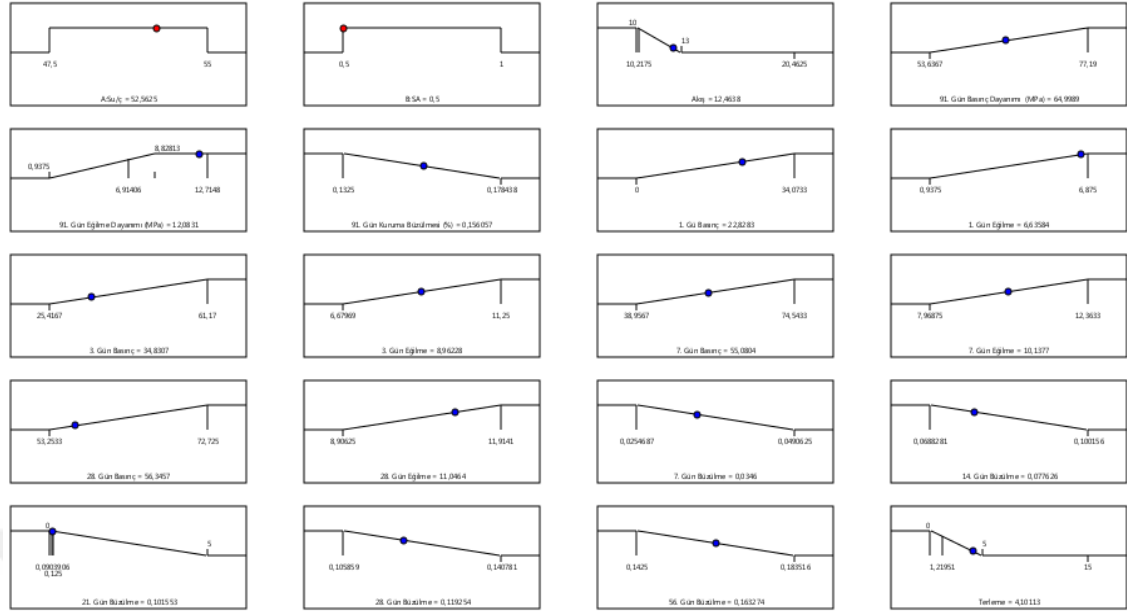


Şekil 4.19. Uçucu kül içeren harçların terleme miktarı yanıt yüzey grafiği

4.4. YYM ile Optimum Karışım Oranlarının Belirlenmesi

4.4.1. Kontrol numunesi

Kontrol numunesinin YYM ile analizi sonucu optimum karışım oranları ve bu karışım oranlarının diğer teorik verileri Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Bu bağlamda, %0,5 SA ve %52,5 su/ç oranı optimum karışım oranları olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.20. Kontrol numunelerinin YYM ile analizi sonucu belirlenen optimum karışım oranları ve diğer teorik verileri

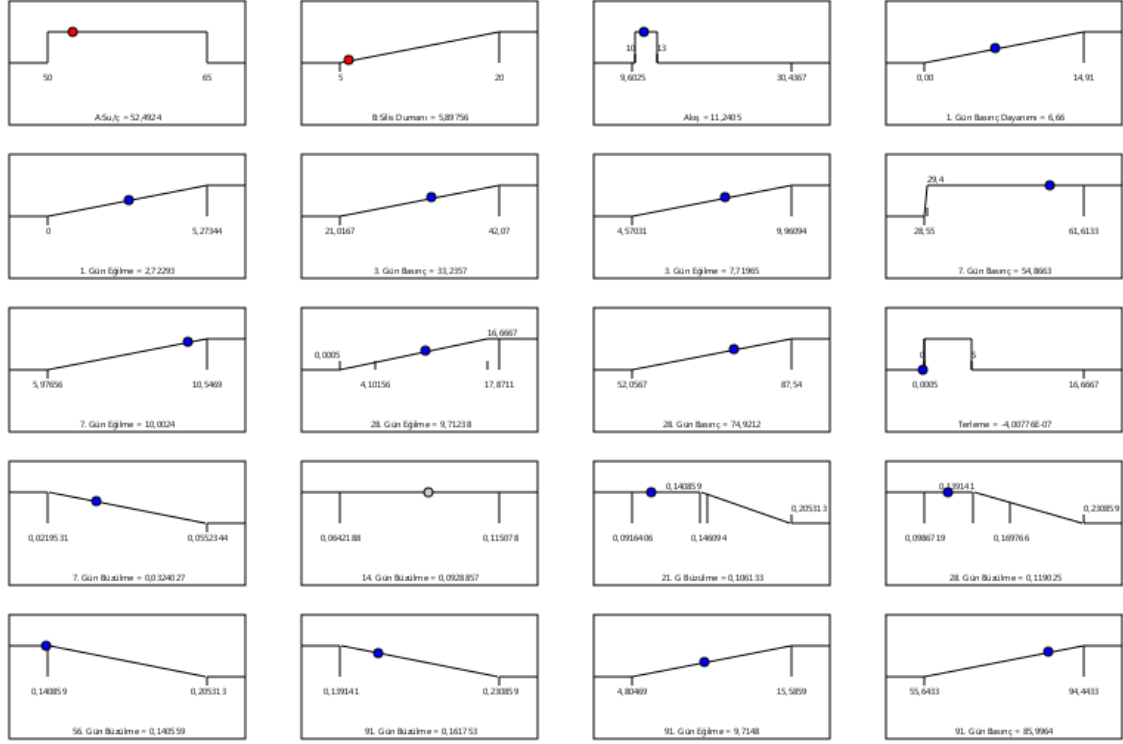
Çizelge 4.23’de optimum kontrol numunesi harcının deneysel ve teorik karşılaştırması gösterilmiştir. Sonuçlara baktığımız zaman deneysel basınç ve eğilme dayanımı deney sonuçlarının teorik sonuçlardan daha yüksek, deneysel kuruma büzülmesi, akışkanlık süresi ve terleme miktarı deney sonuçlarının teorik sonuçlardan daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.23. Optimum kontrol numunesi harcının deneysel ve teorik karşılaştırması

	Basınç Dayanımı (Mpa)					Akışkanlık (San)
	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	91. Gün	
Teorik	22,83	34,83	55,1	56,4	64,9	12,46
Deneysel	26,53	50,35	68,8	75,4	81,4	11,66
	Eğilme Dayanımı (Mpa)					Terleme (%)
	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	91. Gün	
Teorik	6,6	9	10,1	11,1	12,1	4,1
Deneysel	4,8	8,9	9,14	10,4	11,8	3
	Kuruma Büzülmesi (%)					91. Gün
	7. Gün	14. Gün	21. Gün	28. Gün	56. Gün	
Teorik	0,04	0,08	0,1	0,12	0,16	0,16
Deneysel	0,03	0,08	0,09	0,11	0,15	0,16

4.4.2. Silis dumanı içeren harç

SD numunelerinin YYM ile analizi sonucu optimum karışım oranları ve bu karışım oranlarının diğer teorik verileri Şekil 4.21’de gösterilmiştir. Bu bağlamda, %52,5 su/ç oranı ve %5,9 silis dumanı optimum karışım oranları olarak belirlenmiştir. Elde edilen teorik karışım oranları ile hazırlanan harcın deneysel ve teorik karşılaştırması Çizelge 4.23’de gösterilmiştir.



Şekil 4.21. SD numunelerinin YYM ile analizi sonucu belirlenen optimum karışım oranları ve diğer teorik verileri

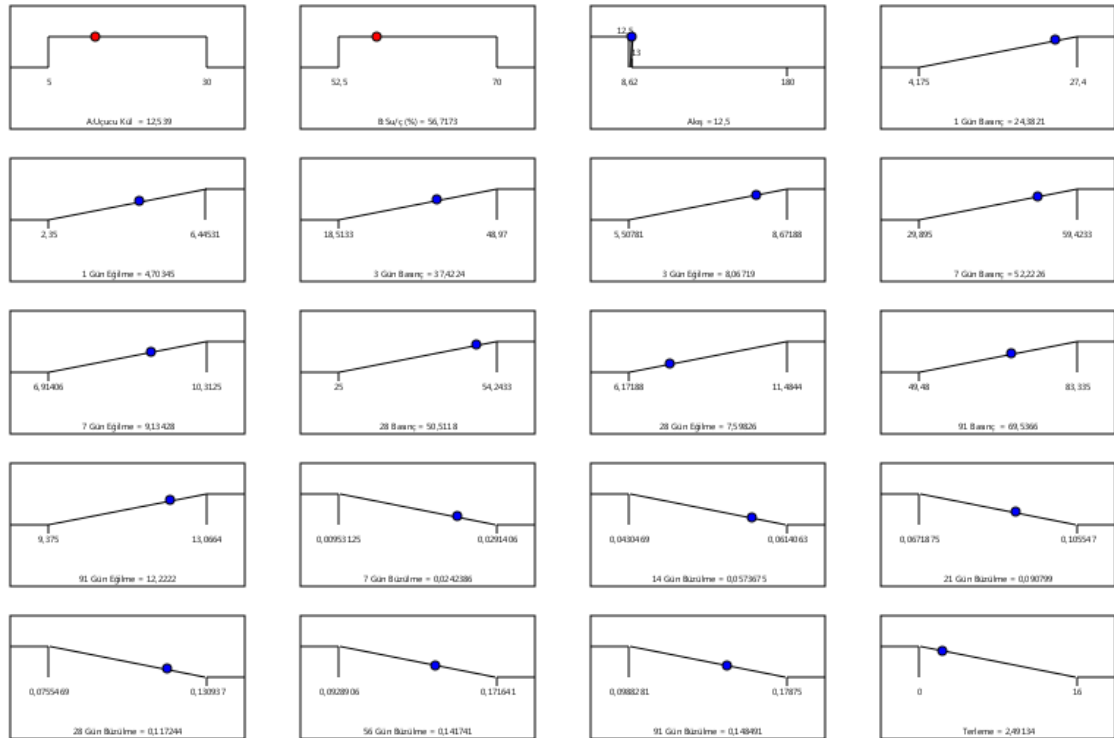
Çizelge 4.24’de optimum S numunesi harcının deneysel ve teorik karşılaştırması gösterilmiştir. Sonuçlara baktığımız zaman deneysel ve teorik sonuçların bir-birlerine çok yakın değerler olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.24. Optimum silis dumanı harcının deneysel ve teorik karşılaştırması

	Basınç Dayanımı (Mpa)					Akışkanlık (San)
	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	91. Gün	
Teorik	6,7	33,2	54,9	74,9	86	11,24
Deneysel	4	36	53,6	73,3	80,3	10,4
	Eğilme Dayanımı (Mpa)					Terleme (%)
	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	91. Gün	
Teorik	2,7	7,7	10	9,7	9,7	0
Deneysel	2,1	7,1	9,14	11,2	7,3	1
	Kuruma Büzülmesi (%)					
	7. Gün	14. Gün	21. Gün	28. Gün	56. Gün	91. Gün
Teorik	0,03	0,09	0,11	0,12	0,14	0,16
Deneysel	0,03	0,07	0,08	0,09	0,11	0,14

4.4.3. Uçucu kül

UK numunelerinin YYM ile analizi sonucu optimum karışım oranları ve bu karışım oranlarının diğer teorik verileri Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Bu bağlamda, %56,7 su/ç oranı ve %12,5 uçucu kül optimum karışım oranları olarak belirlenmiştir.

**Şekil 4.22.** UK numunelerinin YYM ile analizi sonucu belirlenen optimum karışım oranları ve diğer teorik verileri

Çizelge 4.25’de optimum UK numunesi harcının deneysel ve teorik karşılaştırması gösterilmiştir. Sonuçlara baktığımız zaman deneysel ve teorik sonuçların bir-birlerine çok yakın değerler olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.25. Optimum uçucu kül harcının deneysel ve teorik karşılaştırması

	Basınç Dayanımı (Mpa)					Akışkanlık (San)
	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	91. Gün	
Teorik	24,3	37,3	52	50,4	69,4	12
Deneysel	21,63	41,46	58,6	61,3	77,3	11,62
	Eğilme Dayanımı (Mpa)					Terleme (%)
	1. Gün	3. Gün	7. Gün	28. Gün	91. Gün	
Teorik	4,7	8,1	9,1	7,6	12,2	2,56
Deneysel	3,4	8,2	9,14	11,2	12,6	2
	Kuruma Büzülmesi (%)					
	7. Gün	14. Gün	21. Gün	28. Gün	56. Gün	91. Gün
Teorik	0,02	0,06	0,09	0,12	0,14	0,15
Deneysel	0,005	0,01	0,04	0,09	0,12	0,15

4.5. Yarı Rijit Kaplamaya Uygulanan Deneyler

Çalışmada harcın boşluklu asfalta yerleştirilmesinden 24 saat sonra henüz priz almadığı için YRK-S karot numuneleri alınamamıştır. Bu nedenler 1. gün performans deneylerine sonuçları bulunmamaktadır.

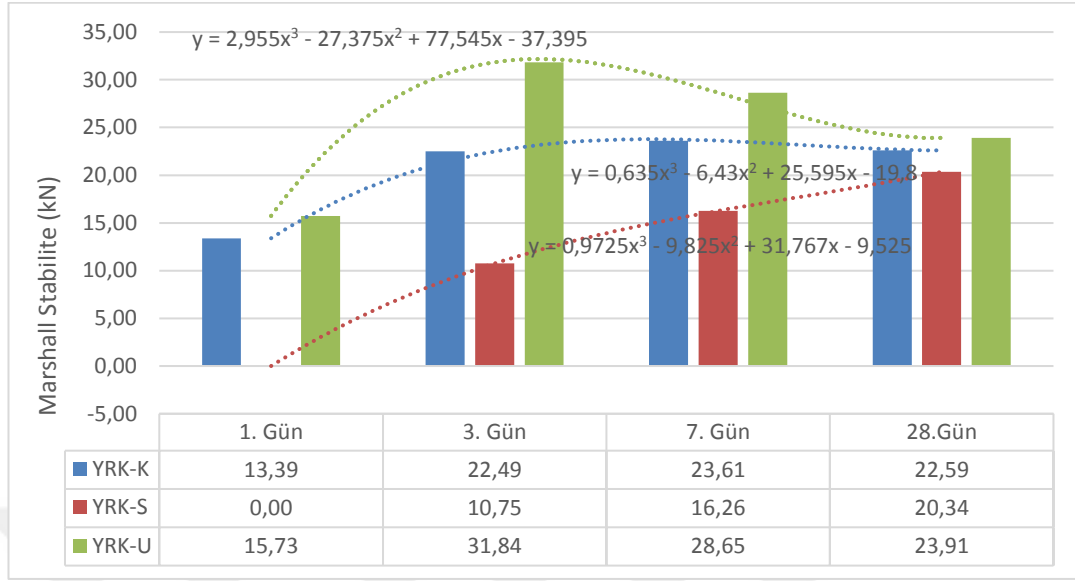
4.5.1. Marshall Stabilité

Çizelge 4.26’da literatürde bulunan farklı çalışmalardan Marshall Stabilité deneyi sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 4.26. Literatürde bulunan farklı Marshal Stabilité deneyi sonuçları

Yazarlar	Marshal Stabilité Sonuçları (kN)
Zhang vd. 2019	20
An vd. 2018	12,64
Anderton 2000	19
Momtaz vd. 2020	44
Hassan vd. 2002	10
Gamal vd. 2020	27,2

Marshall Stabilité deneyi stabilite sonuçları Çizelge 4.27’de, akma değerleri ise Çizelge 4.28’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.27. Marshall stabilite deney sonuçları**Çizelge 4.28.** Marshall stabilite deneyi akma değerleri

Çizelge 4.27 incelendiğinde YRK-U numunesinin, YRK-K'dan daha yüksek stabilite değerlerine ulaştığı ancak YRK-S numunesinin diğer 2 numuneden daha düşük performans sergilediği görülmektedir. Silis dumanı erken prizi geciktirdiği için stabilite değerleri daha düşüktür. Akma değerlerine bakıldığında, YRK-U kontrol numunesinden daha esnekdir.

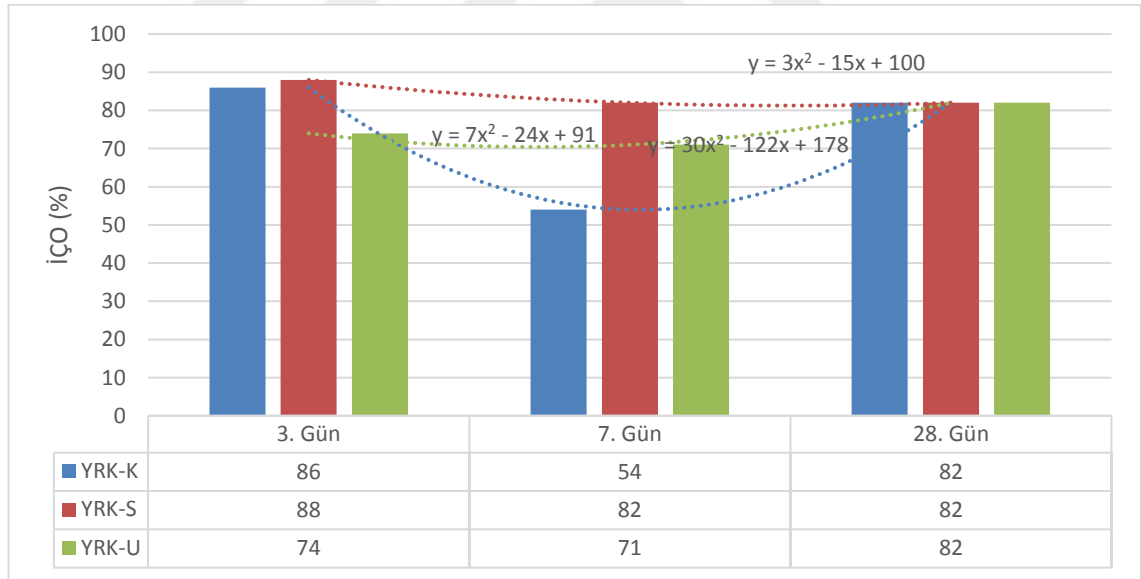
4.5.2. Nem hasarına karşı direnç

Nem hasarına karşı direnç deneyi sonuçları Çizelge 4.29’da İÇO grafiği ise Çizelge 4.30’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.29 Nem hasarına karşı direnç deneyi sonuçları

Numune Yaşı		YRK-K	YRK-S	YRK-U
3. Gün	Koşullu (kPa)	560	860	560
	Koşulsuz (kPa)	650	980	760
	İÇO	0,86	0,88	0,74
7. Gün	Koşullu (kPa)	540	830	560
	Koşulsuz (kPa)	1000	1010	790
	İÇO	0,54	0,82	0,71
28. Gün	Koşullu (kPa)	790	740	850
	Koşulsuz (kPa)	960	900	1040
	İÇO	0,82	0,82	0,82

Çizelge 4.30. İndirekt-çekme oranları (%)



Çizelge 4.27 incelendiğinde, 3. ve 7. gün en yüksek İÇO değerine YRK-S numunesinde ulaşılmış, 28. gün ise bütün numunelerin İÇO değerleri %82 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, İÇO açısından en iyi performans silis dumanı katkılı kaplama dizaynında elde edildiği görülmüştür. Yani silis dumanının kaplamanın nem hasarına karşı duyarlılığını olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir.

4.5.3. Basınç dayanımı

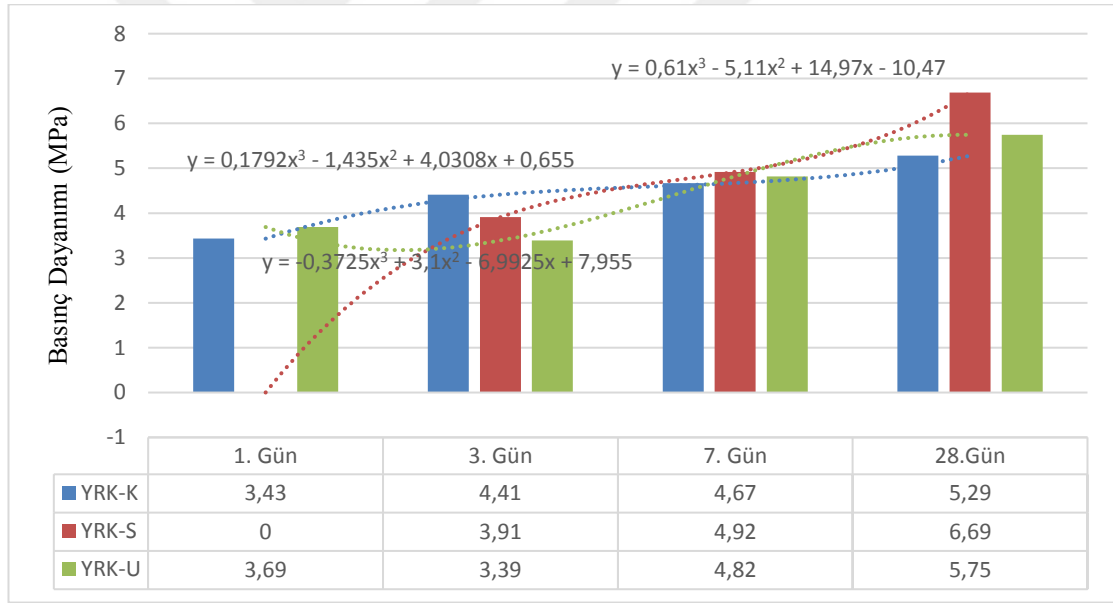
Çizelge 4.31’de literatürde bulunan YRK’ye uygulanmış farklı basınç dayanımı verileri gösterilmiştir.

Çizelge 4.31. Literatürde bulunan YRK’ye uygulanmış farklı basınç dayanımı verileri

Yazarlar	Basınç Dayanımı Sonuçları (Mpa)
Anderton 2000	5,5
Zoorob vd. 2002	10-15
Hassan vd. 2002	13,8
Zhang ve Wu 2020	10-14
Koting vd. 2011	6,4

Çizelge 4.32’de basınç dayanımı deney sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 4.32. Basınç dayanımı deney sonuçları

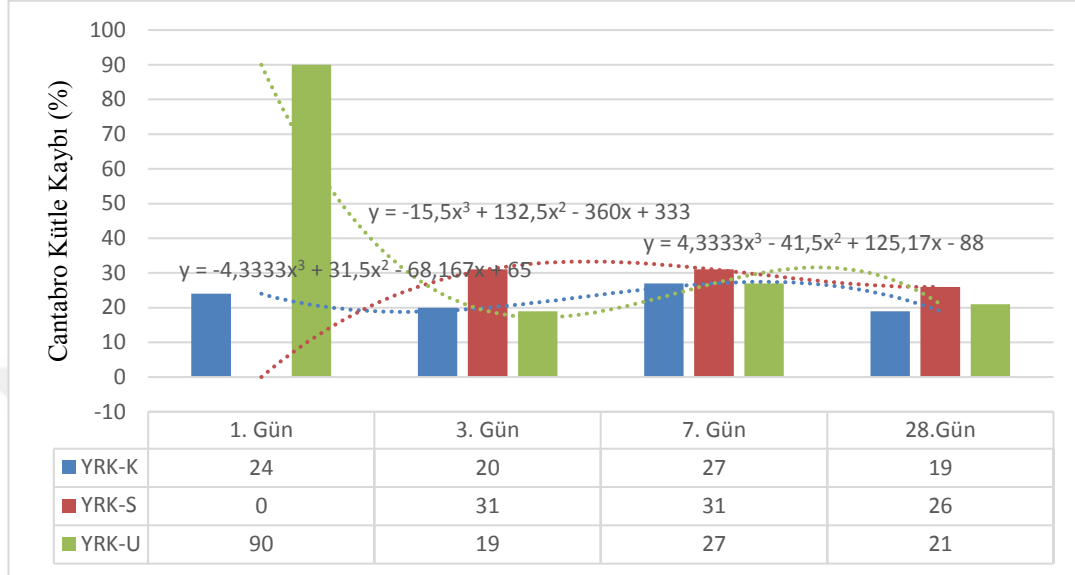


Çizelge 4.32 incelendiğinde, 1. gün YRK-U, 3. gün YRK-K, 7. ve 28. gün ise YRK-S numunelerinin en yüksek basınç dayanımına ulaştığı görülmektedir. Silis dumanı içeren kaplama 1. gün henüz priz almamış olsa da 7. günden itibaren diğer kaplama tiplerinden daha yüksek basınç dayanımına ulaşmıştır. Uçucu kül içeren kaplamada erken prizın daha yavaş olması nedeniyle, 1. ve 3. günlerde kontrol numunesinden daha düşük basınç dayanımı elde edilmiştir. Ancak 7. günden itibaren daha yüksek basınç dayanımına ulaşılmıştır.

4.5.4. Cantabro

Çizelge 4.33’de Cantabro deney sonuçları gösterilmiştir.

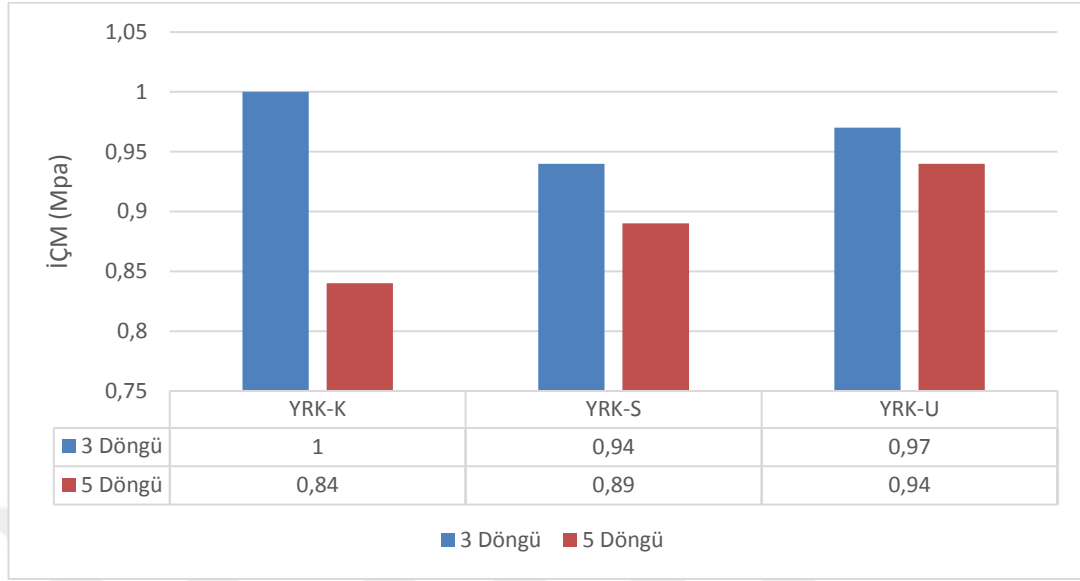
Çizelge 4.33. Cantabro deney sonuçları



Çizelge 4.33 incelendiği zaman, en düşük Cantabro kaybına 1. ve 28. gün YRK-K, 3. gün YRK-U’da ulaşılmıştır. 7. gün ise her iki numunede de %27 oranında parça kaybı oluşmuştur. YRK-K ve YRK-U numunelerinin 3. gün sonuçlarının daha düşük olmasının nedeni 3. günden sonra kürlenmenin olmamasıdır. Tez çalışmasında bölüm 3.2.6’da açıklandığı gibi kürlenme süresi saha koşullarını modellemek amacıyla 3 gün ile sınırlandırılmıştır. Shehata ve Thomas (2000) çalışmalarında yüksek su/ç oranlarında uçucu kül içeren harçlarda genleşme gözlemlendiği bildirmişlerdir. Tez çalışmasında da 3. günden itibaren kürlenme yapılmadığı için harcın poröz asfalt içerisinde genleşerek kılcal çatlaklara neden olduğu düşünülmektedir.

4.5.4. Donma-çözünme deneyi

Çizelge 4.34’de donma-çözünme deneyi İÇM sonuçları gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde YRK-K için döngü sonunda %16, YRK-S için %5 ve YRK-U için ise %3 dayanım kaybı gözlemlenmiştir. Bu da uçucu külün ve silis dumanının kaplamanın soğuk hava tesirlerine karşı direncini önemli miktarda geliştirdiğini göstermektedir.

Çizelge 4.34. Donma-çözünme deneyi İÇM sonuçları

4.5.5. Permeabilite deneyi

Çizelge 4.35’de yatay ve düşey permeabilite değerleri gösterilmiştir. Sonuçlara baktığımız zaman, bütün numunelerde geçirgenlik miktarı çok düşüktür. Yani donma-çözünme döngüsü sonucunda harç ve kaplama arasında boşluk oluşmadığı görülmüştür. Saha uygulamalarında döngü sonucu boşluk oluşmaması yüzeysel suların alt tabakalara gitmemsi açısından olumlu bir durumdur.

Çizelge 4.35. Yatay ve düşey permeabilite değerleri

No	Yatay Permeabilite (m/san)	Düşey Permeabilite (m/san)
YRK-K	$0,000624 \times 10^{-3}$	$0,00000221 \times 10^{-3}$
YRK-S	$0,000568 \times 10^{-3}$	$0,00000189 \times 10^{-3}$
YRK-U	$0,000607 \times 10^{-3}$	$0,00000209 \times 10^{-3}$

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında YRK dolgu harcının silis dumanı ve uçucu kül ile optimum karışım oranları araştırılmıştır. Bu çalışmada harçların basınç ve eğilme dayanımları, kuruma büzülmesi, akışkanlık ve terleme performanslarına bakılmıştır. Performans deneyleri sonuçlarına göre YYM ile optimum karışım oranları hesaplanmıştır. Ayrıca SA, silis dumanı ve uçucu külün YRK harcına etkileri de araştırılmıştır.

- Kontrol numunesi optimum karışım oranları %0,5 SA ve %52,53 su/ç oranı olarak belirlenmiştir.
- Silis dumanı içeren harçların optimum karışım oranları %52,5 su/ç oranı ve %5,9 SD olarak belirlenmiştir.
- Uçucu kül içeren harçların optimum karışım oranları %56,7 su/ç oranı ve %12,5 UK olarak belirlenmiştir.
- SA dozajı ve su/ç oranları arttıkça harçların akışkanlığı artsa da hem basınç hem de eğilme dayanımları azalmıştır.
- Harçların akışkanlığı azaldıkça basınç ve eğilme dayanımları artmıştır.
- SA dozajı ve su/ç oranları arttıkça segregasyon da artmaktadır. Ayrıca harçların terleme miktarı ile segregasyon arasında doğrusal bir bağlantı olduğu gözlemlenmiştir.
- Silis dumanı, harcın akışkanlığını, segregasyonunu, erken dayanımını, terlemeyi ve kuruma büzülmesini azaltmıştır.
- SD numunelerinin eğilme dayanımları kontrol numunelerine göre azalsa da basınç dayanımları artmıştır. Yani silis dumanı, harcı rijitleştirmiştir.
- Erken dayanımı azalsa da kontrol numunesine kıyasla silis dumanı içeren harçların ileri yaş dayanımları artmıştır.
- Uçucu kül, harcın akışkanlığını silis dumanına kıyasla daha fazla azaltmıştır.
- Uçucu kül içeren harçların basınç dayanımları, terleme miktarları, kuruma büzülmeleri ve eğilme dayanımları da azalmıştır.
- Uçucu kül kuruma büzülmesi performansını silis dumanından daha fazla etkilmiştir.
- Yanıt Yüzey Metodu çok faktörlü optimum karışım oranlarını belirlemede etkili olmuştur.

- Uçucu kül, YRK'nin Marshall stabilite sonuçlarını iyileştirmiştir. Kaplamayı daha da esnek hale getirmiştir
- Silis dumanı, nem hasarına karşı duyarlılığı azaltmıştır.
- Yedinci günden itibaren uçucu kül ve silis dumanı basınç dayanımını olumlu yönde etkilemiştir.
- Uçucu kül ve silis dumanı kaplamanın soğuk hava tesirlerine karşı direncini geliştirmiştir.

Bütün elde edilen sonuçlara dayalı olarak, ileri yaş dayanımını ve soğuk hava tesirlerine karşı direncini artırdığı ve nem hasarına karşı duyarlılığı azalttığı için optimum silis dumanı oranı %5,9 olarak belirlenmiştir. Diğer bir taraftan kaplamanın ileri yaş dayanımını, soğuk hava tesirlerine karşı direncini ve aynı zamanda stabilite performansını artırdığı için optimum uçucu kül oranı %12,5 olarak belirlenmiştir. Bu önerilen oranlarda uçucu kül ya da silis dumanının YRK dolgu harcında çimentoya ikameli olarak ayrı ayrı kullanılmasının kaplamanın performansını artıracığı deneysel çalışmalar sonucu belirlenmiştir.

Tez çalışmasında Silis Dumanı ve Uçucu Kül ayrı ayrı YRK dolgu harcında çimentoya ikameli olarak kullanılmıştır. Gelecekteki çalışmalarda ise erken prizi geciktirdiği için bu puzolanların priz hızlandırıcı ile birlikte, her ikisinin bir arada kullanılarak deneysel çalışmalar yapılması önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- AASHTO T 283, Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage.
- AASHTO T96, Standard Method of Test for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.
- Ahmaruzzaman, M. 2010. A review on the utilization of fly ash. *Progress in energy and combustion science*, 36(3): 327-363.
- Al-Qadi, I. L. Gouri, H. and Weyers, R. E. 1994. Asphalt Portland cement concrete composite: laboratory evaluation. *Journal of transportation engineering*, 120(1): 94-108.
- An, S. Ai C. Ren, D. Rahman, A. and Qiu, Y. 2018. Laboratory and field evaluation of a novel cement grout asphalt composite. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(8): 04018179.
- Anderton, G. L. 2000. Engineering properties of resin modified pavement (RMP) for mechanistic design. Engineer Research and Development Center Vicksburg Ms Geotechnical Lab.
- Anderton, G. L. and Ahlrich, R. C. 1994. *Design, Construction and Performance of Resin Modified Pavement at Fort Campbell Army Airfield, Kentucky*. Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg Ms Geotechnical Lab.
- Anlar, C. Beton Ve Asfalt Yolların Tercih Kriterlerinin Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat, 70 s.
- ASTM 6927, Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures.
- ASTM C 940, Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory.
- ASTM C127, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate.
- ASTM C128, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate.
- ASTM C131 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine
- ASTM C39, 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 C939-10, Standard Test Method For Flow Of Grout For Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method).
- ASTM D 113, Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials.
- Aziz, M.M.A. Rahman, M.T. Hainin, M.R. Bakar, W.A.W. 2015. An overview on alternative binders for flexible pavement. *Construction and Building Materials*, 84: 315-319.
- Bowen, F. Tao, X. and Shuang, S. 2016. Laboratory Study on Cement Slurry Formulation and Its Strength Mechanism for Semi-Flexible Pavement. *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 44.
- BS 812, Methods for Determination of Particle Size and Shape.
- BS EN 196-1, Methods of testing cement Determination of strength.
- Cihackova, P. Hyzl, P. Stehlik, D. Dasek, O. Šernas, O. and Vaitkus, A. 2015. Performance characteristics of the open-graded asphalt concrete filled with a special cement grout. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 10(4): 316-324.
- Davoodi, A. Esfahani, M. A. Bayat, M. and Mohammadyan-Yasouj, S. E. 2021. Evaluation of performance parameters of cement mortar in semi-flexible pavement using rubber powder and nano silica additives. *Construction and Building Materials*, 302: 124166.
- Fang, Y. Wang, X. Jia, L. Liu, C. Zhao, Z. Chen, C. and Zhang, Y. 2022. Synergistic effect of polycarboxylate superplasticizer and silica fume on early properties of early high strength grouting material for semi-flexible pavement. *Construction and Building Materials*, 319.
- Gamal Othman, M. M. Hussein, Z. S. E. D. and Abu El-Maaty, A. I. 2020. Evaluation Of Semi-Flexible Pavement Performance. *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*, 15(54): 100-111.
- Gong, M. Xiong, Z. Deng, C. Peng, G. Jiang, L. and Hong, J. 2022. Investigation on the impacts of gradation type and compaction level on the pavement performance of semi-flexible pavement mixture. *Construction and Building Materials*, 324: 126562.
- Handbook for asphalt pavement 2019. Japon Road Association.
- Hassan, K. E. Setyawan, A. and Zoorob, S. E. 2002.. Effect of cementitious grouts on the properties of semi-flexible bituminous pavement. In *Proceedings of the 4th European Symposium on Performance of Bituminous and Hydraulic Materials in Pavement*, pp. 113-120.
- Hassani, A. Taghipoor, M. and Karimi, M. M. 2020. A state of the art of semi-flexible pavements: Introduction, design, and performance. *Construction and Building Materials*, 253: 119196.

- Hlail, S. H. Al-Busaltan, S. and Shaban, A. M. 2020. Sustainable Development of Highly Flowable Cementitious Grouts for Semi-flexible Pavement Mixture. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 928: No. 2.
- Hou, S. Xu, T. and Huang, K. 2016. Investigation into engineering properties and strength mechanism of grouted macadam composite materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 17(10): 878-886.
- Hu, S. Huang, S. Ding, Q. and Zhang, R. 2008. Study on the cementitious mortar for semi-flexible pavement. In *International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites*, pp. 1237-1246.
- Husain, N. M. Karim, M. R. Mahmud, H. B. and Koting, S. 2014. Effects of aggregate gradation on the physical properties of semiflexible pavement. *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2014.
- Karayolları Genel Müdürlüğü 2022. Yol Ağı Bilgileri. <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/YolAgi.aspx> [Son erişim tarihi: 18.03.2022].
- Khan, M. I. Sutanto, M. H. Napiyah, M. B. Zahid, M. and Usman, A. 2020. Optimization of Cementitious Grouts for Semi-Flexible Pavement Surfaces Using Response Surface Methodology. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* Vol. 498, No. 1, p. 012004.
- Koting, S. Karim, M. R. Mahmud, H. and Abdul Hamid, N. A. 2011. Development of cement-bitumen composites for semi-flexible pavement surfacing.
- Koting, S. Karim, M. R. Mahmud, H. Mashaan, N. S. Ibrahim, M. R. Katman, H. and Husain, N. M. 2014. Effects of using silica fume and polycarboxylate-type superplasticizer on physical properties of cementitious grout mixtures for semiflexible pavement surfacing. *The Scientific World Journal*, 2014.
- Lewis, R. C. 2018. Silica fume. In *Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials* pp. 99-121.
- Ling, S. Hu, M. Sun, D. Ni, H. and Xu, L. 2022. Mechanical properties of pouring semi-flexible pavement material and engineering estimation on contribution of each phase. *Construction and Building Materials*, 315: 125782.
- Moghaddam, T. B., Karim, M. R. and Abdelaziz, M. 2011. A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes. *Scientific Research and Essays*, 6(4): 670-682.
- Momtaz, M. O. Ahmed, E. El-Maaty, A. and Zeinab, S. H. 2020. Assessing and Improving the Performance of Grouted Macadam. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13 (2): 153.164.
- Mubarek, Z. 2017. Laboratory Study On The Mixture Design Of Grouted Macadam. PhD Thesis, Addis Ababa Institute Of Technology, Ethiopia, 107p.

- Oliveira, J. R. M. 2006. Grouted macadam : material characterisation for pavement design. PhD Thesis, University of Nottingham, 234 p.
- Ozonur, D. Kiliç, D. Akdur, H. T. K. ve Bayrak, H. 2019. Temel bileşenler analizi ve Yanıt Yüzey Yöntemi Kullanılarak Gıda Sektöründe Çoklu Yanıtların Optimizasyonu *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(2): 734-744.
- 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.
- Reddy, B. R. M. Gain, A. L. Kiranmayi, M. L. Kumar, M. N. Narayan, N. T. Prasanth, T. N. D., and Santhanam, M. 2005. Fabrication of Cement-Grouted Asphalt Concrete for Semi-Flexible Pavements. In *2nd National Conference on Advances in Materials and Mechanics of Concrete Structures, at IIT Madras, Chennai, India*.
- Saboo, N., Khalpada, V., Sahu, P. K., Radhakrishnan, R. and Gupta, A. 2019. Optimal proportioning of grout constituents using mathematical programming for semi flexible pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 12(3): 297-306.
- Setyawan, A. 2013. Assessing the compressive strength properties of semi-flexible pavements. *Procedia Engineering*, 54: 863-874.
- Shehata, M. H. and Thomas, M. D. 2000. The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 30(7), 1063-1072.
- Shuguang, H. Tao, X. and Kai, H. 2015. Investigation Into Engineering Properties and Strength Mechanism of Grouted Macadam Composite Materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 17: 878-886.
- Siti, S. A.V. Mohamed, R. K. Hilmi, M. Nor, F. I. 2009. Influence Of Superplasticiser On Properties Of Cementitious Grout Used In Semi-Flexible Pavement. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.7.
- Sun, Y. Cheng, Y. Ding, M. Yuan, X. and Wang, J. 2018. Research on properties of high-performance cement mortar for semiflexible pavement. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018.
- Sunil, S. Varuna, M. and Nagakumar, M. S. 2021. Performance evaluation of semi rigid pavement mix. *Materials Today: Proceedings*, 46: 4771-4775.
- Tan, O. Zaimoglu, A. S. Hınıslıoğlu, S. and Altun, S. 2005. Taguchi approach for optimization of the bleeding on cement-based grouts. *Tunnelling and underground space technology*, 20(2): 167-173.
- Toraldo, E. 2013. Comparative laboratory investigation into pavement materials for road tunnels. *Road materials and pavement design*, 14(2): 310-324.

- Tran, T. N. Nguyen, H. T. Nguyen, K. S. and Nguyen, N. T. 2017. Semi-flexible material: The sustainable alternative for the use of conventional road materials in heavy duty pavement. *Congrès International de Géotechnique–Ouvrages–Structures* pp. 552-559.
- TS EN 12607-2, Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar - Isı ve hava etkisi altında sertleşme direncinin tayini - Bölüm 2: TFOT yöntemi.
- TS EN 12697-11, Bitümlü karışımlar - Deney metotları - Sıcak karışımli asfalt için Bölüm 11: Agregalar ve bitüm arasındaki bağlanmanın tayini.
- TS EN 12697-17, Bitümlü karışımlar-Sıcak asfalt karışımlar-Deney yöntemleri-Bölüm 17: Gözenekli asfalt numunelerde tanecik kaybı
- TS EN 12697-19, Bitümlü karışımlar - Deney metotları - Sıcak karışımli asfalt için Bölüm 19:Numunenin geçirgenliği.
- TS EN 1367-2, Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler bölüm 2: Magnezyum sülfat deneyi.
- TS EN 1426, Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-İğne batma derinliği tayini.
- TS EN 1427, Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-Yumuşama noktası tayini-Halka ve bilye yöntemi.
- TS EN 1744-1, Agregaların kimyasal özellikleri için deneyler- Bölüm 1: Kimyasal analiz.
- TS EN 933-1, Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini- Eleme metodu
- TS EN 933-9, Agregaların geometrik özellikleri için deneyler- Bölüm 9: İnce tanelerin tayini- Metilen mavisi deneyi.
- TS EN ISO 2592, Petrol ürünleri-Parlama ve yanma noktası tayini-Cleveland açık kap metodu.
- Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı 2018. Ulaştırma Türlerine Göre Taşınan Yolcu ve Yük Miktarı. https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/ulastirma-turlerine-gore-tasinan-yolcu-ve-yuk-miktari-i-85789#_ednref1 [Son erişim tarihi: 18.03.2022].
- Wang, D. Liang, X. Li, D. Liang, H. and Yu, H. 2018. Study on mechanics-based cracking resistance of semiflexible pavement materials. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018.
- Wang, D., Liang, X., Jiang, C. and Pan, Y. 2018. Impact analysis of Carboxyl Latex on the performance of semi-flexible pavement using warm-mix technology. *Construction and Building Materials*, 179: 566-575.

- Wang, K. and Hong, J. 2018. Hybrid Concrete for Advancing Pavement Performance, No. IHRB Project TR-708B.
- Zhang, H. Liang, S. Ma, Y. and Fu, X. 2019. Study on the mechanical performance and application of the composite cement–asphalt mixture. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(1): 44-52.
- Zhang, Y. and Wu, D. Q. 2020. General applications of the semi-rigid pavement in South East Asia. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 13(3): 296-302.
- Zhang, Y. Wang, Y. Wu, Z. G. Lu, Y. M. Kang, A. H. and Xiao, P. 2021. Optimal design of geopolymer grouting material for semi-flexible pavement based on response surface methodology. *Construction and Building Materials*, 306: 124779.
- Zoorob, S. E. Hassan, K. E. and Setyawan, A. 2002. Cold mix cold laid semi-flexible grouted macadams, mix design and properties. *Performance of Bituminous and Hydraulic Materials in Pavements* pp. 105-112.

ÖZGEÇMİŞ

Elmaddin MAHMUDLU

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2020-2022	Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2014-2019	Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya