

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**BAĞLAYICI VE AGREGA OLARAK KULLANILAN ENDÜSTRİYEL
ATIKLARIN GEOPOLİMER HARÇLARIN ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ**

Nihan GÜLMEZ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

HAZİRAN 2018

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**BAĞLAYICI VE AGREGA OLARAK KULLANILAN ENDÜSTRİYEL
ATIKLARIN GEOPOLİMER HARÇLARIN ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ**

Nihan GÜLMEZ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

HAZİRAN 2018

ANTALYA

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

**BAĞLAYICI VE AGREGA OLARAK KULLANILAN ENDÜSTRİYEL
ATIKLARIN GEOPOLİMER HARÇLARIN ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE
ETKİSİ**

**Nihan GÜLMEZ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

**(Bu tez Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FDK-2016-1990 nolu
proje ile desteklenmiştir.)**

HAZİRAN 2018

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BAĞLAYICI VE AGREGA OLARAK KULLANILAN ENDÜSTRİYEL
ATIKLARIN GEOPOLİMER HARÇLARIN ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Nihan GÜLMEZ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

Bu tez 06/06/2018 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL (Danışman)

Doç. Dr. Hasan Erdem ÇAMURLU

Doç. Dr. Turhan BİLİR

Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN

Dr. Öğr. Üyesi Osman KAYA



ÖZET

BAĞLAYICI VE AGREGA OLARAK KULLANILAN ENDÜSTRİYEL ATIKLARIN GEOPOLİMER HARÇLARIN ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Nihan GÜLMEZ

Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Haziran 2018, 172 sayfa

Bu tez, Portland çimentosunun yerini alarak CO₂ emisyonunu azaltmakla kalmayıp aynı zamanda yeşil ve sürdürülebilir bir yapı malzemesi üretmek için endüstriyel atıkların yeniden kullanılmasına olanak sağlayan geopolimer malzemelerin özelliklerini sunmaktadır.

Araştırmada yüksek fırın curufu, silis dumanı ve alkali aktivatör (sodyum silikat ve sodyum hidroksit), geopolimerin temel bileşenleri olarak kullanılmıştır. Farklı karışım tasarımları kullanılarak 300'den fazla numune hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde kür koşulları, bağlayıcı tipi ve atık metal içerikleri gibi faktörlerin etkisini incelemek amacıyla fiziksel, mekanik ve durabilite özellikleri tayin edecek bir seri deneyler gerçekleştirilmiştir. Bulgular ışığında, atık özelliklerinin, harçların özelliklerine ne mertebede katkıda bulunduğu saptanmış ve mikroyapı incelemelerinin de katkısıyla sebepleri araştırılmıştır.

Son yıllardaki araştırmalar, çevresel radyasyon ve özellikle elektronik aygıtların, kablosuz teknolojilerin yaygın kullanımından dolayı çimentolu malzemeler tarafından sağlanan elektromanyetik kalkanlamayı geliştirmeye odaklanmıştır. Literatüre bakıldığında eksikliği bariz olan, elektromanyetik kalkanlama özellikleri henüz araştırılmamış olan atık malzemelerle geopolimer harç üretimi sağlanmıştır. Ek olarak, üretilmiş olan bütün geopolimer harç numuneleri, bir takım performans kısıtlamalarına tabi tutularak optimize edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Alkali aktivatör, Elektromanyetik kalkanlama, Endüstriyel atık malzemeler, Optimizasyon

JÜRİ: Doç. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Doç. Dr. Hasan Erdem ÇAMURLU

Doç. Dr. Turhan BİLİR

Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN

Dr. Öğr. Üyesi Osman KAYA

ABSTRACT

THE EFFECTS OF INDUSTRIAL WASTE USED AS BINDER AND AGGREGATE ON THE PROPERTIES OF GEOPOLYMER MORTARS

Nihan GULMEZ

PhD. Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Niyazi Ugur KOCKAL

June 2018, 172 pages

This thesis presents the properties of geopolymer materials, which not only reduces the CO₂ emissions by replace Portland cement, but also enables the industrial waste to be recycled to produce a green and sustainable construction material.

In the research, blast furnace slag, silica fume and alkali activators (sodium silicate and sodium hydroxide) were used as basic components of the geopolymer. More than 300 samples were prepared using different mix designs and a number of series of experiments were carried out to determine the physical, mechanical and durability properties of these samples in order to examine the effects of factors such as curing conditions, binder type and waste metal contents. It has been determined how waste characteristics contribute to the properties of mortars and microstructural investigations have been investigated.

Researches in recent years have focused on improving electromagnetic shielding provided by cement materials due to the widespread use of wireless technologies and electronic devices. Geopolymer mortar production is provided by waste materials which electromagnetic shielding properties have not been investigated yet. In addition, all geopolymer mortar samples produced have been optimized by subjecting a number of performance constraints.

KEYWORDS: Alkali activator, Electromagnetic shielding, Industrial waste materials, Optimization

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Niyazi Ugur KOCKAL

Assoc. Prof. Dr. Hasan Erdem CAMURLU

Assoc. Prof. Dr. Turhan BILIR

Asst. Prof. Dr. Engin EMSEN

Asst. Prof. Dr. Osman KAYA

ÖNSÖZ

Tezin her aşamasında kıymetli düşünceleri ve önerilerini esirgemeyen, sevgili hocam ve tez danışmanım Doç.Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL'a teşekkür ederim.

Bir bilim insanı olmamı yürekten isteyen, dünyanın en iyi babasına, varlığıyla sınırsız güç bulabildiğim anneme ve önce insan olmanın gereklerini öğreten, diğer yarım, ağabeyime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
AKADEMİK BEYAN.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	3
2.1. Silis Dumanı.....	3
2.2. Yüksek Fırın Curufu.....	4
2.3. Alkali Aktivatör.....	5
2.4. Geopolimer Tarihsel Gelişimi.....	5
2.5. Geopolimer Oluşum Mekanizması.....	6
2.6. Geopolimerlerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	6
2.7. Geopolimerlerin Durabilite Özellikleri.....	8
2.8. Geopolimerlerin Elektromanyetik Kalkanlama Özellikleri.....	10
2.9. Geopolimerlerin Mikroyapısal Analizleri.....	12
2.9.1. Geopolimerler üzerinde XRD çalışmaları.....	12
2.9.2. Geopolimerler üzerinde SEM gözlemleri.....	14
3. MATERYAL ve METOT.....	17
3.1. Geopolimer Harçların Üretiminde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri.....	17
3.1.1. Agrega.....	17
3.1.2. Bağlayıcı.....	18
3.1.3. Alkali aktivatör.....	20
3.2. Geopolimer Harçların Üretimi (Karışım Tasarım Yöntemi).....	20
3.3. Taze Harçlar Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyleer.....	22
3.3.1. Taze harç kıvam tayini.....	22
3.3.2. Taze harcın birim hacim kütlesi tayini.....	23
3.4. Sertleşmiş Harçların Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi.....	24
3.4.1. Yığın yoğunluk, su emme ve görünür porozite.....	24

3.5. Sertleşmiş Harçların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	24
3.5.1. Yarmada çekme dayanımı	24
3.5.2. Eğilmede çekme ve basınç dayanımı	25
3.6. Geopolimer Harçların Durabilite Özelliklerinin Belirlenmesi	25
3.6.1. Kılcal geçirimsizlik	25
3.6.2. Kuruma büzülmesi	26
3.6.3. Korozyon potansiyeli	26
3.7. Geopolimer Harçların Elektromanyetik Özelliklerinin Belirlenmesi	28
3.7.1. Elektromanyetik kalkanma etkinliği	28
3.8. Geopolimer Harçların Mikroyapısal Özelliklerinin Belirlenmesi	28
3.8.1. Geopolimer harçların XRD analizleri	28
3.8.2. Geopolimer harçların SEM görüntüleri	28
4. BULGULAR	31
4.1. BA'nın Yayılma Çapı ve Birim Hacim Kütlesi Üzerindeki Etkisi	31
4.2. KBA'nın Yığın Yoğunlukları Üzerindeki Etkisi	33
4.2.1. SC karışım serisi yığın yoğunluk değerleri	33
4.2.2. SD karışım serisi yığın yoğunluk değerleri	38
4.3. KBA'nın Su Emme Yüzdesi Üzerindeki Etkisi	43
4.3.1. SC karışım serisi su emme yüzdesi değerleri	43
4.3.2. SD karışım serisinin su emme yüzdesi değerleri	45
4.4. KBA'nın Görünür Porozite Üzerindeki Etkisi	48
4.4.1. SC karışım serisinin görünür porozite değerleri	48
4.4.2. SD karışım serisinin görünür porozite değerleri	50
4.5. KBA'nın Yarmada Çekme Dayanımı Üzerindeki Etkisi	53
4.5.1. SC karışım serisi yarmada çekme dayanımı değerleri	53
4.5.2. SD karışım serisinin yarmada çekme dayanımı değerleri	55
4.6. KBA'nın Eğilmede Çekme Dayanımı Üzerindeki Etkisi	58
4.6.1. SC karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri	58
4.6.2. SD karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri	60
4.7. KBA'nın Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi	63
4.7.1. SC karışım serisi basınç dayanımı değerleri	63
4.7.2. SD karışım serisinin basınç dayanımı değerleri	65
4.8. KBA'nın Kılcal Su Emme Katsayısı Üzerindeki Etkisi	68
4.8.1. SC karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri	68

4.8.2. SD karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri	70
4.9. BA'nın Kuruma Büzülmesi Üzerindeki Etkisi.....	73
4.9.1. SC karışım serisi kuruma büzülmesi değerleri	73
4.9.2. SD karışım serisi kuruma büzülmesi değerleri	75
4.10. BA'nın Korozyon Potansiyeli Üzerindeki Etkisi.....	78
4.10.1. SC karışım serisi korozyon potansiyeli değerleri	78
4.10.2. SD karışım serisi korozyon potansiyeli değerleri.....	80
4.11. BA'nın Elektromanyetik Kalkanlama Özelliği Üzerindeki Etkisi.....	83
4.11.1. SC karışım serisi elektromanyetik kalkanlama etkinliği	83
4.11.2. SD karışım serisi elektromanyetik kalkanlama etkinliği.....	85
4.12. Geopolimerler Üzerindeki Mikroyapısal Çalışmalar	88
4.12.1. Geopolimer harçları oluşturan bileşenlerin XRD analizleri	88
4.12.2. Geopolimer harçların XRD analizleri	90
4.12.3. Geopolimer harçların SEM görüntüleri.....	94
5. TARTIŞMA.....	133
6. SONUÇLAR	141
7. KAYNAKLAR.....	145
8. EKLER	155
EK-A. Geçmiş Veri Tasarımı ile Tepkilerin Gerçek ve Tahmini Değerleri (Birinci Amaç için).....	155
EK-B. Geçmiş Veri Tasarımı ile Tepkilerin Gerçek ve Tahmini Değerleri (İkinci Amaç için)	165
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Bağlayıcı ve agrega olarak kullanılan endüstriyel atıkların geopolimer harçların özellikleri üzerine etkisi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

...../...../.....

Nihan GÜLMEZ

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	:Etüv kurusu numunenin kütlesi, g
b	:Numunenin kare kesitinin kenar uzunluğu, mm
B	:Numunelerin yüzey kuru doygun kütlesi, g
B _d	:Numunenin d günlük boy değişim oranı (mm/mm)
C	:Numunelerin sudaki kütlesi, g
d	:Numunenin seçilen en kesit boyutu, mm
E _{corr}	:Korozyon potansiyeli
E _i	:Giren elektrik alanı
E _t	:Kalkandan geçen elektrik alanı
f _{ct}	:Yarmada çekme dayanımı, MPa
F	:Uygulanan maksimum yük, N
F _c	:Kırılmadaki en büyük yük, N
F _f	:Uygulanan yük, N
I _{corr}	:Korozyon akımı
K _c	:Kılcal su emme katsayısı, cm ² /sn
l	:Mesnet silindirleri arasındaki mesafe, mm
L	:Numunenin yükleme parçasına temas çizgisi uzunluğu, mm
L ₀	:Numunenin ilk ölçülen başlangıç boyu (mm)
L _d	:Numunenin d günlük ölçülen boyu (mm)
M	:Molar
n	:Polikondansasyonun derecesi
Q	:t zaman aralığında emilen su miktarı, cm ³
R _c	:Basınç dayanımı, MPa
R _f	:Eğilmede çekme dayanımı, MPa

t	:Ölçüm aralığı süresi, sn
δ	:Kalkanın kabuk derinliği
ρ_m	:Birim hacim kütlesi, kg/m ³

Bu tez çalışmasında, ondalık ayırıcı olarak “virgül (,)” kullanılmıştır.

Kısaltmalar

AAC	:Alkali Aktive Edilmiş Curuf
ACI	:American Concrete Institute
ANOVA	:Varyans Analizi (Analysis of Variance)
AR-GE	:Araştırma Geliştirme
ASTM	:American Society for Testing and Materials
BA	:Bağlayıcı tipi ve içeriği, Agrega tipi ve içeriği
BOF	:Bazik Oksijen Fırını (Basic Oxygen Furnace)
BSE	:Geri Saçılmış Elektron (Backscattered Electrons)
CO ₂	:Karbondioksit
C-S-H	:Kalsiyum-Silikat-Hidrat
DC	:Doğru Akım (Direct Current)
DYK	:Doygun Yüzey Kuru
EAF	:Elektrik Ark Fırını (Electric Arc Furnace)
EM	:Elektromanyetik
EMG	:Elektromanyetik Girişim
H	:Kancalı çelik lif
KBA	:Kür koşulları, Bağlayıcı tipi ve içeriği, Agrega tipi ve içeriği
LOI	:Kızdırma kaybı (Loss on Ignition)
ODTÜ	:Ortadoğu Teknik Üniversitesi
PSS	:Poli-Sialat-Silokso

SEM	:Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
SPC	:Standart Portland Çimentosu
T	:Kıvrımlı çelik lif
TS	:Türk Standartları
TYM	:Tepki Yüzey Metodolojisi
VNA	:Vektör Ağ Analizi (Vector Network Analyzer)
XRD	:X-ışını Difraksiyonu (X-ray Diffraction)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Poli(sialat) geopolimerlerin terminolojisi (Davidovits 2008).....	7
Şekil 3.1. Curuf agregasının gradasyon eğrisi	17
Şekil 3.2. a) Demir tozu; b) Çelik parçacıkları görünümleri.....	18
Şekil 3.3. Silis dumanının parçacık boyut dağılımı	20
Şekil 3.4. Öğütülmüş yüksek fırın curufunun parçacık boyut dağılımı.....	20
Şekil 3.5. Kuruma büzülmesi numunelerinin genel görünümü	26
Şekil 3.6. Korozyon ölçüm düzeneği genel görünümü.....	27
Şekil 3.7. Elektromanyetik kalkanlama numunelerinin genel görünümü.....	28
Şekil 4.1. S0C karışım serisinin kuru yığın yoğunluk değerleri	34
Şekil 4.2. S0C karışım serisinin doygun yüzey kuru yığın yoğunluk değerleri	34
Şekil 4.3. S20C karışım serisinin kuru yığın yoğunluk değerleri	35
Şekil 4.4. S20C karışım serisinin doygun yüzey kuru yığın yoğunluk değerleri	35
Şekil 4.5. S40C karışım serisinin kuru yığın yoğunluk değerleri	36
Şekil 4.6. S40C karışım serisinin doygun yüzey kuru yığın yoğunluk değerleri	36
Şekil 4.7. S60C karışım serisinin kuru yığın yoğunluk değerleri	37
Şekil 4.8. S60C karışım serisinin doygun yüzey kuru yığın yoğunluk değerleri	37
Şekil 4.9. S0D karışım serisinin kuru yığın yoğunluk değerleri.....	39
Şekil 4.10. S0D karışım serisinin doygun yüzey kuru yığın yoğunluk değerleri	39
Şekil 4.11. S20D karışım serisinin kuru yığın yoğunluk değerleri.....	40
Şekil 4.12. S20D karışım serisinin doygun yüzey kuru yığın yoğunluk değerleri	40
Şekil 4.13. S40D karışım serisinin kuru yığın yoğunluk değerleri.....	41
Şekil 4.14. S40D karışım serisinin doygun yüzey kuru yığın yoğunluk değerleri	41
Şekil 4.15. S60D karışım serisinin kuru yığın yoğunluk değerleri.....	42
Şekil 4.16. S60D karışım serisinin doygun yüzey kuru yığın yoğunluk değerleri	42
Şekil 4.17. S0C karışım serisinin su emme yüzdesi değerleri	43

Şekil 4.18. S20C karışım serisinin su emme yüzdesi değerleri	44
Şekil 4.19. S40C karışım serisinin su emme yüzdesi değerleri	44
Şekil 4.20. S60C karışım serisinin su emme yüzdesi değerleri	45
Şekil 4.21. S0D karışım serisinin su emme yüzdesi değerleri	46
Şekil 4.22. S20D karışım serisinin su emme yüzdesi değerleri	46
Şekil 4.23. S40D karışım serisinin su emme yüzdesi değerleri	47
Şekil 4.24. S60D karışım serisinin su emme yüzdesi değerleri	47
Şekil 4.25. S0C karışım serisinin görünür porozite değerleri	48
Şekil 4.26. S20C karışım serisinin görünür porozite değerleri	49
Şekil 4.27. S40C karışım serisinin görünür porozite değerleri	49
Şekil 4.28. S60C karışım serisinin görünür porozite değerleri	50
Şekil 4.29. S0D karışım serisinin görünür porozite değerleri	51
Şekil 4.30. S20D karışım serisinin görünür porozite değerleri	51
Şekil 4.31. S40D karışım serisinin görünür porozite değerleri	52
Şekil 4.32. S60D karışım serisinin görünür porozite değerleri	52
Şekil 4.33. S0C karışım serisinin yarmada çekme dayanımı değerleri	53
Şekil 4.34. S20C karışım serisinin yarmada çekme dayanımı değerleri	54
Şekil 4.35. S40C karışım serisinin yarmada çekme dayanımı değerleri	54
Şekil 4.36. S60C karışım serisinin yarmada çekme dayanımı değerleri	55
Şekil 4.37. S0D karışım serisinin yarmada çekme dayanımı değerleri	56
Şekil 4.38. S20D karışım serisinin yarmada çekme dayanımı değerleri	56
Şekil 4.39. S40D karışım serisinin yarmada çekme dayanımı değerleri	57
Şekil 4.40. S60D karışım serisinin yarmada çekme dayanımı değerleri	57
Şekil 4.41. S0C karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri	58
Şekil 4.42. S20C karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri	59
Şekil 4.43. S40C karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri	59

Şekil 4.44. S60C karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri.....	60
Şekil 4.45. S0D karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri	61
Şekil 4.46. S20D karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri	61
Şekil 4.47. S40D karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri	62
Şekil 4.48. S60D karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri	62
Şekil 4.49. S0C karışım serisinin basınç dayanımı değerleri.....	63
Şekil 4.50. S20C karışım serisinin basınç dayanımı değerleri	64
Şekil 4.51. S40C karışım serisinin basınç dayanımı değerleri	64
Şekil 4.52. S60C karışım serisinin basınç dayanımı değerleri	65
Şekil 4.53. S0D karışım serisinin basınç dayanımı değerleri	66
Şekil 4.54. S20D karışım serisinin basınç dayanımı değerleri	66
Şekil 4.55. S40D karışım serisinin basınç dayanımı değerleri	67
Şekil 4.56. S60D karışım serisinin basınç dayanımı değerleri	67
Şekil 4.57. S0C karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri	68
Şekil 4.58. S20C karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri	69
Şekil 4.59. S40C karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri	69
Şekil 4.60. S60C karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri	70
Şekil 4.61. S0D karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri	71
Şekil 4.62. S20D karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri	71
Şekil 4.63. S40D karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri	72
Şekil 4.64. S60D karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri	72
Şekil 4.65. S0C karışım serisi kuruma büzülmesinin zamanla değişimi	73
Şekil 4.66. S20C karışım serisi kuruma büzülmesinin zamanla değişimi	74
Şekil 4.67. S40C karışım serisi kuruma büzülmesinin zamanla değişimi	74
Şekil 4.68. S60C karışım serisi kuruma büzülmesinin zamanla değişimi	75
Şekil 4.69. S0D karışım serisi kuruma büzülmesinin zamanla değişimi.....	76

Şekil 4.70. S20D karışım serisi kuruma büzülmesinin zamanla değişimi.....	76
Şekil 4.71. S40D karışım serisi kuruma büzülmesinin zamanla değişimi.....	77
Şekil 4.72. S60D karışım serisi kuruma büzülmesinin zamanla değişimi.....	77
Şekil 4.73. S0C karışım serisi korozyon potansiyeli değerleri	78
Şekil 4.74. S20C karışım serisi korozyon potansiyeli değerleri	79
Şekil 4.75. S40C karışım serisi korozyon potansiyeli değerleri	79
Şekil 4.76. S60C karışım serisi korozyon potansiyeli değerleri	80
Şekil 4.77. S0D karışım serisi korozyon potansiyeli değerleri.....	81
Şekil 4.78. S20D karışım serisi korozyon potansiyeli değerleri.....	81
Şekil 4.79. S40D karışım serisi korozyon potansiyeli değerleri.....	82
Şekil 4.80. S60D karışım serisi korozyon potansiyeli değerleri.....	82
Şekil 4.81. S0C karışım serisi elektromanyetik kalkanlama değerleri	83
Şekil 4.82. S20C karışım serisi elektromanyetik kalkanlama değerleri	84
Şekil 4.83. S40C karışım serisi elektromanyetik kalkanlama değerleri	84
Şekil 4.84. S60C karışım serisi elektromanyetik kalkanlama değerleri	85
Şekil 4.85. S0D karışım serisi elektromanyetik kalkanlama değerleri	86
Şekil 4.86. S20D karışım serisi elektromanyetik kalkanlama değerleri	86
Şekil 4.87. S40D karışım serisi elektromanyetik kalkanlama değerleri	87
Şekil 4.88. S60D karışım serisi elektromanyetik kalkanlama değerleri	87
Şekil 4.89. Silis dumanı XRD analizi	89
Şekil 4.90. Bağlayıcı olarak kullanılan öğütülmüş yüksek fırın curufu XRD analizi	89
Şekil 4.91. Agregada olarak kullanılan yüksek fırın curufu XRD analizi.....	90
Şekil 4.92. Normal kür koşuluna tabii tutulan S0 numunesinin XRD analizi	92
Şekil 4.93. Sıcak kür koşuluna tabii tutulan S0 numunesinin XRD analizi	92
Şekil 4.94. Normal kür koşuluna tabii tutulan S60 numunesinin XRD analizi	93
Şekil 4.95. Sıcak kür koşuluna tabii tutulan S60 numunesinin XRD analizi	93

Şekil 4.96. Normal kür koşuluna tabii tutulan S0 numunesinin SEM görüntüleri	96
Şekil 4.97. Sıcak kür koşuluna tabii tutulan S0 numunesinin SEM görüntüleri.....	96
Şekil 4.98. Normal kür koşuluna tabii tutulan S0C10 numunesinin SEM görüntüleri.....	96
Şekil 4.99. Normal kür koşuluna tabii tutulan S60C10 numunesinin SEM görüntüleri.....	97
Şekil 4.100. Normal kür koşuluna tabii tutulan S60D40 numunesinin SEM görüntüleri.....	97
Şekil 4.101. Normal kür koşuluna tabii tutulan S0 numunesinin SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları	97
Şekil 4.102. Sıcak kür koşuluna tabii tutulan S0 numunesinin SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları	98
Şekil 4.103. Normal kür koşuluna tabii tutulan S0C10 numunesinin SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları.....	98
Şekil 4.104. Normal kür koşuluna tabii tutulan S60C10 numunesinin SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları.....	98
Şekil 4.105. Normal kür koşuluna tabii tutulan S60D40 numunesinin SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları.....	99
Şekil 4.106. Çelik agregasının, kuru yığın yoğunluğu üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram	110
Şekil 4.107. Demir agregasının, kuru yığın yoğunluğu üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram	110
Şekil 4.108. Çelik agregasının, su emme yüzdesi üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram	111
Şekil 4.109. Demir agregasının, su emme yüzdesi üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram	111
Şekil 4.110. Çelik agregasının, basınç dayanımı üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram	112
Şekil 4.111. Demir agregasının, basınç dayanımı üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram	112
Şekil 4.112. Çelik agregasının, eğilmede çekme dayanımı üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram	113

Şekil 4.113. Demir agregasının, eğilmede çekme dayanımı üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram.....	113
Şekil 4.114. Kuru yığın yoğunluğu üzerine C ve D arasındaki etkileşim etkisi.....	114
Şekil 4.115. Su emme yüzdesi üzerine C ve D arasındaki etkileşim etkisi	114
Şekil 4.116. Basınç dayanımı üzerine C ve D arasındaki etkileşim etkisi.....	115
Şekil 4.117. Eğilmede çekme dayanımı üzerine C ve D arasındaki etkileşim etkisi....	115
Şekil 4.118. Çelik agregasının kuru yığın yoğunluğu üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram	120
Şekil 4.119. Demir agregasının, kuru yığın yoğunluğu üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram	120
Şekil 4.120. Çelik agregasının, su emme yüzdesi üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram	121
Şekil 4.121. Demir agregasının, su emme yüzdesi üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram	121
Şekil 4.122. Çelik agregasının, basınç dayanımı üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram	122
Şekil 4.123. Demir agregasının, basınç dayanımı üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram	122
Şekil 4.124. Çelik agregasının, eğilmede çekme dayanımı üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram.....	123
Şekil 4.125. Demir agregasının, eğilmede çekme dayanımı üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram.....	123
Şekil 4.126. Çelik agregasının, elektromanyetik kalkanlama etkinliği üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram	124
Şekil 4.127. Demir agregasının, elektromanyetik kalkanlama etkinliği üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram	124
Şekil 4.128. Kuru yığın yoğunluğu üzerine C ve D arasındaki etkileşim etkisi.....	125
Şekil 4.129. Su emme yüzdesi üzerine C ve D arasındaki etkileşim etkisi	125
Şekil 4.130. Basınç dayanımı üzerine C ve D arasındaki etkileşim etkisi.....	126
Şekil 4.131. Eğilmede çekme dayanımı üzerine C ve D arasındaki etkileşim etkisi....	126
Şekil 4.132. Elektromanyetik kalkanlama etkinliği üzerine C ve D arasındaki etkileşim etkisi	127

Şekil 4.133. Birinci amaca dayanan normal kür koşullarındaki çelik agregasının arzulanabilirliği	129
Şekil 4.134. Birinci amaca dayanan sıcak kür koşullarındaki çelik agregasının arzulanabilirliği	130
Şekil 4.135. Birinci amaca dayanan normal kür koşullarındaki demir agregasının arzulanabilirliği	130
Şekil 4.136. Birinci amaca dayanan sıcak kür koşullarındaki demir agregasının arzulanabilirliği	131
Şekil 4.137. İkinci amaca dayanan çelik agregasının arzulanabilirliği.....	131
Şekil 4.138. İkinci amaca dayanan demir agregasının arzulanabilirliği	132
Şekil A.1. Kuru yığın yoğunluk tahmini ve gerçek değerleri	163
Şekil A.2. Basınç dayanımı tahmini ve gerçek değerleri.....	163
Şekil A.3. Eğilmede çekme dayanımı tahmini ve gerçek değerleri.....	164
Şekil A.4. Su emme yüzdesi tahmini ve gerçek değerleri	164
Şekil B.1. Kuru yığın yoğunluk tahmini ve gerçek değerleri	170
Şekil B.2. Basınç dayanımı tahmini ve gerçek değerleri	170
Şekil B.3. Eğilmede çekme dayanımı tahmini ve gerçek değerleri	171
Şekil B.4. Su emme yüzdesi tahmini ve gerçek değerleri.....	171
Şekil B.5. Elektromanyetik kalkanlama etkinliği tahmini ve gerçek değerleri	172

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Farklı silis dumanı örneklerine ait kimyasal kompozisyonlar	3
Çizelge 2.2. Farklı alaşım kaynaklarından elde edilen silis dumanındaki SiO ₂ içeriği (ACI Committee 234, 2000)	4
Çizelge 2.3. Farklı yüksek fırın curufu örneklerine ait kimyasal kompozisyonlar.....	4
Çizelge 3.1. Bağlayıcılar ve agreganın kimyasal kompozisyonları (%)	18
Çizelge 3.2. Bağlayıcılar ve agreganın elementel kompozisyonları (%).....	19
Çizelge 3.3. Silis dumanı ve öğütülmüş yüksek fırın curufunun parçacık boyut dağılımı ve özgül yüzey alanları	19
Çizelge 3.4. Karışıma giren malzeme hacimleri (dm ³).....	22
Çizelge 4.1. Taze harçların yayılma çapı ve birim hacim kütlesi değerleri.....	32
Çizelge 4.2. İşlem değişkenlerinin kodlanmış ve gerçek isimleri	100
Çizelge 4.3. Tasarım matrisi (deneysel çalışmadan elde edilen veriler).....	101
Çizelge 4.4. Kuru yığın yoğunluk tepki yüzey kuadratik model için ANOVA.....	107
Çizelge 4.5. Su emme tepki yüzey kuadratik model için ANOVA	108
Çizelge 4.6. Basınç dayanımı tepki yüzey kübik model için ANOVA	108
Çizelge 4.7. Eğilmede çekme dayanımı tepki yüzey kübik model için ANOVA.....	109
Çizelge 4.8. Kuru yığın yoğunluk tepki yüzey 2FI model için ANOVA	118
Çizelge 4.9. Su emme tepki yüzey lineer model için ANOVA	118
Çizelge 4.10. Basınç dayanımı tepki yüzey kuadratik model için ANOVA	119
Çizelge 4.11. Eğilmede çekme dayanımı tepki yüzey kübik model için ANOVA	119
Çizelge 4.12. Elektromanyetik kalkanlama tepki yüzey 2FI model için ANOVA.....	119
Çizelge 4.13. Bu çalışmada kullanılan birinci optimizasyon amaçları	128
Çizelge 4.14. Bu çalışmada kullanılan ikinci optimizasyon amaçları	128
Çizelge 4.15. Birinci amaca dayanan Design-Expert tarafından elde edilen en uygun çözüm	128
Çizelge 4.16. İkinci amaca dayanan Design-Expert tarafından elde edilen en uygun çözüm	129

Çizelge A.1. Kuru yığın yoğunluk tahmini ve gerçek değerleri	155
Çizelge A.2. Su emme yüzdesi tahmini ve gerçek değerleri	157
Çizelge A.3. Basınç dayanımı tahmini ve gerçek değerleri.....	159
Çizelge A.4. Eğilmede çekme dayanımı tahmini ve gerçek değerleri.....	161
Çizelge B.1. Kuru yığın yoğunluk tahmini ve gerçek değerleri	165
Çizelge B.2. Su emme yüzdesi tahmini ve gerçek değerleri.....	166
Çizelge B.3. Basınç dayanımı tahmini ve gerçek değerleri.....	167
Çizelge B.4. Eğilmede çekme dayanımı tahmini ve gerçek değerleri	168
Çizelge B.5. Elektromanyetik kalkanlama etkinliği tahmini ve gerçek değerleri	169

1. GİRİŞ

Standart Portland Çimentosu (SPC) üretiminin dünya çapındaki sera gazı emisyonlarının %5 ile %7'sinde payının olacağı tahmin edilmektedir (Visintin vd. 2017). Beton üretiminin çevresel etkisini azaltmak için, daha az doğal kaynağın kullanılmasına ve daha az karbondioksit (CO₂) yayan enerji kaynağı gerektiren SPC alternatiflerine ihtiyaç olduğu ileri sürülmüştür. Bu amaç için bir yaklaşım olarak, SPC'nin, yanan kömürden elde edilen uçucu kül, bir dizi metal ekstraksiyon işleminden sonra elde edilen öğütülmüş curuf gibi yan ürün malzemeleri ile tamamen değiştirilmesidir. Sonuç olarak, uçucu kül, curuf, silis dumanı ve diğer doğal atıkların bir kombinasyonu sonucu yeni bir malzeme üretilmekte ve geopolimer olarak adlandırılmaktadır (He vd. 2013; Farhana vd. 2015; Mijarsh vd. 2015; Wianglor vd. 2017).

Toplumun her seviyesinde artan çevre bilinci ile, özellikle beton, çimento ve kilit tuğla endüstrileriyle ilişkili olan sağlık tehlikeleri ve kirlilik, çevreciler ve hükümetler tarafından yoğun olarak incelenmektedir (Okoye vd. 2017). Önemli bir husus olarak Portland Çimento betonunun dayanıklılığı ve sürdürülebilirliği dikkate alınarak, yeşil, dayanıklı ve sürdürülebilir betonlar yapmak için geopolimer gibi alternatif bağlayıcılar araştırılmaktadır. Geopolimer bağlayıcının, SPC yerine kullanılmasıyla ilgili iki büyük çevresel fayda vardır, potansiyel azaltılmış sera gazı emisyonları ve endüstriyel yan ürünlerin kullanımınıdır. Esas olarak geopolimer, silis dumanı gibi herhangi bir alüminosilikat malzemenin alkali aktivasyonunun bir ürünüdür (Tailby ve MacKenzie 2010). Yüksek erken dayanım ve kimyasal saldırı direnci, SPC beton üzerine bir avantaj sağlayan geopolimer betona ait bazı özelliklerdendir (Izzat vd. 2013; Shaikh 2016). Bu bağlamda geopolimer, üretimde düşük maliyeti, düşük CO₂ emisyonu ve düşük enerji kullanımı göz önüne alındığında, SPC için olası alternatif yeşil malzemeler olarak kabul edilmektedir. Bu malzemeler halâ gelişim aşamalarının başında olup teknik ve ekonomik açıdan uygun inşaat malzemeleri haline gelebilmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duymaktadırlar.

Araştırmanın “çevre dostu” ürünler ve prosesler bulmayı amaçladığı düşünüldüğünde en başta gelen malzemelerden biri silis dumanıdır. Silis dumanı, ferrosilikon veya silikon metal üretiminde kullanılan elektrikli ark ocaklarından türemiş bir yan üründür (Santosh vd. 2017). Esas olarak amorf olan %90'dan fazla silisdioksit içeren çok ince küresel parçacıkların yüksek içeriğine sahip olan silis dumanı, fırınlardan çıkan gazların filtrelenmesiyle toplanmaktadır (Papa vd. 2016).

Yapı sektöründe geniş bir kullanım yelpazesi sağlayan geri dönüşümlü endüstriyel atıklardan bir diğeri ise çimentoya benzer özelliklere sahip yüksek fırın curufudur. Demir üretiminde hammadde olarak demir cevheri, kireçtaşı ve kok kömürü kullanılmaktadır. Yüksek fırın curufu ise, demir-çelik tesislerindeki yüksek fırınlarda demir üretimi esnasında açığa çıkan bir yan üründür. Başlıca bileşenleri SiO₂, Al₂O₃, CaO iken, MgO, FeO ve CaS, MnS ve FeS formundaki sülfürler ikincil bileşenleridir (Vaclavik vd. 2012).

Son yıllarda çevresel radyasyon (özellikle radyo frekans radyasyonu) tarafından etkilenen elektronik aygıtların yaygın kullanımı ve kablosuz teknolojilerin giderek artması, hastaneler, askeri idari yapılar, elektrik santralleri veya stratejik tesisler gibi

alanlarda çimentolu malzemeler tarafından sağlanan elektromanyetik girişim (EMG) kalkanlama özelliğine ilgiyi giderek arttırmıştır (Muthusamy ve Chung 2010). Çimentolu malzemeler, elektriği iletmezler, aksine dielektrik malzemeler gibi davranırlar (Zornoza vd. 2010). Bir EMG kalkanı olarak hizmet verebilmesi için, belirli miktarlarda elektrik, manyetik dipoller veya elektriksel iletken ürünler eklenmiş olmalıdır.

Araştırmanın amacı, aktivatör hariç tamamen atık malzemeler kullanılarak, diğer özelliklerin yanında elektromanyetik kalkanlama özelliği yüksek harç üretilmeye çalışılmasıdır. Dolayısıyla çalışma, endüstriyel atık malzemeler için yeniden değerlendirme imkanı sunması ve maliyeti düşürme potansiyeli taşıması bakımından önemlidir. Ayrıca araştırma kapsamında, metal işleme ve şekillendirme sektörü atıkları üretilen harç karışımlarına belli oranlarda dahil edilerek, elektromanyetik dalgaları kalkanlama etkinliği gösteren geopolimer harç üretimi gerçekleştirilmiştir.

Çalışma iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda, geopolimer harçların üretiminde, elektrik-ark fırınlarından temin edilen curuf ve silis dumanı ile birlikte metal işleme ve şekillendirme sektörü atıklarından demir tozu ve çelik parçacıkları kullanılarak üretilen numunelerin özellikleri karşılaştırılmıştır. Bunun için üretilen taze harçlarda, birim hacim kütlesi, kıvam ve işlenebilirlik, sertleşmiş harçlarda ise yığın yoğunluk, görünür porozite, su emme, eğilmede ve yarmada çekme dayanımları, basınç dayanımları, kılcal geçirimsizlik, kuruma büzülmesi, korozyon potansiyeli ve elektromanyetik kalkanlama gibi fiziksel, mekanik, durabilite ve elektromanyetik özellikleri tayin edecek deneyler yapılmıştır. Bulgular ışığında, atık özelliklerinin, harçların özelliklerine ne mertebede katkıda bulunduğu saptanmış ve mikroyapı incelemelerinin de katkısıyla sebepleri araştırılmıştır.

Çalışmanın ikinci kısmında ise, geopolimer özellikleri için elde edilen verilerin regresyon ve grafik analizleri yapılmıştır. Varyans analizi (ANOVA), deneysel verileri analiz etmek için oldukça kullanışlı bir tekniktir. Bu yüzden, sertleşmiş geopolimer özelliklerini analiz etmek için Design-Expert V10.0 kullanılmıştır. Yazılım, kullanıcının belirli ihtiyaçlar için en iyi denklemini seçmesini sağlamak için çok sayıda grafiksel ve sayısal araç sunmaktadır. Bu çalışmada üretilen ve yazılım tarafından önerilen standartlar, ayrıca literatürde belirtilen farklı modellerin öngörülen değerlerinin geçerliliği karşılaştırılarak tartışılmıştır (Kockal ve Özturan 2008).

2. KAYNAK TARAMASI

Çalışmada geopolimer harçların üretilmesinde silis dumanı, yüksek fırın curufu, ve alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır.

2.1. Silis Dumanı

Silis dumanı, silisyum metali ve ferro-silisyum alaşımların üretimi sırasında 2000 °C'yi aşan sıcaklıklardaki elektrik ark fırınlarında yüksek saf kuvarsın indirgenmesi sonucu açığa çıkan endüstriyel yan üründür (Chung 2002). Silis dumanı, çok yüksek özgül yüzey alanına sahip (15.000-25.000 m²/kg), küresel parçacıklar veya ortalama çapı yaklaşık 0.15 mikroküreler içeren çok ince tozdur. Her bir mikrokürecik, bir çimento tanesinden ortalama olarak 100 kez daha küçüktür (King 2012). Bu özelliklerinden dolayı silis dumanı son derece reaktif puzolanik bir malzemedir. Ancak yüksek derecedeki inceliği ve düşük yoğunluğu, bu malzemenin taşınmasında, işlenmesinde ve depolanmasında zorluklara sebep olmaktadır (Pedro vd. 2017).

Silis dumanı başlıca kristal olmayan saf silisten oluşmuştur. Farklı silis dumanlarının XRD analizleri, malzemenin esas olarak kristobalit biçiminde camsı silis olduğunu göstermektedir. Silis dumanı genellikle %90'dan daha fazla SiO₂ içerir ve az miktarlarda demir, magnezyum ve alkali oksitler de bulunmaktadır (Siddique ve Khan 2011). Bazı yazarlar tarafından verilen silis dumanı oksit analizleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Farklı silis dumanı örneklerine ait kimyasal kompozisyonlar

Oksitler	Duan vd. (2013)	Hot vd. (2015)	Koçkal ve Oğuz (2015)
SiO ₂	94,74	96,50	89,11
Al ₂ O ₃	0,90	0,21	1,00
Fe ₂ O ₃	1,21	0,16	0,45
CaO	0,32	0,80	1,11
MgO	1,80	0,29	2,74
K ₂ O	-	0,52	0,80
Na ₂ O	-	0,17	1,18
Mn ₂ O ₃	-	0,02	-
SO ₃	0,52	-	0,45
ZnO	-	-	0,52
Cr ₂ O ₃	-	-	2,31
LOI	0,57	2,74	-

Silis alaşımlarının imalatı ile silis dumanının SiO₂ içeriği arasındaki ilişki Çizelge 2.2'de verilmiştir. Alaşımdaki silisyum içeriğine bağlı olarak silis dumanındaki SiO₂ miktarı da artmakta ve bu miktar silisyum metalinde %98'e ulaşmaktadır (ACI Committee 234, 2000).

Çizelge 2.2. Farklı alaşım kaynaklarından elde edilen silis dumanındaki SiO₂ içeriği (ACI Committee 234, 2000)

Alaşım türü	Silis dumanındaki SiO ₂ (%)
%50 Ferrosilisyum	61 – 84
%75 Ferrosilisyum	84 – 91
Metal silisyum	87 – 98

2.2. Yüksek Fırın Curufu

Granüle yüksek fırın curufu, demir imalatı için kullanılan yüksek fırınlardan elde edilen yan üründür. Yüksek fırınlar demir cevheri, kalkertaşı ve kok kömürünün kontrollü karışımı ile beslenir ve yaklaşık 1500°C'lik bir sıcaklıkta çalıştırılır. Bu malzemeler yüksek fırında eridiği zaman, erimiş demir ve erimiş curuf olan iki ürün üretilmiş olur (Proctor vd. 2000; Siddique ve Khan 2011; Hiraskar ve Patil 2013; Hosseini vd. 2016). Eriyik curuf hafiftir ve eriyik demirin üstünde yüzer. Eriyik curuf, kalkertaşından birleşmiş bazı oksitler ve orjinal demir cevherinden çoğunlukla alümina ve silikatları içermektedir. Granüle curuf işlemi, yüksek basınçlı su jetleri aracılığıyla erimiş curufun soğutulmasını kapsar. Bu işlem hızlıca curufu söndürür ve genellikle 5 mm çaptan daha büyük olmayan granüler parçacıklar şekillenir. Hızlı soğutma, daha büyük kristallerin oluşumunu önler ve sonuçta oluşan granüle malzeme, %95 kadar kristal olmayan kalsiyum-alüminosilikatları içerir. Granüle curuf, kurutma aracılığıyla daha fazla işlenir ve sonra öğütülmüş granüle yüksek fırın curufu olarak adlandırılan çok ince toz halinde öğütülür. Granüle curufun öğütülmesi, dönen bilyeli öğütücü içinde gerçekleştirilir. Curuf ürünün farklı formları, eriyik curufun soğutulması amacıyla kullanılan yöntemle bağlı olarak üretilir. Bu ürünler, havada soğutulmuş yüksek fırın curufu, genleşmiş veya köpük curuf, paletlenmiş curuf ve granüle yüksek fırın curufudur.

Öğütülmüş granüle yüksek fırın curufu, esas olarak CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO içermektedir. Standart Portland Çimentosu ile aynı ana kimyasal bileşenlere sahip fakat farklı oranlardadır. Bazı araştırmacılar tarafından verilen yüksek fırın curufu oksit analizleri Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Farklı yüksek fırın curufu örneklerine ait kimyasal kompozisyonlar

Oxides	Wardhono vd. (2017)	Huang vd. (2016)	Deb vd. (2015)
SiO ₂	36,9	30,18	29,96
Al ₂ O ₃	14,20	10,77	12,25
Fe ₂ O ₃	0,3	0,64	0,52
CaO	36	40,43	45,45
P ₂ O ₅	0,4	-	0,04
TiO ₂	0,6	6,01	0,46
MgO	5,1	7,91	-
K ₂ O	0,1	0,56	0,38
SO ₃	6,1	-	3,62
MnO	0,4	-	-
Na ₂ O	-	0,28	0,31
LOI	0,3	0,01	2,39

2.3. Alkali Aktivatör

Genel olarak yüksek-pH koşulları altında alkali hidroksitler veya silikatlar tarafından aktive edilmiş alüminosilikat bağlayıcı malzemeler geopolimerler olarak sınıflandırılmıştır (Srinivasan ve Sivakumar 2013). Reaktif katı bileşenlere ek olarak, geopolimerizasyon reaksiyonunun başlatılması için kimyasal bir aktivatör gerekmektedir. Geopolimer sentezinde aktivatörler olarak çeşitli çözeltiler kullanılmakta ve her birinin kimyasal ve fiziksel özellikleri, bunları kullanarak sentezlenen geopolimerlerin özelliklerini ve değerini belirlemede rol oynamaktadır (Provis ve Deventer 2009). Daha düşük maliyetli sodyum-esaslı çözeltiler, fakat daha uygun faz davranışı ve reoloji gösteren potasyum-esaslı çözeltiler olarak sodyum ve potasyum silikat ve hidroksit, en yaygın olarak kullanılan aktivasyon çözeltileridir. Alternatif aktivasyon çözeltileri ise, karbonatları, alüminatları ve hatta suyu içermektedir, ancak bunların hiçbiri bugüne kadar alüminosilikat geopolimerlerin sentezinde yaygın kullanım görmemiştir.

Glukhovsky vd. (1980), alkali aktivatörleri kimyasal kompozisyonlarına göre 6 grupta sınıflandırmışlardır (Shi vd. 2006):

- 1 kostik alkaliler: MOH
- 2 silikat olmayan zayıf asit tuzlar: M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4 , MF, vd.
- 3 silikatlar: $M_2O.nSiO_2$
- 4 alüminatlar: $M_2O.nAl_2O_3$
- 5 alüminosilikatlar: $M_2O.Al_2O_3.(2-6)SiO_2$
- 6 silikat olmayan güçlü asit tuzlar: M_2SO_4

NaOH, Na_2CO_3 , $Na_2O.nSiO_2$ ve Na_2SO_4 bu aktivatörler arasında en yaygın kullanılan ve ekonomik olan kimyasallardır. Bazı potasyum bileşikler de laboratuvar çalışmalarında kullanılmıştır, ancak bunların kullanılabilirliği ve maliyetleri nedeniyle potansiyel uygulamaları çok sınırlıdır.

2.4. Geopolimer Tarihsel Gelişimi

Geopolimer tarihi, sodyum hidroksit ile yüksek fırın curufu aktivasyonu üzerine Purdon'un çalışmalarıyla birlikte 1940'lara dayanmaktadır (Pacheco-Torgal vd. 2013). Purdon, birinci adımda silis, alüminyum ve kalsiyum hidroksitlerin serbest bırakılmasını ve ikinci aşamada alkali çözeltinin yenilenmesi ile birlikte silis ve alüminyum hidratların oluşumunu içeren iki aşamalı bir mekanizma önermiştir. Bu araştırmalara önemli bir katkı da 1960'lardan 1980'lere kadar Glukhovsky (1959, 1965, 1978, 1980, 1981) tarafından yapılmıştır. Glukhovsky, kayaç ve kil minerallerinin alkali davranışında, katılaşma ürünleri olarak yeni bir sınıf zeolit-benzeri hidratlar (kalsiyum ve sodyum alüminosilikat hidratlar) tanımlamıştır.

Bu alanda en önemli kapsamlı katkı, şimdiye kadar üretilen ilk mineral reçine veya mineral polimer olarak, 1975'te çözünür alkali silikat ve metakaolin esaslı yeni bir likit bağlayıcı bulmuş olan Davidovits tarafından yapılmıştır. Sonrasında, 1978'de Davidovits, inorganik molekül ağları veya zincirleriyle nitelenen malzemeler için geniş bir tarif olarak "geopolimer" terimini kullanmıştır. 1984'te, hem geopolimer hem de Portland Çimentosu esaslı erken yüksek dayanımlı geopolimer bağlayıcıyı geliştirmiştir.

Alkali aktive edilmiş veya geopolimer çimentoların tanımı için açık bir terimlendirme sisteminin eksikliği, bu alanda önemli bir sorundur. Bunun gibi çoğu benzer malzeme için, şimdiye kadar birçok farklı isim kullanılmıştır. Zemin çimentosu, alkali çimento, mineral polimer ve geopolimerin yanısıra, geoçimento (Krivenko 1994), düşük sıcaklık alüminosilikat cam (Rahier vd. 1996), alkali aktive edilmiş çimento (Palomo ve Palacios 2003), alkali-bağlı seramik (Mallicoat vd. 2005), hidroçimento (Bao vd. 2005) ve inorganik polimer betonunu (Sofi vd. 2007) kapsayan farklı terimlendirme çeşitleri, farklı araştırmacılar tarafından kullanılmıştır.

2.5. Geopolimer Oluşum Mekanizması

Alümino-silikat bağlayıcılar, inorganik geopolimerik bileşikler olarak adlandırılır çünkü geopolimerin elde edilmesi, geopolimerizasyon olarak tanımlanan inorganik polikondansasyon reaksiyonunun bir sonucudur (Davidovits 2005). Bu gibi reaksiyonlar, genel ampirik formülü aşağıdaki gibi olan üç-boyutlu tekto-alüminosilikat sistem açığa çıkarmaktadır. Formülasyonda, M, bir katyon (K, Na, Ca); n, polikondansasyonun derecesi, ve z, 1, 2, 3 veya >>3.



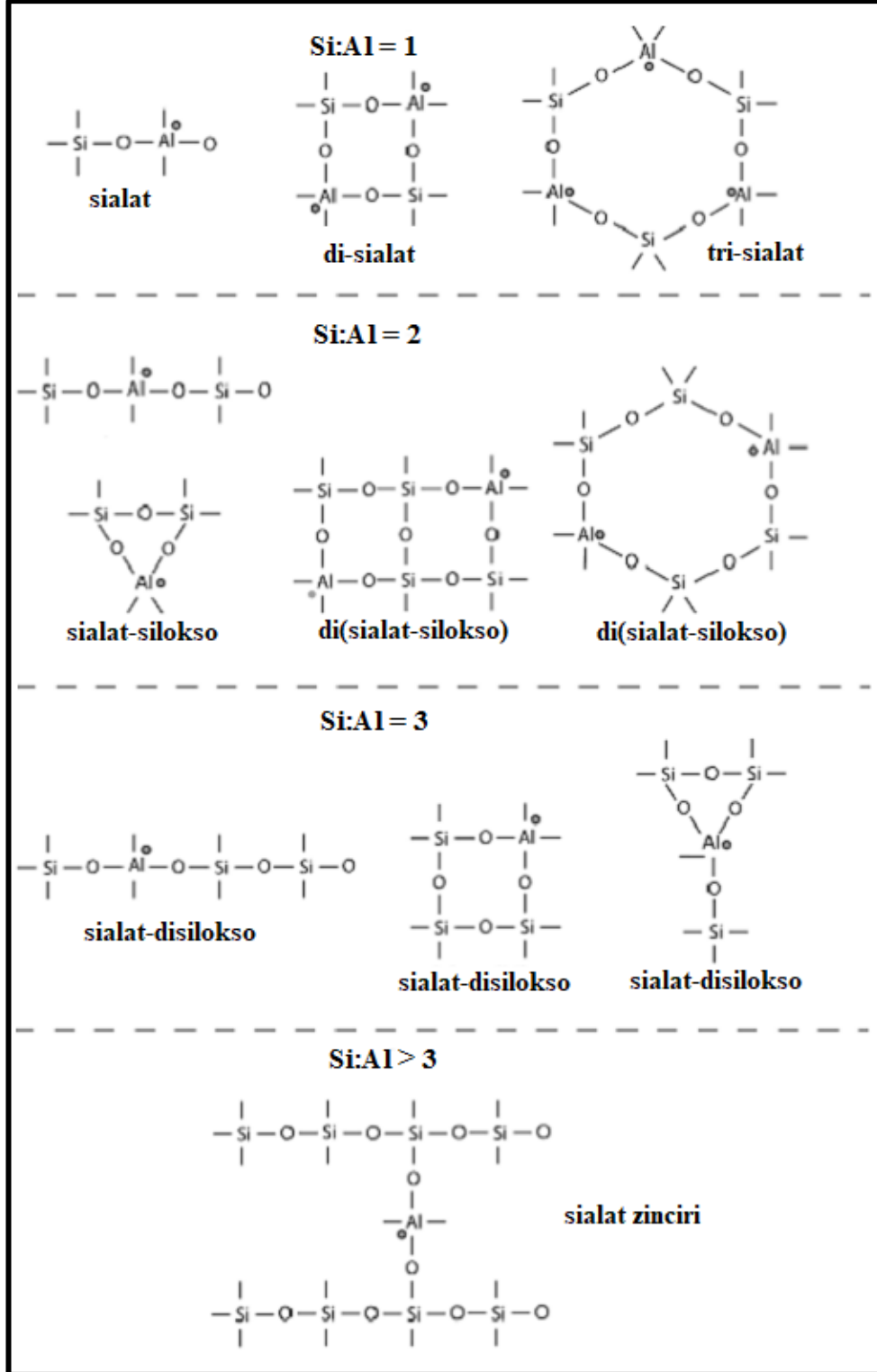
Siliko-alüminatlara dayanarak geopolimerlerin kimyasal tanımı için poli(sialat) önerilmiştir. Sialat, silisyum oksoalüminat için bir kısaltmadır. Sialat ağı, bütün oksijen atomlarını paylaşarak zincirlenen SiO_4 ve AlO_4 tetrahedralarından oluşmaktadır. Pozitif iyonlar (Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^+ , Ba^{++} , NH_3^+ , H_3O^+), 4-kat koordinasyondaki Al'in negatif yükünü dengede tutmak için sistem boşluklarında hazırda bulunmalıdır. Zincirler ve halkalar, daima bir sialat Si-O-Al köprüsü vasıtasıyla oluşturulabilir ve çapraz bağlanabilir (Davidovits 1989). Amorf ile yarı kristal aralığında üç boyutlu siliko-alüminat yapılar, geopolimerlerin türleri olarak adlandırılmıştır (Şekil 2.1).

2.6. Geopolimerlerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Alkali aktivatör türü, aktivatör konsantrasyonu, agrega içeriği ve öncü malzemelerin etkisini araştırmak amacıyla curuf ve uçucu kül esaslı geopolimer harçların işlenebilirliği ve reolojisi incelenmiştir (Alonso vd. 2017). Curuf ve uçucu kül esaslı geopolimer harçların, sıvı/katı oranındaki değişikliklere SPC harçlarından daha duyarlı olduğu gözlenmiş ve camsuyu çözeltisi ile aktive edilmiş harçların, SPC harçlarından daha fazla yayılma ve işlenebilirlik sergilediği görülmüştür. Ayrıca SPC ve geopolimer harçların reolojisi, aktivatör konsantrasyonundan bağımsız olarak bir Bingham modeline uyduğu ve sonuçların SPC, curuf ve uçucu kül esaslı geopolimer harçlarda tiksotropik davranışın varlığını doğruladığı belirtilmiştir.

Curufun, %5, %10 ve %15 silis dumanı ile yer değiştirilmesinin, curuf esaslı geopolimer betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir (Rostami ve Behfarnia 2017). Numuneler su kürü ve plastik örtü altında kürlenme üzere iki farklı kür koşuluna tabii tutulmuştur. Silis dumanı içeren numunelerin 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının, silis dumanı içermeyen numunelerden daha yüksek olduğu görülmüştür. Silis dumanı, basınç dayanımını arttırmakla kalmayıp aynı zamanda geopolimer hamurun gözeneklerini dolduran dolayısıyla matrisin geçirgenliğini azaltan ve durabilitesini arttıran kuvvetli puzolanik etkinliği ile C-S-H jel ürettiği belirtilmiştir.

Bununla birlikte kür yönteminin 28 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisinin dikkate değer olmadığı ve su içinde kürlenmiş numunelerin 28 günde sadece 0,5 ile 3,0 MPa daha fazla dayanım sağladığı belirtilmiştir. Araştırmacılar kürlenme yönteminin etkisinin 90 günlük basınç dayanımı üzerinde etkili olduğunu gözlemlemiştir.



Şekil 2.1. Poli(sialat) geopolimerlerin terminolojisi (Davidovits 2008)

Collins ve Sanjayan (1999), curuf esaslı geopolimer betonun işlenebilirliği ve dayanım gelişimi üzerine silis dumanı etkisini incelemiştir. Curufun %10 oranında silis dumanı ile yer değiştirilmesiyle hazırlanan beton numunenin 91 günlük basınç dayanımı 74,2 MPa olarak bulunmuş ve curuf esaslı betonun dayanımına kıyasla %12 daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, silis dumanı ilavesiyle geopolimer betonun işlenebilirliğinin azaldığı sonucuna varılmıştır.

Geopolimer betonlarının geçirgenlik özelliklerini tayin etmek amacıyla standart çimento kontrol betonu ve eş değer derecede hazırlanmış olan geopolimer betonun su emme kapasitesi, geçirgen boşlukların hacmi ve görünür porozitesi araştırılmıştır (Srinivas ve Rao 2017). Deneysel veriler, geopolimer beton numunelerinin eşdeğer kontrol betonlarına kıyasla, su emme kapasitesi ve geçirgen boşluk hacminin sırasıyla %38,38, %37,62 oranında azaldığını göstermiştir. Ayrıca görünür porozitenin de kontrol numunesine göre daha düşük olduğu ve bunun da geopolimer betonunun durabilitesinin kontrol betonundan daha fazla olabileceğini gösterdiği belirtilmiştir.

12 saat boyunca 65 °C ve 6 saat boyunca 85 °C ısı kürüne tabi tutulan curuf esaslı geopolimer harçların çekme dayanımları, 23 °C de kürlenmiş 3 ve 7 günlük harçlara göre daha yüksektir (Chi vd. 2012). Bununla birlikte kür sıcaklığı 65 °C'den, 85 °C'ye çıkarıldığında çekme dayanımı yavaşça düşmektedir. Aktivatör/curuf oranı 0,54 olan harçların, sıvı/curuf oranı 0,44 ve 0,64 olan diğer harçlara kıyasla en yüksek çekme dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Genel olarak, daha düşük sıvı/curuf oranı daha düşük işlenebilirliğe yol açar. Bu nedenle, daha düşük işlenebilirlik, geçiş bölgesinin kohezyonunu düşürdüğü ve bu şekilde çekme dayanımında bir azalmaya neden olduğu açıklanmıştır.

2.7. Geopolimerlerin Durabilite Özellikleri

Deb vd. (2015) çalışmalarında, %10 ve %20 oranlarında öğütülmüş granüle yüksek fırın curufuyla yer değiştirilerek elde edilen uçucu kül esaslı geopolimer betonun büzülme davranışını incelemiştir. Sodyum silikat ve sodyum hidroksit oranı 1,5 ve 2 olarak alınmıştır. Araştırmaları neticesinde, oda sıcaklığında kürlenmiş olan geopolimer betondaki sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı azaldıkça ve curuf içeriği arttıkça büzülmenin azaldığı görülmüştür.

Curuf esaslı geopolimer betonunda, SPC betonuna kıyasla daha fazla kuruma büzülmesi görülmüştür (Collins ve Sanjayan 2000). Bununla birlikte SPC numuneleri büzülme süresince daha fazla nem kaybetmiştir. Bu durum, büzülme ve nem kaybı arasında yaygın olarak kabul edilen ilişkiyle çelişkilidir. Araştırmacılar, gözenek boyut dağılımının kuruma büzülmesine etkisini inceleyerek bu duruma bir açıklama getirmişlerdir. Araştırmalar, curuf esaslı geopolimer hamurlarının mezapor bölgedeki gözenek boyutlarının SPC hamurlarından çok daha yüksek olduğunu göstermiştir. Ayrıca, menisküsün olduğu gözeneklerin yarıçapı, nem kaybı miktarından ziyade büzülmenin büyüklüğünü belirlemede önemli bir parametre gibi görünmektedir. Bu durum aynı zamanda, kuruma esnasındaki kılcal çekme kuvvetlerinin, betonun kuruma büzülmesinde önemli bir faktör olduğu teorisini desteklemektedir.

Curuf esaslı geopolimer hamurların kuruma büzülmesi, geopolimer harçlardan daha yüksektir ve kuruma büzülmesinin büyük bir kısmı erken yaşlarda

gerçekleşmektedir (Chi vd. 2012). Ayrıca hamur ve harçların kuruma büzülmesi sıvı/curuf oranı arttıkça artmaktadır. Sıvı/curuf oranı, hamurun içindeki buharlaşabilir su miktarını ve suyun numunenin yüzeyine doğru hareket etme oranını belirlemektedir. Böylece alkali aktivatör, büzülmenin gelişiminde belirleyici faktörler olan mekanik özellikler, porozite ve hidrasyon derecesini büyük ölçüde etkilemektedir. Bununla birlikte su içeriği kuruma büzülmesini etkileyen birincil faktör değildir. Daha yüksek kum/curuf oranı veya daha yüksek kütleme sıcaklığı daha düşük kuruma büzülmesi sağlamaktadır.

Çeşitli tip/dozajlarda aktivatör kullanılarak hazırlanan curuf esaslı geopolimer harçlar, dört farklı bağıl nem seviyesinde ve iki ayrı kuruma rejiminde (yani doğrudan ve kademeli kurutmada) karakterize edilmiştir (Ye vd. 2017). Sonuçlar, geopolimerin kuruma büzülmesi değerlerinin kuruma hızına önemli ölçüde bağlı olduğunu göstermiştir, çünkü geopolimer, doğrudan kuruma yerine relatif nem yavaş yavaş azaltıldığında daha fazla büzülme göstermektedir. Yüksek bağıl nemde geopolimerin kuruma büzülmesi, SPC'ye kıyasla belirgin olarak visko-elastik/viskoplastik davranış sergilemektedir. Dolayısıyla, geopolimer harcın yüksek büzülmesinin, katı iskeletinin bu davranışından (düşük sürünme modülü) kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca aktivatör de, gözenek yapısı ve mekanik özellikleri etkileyerek geopolimerin büzülme davranışını etkilemektedir. Doğrudan kuruma işleminde SPC karışımlarının, bağıl nem ile kuruma büzülmesi arasında bilineer ilişki gösterdiği araştırmacılar tarafından raporlanmıştır (Weiss vd. 2008). Bununla birlikte curuf esaslı geopolimer karışımları, doğrudan kuruma durumunda bağıl nem ile nihai büzülme arasında parabolik bir ilişki göstermektedir. Beklendiği gibi, kuruma büzülmesi, nem kaybındaki artış ile birlikte artar ancak bu korelasyon, farklı kuruma hızlarına göre önemli ölçüde değişmektedir. Ek olarak, geopolimer ve SPC numuneleri arasında önemli farklılıklar gözlemlenmektedir. SPC, kurutma koşullarından bağımsız olarak nem kaybı ve büzülme arasında güçlü bir korelasyon sergiler (Hansen 1987). Bununla birlikte herhangi bir nem kaybı seviyesinde, tüm geopolimer karışımları, yavaşça kurutulduğunda (yani, daha yüksek bağıl nemde kurutulduğunda), daha yüksek büzülme deformasyonuna sahip olma eğilimindedir. Bu nedenle, geopolimer sistemleri için kuruma büzülmesinin, toplam kütle kaybı ile karşılaştırıldığında daha az korelasyona sahip olduğu, ancak kuruma oranına duyarlı olma eğilimi olduğu sonucuna varılmıştır. Ek olarak, yüksek bağıl nem (örneğin %70) koşullarında geopolimerde daha az nem kaybı gözlenmesine rağmen büzülmeye devam edebilir, bu da sürünme etkilerinin büzülmeye katkıda bulunduğuna işaret eder.

Korozyon potansiyeli (Ecorr), geliştirilmiş aletlerle yerinde veya laboratuvarında ölçüm kolaylığı nedeniyle en yaygın olarak kullanılan korozyon indeksidir (Sadowski 2013). Bununla birlikte diğer ölçülmüş değişkenlerin aksine, Ecorr oldukça niteliksel bir parametredir ve Ecorr ile çeliğin çözünme oranını tanımlayan korozyon akımı (Icorr) arasında doğrudan bir korelasyon yoktur (Andrade vd. 2004; Babae ve Castel 2016).

Tran vd. (2015), klorür ortamında çelik lif takviyeli çimentolu kompozitlerin korozyon potansiyelini araştırmışlardır. Yüksek dayanımlı harç matrisine (90 MPa) kıvrımlı (T) ve kancalı (H) iki tip çelik lif eklenmiştir. Örneklerin yüzeyinin yakınında bulunan T ve H liflerinin korozyon potansiyeli sırasıyla -381 ve -337 mV olarak bulunmuş ve ASTM C876'ya göre yüksek korozyon riski altında olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca yüzeyden 4 mm uzakta bulunan T ve H liflerinin, orta korozyon

riski aralığı içerisinde sırasıyla -256 ve -225 mV korozyon potansiyelleri taşıdığı belirtilmiştir.

Hızlandırılmış karbonatlaşma deneyi ortamı (%3 CO₂, %65 bağıl nem ve 25°C) ve laboratuvar ortamına (%0,03 CO₂, %65 bağıl nem ve 25°C) maruz bırakılmış curuf esaslı geopolimer ve standart portland çimentosu betonu içine yerleştirilen çelik çubukların zamana karşı korozyon potansiyel değerleri belirlenmiştir (Aperador vd. 2009). Genel olarak, test edilen tüm betonlar, hızlandırılmış ortama tabii tutulan geopolimer betonu hariç benzer davranış göstermiştir. ASTM C876'ya göre, hızlandırılmış ortamdaki geopolimer numune için gözlemlenen Cu/CuSO₄'e karşı -0,2 V ile -0,5 V aralığındaki aktif potansiyeller 45 güne kadar korozyon ihtimalini %90 olarak belirtmiştir. Laboratuvar ortamındaki geopolimer ve standart portland çimentosu betonları ise sırasıyla 45 gün ve 265 gün maruz kaldıklarında %10 olası bir korozyon olasılığı sunmuştur.

Alkali aktive edilmiş curuf harcındaki çeliğin korozyon direnci, galvanik akımı ve yarı hücre potansiyeli, klorür içeren bir çevreye karşı zamanla gözlemlenerek değerlendirilmiştir (Park vd. 2015). Korozyon davranışının alkali aktivatör türüne kuvvetle bağlı olduğu bulunmuştur. KOH ve NaOH aktivatörleri, kontrol SPC harcı ile benzer bir korozyon seviyesine işaret ederken, Ca(OH)₂ aktivatörünü içeren alkali aktive edilmiş curufun galvanik korozyon ve yarı hücre potansiyelinin en pasif grup olduğu belirtilmiştir. Klorür kaynaklı korozyona karşı Ca(OH)₂ içeren curuf esaslı geopolimer harcın daha yüksek direnci, gözenek solüsyonundan serbest klorürleri uzaklaştırmak için klorürlerle fiziksel olarak reaksiyona girmiş olabilecek matristeki Ca(OH)₂'in çökmesine atfedilebileceği belirtilmiştir.

2.8. Geopolimerlerin Elektromanyetik Kalkanlama Özellikleri

Elektromanyetik girişimi kalkanlama amacı, esas olarak elektronik tesisler, dijital aygıtlar vb. kaynaklı elektromanyetik dalgaları ekranlamak ve/veya absorbe etmektir (Kim vd. 2010; Yao vd. 2017; Wang vd. 2013). Bu tür kalkanlama, yüksek elektrik iletkenliğine veya yüksek geçirgenliğe sahip malzemeler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Elektronik tesis veya cihazlardan yayılan elektromanyetik dalgalar komşu elektroniklerle etkileşime girebilir. Benzer şekilde, EMG kalkanlama, önemli bilgileri elde etmeyi amaçlayan askeri ve şirket casus saldırılarını önlemek için de önemlidir. Bu bağlamda elektroniklerin sadece yaşam ortamlarında değil, endüstriyel, askeri ve bilimsel alanlarda da daha yaygın ve tekrarlı kullanılmasıyla birlikte, EMG kalkanlaması daha önemli bir konu haline gelmektedir. Çelik, alüminyum, bakır, nikel vb. gibi metalik EMG kalkanlama malzemeleri, hassas malzemeleri elektromanyetik dalgalardan korumak için yaygın olarak kullanılmakta ve esasları, hava ile metal ortam arasındaki empedans farkıyla elde edilen yüksek yansımaya dayanmaktadır (Nam ve Lee 2016). Bununla birlikte yüksek maliyet, yüksek ağırlık ve zayıf işlenebilirlik, bu malzemelerin uygulamalarını engellemektedir.

EMG radyasyonu ve sızıntısını önlemek veya zayıflatmak için başta kalkanlama ve absorbe etme olmak üzere iki yöntem bulunmaktadır. Şimdiye kadar bu tür mekanizmalar üzerinde araştırmalar yapılmış ve kalkanlama malzemeleri, absorbe malzemelerle karşılaştırıldığında daha kapsamlı ve yoğun olarak çalışıldığı görülmüştür.

Kalkanlama etkinliği, her biri, yansıma kaybı, absorpsiyon kaybı ve çoklu yansıma olaylarından birini temsil eden üç terime bölünebilir (Guan 2006). Kalkanlama etkinliği desibel (dB) cinsinden tanımlanır ve büyüklüğü aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$SEdB = 20\lg|E_i/E_t| = RdB + AdB + MdB \quad (2.2)$$

Burada E_i ve E_t sırasıyla giren ve kalkandan geçen elektrik alanlarıdır. $RdB=106+10\lg(\sigma_r/f\mu_r)$, kalkan yüzeyindeki yansıma ile oluşan yansıma kaybıdır. $AdB=20\lg(\exp(-t/\delta))$, kalkan boyunca ilerledikçe dalgaların absorpsiyon kaybıdır. $MdB=20\lg(1-\exp(-2t/\delta))$, çoklu yansımaların ve kalkanın içindeki geçişlerin ilave etkileridir. Yukarıdaki denklemde $\delta = \sqrt{1/\pi\mu\sigma f}$, kalkanın kabuk derinliği olup, dalga genliği e^{-1} faktörü kadar azaldığında, gelen dalganın yayılmasına neden olan kalkan içindeki mesafedir.

Yukarıda belirtilen denklemlerden, çimento esaslı malzemenin kalkanlama etkisinin, kompozitin elektriksel iletkenliği ve elektromanyetik parametreleri ile yakından ilişkili olduğu açıktır. Elektriksel olarak yalıtkan bir polimer matrisinin aksine çimento matrisi hafif iletkenidir ve kalkanlama etkinliği, iletkenlik ile yakından alakalıdır. Çimento esaslı malzemelerde genellikle iletken polimerler, karbon malzemeler ve metal malzemelerden oluşan farklı iletken dolgu malzemeleri kullanılmıştır (Fu ve Chung 1996, Guan vd. 2007).

Cao ve Chung (2004), çimento hamurunda silis dumanı veya uçucu kül kullanımının kalkanlama etkinliği üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çimento hamurunda ağırlıkça farklı oranlarda silis dumanı kullanılmasının kalkanlama üzerinde ihmal edilebilir etkide sonuç vermesine karşılık, uçucu kül kullanımıyla elektromanyetik kalkanlama etkinliğinin, 1 GHz'de, 4'den 8 dB'ye kadar arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Kalkanlama için uçucu külün etkinliği, uçucu küldeki Fe_2O_3 bileşenine (ağırlıkça %15.4) bağlanmıştır. DC elektriksel direncin, silis dumanı ile hafifçe azaldığını, fakat uçucu kül tarafından esas olarak etkilenmediğini belirtmişlerdir. Silis dumanı durumunda daha düşük direnç, muhtemelen silis dumanının daha küçük partikül boyutu ve dolayısıyla silis dumanı ve çimento arasındaki arayüzün geniş alanından kaynaklandığı belirtilmiştir.

Çelik lif takviyeli betonun elektromanyetik kalkanlama ve absorbe özellikleri, karışımlara hacimce çelik lif ilave edilerek ve çimentonun ağırlıkça %30'u oranında ferrit kullanılarak araştırılmıştır (Zhang ve Sun 2012). Takviyesiz çimento harcının kalkanlama etkinliği çok düşüktür ve frekans değişimi 80 MHz'den 10 GHz'ye yükseldiğinde, değeri artmaktadır. Ayrıca kalkanlama etkinliğinin lif hacim içeriği ile arttığı ve %1 çelik lif eklenmesiyle yaklaşık olarak 10 dB artış gösterdiği bulunmuştur. Çelik lif hacimsel içeriği %3 olduğu zaman ise, çimentolu kompozitin kalkanlama etkinliği 50 dB üzerindedir. Lif fraksiyonu arttıkça, çelik lifler iletken bir ağ oluşturmak üzere birbiri üzerine bindirilir, böylece mikrodalga absorbe performansı artar. Tersine, düşük lif içeriğinde iletken ağ oluşturamaz, bu yüzden yansıma kaybının da zayıf olacağı belirtilmiştir.

Ferrit, düşük maliyetli ve basit teknolojisi nedeniyle radar absorbe edici olarak yaygın kullanılan bir malzemedir. Fakat düşük frekanslı absorpsiyon ve dar bant genişliği ferritin dezavantajlarından. Gerçek uygulamada, absorpsiyon bant

genişliğini ve absorbe edici özellikleri arttırmak için, iki veya daha fazla absorbe edici maddenin karıştırılması uygun bir yoldur (Meshram vd. 2004) . Ferrit ve çelik lif olmak üzere emici maddeler iki tür malzemeden oluştuğunda, mikrodalga absorbe özelliğinin arttığı ve absorpsiyon bant genişliği de, tek emiciyle karşılaştırıldığında daha geniş olduğu gözlenmiştir. Çimentonun ağırlıkça %30 oranında ferrit dozu ile %2 oranında çelik lif ile oluşturulan malzeme ile, en iyi absorbe edici özellik elde edilmiştir. Minimum yansıma oranı -11 dB ve -8 dB'den daha düşük iken bant genişliği yaklaşık 6,5 GHz bulunmuştur. Bu yüzden sadece absorpsiyon bant genişliği artmakla kalmaz, aynı zamanda elektromanyetik dalga için bu özelliklerin kaybı da iki tür emici tarafından geliştirilir (Zhang ve Sun 2012).

Dalga absorpsiyon malzemelerinde kullanılan liflerin çoğu, birkaç mikron çapa sahiptir ve bu nedenle maliyeti oldukça yüksektir. Bina inşaatında, milimetre çapındaki çelik lif ile çimento matrisi daha kuvvetli bir bağlanma dayanımına sahiptir ve hem lif hem de çimento, yükleri paylaşır ki bu da çimento kompozitlerinin dayanımını belirgin olarak arttırmaktadır. Çelik lif takviyeli betonun dalga absorpsiyon özellikleri üzerine yapılan çalışmalar, 31 mm kalınlığındaki numunenin 2-18 GHz frekans aralığında 9,8 dB pik değerini ve 4 dB için 15,28 GHz bant genişliği verdiğini göstermiştir (Yang vd. 2002). Ayrıca hem pik değeri, hem de bant genişliği çelik lifin boy/çap oranı arttıkça arttığını göstermiştir. Ancak lif boy/çap oranı bir eşik değere sahiptir ve bu kritik değer dışında, boy/çap oranının artmasıyla absorpsiyon etkinliği de önemli ölçüde azalacaktır.

Shi ve Chung (1995), çimento hamuruna doldurulmuş olan 0,79 mm çapında ve 31,8 mm uzunluğunda çelik kağıt ataçlarının manyetik kalkanlama etkinliğini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda hacimce %5 ilave edilen çelik ataçların, 0,6 mm çaplı bir çelik hasır kadar yüksek bir manyetik koruma sağlayabildiği belirtilmiştir. Ayrıca kullanılan çelik ataçların sürekli olmadığı, fakat iç içe geçmiş olan durumları manyetik kalkanlama için gereken sürekliliği sağladığı açıklanmıştır. Elektromanyetik darbe için kalkanlama etkinliğini sağlamak amacıyla takviye ağ ile kalkanlama odaları oluşturulmuştur (Bihua vd. 2000). Elektromanyetik darbe düzlem dalgası için kalkanlama etkinliği 20-40 dB olabilmekte ve ayrıca takviye ağının boyutuyla yakından ilişkili olduğunu da göstermektedir. Takviye çubuk ve ağ (örgü) ne kadar inceltirse, kalkanlama etkinliği de o kadar iyi olmaktadır (Reineix vd. 1987).

Çimento esaslı yapı malzemelerinde bir bileşen olarak atık metal çipler kullanılarak, elektromanyetik kalkanlama, dalga absorpsiyon özellikleri ve elektriksel özellik olarak dielektrik sabitleri araştırılmıştır (Cakir vd. 2017). Bu amaçla, çimentolu kompozitin üretiminde farklı endüstriyel alanlardan sağlanan atık çipler hacimsel olarak doğal kum ile yer değiştirilmiştir. Sonuç olarak, referans numune hemen hemen 7 dB bir kalkanlama etkinliğine sahipken, hacimsel olarak %60 demir çip içeren numunelerde 18 dB kalkanlama etkinliği saptanmıştır.

2.9. Geopolimerlerin Mikroyapısal Analizleri

2.9.1. Geopolimerler üzerinde XRD çalışmaları

Çeşitli bağıl nemlerde kurutulan alkali aktive edilmiş curuf (AAC) ve ham curufun XRD analizleri gösterilmiştir (Ye ve Radlinska 2016). Ham curuf, öncelikle

kristal jips izleri ve monoklinik alit bulunan amorf yapı içermektedir. $2\theta=30^\circ$ ile $31,6^\circ$ aralığındaki geniş ve dağınık pik, hidrate olmamış curufun $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ cam yapısının kısa aralıklı düzeninin bir sonucudur. Daha önceki araştırmalarla uyumlu olarak, alkali aktive edilmiş curufun ana hidrasyon ürünleri, C-S-H, hidrotalsit tipi fazlar ve portlandit olarak tanımlanmaktadır. Ek olarak, karıştırma, numune hazırlama ve ölçümler sırasında hafif karbonatlaşmaya bağlı olarak, aragonit ve kalsit tespit edilmiştir. Çeşitli bağıl nemlerde kurutma, alkali aktive edilmiş curuf numunelerinde farklı XRD paternleri neden olabilir. %11 bağıl nemde yoğun kuruma, C-A-S-H'de tabakalar arası su kaybını gösteren, ara tabaka kalınlığında bir düşüşe neden olur. %70 bağıl nemde kurutulmuş numuneler için, %100 bağıl nemde kurutulanlara kıyasla, diğer pik yoğunlukları hemen hemen değişmeden kalırken, C-S-H'a karşılık gelen tepe yoğunluğunda (kütle fraksiyonu) önemli bir artış vardır. SPC'de oluşan C-S-H'den farklı olarak C-A-S-H nano yapısı nedeniyle, kuruma sorası alkali aktive edilmiş curufun öngörülen visko-elastik/visko-plastik mekanik tepkisi, SPC'den muhtemelen daha farklıdır. XRD paterni, AAC'de oluşturulan C-S-H'nin, SPC'de oluşan C-S-H'den daha kristal olduğunu göstermektedir, zira aratabaka d-aralığına ($\sim 12,5 \text{ \AA}$) tekabül eden tepe noktası hidrate olmuş SPC'de gözlenmemektedir.

Bununla birlikte, XRD senkronografi kullanan bir çalışmada, AAC'deki C-A-S-H'nin sadece $\sim 15 \text{ \AA}$ 'a kadar tutarlı atom-atom korelasyonlarını içerdiğini ve SPC'dekinden (hidrate C_3S için $\sim 40 \text{ \AA}$ 'a kadar) daha küçük olduğunu ortaya koymaktadır (White vd. 2015). Bu C-A-S-H nanopartiküllerinin yüzeyindeki atomların daha düzensizce dizildiğini ve muhtemelen parçacıklar arası sınırlar boyunca C-A-S-H'nin sürüklenmesini ve kaymasını arttırdığını ve komşu C-A-S-H parçacıklarının etkileşimine katkıda bulunduğunu göstermektedir. C-A-S-H'nin nanoyapısına dahil edilen veya C-A-S-H'nin yüzeyinde adsorbe edilen alkali katyonu, hem AAC hem de SPC içeren alkaliler için viskoz büzülme performansından sorumlu olma olasılığı yüksektir. C-A-S-H'nin nanoyapısındaki (ara tabaka) veya yüzeydeki alkali bağlanma bölgelerinin ayırt edilmesinin günümüzde mevcut analitik teknikler yoluya zor olduğu belirtilmiştir (Ye ve Radlinska 2016).

Orijinal curufun yaklaşık $30\text{-}31^\circ 2\theta$ arasındaki geniş ve dağınık zirvesi $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-SiO}_2$ cam yapısının kısa aralıklı sıralamasını yansıtmaktadır (Wang ve Scrivener 1995). Daha sonraki yaşlarda tepe noktası, C-S-H jel oluşumundan dolayı 2θ 'dan biraz daha küçük bir değere kaymaktadır. Hem NaOH ile hem de Na_2SiO_3 ile aktive edilen karışımlar için yaklaşık $3,03 \text{ \AA}$ 'da amorf kambur üzerine bindirilmiş bir tepe belirlenmiştir. Bu, zayıf kristalin C-S-H yansımasına atfedilebilir, ayrıca kısmen karbonatlaşma sonucu kalsitten kaynaklanıyor da olabilir ancak bu aşamaya ait kanıt bulunmamıştır. NaOH curuf hamurlarında oluşan hidrasyon ürünlerinin, cam suyu hamurlarında oluşanlardan daha fazla kristal olduğu açıktır. NaOH ile aktive edilen hamurlarda $7,6, 3,82, 2,57, 2,28$ ve $1,94 \text{ \AA}$ 'da, Gastuche vd. (1967) tarafından verilen hidrotalsitlere tekabül eden tepe noktaları bulunmaktadır. Hidrotalsitin kendisi, $\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ formülü olan doğal bir mineraldir ve ara katman su molekülleri ve CO_3^{2-} iyonlarıyla brusit tipi tabakalara dayanan bir yapıya sahiptir. Bu tip fazlar Portland çimentosu/curuf karışımı hamurlarda daha önceki diğer araştırmalarda da tespit edilmiştir (Richardson ve Groves 1992).

NaOH ve Na_2SiO_3 ile alkali aktive edilmiş curuf hamurlarında 9 \AA tipi yapıya ($\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{17}\cdot\text{H}_2\text{O}$) sahip bir kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) gözlenmiştir

(Deventer vd. 2014). Bu faza ($29,5^\circ 2\theta$) verilen ana yansıma keskinleşmiş ve reaksiyon ilerledikçe daha yoğun olduğu gözlenmiştir. Çift katmanlı hidroksit hidrotalsit ($Mg_6Al_2CO_3(OH)_{16} \cdot 4H_2O$) oluşumu, kalsiyum karbonat kalsitinin izleri ve vateritin ($CaCO_3$ 'ün tüm polimorfları) izlenmesiyle birlikte gözlenmiştir. Hidrotalsit, kullanılan aktivatörden bağımsız olarak alkali aktive edilmiş curuf hamurlarında Mg mevcut olduğunda ana reaksiyon ürünlerinden biridir (Haha vd. 2011). Bu numunelerde karbonat oluşumu, tutma, parçalama ve/veya analiz esnasında numunelerin yüzeysel olarak aşınması ile bağlantılıdır. Katoit izleri (silisli hidrogarnet, $1,5 \leq x \leq 3,0$ olmak üzere $Ca_3Al_2(SiO_4)_{3-x}(OH)_{4x}$) 90 günlük kütleme sonrasında tespit edilmiştir.

2.9.2. Geopolimerler üzerinde SEM gözlemleri

Mozgowa ve Deja (2009), curuf esaslı geopolimerlerin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntülerinde, numunenin mikroyapısının çok kompakt olup, hamurun ana bileşeni olan amorf C-S-H fazının oluşumu ile açıklanabileceğini belirtmişlerdir. Tanecikler arası boşluklar, ya bütünleşik kompakt madde ya da küçük izometrik granüller oluşturur ki, bahsedilen bu faz, geopolimerin granülleri üzerinde oluşmaktadır. Ayrıca otoklavlama, kompakt olmayan mikroyapının noktalarında ve gözeneklerinde iyi gelişmiş plakalar (thomberito benzeri C-S-H fazı) gösterdiği belirtilmiştir.

SEM ile incelenen geopolimer onarım malzemeleri farklı yaşlarda oldukça farklı mikroyapıya sahip olduğu gözlenmiştir (Hu vd. 2008). Birçok durumda, çözülmemiş curuf parçacıklarının nihai alüminosilikat matris yapısına bağlanmasından, bir yüzey reaksiyonunun sorumlu olduğu belirtilmiştir. Reaksiyona giren curuf parçacıkları amorf alüminosilikat matrise sabitlenmiş gibi görünmektedir. 28 günlük yaşta $20 \pm 0.5^\circ C$, %95 bağıl nemdeki geopolimer onarım malzemelerinin, 1 günlük yaştaki malzemelerden daha kompakt yapıya sahip olduğu ayrıca çelik curuf parçacıklarının sodyum silikat çözeltisiyle neredeyse tamamen reaksiyona girdiği ve SEM'de gözlenemediği belirtilmiştir. Bu durum ise 28 günde basınç ve bağ kuvvetlerinin daha yüksek olmasının sebebi olarak açıklanmıştır.

Al-Majidi vd. (2016), çekme deneylerinin bitiminden sonra çelik lif takviyeli ve takviyesiz geopolimer kompozitlerin SEM görüntülerini elde etmiş ve geopolimer hidrasyon ürünleri ile bağlanmış nispeten kaba çelik bir lif yüzeyi gözlemlemişlerdir. Bu gözlem geopolimer matrisi ve lifler arasındaki nispeten iyi bağa bağlanmıştır. Ayrıca çelik liflerin değişmemiş olan çapı ve nispeten temiz açıkta kalan lif yüzeyleri, alkali geopolimer matrisinin, çelik lifler üzerinde önemsiz derecedeki bozunma etkisini göstermiştir.

Silis dumanı içermeyen ve %10 silis dumanı içeren curuf esaslı geopolimer beton numunelerinin SEM görüntüleri elde edilmiştir (Rostami ve Behfarnia 2017). Silis dumanı içermeyen numunelerin hamur matrisi içerisinde, gözenekler ve curuf tanecikleri arasında çok sayıda boş alan bulunduğu gözlenmiştir. Bu boş alanlar ve gözenekler betonun geçirgenliği üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. %10 silis dumanı ihtiva eden numunelerin görüntülerinde ise beton hamurundaki gözenekleri, silis dumanı parçacıklarının doldurduğu ve aynı zamanda matristeki parçacıklar arası boş alanları da dolduran C-S-H jelini oluşturduğu gözlemlenmiştir. Böylece, silis dumanının

kullanılması porozite ve permeabilityyi azaltarak, curuf esaslı geopolimer betonun durabilitesini ve mekanik özelliklerini arttırabileceği sonucuna varılmıştır.

Sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktive edilmiş curuf hamurunun mikroyapısal gelişimi için çeşitli kürlleme sürelerinde SEM mikrografisi analiz edilmiştir (Gebregziabiher vd. 2015). NaOH ile aktive edilen curuf karışımları, curuf ve aktivatörü birleştirdikten hemen sonra, sistemin matrisinde olduğu gibi tekli curuf tanelerinin etrafında da hızlı ürün oluşumu sergilemiştir. NaOH aktivatörü tarafından sağlanan yüksek derecede alkali ortamı, curufun derhal çözünmesi ve müteakip ürün oluşumu ile sonuçlandığı görülmüştür. Matristeki reaksiyona girmemiş curuf taneleri ve aktive jel ürünleri (dış ürünler) olmak üzere ayırdelebilir iki ana faz ile, mikroyapı 3 saat içerisinde tamamen geliştirilmiştir. 6 saat sonra, curuf taneleri etrafında bir reaksiyon halkası oluşumu (iç ürün) belirgindir, ancak başka hiçbir önemli farklılık gözlemlenmemiştir. İnce iç ürün kabuğu, curuf tanesinin çözülme derecesini sınırlayan, başlangıç reaksiyon süresince taneciklerin etrafında oluşmaktadır. İç ürün kabuğu aracılığıyla curuf tanesi içerisine aktivatör solusyonunun difüzyon derecesi, erken yaştaki mikroyapı gelişiminde önemli bir faktör haline gelir, çünkü ürünlerin oluşumu, gözenek solüsyonundaki iyonların bulunabilirliğine ve bunların iç ürün kabuğuna nüfuz etmesine bağlıdır (Gruskovnjak vd. 2006; Aydın ve Baradan 2012; Haha 2012). NaOH ile aktive edilen curuftaki mikroyapısal gelişimin, genellikle portland çimentosu hidratasyonu için kullanılan büzülen çekirdek modeli ve yer kütlesi (zemin-kütle modeli) modelleriyle karşılaştırılabileceği açıktır. Büzülen çekirdek modeli, gözenek solüsyonunun curuf tanelerine difüzyonuna bağlı olarak iç ürünlerin oluşumunu temsil eder ve böylece reaksiyona girmemiş curuf tanelerinin boyutunu azaltır (Haha 2011, Shi ve Day 1995). Zemin kütlesi modeli, çözeltideki ayrıışmış iyonlardan yeni ürünlerin çekirdeklenmesini göstermektedir (Shi ve Day 1995). Curuf taneleri etrafındaki ürün oluşum oranı, NaOH aktivatörünün molaritesine göre değişir. İç ürün kabuğu artan molarite ile nispeten ince olmaktadır, ancak yüksek molaritede iç ürün kabuğunun yoğunluğunun artmasıyla iyonik yayılmanın azaltıldığı da anlaşılmaktadır. Bu düşük difüzyonun bir sonucu olarak, büyük curuf taneleri reaksiyona girmeden kalır. Öte yandan düşük molaritede, gözle görülür büzülen çekirdekler gözlemlenebilmektedir.

Sodyum silikat ile aktive edilen curuf hamurundaki mikroyapısal gelişim, NaOH ile aktive edilen curufta gözlenenden oldukça farklıdır (Gebregziabiher vd. 2015). Sodyum silikat aktivatörleri curufun çözülmesini önemli ölçüde önlemekte ve ürün oluşumu, çözeltiden çekirdeklenme ile oluşmaktadır. Ayrıca görünür bir iç ürün halkası oluşumu gözlenmemiş ancak yer kütlesi içinde yoğun bir matris geliştirildiği belirtilmiştir. Ek olarak hidratasyon kinetiğinde önemli farklılıklara rağmen, silika modülü 2,5 olan sodyum silikatla aktive edilen curuftaki mikroyapısal gelişim, silika modülü 1,5 olanla çok benzer olduğu gözlemlenmekle birlikte, daha yüksek silika modülü ile biraz daha fazla ürün oluştuğu belirtilmiştir. Ayrıca sodyum silikat ile aktive edilen curuf, NaOH ile aktive edilen curufta gözlemlendiği gibi bir iç ürün halkasının oluşumuyla sonuçlanmamıştır (Gruskovnjak vd. 2006).

Wang ve Scrivener (1995), farklı yaşlardaki 4 M NaOH ve 2 M Na₂SiO₃ ile aktive edilen hamurların SEM görüntülerini elde etmişlerdir. Erken yaştaki numunelerde (1, 5, 7 günlük), hidratasyon ürünlerinin alkali çözeltisi tarafından işgal edilen curuf taneleri arasındaki boşlukta oluştuğunu ve bunların erken yaşlarda bir çözünme ve çökeltme mekanizması ile oluştuğuna işaret ettiği belirtilmiştir. Cam suyu

ile aktive edilmiş hamurlarda tüm ürünler homojen, amorf bir görünüme sahiptir ve farklı fazların çözöldüğüne SEM görüntülerinde rastlanılmamıştır. Bununla birlikte NaOH ile, yaklaşık 0,1-0,2 µm kalınlığında ve 15 µm'a kadar çapta farklı plakalar tanımlanmıştır. 5-7 gün sonra curuf parçacıklarının etrafında 0,5-1 µm kalınlığına kadar koyu renkli kenarlar oluşmuş, kenarların yaşlanmayla birlikte daha netleştiği ve kalınlaştığı görölmüştür (Ye ve Radlinska 2016).

3. MATERYAL ve METOT

Çalışma iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda, geopolimer harçları oluşturan bileşenlerin bazı fiziksel ve mikroyapısal özellikleri verilmiştir. Sonrasında, farklı karışım tasarımları kullanılarak hazırlanan numuneler üzerinde kür koşulları, bağlayıcı ve agrega içeriği gibi faktörlerin etkisini incelemek amacıyla fiziksel, mekanik, durabilite ve elektromanyetik özellikleri tayin edecek deneyler gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, agrega-geopolimer matris ara yüzey geçiş bölgesini araştırmak için SEM gözlemleri yapılmış ve sertleşmiş geopolimer matrisin öğütülmesiyle elde edilen toz numuneler üzerinde XRD analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında ise, geopolimer özellikleri için elde edilen deneysel verilerin varyans analizi (ANOVA) yapılmış ve bu çalışmada ele alınan dört tasarım faktörü açısından polinom regresyon modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen istatistiksel model, geopolimer karışımların optimizasyonunun çeşitli olası seçeneklerle nasıl gerçekleştirilebileceğini göstermek amacıyla kullanılmıştır.

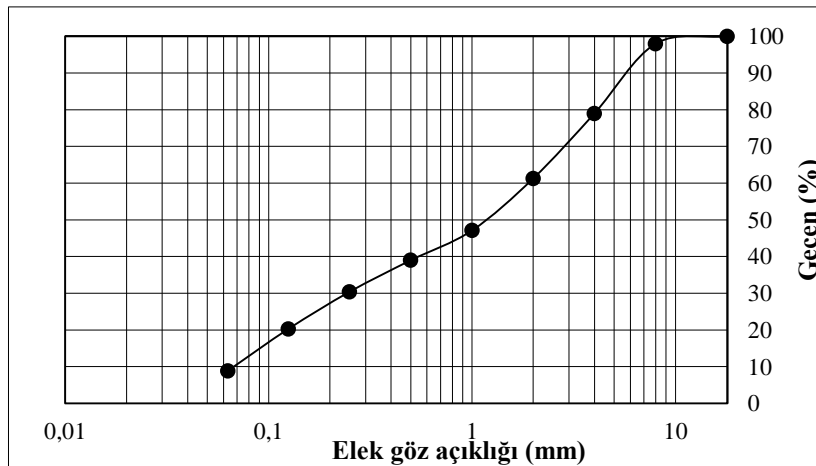
3.1. Geopolimer Harçların Üretiminde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

3.1.1. Agrega

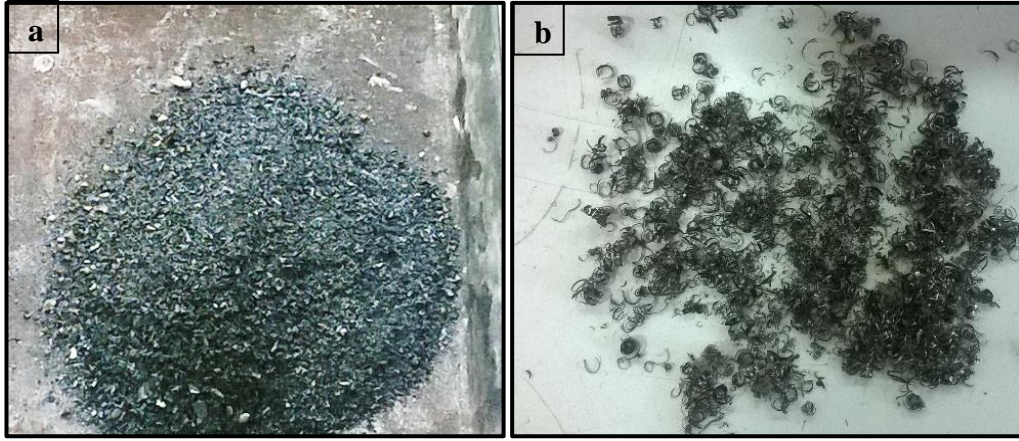
Çalışmada agrega olarak kullanılan granüle yüksek fırın curufu Antalya Eti Elektrometalurji A.Ş.'den temin edilmiştir. Agreganın elek analizi, TS 130'a göre yapılmış ve gradasyon eğrisi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Bileşenler için özgül ağırlık tayini ASTM C188-95'e göre Le Chatelier Balonu ve Balon Joje yöntemi ile yapılmıştır. Her iki yöntem ile elde edilen değerlerin ortalaması alınarak, özgül ağırlık değeri belirlenmiştir. Curuf agregasının özgül ağırlığı 3,03'tür. Agreganın gevşek ve sıkışık birim ağırlıkları ise ASTM C29-97'ye göre belirlenmiş ve sırasıyla 1,64 ve 1,72 g/cm³ olarak bulunmuştur.

Ayrıca agrega olarak karışıma ilave edilen demir ve çelik, metal işleme ve sektörü atıklarından sağlanmıştır. Demir özgül ağırlığı, 6,78, çeliğin özgül ağırlığı ise 7,31 olarak tayin edilmiş ve genel görünümü Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Curuf agregasının gradasyon eğrisi



Şekil 3.2. a) Demir tozu; b) Çelik parçacıkları görünümleri

3.1.2. Bağlayıcı

Çalışmada bağlayıcı olarak kullanılan öğütülmüş yüksek fırın curufu, İskenderun Demir ve Çelik A.Ş.'den temin edilmiştir. Silis dumanı ise, Antalya Eti Elektrometalurji A.Ş.'den sağlanmıştır. Silis dumanı ve öğütülmüş yüksek fırın curufunun özgül ağırlıkları ASTM C188-95'e göre tayin edilmiş olup, sırasıyla 2,275 ve 2,815'tir. Bağlayıcılar ve agrega olarak kullanılan curufun XRF analizi ile tayin edilen kimyasal ve elementel kompozisyonları Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Bağlayıcılar ve agreganın kimyasal kompozisyonları (%)

Oksit	Silis dumanı	Bağlayıcı curuf	Agrega curuf
Na ₂ O	2,15	1,13	1,39
MgO	14,32	7,725	10,64
Al ₂ O ₃	1,684	15,04	9,343
SiO ₂	78,02	31,44	13,09
P ₂ O ₅	0,02396	-	-
SO ₃	0,2984	0,3434	0,1752
Cl	0,02678	0,02592	0,02091
K ₂ O	1,097	0,4024	-
CaO	0,1931	41,92	56,49
TiO ₂	-	0,5262	0,04413
Cr ₂ O ₃	1,405	-	6,392
MnO	0,0560	0,5138	0,072
Fe ₂ O ₃	0,3170	0,5862	1,218
CuO	-	0,0863	-
ZnO	0,1950	-	-
SrO	-	0,09554	0,02081
ZrO ₂	< 0,068	< 0,068	< 0,068
Ba	-	0,1218	-

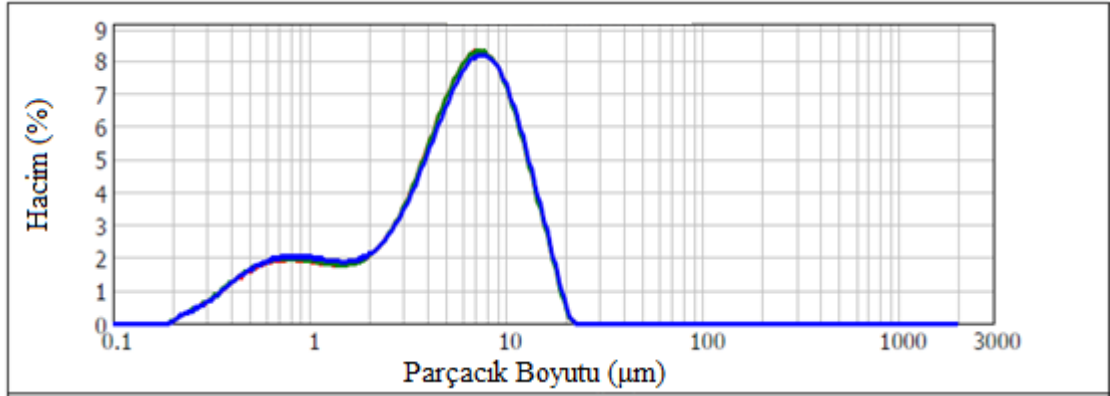
Çizelge 3.2. Bağlayıcılar ve agreganın elementel kompozisyonları (%)

Element	Silis Dumanı	Bağlayıcı curuf	Agrega curuf
Na	1,60	0,84	1,03
Mg	8,635	4,658	6,414
Al	0,8911	7,959	4,945
Si	36,47	14,70	6,116
P	0,01046	-	-
S	0,1195	0,1375	0,07018
Cl	0,02678	0,02592	0,02091
K	0,9108	0,3341	-
Ca	0,1380	29,96	40,37
Ti	-	0,3154	0,02645
Cr	0,9614	-	4,373
Mn	0,0434	0,3979	0,0555
Fe	0,2217	0,4100	0,8522
Cu	-	0,0690	-
Zn	0,1567	-	-
Sr	-	0,08079	0,01760
Zr	< 0,051	< 0,051	< 0,051
Ba	-	0,1218	-

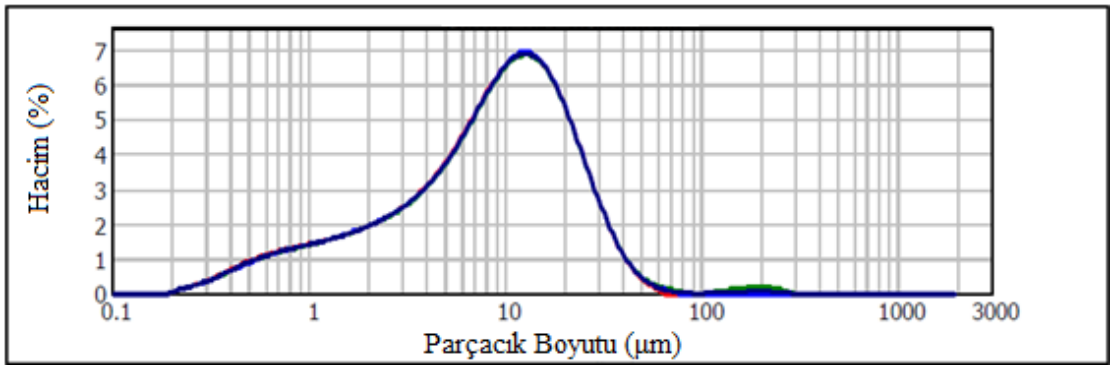
Bağlayıcıların parçacık boyut dağılımı, ODTÜ AR-GE Eğitim ve Ölçme Merkezinde Malvern Mastersizer 2000 cihazı ile yapılmıştır. Malzemelerin mukavemeti, içindeki tanecik boyutu karakteristiklerine bağlıdır. Küçük tanelerin boyutlarını ölçmek için Mie teorisi kullanılmaktadır (Eshel vd. 2004). Mie Teorisi, ışığın, ortam içerisinde tane boyu etrafındaki hem kırılmasını hem de geçirgenliğini dikkate almaktadır. Parçacık içerisinde geçen lazer ışığının saçılma açısı parçacık boyutuna bağlıdır. Parçacık boyutu düştükçe saçılma açısı logaritmik olarak artmaktadır. Büyük parçacıkların saçılma açıları düşük, saçılan lazer ışığının şiddeti yüksektir. Küçük parçacıklarda ise saçılma açısı yüksek, saçılan lazer ışığının şiddeti düşüktür. Çizelge 3.3, silis dumanı ve öğütülmüş yüksek fırın curufunun d(0,1), d(0,5), d(0,9) değerlerini ve özgül yüzey alanını göstermektedir. Ayrıca, silis dumanı ve öğütülmüş yüksek fırın curufunun parçacık boyut dağılımları sırasıyla Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te verilmiştir. Boyut dağılımı analizinde, silis dumanının ortalama parçacık boyutunun, curuftan daha küçük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca curufun %50'si 9,013 μ m'dan küçük iken, silis dumanının neredeyse %90'ının bu boyuttan küçük olduğu gözlenmiştir (d(0,9)=12,351 μ m).

Çizelge 3.3. Silis dumanı ve öğütülmüş yüksek fırın curufunun parçacık boyut dağılımı ve özgül yüzey alanları

Malzeme	Yüzey alanı (m ² /g)	Parçacık boyut dağılımı (μ m)		
		d(0,1)	d(0,5)	d(0,9)
Silis dumanı	2,79	0,766	5,479	12,351
Curuf	1,87	1,251	9,013	24,282



Şekil 3.3. Silis dumanının parçacık boyut dağılımı



Şekil 3.4. Öğütülmüş yüksek fırın curufunun parçacık boyut dağılımı

3.1.3. Alkali aktivatör

Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır.

Pelet halinde bulunan NaOH 'ın saflığı %98'den fazladır ve moleküler ağırlığı 40 g/mol'dür. Sodyum hidroksit peletlerinin saf su içerisinde çözünmesiyle, 8 molar (M) konsantrasyonda sodyum hidroksit çözeltisi hazırlanmıştır. Hazırlandıktan sonra 24 saat boyunca dinlendirilen çözeltinin özgül ağırlığı 1,236 olarak bulunmuştur.

Na_2SiO_3 için kimyasal değerler ise $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=2$, % $\text{Na}_2\text{O}=14,9$, % $\text{SiO}_2=29,8$ olarak verilmiştir. Sodyum silikatın özgül ağırlığı 1,425'tir.

Hazırlanan sodyum hidroksit çözeltisi ile likit durumdaki sodyum silikat birbirleriyle karıştırılarak alkali solüsyonu hazırlanmıştır. Karışımda kullanılan sodyum hidroksit/sodyum silikat:1 (hacimsel olarak) alınmıştır.

3.2. Geopolimer Harçların Üretimi (Karışım Tasarım Yöntemi)

Geopolimer harçların üretimi, 1 dm^3 'lük hacimdeki karışım olarak tasarlanmıştır. Karışıma giren malzemelerin hacmi, her bir hacmin kendi yoğunluğuyla çarpılmasıyla kütleye dönüştürülmüştür. Agregalar geopolimer betonun toplam

hacminin %45'ini oluştururken, geri kalan hacmi alkali aktivatör ve bağlayıcı oluşturmaktadır.

Karışım aşaması şu şekilde gerçekleştirilmiştir: NaOH peletlerinin saf su içerisinde çözünmesiyle 8 M konsantrasyonda hazırlanmış olan NaOH çözeltisi ve likit haldeki Na_2SiO_3 karıştırılmıştır. Sonrasında curuf agregası ilave edilmiştir. Yaklaşık olarak 1 dakika boyunca mikserde karıştırıldıktan sonra metal atık olarak demir veya çelik ilave edilmiştir. Karıştırma işlemi devam ederken bağlayıcılar da (silis dumanı ve/veya öğütülmüş yüksek fırın curufu) karışıma dahil edilerek, toplamda 3 dakika boyunca mikser çalıştırılmıştır. Karışıma giren malzeme miktarları hacimsel olarak Çizelge 3.2'de verilmiştir. Karışım serilerinin her birinde aşağıdaki özellikler sabit tutulmuştur.

Sodyum hidroksit konsantrasyonu: 8 M

Sodyum hidroksit/sodyum silikat oranı:1 (hacimsel olarak)

Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı: 1,75 (hacimsel olarak)

S0C Karışım Serisi: Agregası olarak kullanılan granüle yüksek fırın curufu, çelik ile hacimce %2,5, 5, 7,5 ve 10 oranlarında yer değiştirilmiştir. Bağlayıcı olarak sadece öğütülmüş yüksek fırın curufu kullanılmıştır.

S0D Karışım Serisi: Agregası olarak kullanılan granüle yüksek fırın curufu, demir ile hacimce %10, 20, 30 ve 40 oranlarında yer değiştirilmiştir. Bağlayıcı olarak sadece öğütülmüş yüksek fırın curufu kullanılmıştır.

S20C Karışım Serisi: Agregası olarak kullanılan granüle yüksek fırın curufu, çelik ile hacimce %2,5, 5, 7,5 ve 10 oranlarında yer değiştirilmiştir. Bağlayıcı olarak kullanılan öğütülmüş yüksek fırın curufu, hacimce %20 silis dumanı ile yer değiştirilmiştir.

S20D Karışım Serisi: Agregası olarak kullanılan granüle yüksek fırın curufu, demir ile hacimce %10, 20, 30 ve 40 oranlarında yer değiştirilmiştir. Bağlayıcı olarak kullanılan öğütülmüş yüksek fırın curufu, hacimce %20 silis dumanı ile yer değiştirilmiştir.

S40C Karışım Serisi: Agregası olarak kullanılan granüle yüksek fırın curufu, çelik ile hacimce %2,5, 5, 7,5 ve 10 oranlarında yer değiştirilmiştir. Bağlayıcı olarak kullanılan öğütülmüş yüksek fırın curufu, hacimce %40 silis dumanı ile yer değiştirilmiştir.

S40D Karışım Serisi: Agregası olarak kullanılan granüle yüksek fırın curufu, demir ile hacimce %10, 20, 30 ve 40 oranlarında yer değiştirilmiştir. Bağlayıcı olarak kullanılan öğütülmüş yüksek fırın curufu, hacimce %40 silis dumanı ile yer değiştirilmiştir.

S60C Karışım Serisi: Agregası olarak kullanılan granüle yüksek fırın curufu, çelik ile hacimce %2,5, 5, 7,5 ve 10 oranlarında yer değiştirilmiştir. Bağlayıcı olarak kullanılan öğütülmüş yüksek fırın curufu, hacimce %60 silis dumanı ile yer değiştirilmiştir.

S60D Karışım Serisi: Agregası olarak kullanılan granüle yüksek fırın curufu, demir ile hacimce %10, 20, 30 ve 40 oranlarında yer değiştirilmiştir. Bağlayıcı olarak kullanılan öğütülmüş yüksek fırın curufu, hacimce %60 silis dumanı ile yer değiştirilmiştir.

Çizelge 3.4. Karışıma giren malzeme hacimleri (dm³)

Seri Kod	Karışım Kod	Na ₂ O ₃	NaOH çözeltisi	Bağlayıcı Curuf	Silis Dumanı	Agrega Curuf	Demir	Çelik
S0C	S0	175	175	200	-	450	-	-
	S0C2,5	175	175	200	-	438,75	-	11,25
	S0C5	175	175	200	-	427,50	-	22,50
	S0C7,5	175	175	200	-	416,25	-	33,75
	S0C10	175	175	200	-	405	-	45
S0D	S0D10	175	175	200	-	405	45	-
	S0D20	175	175	200	-	360	90	-
	S0D30	175	175	200	-	315	135	-
	S0D40	175	175	200	-	270	180	-
S20C	S20	175	175	160	40	450	-	-
	S20C2,5	175	175	160	40	438,75	-	11,25
	S20C5	175	175	160	40	427,50	-	22,50
	S20C7,5	175	175	160	40	416,25	-	33,75
	S20C10	175	175	160	40	405	-	45
S20D	S20D10	175	175	160	40	405	45	-
	S20D20	175	175	160	40	360	90	-
	S20D30	175	175	160	40	315	135	-
	S20D40	175	175	160	40	270	180	-
S40C	S40	175	175	120	80	450	-	-
	S40C2,5	175	175	120	80	438,75	-	11,25
	S40C5	175	175	120	80	427,50	-	22,50
	S40C7,5	175	175	120	80	416,25	-	33,75
	S40C10	175	175	120	80	405	-	45
S40D	S40D10	175	175	120	80	405	45	-
	S40D20	175	175	120	80	360	90	-
	S40D30	175	175	120	80	315	135	-
	S40D40	175	175	120	80	270	180	-
S60C	S60	175	175	80	120	450	-	-
	S60C2,5	175	175	80	120	438,75	-	11,25
	S60C5	175	175	80	120	427,50	-	22,50
	S60C7,5	175	175	80	120	416,25	-	33,75
	S60C10	175	175	80	120	405	-	45
S60D	S60D10	175	175	80	120	405	45	-
	S60D20	175	175	80	120	360	90	-
	S60D30	175	175	80	120	315	135	-
	S60D40	175	175	80	120	270	180	-

3.3. Taze Harçlar Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler

3.3.1. Taze harç kıvam tayini

Taze harçların kıvam tayini TS 1015-3'e göre, üretimden hemen sonra taze harçlar üzerinde yapılmıştır. Deney yönteminde, kesik koni şeklindeki kalıp, yayılma

tablasının tam ortasına yerleştirilerek, iki tabaka halinde harç ile doldurulmuştur. Her bir tabaka farklı yerlerinden en az 10 kez şişlenerek sıkıştırılmıştır. Fazla gelen harç, palet bıçağı ile kalıbın tepesinden alınarak, ve kalıp tabanı etrafındaki alan bir bezle temizlenerek koni kaldırılmıştır. Yayılma tablasının kolu saniyede 1 defa olmak üzere döndürülerek 15 defa düşürülmesi sağlanmıştır. Yayılan harcın çapı birbirine dik açılarla ölçülerek her iki sonucun ortalaması alınarak raporlanmıştır.

3.3.2. Taze harcın birim hacim kütlesi tayini

Taze harçların birim hacim kütlesi TS 1015-6'ya göre bulunmuştur. Deney yöntemi, bilinen hacimdeki harç kütlesinin hesaplanmasını içermektedir. Yöntem, yayılma tablası deneyi ile belirlendiği üzere taze harcın kıvamına bağlı olarak gerçekleştirilmektedir.

- i) Yayılma değeri 140 mm'den daha düşük ise (kuru harç) – Vibrasyon yöntemi

Kalibre edilmiş kap, taşana kadar harç ile doldurulur, daha sonra titreşimli bir tabla üzerine yerleştirilir ve titreşim, malzemenin daha fazla yerleşmediği durum gözlenene kadar devam eder, gerektiğinde malzeme ilavesi yapılır. Kap daha sonra 1 gram hassasiyetle tartılır.

- ii) Yayılma değeri 140 mm ve 200 mm arasında ise (plastik kıvamda harç) – Şok yöntemi

Kalibre edilmiş kap, yüksekliğinin yaklaşık olarak yarısına kadar harçla doldurulur, daha sonra kap, karşılıklı kenarları üzerinde yaklaşık 30 mm kadar eğilir ve sağlam bir tabana 10 kez düşmesine izin verilir. Harcın hava sürükleyici katkı içermesi durumunda, şokların sayısı beşe indirilir. Kap daha sonra taşana kadar doldurulur ve şok sıkıştırması tekrarlanır. Kap, 1 gram hassasiyetle tartılır.

- iii) Yayılma değeri 200 mm'den daha büyük ise (akıcı kıvamda harç)

Kalibre edilmiş kap, taşana kadar doldurulur ve kabın kenarları nemli bir bez ile silinir ve kap, 1 gram hassasiyette tartılır.

Birim hacim kütlesi (ρ_m , kg/m^3) aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\rho_m = (m_2 - m_1) / V_v \quad (3.1)$$

m_1 = boş kabın ağırlığı

m_2 = kap+harç ağırlığı

V_v = kabın hacmi

3.4. Sertleşmiş Harçların Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

3.4.1. Yığın yoğunluk, su emme ve görünür porozite

Yığın yoğunluk, absorpsiyon ve görünür porozite değerleri ASTM C 642-06 standartına uygun olarak elde edilmiştir. 40x40x160 mm'lik prizma numuneler kalıptan alındıktan sonra, 48 saat boyunca yaklaşık 23 °C'lik normal kür ve 60 °C'lik sıcak kür olmak üzere iki ayrı su kürü koşuluna tabii tutulmuştur. Kürlerden alınan numunelerin yüzeyi bir havlu ile yüzey nemi alınarak kurutulmuş ve kütle belirlenmiştir. Yüzey kuru kütlesi B olarak adlandırılmıştır. Numune askıda duran bir tel aracılığıyla suya daldırılarak sudaki kütlesi belirlenmiş ve bu kütle ise C olarak isimlendirilmiştir. Ardından numuneler 48 saat boyunca 80 °C'lik sıcaklıktaki fırında kurutulmuştur. Her örnek fırından çıkarıldıktan sonra havada, 20-25 °C'lik bir sıcaklığa soğumaya bırakılmış ve kütle belirlenmiştir. Bu değer ise A olarak belirlenmiştir.

Yukarıda açıklanan prosedüre uygun olarak belirlenen değerler kullanılarak, sertleşmiş harç içerisindeki yığın yoğunluğu, su emme ve görünür porozite hesaplamaları aşağıdaki gibi yapılmıştır (Kockal 2008).

$$\text{Yığın yoğunluk (KURU)} = \frac{A}{B - C} \quad (3.2)$$

$$\text{Yığın yoğunluk (DYK)} = \frac{B}{B - C} \quad (3.3)$$

$$\text{Su emme (\%)} = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (3.4)$$

$$\text{Görünür Porozite (\%)} = \frac{B - A}{B - C} \times 100 \quad (3.5)$$

3.5. Sertleşmiş Harçların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

3.5.1. Yarmada çekme dayanımı

Harçların yarmada çekme dayanımı deneyleri TS EN 12390-6'ya uygun olarak 50x100 mm silindirik numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yük, darbe etkisi oluşturulmadan 0.5 kN/s'lik sabit bir hızda numune kırılıncaya kadar kesintisiz olarak uygulanmıştır.

Yarmada çekme dayanımının hesaplanması aşağıdaki gibidir.

$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi Ld} \quad (3.6)$$

f_{ct} : Yarmada çekme dayanımı, MPa

F : Uygulanan maksimum yük, N

L : Numunenin yükleme parçasına temas çizgisi uzunluğu, mm

d : Numunenin seçilen en kesit boyutu, mm

3.5.2. Eğilmede çekme ve basınç dayanımı

Sertleşmiş harç numunelerinin eğilmede çekme ve basınç dayanımları TS EN 196-1 standartına uygun şekilde tayin edilmiştir. Harçların eğilme dayanımları, 40x40x160 mm prizma numunelerinin üç noktadan yüklenmeleriyle bulunmuş ve kırılan numunelerin her bir parçası basınç dayanımı tayininde kullanılmıştır.

Eğilmede çekme dayanımı aşağıdaki eşitlikten hesaplanmıştır.

$$R_f = 1,5 \frac{F_f l}{b^3} \quad (3.7)$$

R_f : Eğilmede çekme dayanımı, MPa

F_f : Uygulanan yük, N

b : Numunenin kare kesitinin kenar uzunluğu, mm

l : Mesnet silindirleri arasındaki mesafe, mm

Basınç dayanımı ise aşağıdaki eşitlikten hesaplanmıştır.

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (3.8)$$

R_c : Basınç dayanımı, MPa

F_c : Kırılmadaki en büyük yük, N

A : Yükleme plakalarının alanı (40mmx40mm), mm²

3.6. Geopolimer Harçların Durabilite Özelliklerinin Belirlenmesi

3.6.1. Kılcal geçirimsizlik

TS EN 480-5 standartına uygun olarak, 48 saat 80°C etüvde kurutulmuş 40x40x160 mm'lik prizma numuneler alt yüzeylerinden su ile temas ettirilerek kılcal su emme deneyine tabii tutulmuştur. Numuneler suya değen alt kısmı hariç, diğer yüzeylerinden su emmesini önlemek için parafin ile kaplanmıştır. Kılcal yolla emilen su miktarları 24 saat sonrasında, numuneler tartılarak ölçülmüştür. Kılcal su emme katsayısı ise aşağıdaki bağıntıdan hesaplanmıştır.

$$k_c = \left(\frac{Q}{A}\right)^2 \times \frac{1}{t} \quad (3.9)$$

k_c : Kılcal su emme katsayısı (cm²/sn)

t : Ölçüm aralığı süresi (sn)

A : Kılcal su emme yüzeyi alanı (cm²)

Q : t zaman aralığında emilen su miktarı (cm³)

3.6.2. Kuruma büzülmesi

Kuruma büzülmesi deneyi, her karışım için 25x25x285mm prizma numuneler üzerinde ASTM C596-01'e göre yapılmıştır. Boy değişimi ölçümleri, 0,001mm hassasiyetteki komparatör ile gerçekleştirilmiştir.

Prizma numuneler, dökümden hemen sonra 24±1°C sıcaklık ve %60±5 bağıl nemin mevcut olduğu laboratuvar ortamında muhafaza edilmiştir. Numunelerin döküleceği kalıpların her iki ucuna, boy ölçme aleti uçlarının oturacağı pimler yerleştirilmiştir. Prizma numuneler dökümden 1 gün sonra kalıptan çıkarılmış, hemen sonrasında da ilk uzunluk okuması yapılmıştır. İkinci uzunluk okuması ilk okumadan 2 gün sonra gerçekleştirilmiş ve 90. güne kadar ölçümler periyodik olarak devam etmiştir.

Numunelerin boy kısaltmalarının hesabı aşağıdaki formül ile yapılmıştır (Koçkal, 2002).

$$B_d = \frac{L_0 - L_d}{L_0} \quad (3.10)$$

B_d : Numunenin d günlük boy değişim oranı (mm/mm)

L_0 : Numunenin ilk ölçülen başlangıç boyu (mm)

L_d : Numunenin d günlük ölçülen boyu (mm)



Şekil 3.5. Kuruma büzülmesi numunelerinin genel görünümü

3.6.3. Korozyon potansiyeli

Takviyeli betonun elektrokimyasal özelliklerine bağlı olarak aktif korozyonunu tayin etmek amacıyla yarı hücreli yöntem kullanılmıştır. Ölçümler, çubuk elektrot bakır/bakır sülfat (Cu/CuSO₄) yarı hücresine dayanan "Proceq Profometer" cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Aktif korozyonun başladığı noktaların belirlenmesi, yarı hücre

potansiyelinin bölgesel negatif değerlerinin yani korozyon potansiyelinin ölçülmesini içermektedir. Yarı hücre, bakır/bakır sülfat ile reaksiyona girmeyen bir dielektrik malzemeden oluşan rijit bir tüp, kapiler etki ile ıslak kalan gözenekli ahşap bir tapa ve doymuş bakır sülfat çözeltisi içerisine batırılmış halde bulunan bir bakır çubuktan oluşmaktadır. Çözelti, damıtılmış su içerisinde çözünmüş reaktif sülfat kristalleriyle hazırlanmıştır ve çözeltinin altında aşırı miktarda çözünmemiş kristal bulunduğu zaman doymuş olarak kabul edilmiştir.

Beton yüzeyi ile yarı hücre arasında düşük bir elektriksel dirençte sıvı köprüsü sağlamak amacıyla elektriksel bağlantı mekanizması kullanılmalıdır. Bu mekanizma ise gözenekli tapa ve beton eleman arasında elektriksel sürekliliği sağlayacak şekilde yarım hücrenin ucuna önceden ıslatılmış bir süngerin eklenmesi ile gerçekleştirilmiştir.

Ölçümler sonucunda elde edilen korozyon potansiyeli aralıkları ASTM C876'ya göre belirlenmiştir:

- i. Eğer bir alan üzerindeki potansiyeller -0.20 V'den daha pozitifse, o bölgede ölçüm anında %90'dan daha fazla ihtimalle takviyeli çelik korozyonu meydana gelmemiştir.
- ii. Eğer bir alan üzerindeki potansiyeller -0.20 V ve -0.35 V aralığını içeriyorsa, o bölgedeki takviye çeliğinin korozyon aktivitesi belirsizdir.
- iii. Bir alan üzerindeki potansiyellerin -0.35 V'den daha negatif olması durumunda, o bölgede ölçüm anında takviye çelik korozyonunun meydana gelme olasılığı %90'dan daha fazladır.

3 ay boyunca laboratuvar ortamında bekletilen numunelerin korozyon riski, yarı hücre ve korozyon koşulları arasındaki önerilen ilişkiye dayanarak değerlendirilmiştir.

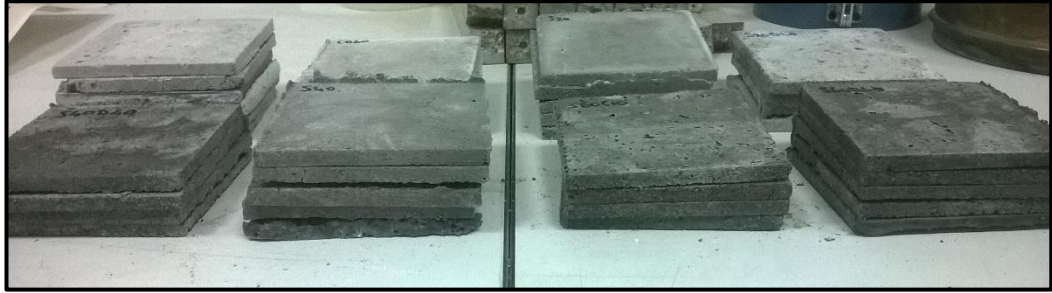


Şekil 3.6. Korozyon ölçüm düzeneği genel görünümü

3.7. Geopolimer Harçların Elektromanyetik Özelliklerinin Belirlenmesi

3.7.1. Elektromanyetik kalkanma etkinliği

Sertleşmiş harçlar üzerindeki elektromanyetik kalkanlama ölçümleri, Akdeniz Üniversitesi Endüstriyel ve Medikal Uygulamalar Mikrodalga Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (EMUMAM) yürütülmüştür. Ölçümler için 10 MHz – 9 GHz (Anritsu MS4624B) frekans aralığında çalışan bir vektör ağ analizi (VNA) kullanılmıştır. Kullanılan ağ analizörü her ölçümden önce kalibre edilmiş ve ölçümler 4.5 GHz – 7.5 GHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Her bir karışıma ait 7.6 ± 0.1 mm kalınlıktaki numuneler üretilmiştir.



Şekil 3.7. Elektromanyetik kalkanlama numunelerinin genel görünümü

3.8. Geopolimer Harçların Mikroyapısal Özelliklerinin Belirlenmesi

3.8.1. Geopolimer harçların XRD analizleri

XRD analizi katı ve toz örneklerin yapılarındaki çeşitli kristal formlar veya fazlar hakkında bilgi veren analitik bir tekniktir. Bu teknik, malzemenin içerdiği fazlar ve bu fazların konsantrasyonu, kristal olmayan fazların miktarı ve kristal boyutu hakkında bilgi vermektedir. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Araştırma Merkezinde Philips X'Pert Pro cihazıyla, toz haline getirilmiş hamur matrisi örneklerinin XRD analizleri yapılmıştır.

3.8.2. Geopolimer harçların SEM görüntüleri

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), malzemelerin yapılarını mikro ve nano boyutta görüntüleyebilmektedir. Kullanılan SE dedektörü ile topografik 3 boyutlu görüntü, BSE dedektörü ile atomik kontrasta bağlı 2 boyutlu görüntü sağlanmaktadır. Ayrıca EDX dedektörü ile de yapıların elementel içeriği nicel ve nitel olarak belirlenebilmekte ve elementlerin dağılımı izlenebilmektedir. Üretilen geopolimer harçların mekanik özelliklerinin belirlendiği numunelerden alınan küçük parçalar taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. SEM fotoğrafları, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Araştırma Merkezinde, elektron mikroskobu Philips XL 30S FEG kullanılarak 500, 1000, 2500 ve 5000 kez farklı büyütme ile elde edilmiştir.

3.9. Tepki Yüzey Metodolojisi ile Geopolimer Harçların Optimizasyonu

Tepki yüzey metodolojisi, olasılıkların geçerli bir bölgesindeki en iyi tepkiyi araştırmak veya en azından birden çok değişkenden etkilenen herhangi bir tepkiyi daha iyi anlamak için istatistiksel olarak temel bir tekniktir (Ferdosian ve Camoes 2017). 1950’de bu teknik, ilk önce çok-değişkenli ve çoklu-objektif optimizasyonlar durumunda karmaşık ilişkileri ve istenilen çıktıyı bulmak amacıyla sunulmuştur. Bu metodolojideki performans ölçümlerine ‘tepki’ adı verilmiştir. Bu deneysel tasarım yaklaşımının avantajları, deneysel bölgedeki faktörlerin etkileşiminin değerlendirilmesi, farklı önceliklere dayanan optimal tepkinin tanınması ve nihai olarak minimum deneysel emek ile verilerin geliştirilmiş bir modelinin geliştirilmesi olanağını içermektedir.

TYM, bir ilgi tepkisi ‘y’ ile x_1, x_2, \dots, x_k olarak ifade edilen bir dizi ilişkili girdi değişkenleri arasında yeterli bir fonksiyonel ilişkinin geliştirilmesinde kullanılan bir grup matematiksel ve istatistiksel tekniklerden oluşmaktadır (Khuri ve Mukhopadhyay 2010). Genel olarak böyle bir ilişki bilinmemekle birlikte, formun düşük dereceli bir polinom modeli ile tahmin edilebilmektedir.

$$y = f'(x)\beta + \epsilon \quad (3.11)$$

Burada, $x = (x_1, x_2, \dots, x_k)'$. $f(x)$, belirli bir dereceye kadar $d(\geq 1)$ ile gösterilen, x_1, x_2, \dots, x_k kuvvetlerinden ve kuvvetlerinin vektörel çarpımlarından oluşan p elemanlarının bir vektör fonksiyonudur. β , parametre olarak adlandırılan p bilinmeyen sabit katsayıların bir vektörüdür ve ϵ sıfır ortalamasına sahip olduğu kabul edilen rastgele deneysel bir hatadır. Bu durumda $f(x)\beta$, ortalama tepkiyi yani beklenen y değerini temsil eder ve μx ile gösterilmektedir.

TYM’de yaygın olarak kullanılan iki önemli model vardır. Bunlar özel model örnekleri olup birinci derece modelini ($d=1$);

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \epsilon \quad (3.12)$$

ve ikinci derece modelini ($d=2$) içermektedir.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j} \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \epsilon \quad (3.13)$$

modelin üç bölümden oluştuğu düşünülürse;

1. Girdi değişkenlerinin tepki değerlerini tahmin etmek için kullanılabilir, y ve x_1, x_2, \dots, x_k arasında yaklaşık olarak da olsa bir ilişki kurmak
2. Hipotez testi ile seviyeleri x_1, x_2, \dots, x_k ile temsil edilen faktörlerin önemini saptamak
3. Belirli bir ilgi bölgesi boyunca maksimum (veya minimum) tepki ile sonuçlanan x_1, x_2, \dots, x_k optimum ayarlarını belirlemek

Bu çalışmada tepki yüzey metodolojisi, üretilen geopolimer harçların mühendislik özellikleri üzerinde, agrega miktarı, bağlayıcı miktarı, agrega tipi ve kür koşulları olmak üzere 4 faktörün etkilerini araştırmak amacıyla kullanılmıştır. Bu amaçla Design Expert V10 yazılımı kullanılarak, su emme yüzdesi ve kuru yığın yoğunluk en düşük seviyede tutulurken, basınç, eğilmede çekme dayanımı ve elektromanyetik kalkanlama özelliklerini en iyi hale getirecek optimum üretim kombinasyonu bulunmuş ve sonuçlar analiz edilmiştir.

4. BULGULAR

4.1. BA'nın Yayılma Çapı ve Birim Hacim Kütlesi Üzerindeki Etkisi

Bağlayıcı tipi ve içeriği, agrega tipi ve içeriğini kapsayan parametreler tezin bundan sonraki kısımlarında "BA" olarak kodlanacaktır.

Tüm karışım serilerine ait yayılma çapı ve birim hacim kütlesi değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Sonuçlar, çelik lif ilavesinin hem portland çimento sisteminde hem de alkali aktive edilmiş sistemde akışkanlık üzerinde olumsuz bir etki yarattığına dair önceki araştırmalarla uyumludur. Aydın ve Baradan (2013), çelik lif takviyeli curuf/silis dumanı esaslı geopolimer harçların işlenebilirliğinin lif dozundaki artışa paralel olarak azaldığını gözlemlemişlerdir. Lif içermeyen geopolimer harçların yayılma çapı 156 mm iken, hacimsel olarak %1,5 dozajında 13 mm uzunluğundaki liflerin takviyesi ile yayılma çapınının 121 mm'ye düştüğü belirtilmiştir. Bununla birlikte Portland çimentosu sistemine ait lif takviyesiz ve hacimsel %1,5 lif takviyeli harçlar ise sırasıyla 169 mm ve 126 mm yayılma çapı değerleri verdiği belirtilmiştir.

Gao vd. (2017) tarafından alkali aktive edilmiş curuf-uçucu kül esaslı harçların uzun ve kısa lif katkılı yayılma çapları gösterilmiştir. Çelik lif içeriği arttıkça yayılma çapı genel olarak kademeli olarak azalmakta ve uzun çelik liflerin, kısa olanlardan daha önemli etki gösterdikleri belirtilmiştir. Lif takviyesi olmayan numuneler için yayılma çapı 25,9 cm iken kısa lif içeriği ağırlıkça %1'e yükseldiğinde yayılma 23,1 cm'ye düşmüştür. Benzer eğilimleri, uzun çelik lifleri içeren karışımlar da göstermiştir. Lif içeriği %0'dan %1'e yükseldiğinde, yayılma akışı kademeli olarak 25,9'dan 20,6'ya düşmekte ve bu düşüş kısa liflere kıyasla daha yüksek bir düşüşü göstermektedir.

Hammadde kompozisyonunun ve aktivatör modülünün işlenebilirlik üzerindeki etkisi araştırılmıştır (Gao vd. 2016). Aktivatör modülünün genel olarak yayılma üzerinde, curuf/uçucu kül oranına kıyasla daha belirgin bir etki sergilediği belirtilmiştir. 1,0 sabit aktivatör modülü olan numunelerde curuf/uçucu kül oranı 80/20'den, 40/60'a kaydırılırken yayılma çapı da 16,4'ten 18,7 cm'ye yükselmiştir. Benzer aktiviteler diğer aktivatör modülleriyle hazırlanmış karışımlarda da gözlenmiştir. Bu durum curuf ve uçucu kül arasındaki morfolojik farklılıkların sebep olduğu farklı su ihtiyacı ile açıklanabilmektedir, curuf genellikle daha açısız bir parçacık şekli ve daha geniş yüzey alanı sunar. Öte yandan curuf/uçucu kül oranının etkisi ile karşılaştırıldığında, farklı aktivatör modülüne sahip numunelerde daha yüksek akışkanlık aralığı gösterilmektedir.

Portland çimentosu sisteminde hazırlanan beton karışımlarında artan atık demir tozu oranı ile birlikte azalan bir çökme gözlemlendiği belirlenmiştir (Ismail ve Al-Hashmi 2008). Atık demir agregası içermeyen beton karışımlarının çökme değeri 7,50 cm olarak bulunmuştur. İnce agrega olarak kumun yerine %10, %15, %20 oranlarında demir tozunun ikamesi ile birlikte, çökme değerlerinin demir içermeyen referans karışıma göre sırasıyla %3,30, %4, %8 düştüğü belirtilmiştir. Bu eğilimin, karışımın akışkanlığını düşüren atık demir parçacıklarının heterojenliği ve açısız şekillerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Collins ve Sanjayan (1999), curuf esaslı geopolimer beton için bağlayıcı olarak curufun %10 oranında silis dumanı ile yer değiştirilmesinin, curuf esaslı geopolimerin

başlangıç çökmesini 115 mm'den 37 mm'ye düşürerek, işlenebilirliğin önemli ölçüde azaldığını belirtmişlerdir. Bu tipteki bir beton, düşük işlenebilirliği yenmek için bir süper akışkanlaştırıcı kullanmayı gerektirmiştir.

Çizelge 4.1. Taze harçların yayılma çapı ve birim hacim kütlesi değerleri

Seri Kod	Karışım Kod	Yayılma Çapı (cm)	Birim Hacim Kütlesi (kg/m ³)
S0C	S0	15,6	2378
	S0C2,5	12,45	2460
	S0C5	11,6	2501
	S0C7,5	10,9	2539
	S0C10	10,35	2572
S0D	S0D10	15,45	2580
	S0D20	14,5	2730
	S0D30	13,75	2921
	S0D40	12,45	3084
S20C	S20	>25	2460
	S20C2,5	20,9	2470
	S20C5	19,65	2488
	S20C7,5	15,15	2549
	S20C10	14,55	2567
S20D	S20D10	22,85	2567
	S20D20	22,35	2715
	S20D30	21,7	2875
	S20D40	21,15	3033
S40C	S40	>25	2419
	S40C2,5	23,3	2427
	S40C5	21,75	2450
	S40C7,5	19,6	2475
	S40C10	18,8	2506
S40D	S40D10	>25	2531
	S40D20	>25	2712
	S40D30	24,75	2821
	S40D40	24,15	3020
S60C	S60	>25	2409
	S60C2,5	>25	2417
	S60C5	22,9	2429
	S60C7,5	19,9	2465
	S60C10	19,15	2485
S60D	S60D10	>25	2521
	S60D20	>25	2707
	S60D30	>25	2771
	S60D40	>25	2962

4.2. KBA'nın Yığın Yoğunlukları Üzerindeki Etkisi

Kür koşulları, bağlayıcı tipi ve içeriği, agrega tipi ve içeriğinin (KBA), yığın yoğunlukları üzerine etkileri Şekil 4.1-16'da gösterilmektedir. Tezin bundan sonraki kısımlarında bahsi geçen parametreler "KBA" olarak kodlanacaktır.

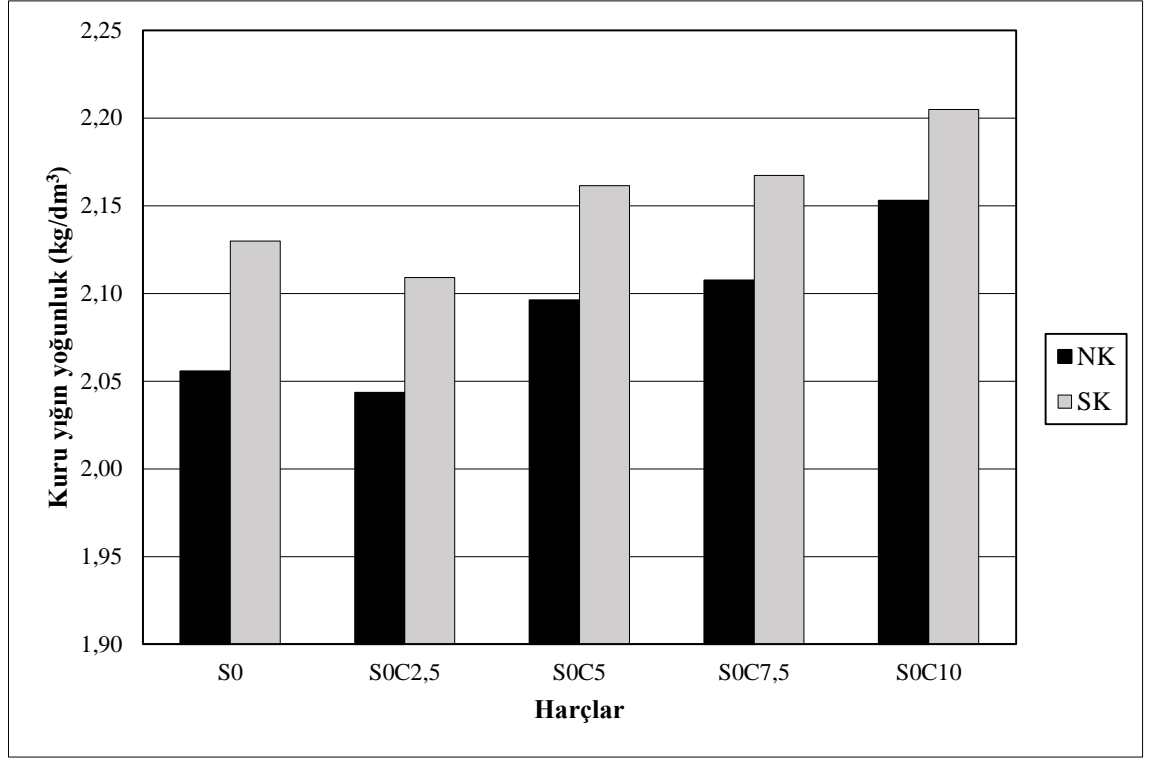
4.2.1. SC karışım serisi yığın yoğunluk değerleri

S0C karışım serisi dikkate alındığında, en düşük kuru yığın yoğunluk değerlerini normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 2,04 ve 2,11 kg/dm³ olmak üzere S0C2,5 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 2,15 ve 2,20 kg/dm³ olmak üzere S0C10 numunelerinde elde edilmiştir. En düşük doygun yüzey kuru yığın yoğunluk değerlerini ise normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 2,312 ve 2,315 kg/dm³ olmak üzere S0 kontrol numuneleri gösterirken, karışımdaki çelik yüzdesindeki artış ile birlikte yığın yoğunluklarında da bir artış görülerek en yüksek değerler sırasıyla 2,44 ve 2,46 kg/dm³ olmak üzere S0C10 numunelerinde elde edilmiştir.

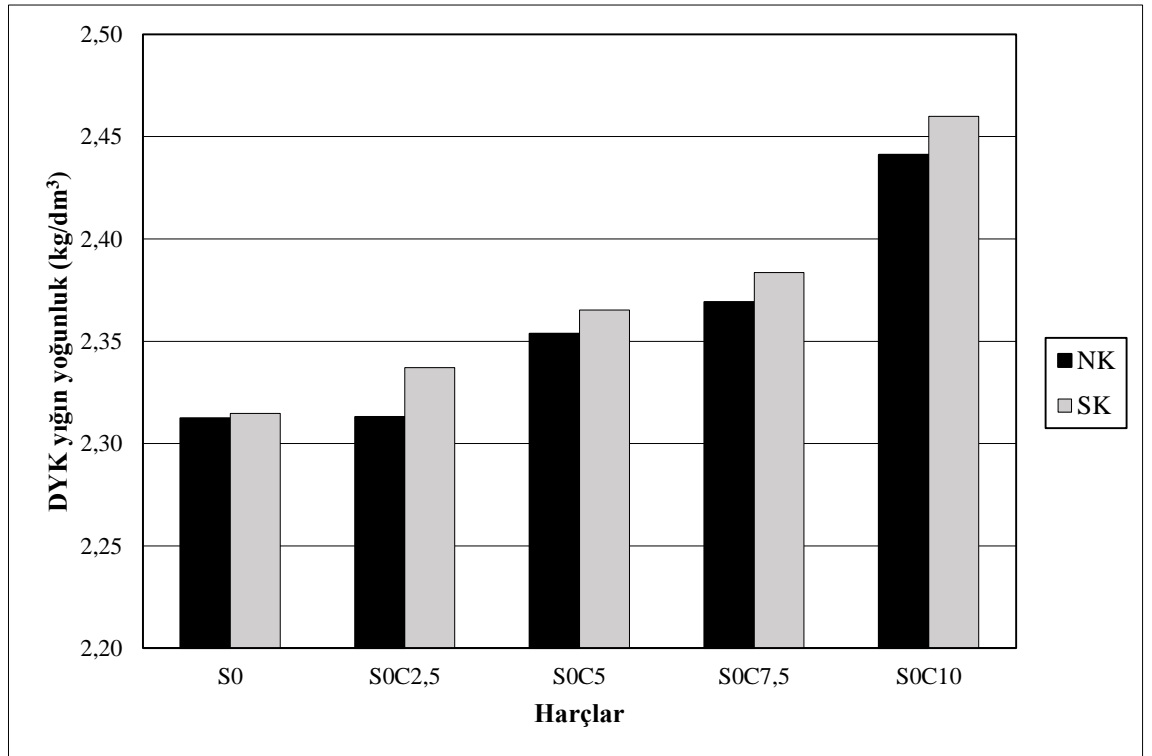
S20 karışım serisi dikkate alındığında, en düşük kuru yığın yoğunluk değerlerini normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 2,04 ve 2,07 kg/dm³ olmak üzere S20C5 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 2,08 ve 2,13 kg/dm³ olmak üzere S20C10 numunelerinde elde edilmiştir. En düşük doygun yüzey kuru yığın yoğunluk değerlerini ise normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 2,30 ve 2,32 kg/dm³ olmak üzere S20C5 kontrol numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 2,33 ve 2,35 kg/dm³ olmak üzere S20C10 numunelerinde elde edilmiştir.

S40 karışım serisi dikkate alındığında, en düşük kuru yığın yoğunluk değerlerini normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 2,04 ve 2,06 kg/dm³ olmak üzere S40 kontrol numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 2,09 ve 2,11 kg/dm³ olmak üzere S40C7,5 numunelerinde elde edilmiştir. En düşük doygun yüzey kuru yığın yoğunluk değerlerini ise normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 2,307 ve 2,315 kg/dm³ olmak üzere S40 kontrol numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 2,361 ve 2,364 kg/dm³ olmak üzere S40C7,5 numunelerinde elde edilmiştir.

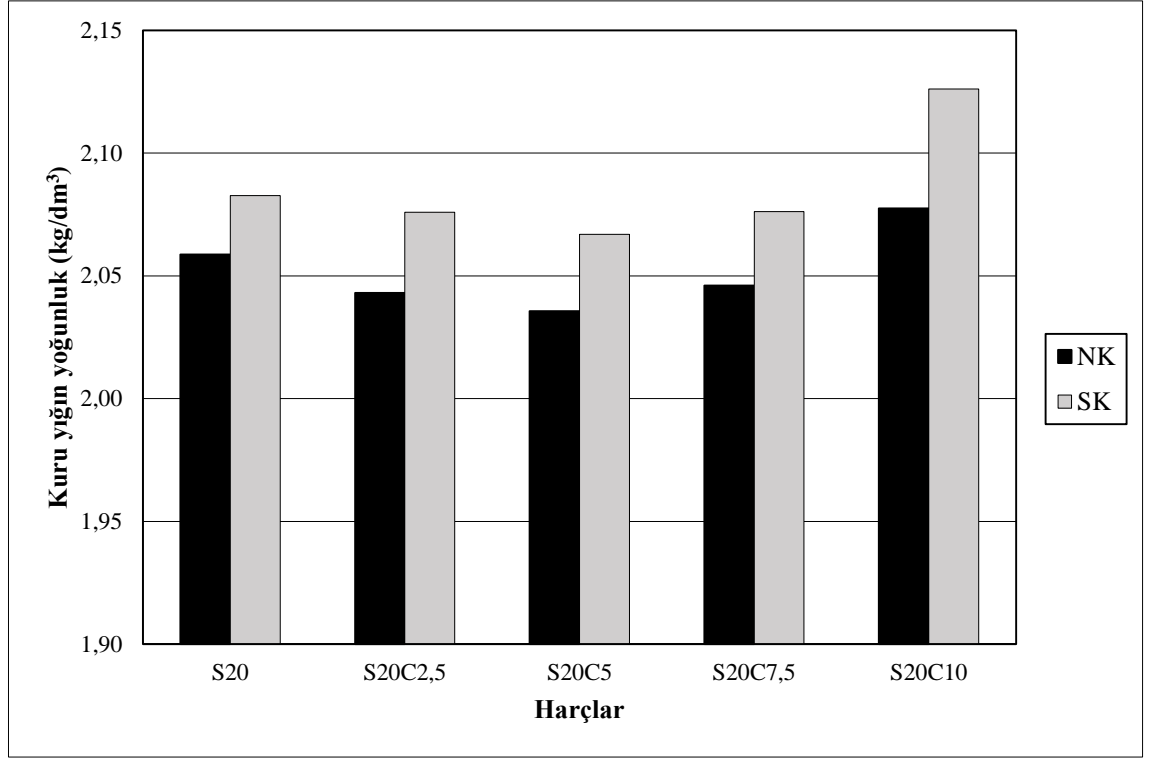
S60 karışım serisi dikkate alındığında, en düşük kuru yığın yoğunluk değerlerini normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 2,018 ve 2,030 kg/dm³ olmak üzere S60C10 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 2,06 ve 2,09 kg/dm³ olmak üzere S60C5 numunelerinde elde edilmiştir. En düşük doygun yüzey kuru yığın yoğunluk değerlerini normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 2,28 ve 2,29 kg/dm³ olmak üzere S60C10 kontrol numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 2,33 ve 2,34 kg/dm³ olmak üzere S60C5 numunelerinde elde edilmiştir.



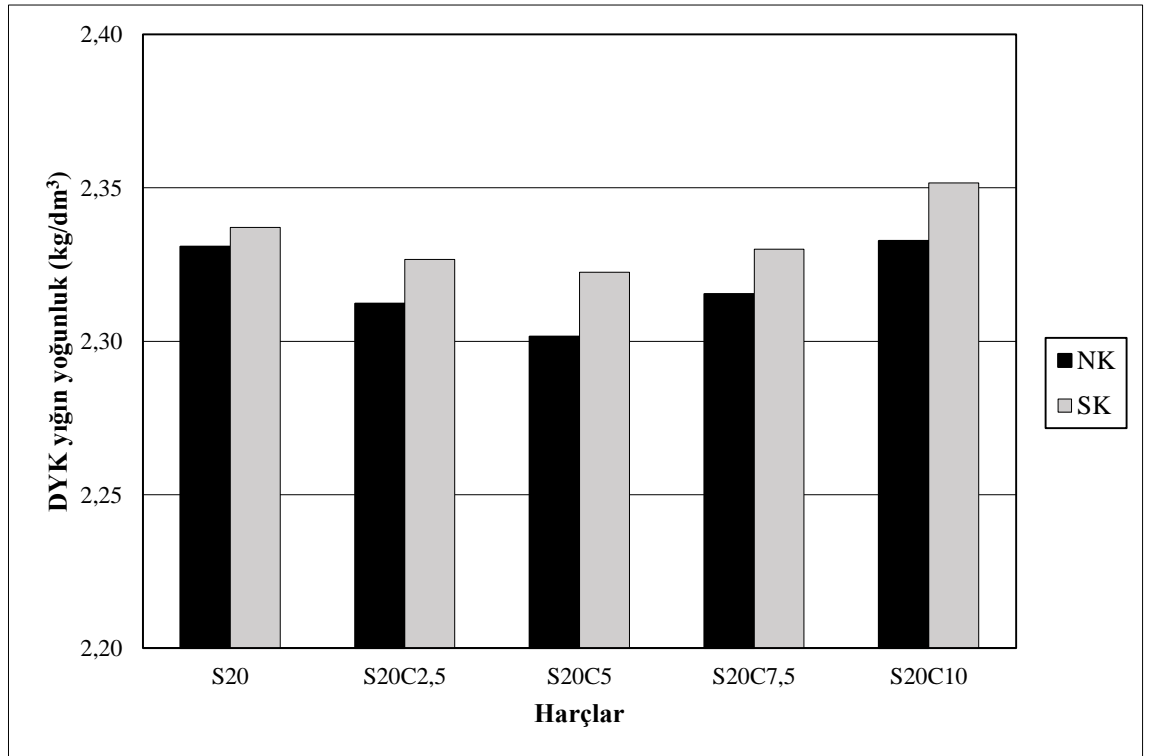
Şekil 4.1. SOC karışım serisinin kuru yağın yoğunluk değerleri



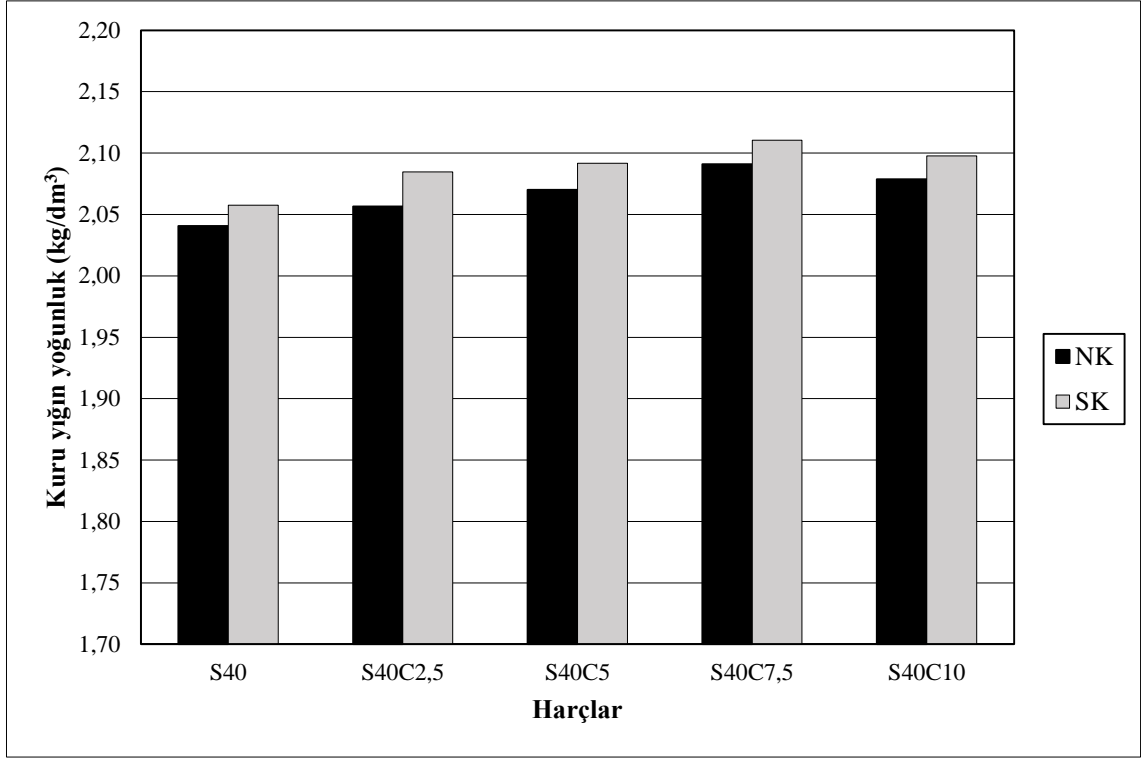
Şekil 4.2. SOC karışım serisinin doymun yüzey kuru yağın yoğunluk değerleri



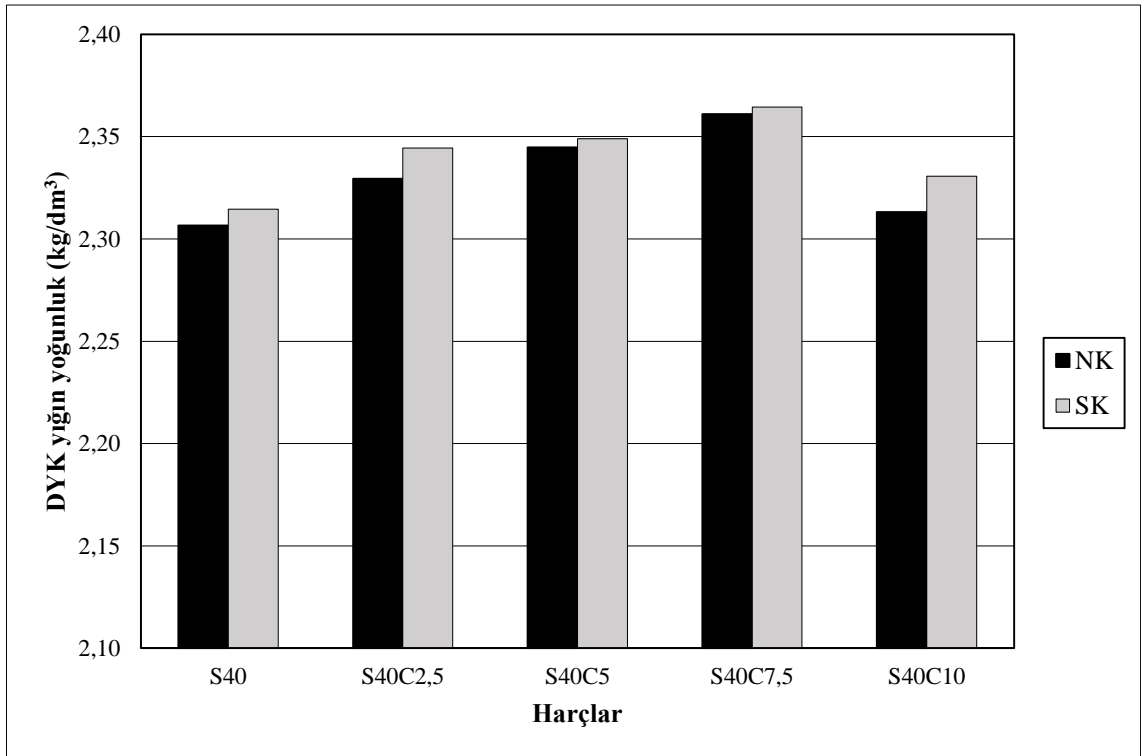
Şekil 4.3. S20C karışım serisinin kuru yığın yoğunluk değerleri



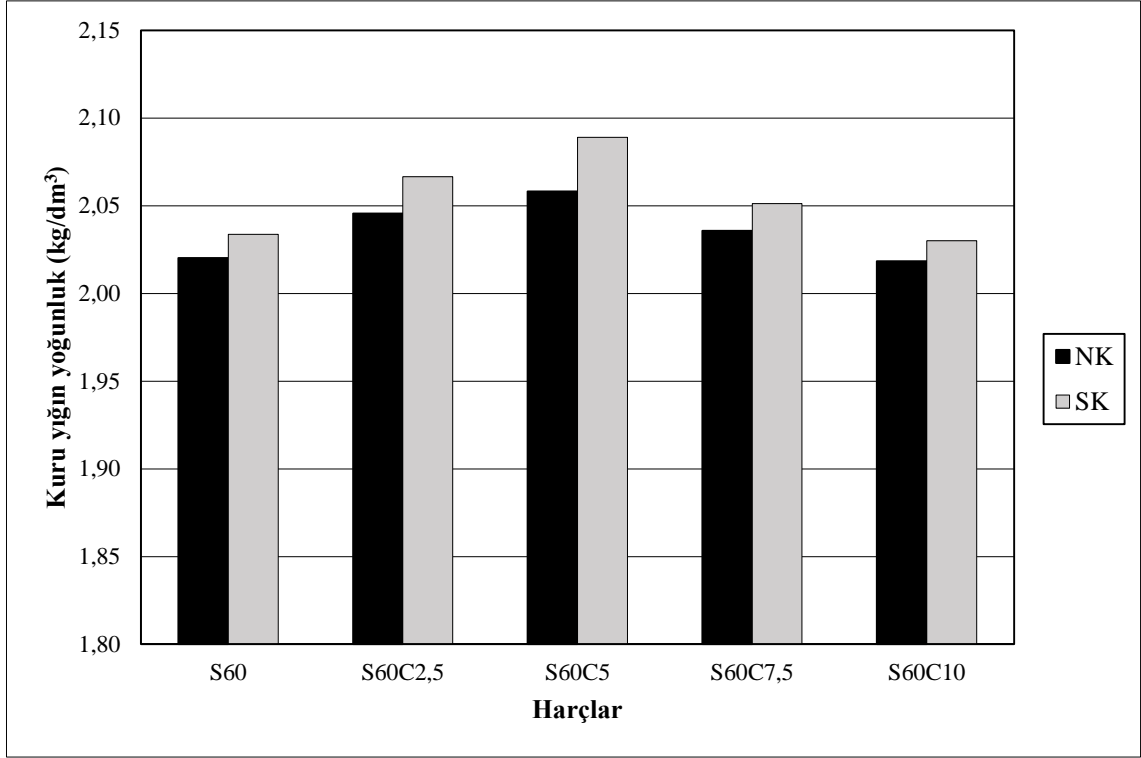
Şekil 4.4. S20C karışım serisinin doymun yüzey kuru yığın yoğunluk değerleri



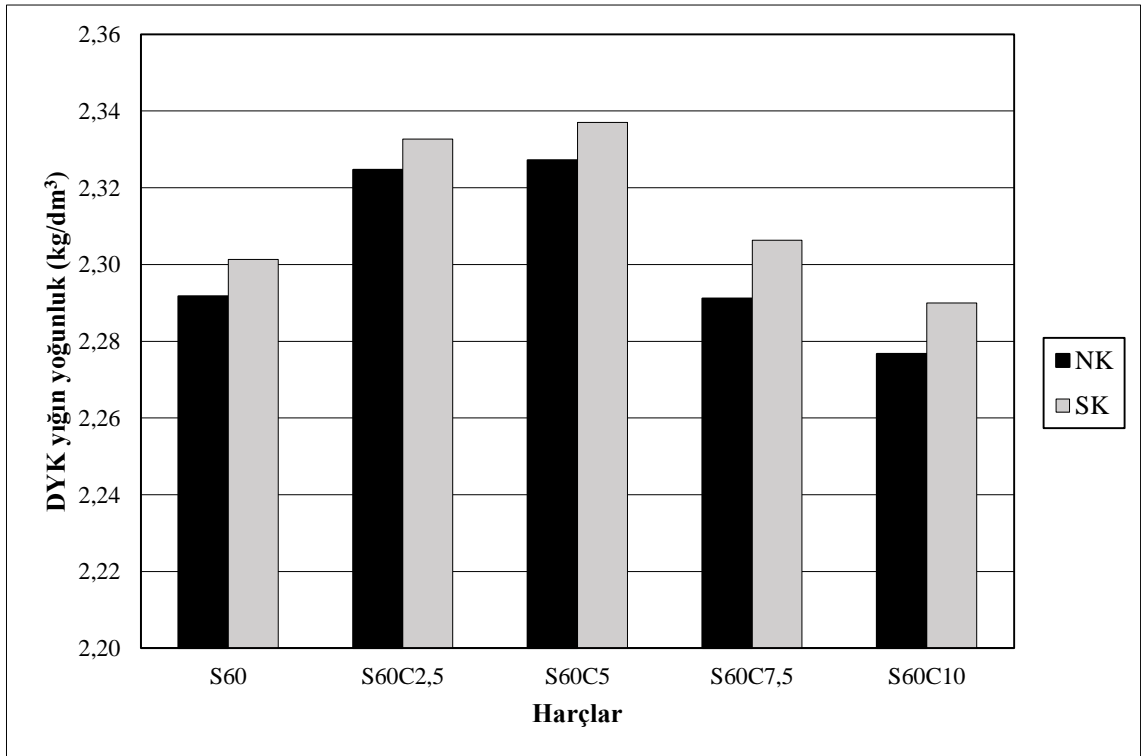
Şekil 4.5. S40C karışım serisinin kuru yığın yoğunluk değerleri



Şekil 4.6. S40C karışım serisinin doymun yüzey kuru yığın yoğunluk değerleri



Şekil 4.7. S60C karışım serisinin kuru yığın yoğunluk değerleri



Şekil 4.8. S60C karışım serisinin doymun yüzey kuru yığın yoğunluk değerleri

4.2.2. SD karışım serisi yığın yoğunluk değerleri

S0D karışım serisi dikkate alındığında, en düşük kuru yığın yoğunluk değerlerini normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 2,06 ve 2,13 kg/dm³ olmak üzere S0 kontrol numuneleri göstermiştir. Normal kür koşullarına tabii tutulan S0D10, S0D20, S0D30, S0D40 numunelerinde kontrol numunelerine kıyasla %6,2, %12,5, %19,5, %25,1 oranlarında, sıcak kür koşullarına tabii tutulan numunelerde ise sırasıyla %6,0, %11,5, %18,3, %22,0 oranlarında bir artış gözlenmiştir.

En düşük doygun yüzey kuru yığın yoğunluk değerlerini ise normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 2,312 ve 2,315 kg/dm³ olmak üzere S0 kontrol numuneleri göstermiştir. Normal kür koşullarına tabii tutulan S0D10, S0D20, S0D30, S0D40 numunelerinde kontrol numunelerine kıyasla %5,7, %11,3, %17,7, %22,3 oranlarında, sıcak kür koşullarına tabii tutulan numunelerde ise sırasıyla %6,3, %11,8, %17,8, %22,3 oranlarında bir artış gözlenmiştir.

S20D karışım serisi dikkate alındığında, en düşük kuru yığın yoğunluk değerlerini normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 2,06 ve 2,08 kg/dm³ olmak üzere S20 kontrol numuneleri göstermiştir. Normal kür koşullarına tabii tutulan S20D10, S20D20, S20D30, S20D40 numunelerinde kontrol numunelerine kıyasla %6,9, %11,9, %18,1, %23,8 oranlarında, sıcak kür koşullarına tabii tutulan numunelerde ise sırasıyla %6,5, %12,0, %19,4, %23,4 oranlarında bir artış gözlenmiştir.

En düşük doygun yüzey kuru yığın yoğunluk değerlerini normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 2,33 ve 2,34 kg/dm³ olmak üzere S20 kontrol numuneleri göstermiştir. Normal kür koşullarına tabii tutulan S20D10, S20D20, S20D30, S20D40 numunelerinde kontrol numunelerine kıyasla %5,6, %10,5, %15,3, %19,9 oranlarında, sıcak kür koşullarına tabii tutulan numunelerde ise sırasıyla %5,4, %10,7, %15,4, %20,6 oranlarında bir artış gözlenmiştir.

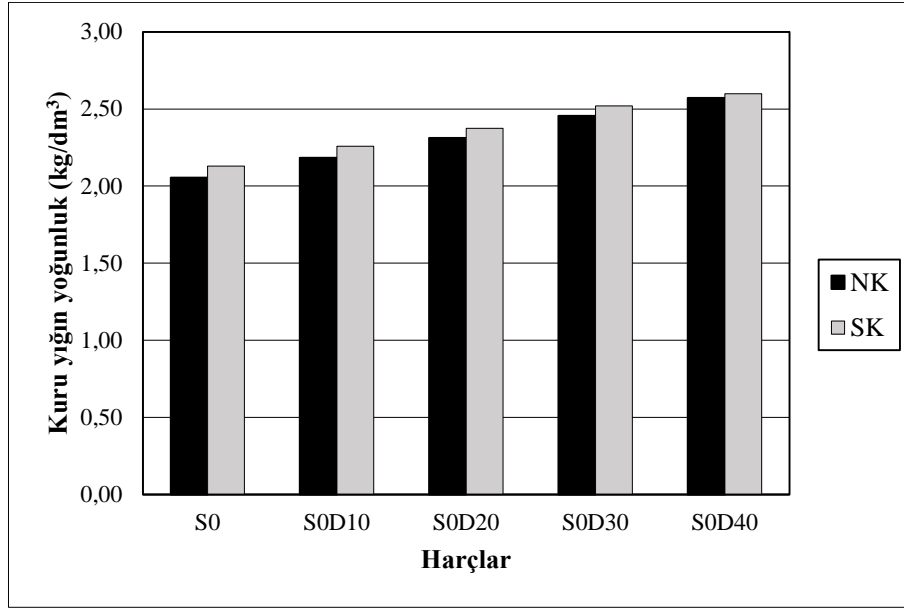
S40D karışım serisi dikkate alındığında, en düşük kuru yığın yoğunluk değerlerini normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 2,04 ve 2,06 kg/dm³ olmak üzere S40 kontrol numuneleri göstermiştir. Normal kür koşullarına tabii tutulan S40D10, S40D20, S40D30, S40D40 numunelerinde kontrol numunelerine kıyasla %7,3, %12,2, %18,2, %22,2 oranlarında, sıcak kür koşullarına tabii tutulan numunelerde ise sırasıyla %9,4, %16,2, %21,1, %23,3 oranlarında bir artış gözlenmiştir.

En düşük doygun yüzey kuru yığın yoğunluk değerlerini normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 2,307 ve 2,315 kg/dm³ olmak üzere S40 kontrol numuneleri göstermiştir. Normal kür koşullarına tabii tutulan S40D10, S40D20, S40D30, S40D40 numunelerinde kontrol numunelerine kıyasla %6,4, %10,7, %15,7, %18,9 oranlarında, sıcak kür koşullarına tabii tutulan numunelerde ise sırasıyla %7,2, %12,8, %16,9, %18,7 oranlarında bir artış gözlenmiştir.

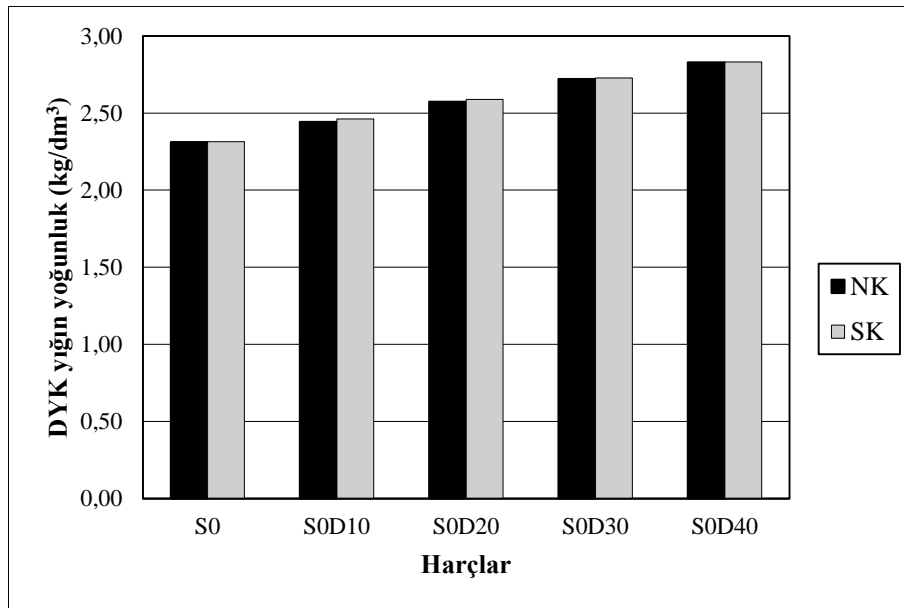
S60D karışım serisi dikkate alındığında, en düşük kuru yığın yoğunluk değerlerini normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 2,02 ve 2,03 kg/dm³ olmak üzere S60 kontrol numuneleri göstermiştir. Normal kür koşullarına tabii tutulan S60D10, S60D20, S60D30, S60D40 numunelerinde kontrol numunelerine kıyasla %9,1,

%15,8, %21,0, %25,2 oranlarında, sıcak kür koşullarına tabii tutulan numunelerde ise sırasıyla %9,5, %17,6, %22,4, %25,7 oranlarında bir artış gözlenmiştir.

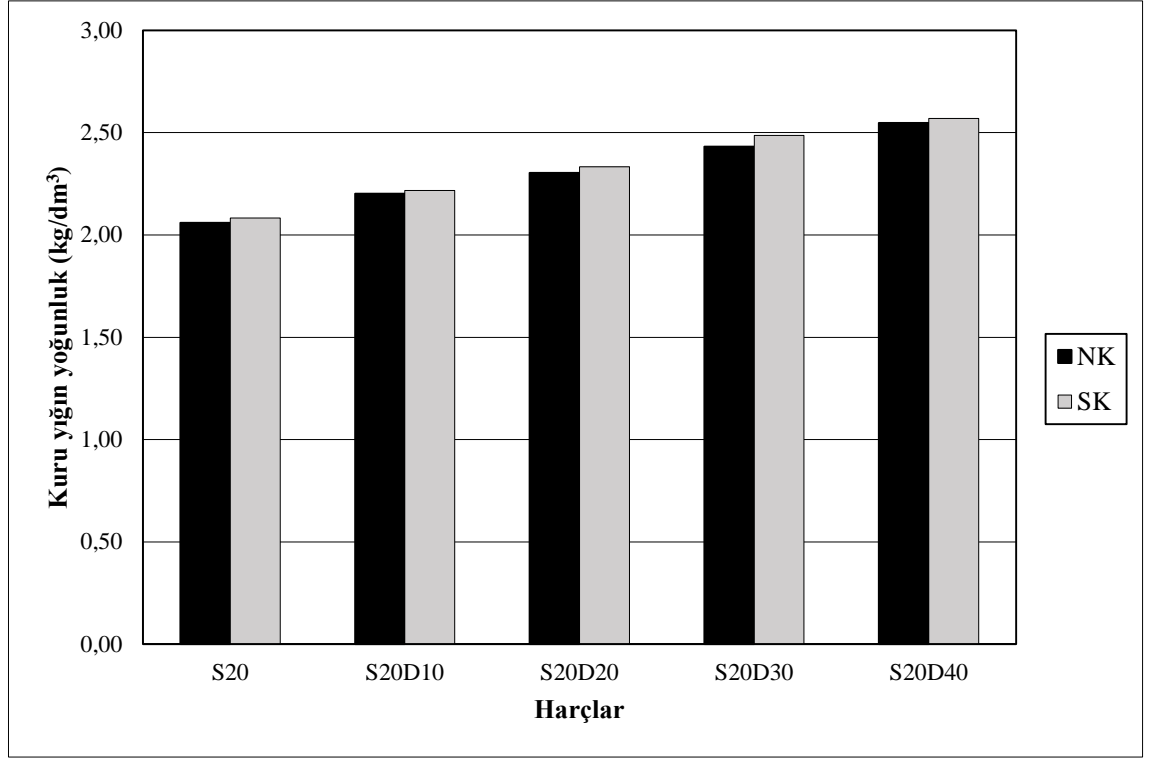
En düşük doygun yüzey kuru yığın yoğunluk değerlerini normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 2,29 ve 2,30 kg/dm^3 olmak üzere S60 kontrol numuneleri göstermiştir. Normal kür koşullarına tabii tutulan S60D10, S60D20, S60D30, S60D40 numunelerinde kontrol numunelerine kıyasla %7,8, %13,3, %17,2, %20,9 oranlarında, sıcak kür koşullarına tabii tutulan numunelerde ise sırasıyla %7,5, %14,2, %18,0, %20,9 oranlarında bir artış gözlenmiştir.



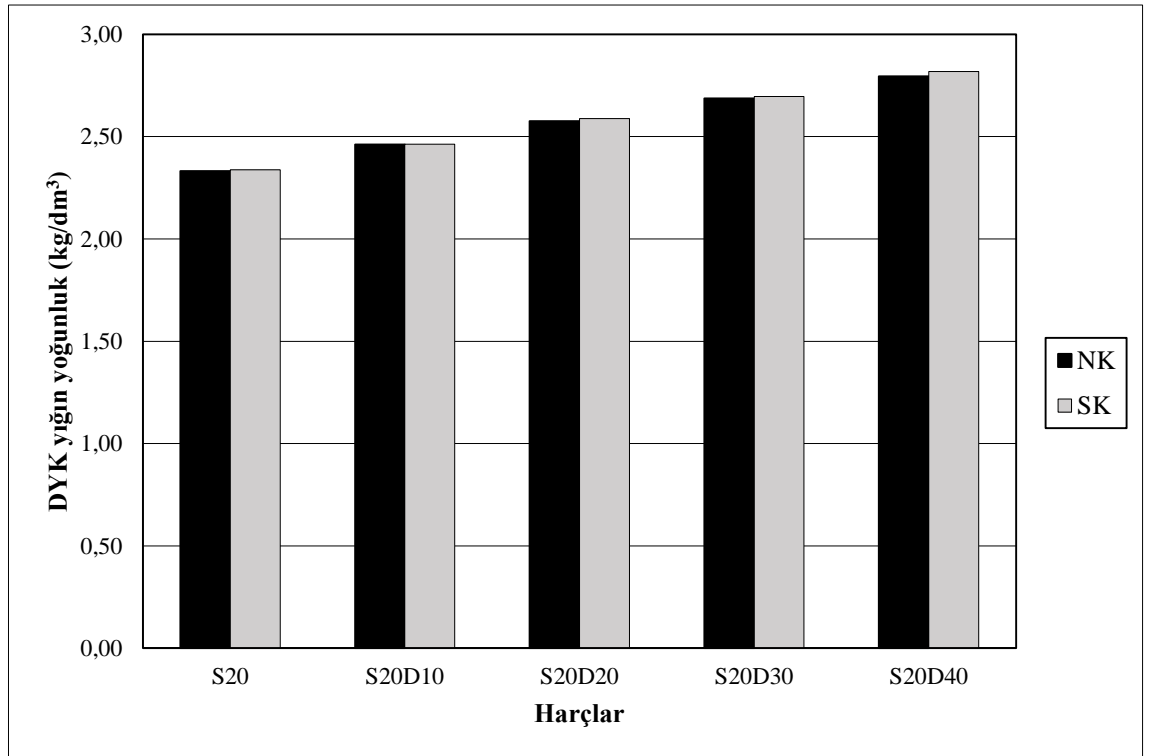
Şekil 4.9. SOD karışım serisinin kuru yığın yoğunluk değerleri



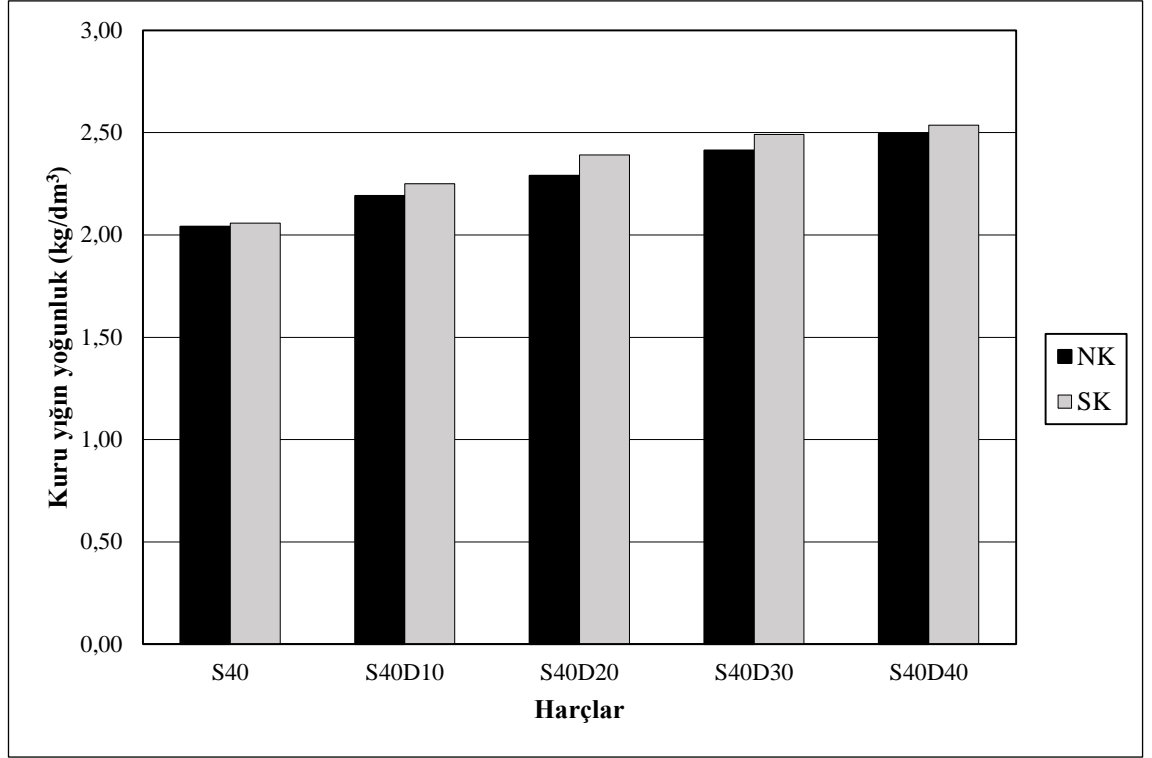
Şekil 4.10. SOD karışım serisinin doygun yüzey kuru yığın yoğunluk değerleri



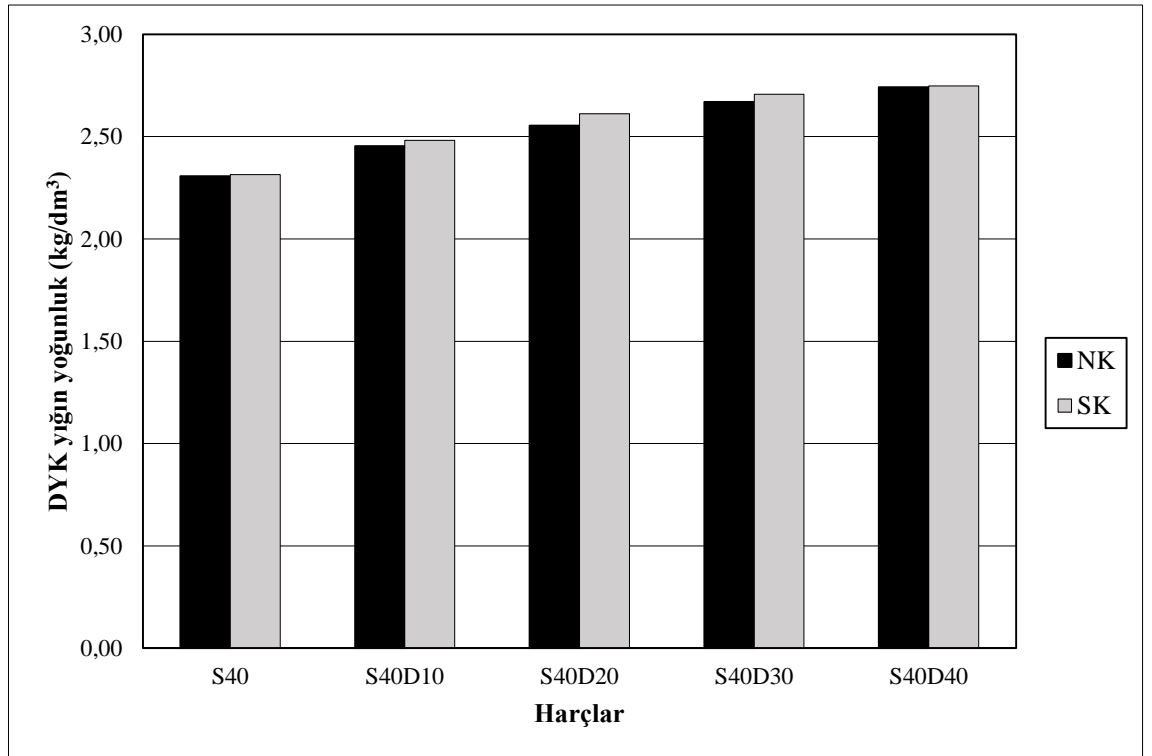
Şekil 4.11. S20D karışım serisinin kuru yığın yoğunluk değerleri



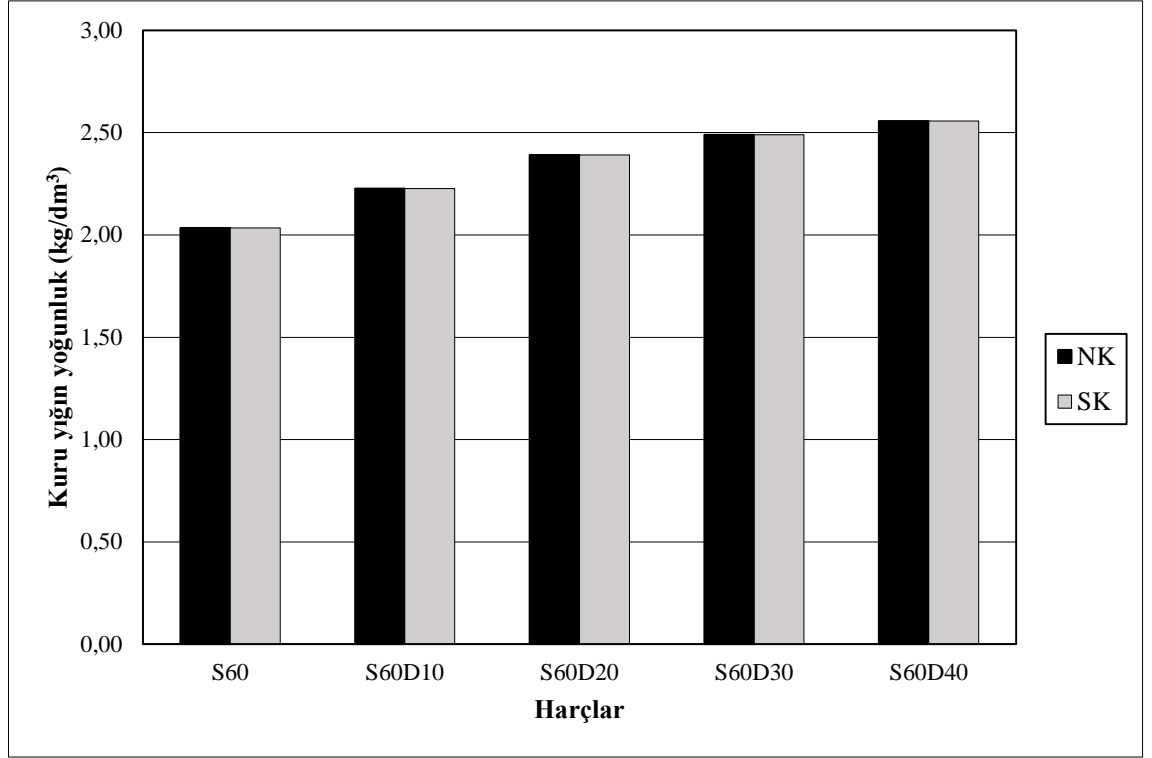
Şekil 4.12. S20D karışım serisinin doymun yüzey kuru yığın yoğunluk değerleri



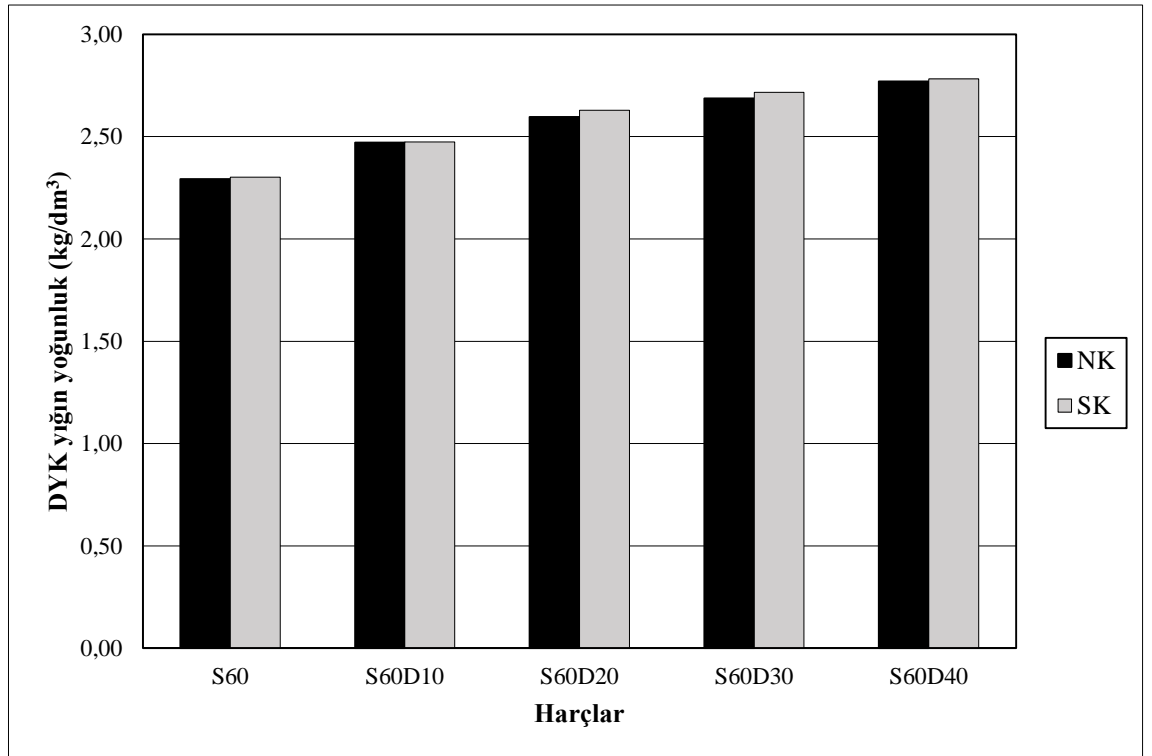
Şekil 4.13. S40D karışım serisinin kuru yığın yoğunluk değerleri



Şekil 4.14. S40D karışım serisinin doymun yüzey kuru yığın yoğunluk değerleri



Şekil 4.15. S60D karışım serisinin kuru yığın yoğunluk değerleri



Şekil 4.16. S60D karışım serisinin doymun yüzey kuru yığın yoğunluk değerleri

4.3. KBA'nın Su Emme Yüzdesi Üzerindeki Etkisi

Kür koşulları, bağlayıcı tipi ve içeriği, agrega tipi ve içeriğinin, su emme yüzdesi üzerine etkileri Şekil 4.17-24'te gösterilmektedir.

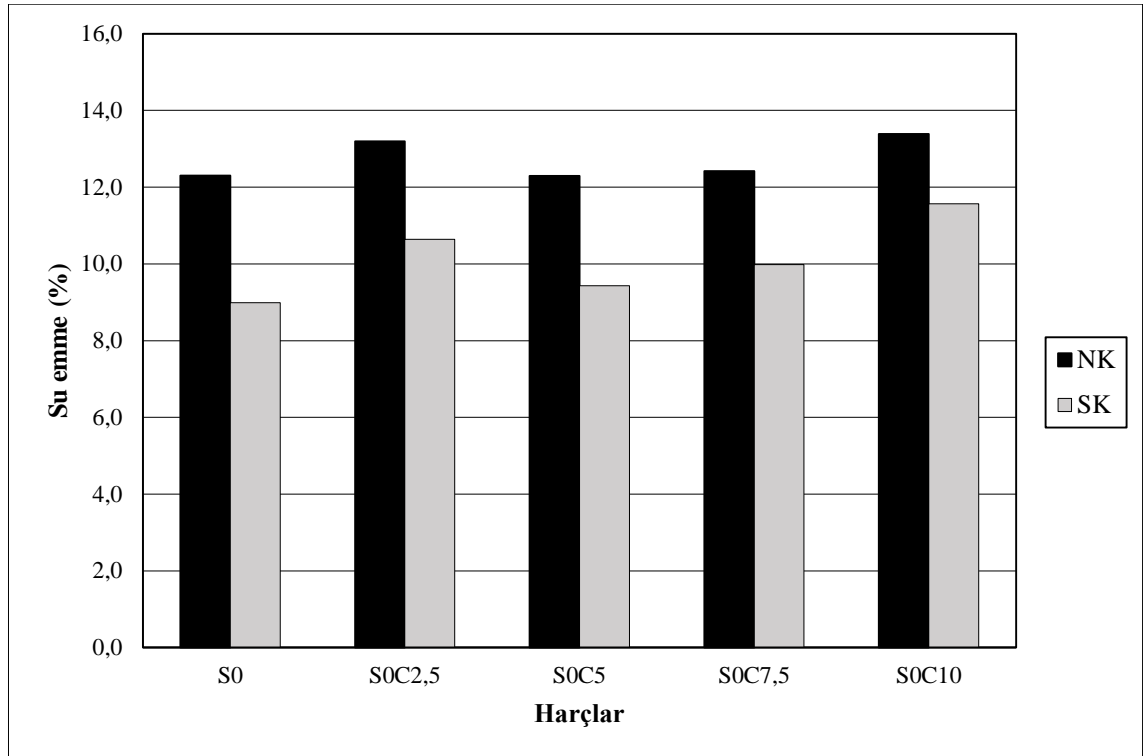
4.3.1. SC karışım serisi su emme yüzdesi değerleri

S0 karışım serisi dikkate alındığında, en yüksek su emme değerlerini normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla %13,4 ve %11,6 olmak üzere S0C10 gösterirken, en düşük değerler sırasıyla %12,3 ve %9 olmak üzere S0 numunelerinde elde edilmiştir.

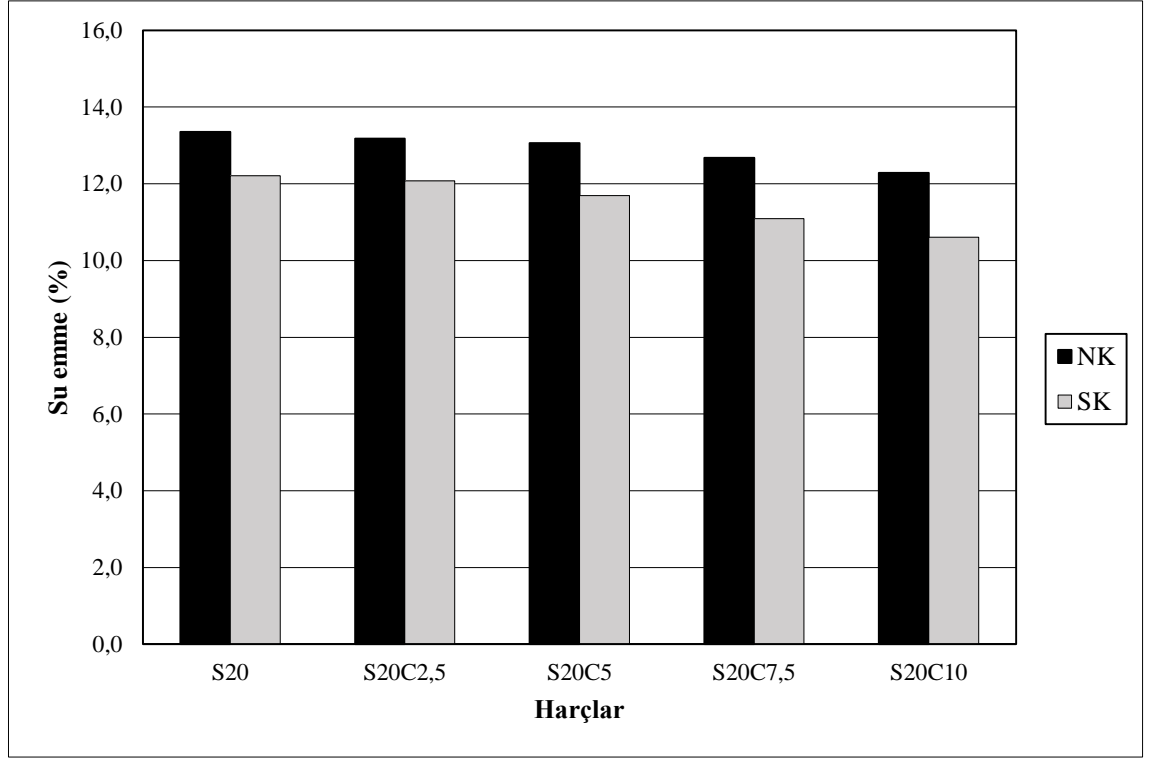
S20 karışım serisi dikkate alındığında, en yüksek su emme değerlerini normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla %13,4 ve %12,2 olmak üzere S20 numuneleri gösterirken, en düşük değerler sırasıyla %12,3 ve %10,6 olmak üzere S20C10 numunelerinde elde edilmiştir.

S40 karışım serisi dikkate alındığında, en yüksek su emme değerlerini normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla %13,5 ve %12,5 olmak üzere S40C2,5 gösterirken, en düşük değerler sırasıyla %12,5 ve %11,1 olmak üzere S40C10 numuneleri numunelerinde elde edilmiştir.

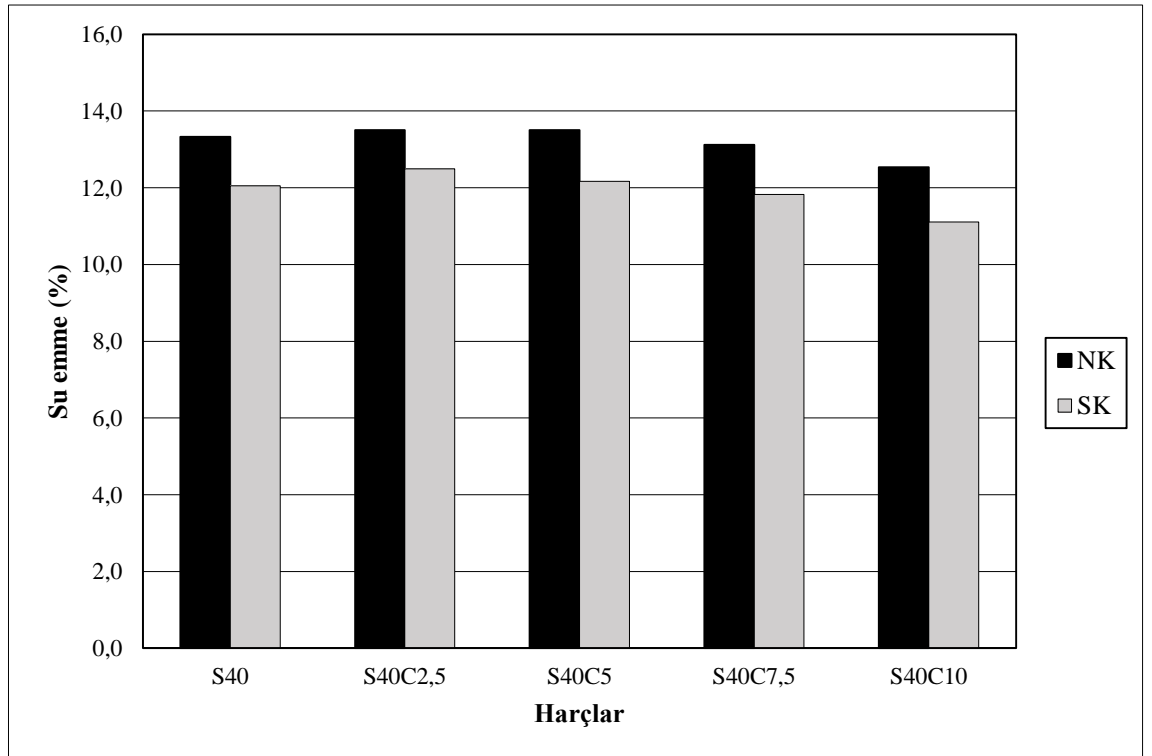
S60 karışım serisi dikkate alındığında, en yüksek su emme değerlerini normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla %14,2 ve %13,4 olmak üzere S60C2,5 gösterirken, en düşük değerler sırasıyla %12,3 ve %11,8 olmak üzere S60C7,5 numunelerinde elde edilmiştir.



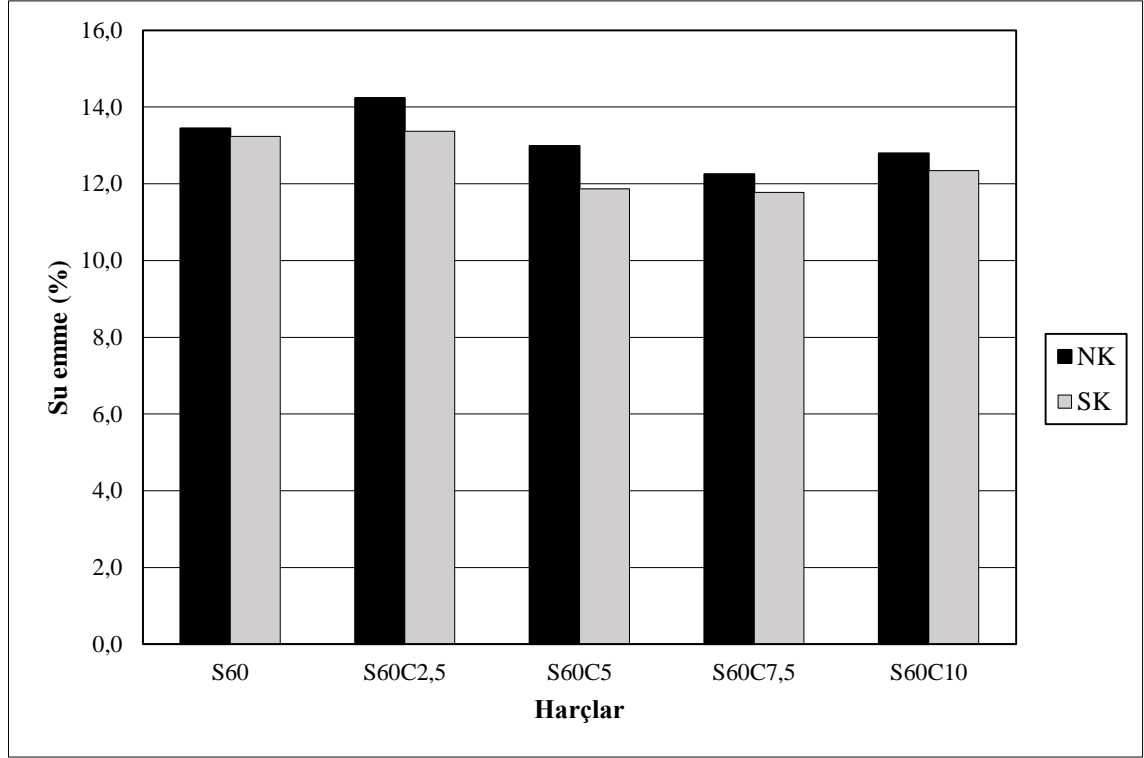
Şekil 4.17. S0C karışım serisinin su emme yüzdesi değerleri



Şekil 4.18. S20C karışım serisinin su emme yüzdesi değerleri



Şekil 4.19. S40C karışım serisinin su emme yüzdesi değerleri



Şekil 4.20. S60C karışım serisinin su emme yüzdesi değerleri

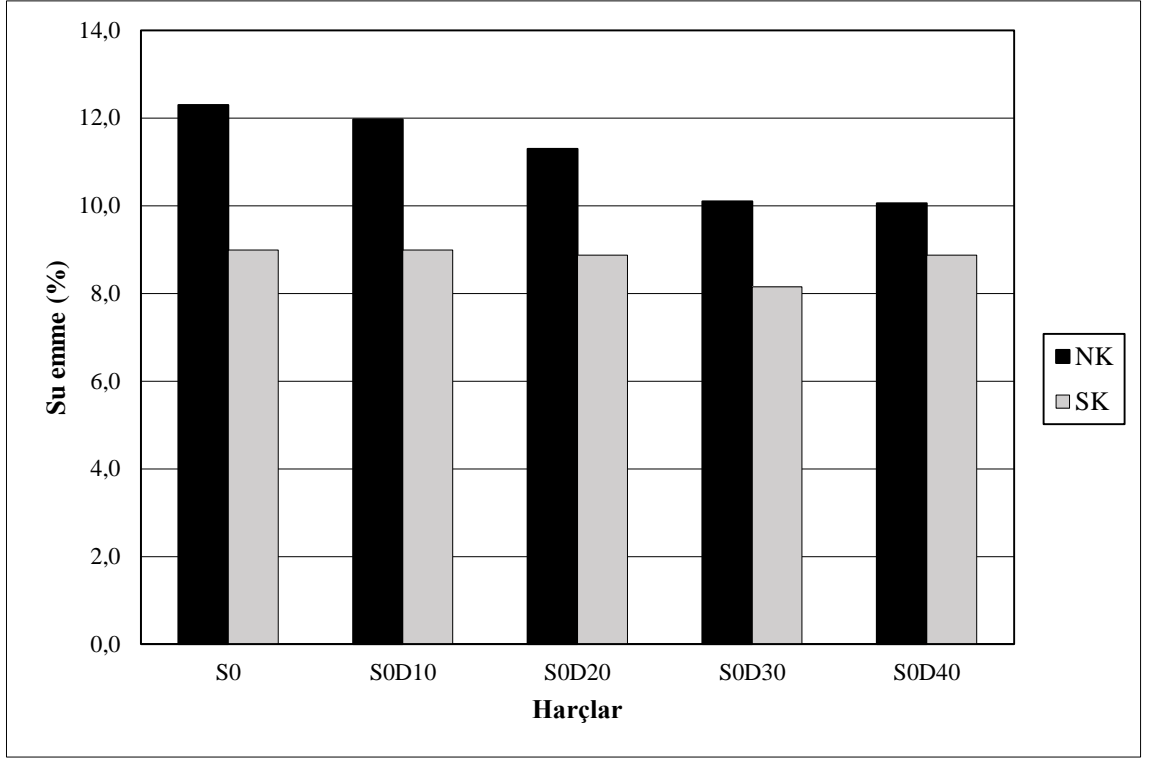
4.3.2. SD karışım serisinin su emme yüzdesi değerleri

S0 karışım serisi dikkate alındığında, en yüksek su emme değerlerini normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla %12,3 ve %9 olmak üzere S0 kontrol numuneleri gösterirken, en düşük değerler sırasıyla %10,1 ve %8,2 olmak üzere S0D30 numunelerinde elde edilmiştir.

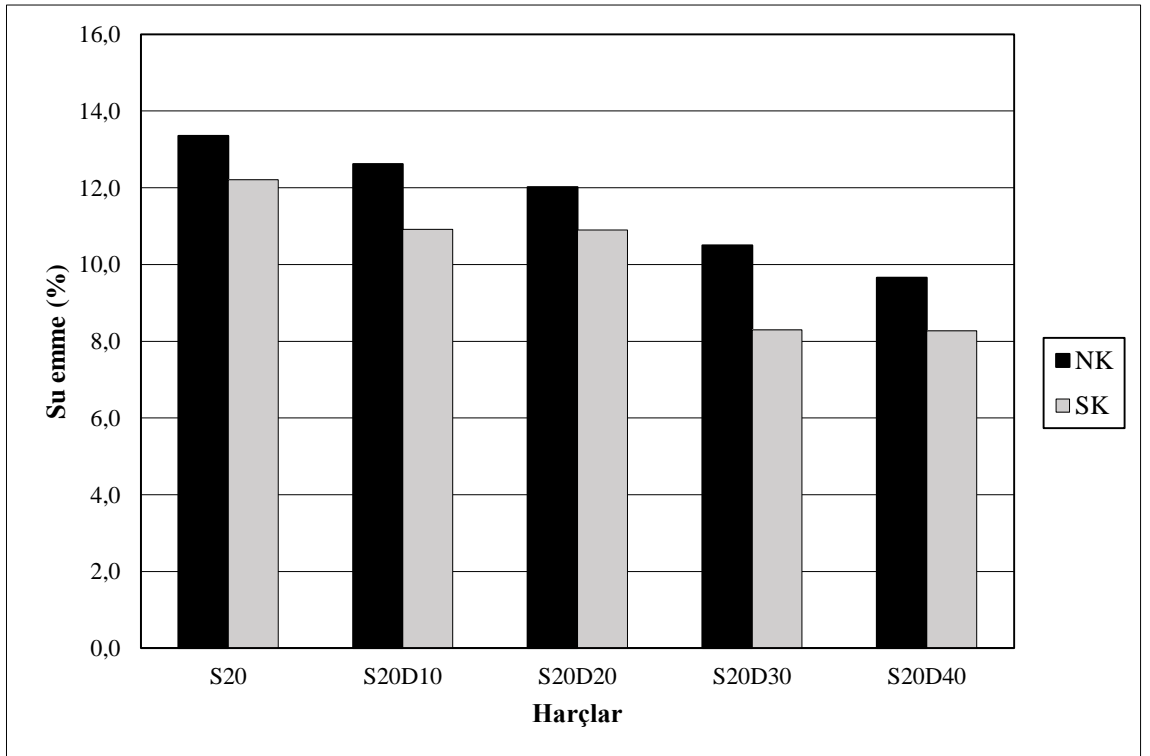
S20 karışım serisi dikkate alındığında, en yüksek su emme değerlerini normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla %13,4 ve %12,2 olmak üzere S20 numuneleri gösterirken, en düşük değerler sırasıyla %9,7 ve %8,3 olmak üzere S20D40 numunelerinde elde edilmiştir.

S40 karışım serisi dikkate alındığında, en yüksek su emme değerlerini normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla %13,3 ve %12 olmak üzere S40 numuneleri gösterirken, en düşük değerler sırasıyla %10,6 ve %8,7 olmak üzere S40D30 numunelerinde elde edilmiştir.

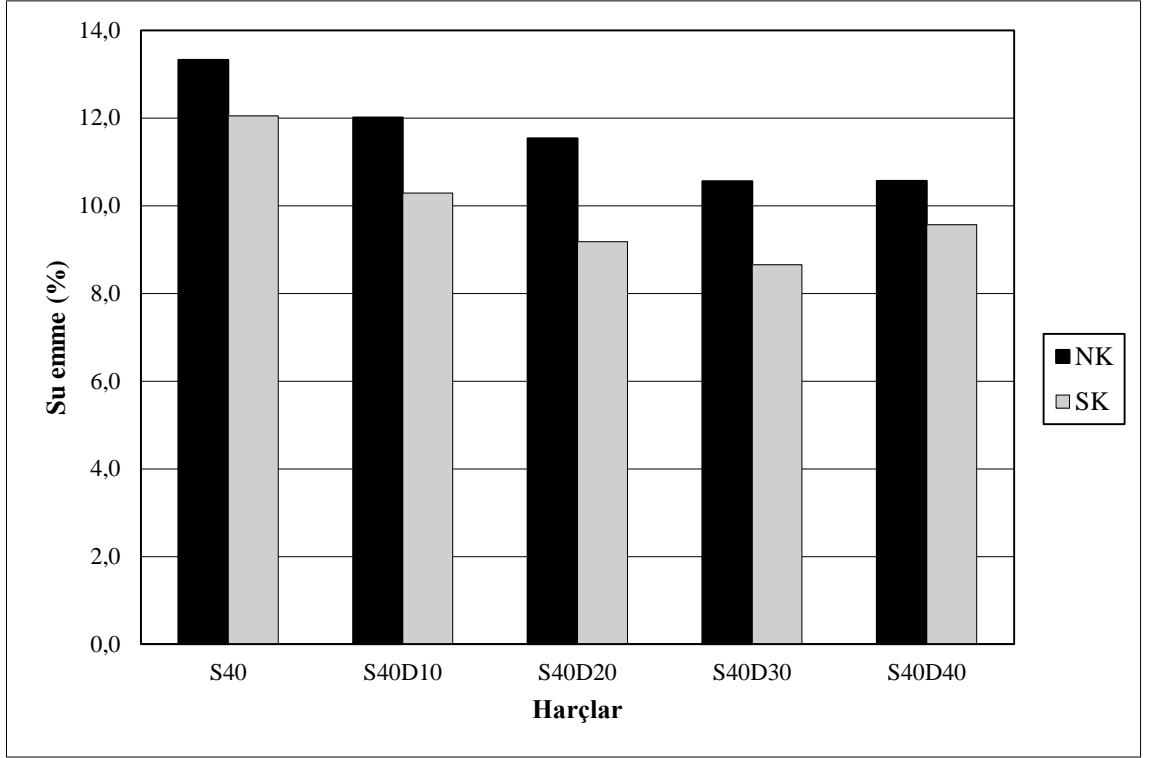
S60 karışım serisi dikkate alındığında, en yüksek su emme değerlerini normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla %13,4 ve %13,2 olmak üzere S60 numuneleri gösterirken, en düşük değerler sırasıyla %9,5 ve %8,8 olmak üzere S60D40 numunelerinde elde edilmiştir.



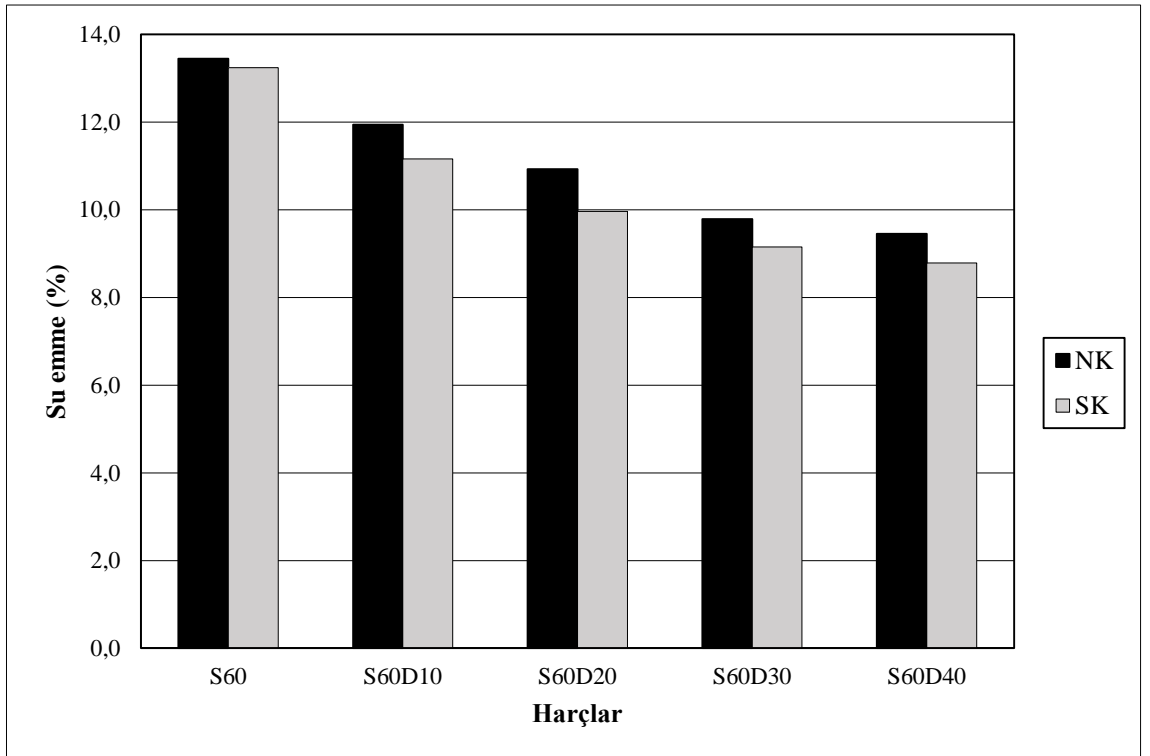
Şekil 4.21. SOD karışım serisinin su emme yüzdesi değerleri



Şekil 4.22. S20D karışım serisinin su emme yüzdesi değerleri



Şekil 4.23. S40D karışım serisinin su emme yüzdesi değerleri



Şekil 4.24. S60D karışım serisinin su emme yüzdesi değerleri

4.4. KBA'nın Görünür Porozite Üzerindeki Etkisi

Kür koşulları, bağlayıcı tipi ve içeriği, agrega tipi ve içeriğinin, görünür porozite üzerine etkileri Şekil 4.25-32'de gösterilmektedir.

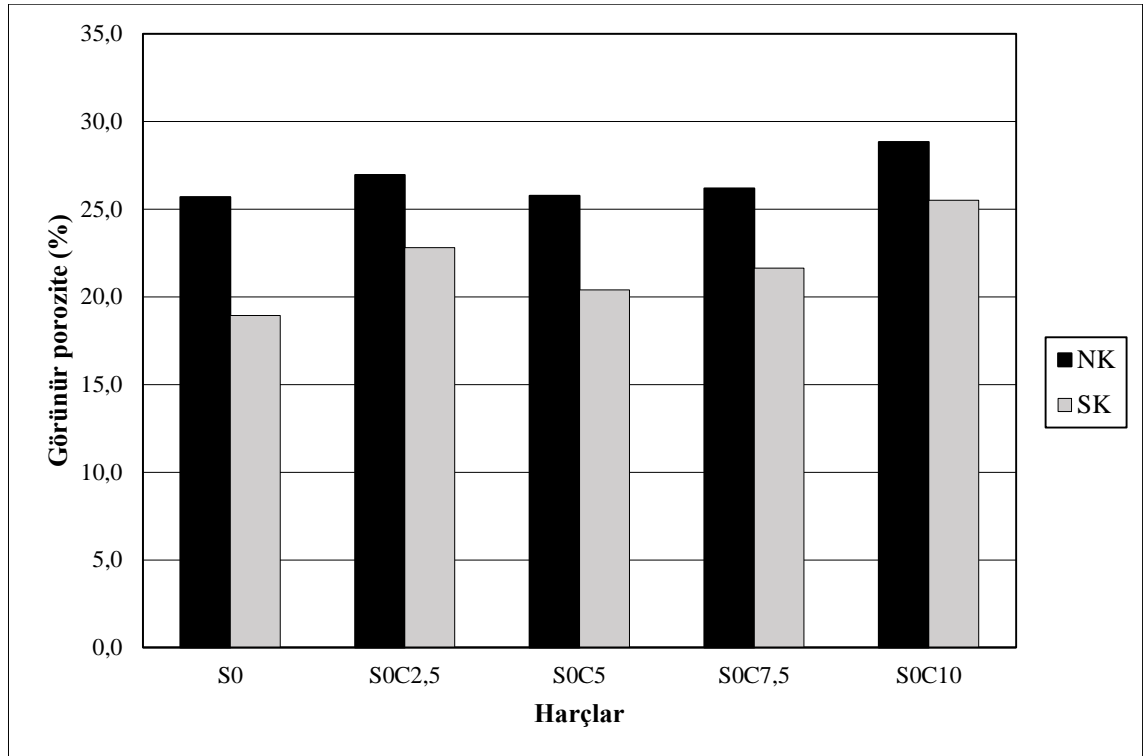
4.4.1. SC karışım serisinin görünür porozite değerleri

S0 karışım serisi dikkate alındığında, en yüksek porozite değerlerini normal su kuru ve sıcak su kuru koşullarında sırasıyla 28,8 ve 25,5 olmak üzere S0C10 gösterirken, en düşük değerler sırasıyla %25,7 ve %18,9 olmak üzere S0 numunelerinde elde edilmiştir.

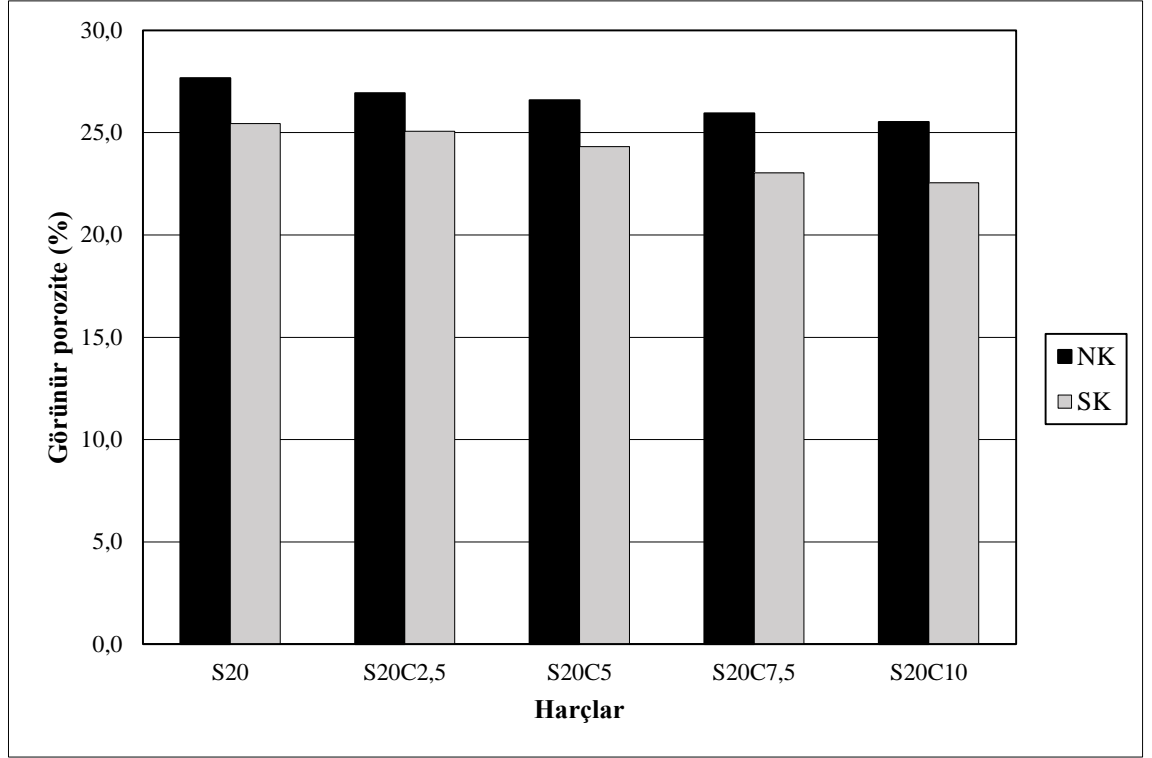
S20 karışım serisi dikkate alındığında, en yüksek porozite değerlerini normal su kuru ve sıcak su kuru koşullarında sırasıyla %27,8 ve %25,4 olmak üzere S20 gösterirken, en düşük değerler sırasıyla 25,5 ve 22,6 olmak üzere S20C10 numunelerinde elde edilmiştir.

S40 karışım serisi dikkate alındığında, en yüksek porozite değerlerini normal su kuru ve sıcak su kuru koşullarında sırasıyla %28,0 ve %26,1 olmak üzere S40C2,5 gösterirken, en düşük değerler sırasıyla 26,0 ve 23,3 olmak üzere S40C10 numunelerinde elde edilmiştir.

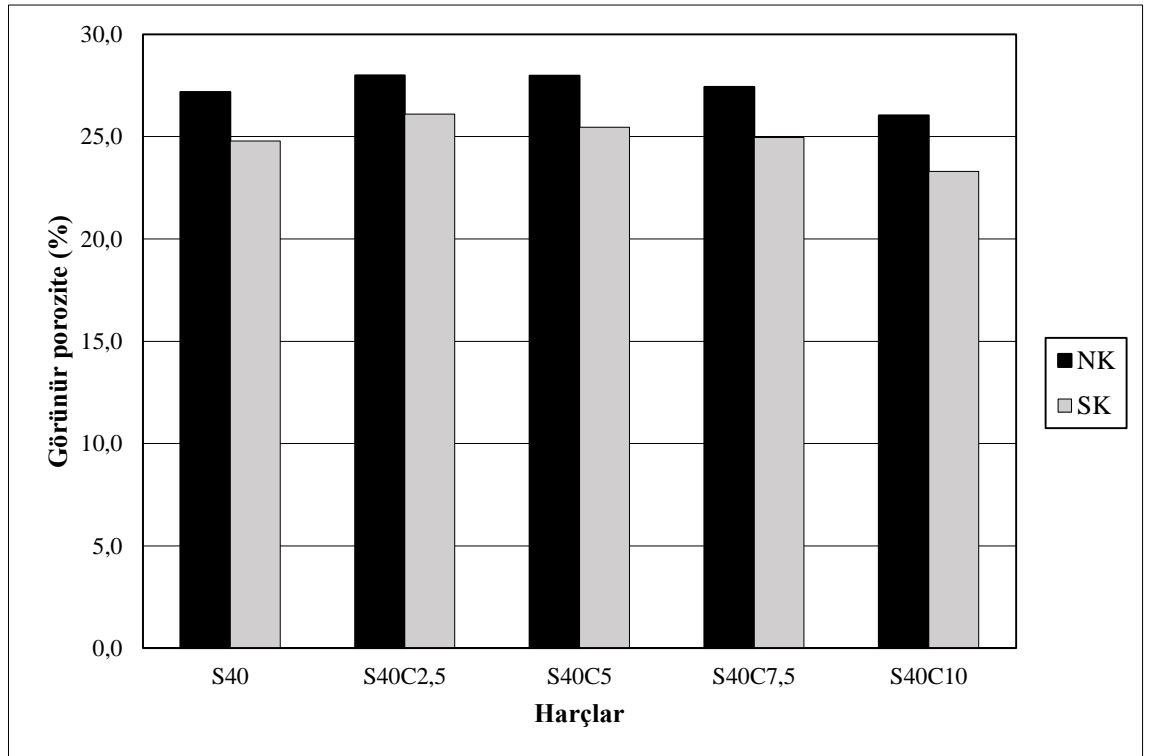
S60 karışım serisi dikkate alındığında, en yüksek porozite değerleri normal su kuru ve sıcak su kuru koşullarında sırasıyla %29,2 ve %27 olmak üzere S60C2,5 gösterirken, en düşük değerler sırasıyla 24,8 ve 23,8 olmak üzere S60C7,5 numunelerinde elde edilmiştir.



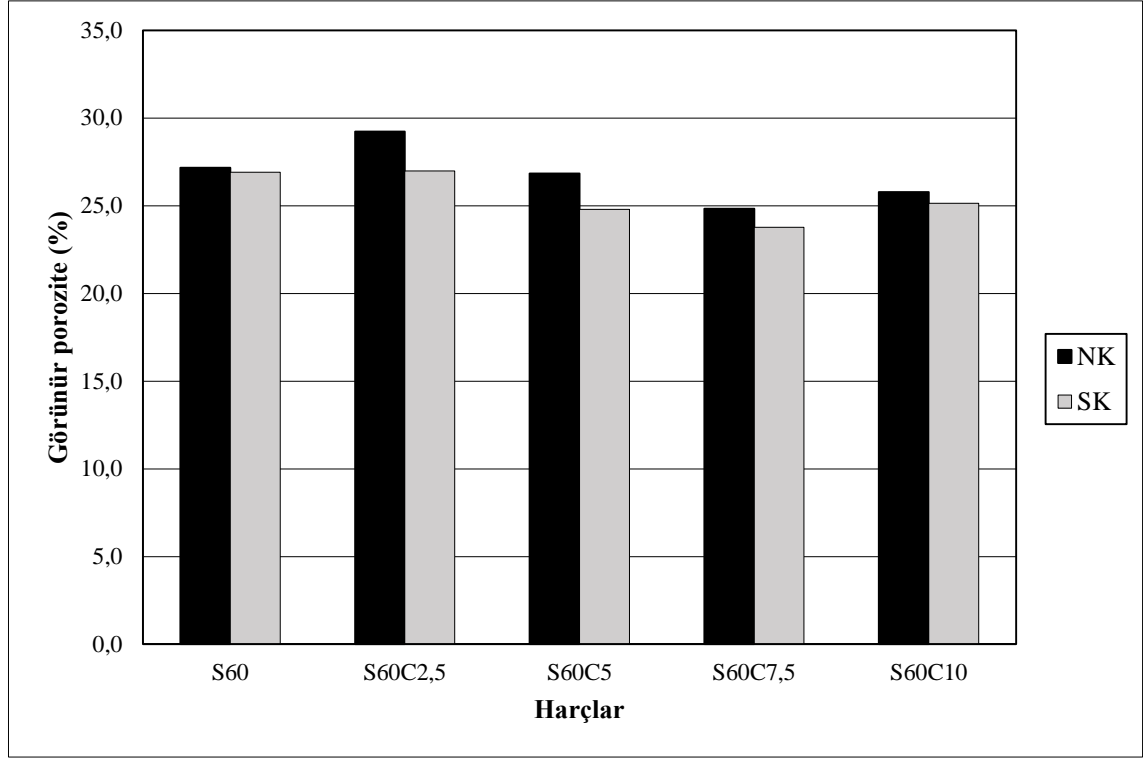
Şekil 4.25. S0C karışım serisinin görünür porozite değerleri



Şekil 4.26. S20C karışım serisinin görünür porozite değerleri



Şekil 4.27. S40C karışım serisinin görünür porozite değerleri



Şekil 4.28. S60C karışım serisinin görünür porozite değerleri

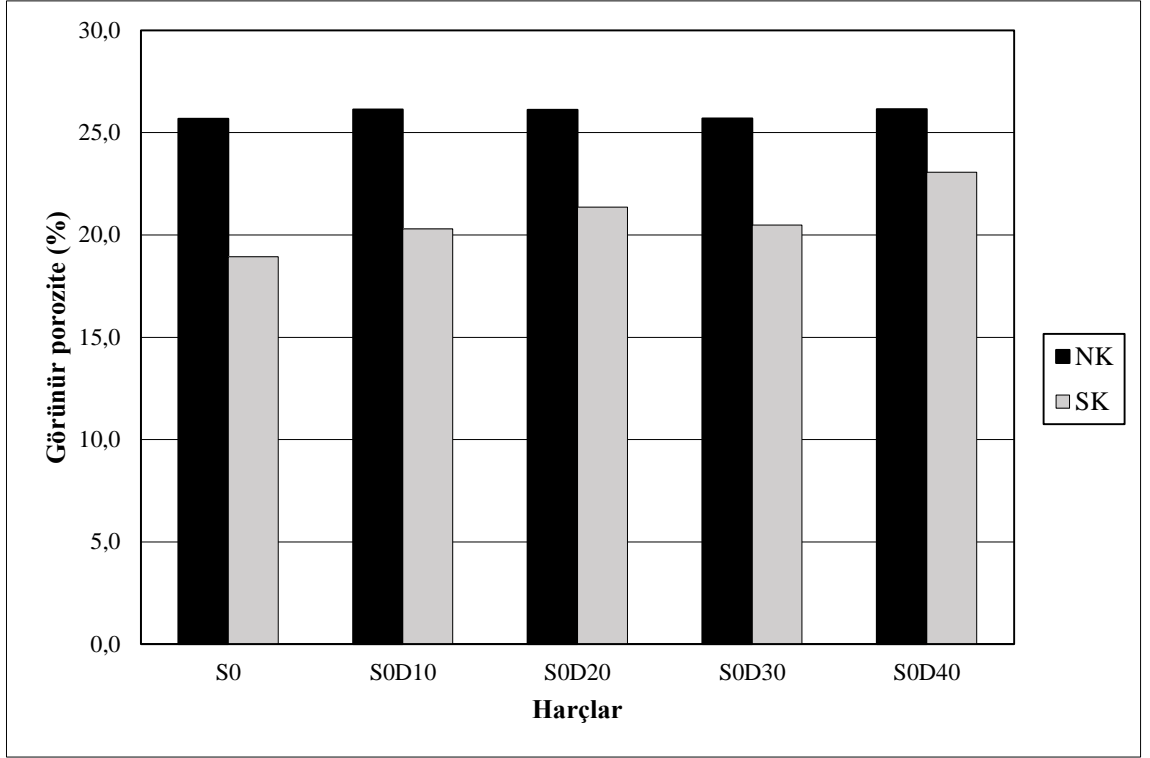
4.4.2. SD karışım serisinin görünür porozite değerleri

S0 karışım serisi dikkate alındığında, en yüksek porozite değerlerini normal su kuru ve sıcak su kuru koşullarında sırasıyla %26,1 ve %23,1 olmak üzere S0D40 numuneleri gösterirken, en düşük değerler sırasıyla %25,7 ve %18,9 olmak üzere S0 numunelerinde elde edilmiştir.

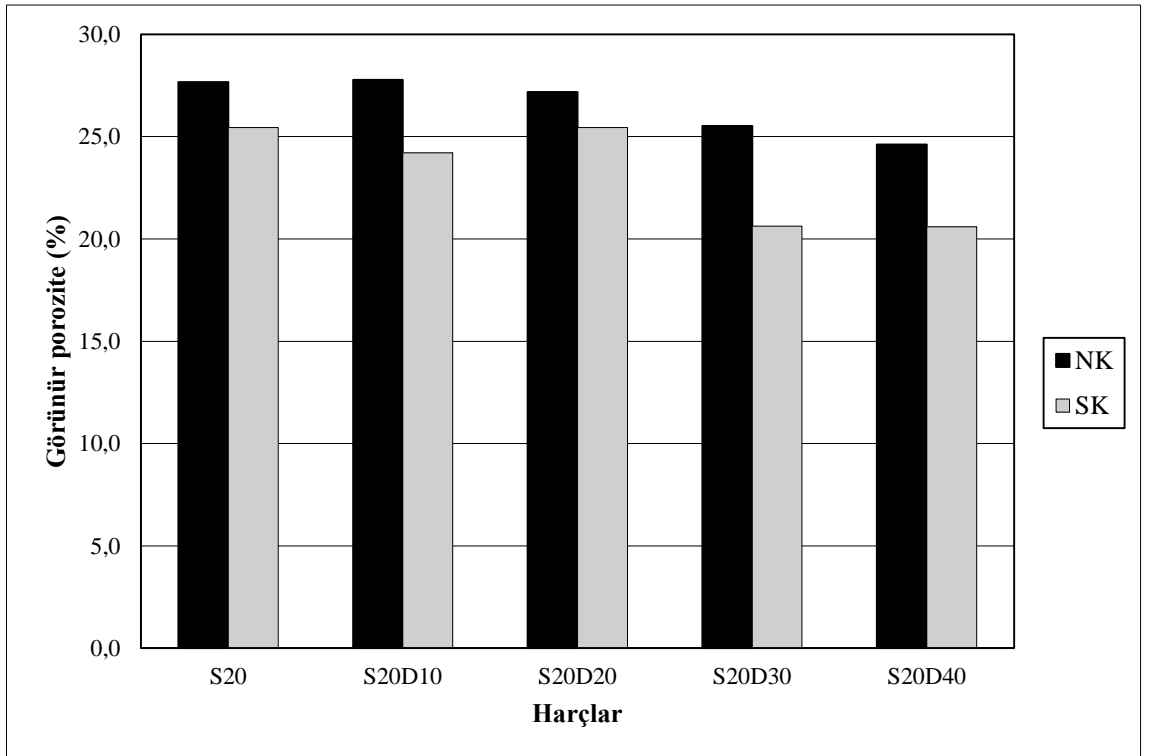
S20 karışım serisi dikkate alındığında, en yüksek porozite değerlerini normal su kuru ve sıcak su kuru koşullarında sırasıyla %27,8 ve %25,4 olmak üzere S20 gösterirken, en düşük değerler sırasıyla %24,6 ve %20,6 olmak üzere S20D40 numunelerinde elde edilmiştir.

S40 karışım serisi dikkate alındığında, en yüksek porozite değerlerini normal su kuru ve sıcak su kuru koşullarında sırasıyla %27,2 ve %24,8 olmak üzere S40 kontrol numuneleri gösterirken, en düşük değerler sırasıyla %25,0 ve %21,6 olmak üzere S40D30 numunelerinde elde edilmiştir.

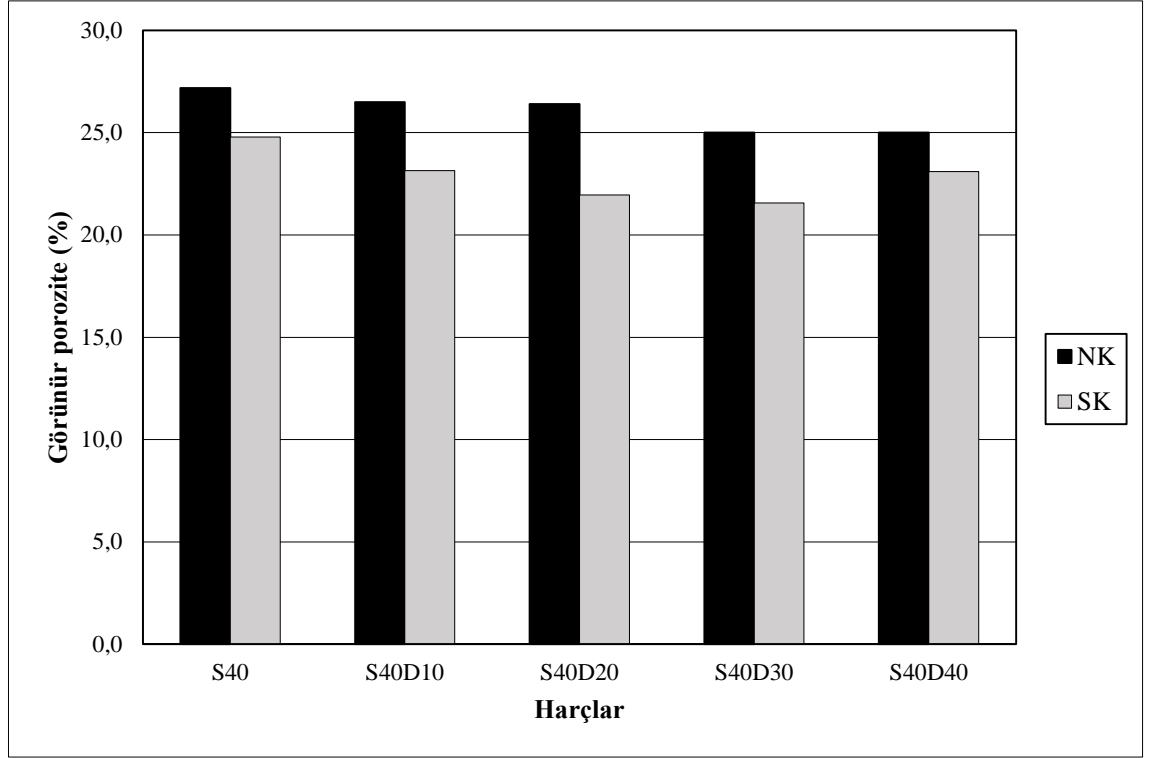
S60 karışım serisi dikkate alındığında, en yüksek porozite değerleri normal su kuru ve sıcak su kuru koşullarında sırasıyla %27,2 ve %26,9 olmak üzere S60 gösterirken, en düşük değerler sırasıyla %24,0 ve %22,4 olmak üzere S60D40 numunelerinde elde edilmiştir.



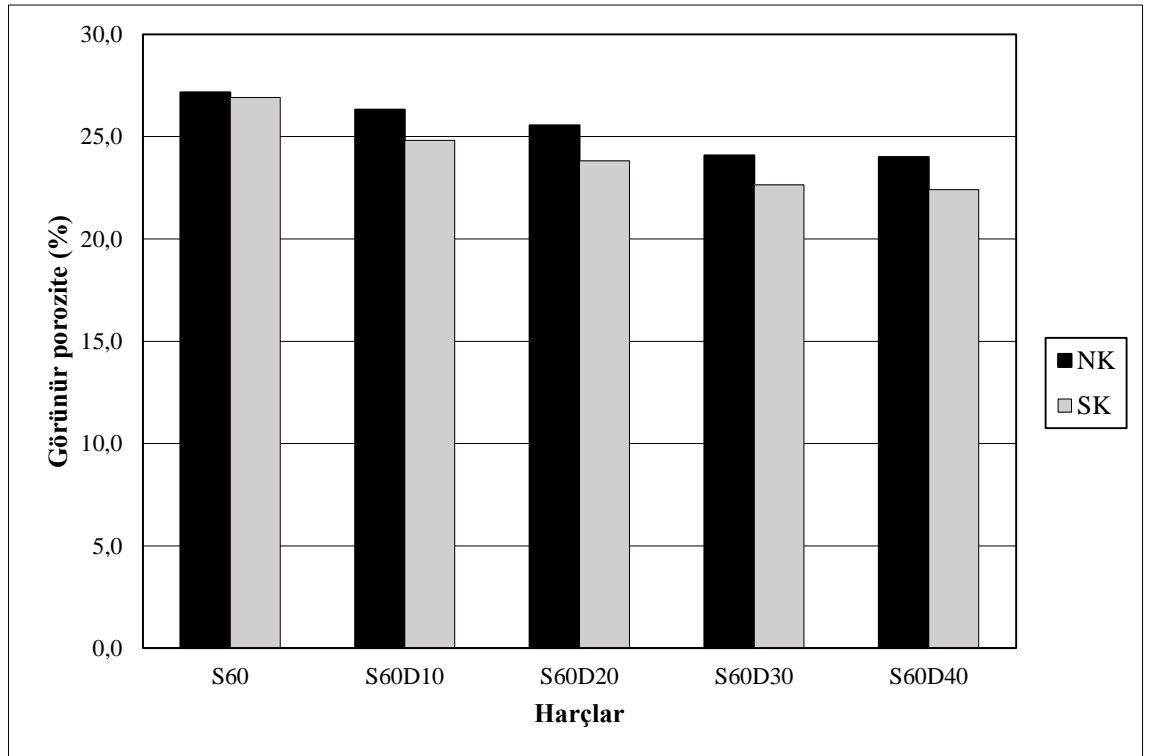
Şekil 4.29. S0D karışım serisinin görünür porozite değerleri



Şekil 4.30. S20D karışım serisinin görünür porozite değerleri



Şekil 4.31. S40D karışım serisinin görünür porozite değerleri



Şekil 4.32. S60D karışım serisinin görünür porozite değerleri

4.5. KBA'nın Yarmada Çekme Dayanımı Üzerindeki Etkisi

Kür koşulları, bağlayıcı tipi ve içeriği, agrega tipi ve içeriğinin, yarmada çekme dayanımı üzerine etkileri Şekil 4.33-40'ta gösterilmektedir.

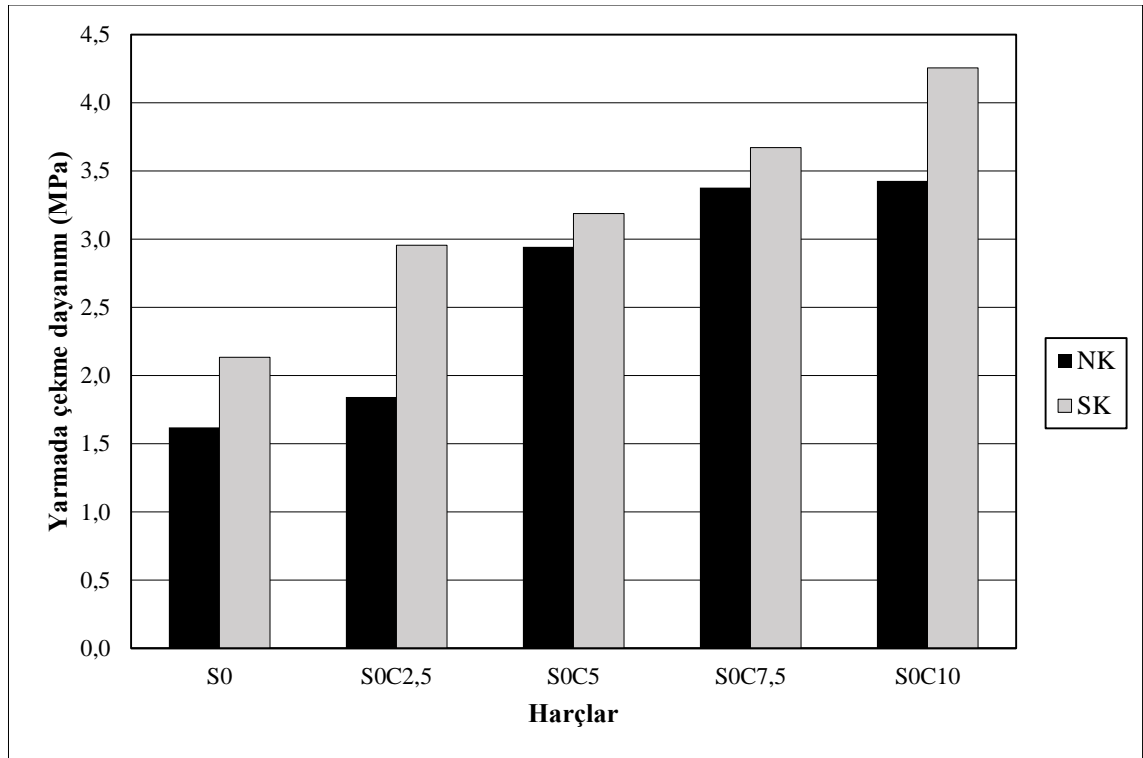
4.5.1. SC karışım serisi yarmada çekme dayanımı değerleri

S0C karışım serisi dikkate alındığında, en düşük yarmada çekme dayanımları normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 1,6 ve 2,1 MPa olmak üzere S0 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 3,4 ve 4,3 MPa olmak üzere S0C10 numunelerinde elde edilmiştir.

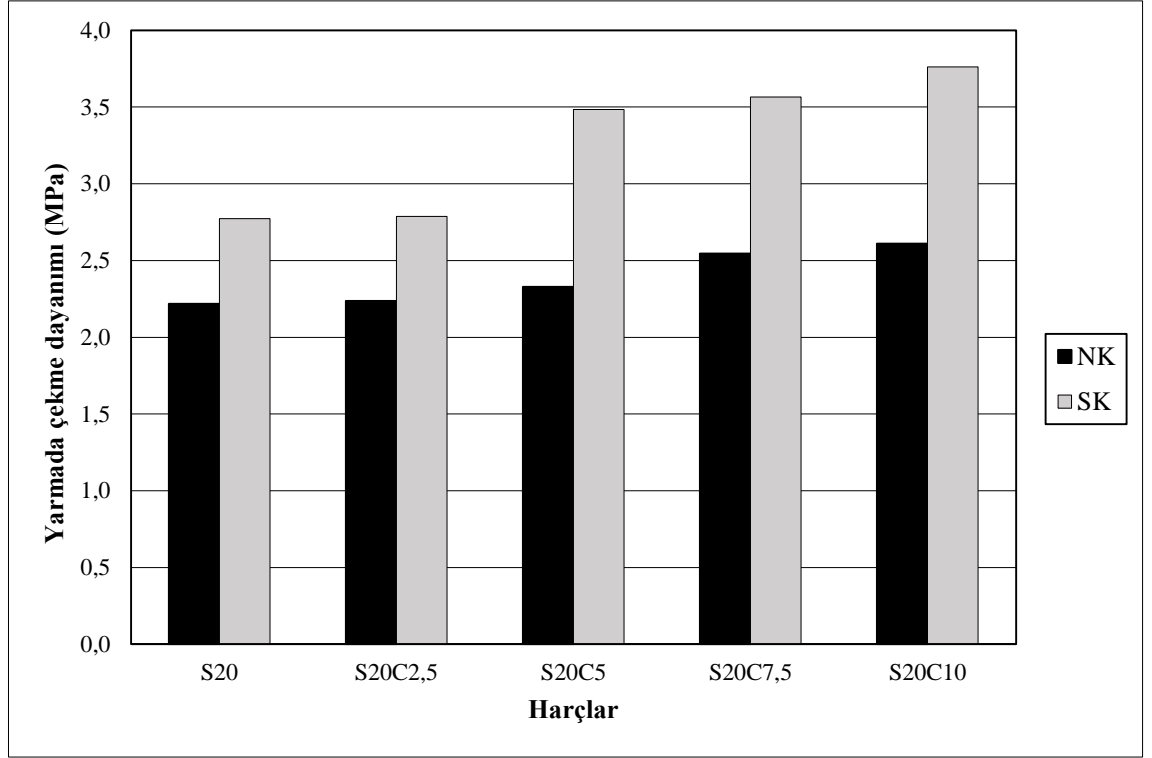
S20C karışım serisi dikkate alındığında, en düşük yarmada çekme dayanımları normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 2,2 ve 2,8 MPa olmak üzere S20 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 2,6 ve 3,8 MPa olmak üzere S20C10 numunelerinde elde edilmiştir.

S40C karışım serisi dikkate alındığında, en düşük yarmada çekme dayanımları normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 1,9 ve 2,3 MPa olmak üzere S40 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 2,4 ve 2,8 MPa olmak üzere S40C10 numunelerinde elde edilmiştir.

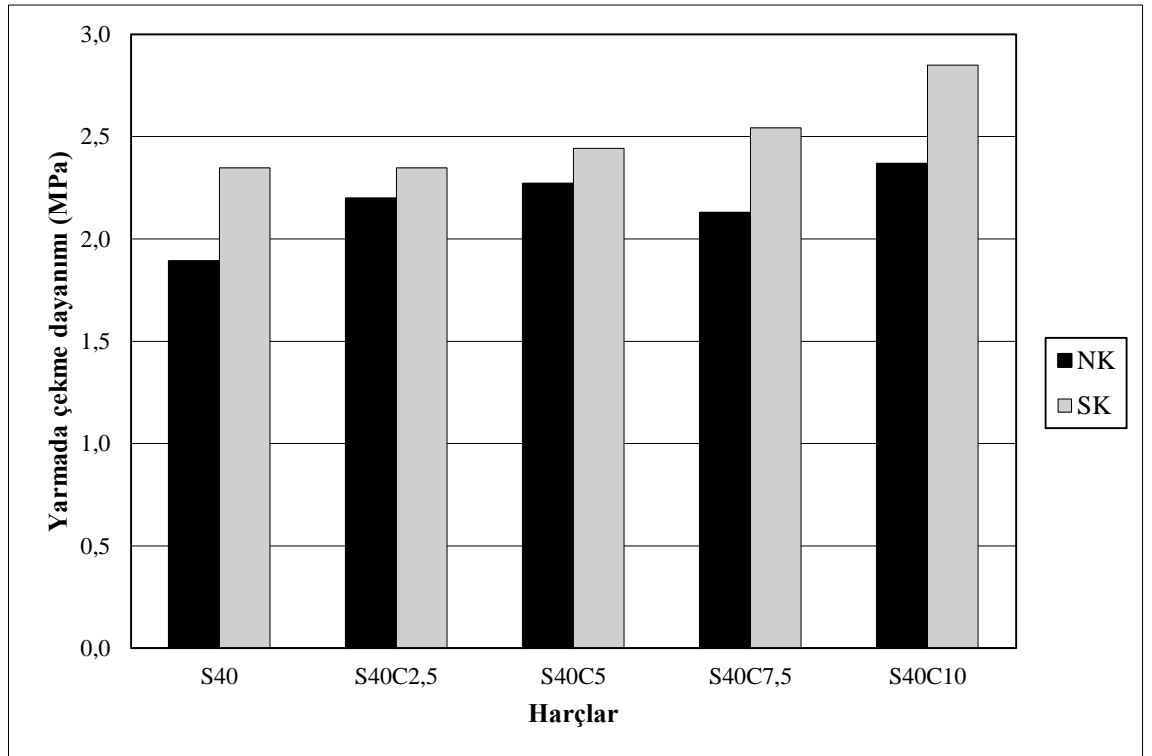
S60C karışım serisi dikkate alındığında, en düşük yarmada çekme dayanımları normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 1,9 ve 2,1 MPa olmak üzere S60 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 2,2 ve 2,9 MPa olmak üzere S60C10 numunelerinde elde edilmiştir.



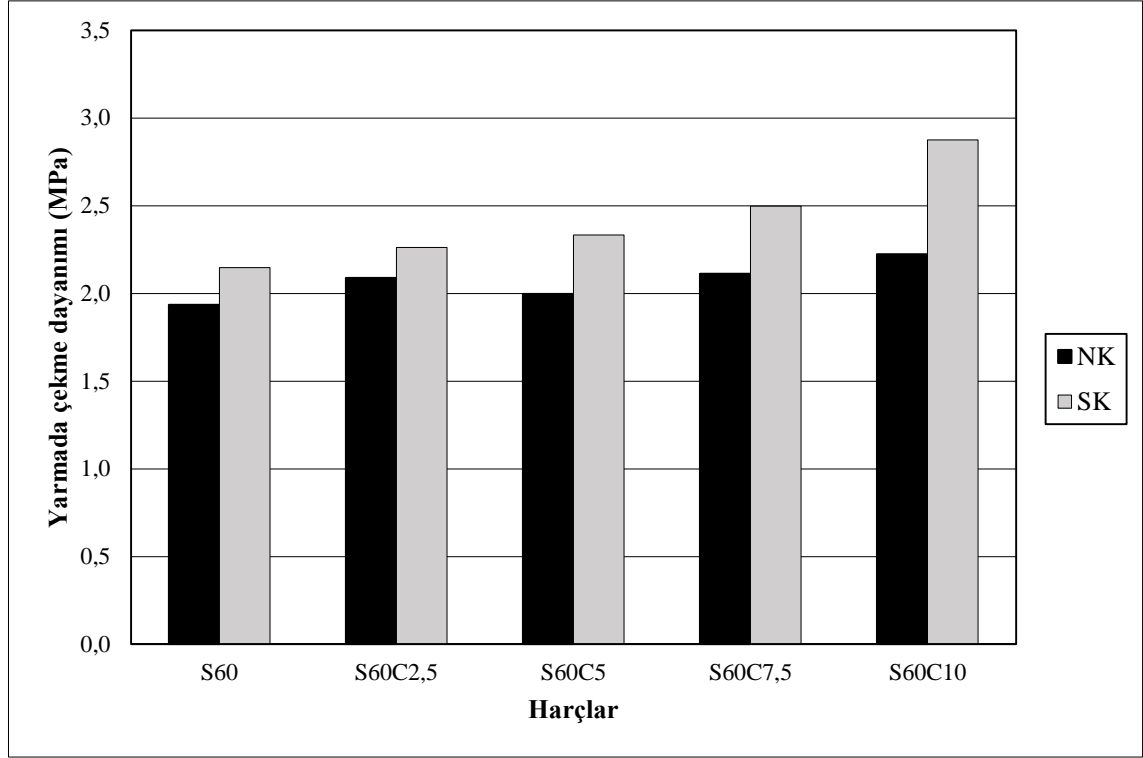
Şekil 4.33. S0C karışım serisinin yarmada çekme dayanımı değerleri



Şekil 4.34. S20C karışım serisinin yarmada çekme dayanımı değerleri



Şekil 4.35. S40C karışım serisinin yarmada çekme dayanımı değerleri



Şekil 4.36. S60C karışım serisinin yarmada çekme dayanımı değerleri

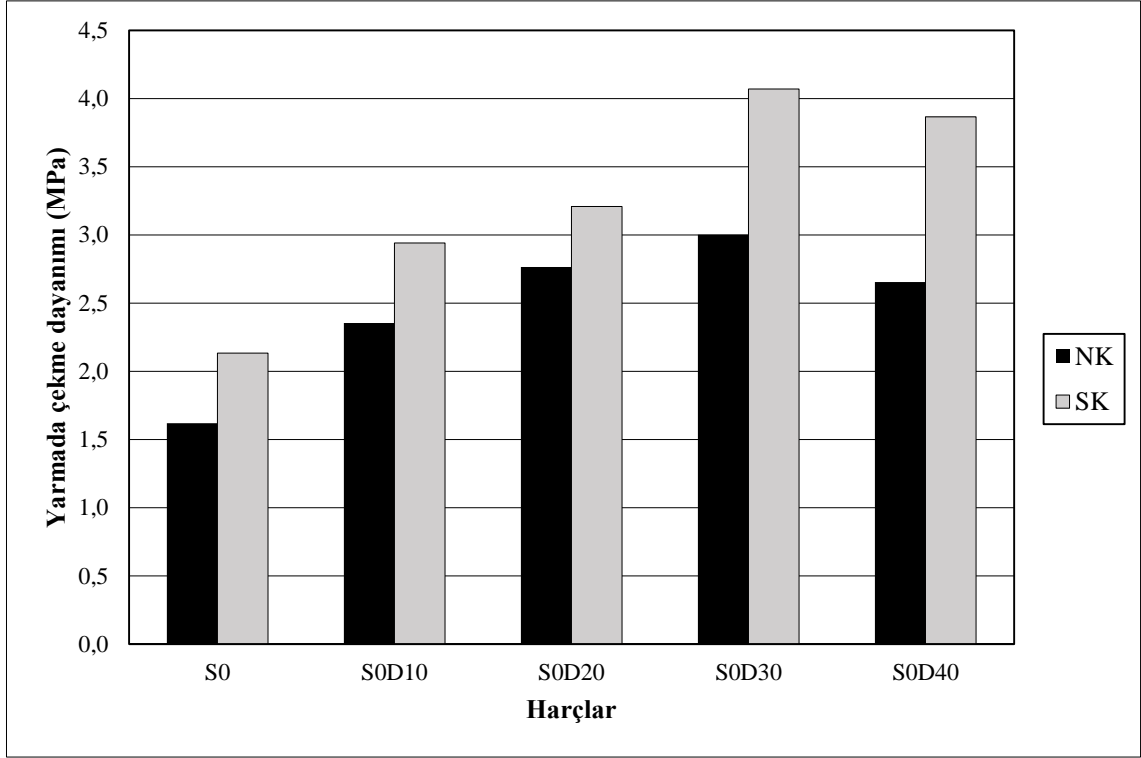
4.5.2. SD karışım serisinin yarmada çekme dayanımı değerleri

S0D karışım serisi dikkate alındığında, en düşük yarmada çekme dayanımlarını normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 1,6 ve 2,1 MPa olmak üzere S0 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 3,0 ve 4,1 MPa olmak üzere S0D30 numunelerinde elde edilmiştir.

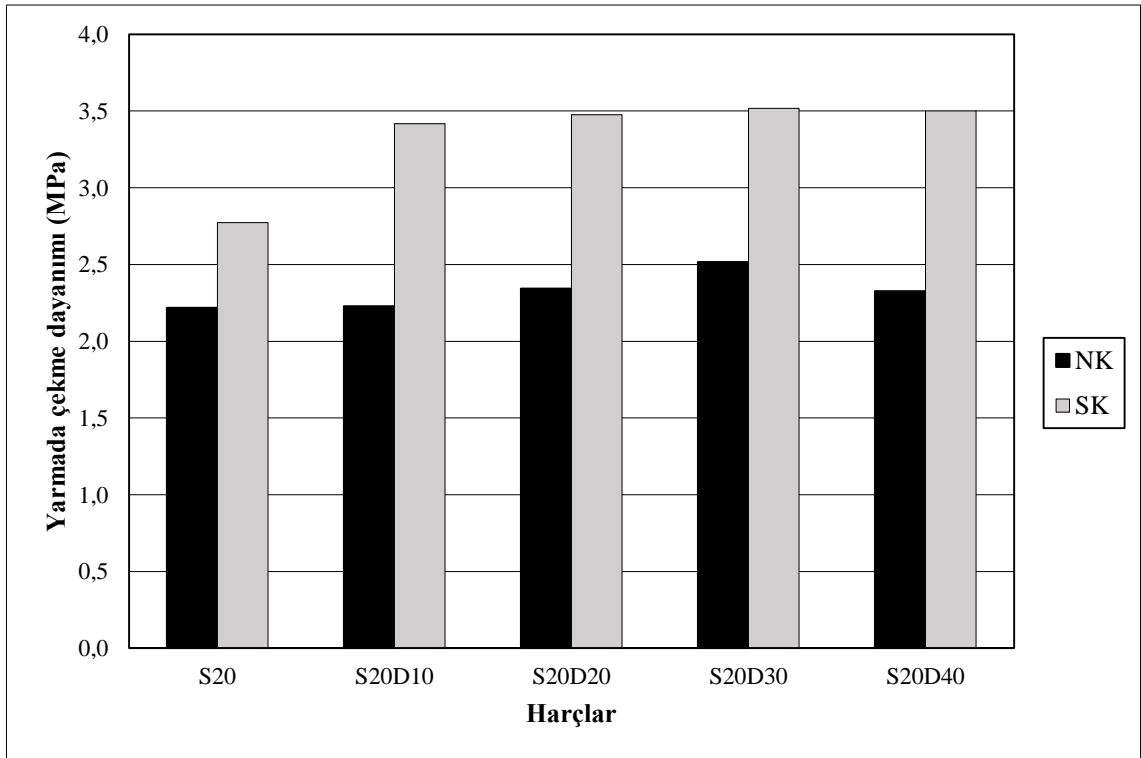
S20D karışım serisi dikkate alındığında, en düşük yarmada çekme dayanımlarını normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 2,2 ve 2,8 MPa olmak üzere S20 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 2,5 ve 3,5 MPa olmak üzere S20D30 numunelerinde elde edilmiştir.

S40D karışım serisi dikkate alındığında, en düşük yarmada çekme dayanımlarını normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 1,9 ve 2,3 MPa olmak üzere S40 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 2,4 ve 3,1 MPa olmak üzere S40D30 numunelerinde elde edilmiştir.

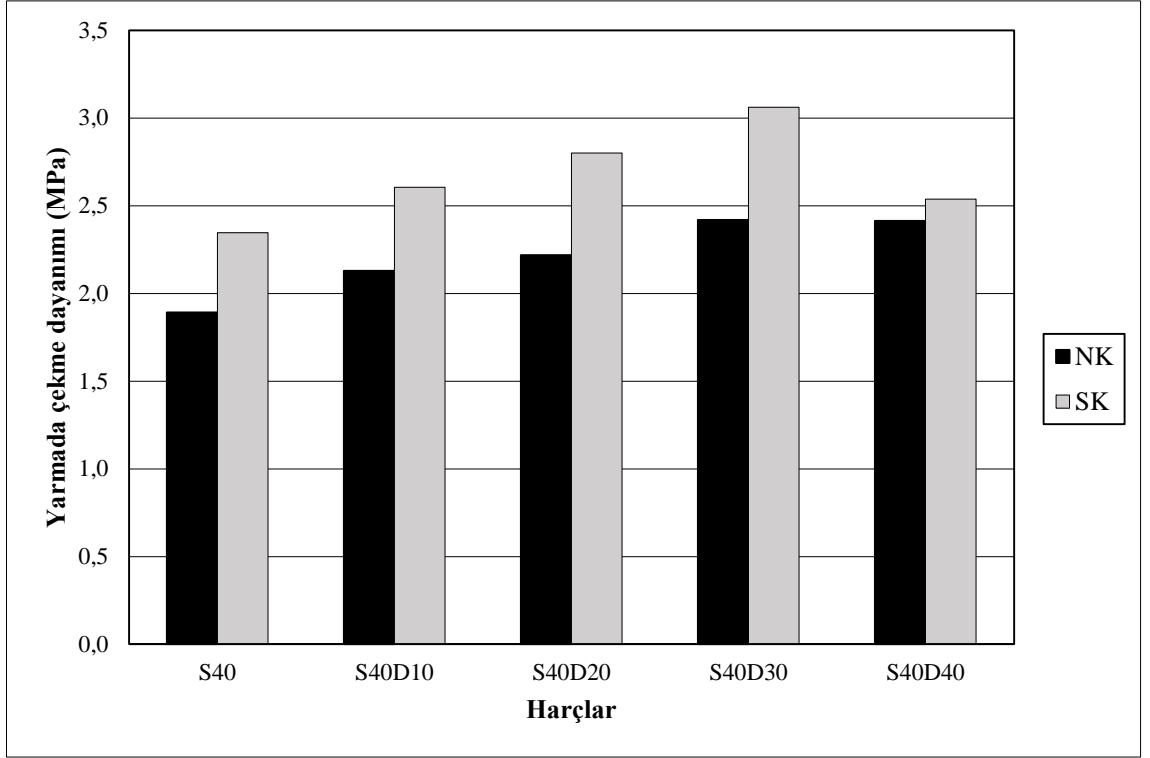
S60D karışım serisi dikkate alındığında, en düşük yarmada çekme dayanımlarını normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 1,9 ve 2,1 MPa olmak üzere S60 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 2,4 ve 2,6 MPa olmak üzere S60D30 numunelerinde elde edilmiştir.



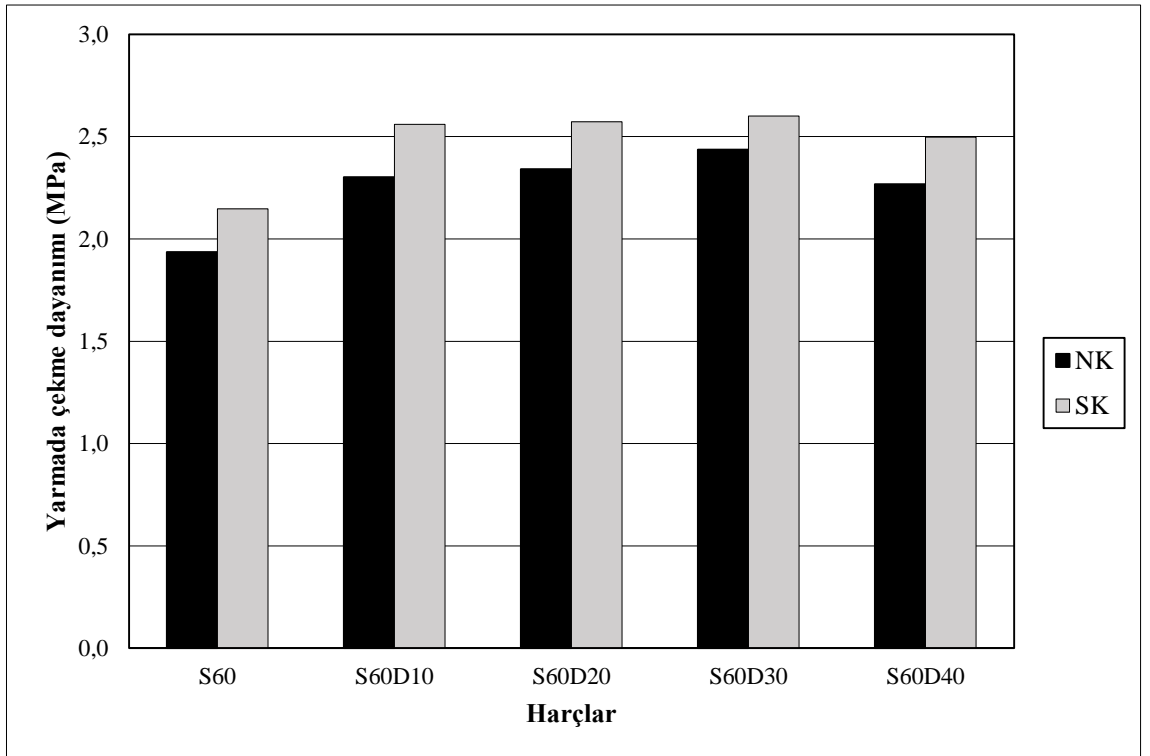
Şekil 4.37. S0D karışım serisinin yarmada çekme dayanımı değerleri



Şekil 4.38. S20D karışım serisinin yarmada çekme dayanımı değerleri



Şekil 4.39. S40D karışım serisinin yarmada çekme dayanımı değerleri



Şekil 4.40. S60D karışım serisinin yarmada çekme dayanımı değerleri

4.6. KBA'nın Eğilmede Çekme Dayanımı Üzerindeki Etkisi

Kür koşulları, bağlayıcı tipi ve içeriği, agrega tipi ve içeriğinin, eğilmede çekme dayanımı üzerine etkileri Şekil 4.41-48'de gösterilmektedir.

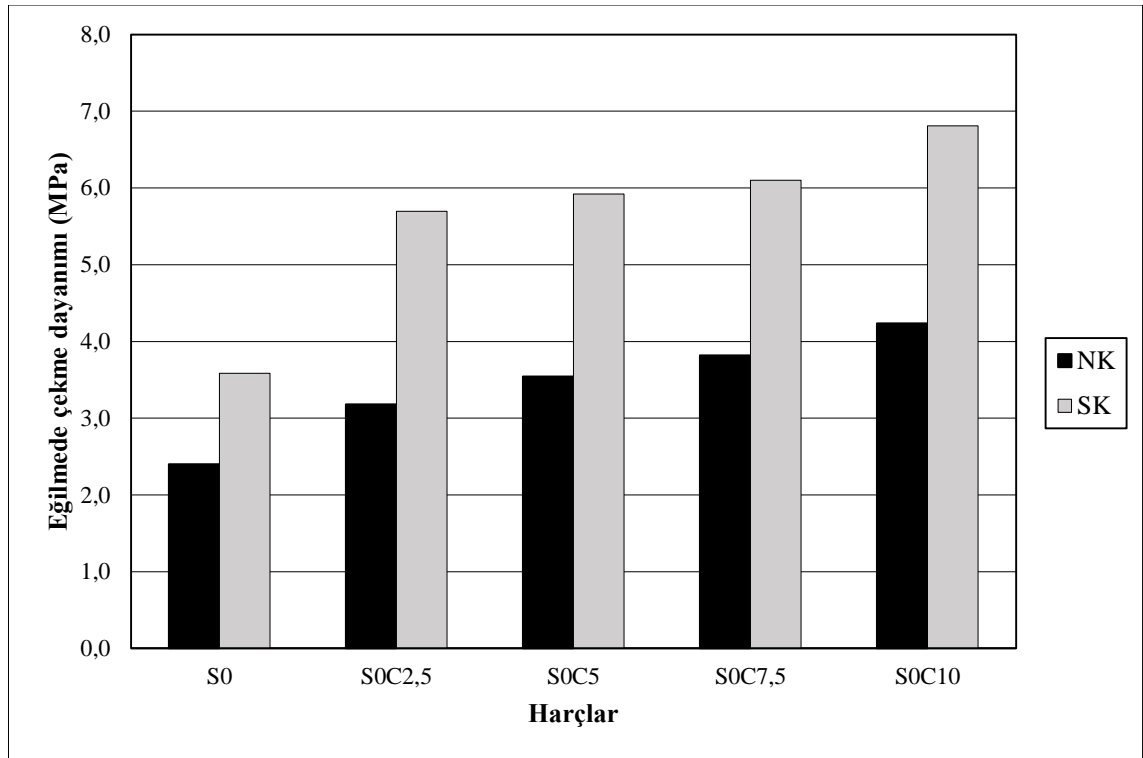
4.6.1. SC karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri

S0C karışım serisi dikkate alındığında, en düşük eğilmede çekme dayanımlarını normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 2,4 ve 3,6 MPa olmak üzere S0 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 4,2 ve 6,8 MPa olmak üzere S0C10 numunelerinde elde edilmiştir.

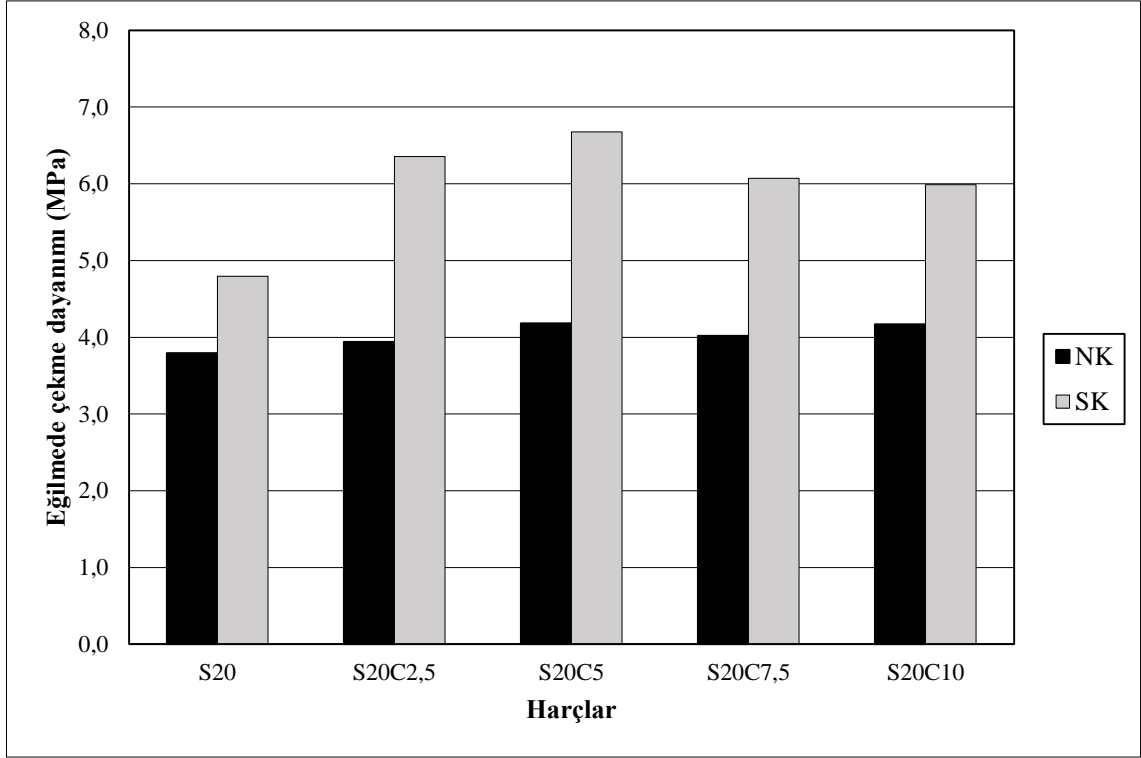
S20C karışım serisi dikkate alındığında, en düşük eğilmede çekme dayanımlarını normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 3,8 ve 4,8 MPa olmak üzere S20 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 4,2 ve 6,7 MPa olmak üzere S20C5 numunelerinde elde edilmiştir.

S40C karışım serisi dikkate alındığında, en düşük eğilmede çekme dayanımlarını normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 4,3 ve 5,0 MPa olmak üzere S40 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 4,8 ve 6,2 MPa olmak üzere S40C5 numunelerinde elde edilmiştir.

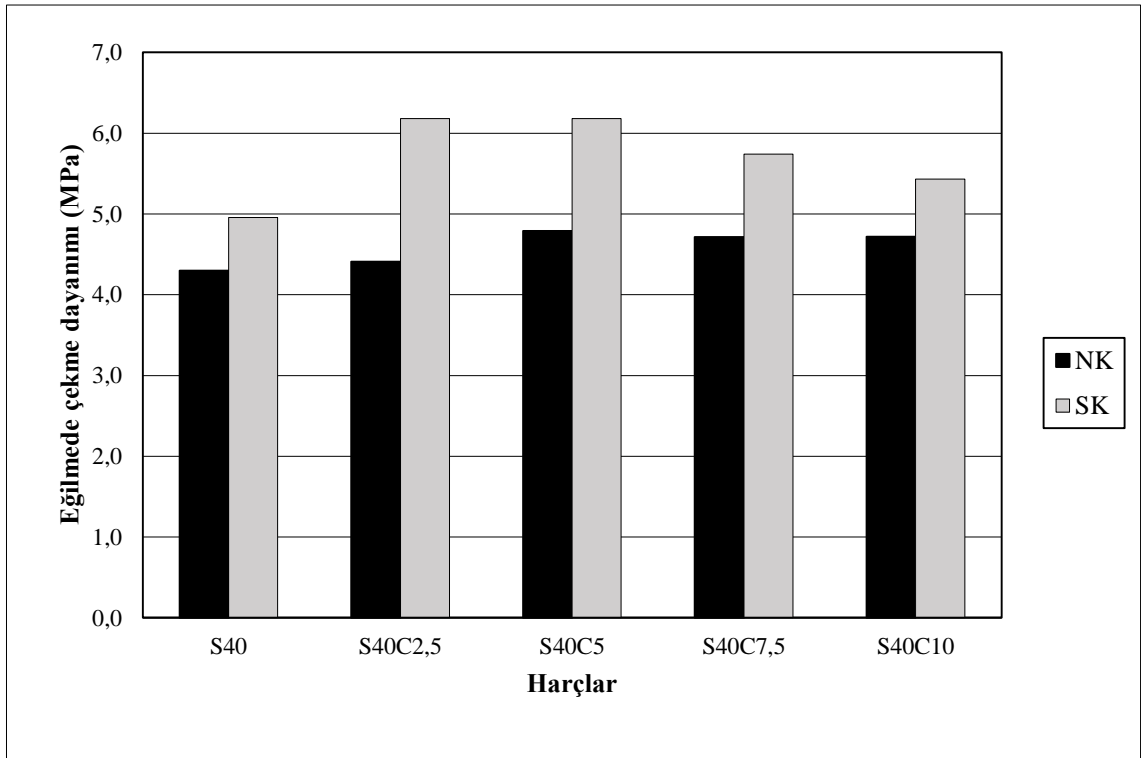
S60C karışım serisi dikkate alındığında, en düşük eğilmede çekme dayanımlarını normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 2,9 ve 3,9 MPa olmak üzere S60 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 4,3 ve 6,1 MPa olmak üzere S60C5 numunelerinde elde edilmiştir.



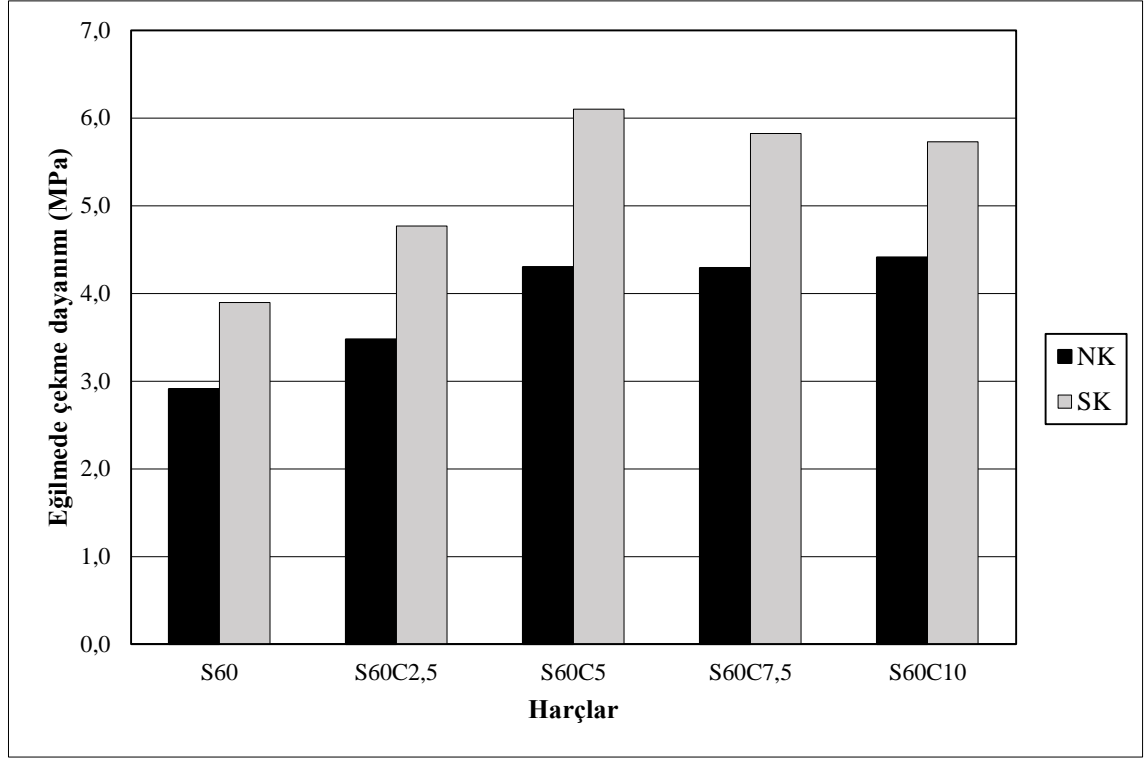
Şekil 4.41. S0C karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri



Şekil 4.42. S20C karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri



Şekil 4.43. S40C karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri



Şekil 4.44. S60C karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri

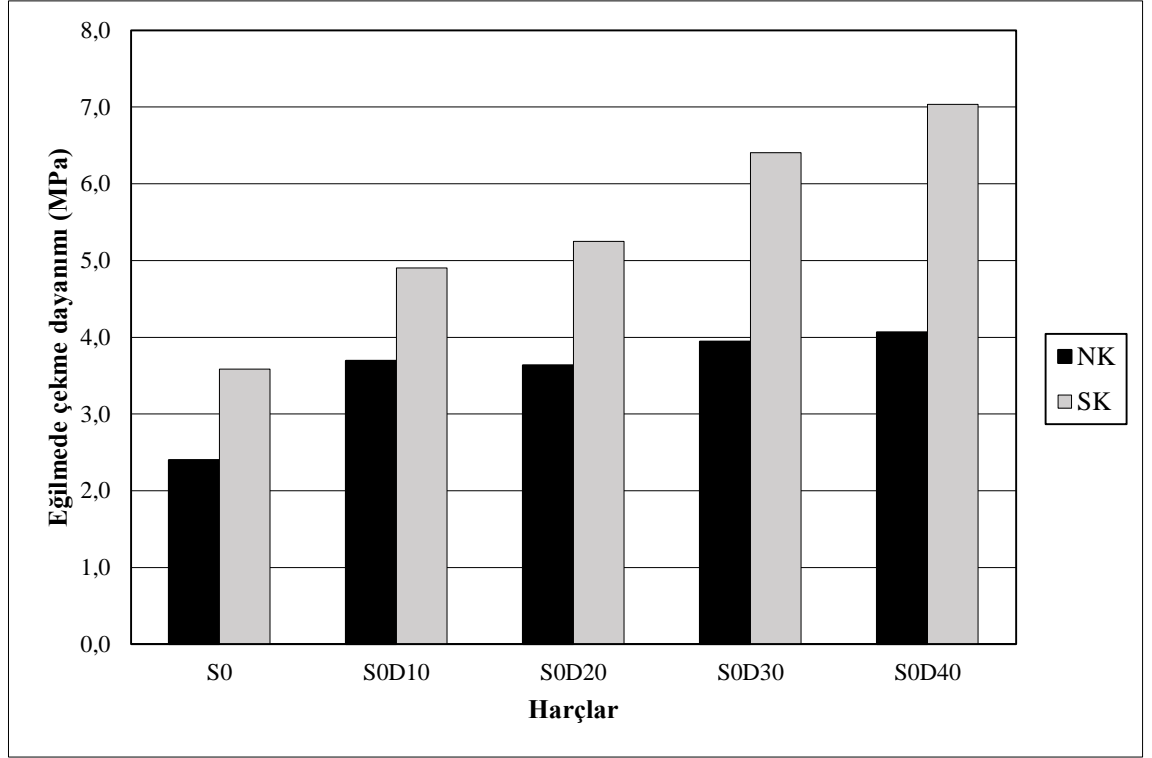
4.6.2. SD karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri

S0D karışım serisi dikkate alındığında, en düşük eğilmede çekme dayanımlarını normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 2,4 ve 3,6 MPa olmak üzere S0 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 4,1 ve 7,0 MPa olmak üzere S0D10 numunelerinde elde edilmiştir.

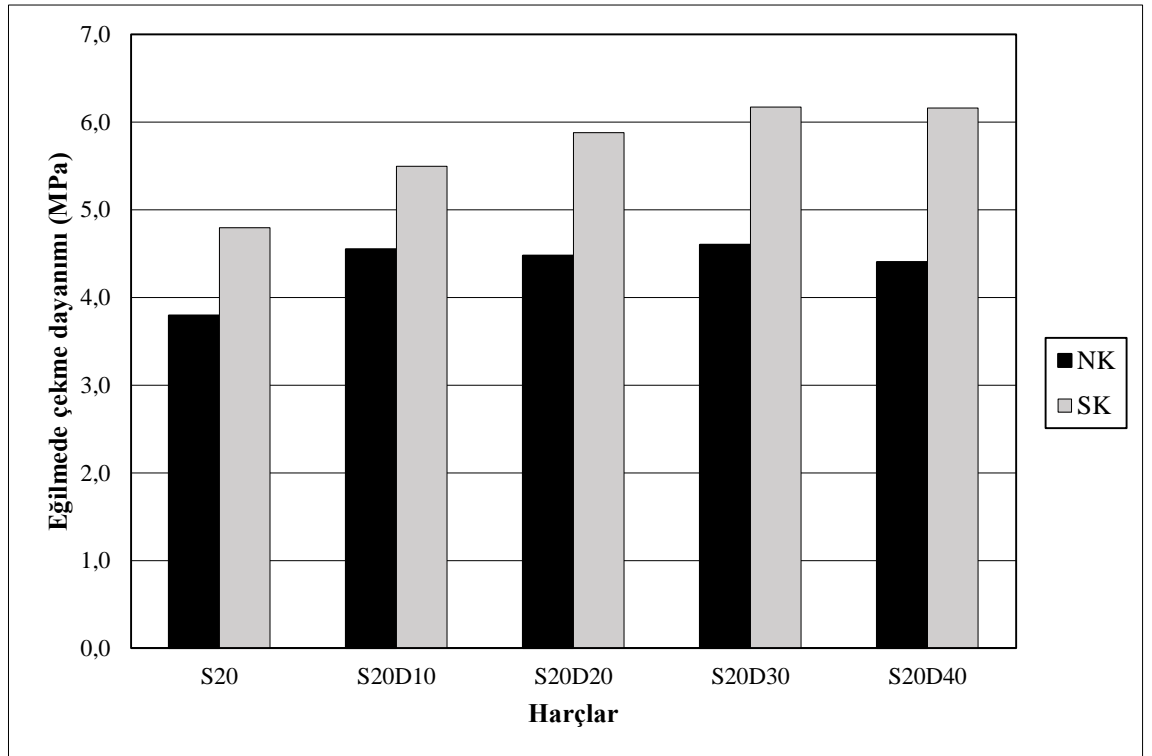
S20D karışım serisi dikkate alındığında, en düşük eğilmede çekme dayanımlarını normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 3,8 ve 4,8 MPa olmak üzere S20 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 4,6 ve 6,2 MPa olmak üzere S20D30 numunelerinde elde edilmiştir.

S40D karışım serisi dikkate alındığında, en düşük eğilmede çekme dayanımlarını normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 4,3 ve 5,0 MPa olmak üzere S40 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 4,9 ve 6,6 MPa olmak üzere S40D30 numunelerinde elde edilmiştir.

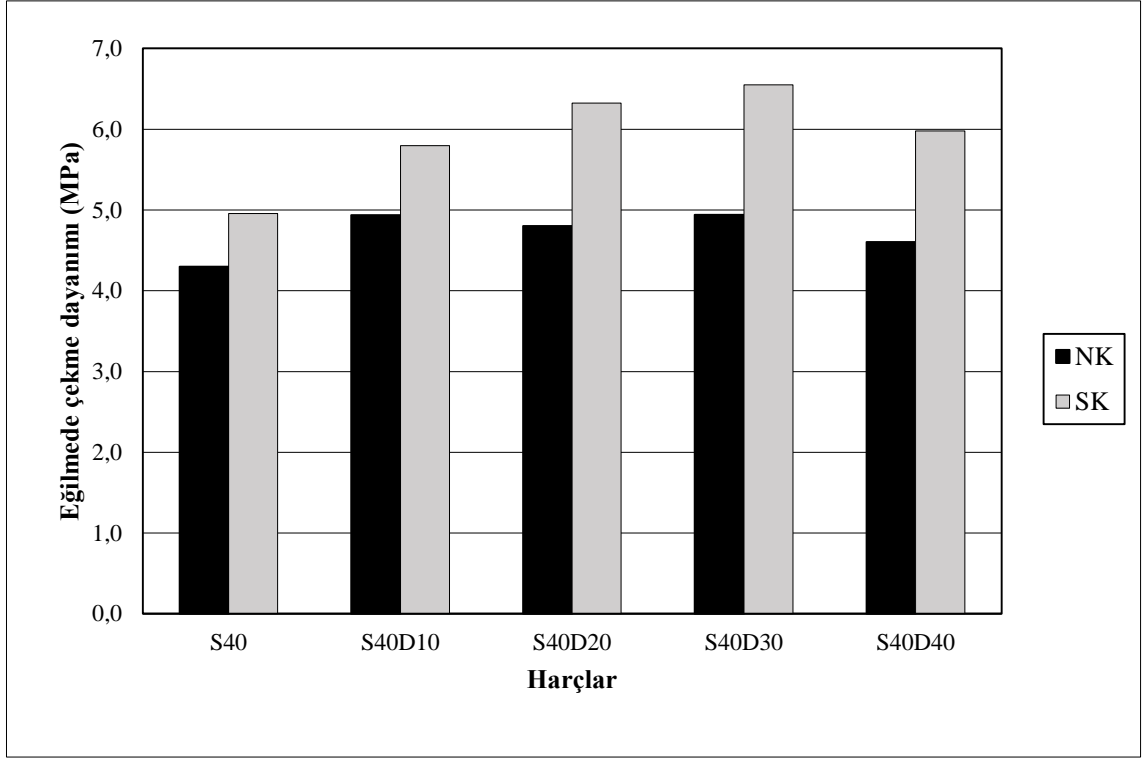
S60D karışım serisi dikkate alındığında, en düşük eğilmede çekme dayanımlarını normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 2,9 ve 3,9 MPa olmak üzere S60 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 5,2 ve 6,3 MPa olmak üzere S60D40 numunelerinde elde edilmiştir.



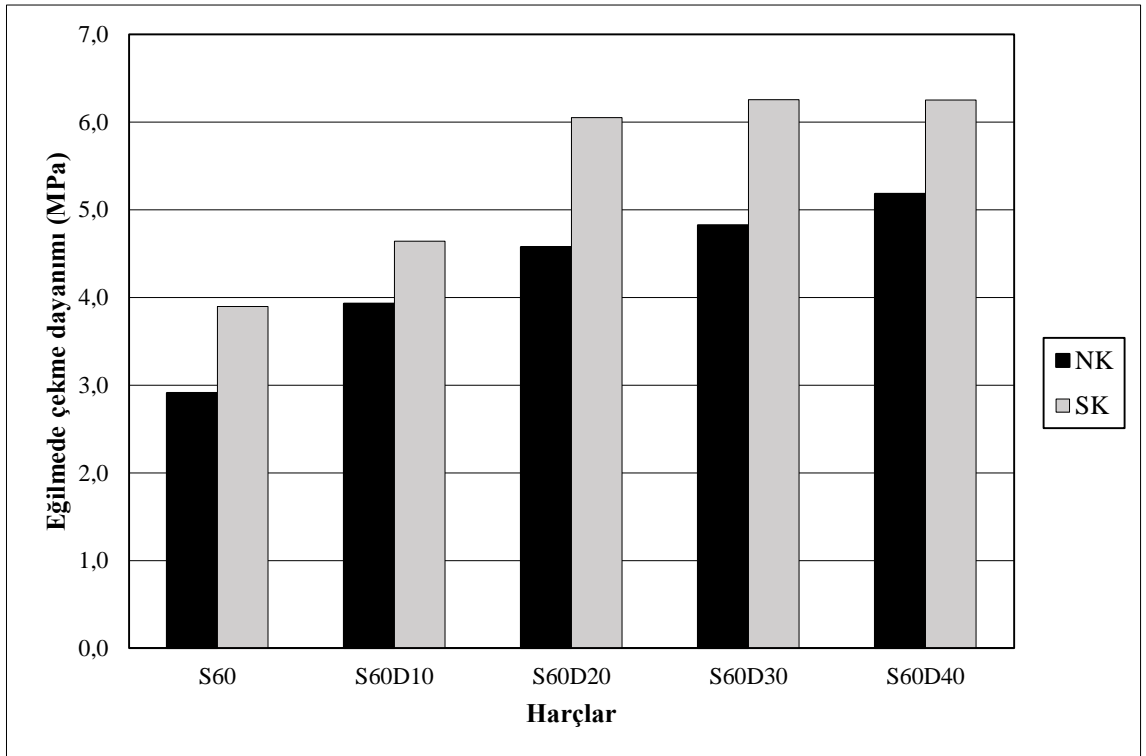
Şekil 4.45. S0D karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri



Şekil 4.46. S20D karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri



Şekil 4.47. S40D karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri



Şekil 4.48. S60D karışım serisinin eğilmede çekme dayanımı değerleri

4.7. KBA'nın Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi

Kür koşulları, bağlayıcı tipi ve içeriği, agrega tipi ve içeriğinin, basınç dayanımı üzerine etkileri Şekil 4.49-56'da gösterilmektedir.

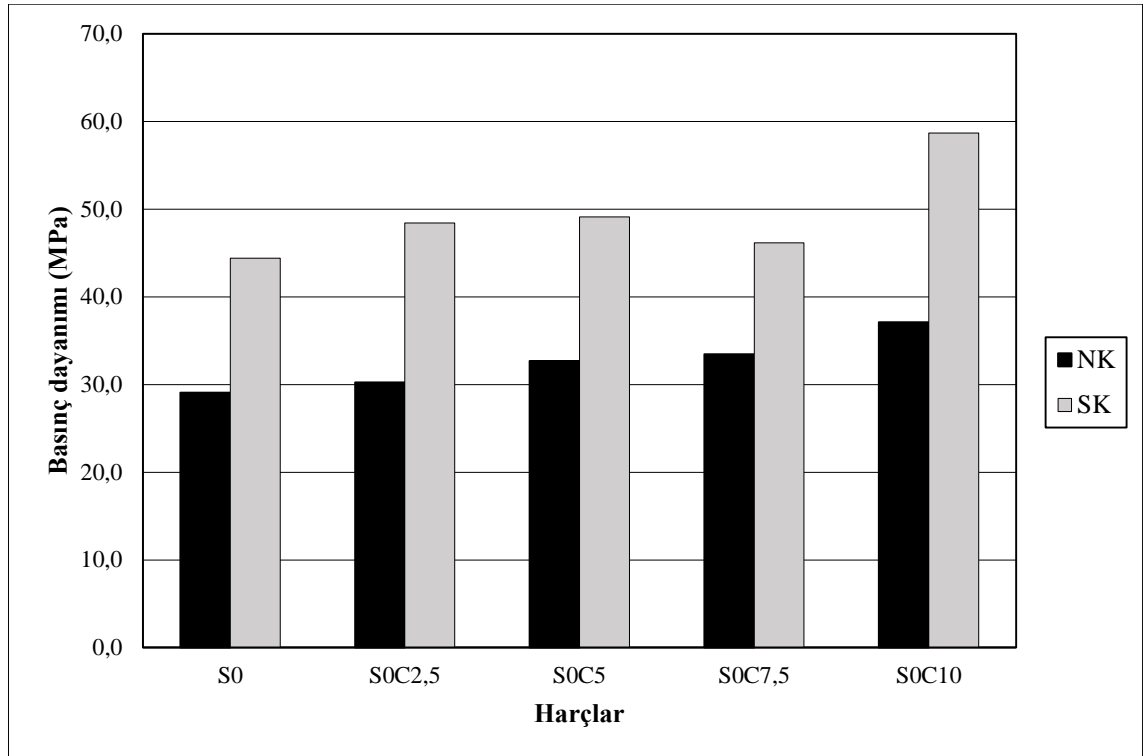
4.7.1. SC karışım serisi basınç dayanımı değerleri

S0C karışım serisi dikkate alındığında, en düşük basınç dayanımlarını normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 29,1 ve 44,4 MPa olmak üzere S0 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 37,1 ve 58,7 MPa olmak üzere S0C10 numunelerinde elde edilmiştir.

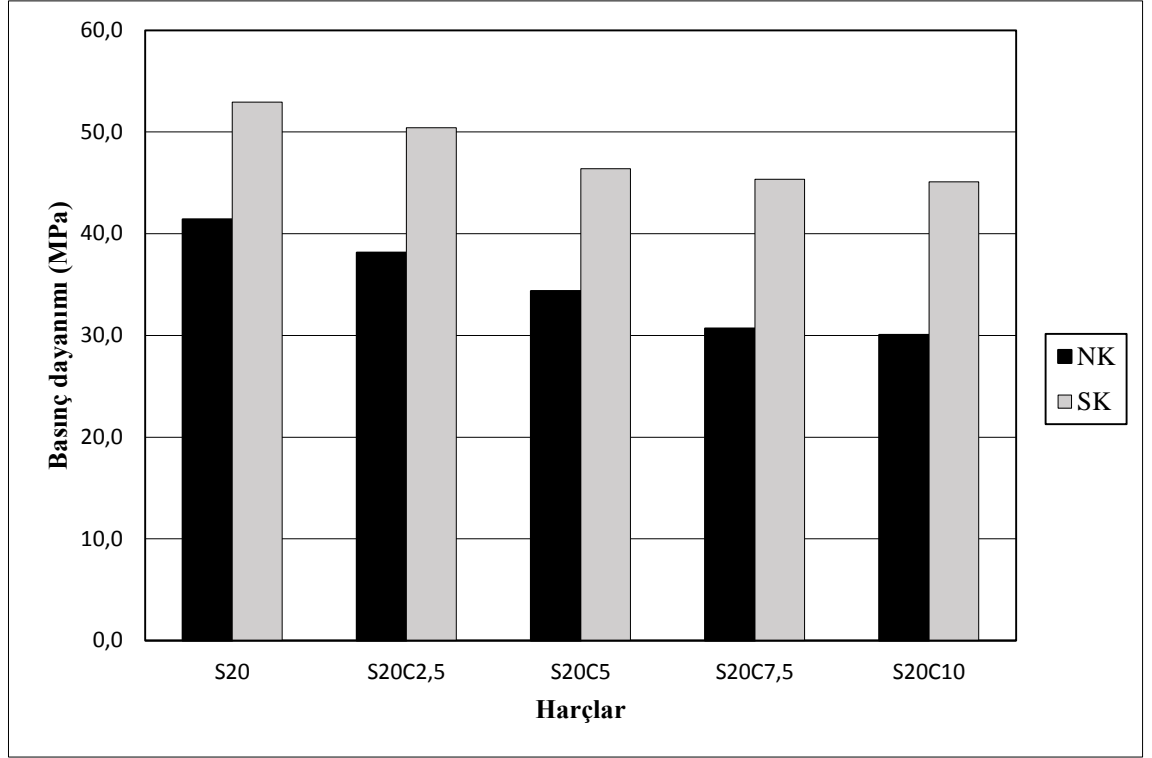
S20C karışım serisi dikkate alındığında, en düşük basınç dayanımlarını normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 30,1 ve 45,1 MPa olmak üzere S20C10 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 41,4 ve 52,9 MPa olmak üzere S20 numunelerinde elde edilmiştir.

S40C karışım serisi dikkate alındığında, en düşük basınç dayanımlarını normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 34,7 ve 40,3 MPa olmak üzere S0 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 41,9 ve 43,5 MPa olmak üzere S0C10 numunelerinde elde edilmiştir.

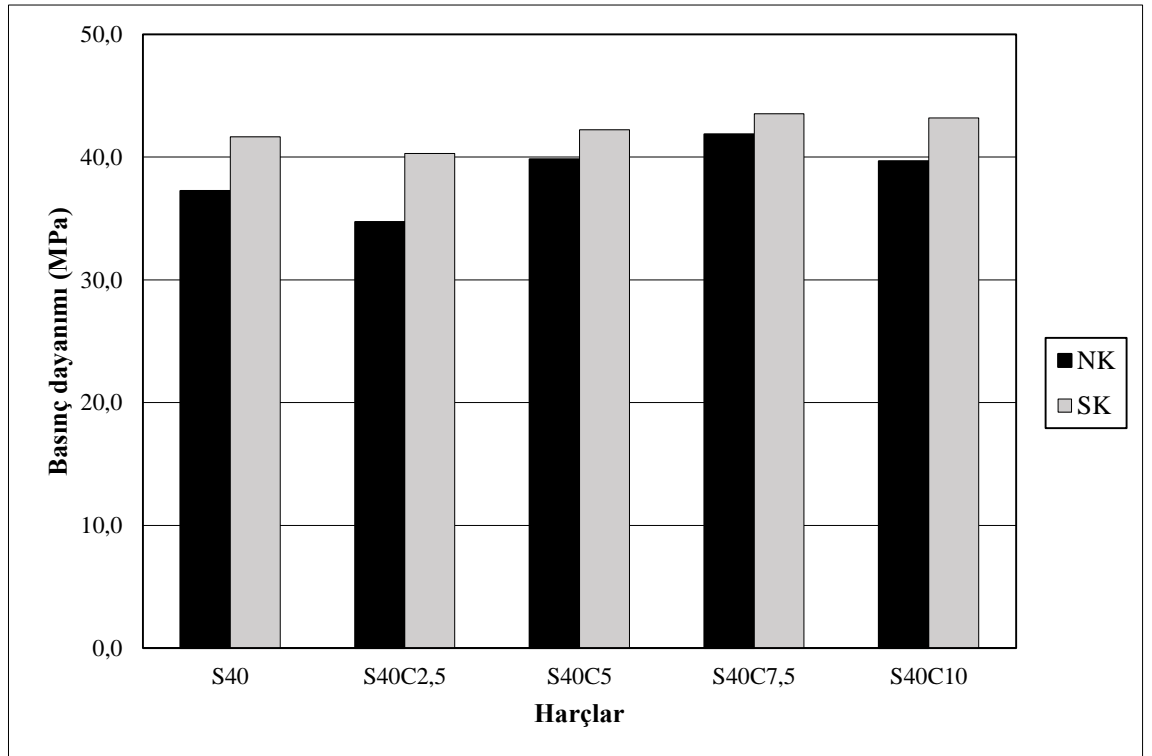
S60C karışım serisi dikkate alındığında, en düşük basınç dayanımlarını normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 28,4 ve 30,2 MPa olmak üzere S60C7,5 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 31,2 ve 34,3 MPa olmak üzere S60 numunelerinde elde edilmiştir.



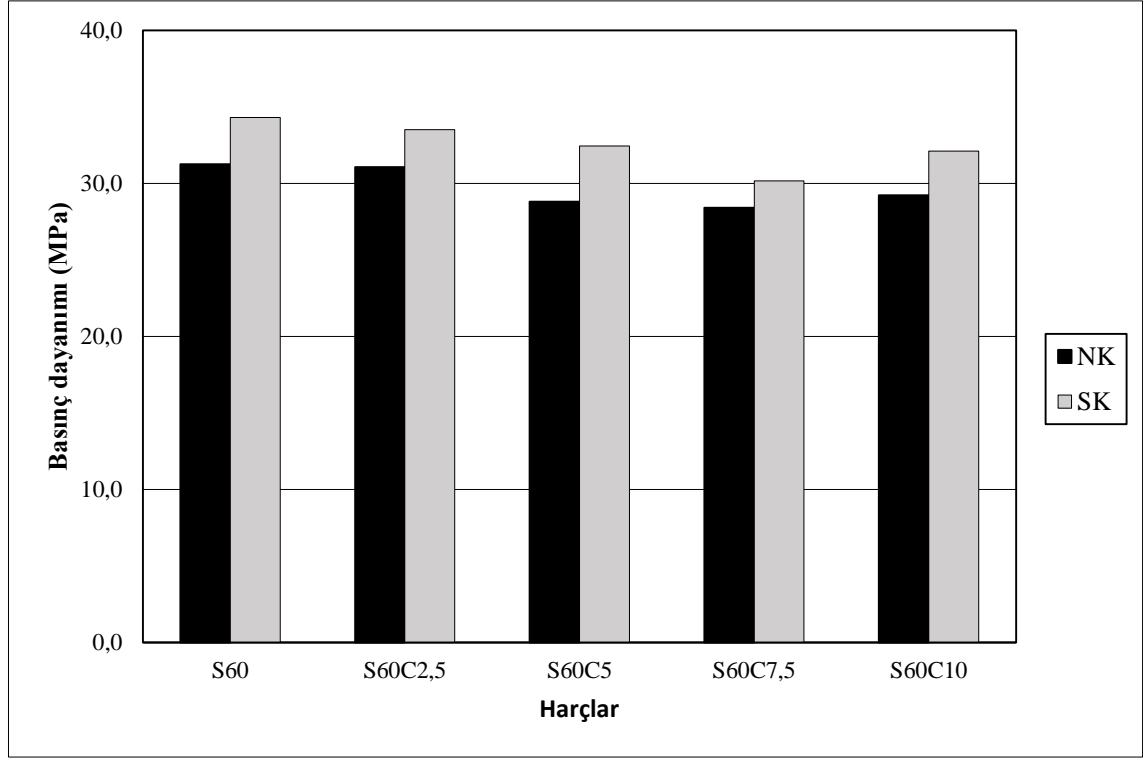
Şekil 4.49. S0C karışım serisinin basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.50. S20C karışım serisinin basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.51. S40C karışım serisinin basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.52. S60C karışım serisinin basınç dayanımı değerleri

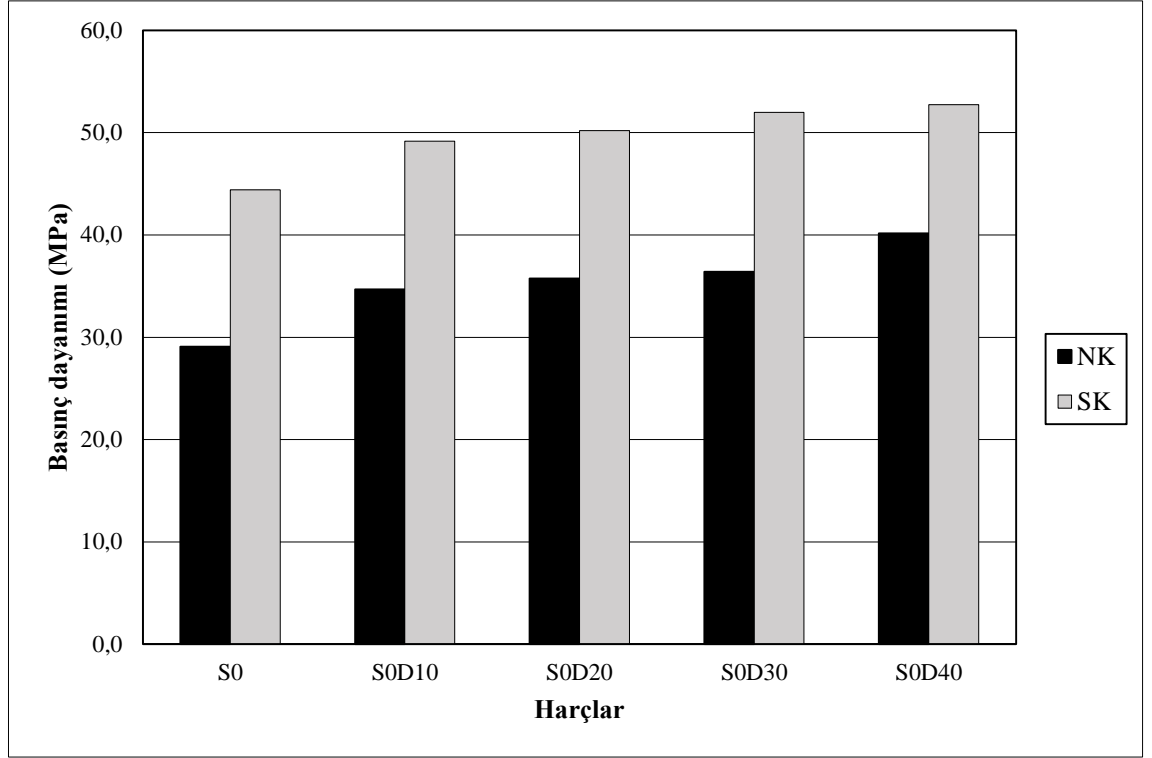
4.7.2. SD karışım serisinin basınç dayanımı değerleri

S0D karışım serisi dikkate alındığında, en düşük basınç dayanımlarını normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 29,1 ve 44,4 MPa olmak üzere S0 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 40,1 ve 52,7 MPa olmak üzere S0D40 numunelerinde elde edilmiştir.

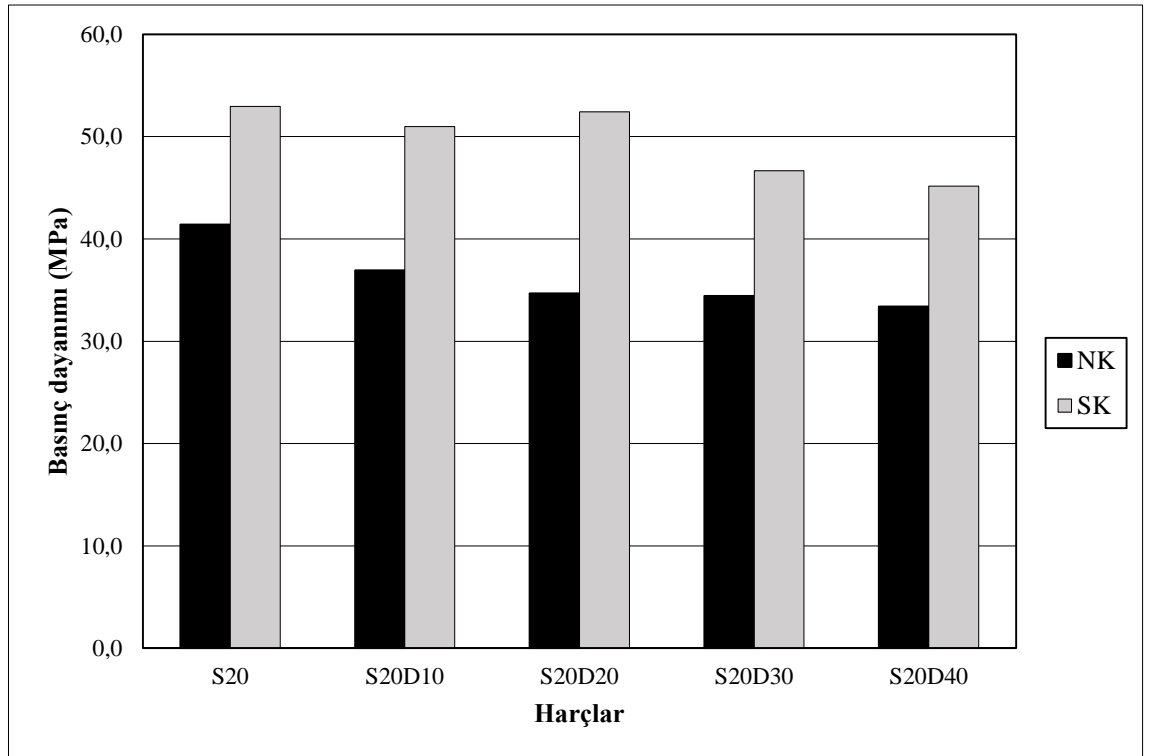
S20D karışım serisi dikkate alındığında, en düşük basınç dayanımlarını normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 33,4 ve 45,2 MPa olmak üzere S20D40 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 41,4 ve 52,9 MPa olmak üzere S20 numunelerinde elde edilmiştir.

S40D karışım serisi dikkate alındığında, en düşük basınç dayanımlarını normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 28,3 ve 35,5 MPa olmak üzere S40D40 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 37,6 ve 42,8 MPa olmak üzere S0D10 numunelerinde elde edilmiştir.

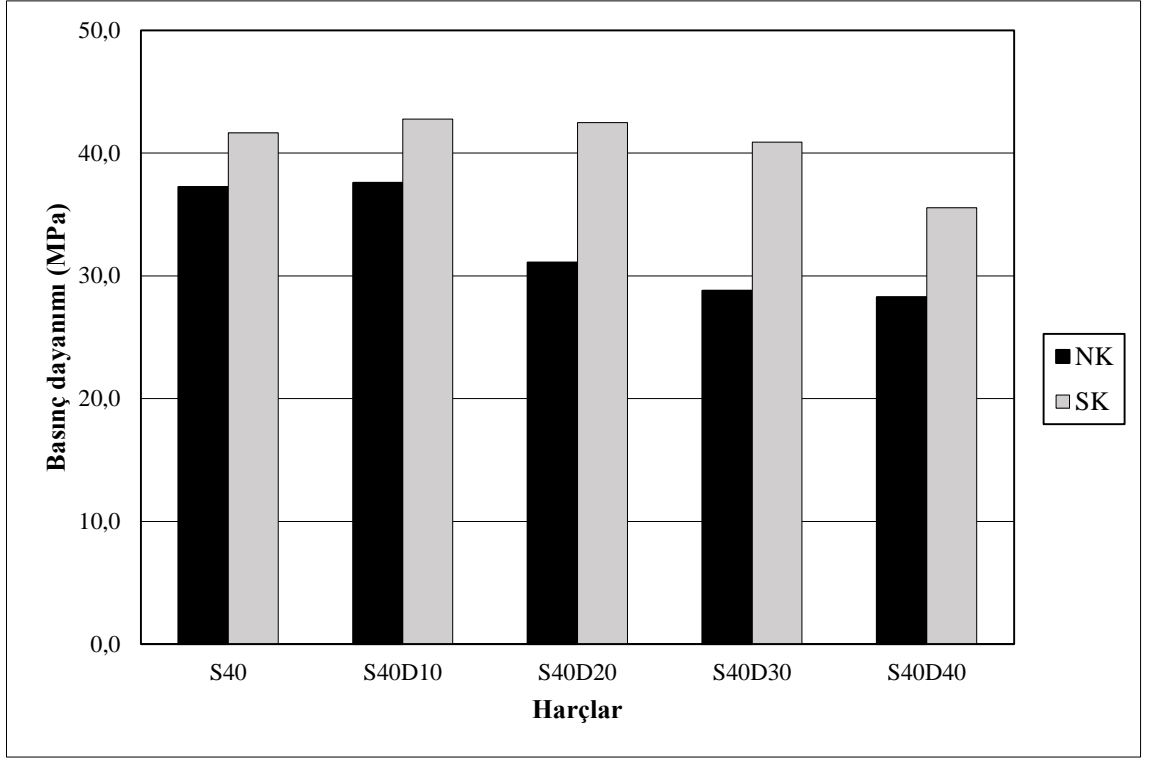
S60D karışım serisi dikkate alındığında, en düşük basınç dayanımlarını normal su kürü ve sıcak su kürü koşullarında sırasıyla 27,8 ve 34,3 MPa olmak üzere S60D40 numuneleri gösterirken, en yüksek değerler sırasıyla 39,7 ve 49,7 MPa olmak üzere S60D20 numunelerinde elde edilmiştir.



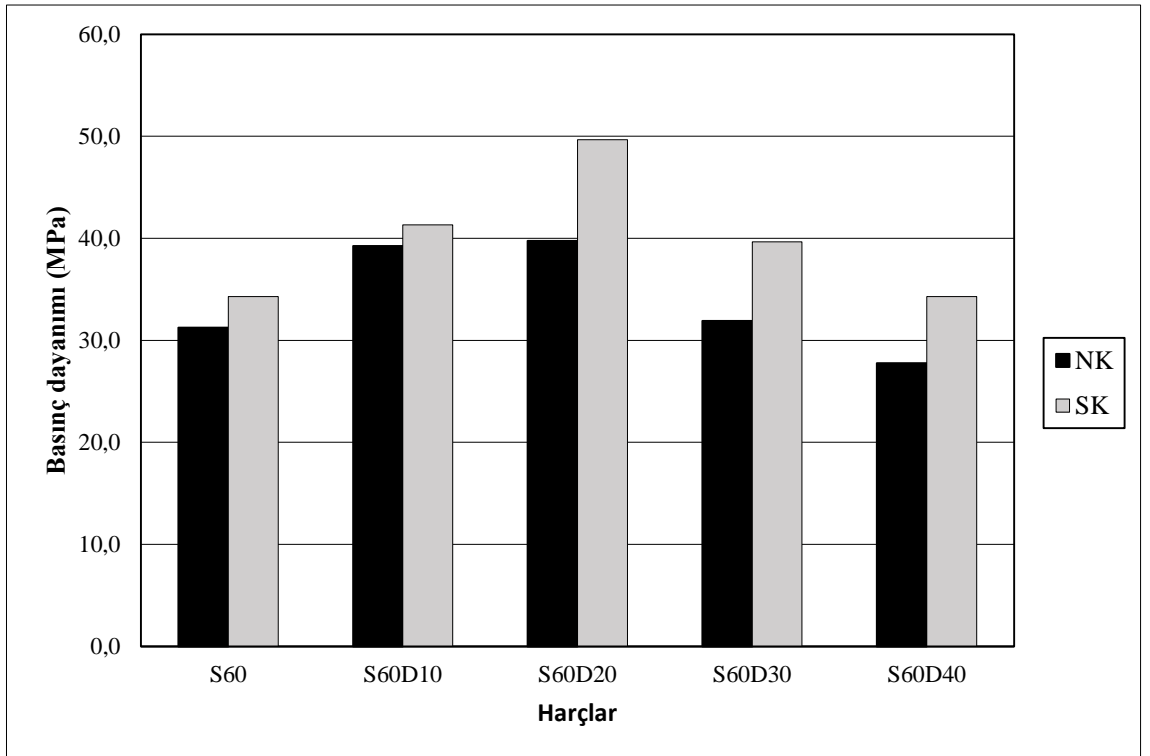
Şekil 4.53. S0D karışım serisinin basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.54. S20D karışım serisinin basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.55. S40D karışım serisinin basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.56. S60D karışım serisinin basınç dayanımı değerleri

4.8. KBA'nın Kılcal Su Emme Katsayısı Üzerindeki Etkisi

Kür koşulları, bağlayıcı tipi ve içeriği, agrega tipi ve içeriğinin, kılcal su emme katsayısı üzerine etkileri Şekil 4.57-64'te gösterilmektedir.

4.8.1. SC karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri

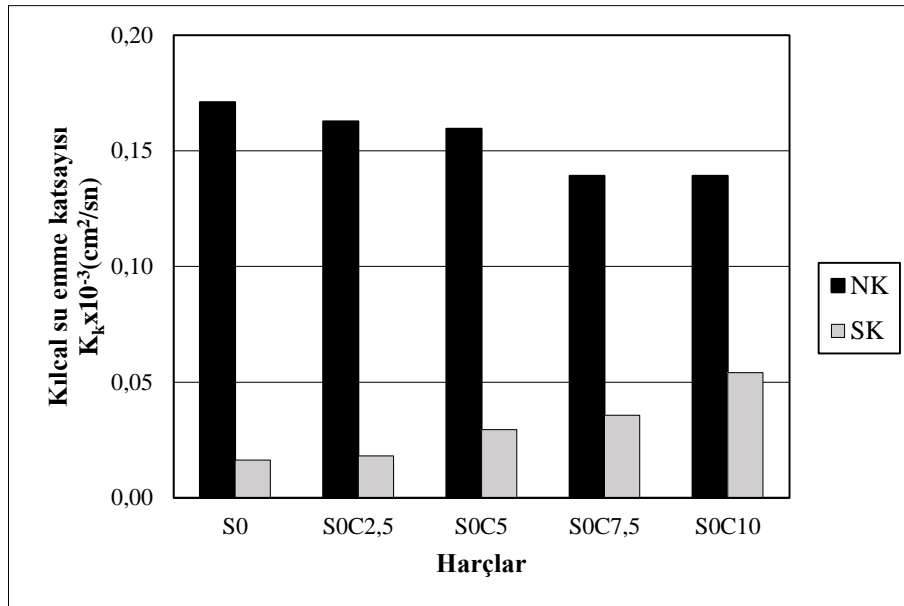
S0, S20, S40, S60 karışım serileri dikkate alındığında normal su kürü koşullarına tabii tutulan numunelerin kılcal su emme katsayılarının agrega içeriğinden önemli derecede etkilenmediği ve birbirine çok yakın değerler verdiği görülmüştür.

S0C karışım serisi dikkate alındığında sıcak su kürü koşullarında en düşük kılcal su emme katsayısını $0,02 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak S0 kontrol numunesi gösterirken, en yüksek kılcal su emme katsayısı $0,05 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak S0C10 numunesinde elde edilmiştir.

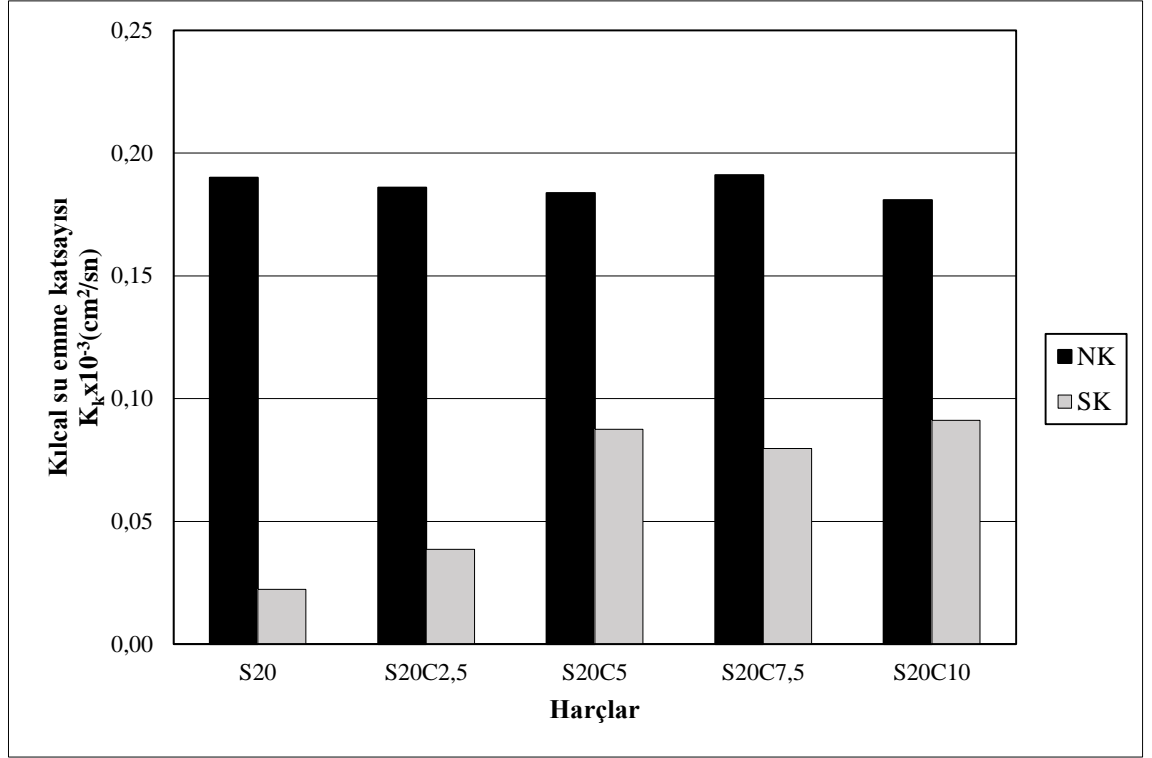
S20C karışım serisi dikkate alındığında sıcak su kürü koşullarında en düşük kılcal su emme katsayısını $0,02 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak S20 kontrol numunesi gösterirken, en yüksek kılcal su emme katsayısı $0,09 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak S20C10 numunesinde elde edilmiştir.

S40C karışım serisi dikkate alındığında sıcak su kürü koşullarında en düşük kılcal su emme katsayısını $0,03 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak S40 kontrol numunesi gösterirken, en yüksek kılcal su emme katsayısı $0,10 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak S40C10 numunesinde elde edilmiştir.

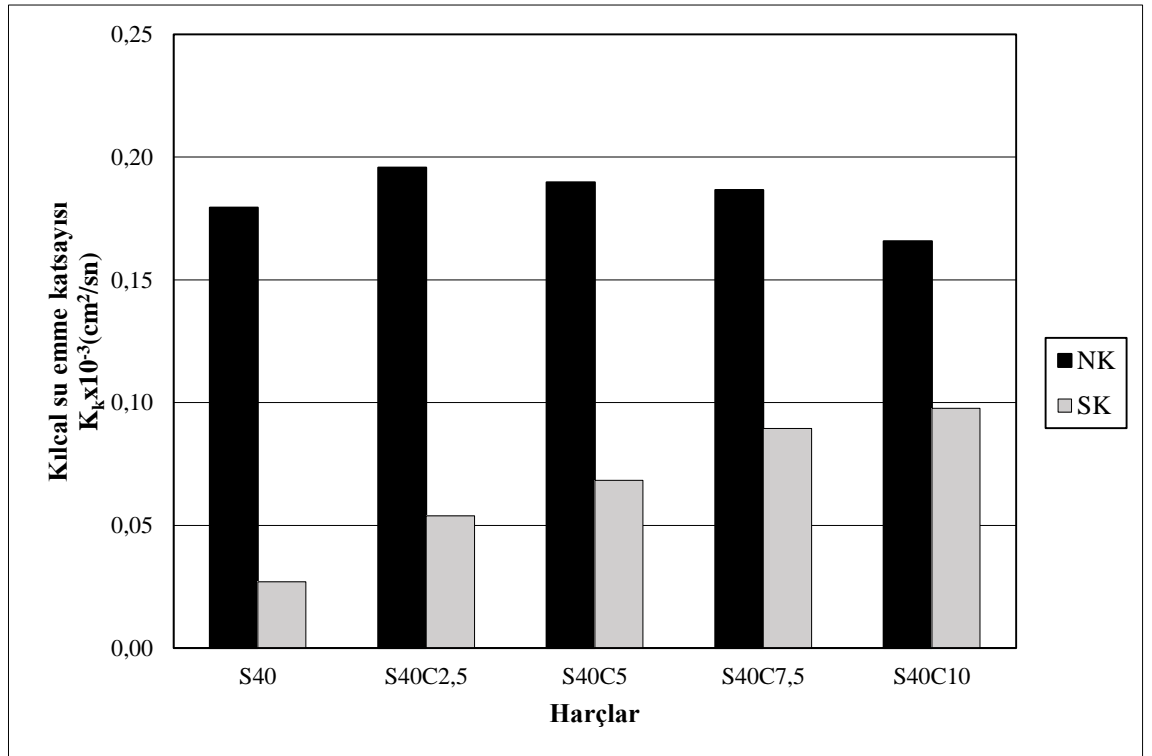
S60C karışım serisi dikkate alındığında sıcak su kürü koşullarında en düşük kılcal su emme katsayısını $0,11 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak S60 kontrol numunesi gösterirken, en yüksek kılcal su emme katsayısı $0,17 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak S60C10 numunesinde elde edilmiştir.



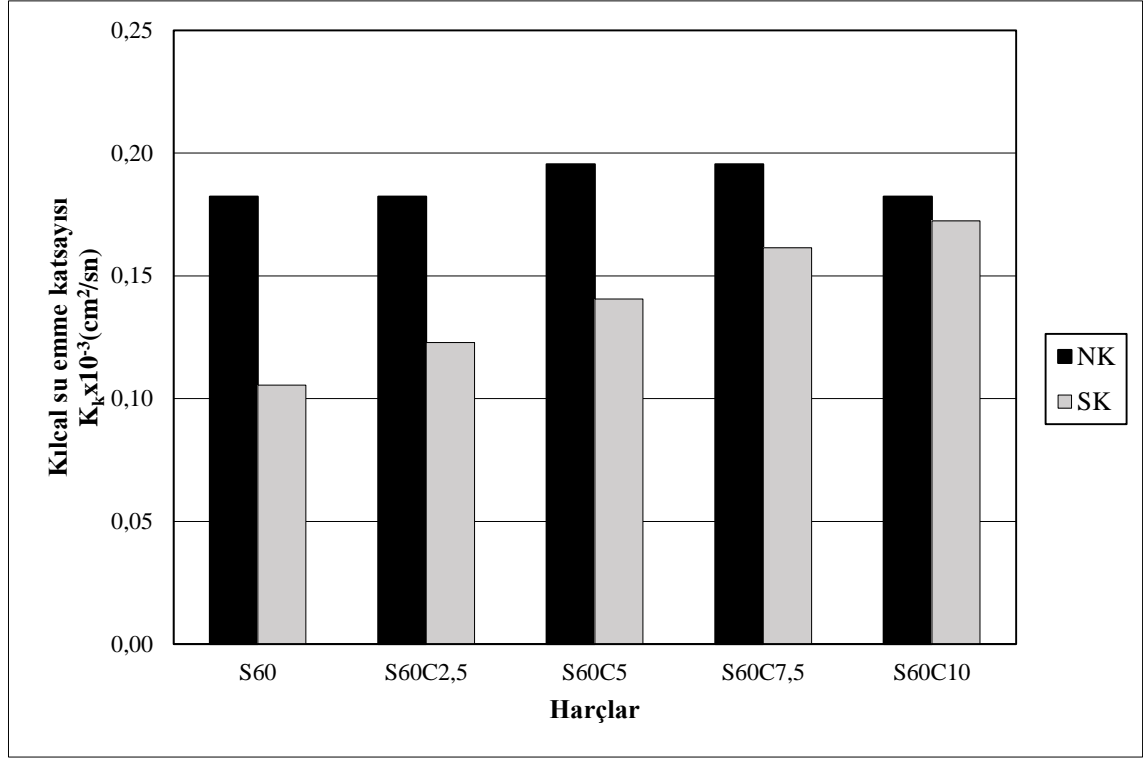
Şekil 4.57. S0C karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri



Şekil 4.58. S20C karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri



Şekil 4.59. S40C karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri



Şekil 4.60. S60C karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri

4.8.2. SD karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri

Normal su kuru koşullarına tabi tutulan S0D, S20D, S40D karışım serilerine dikkat edilecek olursa, $0,18 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sn}$ değeriyle S0D10 ve S20D20 numuneleri dışında genel olarak agregadaki metal yüzdesi arttıkça kılcal su emme katsayılarında bir düşme eğilimi gözlenmiştir. S60D karışım serilerinde ise normal su koşullarında, birbirine çok yakın değerler elde edilmesine istinaden, agrega yüzdesindeki değişimin kılcal su emme katsayısı üzerinde çok fazla etkisi olmadığı gözlenmiştir.

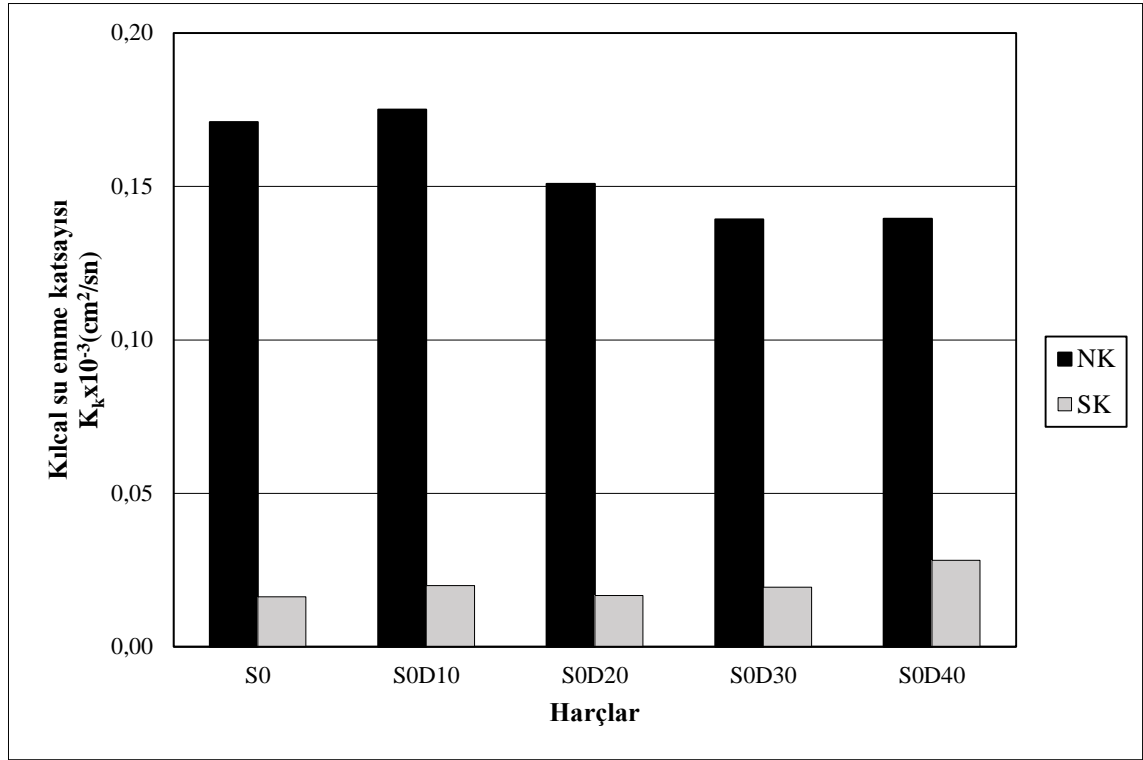
S0D karışım serisi dikkate alındığında sıcak su kuru koşullarında en düşük kılcal su emme katsayısını $0,02 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak S0 kontrol numunesi gösterirken, en yüksek kılcal su emme katsayısı $0,03 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak S0D40 numunesinde elde edilmiştir.

S20D karışım serisi dikkate alındığında sıcak su kuru koşullarında en düşük kılcal su emme katsayısını $0,02 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak S20D10 kontrol numunesi gösterirken, en yüksek kılcal su emme katsayısı $0,03 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak S20D20 numunesinde elde edilmiştir.

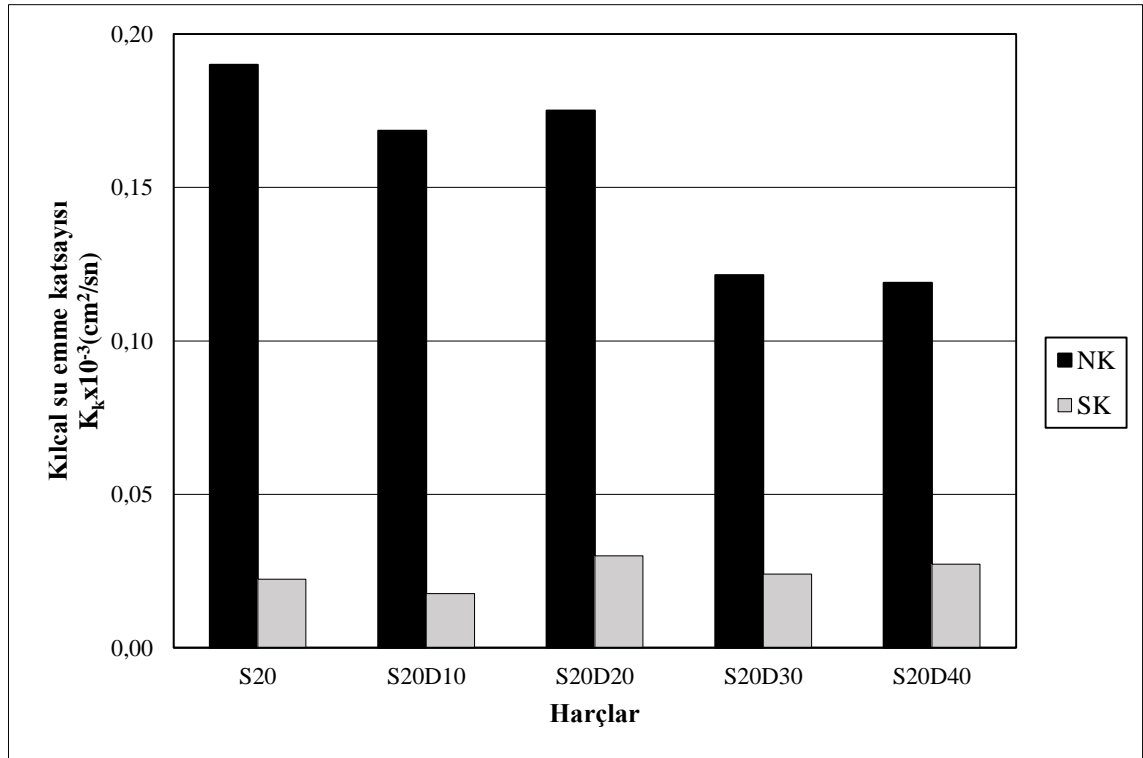
S40D karışım serisi dikkate alındığında sıcak su kuru koşullarında en düşük kılcal su emme katsayısını $0,03 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak S40 kontrol numunesi gösterirken, en yüksek kılcal su emme katsayısı $0,08 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak S40D30 numunesinde elde edilmiştir.

S60D karışım serisi dikkate alındığında sıcak su kuru koşullarında en düşük kılcal su emme katsayısını $0,11 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak S60 kontrol numunesi gösterirken,

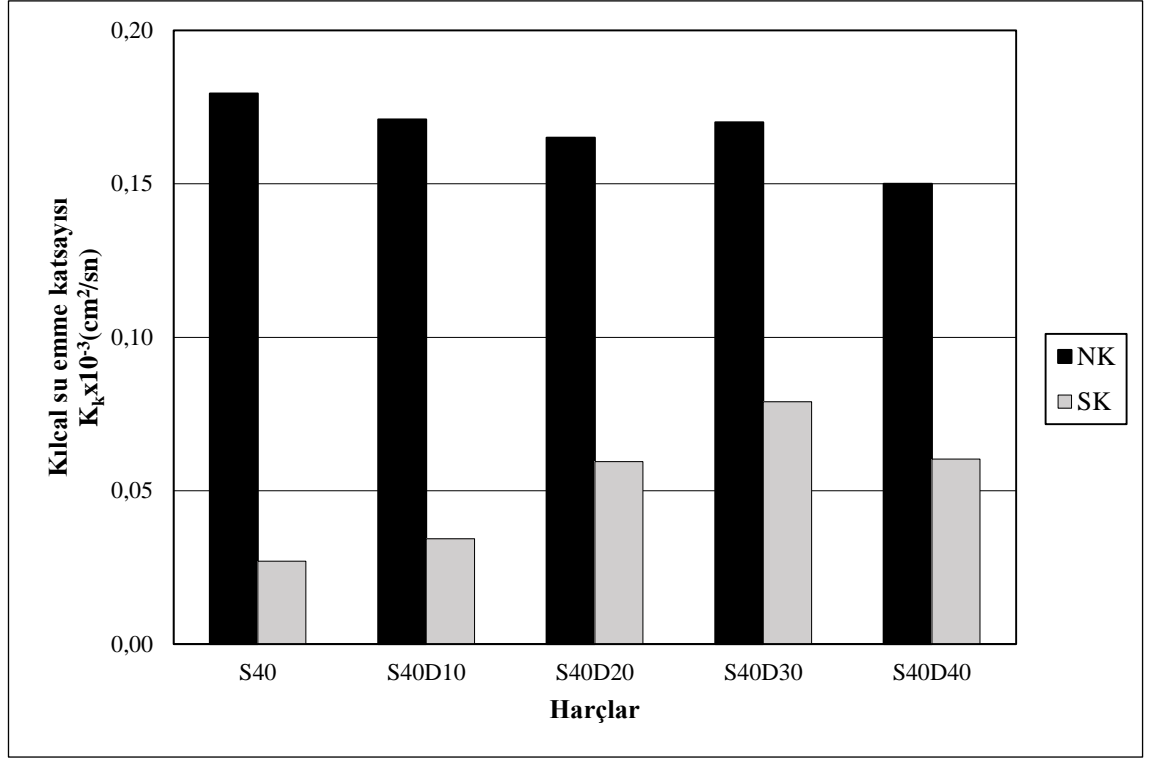
en yüksek kılcal su emme katsayısı $0,17 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak S60D20 numunesinde elde edilmiştir.



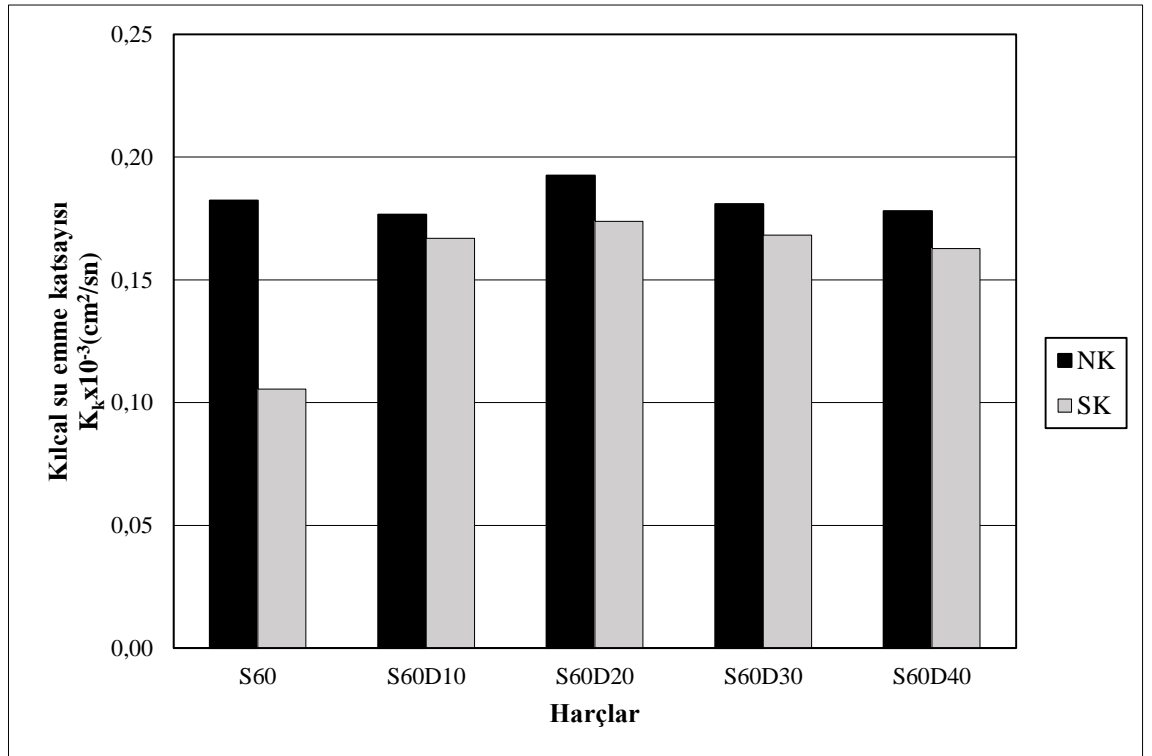
Şekil 4.61. SOD karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri



Şekil 4.62. S20D karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri



Şekil 4.63. S40D karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri



Şekil 4.64. S60D karışım serisinin kılcal su emme katsayısı değerleri

4.9. BA'nın Kuruma Büzülmesi Üzerindeki Etkisi

Bağlayıcı tipi ve içeriği, agrega tipi ve içeriğinin, kuruma büzülmesi üzerine etkileri Şekil 4.65-72'de gösterilmektedir.

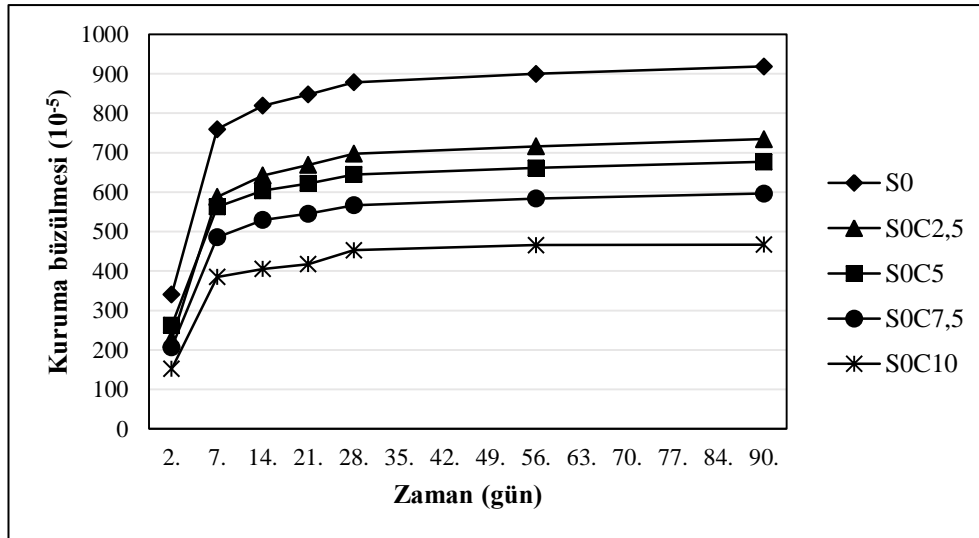
4.9.1. SC karışım serisi kuruma büzülmesi değerleri

S0 karışım serisi dikkate alındığında, S0C2,5, S0C5, S0C7,5, S0C10 numunelerinin 90. güne ait kuruma büzülmesi değerleri sırasıyla $734,4 \times 10^{-5}$, $676,7 \times 10^{-5}$, $596,3 \times 10^{-5}$, $467,2 \times 10^{-5}$ olmak üzere karışımdaki metal yüzdesi arttıkça azalan bir eğilim göstermiştir. S0 kontrol numunesi ise 90. gün sonunda $918,2 \times 10^{-5}$ kuruma büzülmesi değeri göstermiştir.

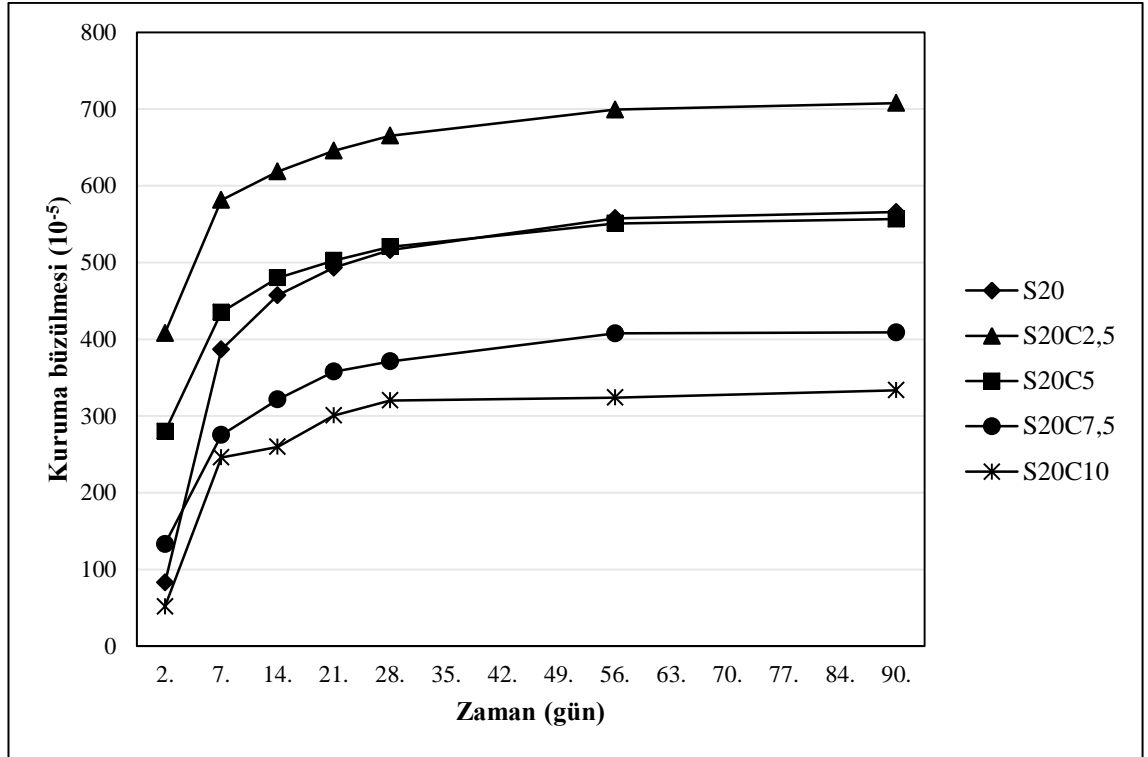
S20 karışım serisi dikkate alındığında, S20C2,5, S20C5, S20C7,5, S20C10 numunelerinin 90. güne ait kuruma büzülmesi değerleri sırasıyla $707,7 \times 10^{-5}$, $556,5 \times 10^{-5}$, $408,9 \times 10^{-5}$, $333,7 \times 10^{-5}$ olmak üzere karışımdaki metal yüzdesi arttıkça azalan bir eğilim göstermiştir. S20 kontrol numunesi ise 90. gün sonunda $565,8 \times 10^{-5}$ kuruma büzülmesi değeri göstermiştir.

S40 karışım serisi dikkate alındığında, S40C2,5, S40C5, S40C7,5, S40C10 numunelerinin 90. güne ait kuruma büzülmesi değerleri sırasıyla $607,9 \times 10^{-5}$, $575,1 \times 10^{-5}$, $525,1 \times 10^{-5}$, $444,2 \times 10^{-5}$ olmak üzere karışımdaki metal yüzdesi arttıkça azalan bir eğilim göstermiştir. S40 kontrol numunesi ise 90. gün sonunda $546,0 \times 10^{-5}$ kuruma büzülmesi değeri göstermiştir.

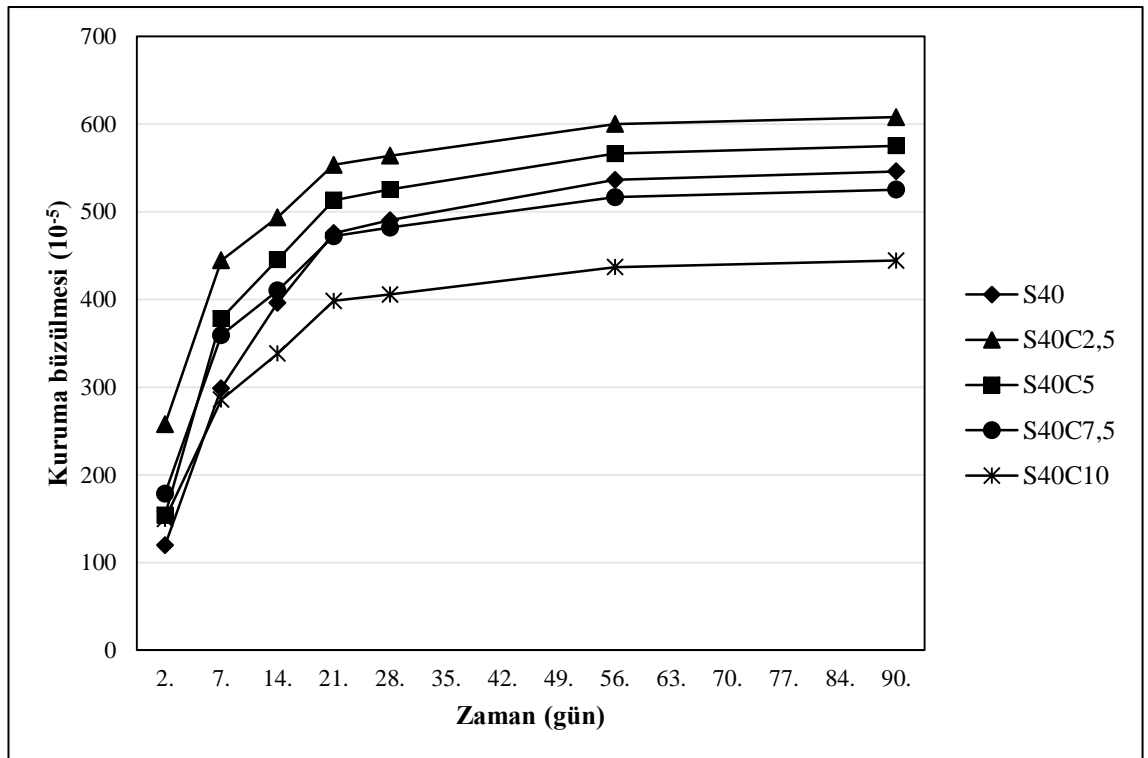
S60 karışım serisi kapsamındaki S60, S60C2,5, S60C5, S60C7,5, S60C10 numunelerinin 90. güne ait kuruma büzülmesi değerleri dikkate alındığında, eğrilerin birbirine çok yaklaştığı ve silis dumanının %60 oranında curuf ile yer değiştirmesi neticesinde, agrega içeriği ve miktarının değişmesi ile kuruma büzülmesi değerlerinin etkilenmediği açıkça görülmektedir. 90. günde en yüksek kuruma büzülmesini $548,2 \times 10^{-5}$ değeri ile S60 numuneleri, en düşük kuruma büzülmesini ise $455,3 \times 10^{-5}$ değeri ile S60C10 numunelerinin gösterdiği gözlenmiştir.



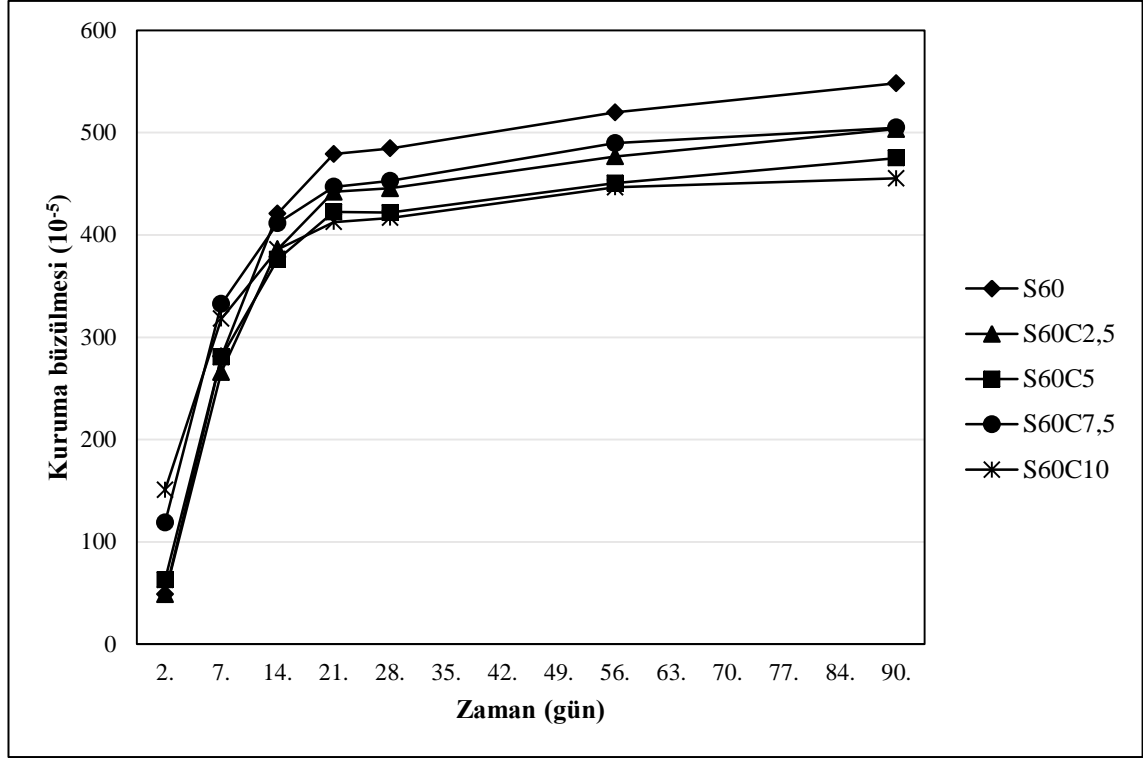
Şekil 4.65. SOC karışım serisi kuruma büzülmesinin zamanla değişimi



Şekil 4.66. S20C karışım serisi kuruma büzülmesinin zamanla değişimi



Şekil 4.67. S40C karışım serisi kuruma büzülmesinin zamanla değişimi



Şekil 4.68. S60C karışım serisi kuruma büzülmesinin zamanla değişimi

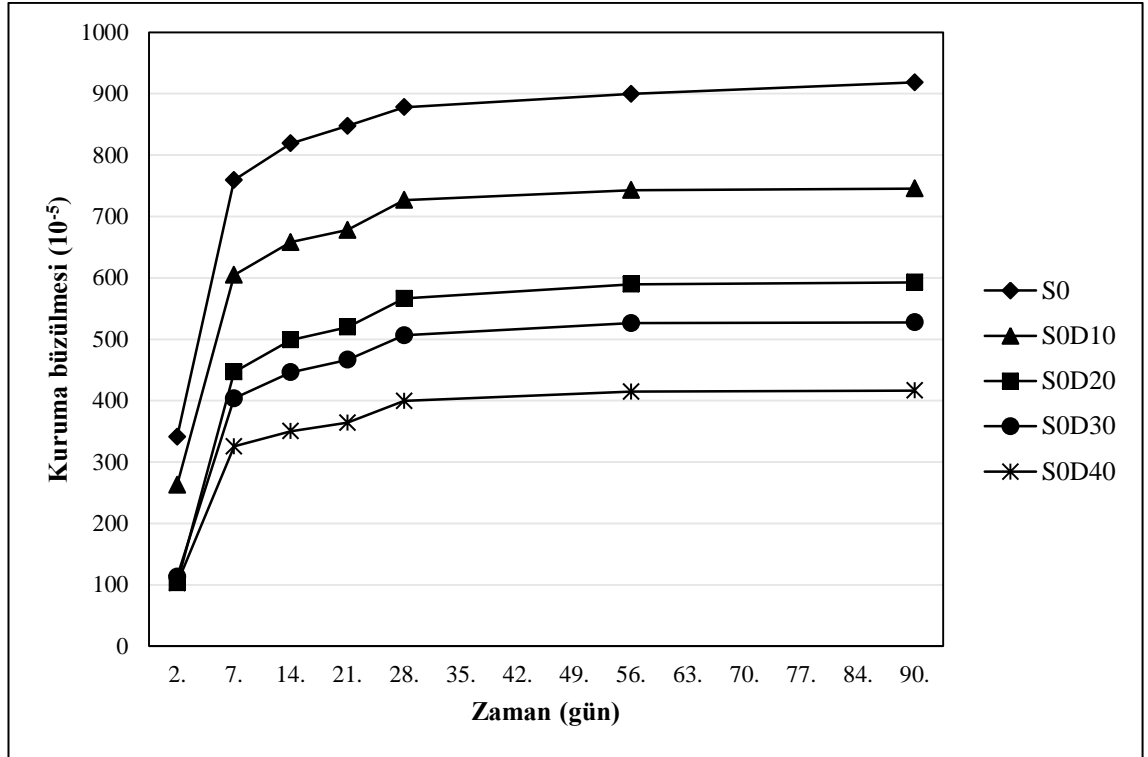
4.9.2. SD karışım serisi kuruma büzülmesi değerleri

S0 karışım serisi dikkate alındığında, S0, S0D10, S0D20, S0D30, S0D40 numunelerinin 90. güne ait kuruma büzülmesi değerleri sırasıyla $918,2 \times 10^{-5}$, $745,6 \times 10^{-5}$, $592,8 \times 10^{-5}$, $527,5 \times 10^{-5}$, $416,5 \times 10^{-5}$ olmak üzere karışımdaki metal yüzdesi arttıkça azalan bir eğilim göstermiştir.

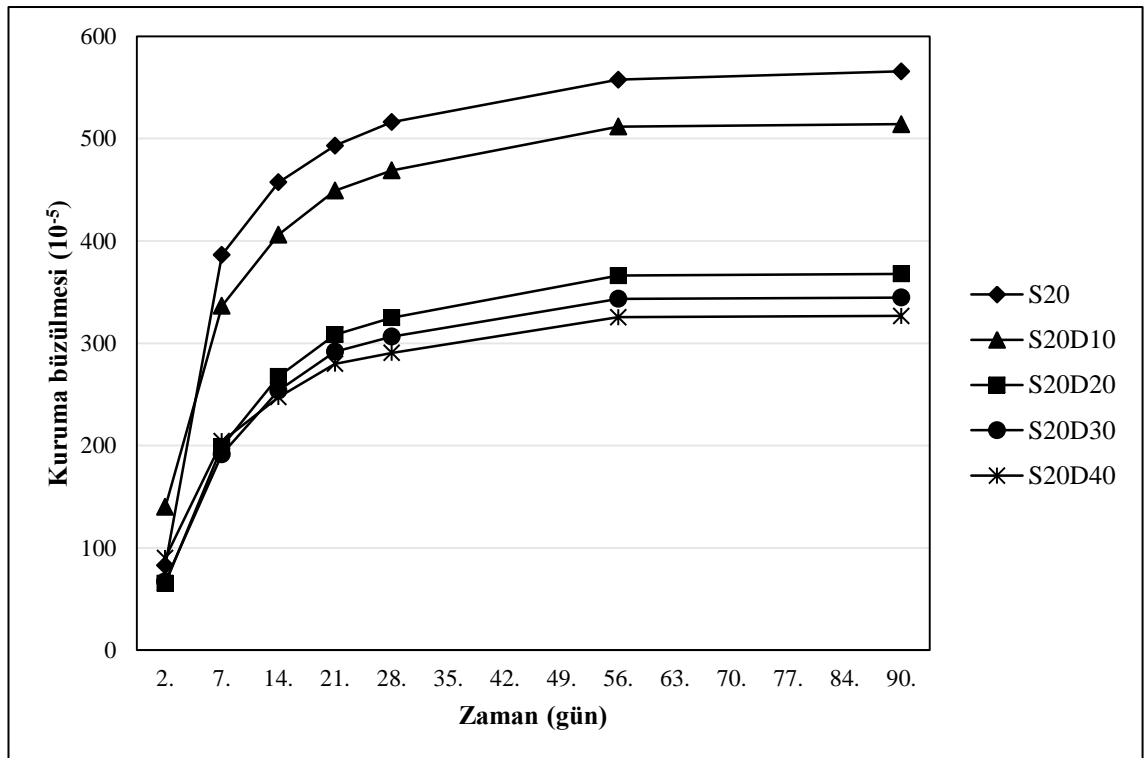
S20 karışım serisi dikkate alındığında, S20, S20D10, S20D20, S20D30, S20D40 numunelerinin 90. güne ait kuruma büzülmesi değerleri sırasıyla $565,8 \times 10^{-5}$, $514,0 \times 10^{-5}$, $367,9 \times 10^{-5}$, $344,7 \times 10^{-5}$, $326,7 \times 10^{-5}$ olmak üzere karışımdaki metal yüzdesi arttıkça azalan bir eğilim göstermiştir.

S40 karışım serisi dikkate alındığında, S40, S40D10, S40D20, S40D30, S40D40 numunelerinin 90. güne ait kuruma büzülmesi değerleri sırasıyla $546,0 \times 10^{-5}$, $448,6 \times 10^{-5}$, $348,9 \times 10^{-5}$, $312,5 \times 10^{-5}$, $280,4 \times 10^{-5}$ olmak üzere karışımdaki metal yüzdesi arttıkça azalan bir eğilim göstermiştir.

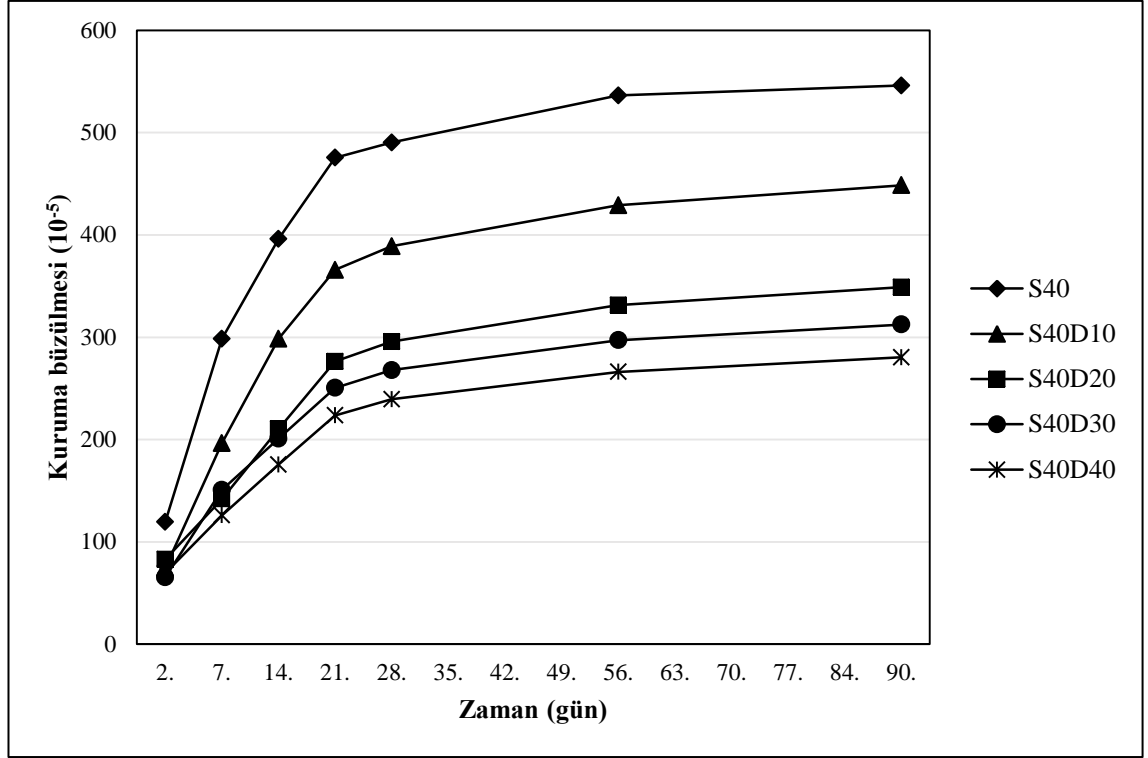
S60 karışım serisi kapsamındaki S60, S60D10, S60D20, S60D30, S60D40 numunelerinin 90. güne ait kuruma büzülmesi değerleri dikkate alındığında, eğrilerin birbirine çok yaklaştığı ve silis dumanının %60 oranında curuf ile yerdeğiştirmesi neticesinde, agrega içeriği ve miktarının değişmesi ile kuruma büzülmesi değerlerinin etkilenmediği açıkça görülmektedir. 90. günde en yüksek kuruma büzülmesini $548,2 \times 10^{-5}$ değeri ile S60 numuneleri, en düşük kuruma büzülmesi değerlerini ise $464,2 \times 10^{-5}$ değeri ile S60D40 numunelerinin gösterdiği gözlenmiştir.



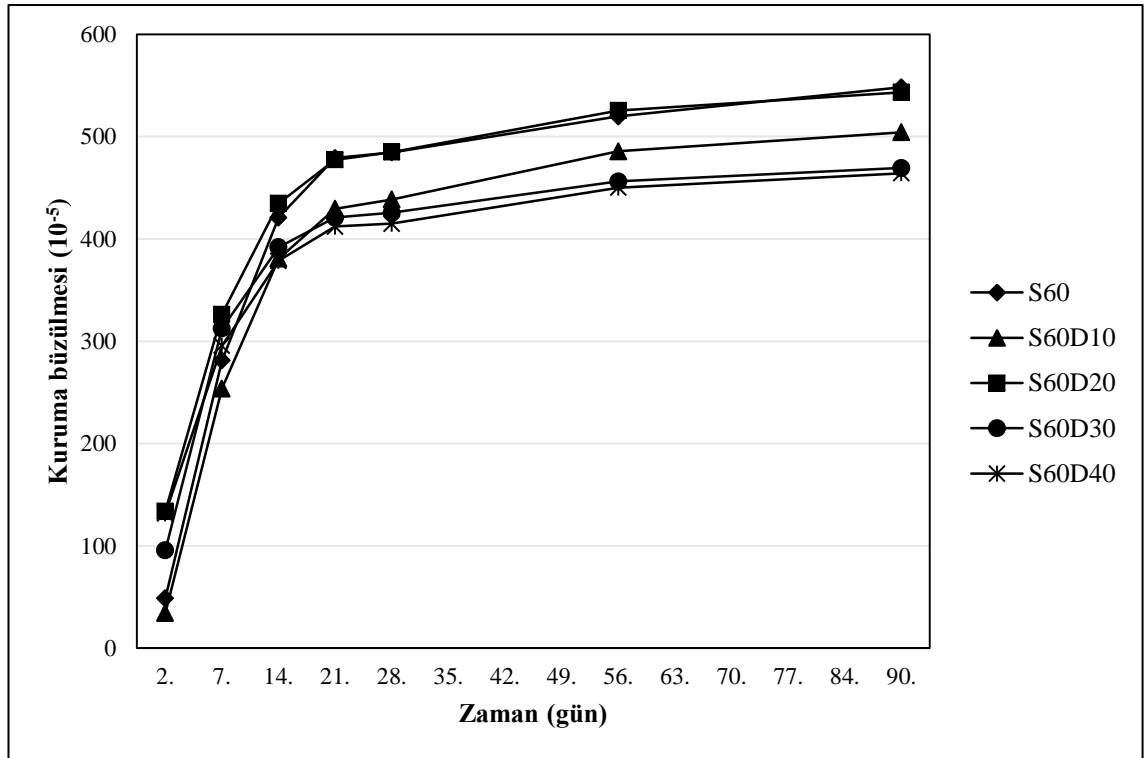
Şekil 4.69. S0D karışım serisi kuruma büzülmesinin zamanla değişimi



Şekil 4.70. S20D karışım serisi kuruma büzülmesinin zamanla değişimi



Şekil 4.71. S40D karışım serisi kuruma büzülmesinin zamanla değişimi



Şekil 4.72. S60D karışım serisi kuruma büzülmesinin zamanla değişimi

4.10. BA'nın Korozyon Potansiyeli Üzerindeki Etkisi

Bağlayıcı tipi, içeriği ve agrega tipi ve içeriğinin, korozyon üzerindeki etkisi Şekil 4.73-80'de verilmiştir.

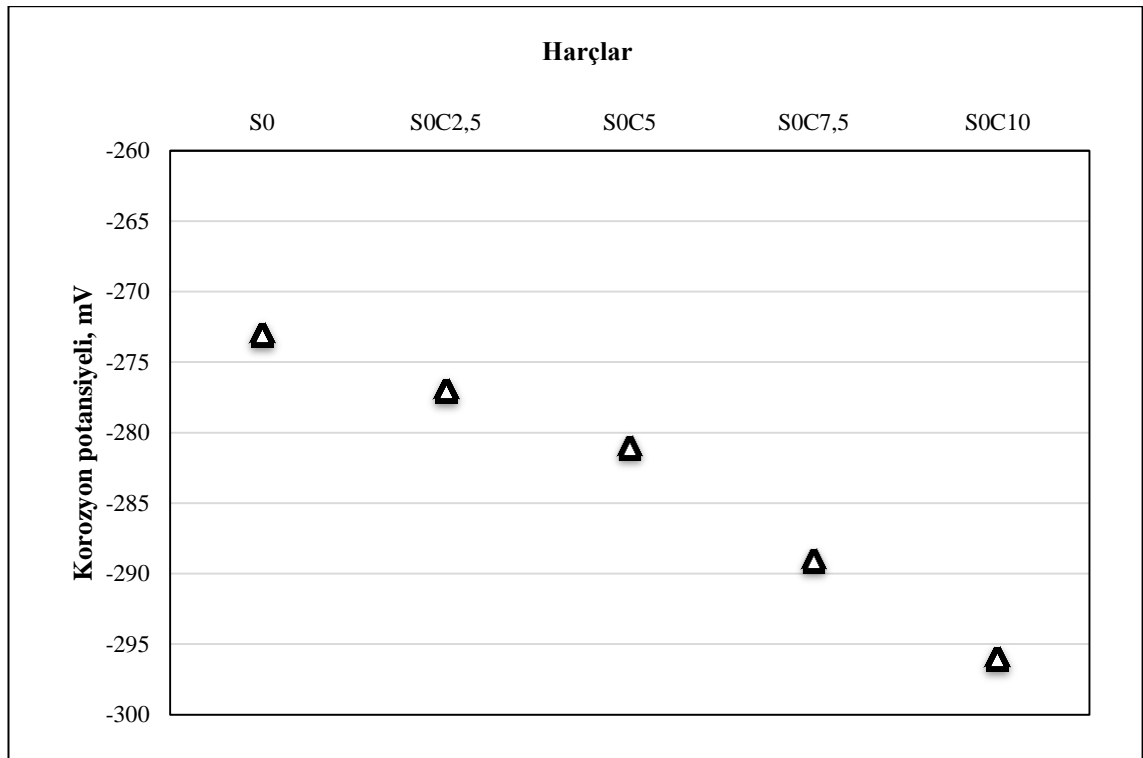
4.10.1. SC karışım serisi korozyon potansiyeli değerleri

S0C karışım serisi dikkate alındığında, en düşük ve en yüksek korozyon potansiyelleri -273 mV ve -296 mV olmak üzere sırasıyla S0 ve S0C10 numuneleri göstermiştir. S0C2,5, S0C5, S0C7,5, S0C10 numunelerinde kontrol numunelerine kıyasla %1,5, %2,9, %5,9, %8,4 oranlarında bir artış gözlenmiştir.

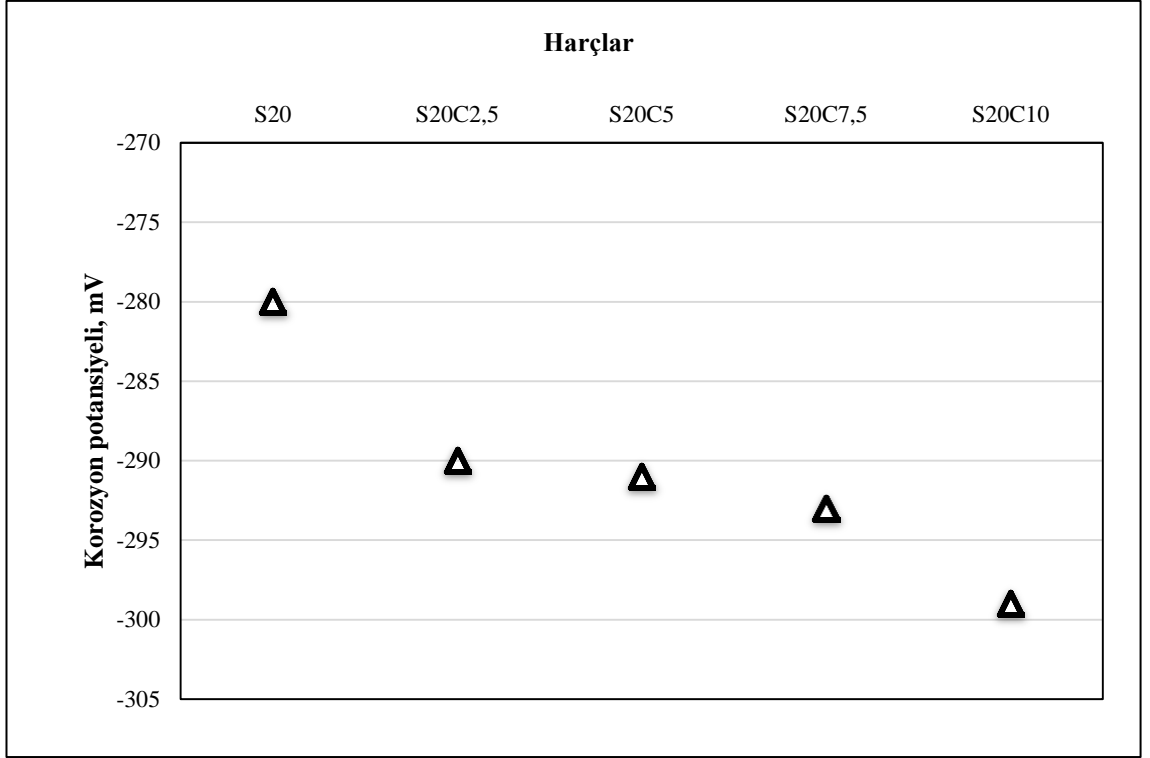
S20C karışım serisi dikkate alındığında, en düşük ve en yüksek korozyon potansiyelleri -280 mV ve -299 mV olmak üzere sırasıyla S20 ve S20C10 numuneleri göstermiştir. S20C2,5, S20C5, S20C7,5, S20C10 numunelerinde kontrol numunelerine kıyasla %3,6, %3,9, %4,6, %6,8 oranlarında bir artış gözlenmiştir.

S40C karışım serisi dikkate alındığında, en düşük ve en yüksek korozyon potansiyelleri -300mV ve -308mV olmak üzere sırasıyla S40 ve S40C10 numuneleri göstermiştir. S40C2,5, S40C5, S40C7,5, S40C10 numunelerinde kontrol numunelerine kıyasla %1,0, %1,3, %2,3, %2,7 oranlarında bir artış gözlenmiştir.

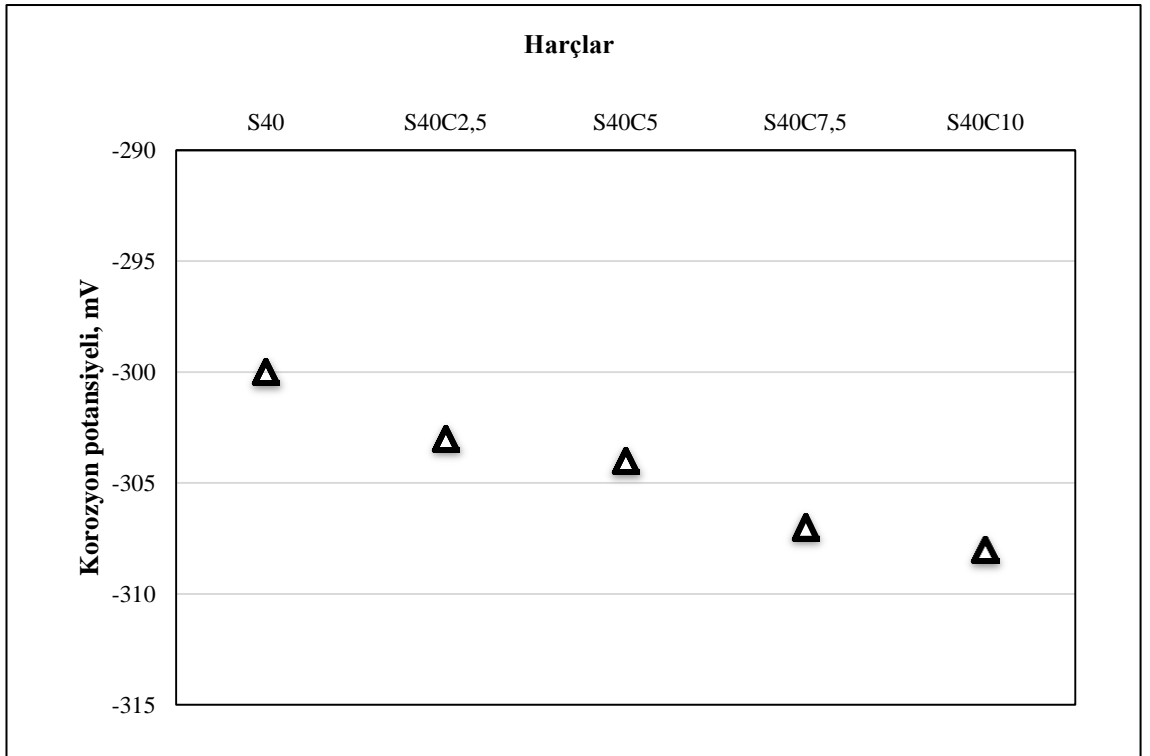
S60C karışım serisi dikkate alındığında, en düşük ve en yüksek korozyon potansiyelleri -314 mV ve -327 mV olmak üzere sırasıyla S60 ve S60C10 numuneleri göstermiştir. S60C2,5, S60C5, S60C7,5, S60C10 numunelerinde kontrol numunelerine kıyasla %1,3, %1,9, %2,9 %4,1 oranlarında bir artış gözlenmiştir.



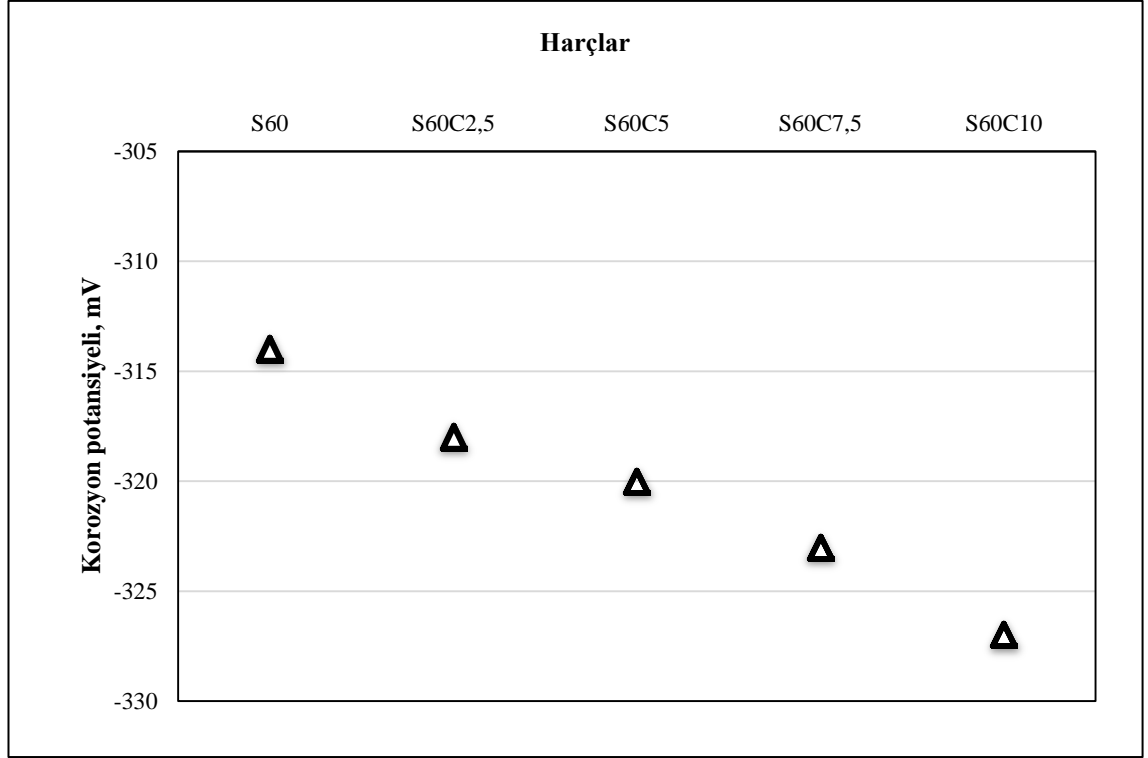
Şekil 4.73. S0C karışım serisi korozyon potansiyeli değerleri



Şekil 4.74. S20C karışım serisi korozyon potansiyeli değerleri



Şekil 4.75. S40C karışım serisi korozyon potansiyeli değerleri



Şekil 4.76. S60C karışım serisi korozyon potansiyeli değerleri

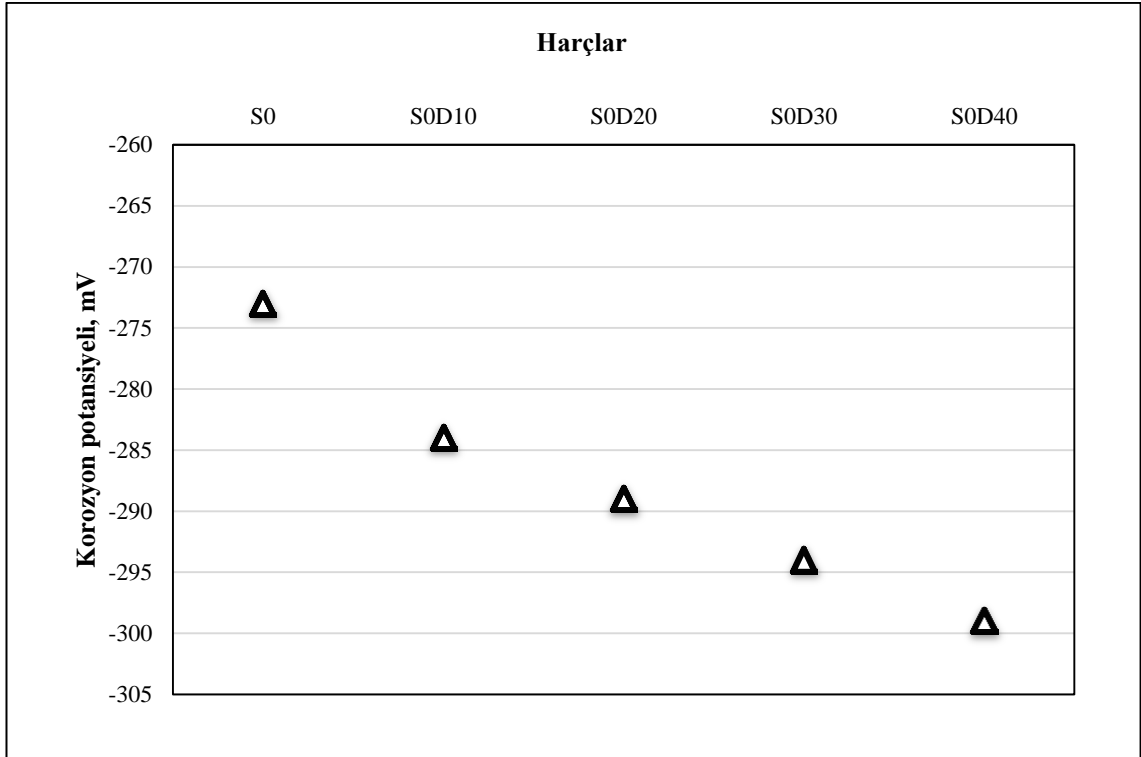
4.10.2. SD karışım serisi korozyon potansiyeli değerleri

S0D karışım serisi dikkate alındığında, en düşük ve en yüksek korozyon potansiyelleri -273 mV ve -299 mV olmak üzere sırasıyla S0 ve S0D40 numuneleri göstermiştir. S0D10, S0D20, S0D30, S0D40 numunelerinde kontrol numunelerine kıyasla %4,0, %5,9, %7,7, %9,5 oranlarında bir artış gözlenmiştir.

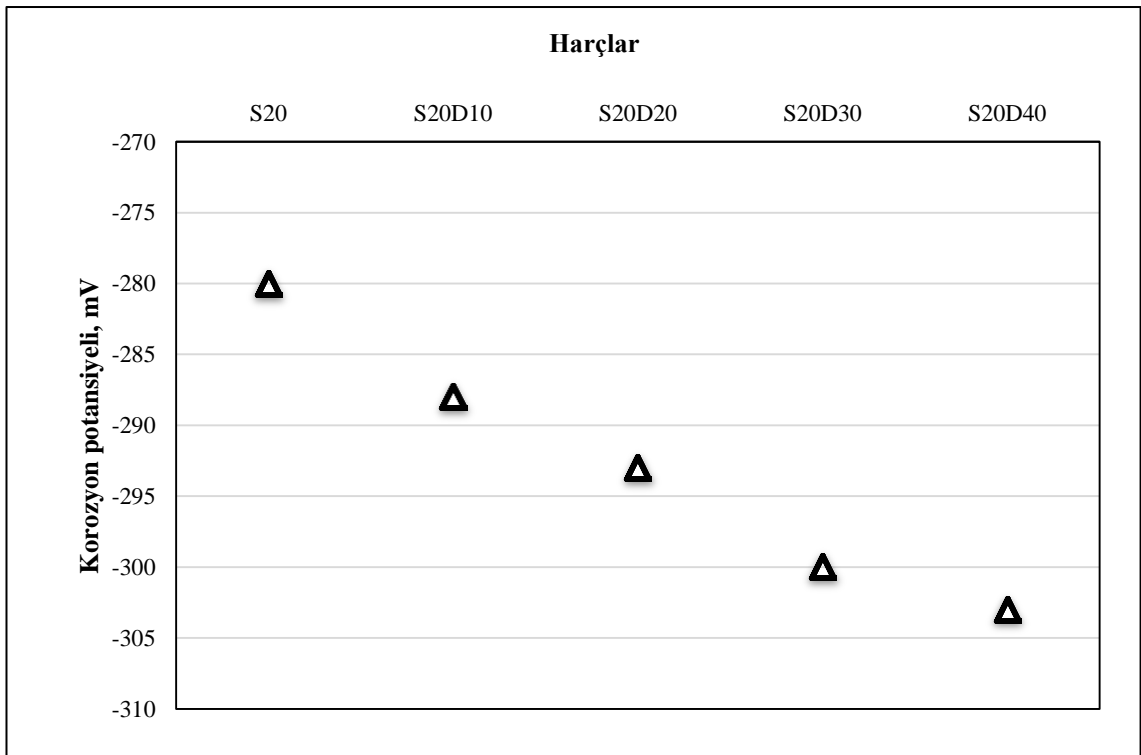
S20D karışım serisi dikkate alındığında, en düşük ve en yüksek korozyon potansiyeli değerleri -280 mV ve -303 mV olmak üzere sırasıyla S20 ve S20D40 numuneleri göstermiştir. S20D10, S20D20, S20D30, S20D40 numunelerinde kontrol numunelerine kıyasla %2,9, %4,6, %7,1, %8,2 oranlarında bir artış gözlenmiştir.

S40D karışım serisi dikkate alındığında, en düşük ve en yüksek korozyon potansiyeli değerleri -300 mV ve -311 mV olmak üzere sırasıyla S40 ve S40D40 numuneleri göstermiştir. S40D10, S40D20, S40D30, S40D40 numunelerinde kontrol numunelerine kıyasla %0,3, %1,0, %2,0, %3,7 oranlarında bir artış gözlenmiştir.

S60D karışım serisi dikkate alındığında, en düşük ve en yüksek korozyon potansiyeli değerleri -314 mV ve -328 mV olmak üzere sırasıyla S60 ve S60D40 numuneleri göstermiştir. S60D10, S60D20, S60D30, S60D40 numunelerinde kontrol numunelerine kıyasla %1,6, %2,9, %3,8, %4,5 oranlarında bir artış gözlenmiştir.



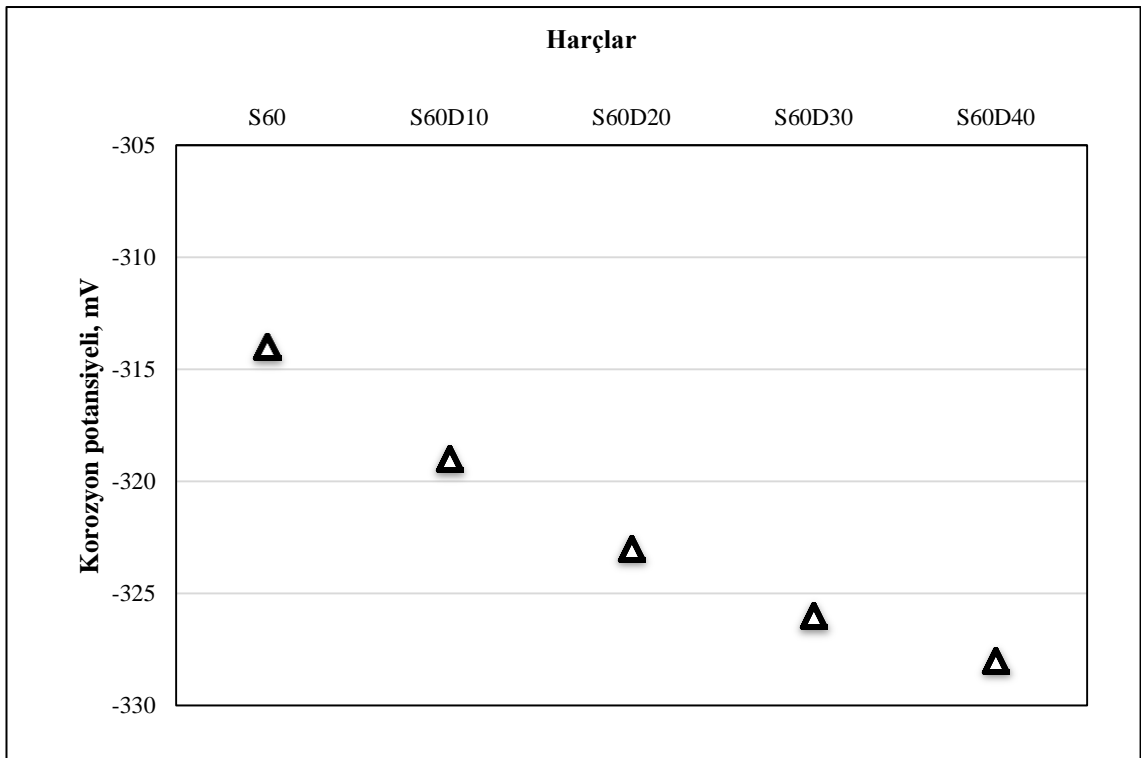
Şekil 4.77. S0D karışım serisi korozyon potansiyeli değerleri



Şekil 4.78. S20D karışım serisi korozyon potansiyeli değerleri



Şekil 4.79. S40D karışım serisi korozyon potansiyeli değerleri



Şekil 4.80. S60D karışım serisi korozyon potansiyeli değerleri

4.11. BA'nın Elektromanyetik Kalkanlama Özelliği Üzerindeki Etkisi

Bağlayıcı tipi ve içeriği, agrega tipi ve içeriğinin elektromanyetik kalkanlama etkinliği üzerine etkileri Şekil 4.81-88'de gösterilmektedir.

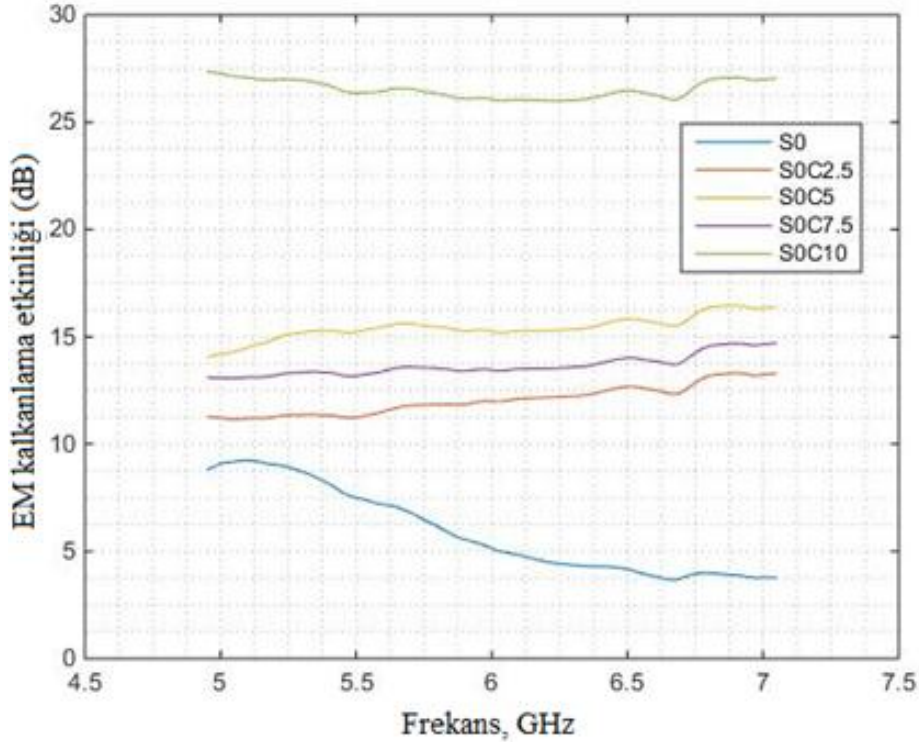
4.11.1. SC karışım serisi elektromanyetik kalkanlama etkinliği

S0C karışım serisi dikkate alındığında, S0, S0C2,5, S0C5, S0C7,5, S0C10 numuneleri 6 GHz frekansta sırasıyla 5,1 dB, 12 dB, 15,2 dB, 13,5 dB, 26,1 dB elektromanyetik kalkanlama etkinliği göstermişlerdir.

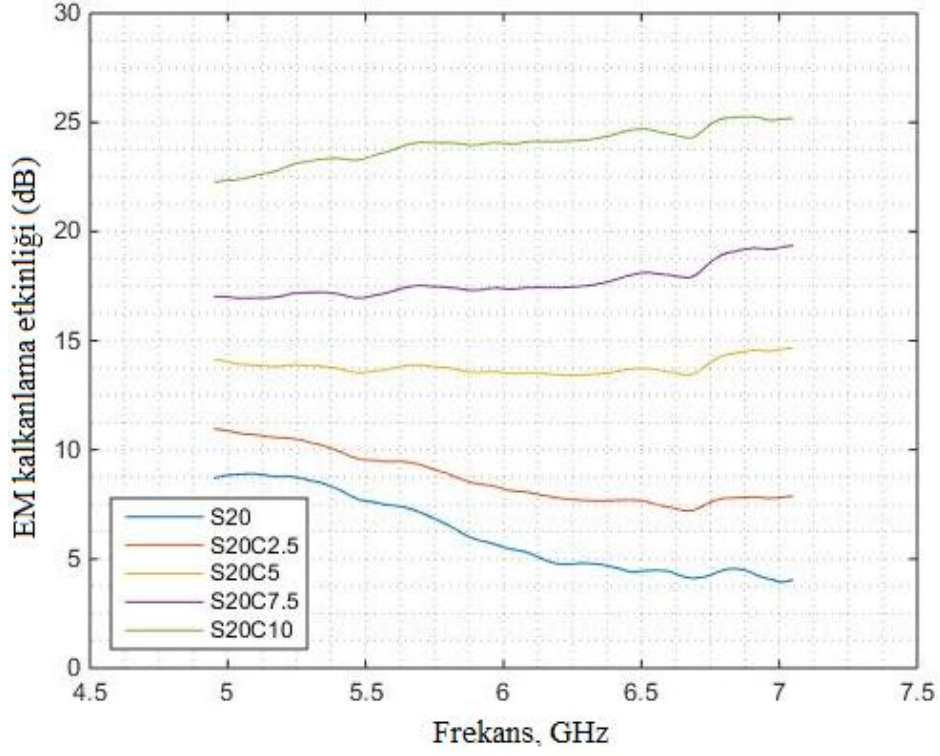
S20C karışım serisi dikkate alındığında, S20, S20C2,5, S20C5, S20C7,5, S20C10 numuneleri 6 GHz frekansta sırasıyla 5,5 dB, 8,2 dB, 13,5 dB, 17,4 dB, 24,0 dB elektromanyetik kalkanlama etkinliği göstermişlerdir.

S40C karışım serisi dikkate alındığında, S40, S40C2,5, S40C5, S40C7,5, S40C10 numuneleri 6 GHz frekansta sırasıyla 5,8 dB, 7,6 dB, 17,9 dB, 15,1 dB, 14,6 dB elektromanyetik kalkanlama etkinliği göstermişlerdir.

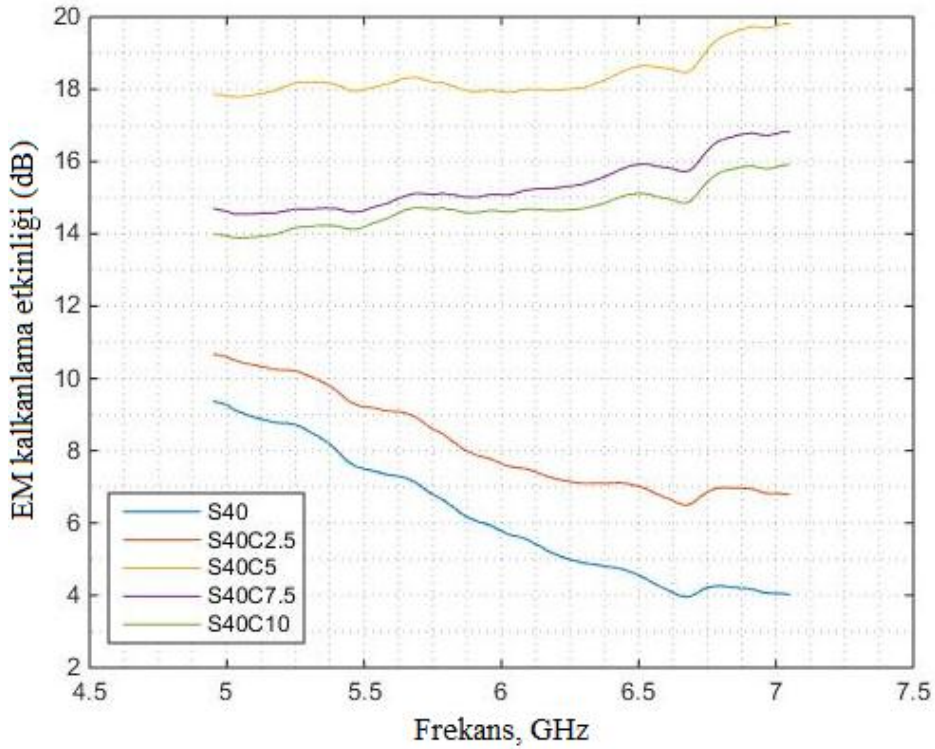
S60C karışım serisi dikkate alındığında, S60, S60C2,5, S60C5, S60C7,5, S60C10 numuneleri 6 GHz frekansta sırasıyla 7,8 dB, 10,1 dB, 10,6 dB, 17,3 dB, 16,8 dB elektromanyetik kalkanlama etkinliği göstermişlerdir.



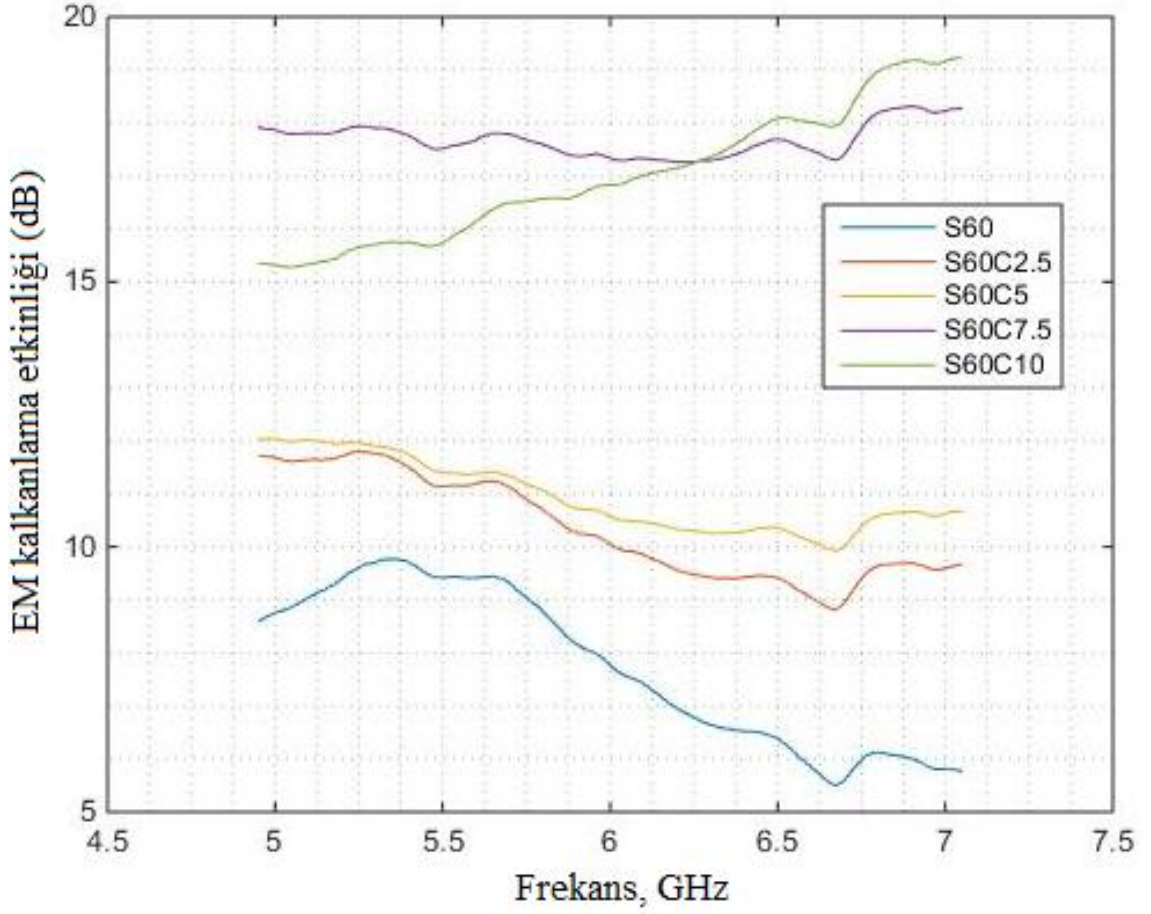
Şekil 4.81. S0C karışım serisi elektromanyetik kalkanlama değerleri



Şekil 4.82. S20C karışım serisi elektromanyetik kalkanlama değerleri



Şekil 4.83. S40C karışım serisi elektromanyetik kalkanlama değerleri



Şekil 4.84. S60C karışım serisi elektromanyetik kalkanlama değerleri

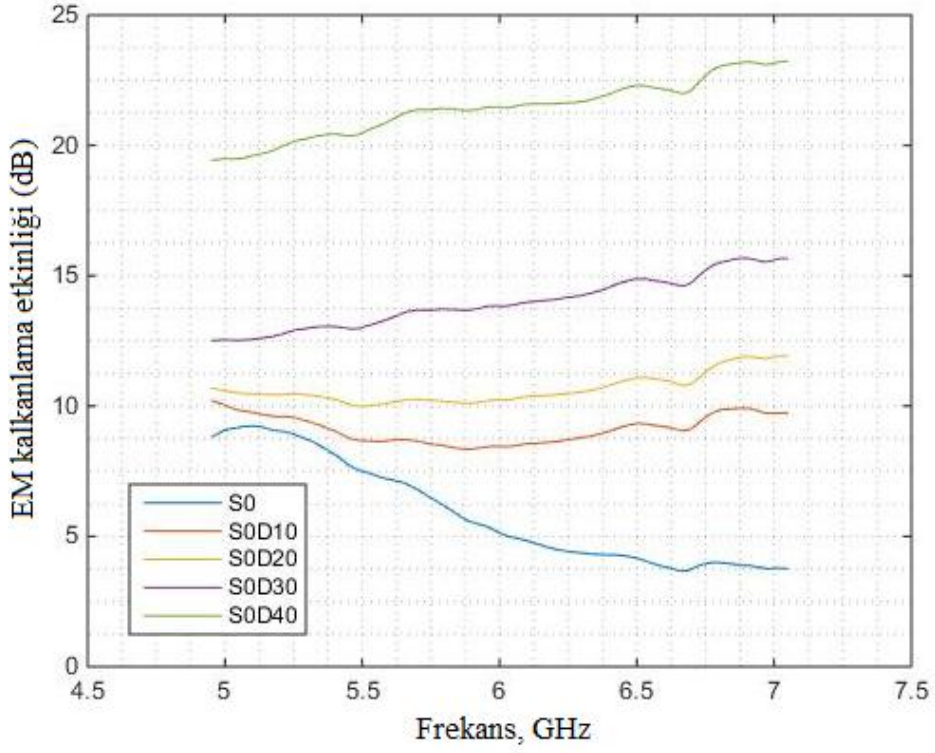
4.11.2. SD karışım serisi elektromanyetik kalkanlama etkinliği

S0D karışım serisi dikkate alındığında, S0, S0D10, S0D20, S0D30, S0D40 numuneleri 6 GHz frekansta sırasıyla 5,1 dB, 8,4 dB, 10,2 dB, 13,8 dB, 21,5 dB elektromanyetik kalkanlama etkinliği göstermişlerdir.

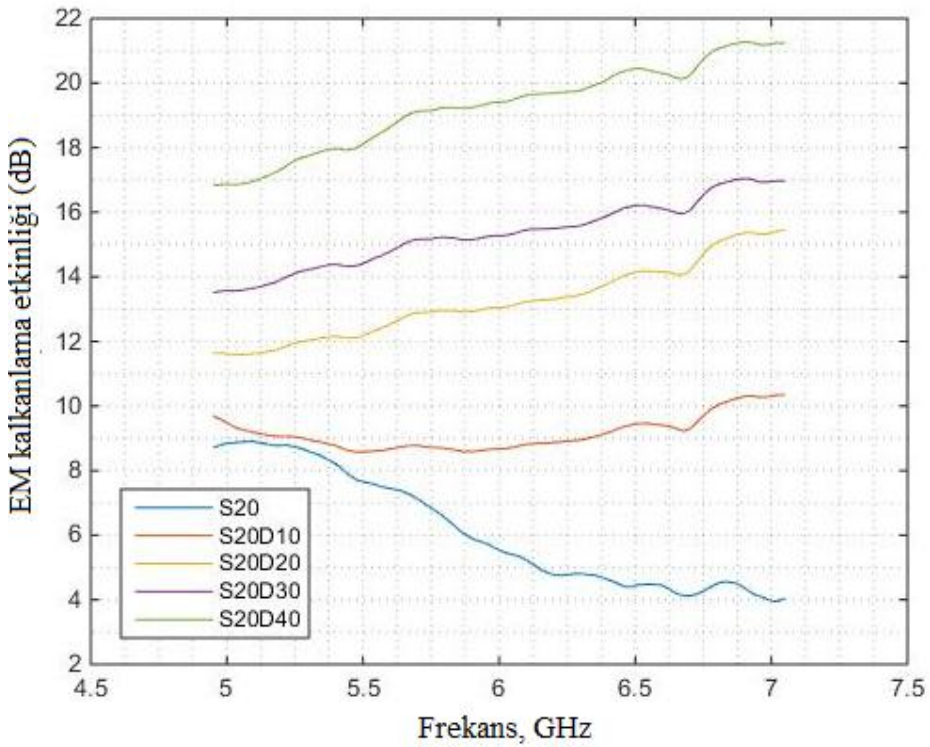
S20D karışım serisi dikkate alındığında, S20, S20D10, S20D20, S20D30, S20D40 numuneleri 6 GHz frekansta sırasıyla 5,5 dB, 8,7 dB, 13,1 dB, 15,3 dB, 19,4 dB elektromanyetik kalkanlama etkinliği göstermişlerdir.

S40D karışım serisi dikkate alındığında, S40, S40D10, S40D20, S40D30, S40D40 numuneleri 6 GHz frekansta sırasıyla 5,8 dB, 12,4 dB, 14,6 dB, 13,5 dB, 23,1 dB elektromanyetik kalkanlama etkinliği göstermişlerdir.

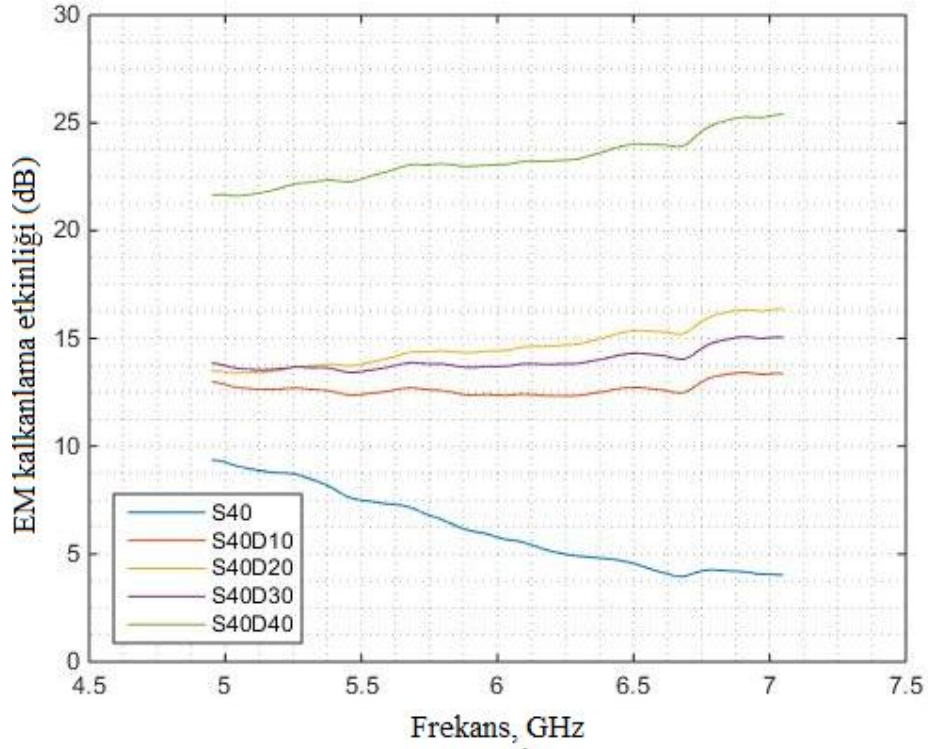
S60D karışım serisi dikkate alındığında, S60, S60D10, S60D20, S60D30, S60D40 numuneleri 6 GHz frekansta sırasıyla 7,8 dB, 9,6 dB, 10,8 dB, 15,3 dB, 21,1 dB elektromanyetik kalkanlama etkinliği göstermişlerdir.



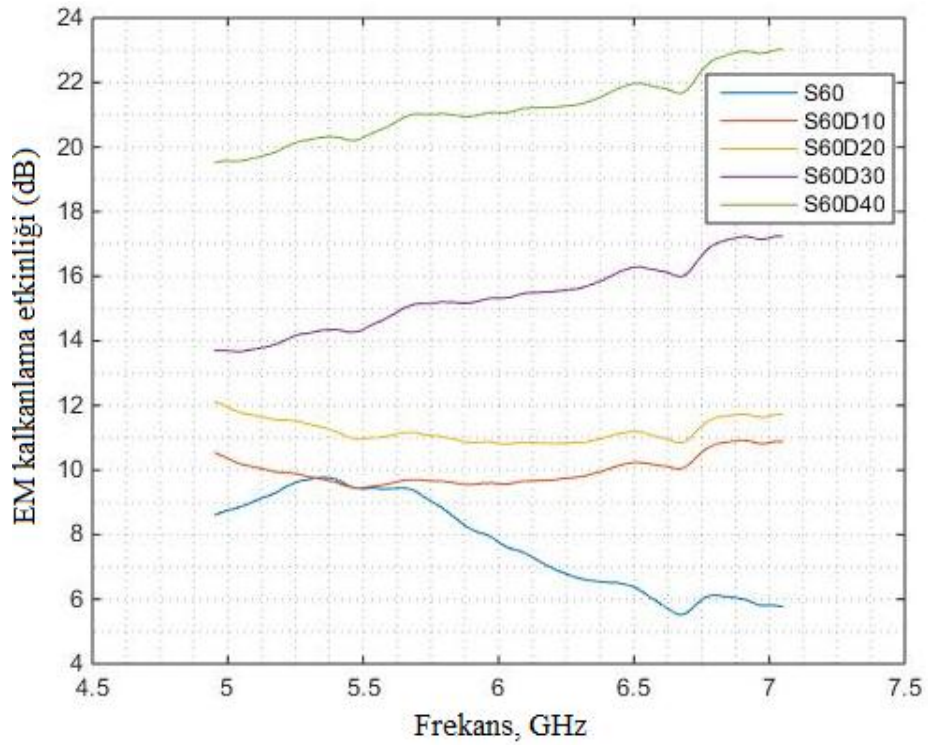
Şekil 4.85. S0D karışım serisi elektromanyetik kalkanlama değerleri



Şekil 4.86. S20D karışım serisi elektromanyetik kalkanlama değerleri



Şekil 4.87. S40D karışım serisi elektromanyetik kalkanlama değerleri



Şekil 4.88. S60D karışım serisi elektromanyetik kalkanlama değerleri

4.12. Geopolimerler Üzerindeki Mikroyapısal Çalışmalar

4.12.1. Geopolimer harçları oluşturan bileşenlerin XRD analizleri

Silis dumanı ve curuf malzemelerin XRD analizleri Şekil 4.89-91'de verilmiştir. Silis dumanı patern tayininde, amorf olmakla birlikte küçük piklerde tridimit ($\text{Si}_{48.00}\text{O}_{96.00}$) fazı tanımlanmıştır. Bağlayıcı olarak kullanılan curufta, kalsit ($\text{Ca}_{6.00}\text{C}_{6.00}\text{O}_{18.00}$), magnezit ($\text{Mg}_{6.00}\text{C}_{6.00}\text{O}_{18.00}$), magnezyum kalsit ($\text{C}_{6.00}\text{O}_{18.00}\text{Ca}_{5.64}\text{Mg}_{0.36}$) tanımlanmıştır. Agrega olarak kullanılan ham curufta ise, spinel ($\text{Fe}_{1.84}\text{Mg}_{5.61}\text{Al}_{15.75}\text{O}_{32.00}$), kalsit ($\text{Ca}_{6.00}\text{C}_{6.00}\text{O}_{18.00}$), gehlenit ($\text{Ca}_{4.00}\text{Mg}_{0.42}\text{Al}_{3.08}\text{Si}_{2.48}\text{O}_{14.00}$) ve mervinite ($\text{Ca}_{12.00}\text{Mg}_{4.00}\text{Si}_{8.00}\text{O}_{32.00}$) rastlanmıştır.

Granüle demir curufu neredeyse tamamen amorf camdır. Curuf camsı fazın mineral bileşimi ağırlıklı olarak melilit, katı çözelti olarak gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), akermanit ($\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$) ve aynı zamanda mervinitten ($\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$) oluşmaktadır (Davidovits 2011). Alüminyum sadece gehlenit, magnezyum akermanit ve mervinit bulunmaktadır. Bir geopolimerik kimya bakışı açısından, gehlenit etkili potansiyele sahip geopolimer öncü olarak reaktif moleküldür.

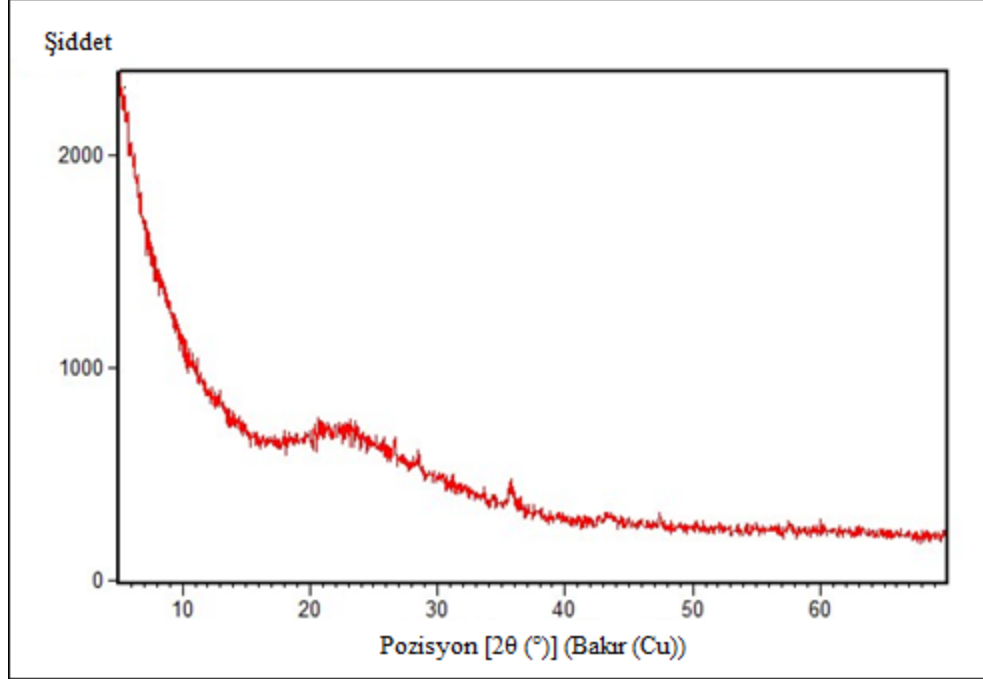
Huang vd. (2016), difraksiyon pikindeki yaklaşık $25-45^\circ$ (2θ)'daki geniş ve zayıf pikin, curufun önemli bir kısmının amorf fazdan oluştuğunu gösterdiğini açıklamış ve küçük bir kısmının da gehlenitten oluştuğunu bildirmiştir. Balczar vd. (2017), curufun ana kristal fazının mervinit iken minör bileşenlerinin akermanit ve kuvars olduğunu belirtmişlerdir.

Yüksek fırın curufu, büyük oranda cam fazı içerirken, gehlenit, akermanit ve mervinit gibi fazlar minör seviyede mevcut olabilmektedir (Li vd. 2010). Demir-çelik curuflarında yaygın olarak tanımlanan mineral fazlar, larnit, brownmillerit, srebrodolskit, melilit, vustit, spinel, kalsit, kuvars, kristobalit ve demir metalidir (Piatak vd. 2017). Torres-Carrasco vd. (2015) curufun, yüksek amorf içerik ile birlikte küçük içerikte gehlenit ve akermanit gibi yüksek yoğunluklu kristal fazları gösterdiğini belirtmişlerdir.

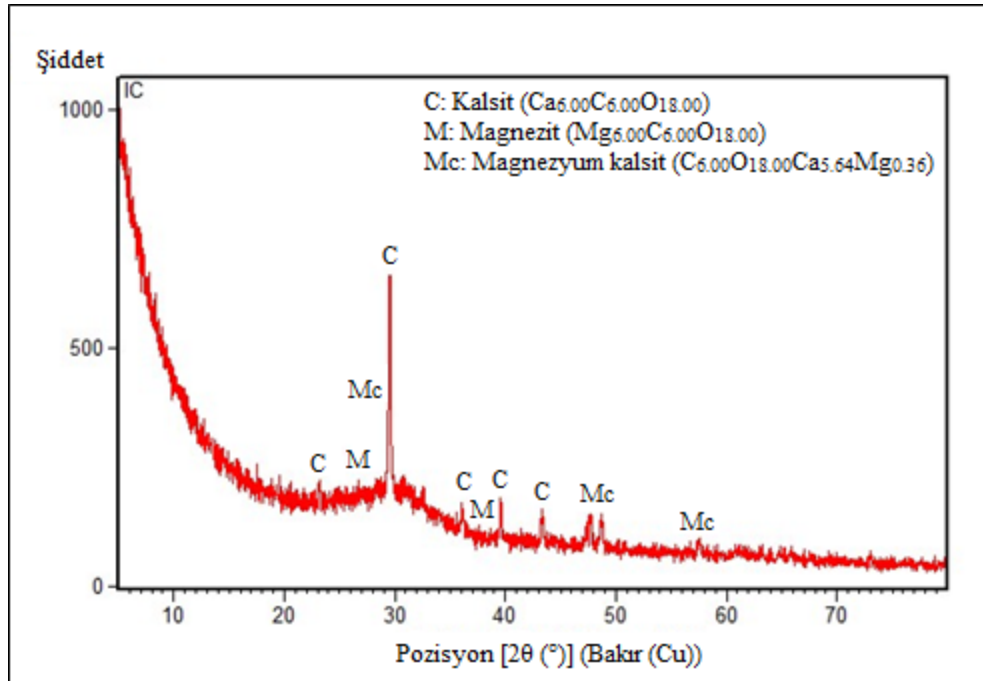
Silis dumanı oldukça karışık bir faz diyagramına sahiptir. Atmosfer basıncında, kuvars, kristobalit ve tridimit olmak üzere üç ana kararlı kristal hal (polimorf) mevcuttur (Anderson vd. 2000). Silis dumanının kararlılığı bir dizi ısıtma deneyi ile incelenmiş ve sonuçlar 1000°C 'de bir saat kadar ısıtmanın yeterli ve tekrar üretilebilir kristallığe sahip olarak kristobalite ürettiğini göstermiştir (Bottrill 1991). 1000 ila 1500°C arasındaki uzun süreli ısıtma tridimit oluşumunu başlatmaktadır. $800-1200^\circ\text{C}$ 'de 3 saat süreyle ısıtılan üç farklı silika dumanının XRD analizleri, tüm numunelerde silisin 800°C 'de ısıtıldığında amorf olarak bulunduğunu ve sırasıyla 900 ve 1200°C 'de ısıtıldıktan sonra kristobalit ve tridimit haline geldiğini ortaya koymuştur (He vd. 2012).

Bir yan ürün olarak çelik curufunun üretildiği iki ayrı çelik üretim süreci vardır: (1) bazik oksijen fırını (BOF) işlemi ve (2) elektrik ark fırını (EAF) işlemi (Proctor vd. 2000). Bu iki işlemden üretilen curuflara sırasıyla BOF çelik curufu ve EAF curufu denilmektedir. Genel olarak kimyasal ve minerolojik bileşimleri benzer olmakla birlikte BOF curuflarının XRD paternlerinde, portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), srebrodolskit ($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$), mervinit ($\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$), larnit (Ca_2SiO_4), kalsit ($\text{Ca},\text{Mn}(\text{CO}_3)$), EAF curuflarının XRD paternlerinde ise, portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), mayenit ($\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$) ve larnit (Ca_2SiO_4)

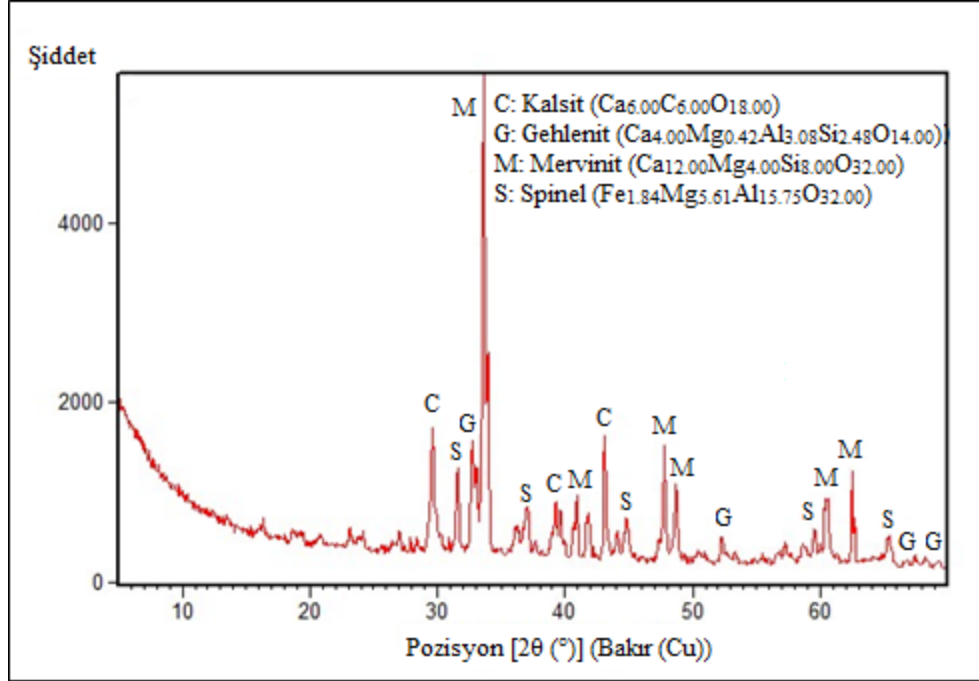
rastlanmıştır (Yildirim ve Prezzi 2011). BOF curuflarının XRD analizlerinde gözlenen major fazlar, kalsit, portlandit, vustit, dikalsiyum silikat hidrat-alfa, dikalsiyum hidroksotrioksosilikat hidroksit-alfa, kalsiyum fosfit, demir silikon oksit, koezit, mervinit, brownmilerit ve magnezit'tir (Ashrit vd. 2015).



Şekil 4.89. Silis dumanı XRD analizi



Şekil 4.90. Bağlayıcı olarak kullanılan öğütülmüş yüksek fırın curufu XRD analizi



Şekil 4.91. Agrega olarak kullanılan yüksek fırın curufu XRD analizi

4.12.2. Geopolimer harçların XRD analizleri

Normal kür koşullarına tabii tutulmuş olan bağlayıcı olarak %100 curuf içeren harçların XRD paternlerinde, mervinit ($\text{Ca}_{12.00}\text{Mg}_{4.00}\text{Si}_{8.00}\text{O}_{32.00}$), kalsit ($\text{Ca}_{5.62}\text{Mg}_{0.38}\text{C}_{6.00}\text{O}_{18.00}$) ve silimanit ($\text{Al}_{8.00}\text{Si}_{4.00}\text{O}_{20.00}$) tanımlanmıştır. Normal kür koşullarına tabii tutulmuş olan bağlayıcı olarak %40 curuf ve %60 silis dumanı içeren harçların XRD paternlerinde ise, kalsit ($\text{Ca}_{6.00}\text{C}_{6.00}\text{O}_{18.00}$), kuvars ($\text{Si}_{3.00}\text{O}_{6.00}$), koezite ($\text{Si}_{16.00}\text{O}_{32.00}$) ve nordstrandit ($\text{Al}_{2.00}\text{O}_{6.00}$) tanımlanmıştır.

Song vd. (2014) tarafından, AAC hamurlarının XRD paternlerinde albit ($(\text{Na}, \text{Ca})\text{Al}(\text{Si}, \text{Al})_3\text{O}_8$), sodyum alüminyum silikat, kalsit (CaCO_3), kuvars (SiO_2) ve C-S-H gözlenmiştir. Ayrıca çalışmada ilave aktivatör miktarındaki artışın AAC'nin hidrasyon ürünleri arasında kuvarsin artmasına yol açtığı da belirtilmiş; bu durumun aktivatör olarak kullanılan sodyum silikat içindeki Na^+ ve SiO_4^{2-} miktarlarıyla ilişkili olduğu açıklanmıştır. Albitin oluşumunun, bileşimsel yapısından dolayı Ca^+ 'ya bağlı olduğu ve dolayısıyla sodyum silikatın eklenmesiyle önemli ölçüde değişmediği tespit edilmiştir.

Puertas vd. (2004) tarafından, NaOH ile aktive edilmiş öğütülmüş yüksek fırın curufu incelenmiş, hidrokalsit ($\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{C}_3(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$), kalsit (CaCO_3) ve yarı kristal bir kalsiyum silikat hidrat fazlarının tanımlandığı bildirilmiştir. Cam suyu içeren alkali aktive edilmiş hamurlarda ise hidrokalsite saptanmadığı ve C-S-H tanımlanmasının daha zor olduğu belirtilmiş ayrıca kalsiyum karbonatın varlığı tespit edilmiştir.

Alkali aktive edilmiş curuf harçları için, $30^\circ(2\theta)$ civarında geniş bir dağılım halkası (kambur) görülmüş olup, C-S-H jelinin, aktive olmuş curufun egemen bir hidrasyon ürünü olarak amorf bir biçimde bulunduğu ve aynı zamanda bazı reaksiyona

girmemiş curuf varlığı belirtilmiştir (Li vd. 2017). Buna ek olarak, hidroksit ($2\theta=12^\circ$)'e bağlı bir pik de, NaOH ile aktive edilen curuf için izlenmiştir.

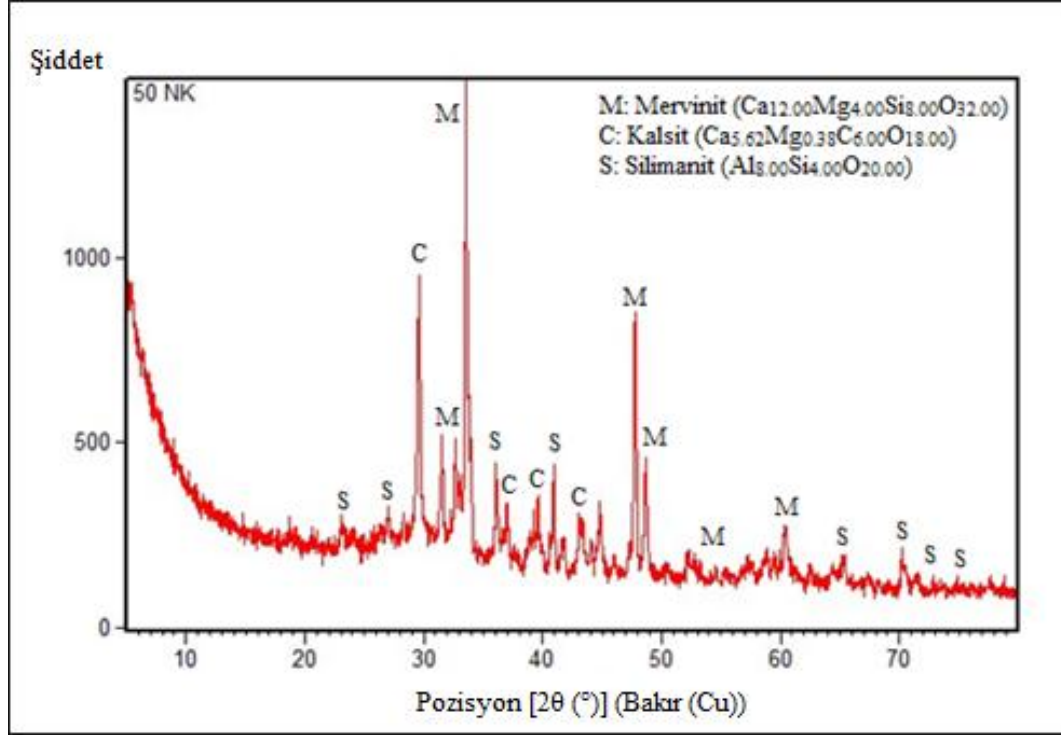
Alkali aktive edilmiş curufun XRD analizleri, yaklaşık $30^\circ(2\theta)$ yüksek bir pikle, ana hidrasyon ürünü olarak C-S-H'si göstermiştir (Gruskovnjak vd. 2006). AAC spektrumundaki yüksek pik, C-S-H'nin daha yüksek kristalinitesini göstermektedir. Ayrıca C-S-H fazına ilaveten, kuvars ve ana kristal curuf fazından (mervinit) gelen pikler tanımlanmıştır. Mervinit ilk 180 gün boyunca pek çözünmez. Hidroksit 28 ve 180 gün sonrasında tanımlanabilmektedir.

Sayed ve Zeedan (2012) tarafından, NaOH ve cam suyu ile aktive edilmiş silis dumanı ve curuf hamurları ile yapılan çalışmada XRD analizi, alkali aktivasyondan sonra kristalinite değişimini incelemek için kullanılmıştır. Çalışmada, kullanılan reaktantların ve bağlayıcıların çoğunun çok yüksek oranda amorf yarı-kristal faz içerdiğine dikkat edilmesi gerektiği not edilmiştir. Bu nedenle, kristal halindeki C-S-H'nin araştırmada kullanılan koşullar altında silis dumanı ve curufun alkali aktivasyonu sonucunda oluşan baskın bir ürün olmadığı sonucuna varılmıştır. Jaarsveld ve Deventer (1999) tarafından yapılan çalışmada, kristal halindeki C-S-H'nin yüksek pH ($pH \geq 14$) ortamda oluşmadığı gerçeği ile bu fenomeni açıklayan önceki çalışma ile iyi bir şekilde anlaşılmıştır. Ancak, bir geopolimer jel içerisindeki amorf C-S-H'nin, sonuç ürününün bir parçası olabileceği vurgulanmıştır.

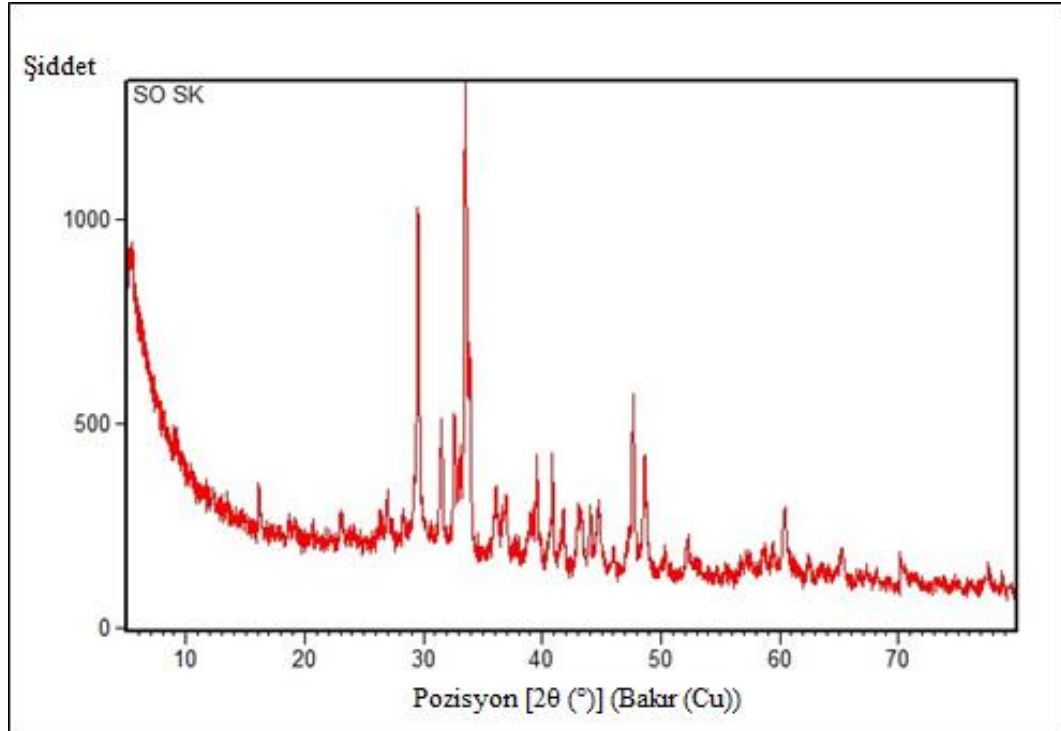
Huang vd. (2016) tarafından, NaOH ve cam suyu ile aktive edilmiş curuf esaslı geopolimerlerin XRD paternlerinde görülen, $20-40^\circ(2\theta)$ 'de geniş, yaygın bir difraksiyon piki ürünün amorf malzemeden oluştuğunu göstermiştir. Hidrasyon sonucu C-S-H mineral fazı üretilmiş ve natrolite fazı geopolimerizasyon ile oluşturulmuştur. C-S-H jel, curufun kalsiyum oksit ve alüminyum-silisyum bileşenleri arasından, alkali aktivatörün reaksiyonuyla hidratlanmış kalsiyum silikat oluşturmak üzere yapılmıştır. Natrolit yapısı aktif maddenin Si-O ve Al-O bağlarını kırarak ve yeniden polimerleştirerek oluşturulmuştur. Bu işlemler, mekanik özellikleri iyileştirerek geopolimerin yoğunluğunu arttırmaktadır.

28 günlük yaştaki, iki farklı curuf örneğinin kullanıldığı alkali aktive edilmiş curuf harçların XRD paternlerinde, curuf örneğinin niteliğine bakılmaksızın, herbir difraktogramda $28-30,5^\circ(2\theta)$ arasında yeni, dar bir amorf zirve gözlemlenmiştir (Balczar vd. 2017). Bu yeni amorf zirve, bir C-S-H jel fazı ve zayıf kristalleşmiş bir calcite fazıyla ilişkili olabileceği belirtilmiştir. Burada, kalan kristal fazların pik yoğunluklarının (akermanit, mervinit, kuvars), ham curuf numunelerinkinden daha düşük olduğu belirtilmiştir. Aktivasyon çözeltisindeki bileşenler (cam suyu ve NaOH) amorf içeriği de arttıracığı için, bu durum, alkali aktive edilmiş curuf harçlarındaki artmış amorf içerikle açıklanmıştır.

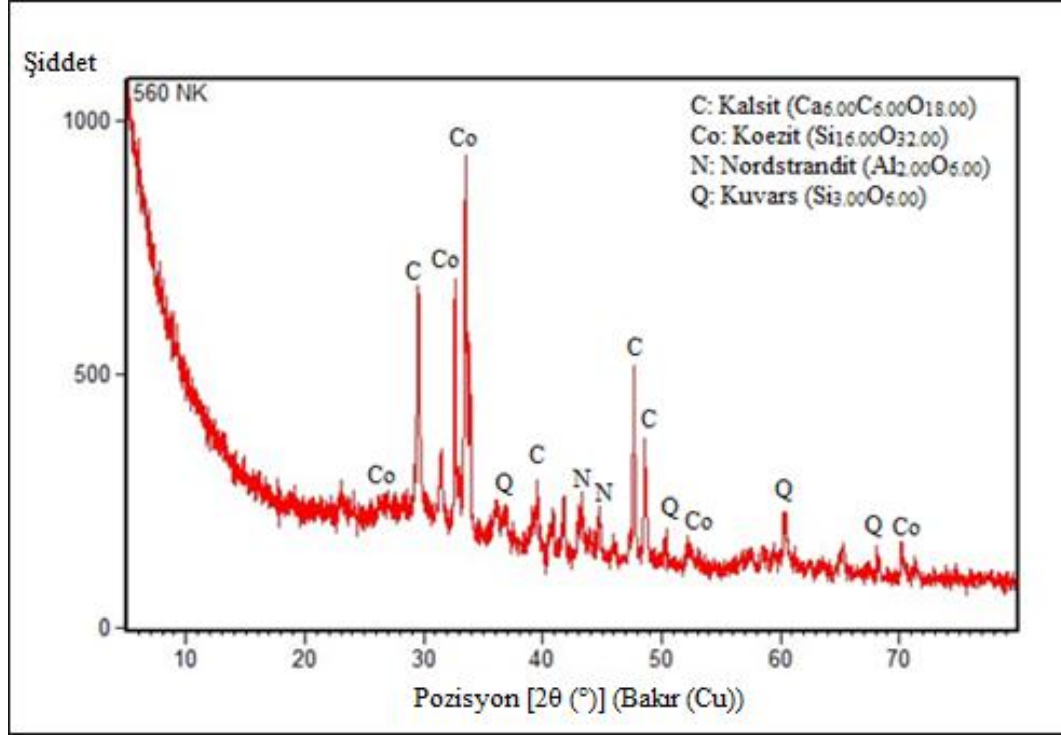
Curuf esaslı geopolimer harçların, XRD paternleri, zayıf kristal C-S-H'a karşılık gelmiştir (Fernandez-Jimenez ve Puertas 2003). İlerlemiş aktivasyonda kristal $CaCO_3$ (kalsit) algılanmıştır. NaOH ile aktive edilmiş numunelerde küçük bir miktarda hidroksit ($Mg_6Al_2CO_3(OH)_6 \cdot 4H_2O$) ve $C_4Ac_3H_{11}$ -tipi carboaluminate gözlenmiştir. Na_2CO_3 ile aktive edilmiş curuf hamurlarda ise carbonate gaylussite ($Na_2Ca(CO_3)_2 \cdot 5H_2O$) tespit edilmiştir.



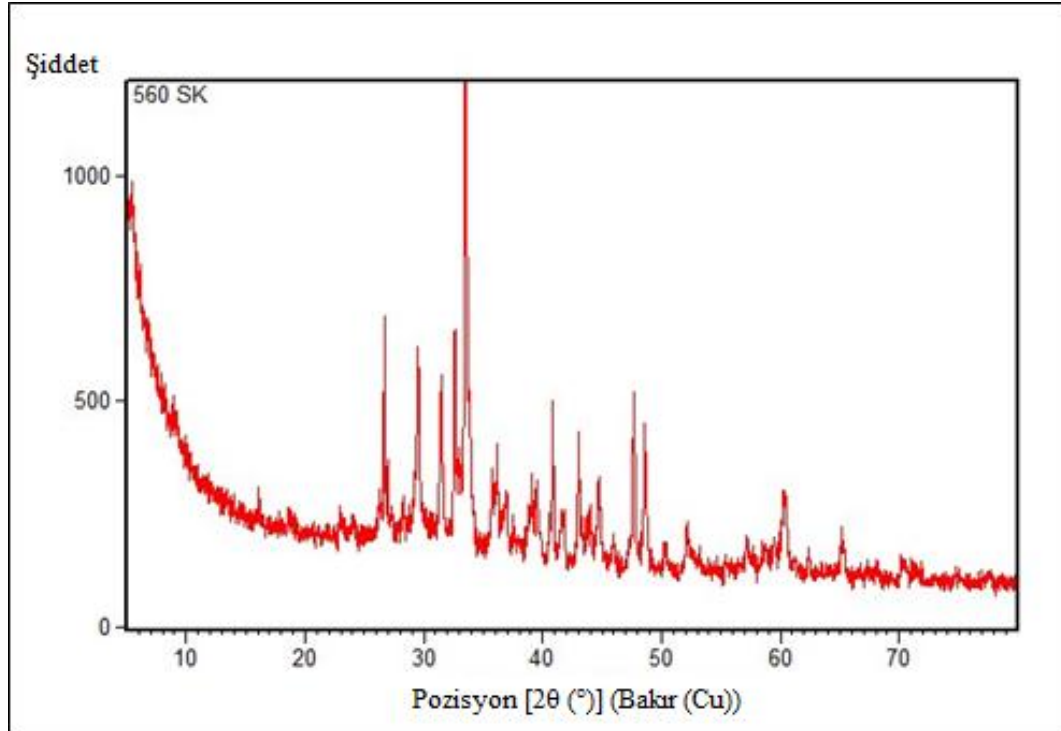
Şekil 4.92. Normal kür koşuluna tabii tutulan S0 numunesinin XRD analizi



Şekil 4.93. Sıcak kür koşuluna tabii tutulan S0 numunesinin XRD analizi



Şekil 4.94. Normal kür koşuluna tabii tutulan S60 numunesinin XRD analizi



Şekil 4.95. Sıcak kür koşuluna tabii tutulan S60 numunesinin XRD analizi

4.12.3. Geopolimer harçların SEM görüntüleri

Normal kür ve sıcak kür koşullarına tabii tutulan S0 numunesinin ve ayrıca normal kür koşuluna tabii tutulan S0C10, S60C10 ve S60D40 numunelerinin 2500x ve 5000x büyütmedeki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 4.96-100'de verilmiştir. Silis dumanı içermeyen numunelerin görüntülerinde, harç hamurundaki gözenekleri, curuf parçacıklarının doldurduğu ve aynı zamanda matristeki parçacıklar arası boş alanları da dolduran C-S-H jelini oluşturduğu gözlemlenmiştir. %60 oranında silis dumanı içeren numunelerin hamur matrisi içerisinde ise, gözenekler ve curuf tanecikleri arasında çok sayıda boş alan bulunduğu gözlenmiştir. Bu boş alanlar ve gözenekler harçların geçirgenliği üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Böylece, belirli bir orana kadar (%20) silis dumanının kullanılması geopolimer harçta iyileşmeye sağlasa da, belirli bir orandan sonra porozite ve kılcak geçirimsizliği artırarak, curuf esaslı geopolimer harçların durabilitesini ve mekanik özelliklerini azaltabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca çelik parçacık ve demir tozu takviyeli geopolimer kompozitlerin SEM görüntülerinde, geopolimer hidrasyon ürünleri ile bağlanmış nispeten kaba çelik lif veya demir tozu yüzeyi gözlemlenmiştir. Bu gözlem geopolimer matrisi ve metal parçacıklar arasındaki iyi bağa bağlanabilir.

Çalışma kapsamında ayrıca, belirli bir bölge üzerinde enerji dağılımlı X-ışını spektrometre (EDX) kullanılarak yüzey alanlarının temel bileşimleri analiz edilmiştir (Şekil 4.101-105). Normal ve sıcak kür koşullarına tabii tutulan S0 numuneleri matrisi üzerindeki elementel bileşim esas olarak, O, Ca, C ve Si'dir ve normal kür koşullarına tabii tutulan S0 numunesi için atomik yüzdeler O:Ca:C:Si=55,16:9,43:24,30:5,81 olarak belirlenmişken, sıcak kür koşullarındaki atomik yüzdeler O:Ca:C:Si=60,79:9,25:18,36:5,75 olarak tanımlanmıştır. S0C10 numunesi için elementel bileşim esas olarak, O, Ca, C, Si, Fe ve Mg'dir ve normal kür koşullarına tabii tutulan S0C10 numunesi için O:Ca:C:Si:Fe:Mg= 59,48:8,12:14,45:5,99:2,50:3,94 olarak belirlenmiştir. Normal kür koşullarına tabii tutulan S60C10 numunesi için elementel bileşim, O:C:Ca:Si:Fe=53,66:21,32:6,09:8,39:3,47 olarak tanımlanmıştır. Normal kür koşullarına tabii tutulan S60D40 numunesi için ise atomik yüzdeler O:Fe:Si:Ca:C=53,50:8,97:8,46:5,62:16,41 olarak belirlenmiştir.

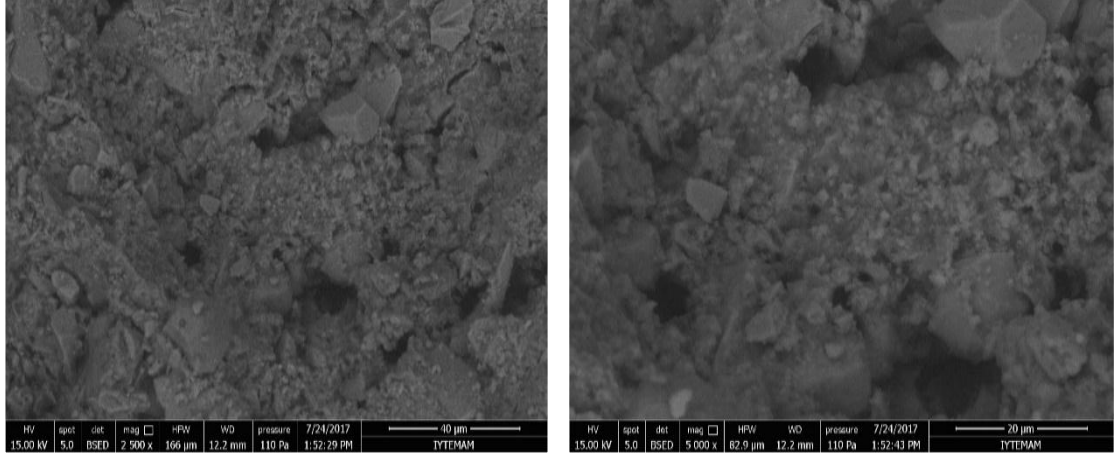
Li vd. (2017) tarafından Portland çimentosu ve alkali aktive edilmiş curuf harç örneklerinin SEM görüntüleri incelenmiş ve görüntülerin çimentonun hidrasyonundan oluşan ve NaOH/Na₂SiO₃ ile curufun aktivasyonundan oluşan C-S-H arasındaki farkları iyi bir şekilde ortaya koyduğu açıklanmıştır. Çalışmada C-S-H'nin farklı morfolojisinin, C-S-H jelinin farklı Ca/Si oranına atfedildiği raporlanmıştır. Chen vd. (2004) tarafından Ca/Si'ye bağlı olarak 30 çeşit C-S-H jeli bildirilmiştir. Örneğin, C-S-H (I), Ca/Si'nin 0,7 ile 1,5 arasında değiştiği, 1,4-nm tobermoritin eksik bir formudur. C-S-H (II), 2'ye yakın Ca/Si'ye sahip eksik bir jennit formudur ve ayrıca, CSH(I) ve CSH(II) amorfudur. Puertas vd. (2006) yaptığı çalışmada, camsuyu ile aktive edilmiş curufun C-S-H jelinin Ca/Si oranının 0,8 olduğu ve 1,4-nm tobermorite amorf C-S-H jele yakın olduğu bildirilmiştir. Ayrıca NaOH ile aktive edilen curufun C-S-H jelinin Ca/Si'nin 1,2 olduğu ve camsuyu ile aktive edilmiş sertleşmiş matrisinden daha büyük olduğu belirtilmiştir.

SEM mikrografları ile, PC bazlı bağlayıcılara kıyasla AAC bağlayıcıları için lifler ve matris fazı arasındaki arayüz bölgesinde daha iyi bağ özellikleri doğrulanmıştır

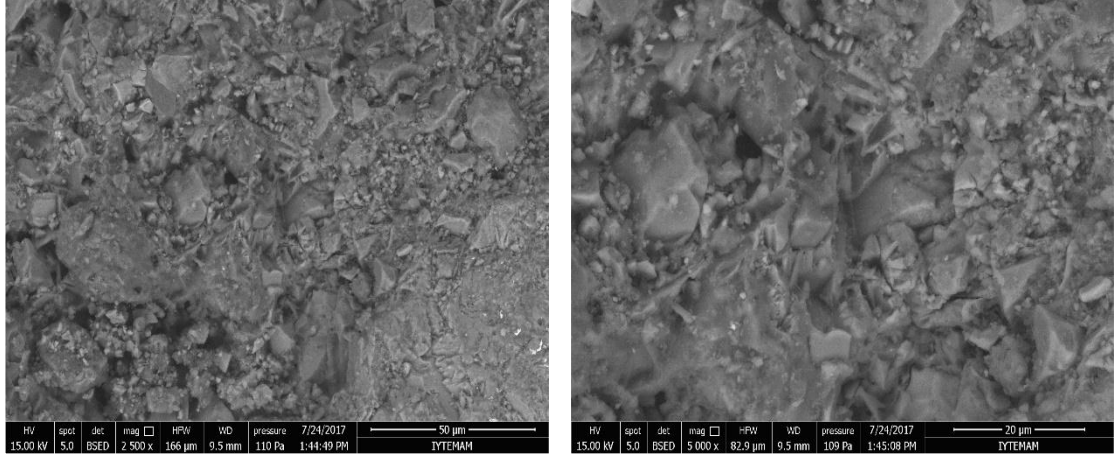
(Kim vd. 2010). Alkali aktive edilmiş bağlayıcıların PC'ye kıyasla daha iyi bağ özellikleri diğer araştırmacılar tarafından da bildirilmiştir (Aydın ve Baradan 2013, Hu vd. 2008). Ayrıca Shi ve Xie (1998), Na_2SiO_3 ile aktive edilen curuf harçlarında yoğun ve uniform geçiş bölgesinin oluşumunun, Na_2SiO_3 'ün su azaltıcı fonksiyonu ve gözenek solüsyonundaki $(\text{SiO}_4)^{4-}$ 'ün yüksek başlangıç konsantrasyonu gibi çeşitli faktörlere bağlı olduğunu bildirmişlerdir.

Huang vd. (2016) tarafından, curuf esaslı geopolimer matrisin mikrografları incelendiğinde, geopolimerin iç yapısının çok kompakt olduğu ve bunun iyi mekanik özelliklere sahip olma durumunu açıkladığı belirtilmiştir. Geopolimerin yüzeyi, hidrate C-S-H jelinin ürünü olabilecek beyaz bir kolloid ile kaplandığı görülmüştür. Geopolimerin iç yapıları, yoğunlaşma reaksiyonu ile inorganik geopolimerik jelleri oluşturmak üzere birbirine bağlı olan -Si-O-Al-O- dan oluşan yoğun kafesler olduğu ve ağ yapısını oluşturmak üzere çapraz bir modelde düzenlendiği belirtilmiştir. Çalışma kapsamında ayrıca, amorf ürünleri incelemek için iki farklı bölge üzerinde enerji dağılımlı spektrometri (EDS) kullanılarak yüzey alanlarının temel bileşimleri analiz edilmiştir. Matris üzerinde iki ayrı faz görülmüştür. A fazının elementel bileşimi, Si, Al, Na ve Ca (Si:Al:Na=2.14:1:1.12)'dir. Faz A, polimerin PSS (poli-sialat-silokso) tipi silis alüminyum ağ yapısına benzeyen zeolit fazının amorf ürünleri olabileceği açıklanmıştır. Faz B ise esas olarak Si ve Ca'dan oluşmaktadır ve Na ve Al konsantrasyonları nispeten daha düşüktür. Faz B, alkali aktive edilmiş curuf, çimentonun hidrasyon prosesi sırasında üretilen C-S-H ile benzer özelliklere sahiptir ve Ca/Si=1.1'dir. Geopolimerizasyon sürecinde oluşan C-S-H, polimer malzemesindeki gözenekleri doldurmuş ve malzemenin dayanımı artırarak kalitesini iyileştirmiştir. Her iki ürünün de (zeolit fazı ve C-S-H fazı) amorf olduğu belirtilmiştir. Ayrıca jellerin aynı anda oluşması, farklı hidratlanmış fazlar ve reaksiyona girmemiş partiküller arasındaki boşlukların köprülenmesine yardımcı olmuş ve yoğun yüksek dayanımlı bir malzeme elde edilmiştir.

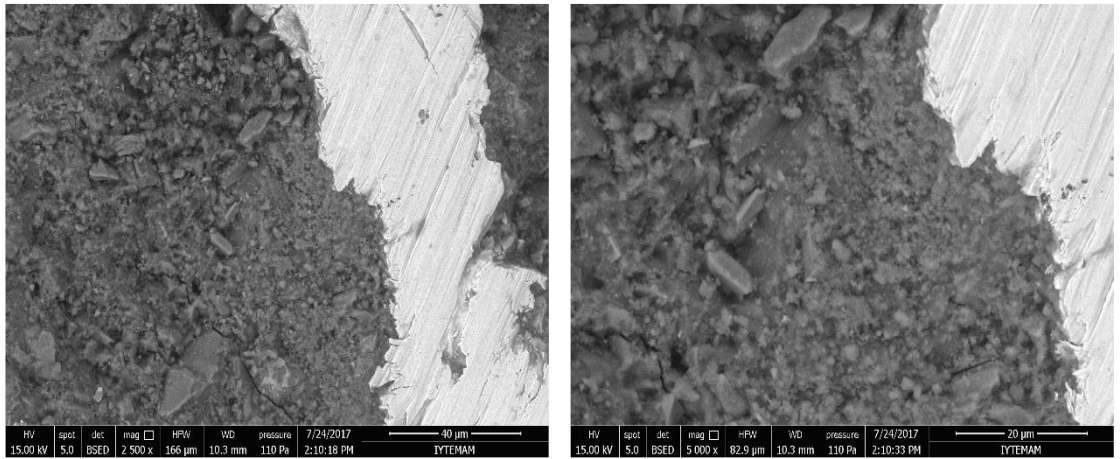
Curuf esaslı geopolimer hamurların, elektron difraksiyon paterni, oluşan C-S-H'ların yarı kristal karakterini teyit etmiştir (Fernandez-Jimenez ve Puertas 2003). 7 günlük AAC hamurları üzerinde yürütülen EDX mikroanalizleri ise, cam suyu ile yapılan AAC hamurlarının (Ca/Si:0,6-0,7), NaOH ile yapılanlardan (Ca/Si:0,9-1,0), daha düşük Ca/Si atomik oranlara sahip olduğunu göstermiştir. Tüm AAC hamurlarında, Ca/Al oranları ham curufa kıyasla oldukça düşük olduğu ayrıca her iki durumda da magnezyum ve alüminyum bakımından zengin olan küçük bir faz tespit edildiği, ve son olarak NaOH ile aktive edilmiş curuf hamurlarındaki Na/Al:2,0-2,22 atomik oranını, cam suyu ile aktive edilmiş hamurlardaki Na/Al:2,5-2,77 atomik oranına yükselten ve tüm AAC hamurlarına dahil olan Na^+ nın önemli olduğu belirtilmiştir.



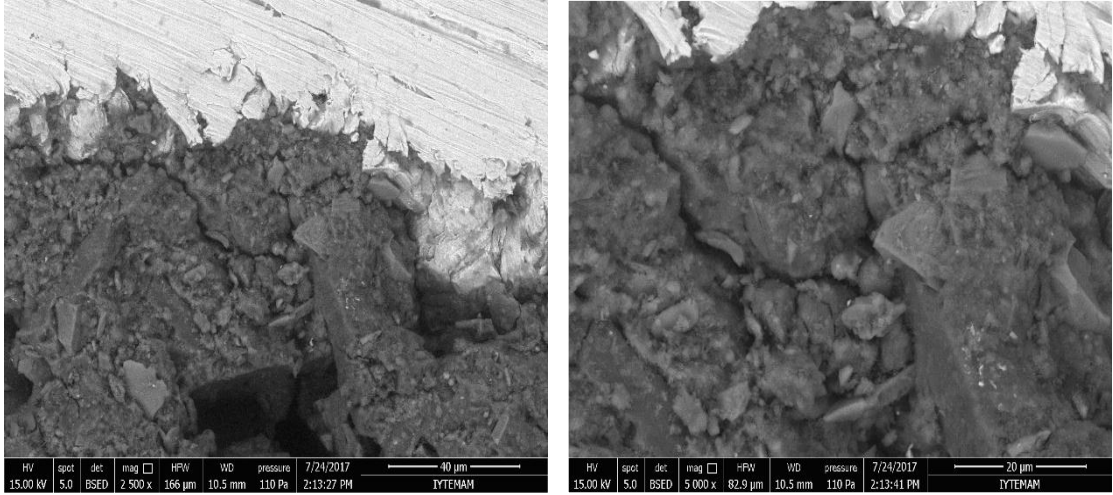
Şekil 4.96. Normal kür koşuluna tabii tutulan S0 numunesinin SEM görüntüleri



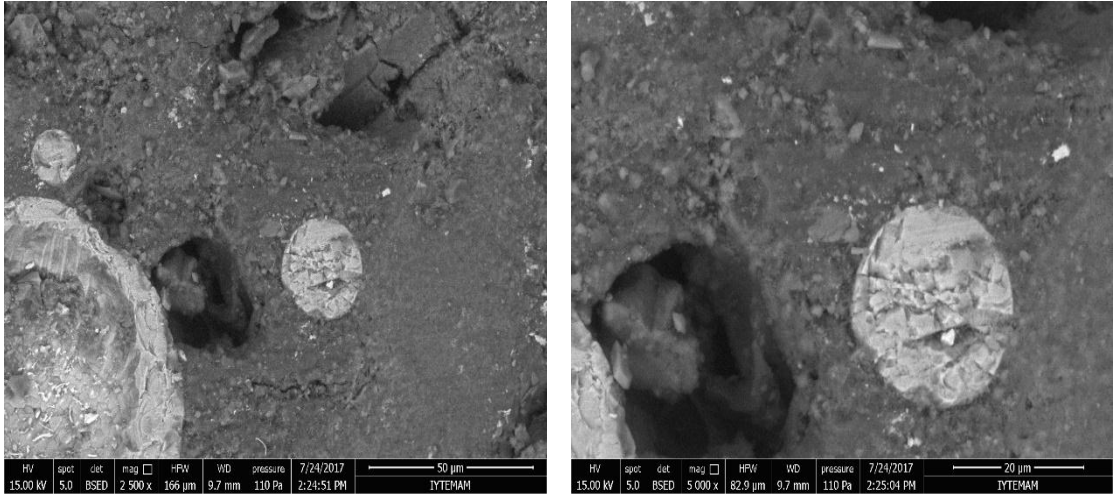
Şekil 4.97. Sıcak kür koşuluna tabii tutulan S0 numunesinin SEM görüntüleri



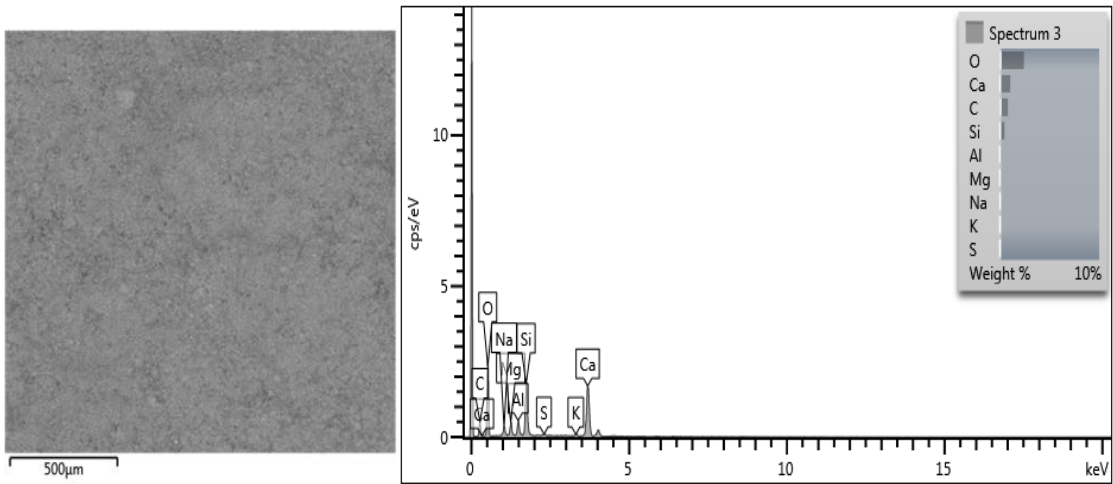
Şekil 4.98. Normal kür koşuluna tabii tutulan S0C10 numunesinin SEM görüntüleri



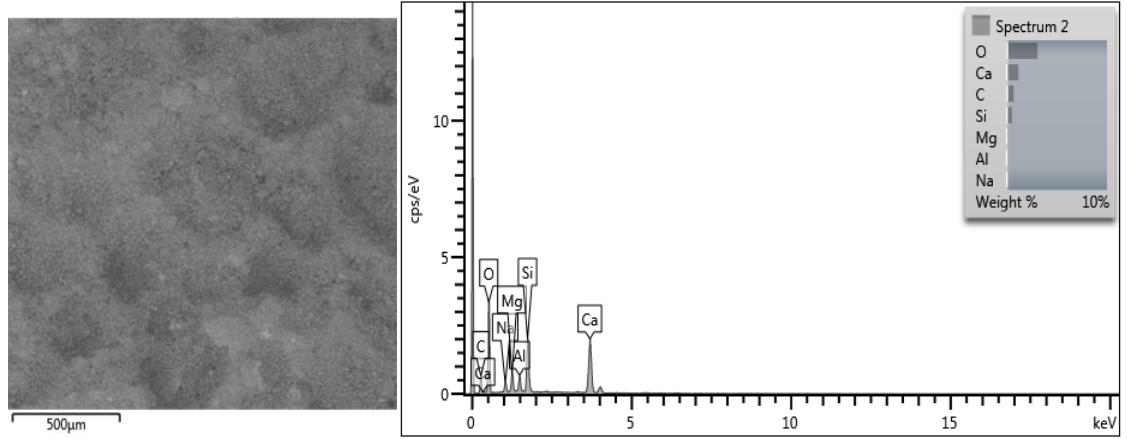
Şekil 4.99. Normal kür koşuluna tabii tutulan S60C10 numunesinin SEM görüntüleri



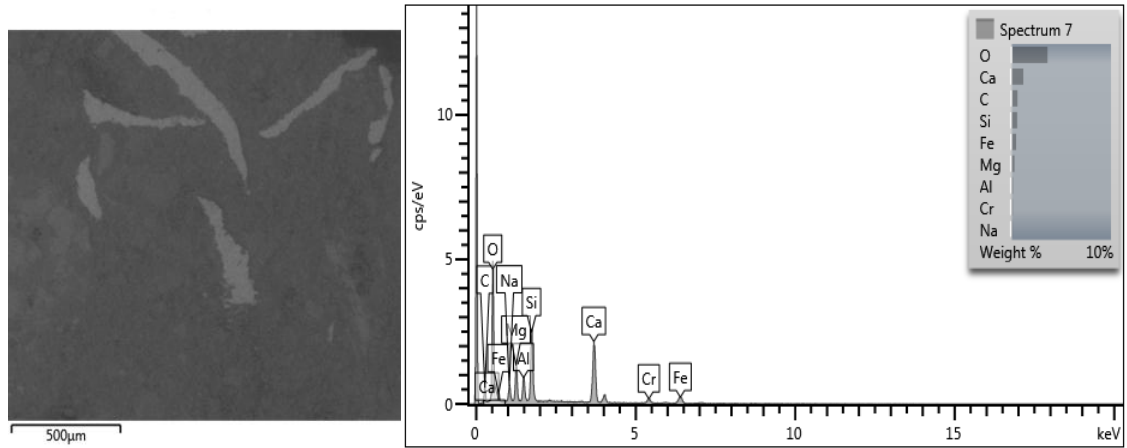
Şekil 4.100. Normal kür koşuluna tabii tutulan S60D40 numunesinin SEM görüntüleri



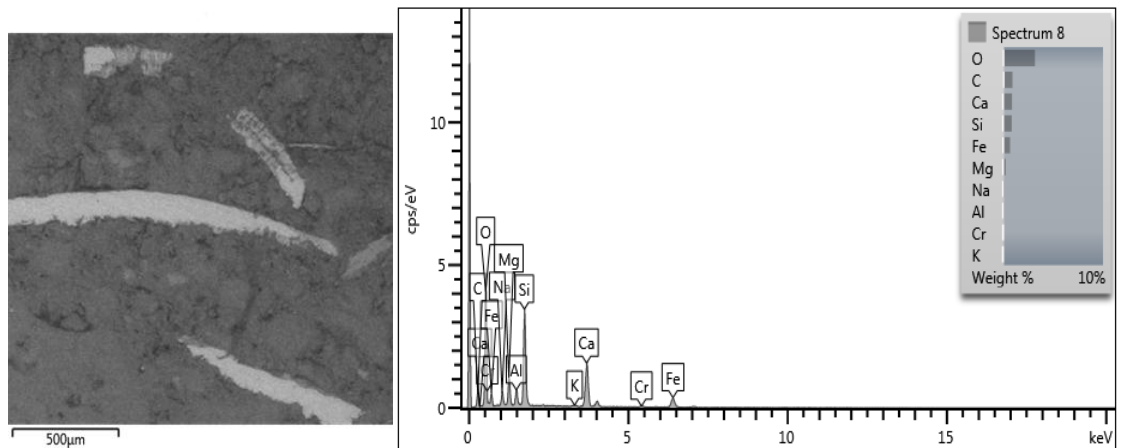
Şekil 4.101. Normal kür koşuluna tabii tutulan S0 numunesinin SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları



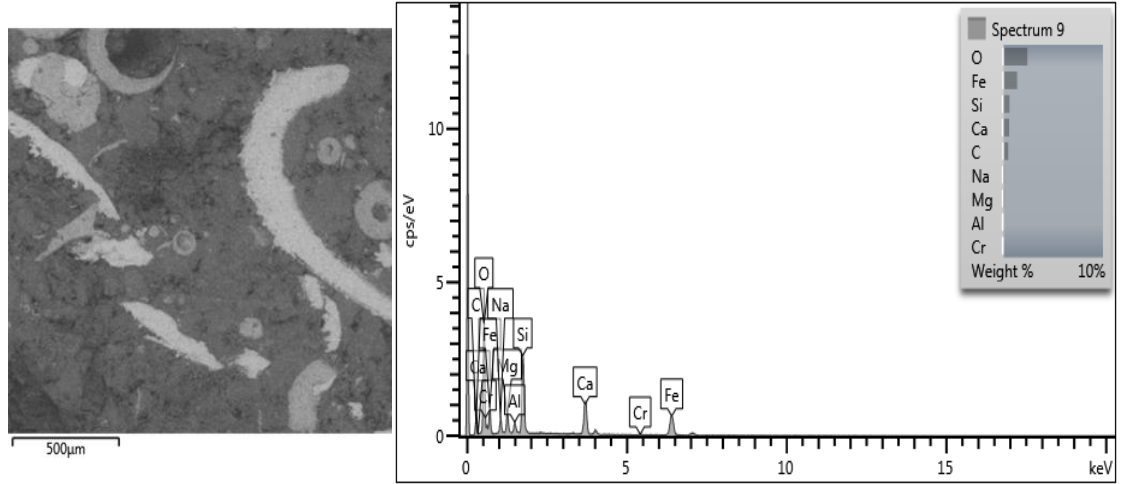
Şekil 4.102. Sıcak kür koşuluna tabii tutulan S0 numunesinin SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları



Şekil 4.103. Normal kür koşuluna tabii tutulan S0C10 numunesinin SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları



Şekil 4.104. Normal kür koşuluna tabii tutulan S60C10 numunesinin SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları



Şekil 4.105. Normal kür koşuluna tabii tutulan S60D40 numunesinin SEM görüntüsü ve seçilen bölgedeki EDX spektrumları

4.13. Tepki Yüzey Metodolojisi (TYM) Kullanılarak Geopolimer Harçların Optimizasyonu

TYM, mühendislik problemlerini modellemek ve analiz etmek için kullanılan istatistiksel ve matematiksel yöntemlerin bir toplamıdır (Chehreghani vd. 2017). Bu tekniğin ana hedefi, çeşitli işlem parametrelerinden etkilenen tepki yüzeyini optimize etmektir. TYM, kontrol edilebilir giriş parametreleri ile elde edilen tepki yüzeyleri arasındaki ilişkiyi de belirler (Kwak 2005). TYM için tasarım prosedürü aşağıdaki gibidir (Gunaraj ve Murugan 1999).

- i) İstenilen tepkinin yeterli ve güvenilir ölçümü için bir seri deney tasarlanır.
- ii) İkinci mertebeden bir tepki yüzeyi ve maksimum uygunluk ile matematiksel bir model geliştirilir.
- iii) Etkinin maksimum ve minimum değerini veren deney parametrelerinin en uygun seti belirlenir.
- iv) İşlem parametrelerinin doğrudan ve etkileşimli etkileri iki ve üç boyutlu çizimler olarak ifade edilir.

Böylece deneysel olarak incelenmemiş ara seviyelerdeki tepkilerden hesaplamalar yapılmasına izin verir ve tepkiyi arttırmak veya azaltmak amacıyla girdi seviyelerinin değiştirilmesi arzu edildiğinde hareket yönünü gösterir. Optimizasyon kullanılarak her giriş faktörü ve tepki için arzulanan bir değer seçilebilir. Seçilebilecek olası giriş optimizasyonları; aralık, maksimum, minimum ve amacı kapsamaktadır, ayrıca belirli bir koşul kümesi için optimize edilmiş bir çıktı değerini oluşturacak şekilde ayarlanır. Design Expert V10 yazılımı tepki yüzeyi metodolojisi, 4 girdi değişkeninin yanıtlarını optimize etmek için kullanılmıştır. Tepki yüzey metodolojisine dayalı deneylerin tasarımı kullanılarak minimum su emme yüzdesi ve kuru yığın yoğunluğu ve ayrıca maksimum dayanıma sahip geopolimer harç özelliklerine, olası tüm kombinasyonların deneysel olarak incelenmesine gerek

kalmaksızın minimum deney sayısı ile ulaşılabilmektedir. Ayrıca belirli bir tepki seviyesi için farklı değişkenlerin giriş seviyeleri de belirlenebilmektedir. Bu çalışmada ‘Geçmiş Veri Tasarımı’ kullanılmıştır.

Üretici için en büyük zorluk, yüksek dayanımlı geopolimer harç üretecek işlem girdi parametrelerini seçmektir. Çalışma için seçilen dört değişken, agrega miktarı (a), bağlayıcı miktarı (b), agrega tipi (at) ve kür koşulları (kk), A, B, C, D olarak adlandırılırken, öngörülen tepkiler yani, kuru ve doymuş yüzey kuru yığın yoğunluk, basınç, eğilmede ve yarmada çekme dayanımları, kılcak su emme katsayısı, su emme yüzdesi, görünür porozite yüzdesi ve elektromanyetik kalkanlama etkinliğinin her biri ‘y’ olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.2, işlem değişkenlerini, bunların kodlanmış ve gerçek değerlerini göstermektedir. Değişkenler ve tepkiler arasındaki matematiksel ilişki, ikinci dereceden polinom ile tahmin edilebilmektedir.

Yazılımı çalıştırmak ve tepki yüzeyi metodolojisini kullanarak tasarım noktalarını elde etmek için, düşük ve yüksek seviyeleri (-1 ve +1 seviyesi) olan faktörler, işleme girilmiştir. Burada agrega ve bağlayıcı miktarı sayısal faktörleri, kür koşulları ve agrega tipi ise kategorik faktörleri temsil etmektedir.

Çizelge 4.2. İşlem değişkenlerinin kodlanmış ve gerçek isimleri

Değişkenler	İsim	Birim
Agrega miktarı	A	%
Bağlayıcı miktarı	B	%
Agrega tipi	C	-
Kür koşulları	D	-

TYM için dört girdi parametresi ve alt, orta ve üst tasarım noktaları Çizelge 4.3’te verilmiştir. TYM’de doğal değişkenler, sıfır ortalamalı ve standart sapma ile boyutsuz olarak tanımlanan kodlanmış değişkenlere dönüştürülür. Bağımsız değişkenlerin kodlanmış seviyelerine, tepki değişkeniyle ilişkili çoklu regresyon denklemleri oluşturulmuştur.

Verilerin fonksiyona uydurulmasından sonra bulunan matematiksel model, bazen çalışılan deneysel alanı gerektiği şekilde tanımlayamaz (Bezerra vd. 2008). Modelin kalitesini değerlendirmenin daha güvenilir yolu, varyans analizi (ANOVA) uygulamasıdır. ANOVA’nın temel yaklaşımı, işleme bağlı varyasyonu (değişken düzeylerin kombinasyonundaki değişim), oluşturulan tepkilerin ölçümlerine özgü rastgele hatalardan kaynaklanan varyasyonla karşılaştırmaktır. Bu karşılaştırmadan, deneysel varyans kaynakları dikkate alınarak tepkileri öngörmek için kullanılan regresyonun önemini değerlendirmek mümkündür. Varyans analizi, seçilen modellerin elde edilen veriyi yeterli düzeyde temsil ettiğini göstermektedir.

Çizelge 4.3. Tasarım matrisi (deneysel çalışmadan elde edilen veriler)

	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Faktör 4
	A:Agrega miktarı	B:Bağlayıcı miktarı	C:Agrega tipi	D:Kür koşulları
1	0	0	C	NK
2	2,5	0	C	NK
3	5	0	C	NK
4	7,5	0	C	NK
5	10	0	C	NK
6	10	0	D	NK
7	20	0	D	NK
8	30	0	D	NK
9	40	0	D	NK
10	0	20	C	NK
11	2,5	20	C	NK
12	5	20	C	NK
13	7,5	20	C	NK
14	10	20	C	NK
15	10	20	D	NK
16	20	20	D	NK
17	30	20	D	NK
18	40	20	D	NK
19	0	40	C	NK
20	2,5	40	C	NK
21	5	40	C	NK
22	7,5	40	C	NK
23	10	40	C	NK
24	10	40	D	NK
25	20	40	D	NK
26	30	40	D	NK
27	40	40	D	NK
28	0	60	C	NK
29	2,5	60	C	NK
30	5	60	C	NK
31	7,5	60	C	NK
32	10	60	C	NK
33	10	60	D	NK
34	20	60	D	NK
35	30	60	D	NK
36	40	60	D	NK
37	0	0	C	SK
38	2,5	0	C	SK
39	5	0	C	SK
40	7,5	0	C	SK
41	10	0	C	SK

(devamı arkada)

Çizelge 4.3' ün devamı

42	10	0	D	SK
43	20	0	D	SK
44	30	0	D	SK
45	40	0	D	SK
46	0	20	C	SK
47	2,5	20	C	SK
48	5	20	C	SK
49	7,5	20	C	SK
50	10	20	C	SK
51	10	20	D	SK
52	20	20	D	SK
53	30	20	D	SK
54	40	20	D	SK
55	0	40	C	SK
56	2,5	40	C	SK
57	5	40	C	SK
58	7,5	40	C	SK
59	10	40	C	SK
60	10	40	D	SK
61	20	40	D	SK
62	30	40	D	SK
63	40	40	D	SK
64	0	60	C	SK
65	2,5	60	C	SK
66	5	60	C	SK
67	7,5	60	C	SK
68	10	60	C	SK
69	10	60	D	SK
70	20	60	D	SK
71	30	60	D	SK
72	40	60	D	SK

İstatistiksel model, harçlar için deneysel verilerin kullanılması üzerine çoklu regresyon analizi yöntemleri uygulanarak geliştirilmiştir. Kodlanmış ve gerçek faktörler açısından nihai matematiksel modeller aşağıda listelenmiştir.

Kodlanmış faktörler açısından nihai denklem;

$$\begin{aligned} \text{Kuru yığın yoğunluk} = & +2,07 + 0,012 \times A - 1,088E-003 \times B + 0,031 \times C - 0,025 \times D - \\ & 4,411E-005 \times AB - 2,056E-004 \times AC + 5,667E-003 \times AD - 2,333E-004 \times \\ & BC + 8,949E-004 \times BD + 6,618E-003 \times CD - 9,961E-005 \times A^2 + 1,806E-005 \\ & \times B^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Doygun yüzey kuru yığın yoğunluk} = & +2,30 + 0,013 \times A - 2,083E-004 \times B - 0,034 \times C \\ & + 8,000E-003 \times D - 7,056E-005 \times AB + 5,917E-003 \times AC - 5,556E-006 \times \end{aligned}$$

$$AD +1.031E-003 \times BC +1,111E-005 \times BD +1,806E-003 \times CD -1,077E-004 \times A^2 +1,319E-005 \times B^2$$

$$\text{Basınç dayanımı} = +39,66+0,049 \times A +0,33 \times B +0,50 \times C +6,92 \times D -0,029 \times AB +0,098 \times AC +0,16 \times AD +0,20 \times BC -0,095 \times BD -1,04 \times CD +0,026 \times A^2 -1,175E-003 \times B^2 +5,955E-003 \times ABC +2,156E-004 \times ABD +0,070 \times ACD +9,138E-003 \times BCD -9,017E-005 \times A^2B -0,028 \times A^2C -5,079E-003 \times A^2D +4,083E-004 \times AB^2 -5,598E-003 \times B^2C -4,340E-004 \times B^2D +5,757E-005 \times A^3 -1,402E-004 \times B^3$$

$$\text{Eğilmede çekme dayanımı} = +3,74+0,19 \times A +0,070 \times B +0,38 \times C +0,42 \times D -2,971E-003 \times AB -0,22 \times AC +0,058 \times AD +0,020 \times BC -0,010 \times BD -0,55 \times CD -0,010 \times A^2 -8,065E-004 \times B^2 +1,429E-003 \times ABC -4,149E-004 \times ABD +0,017 \times ACD +4,937E-003 \times BCD -4,876E-005 \times A^2B +0,013 \times A^2C -9,696E-004 \times A^2D +6,619E-005 \times AB^2 -5,283E-004 \times B^2C +1,490E-004 \times B^2D -3,163E-005 \times A^3 -7,905E-006 \times B^3$$

$$\text{Yarmada çekme dayanımı} = +18,73+0,49 \times A +0,32 \times B +2,47 \times C +2,12 \times D -0,023 \times AB -0,90 \times AC +0,096 \times AD +0,085 \times BC +0,039 \times BD +0,37 \times CD +0,022 \times A^2 -0,011 \times B^2 +5,809E-003 \times ABC -1,330E-003 \times ABD -0,055 \times ACD +1,500E-003 \times BCD +1,313E-004 \times A^2B +0,019 \times A^2C +2,100E-004 \times A^2D +1,288E-004 \times AB^2 -1,050E-003 \times B^2C -9,444E-004 \times B^2D -6,873E-004 \times A^3 +1,088E-004 \times B^3$$

$$\text{Kılcal su emme} = +0,088+2,995E-003 \times A +7,456E-004 \times B +1,124E-003 \times C -0,088 \times D +8,987E-005 \times AB -4,710E-004 \times AC +2,870E-003 \times AD -1,435E-003 \times BC -4,967E-004 \times BD -9,338E-003 \times CD -2,384E-004 \times A^2 -5,354E-005 \times B^2 +1,027E-005 \times ABC -1,389E-005 \times ABD -1,210E-003 \times ACD +3,064E-004 \times BCD -1,576E-006 \times A^2B +5,641E-005 \times A^2C -1,137E-005 \times A^2D -1,806E-007 \times AB^2 +2,056E-005 \times B^2C +2,396E-005 \times B^2D +2,807E-006 \times A^3 +8,681E-007 \times B^3$$

$$\text{Su emme} = +11,73-0,091 \times A +0,047 \times B +0,089 \times C -1,29 \times D -6,633E-004 \times AB -0,035 \times AC +9,944E-003 \times AD -2,310E-003 \times BC +0,013 \times BD -0,12 \times CD +1,609E-003 \times A^2 -3,924E-004 \times B^2$$

$$\text{Porozite} = +24,14-5,917E-003 \times A +0,051 \times B -0,46 \times C -2,46 \times D -2,111E-003 \times AB +0,016 \times AC +0,012 \times AD +8,036E-003 \times BC +0,026 \times BD -0,26 \times CD$$

Gerçek faktörler açısından nihai denklem;

Agrega tipi: C ve Kür Koşulu: NK için:

$$\text{Kuru yığın yoğunluk} = +2,06818+6,47504E-00 3x a-1,74944E-003 \times b-4,41111E-005 \times a \times b-9,96146E-005 \times a^2+1,80556E-00 5x b^2$$

$$\text{Doygun yüzey kuru yığın yoğunluk} = +2,32690+6,64929E-00 3x a-1,25000E-003 \times b-7,05556E-005 \times a \times b-1,07707E-004 \times a^2+1,31944E-00 5x b^2$$

$$\text{Basınç dayanımı} = +31,20965-0,14209 \times a + 0,23420 \times b - 0,034914 \times a \times b + 0,058635 \times a^2 + 4,85694E-003 \times b^2 - 9,01734E-005 \times a^2 \times b + 4,08333E-004 \times a \times b^2 + 5,75699E-005 \times a^3 - 1,40162E-004 \times b^3$$

$$\text{Eğilmede çekme dayanımı} = +2,38607+0,36917 \times a + 0,065085 \times b - 3,98522E-003 \times a \times b - 0,022522 \times a^2 - 4,27222E-004 \times b^2 - 4,87553E-005 \times a^2 \times b + 6,61944E-005 \times a \times b^2 - 3,16309E-005 \times a^3 - 7,90509E-006 \times b^3$$

$$\text{Yarmada çekme dayanımı} = +14,50327+1,24119 \times a + 0,19949 \times b - 0,027438 \times a \times b + 3,44691E-003 \times a^2 - 9,40347E-003 \times b^2 + 1,31291E-004 \times a^2 \times b + 1,28750E-004 \times a \times b^2 - 6,87329E-004 \times a^3 + 1,08796E-004 \times b^3$$

$$\text{Kılcal su emme} = +0,16561-6,14524E-004 \times a + 2,98363E-003 \times b + 9,34833E-005 \times a \times b - 2,83454E-004 \times a^2 - 9,80556E-005 \times b^2 - 1,57611E-006 \times a^2 \times b - 1,80556E-007 \times a \times b^2 + 2,80702E-006 \times a^3 + 8,68056E-007 \times b^3$$

$$\text{Su emme} = +12,81406-0,065633 \times a + 0,036586 \times b - 6,63333E-004 \times a \times b + 1,60886E-003 \times a^2 - 3,92361E-004 \times b^2$$

$$\text{Porozite} = +26,80800-0,034000 \times a + 0,016956 \times b - 2,11111E-003 \times a \times b$$

Agrega tipi: C ve Kür Koşulu: SK için;

$$\text{Kuru yığın yoğunluk} = +2,11724+6,06392E-003 \times a - 2,21611E-003 \times b - 4,41111E-005 \times a \times b - 9,96146E-005 \times a^2 + 1,80556E-005 \times b^2$$

$$\text{Doygun yüzey kuru yığın yoğunluk} = +2,33929+6,63818E-003 \times a - 1,22778E-003 \times b - 7,05556E-005 \times a \times b - 1,07707E-004 \times a^2 + 1,31944E-004 \times b^2$$

$$\text{Basınç dayanımı} = +47,12412+0,044556 \times a + 0,025332 \times b - 0,034483 \times a \times b + 0,048477 \times a^2 + 3,98889E-003 \times b^2 - 9,01734E-005 \times a^2 \times b + 4,08333E-004 \times a \times b^2 + 5,75699E-005 \times a^3 - 1,40162E-004 \times b^3$$

$$\text{Eğilmede çekme dayanımı} = +4,32973+0,45266 \times a + 0,034819 \times b - 4,81500E-003 \times a \times b - 0,024461 \times a^2 - 1,29306E-004 \times b^2 - 4,87553E-005 \times a^2 \times b + 6,61944E-005 \times a \times b^2 - 3,16309E-005 \times a^3 - 7,90509E-006 \times b^3$$

$$\text{Yarmada çekme dayanımı} = +18,01296+1,54179 \times a + 0,27532 \times b - 0,030098 \times a \times b + 3,86695E-003 \times a^2 - 0,011292 \times b^2 + 1,31291E-004 \times a^2 \times b + 1,28750E-004 \times a \times b^2 - 6,87329E-004 \times a^3 + 1,08796E-004 \times b^3$$

$$\text{Kılcal su emme} = +8,42409E-003+7,54617E-003 \times a + 1,37752E-003 \times b + 6,57055E-005 \times a \times b - 3,06190E-004 \times a^2 - 5,01389E-005 \times b^2 - 1,57611E-006 \times a^2 \times b - 1,80556E-007 \times a \times b^2 + 2,80702E-006 \times a^3 + 8,68056E-007 \times b^3$$

$$\text{Su emme} = +10,46628-0,045744 \times a + 0,062531 \times b - 6,63333E-004 \times a \times b + 1,60886E-003 \times a^2 - 3,92361E-004 \times b^2$$

$$\text{Porozite} = +22,40467-9,33333E-003 \times a + 0,068456 \times b - 2,11111E-003 \times a \times b$$

Agrega tipi: D ve Kür Koşulu: NK için;

$$\text{Kuru yığın yoğunluk} = +2,00419+0,017810 \times a+4,02778E-00 \times b-4,41111E-005 \times a \times b-9,96146E-05 \times a^2+1,80556E-00 \times b^2$$

$$\text{Doygun yüzey kuru yığın yoğunluk} = +2,25445+0,018483 \times a+8,11111E-00 \times b-7,05556E-005 \times a \times b-1,07707E-004 \times a^2+1,31944E-00 \times b^2$$

$$\text{Basınç dayanımı} = +34,28324-0,086031 \times a +0,61135 \times b -0,023004 \times a \times b +3,18521E-003 \times a^2 -6,33941E-003 \times b^2 -9,01734E-005 \times a^2 \times b +4,08333E-004 \times a \times b^2 +5,75699E-005 \times a^3 -1,40162E-004 \times b^3$$

$$\text{Eğilmede çekme dayanımı} = +4,25503-0,099187 \times a+0,095746 \times b-1,12726E-003 \times a \times b+3,80766E-003 \times a^2-1,48377E-003 \times b^2-4,87553E-005 \times a^2 \times b+6,61944E-005 \times a \times b^2-3,16309E-005 \times a^3-7,90509E-006 \times b^3$$

$$\text{Yarmada çekme dayanımı} = +18,70550-0,45325 \times a+0,36677 \times b-0,015820 \times a \times b+0,040651 \times a^2-0,011503 \times b^2+1,31291E-004 \times a^2 \times b+1,28750E-004 \times a \times b^2-6,87329E-004 \times a^3+1,08796E-004 \times b^3$$

$$\text{Kılcal su emme} = +0,18653+8,63768E-004 \times a-4,99165E-004 \times b+1,14028E-004 \times a \times b-1,70625E-004 \times a^2-5,69444E-005 \times b^2-1,57611E-006 \times a^2 \times b-1,80556E-007 \times a \times b^2+2,80702E-006 \times a^3+8,68056E-007 \times b^3$$

$$\text{Su emme} = +13,22776-0,13611 \times a+0,031965 \times b-6,63333E-004 \times a \times b+1,60886E-003 \times a^2-3,92361E-004 \times b^2$$

$$\text{Porozite} = +26,40500-2,50000E-003 \times a+0,033028 \times b-2,11111E-003 \times a \times b$$

Agrega tipi: D ve Kür Koşulu: SK için;

$$\text{Kuru yığın yoğunluk} = +2,07972+0,017399 \times a-4,26389E-004 \times b-4,41111E-005 \times a \times b-9,96146E-005 \times a^2+1,80556E-00 \times b^2$$

$$\text{Doygun yüzey kuru yığın yoğunluk} = +2,27406+0,018471 \times a+8,33333E-00 \times b-7,05556E-005 \times a \times b-1,07707E-004 \times a^2+1,31944E-00 \times b^2$$

$$\text{Basınç dayanımı} = +46,03910+0,38069 \times a +0,43903 \times b -0,022573 \times a \times b -6,97278E-003 \times a^2 -7,20747E-003 \times b^2 -9,01734E-005 \times a^2 \times b +4,08333E-004 \times a \times b^2 +5,75699E-005 \times a^3 -1,40162E-004 \times b^3$$

$$\text{Eğilmede çekme dayanımı} = +3,98893+0,051237 \times a+0,085228 \times b-1,95704E-003 \times a \times b+1,86855E-003 \times a^2-1,18585E-003 \times b^2-4,87553E-005 \times a^2 \times b+6,61944E-005 \times a \times b^2-3,16309E-005 \times a^3-7,90509E-006 \times b^3$$

$$\text{Yarmada çekme dayanımı} = +23,69247-0,37145 \times a+0,44860 \times b-0,018480 \times a \times b+0,041071 \times a^2-0,013392 \times b^2+1,31291E-004 \times a^2 \times b+1,28750E-004 \times a \times b^2-6,87329E-004 \times a^3+1,08796E-004 \times b^3$$

$$\text{Kılcal su emme} = -8,00218\text{E-}003 + 4,18390\text{E-}003 \times a - 8,79721\text{E-}004 \times b + 8,62498\text{E-}005 \times a \times b - 1,93361\text{E-}004 \times a^2 - 9,02778\text{E-}006 \times b^2 - 1,57611\text{E-}006 \times a^2 \times b - 1,80556\text{E-}007 \times a \times b^2 + 2,80702\text{E-}006 \times a^3 + 8,68056\text{E-}007 \times b^3$$

$$\text{Su emme} = +10,40846 - 0,11622 \times a + 0,057910 \times b - 6,63333\text{E-}004 \times a \times b + 1,60886\text{E-}003 \times a^2 - 3,92361\text{E-}004 \times b^2$$

$$\text{Porozite} = +20,95583 + 0,022167 \times a + 0,084528 \times b - 2,11111\text{E-}003 \times a \times b$$

Model özet istatistikleri, model seçimi için bir takım karşılaştırmalı sınırlar vermektedir. Aliased modeli yok sayarak, kuru ve doymuş yüzey kuru yığın yoğunluk ve su emme için kuadratik, basınç, eğilmede ve yarmada çekme dayanımı, kılcal su emme katsayısı için kübik, ve porozite için 2FI model en iyi sonucu vermektedir: düşük standart sapma ve yüksek R-karesi istatistikleriyle. İncelenen farklı modeller arasında kuru yığın yoğunluk ve su emme için 0,022, 0,57 standart sapmalar ve sırasıyla 0,9885 ve 0,8920 korelasyon katsayılarıyla (R^2 değeri) kuadratik modellerin, basınç ve eğilmede çekme dayanımı için ise sırasıyla 2,76 ve 0,32 standart sapma ve 0,9459, 0,9375 korelasyon sayılarıyla kübik modellerin deneysel verilere en uygun oldukları bulunmuştur.

Tahmini tepki yüzey modellerinin regresyon parametrelerinin ANOVA değerleri Çizelge 4.4-7'de özetlenmiştir. Olasılık > F değerinin 0,05'ten düşük değerleri model terimlerinin anlamlı olduğunu göstermektedir. Sonuçlar, bütün değişkenlerin doğrusal etkilerinin, agrega miktarı-bağlayıcı miktarı etkileşimi, agrega miktarı-agrega tipi etkileşimi, bağlayıcı miktarı-agrega tipi etkileşimi, bağlayıcı miktarı-kür koşulları etkileşiminin ve ayrıca agrega miktarı ve bağlayıcı miktarının kuadratik etkilerinin kuru yığın yoğunlukları üzerinde anlamlı bir etki gösterdiğini ortaya koymuştur.

Agrega miktarı, bağlayıcı miktarı ve kür koşullarının doğrusal etkilerinin, bağlayıcı miktarı-kür koşullarının etkileşiminin, ve ayrıca bağlayıcı miktarının kuadratik etkilerinin su emme için son derece anlamlı olduğunu göstermiştir.

Kür koşullarının doğrusal etkisinin, agrega miktarı-bağlayıcı miktarı etkileşimi, bağlayıcı miktarı-agrega tipi etkileşimi, ayrıca bağlayıcı miktarının kübik etkisinin basınç dayanımı için anlamlı bir etki oluşturduğunu ortaya koymuştur.

Agrega miktarı, bağlayıcı miktarı ve kür koşullarının doğrusal etkileri, agrega miktarı-bağlayıcı miktarı etkileşimi, agrega miktarı-agrega tipi etkileşimi, agrega miktarı-kür koşulları etkileşimi, agrega tipi-kür koşulları etkileşimi ve agrega miktarının kuadratik etkisi, agrega miktarı-bağlayıcı miktarı-agrega tipi etkileşimi, bağlayıcı miktarı-agrega tipi etkileşiminin eğilmede çekme dayanımı üzerinde anlamlı etkisi olduğunu göstermiştir.

Yazılım, uygun model için, model katsayıları, R^2 değerleri, F-değerleri ve önemli olasılıklar üretir ve dolayısıyla her deneysel değişkenin önemini doğrulayabilir. İstatistiksel açıdan modeli değerlendirmek için üç test gereklidir: faktörlerin ve etkileşimlerin önem testi, R-kare testi ve uygunsuzluk testi.

Faktörlerin ve etkileşimlerin anlamlılığının test edilmesi hangi faktörlerin modele dahil edilmesi gerektiğini ve hangi faktörlerin çıkarılması gerektiğini belirler. P-değeri (olasılık değeri), 0,05'ten fazla ise, bunun %95 güven düzeyinde önemsiz olduğunu göstermektedir. R-kare, bir modelin gerçek veri noktalarına ne kadar yakın olduğunu gösteren istatistiksel bir ölçüttür. Uygunsuzluk testi, ölçülen ve beklenen değerler arasındaki tutarsızlıkların tesadüfi veya sistematik hatalara atfedilip veya atfedilemeyeceğini belirlemek için kullanılır.

Uygunsuzluk testi, kalan hatayı tekrarlanan tasarım noktalarındaki saf hatayla karşılaştırır. Uygunsuzluk için p-değeri 0,05'in altındaysa, %95 güven düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı uygunsuzluk var demektir. Deneysel ve teorik değerler, kuru yığın yoğunluk, su emme, basınç ve eğilmede çekme dayanımı için mükemmel bir uyuma işare etmiştir. TYM, deneysel değerlerin, tahmini modellerin geçerliliğini ve yeterliliğini teyit eden öngörülen değerlere makul derecede yakın olduğunu göstermiştir. Modelin iyi olduğu, belirleme katsayısı R^2 ile kontrol edilebilir. Regresyon modellerinin, 0,8920'den 0,9885'e değişen belirleme katsayısı (R^2) ile kuru yığın yoğunluk, su emme, basınç ve eğilmede çekme dayanımları açısından son derece anlamlı olduğu ortaya konulmuştur.

Çizelge 4.4. Kuru yığın yoğunluk tepki yüzey kuadratik model için ANOVA

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri	p-değeri Olasılık > F
Model	2,35	12	0,20	421,42	< 0,0001
A-a	0,038	1	0,038	82,21	< 0,0001
B-b	2,686E-003	1	2,686E-003	5,79	0,0193
C-at	2,050E-003	1	2,050E-003	4,42	0,0398
D-k	0,011	1	0,011	23,48	< 0,0001
AB	4,378E-003	1	4,378E-003	9,44	0,0032
AC	0,018	1	0,018	38,57	< 0,0001
AD	1,901E-004	1	1,901E-004	0,41	0,5245
BC	0,011	1	0,011	23,79	< 0,0001
BD	1,960E-003	1	1,960E-003	4,23	0,0442
CD	1,207E-003	1	1,207E-003	2,60	0,1120
A ²	3,219E-003	1	3,219E-003	6,94	0,0107
B ²	3,756E-003	1	3,756E-003	8,10	0,0061

Çizelge 4.5. Su emme tepki yüzey kuadratik model için ANOVA

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri	p-değeri Olasılık > F
Model	157,97	12	13,16	40,61	< 0,0001
A-a	2,21	1	2,21	6,82	0,0114
B-b	5,07	1	5,07	15,63	0,0002
C-at	0,025	1	0,025	0,078	0,7814
D-k	18,74	1	18,74	57,79	< 0,0001
AB	0,99	1	0,99	3,05	0,0857
AC	0,69	1	0,69	2,13	0,1494
AD	0,45	1	0,45	1,37	0,2461
BC	0,074	1	0,074	0,23	0,6356
BD	6,06	1	6,06	18,69	< 0,0001
CD	0,38	1	0,38	1,18	0,2815
A ²	0,84	1	0,84	2,59	0,1129
B ²	1,77	1	1,77	5,47	0,0227

Çizelge 4.6. Basınç dayanımı tepki yüzey kübik model için ANOVA

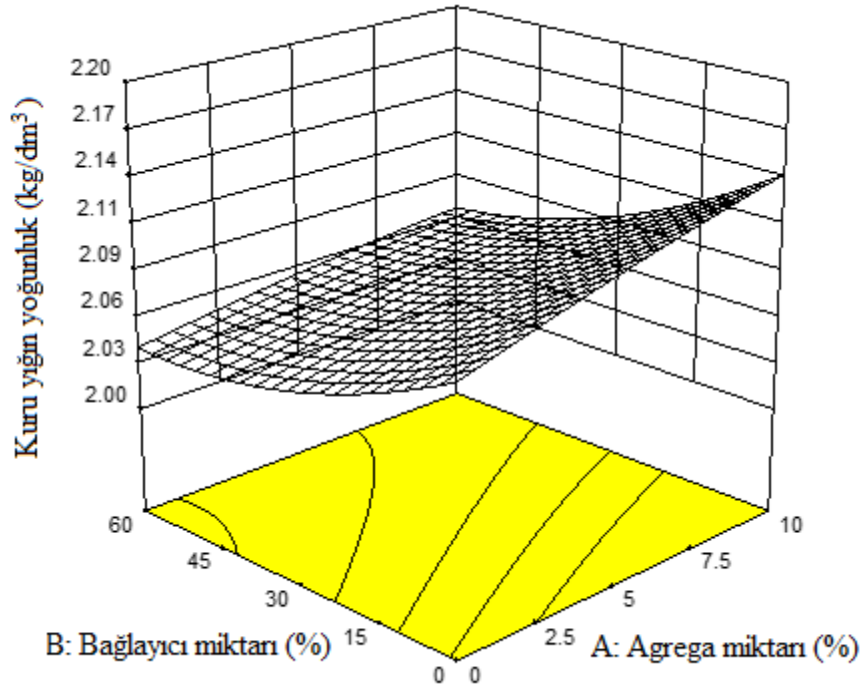
Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri	p-değeri Olasılık > F
Model	6234,62	24	259,78	34,22	< 0,0001
A-a	0,037	1	0,037	4,852E-003	0,9448
B-b	29,13	1	29,13	3,84	0,0561
C-at	0,093	1	0,093	0,012	0,9123
D-kk	120,46	1	120,46	15,87	0,0002
AB	70,77	1	70,77	9,32	0,0037
AC	0,17	1	0,17	0,022	0,8819
AD	7,14	1	7,14	0,94	0,3371
BC	29,75	1	29,75	3,92	0,0536
BD	20,61	1	20,61	2,72	0,1061
CD	3,44	1	3,44	0,45	0,5040
A ²	3,27	1	3,27	0,43	0,5146
B ²	0,32	1	0,32	0,042	0,8380
ABC	9,87	1	9,87	1,30	0,2598
ABD	0,10	1	0,10	0,014	0,9071
ACD	2,73	1	2,73	0,36	0,5516
BCD	1,15	1	1,15	0,15	0,6988
A ² B	1,32	1	1,32	0,17	0,6787
A ² C	6,39	1	6,39	0,84	0,3636
A ² D	8,37	1	8,37	1,10	0,2991
AB ²	120,05	1	120,05	15,82	0,0002
B ² C	138,19	1	138,19	18,21	< 0,0001
B ² D	2,17	1	2,17	0,29	0,5954
A ³	0,048	1	0,048	6,300E-003	0,9371
B ³	40,74	1	40,74	5,37	0,0249

Çizelge 4.7. Eğilmede çekme dayanımı tepki yüzey kübik model için ANOVA

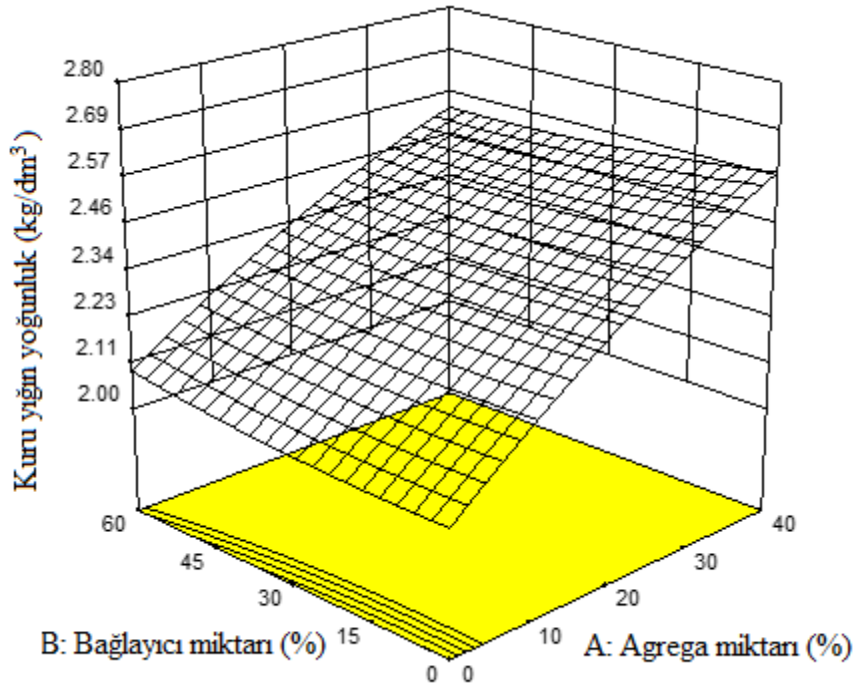
Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri	p-değeri Olasılık > F
Model	74,24	24	3,09	29,39	< 0,0001
A-a	0,57	1	0,57	5,39	0,0246
B-b	1,34	1	1,34	12,72	0,0008
C-at	0,055	1	0,055	0,52	0,4736
D-kk	0,44	1	0,44	4,21	0,0459
AB	0,76	1	0,76	7,18	0,0101
AC	0,83	1	0,83	7,92	0,0071
AD	0,92	1	0,92	8,69	0,0050
BC	0,31	1	0,31	2,97	0,0914
BD	0,24	1	0,24	2,24	0,1410
CD	0,97	1	0,97	9,23	0,0039
A ²	0,52	1	0,52	4,97	0,0306
B ²	0,15	1	0,15	1,44	0,2369
ABC	0,57	1	0,57	5,40	0,0245
ABD	0,39	1	0,39	3,68	0,0612
ACD	0,16	1	0,16	1,48	0,2296
BCD	0,34	1	0,34	3,19	0,0805
A ² B	0,39	1	0,39	3,66	0,0617
A ² C	1,44	1	1,44	13,69	0,0006
A ² D	0,30	1	0,30	2,90	0,0953
AB ²	3,15	1	3,15	29,98	< 0,0001
B ² C	1,23	1	1,23	11,69	0,0013
B ² D	0,26	1	0,26	2,43	0,1258
A ³	0,014	1	0,014	0,14	0,7128
B ³	0,13	1	0,13	1,23	0,2728

Uyarlanmış tepki yüzeyi çizimi, optimum tepki için gerekli parametrelerin etkileşimini anlamak amacıyla Design Expert programı tarafından istatistiksel açıdan önemli olan model üzerinde oluşturulmuştur. Denklemler daha sonra üç boyutlu yüzey alanlarının çizilmesini kolaylaştırmak için kullanılmıştır. Çizimler Şekil 4.106-113'te gösterilmektedir. Her bir modelin iki parametresi, X ve Y eksenlerinde, Z eksenindeki tepki ile çizilmiştir.

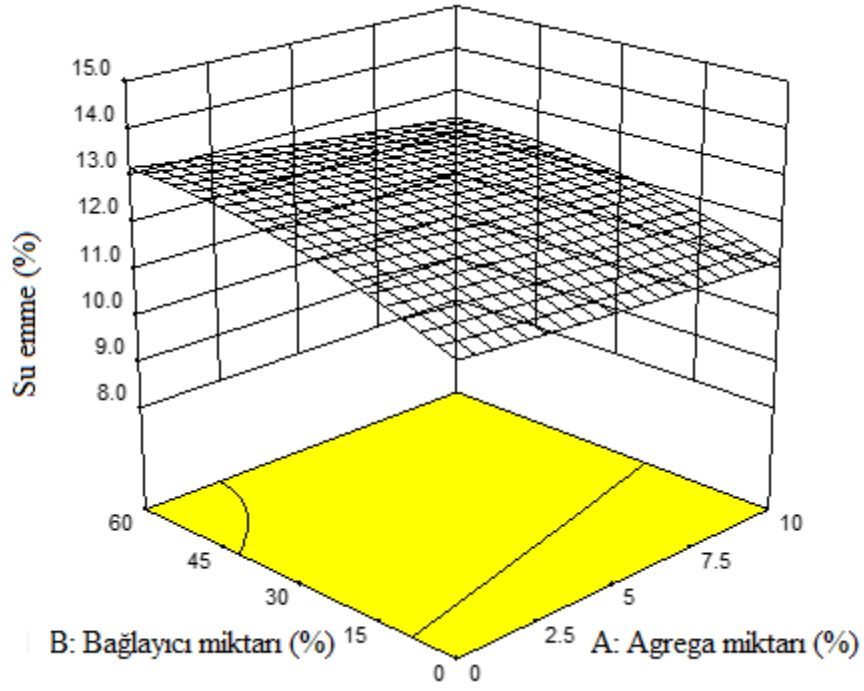
Değişkenler arasındaki ilişkiler, modeller tarafından üretilen kür koşulları ve agrega tipi arasındaki etkileşim etkileri olarak gösterilmiştir (Şekil 4.114-117).



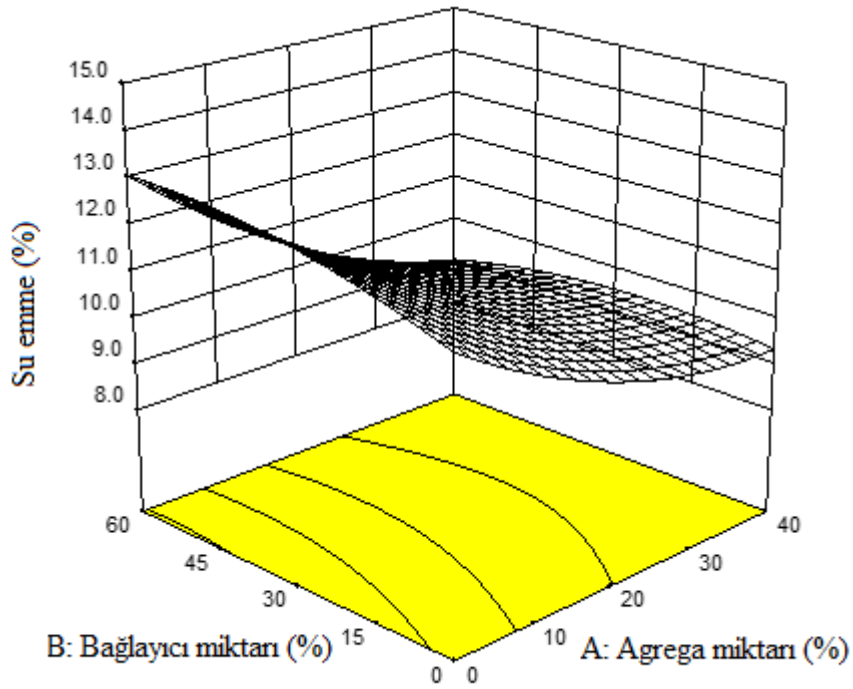
Şekil 4.106. Çelik agregasının, kuru yığın yoğunluğu üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram



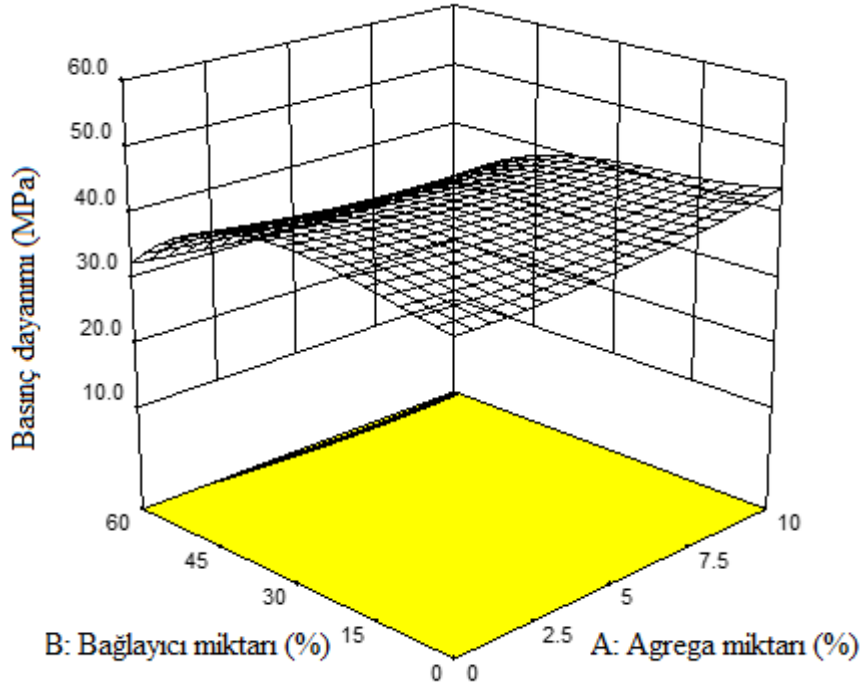
Şekil 4.107. Demir agregasının, kuru yığın yoğunluğu üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram



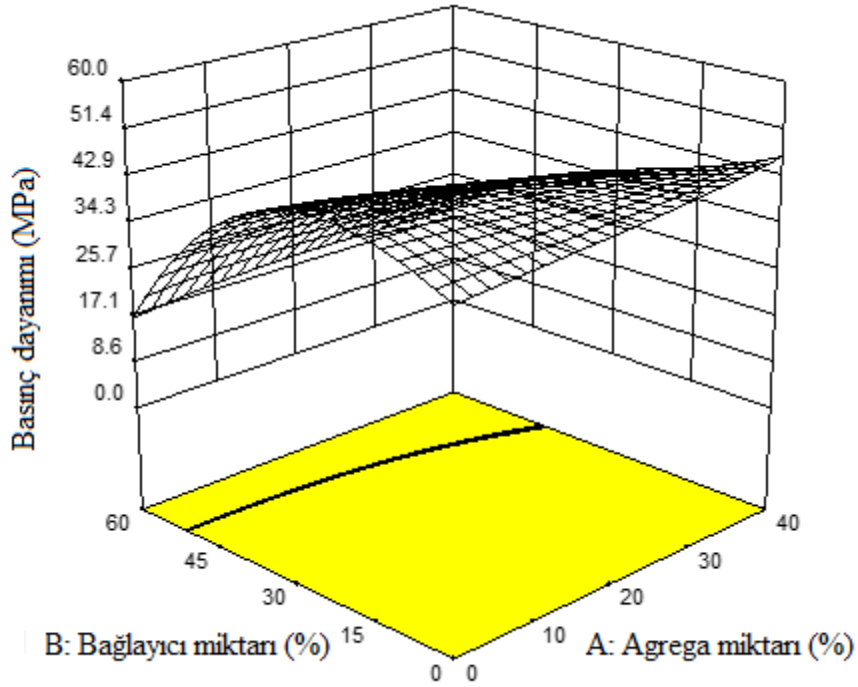
Şekil 4.108. Çelik agregasının, su emme yüzdesi üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram



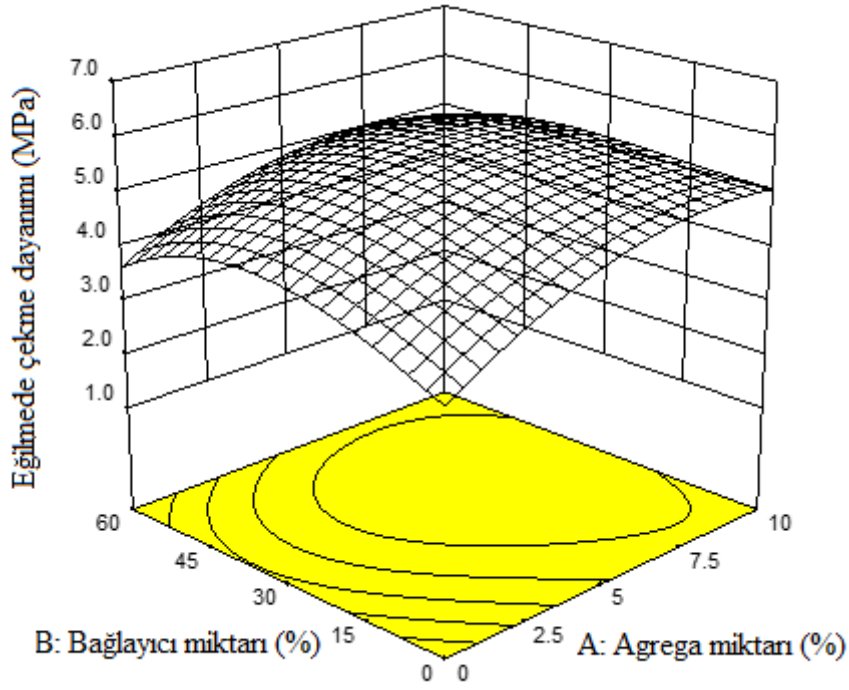
Şekil 4.109. Demir agregasının, su emme yüzdesi üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram



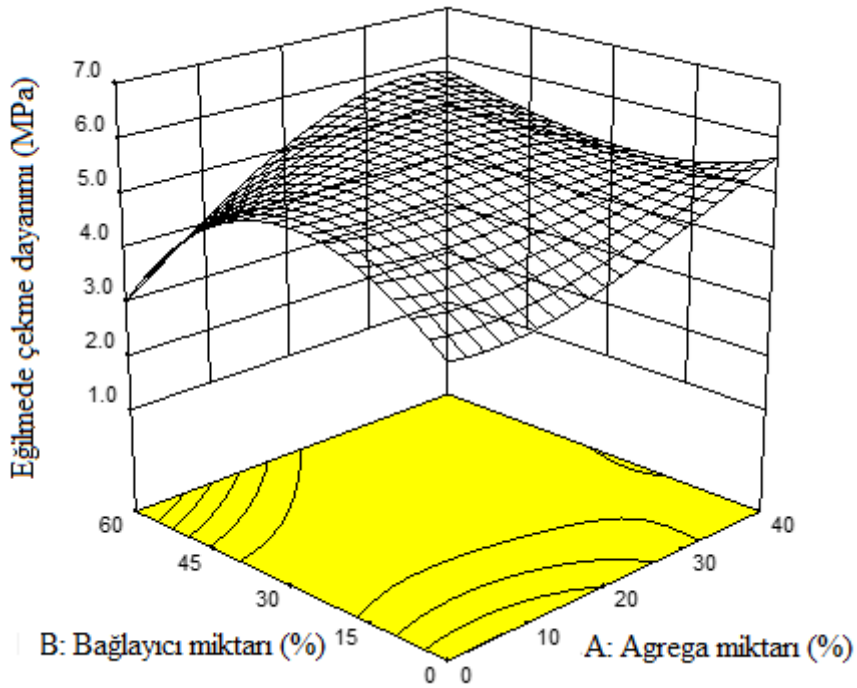
Şekil 4.110. Çelik agregasının, basınç dayanımı üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram



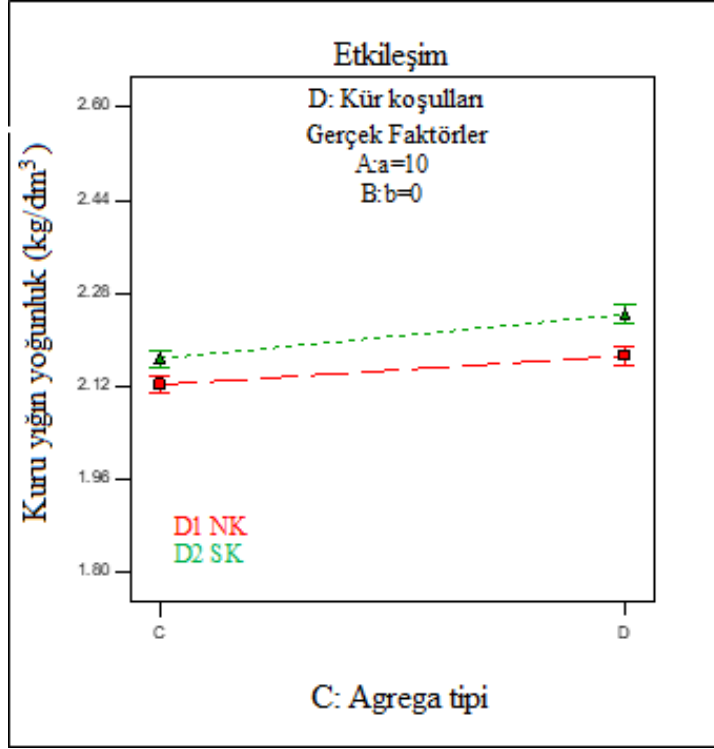
Şekil 4.111. Demir agregasının, basınç dayanımı üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram



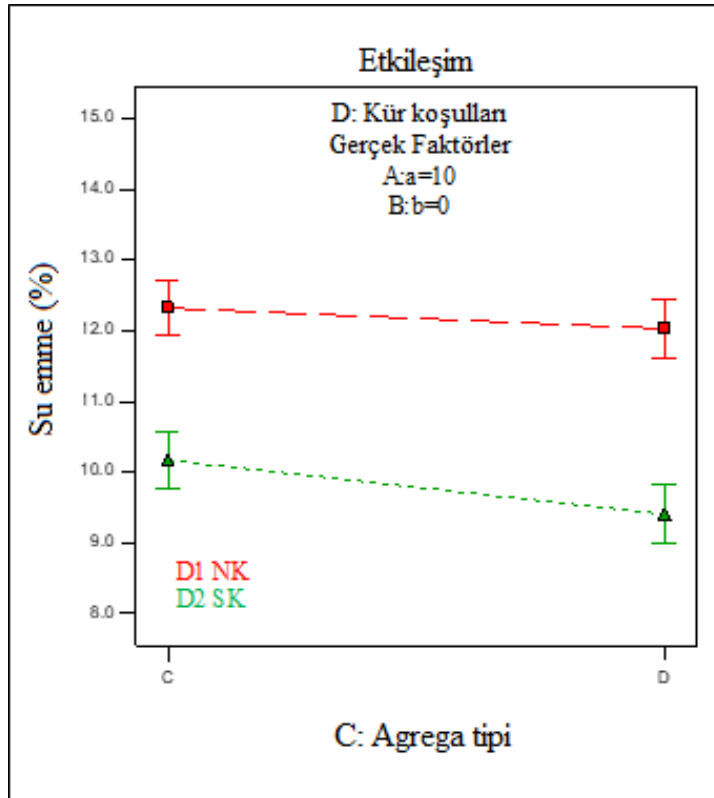
Şekil 4.112. Çelik agregasının, eğilmede çekme dayanımı üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram



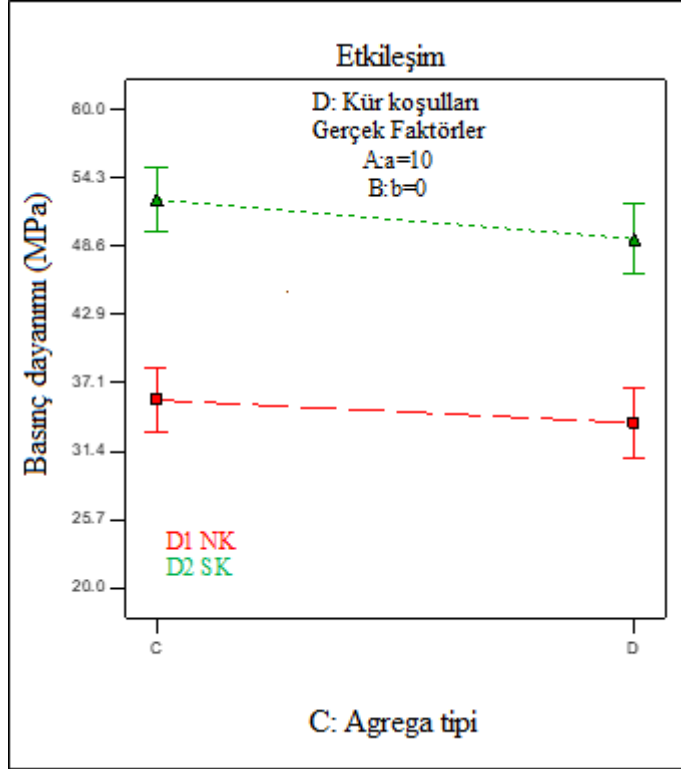
Şekil 4.113. Demir agregasının, eğilmede çekme dayanımı üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram



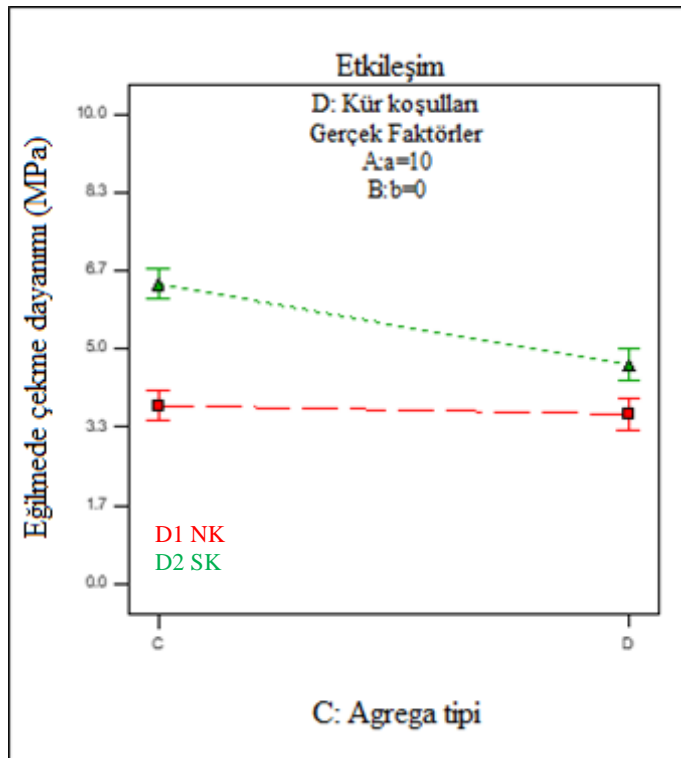
Şekil 4.114. Kuru yığın yoğunluğu üzerine C ve D arasındaki etkileşim etkisi



Şekil 4.115. Su emme yüzdesi üzerine C ve D arasındaki etkileşim etkisi



Şekil 4.116. Basınç dayanımı üzerine C ve D arasındaki etkileşim etkisi



Şekil 4.117. Eğilmede çekme dayanımı üzerine C ve D arasındaki etkileşim etkisi

Sayısal optimizasyonda iki amaç belirlenmiştir. İlk amaç, düşük kuru yığın yoğunluk, düşük su emme ve ayrıca yüksek basınç ve yüksek eğilmede çekme dayanımına sahip geopolimer harç türüne ulaşmak, ikinci amaç ise, birinci amaca ek olarak elektromanyetik kalkanlama özelliği yüksek harç türüne ulaşmaktır. Dolayısıyla EM kalkanlama verilerinin de programa dahil edilmesi ile elde edilen kodlanmış ve gerçek faktörler açısından nihai matematiksel modeller aşağıda listelenmiştir.

Kodlanmış faktörler açısından nihai denklem;

$$\text{Kuru yığın yoğunluk} = +2,05+9,376\text{E-}003 \times A+3,554\text{E-}004 \times B-6,296\text{E-}003 \times C-5,378\text{E-}005 \times AB+3,762\text{E-}003 \times AC+8,265\text{E-}004 \times BC$$

$$\text{Doygun yüzey kuru yığın yoğunluk} = +2,31+9,269\text{E-}003 \times A+6,096\text{E-}004 \times B-0,010 \times C-7,356\text{E-}005 \times AB+3,962\text{E-}003 \times AC+9,918\text{E-}004 \times BC$$

$$\text{Basınç dayanımı} = +34,60-0,10 \times A+0,32 \times B+3,01 \times C-3,936\text{E-}003 \times AB-0,11 \times AC-0,095 \times BC+5,499\text{E-}003 \times A^2-7,063\text{E-}003 \times B^2$$

$$\text{Eğilmede çekme dayanımı} = +3,29+0,080 \times A+0,062 \times B+0,65 \times C-2,409\text{E-}003 \times AB-0,14 \times AC+0,015 \times BC-3,041\text{E-}003 \times A^2-1,472\text{E-}004 \times B^2+7,855\text{E-}004 \times ABC-2,539\text{E-}005 \times A^2B+6,143\text{E-}003 \times A^2C+5,433\text{E-}005 \times AB^2-4,085\text{E-}004 \times B^2C-3,413\text{E-}005 \times A^3-1,491\text{E-}005 \times B^3$$

$$\text{Yarmada çekme dayanımı} = +15,61+0,73 \times A+0,028 \times B+1,59 \times C-0,021 \times AB-0,82 \times AC+0,028 \times BC+1,633\text{E-}003 \times A^2+8,505\text{E-}004 \times B^2+6,276\text{E-}003 \times ABC+2,013\text{E-}004 \times A^2B+0,023 \times A^2C+6,222\text{E-}005 \times AB^2-6,753\text{E-}005 \times B^2C-4,988\text{E-}004 \times A^3-5,324\text{E-}006 \times B^3$$

$$\text{Kılcal su emme} = +0,17-1,033\text{E-}003 \times A+5,222\text{E-}004 \times B+2,021\text{E-}003 \times C$$

$$\text{Su emme} = +13,04-0,075 \times A+1,778\text{E-}003 \times B-0,28 \times C$$

$$\text{Porozite} = +27,49-0,069 \times A-5,222\text{E-}003 \times B+0,15 \times C$$

$$\text{EM kalkanlama} = +4,92+0,95 \times A+0,026 \times B-2,01 \times C-2,306\text{E-}003 \times AB-0,52 \times AC+0,051 \times BC$$

Gerçek faktörler açısından nihai denklem;

Agrega tipi: C için,

$$\text{Kuru yığın yoğunluk} = +2,05713+5,61333\text{E-}003 \times a-4,71111\text{E-}004 \times b-5,37778\text{E-}005 \times a \times b$$

$$\text{Doygun yüzey kuru yığın yoğunluk} = +2,32247+5,30667\text{E-}003 \times a-3,82222\text{E-}004 \times b-7,35556\text{E-}005 \times a \times b$$

$$\text{Basınç dayanımı} = +31,58440+0,010076 \times a+0,42023 \times b-3,93556\text{E-}003 \times a \times b+5,49904\text{E-}003 \times a^2-7,06250\text{E-}003 \times b^2$$

$$\text{Eğilmede çekme Dayanımı} = +2,63946+0,22189 \times a+0,047152 \times b-3,19413E-003 \times a \times b-9,18363E-003 \times a^2+2,61250E-004 \times b^2-2,53873E-005 \times a^2 \times b+5,43333E-005 \times a \times b^2-3,41261E-005 \times a^3-1,49074E-005 \times b^3$$

$$\text{Yarmada çekme Dayanımı} = +14,02048+1,54464 \times a-6,26215E-004 \times b-0,027466 \times a \times b-0,021415 \times a^2+9,18056E-004 \times b^2+2,01310E-004 \times a^2 \times b+6,22222E-005 \times a \times b^2-4,98765E-004 \times a^3-5,32407E-006 \times b^3$$

$$\text{Kılcal su emme} = +0,16800-1,03333E-003 \times a+5,22222E-004 \times b$$

$$\text{Su emme} = +13,31611-0,074889 \times a+1,77778E-003 \times b$$

$$\text{Porozite} = +27,33333-0,069333 \times a-5,22222E-003 \times b$$

$$\text{EM kalkanlama} = +6,93123+1,46942 \times a-0,024126 \times b-2,30604E-003 \times a \times b$$

Agrega tipi: D için,

$$\text{Kuru yığın yoğunluk} = +2,04454+0,013138 \times a+1,18194E-003 \times b-5,37778E-005 \times a \times b$$

$$\text{Doygun yüzey kuru yığın yoğunluk} = +2,30196+0,013232 \times a+1,60139E-003 \times b-7,35556E-005 \times a \times b$$

$$\text{Basınç dayanımı} = +37,61410-0,21764 \times a+0,22951 \times b-3,93556E-003 \times a \times b+5,49904E-003 \times a^2-7,06250E-003 \times b^2$$

$$\text{Eğilmede çekme dayanımı} = +3,94158-0,062301 \times a+0,077374 \times b-1,62314E-003 \times a \times b+3,10232E-003 \times a^2-5,55729E-004 \times b^2-2,53873E-005 \times a^2 \times b+5,43333E-005 \times a \times b^2-3,41261E-005 \times a^3-1,49074E-005 \times b^3$$

$$\text{Yarmada çekme dayanımı} = +17,20294-0,086009 \times a+0,055917 \times b-0,014914 \times a \times b+0,024681 \times a^2+7,82986E-004 \times b^2+2,01310E-004 \times a^2 \times b+6,22222E-005 \times a \times b^2-4,98765E-004 \times a^3-5,32407E-006 \times b^3$$

$$\text{Kılcal su emme} = +0,17204-1,03333E-003 \times a+5,22222E-004 \times b$$

$$\text{Su emme} = +12,76264-0,074889 \times a+1,77778E-003 \times b$$

$$\text{Porozite} = +27,64000-0,069333 \times a-5,22222E-003 \times b$$

$$\text{EM kalkanlama} = +2,91069+0,43689 \times a+0,077076 \times b-2,30604E-003 \times a \times b$$

Aliased modeli yok sayarak, kuru ve doymuş yüzey kuru yığın yoğunluk ve elektromanyetik kalkanlama için 2FI, basınç için kuadratik, eğilmede ve yarmada çekme dayanımı, kılcal su emme katsayısı için kübik, su emme ve porozite yüzdesi için lineer model, düşük standart sapma ve yüksek R-karesi istatistikleriyle en iyi sonucu vermektedir. İncelenen farklı modeller arasında kuru yığın yoğunluk ve elektromanyetik kalkanlama için sırasıyla 0,021 ve 2,55 standart sapma ve sırasıyla 0,9881 ve 0,8087 korelasyon katsayılarıyla (R^2 değeri) 2FI modelin, basınç dayanımı için 3,23 standart

sapma ve 0,8002 korelasyon sayısı ile kuadratik modelin, eğilmede çekme dayanımı için 0,22 standart sapma ve 0,9263 korelasyon sayısı ile kübik modelin, su emme yüzdesi için ise 0,46 standart sapma ve 0,8793 korelasyon sayısı ile lineer modelin deneysel verilere en uygun oldukları bulunmuştur.

Tahmini tepki yüzey modellerinin regresyon parametrelerinin ANOVA değerleri Çizelge 4.8-12’de özetlenmiştir. Sonuçlar, agrega miktarının doğrusal etkisinin, agrega miktarı-bağlayıcı miktarı etkileşimi, agrega miktarı-agrega tipi etkileşimi, bağlayıcı miktarı-agrega tipi etkileşiminin kuru yığın yoğunlukları üzerinde anlamlı bir etki gösterdiğini ortaya koymuştur. Agrega miktarı ve agrega tipinin doğrusal etkilerinin su emme için son derece anlamlı olduğunu göstermiştir.

Bağlayıcı miktarının doğrusal etkisinin, bağlayıcı miktarı-agrega tipi etkileşimi ve ayrıca bağlayıcı miktarının kuadratik etkisinin basınç dayanımı için anlamlı bir etki oluşturduğunu ortaya koymuştur.

Bağlayıcı miktarının doğrusal etkisinin, agrega miktarı-bağlayıcı miktarı etkileşimi, bağlayıcı miktarı-agrega tipi etkileşimi ve ayrıca bağlayıcı miktarının kübik etkisinin eğilmede çekme dayanımı üzerinde anlamlı etkisi olduğunu göstermiştir.

Agrega miktarının doğrusal etkisi ve agrega miktarı-agrega tipi etkileşim etkisinin elektromanyetik kalkanlama üzerinde anlamlı etkisi olduğunu göstermiştir.

Çizelge 4.8. Kuru yığın yoğunluk tepki yüzey 2FI model için ANOVA

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri	p-değeri Olasılık > F
Model	1,11	6	0,18	402,84	< 0,0001
A-a	0,046	1	0,046	99,78	< 0,0001
B-b	4,930E-004	1	4,930E-004	1,08	0,3079
C-at	1,514E-004	1	1,514E-004	0,33	0,5697
AB	3,254E-003	1	3,254E-003	7,11	0,0124
AC	0,013	1	0,013	27,50	< 0,0001
BC	4,707E-003	1	4,707E-003	10,28	0,0033

Çizelge 4.9. Su emme tepki yüzey lineer model için ANOVA

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri	p-değeri Olasılık > F
Model	50,08	3	16,69	77,72	< 0,0001
A-a	12,62	1	12,62	58,75	< 0,0001
B-b	0,057	1	0,057	0,26	0,6103
C-at	1,06	1	1,06	4,91	0,0339

Çizelge 4.10. Basınç dayanımı tepki yüzey kuadratik model için ANOVA

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri	p-değeri Olasılık > F
Model	1125,02	8	140,63	13,52	< 0,0001
A-a	1,44	1	1,44	0,14	0,7127
B-b	119,76	1	119,76	11,51	0,0021
C-at	14,47	1	14,47	1,39	0,2485
AB	17,42	1	17,42	1,68	0,2065
AC	3,61	1	3,61	0,35	0,5607
BC	62,65	1	62,65	6,02	0,0209
A ²	4,90	1	4,90	0,47	0,4982
B ²	287,30	1	287,30	27,62	< 0,0001

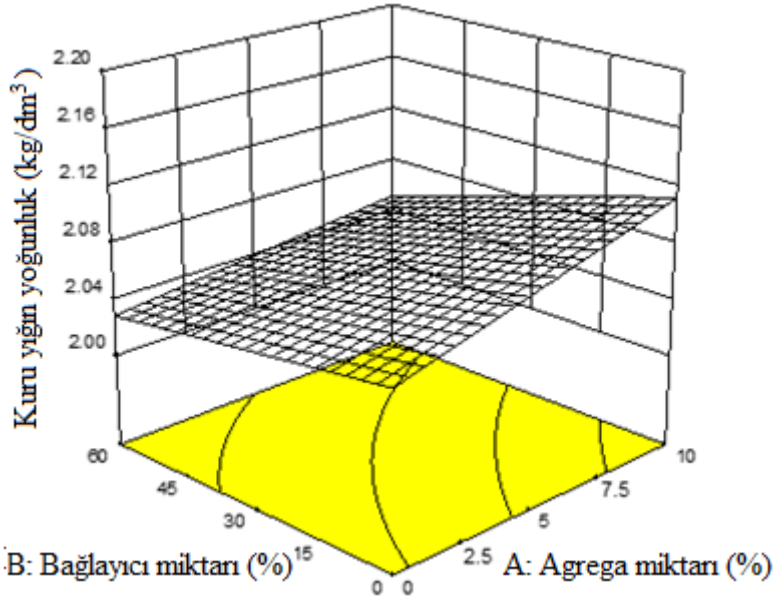
Çizelge 4.11. Eğilmede çekme dayanımı tepki yüzey kübik model için ANOVA

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri	p-değeri Olasılık > F
Model	11,63	15	0,78	16,76	< 0,0001
A-a	0,048	1	0,048	1,04	0,3191
B-b	0,53	1	0,53	11,38	0,0030
C-at	0,080	1	0,080	1,72	0,2040
AB	0,25	1	0,25	5,37	0,0312
AC	0,18	1	0,18	3,85	0,0639
BC	0,087	1	0,087	1,88	0,1857
A ²	0,023	1	0,023	0,49	0,4918
B ²	2,517E-003	1	2,517E-003	0,054	0,8179
ABC	0,086	1	0,086	1,86	0,1881
A ² B	0,052	1	0,052	1,13	0,3004
A ² C	0,16	1	0,16	3,39	0,0804
AB ²	1,06	1	1,06	22,98	0,0001
B ² C	0,37	1	0,37	7,96	0,0106
A ³	8,401E-003	1	8,401E-003	0,18	0,6745
B ³	0,23	1	0,23	4,98	0,0372

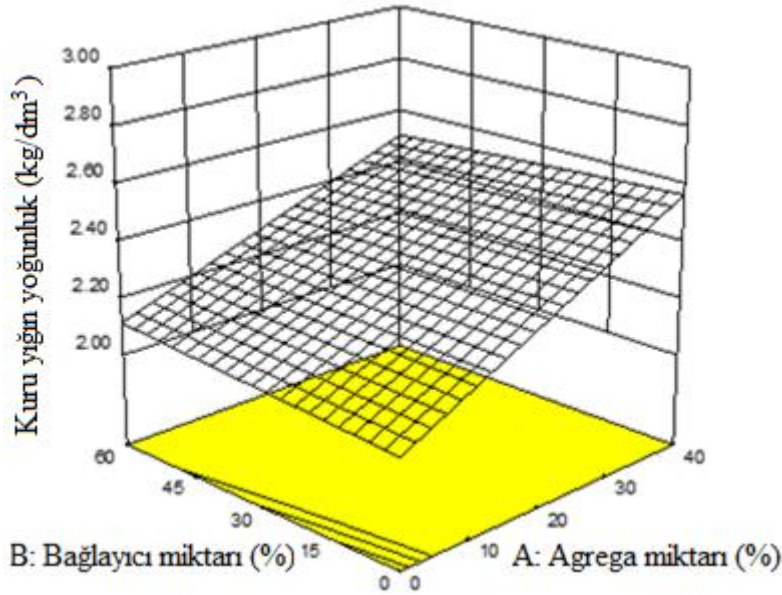
Çizelge 4.12. Elektromanyetik kalkanlama tepki yüzey 2FI model için ANOVA

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri	p-değeri Olasılık > F
Model	795,26	6	132,54	20,43	< 0,0001
A-a	471,95	1	471,95	72,76	< 0,0001
B-b	2,74	1	2,74	0,42	0,5212
C-at	15,43	1	15,43	2,38	0,1338
AB	5,98	1	5,98	0,92	0,3448
AC	236,91	1	236,91	36,52	< 0,0001
BC	17,64	1	17,64	2,72	0,1099

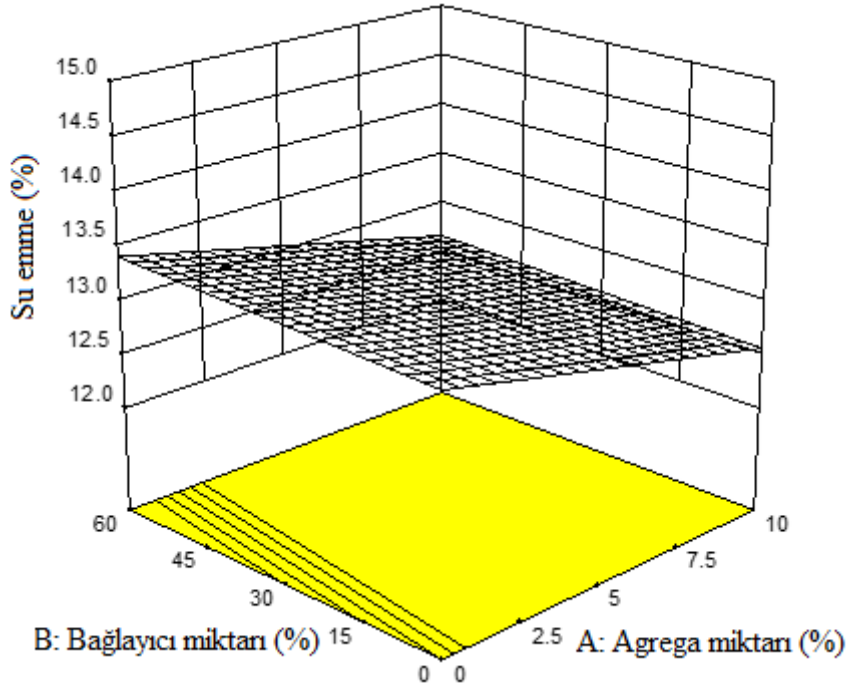
Design Expert programı tarafından model üzerinde oluşturulan üç boyutlu yüzey alanlarının çizimleri Şekil 4.118-127’de gösterilmektedir. Tepki yüzeyleri ve modeller tarafından üretilen agrega tipi arasındaki etkileşim etkileri Şekil 4.128-132’de gösterilmiştir.



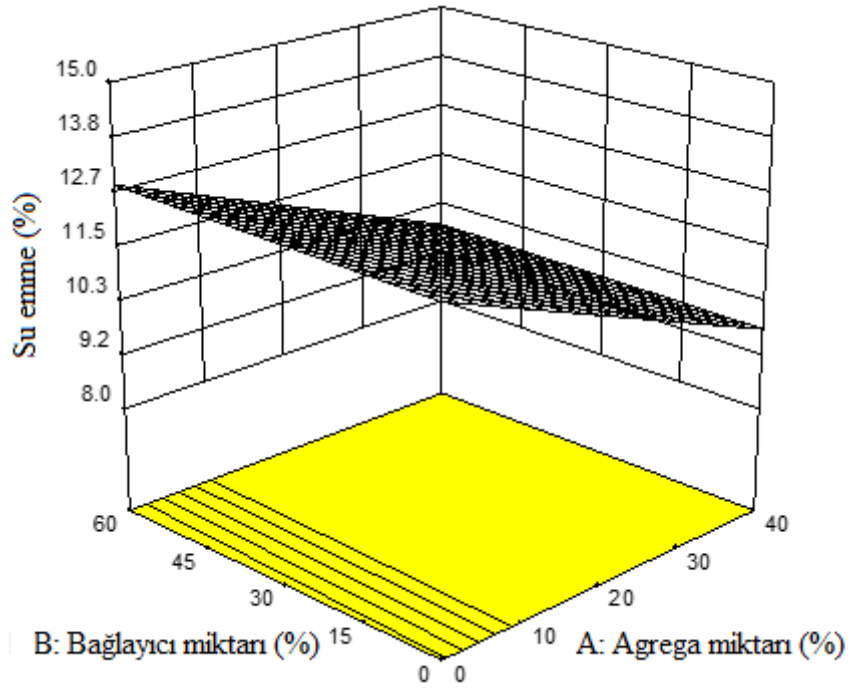
Şekil 4.118. Çelik agregasının kuru yığın yoğunluğu üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram



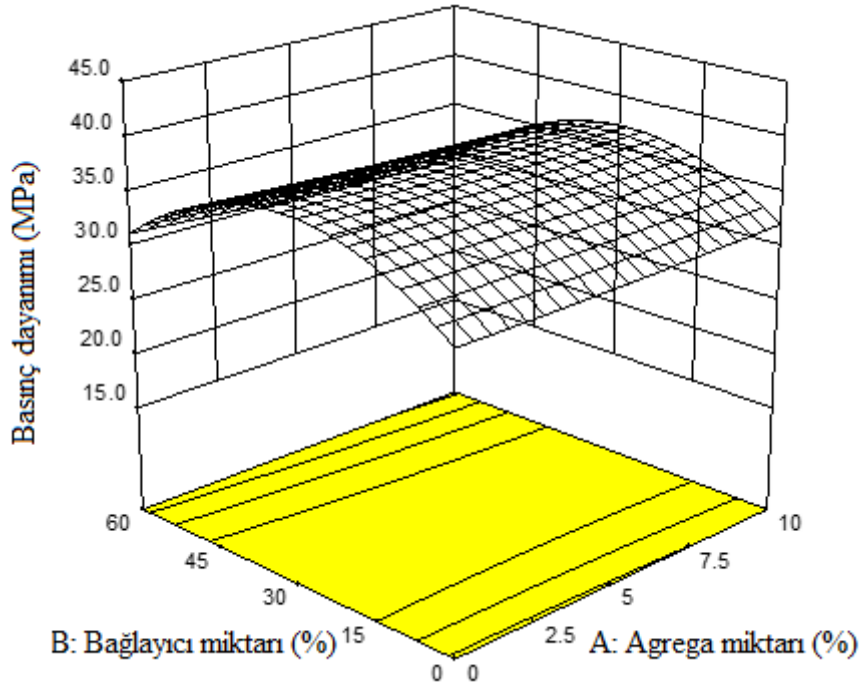
Şekil 4.119. Demir agregasının, kuru yığın yoğunluğu üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram



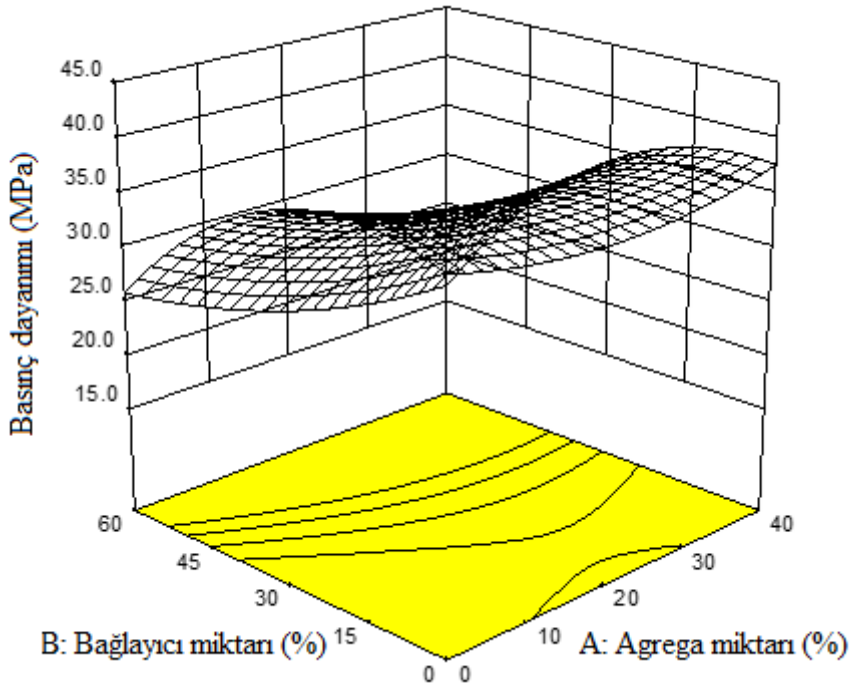
Şekil 4.120. Çelik agregasının, su emme yüzdesi üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram



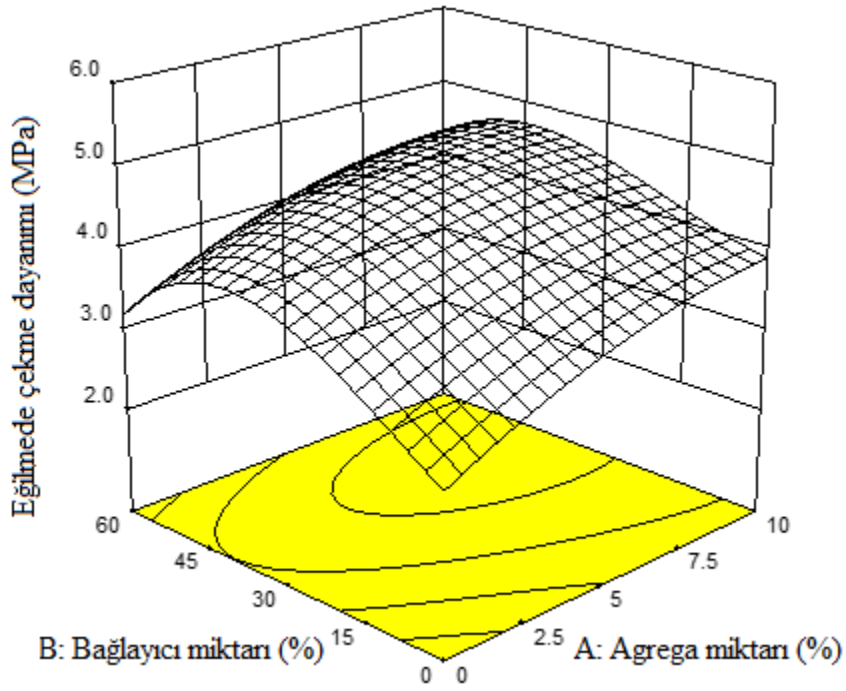
Şekil 4.121. Demir agregasının, su emme yüzdesi üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram



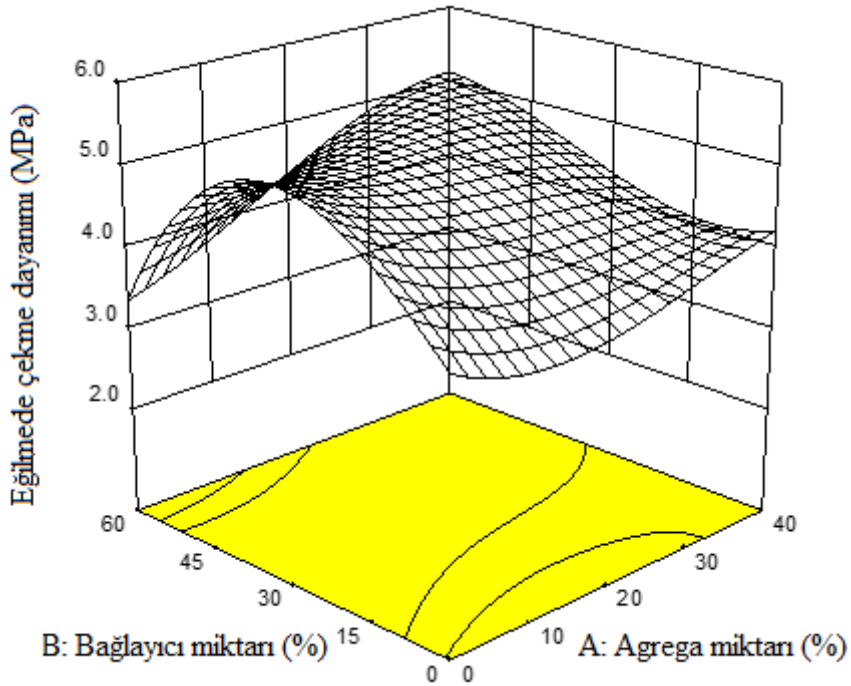
Şekil 4.122. Çelik agregasının, basınç dayanımı üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram



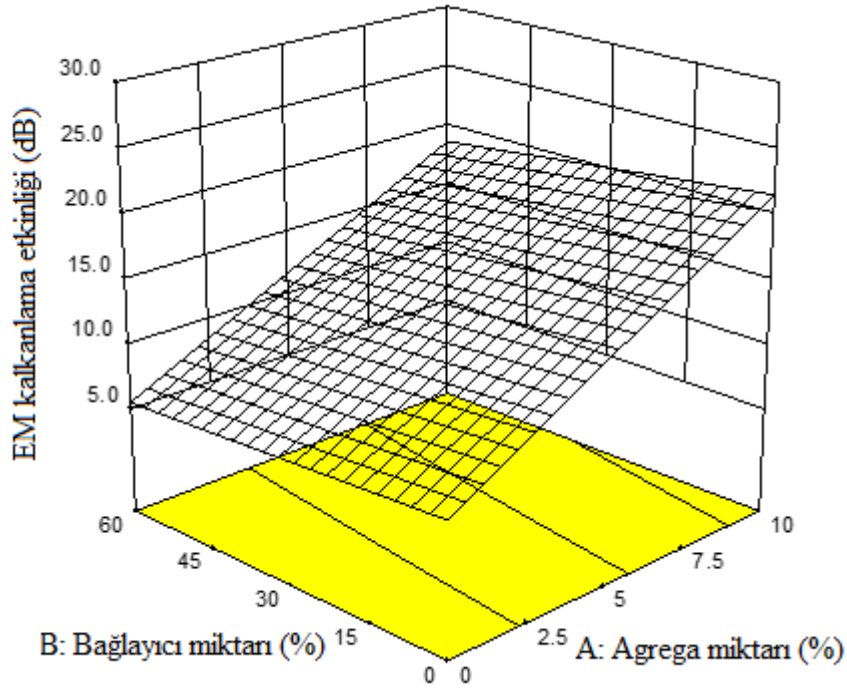
Şekil 4.123. Demir agregasının, basınç dayanımı üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram



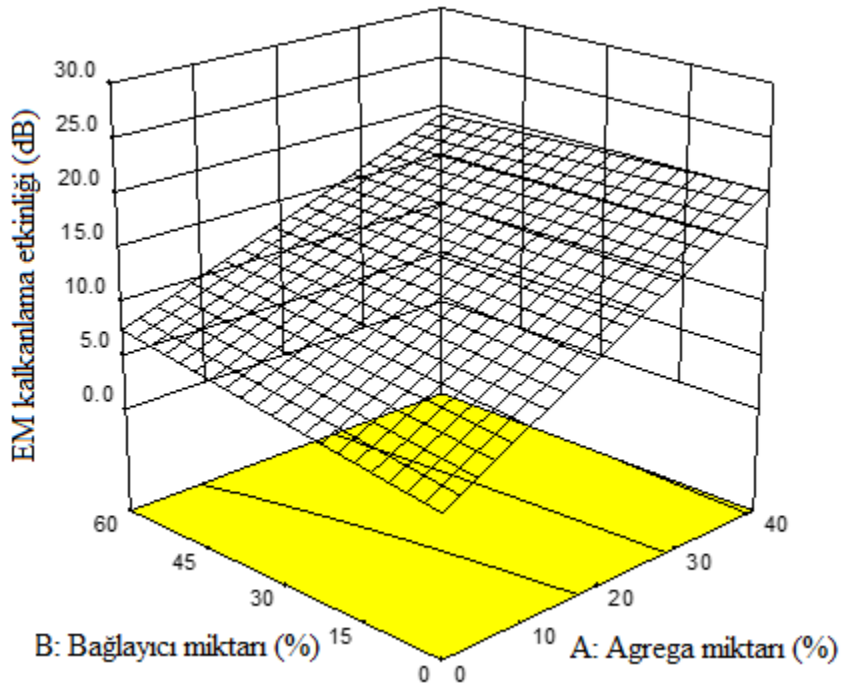
Şekil 4.124. Çelik agregasının, eğilmede çekme dayanımı üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram



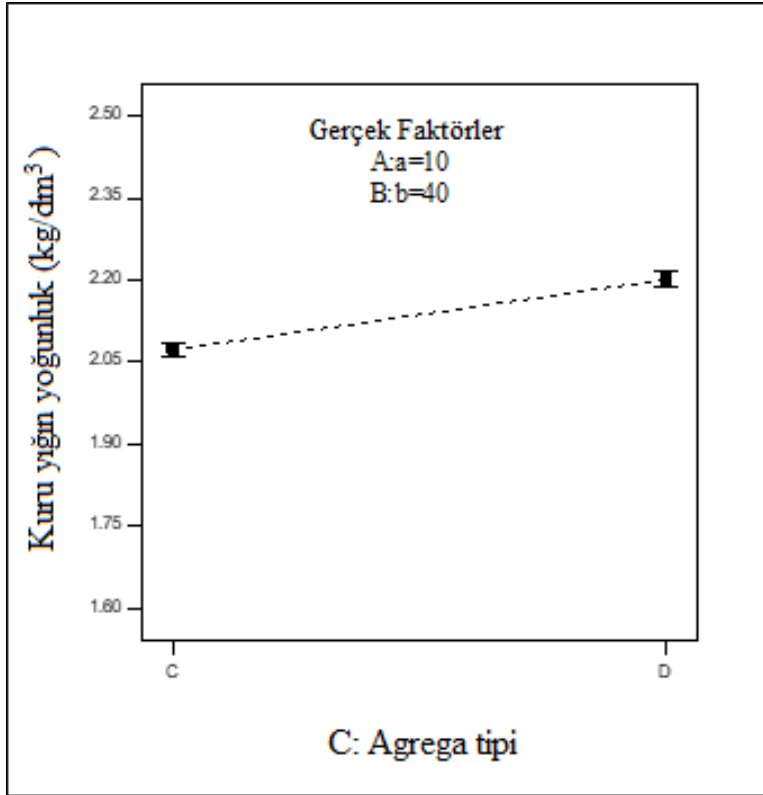
Şekil 4.125. Demir agregasının, eğilmede çekme dayanımı üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram



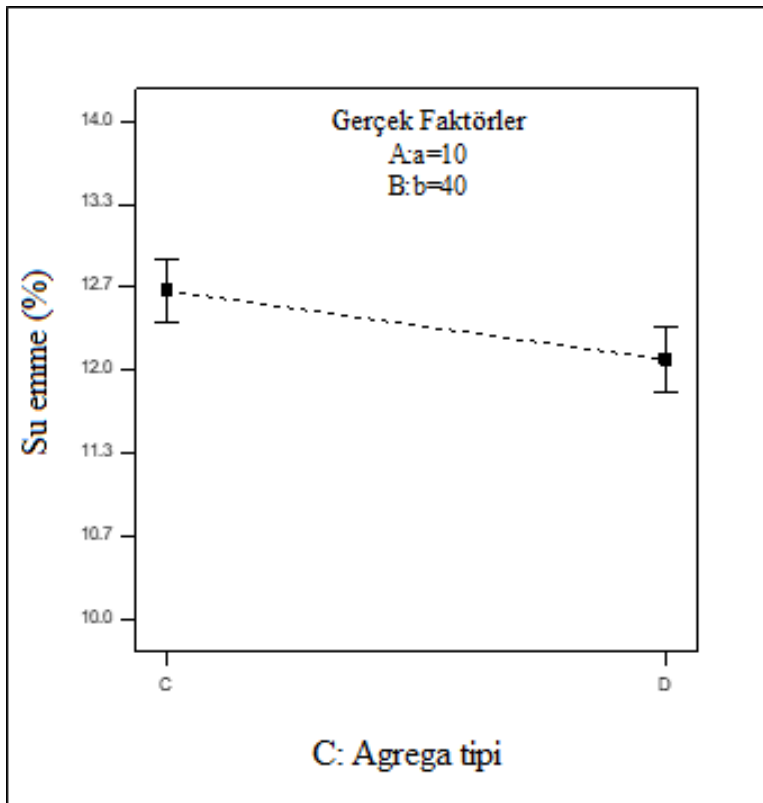
Şekil 4.126. Çelik agregasının, elektromanyetik kalkanlama etkinliği üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram



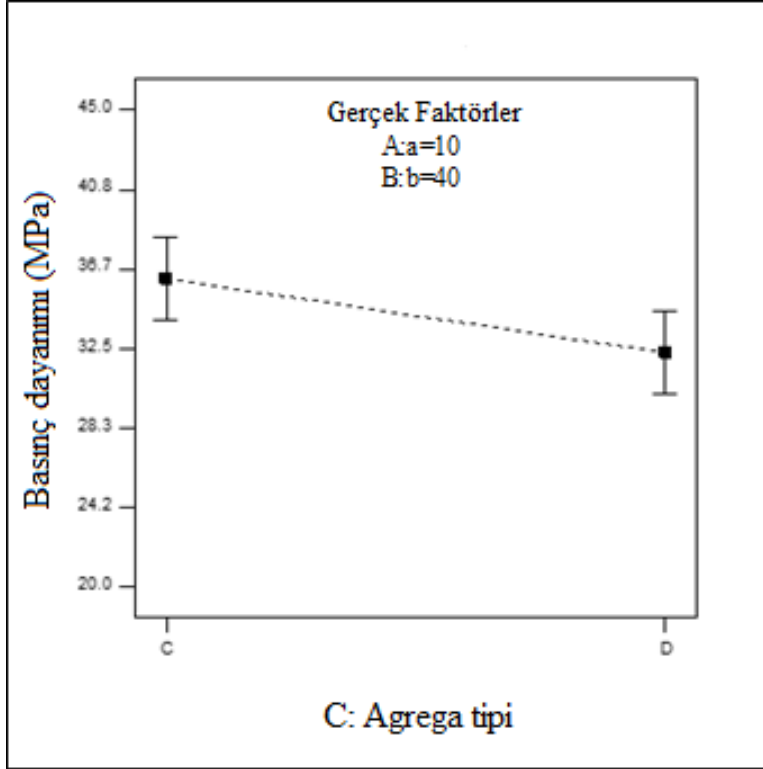
Şekil 4.127. Demir agregasının, elektromanyetik kalkanlama etkinliği üzerine A ve B faktörleri için kontur çizimlerini gösteren 3D diyagram



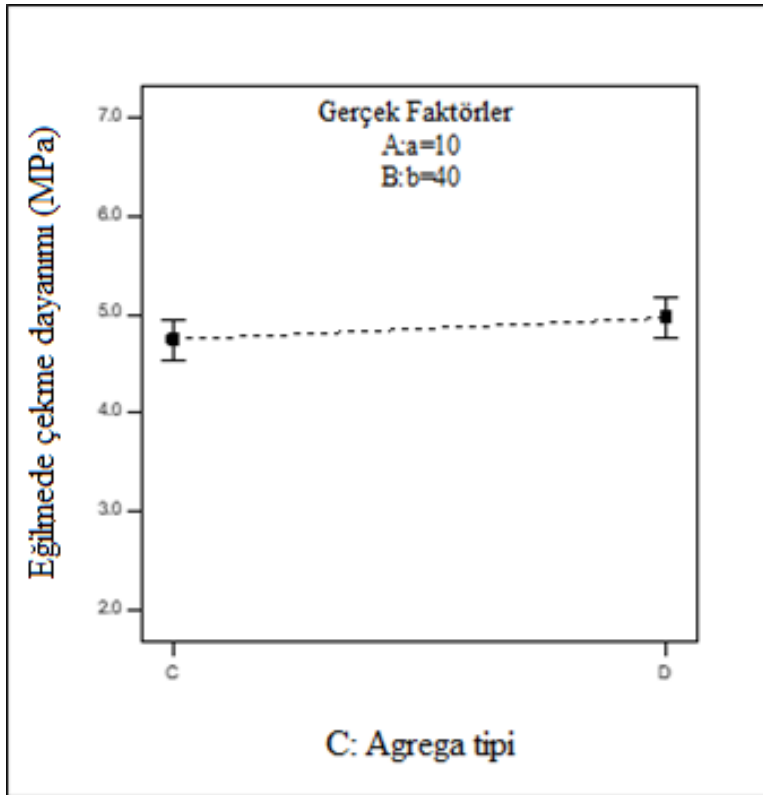
Şekil 4.128. Kuru yığın yoğunluğu üzerine C ve D arasındaki etkileşim etkisi



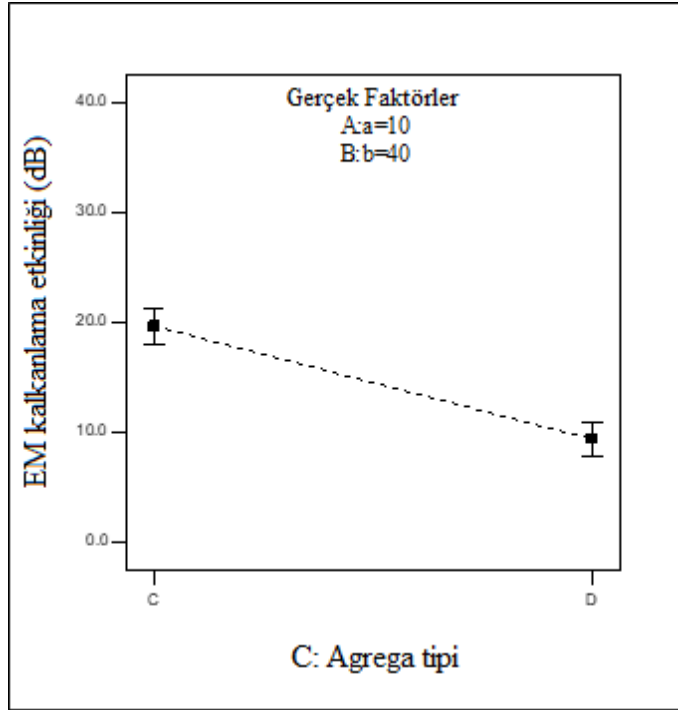
Şekil 4.129. Su emme yüzdesi üzerine C ve D arasındaki etkileşim etkisi



Şekil 4.130. Basınç dayanımı üzerine C ve D arasındaki etkileşim etkisi



Şekil 4.131. Eğilmede çekme dayanımı üzerine C ve D arasındaki etkileşim etkisi



Şekil 4.132. Elektromanyetik kalkanlama etkinliği üzerine C ve D arasındaki etkileşim etkisi

Optimizasyon modülü, her bir tepkide ve işlem faktöründe belirtilen gereksinimleri (optimizasyon amaçları), aynı anda karşılayan faktör düzeyleri kombinasyonunu arar (çoklu yanıt optimizasyonu). Sayısal ve grafiksel optimizasyon yöntemleri her faktör ve tepki için arzu edilen hedefleri seçerek, kullanılır. Optimizasyon süreci, hedefleri genel bir arzulanabilirlik işleviyle birleştirmeyi içermektedir. Sayısal optimizasyon, bu işlevi en üst düzeye çıkaran bir nokta veya daha fazlasını bulmaktadır. Çoklu tepki ile grafiksel optimizasyonda gereksinimlerin aynı anda, önerilen ölçütleri karşılayan bölgelerini tanımlamak gerekmektedir. Grafiksel optimizasyon sonuçları, optimum parametrelerini seçmek için görsel incelemeye olanak tanımaktadır.

Bu sayısal optimizasyonda iki amaç belirlenmiştir. Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14 sırasıyla birinci ve ikinci amaçlardaki her tepki ve faktör için, hedef, alt ve üst limitleri ve önemi göstermektedir. İlk amaç, düşük kuru yığın yoğunluk, düşük su emme ve yüksek basınç ve yüksek eğilmede çekme dayanımına sahip geopolimer harç türüne ulaşmak, ikinci amaç ise, birinci amaca ek olarak elektromanyetik kalkanlama özelliği yüksek harç türüne ulaşmaktır.

Optimizasyon sonuçları, birinci optimizasyon amaçlarına göre çelik agregası içeren harçlar içerisinde sıcak kür koşullarına tabii tutulan S0C10 harçlarının, demir agregası içeren harçlar içerisinde ise sıcak kür koşullarına tabii tutulan S20D10 harçlarının düşük kuru yığın yoğunluk, düşük su emme ve yüksek dayanıma sahip olacak tüm harçlar arasında en fazla arzulan özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. İlk amaca dayanarak, normal kür ve sıcak kür koşullarındaki çelik ve demir agregaları için arzulanabilirliğin 3D görünümü Şekil 4.133-136'da gösterilmiştir. Grafiksel

optimizasyonun, belirli amaca göre optimum harç özelliklerini görsel olarak seçmesine izin verdiği açıktır. İkinci optimizasyon amaçları değerlendirildiğinde, çelik agregası içeren harçlar içerisinde S40C10 harçlarının, demir agregası içeren harçlar içerisinde ise S20D30 harçlarının düşük kuru yığın yoğunluk, düşük su emme, yüksek dayanım ve yüksek elektromanyetik kalkanlama özelliklerine sahip olacak tüm harçlar içerisinde en fazla arzulan özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. İkinci amaca dayanarak, çelik ve demir agregaları için arzulanabilirliğin 3D görünümü Şekil 4.137 ve Şekil 4.138’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.13. Bu çalışmada kullanılan birinci optimizasyon amaçları

İsim	Limitler		Önem	Birinci Amaç
	Alt	Üst		
Agrega miktarı	0	40	3	aralıkta
Bağlayıcı miktarı	0	60	3	aralıkta
Agrega tipi	C	D	3	aralıkta
Kur koşulları	NK	SK	3	aralıkta
Kuru yığın yoğunluk	2,02	2,6	3	minimize
Basınc dayanımı	17,8	58,7	5	maksimize
Eğilme dayanımı	2,4	7	5	maksimize
Su emme	8,2	14,2	4	minimize

Çizelge 4.14. Bu çalışmada kullanılan ikinci optimizasyon amaçları

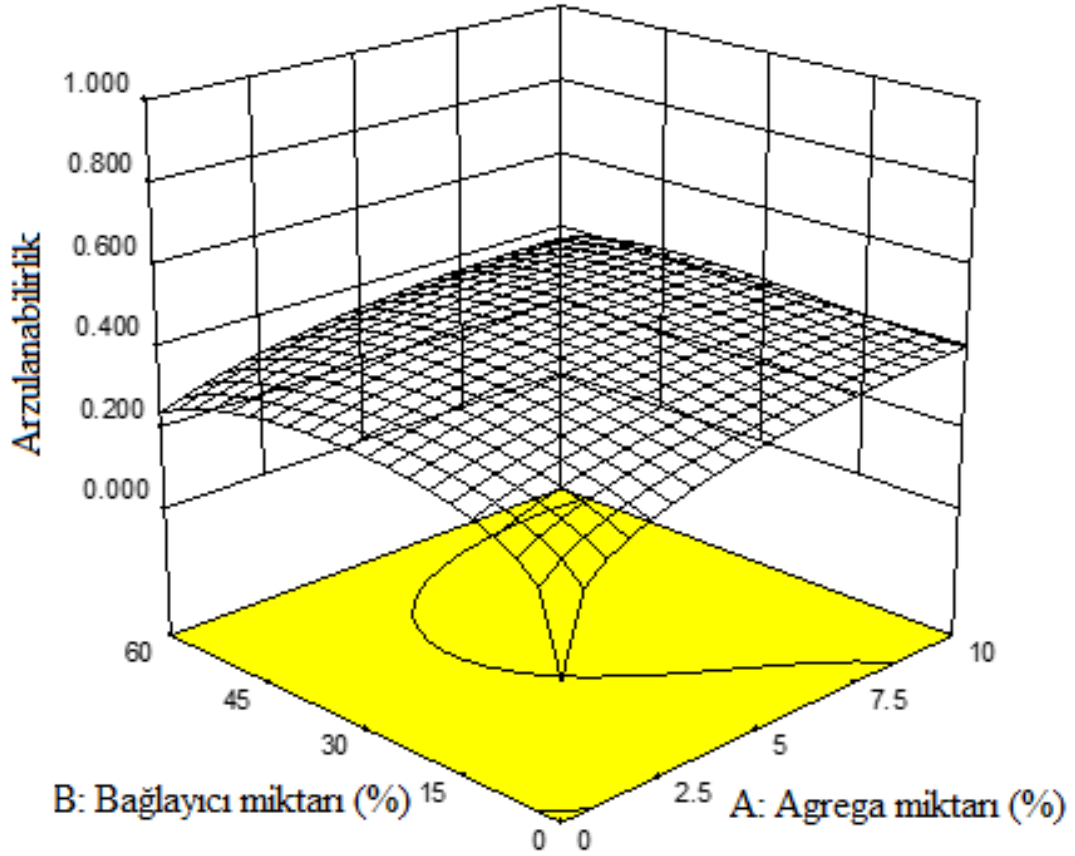
İsim	Limitler		Önem	İkinci Amaç
	Alt	Alt		
Agrega miktarı	0	40	3	aralıkta
Bağlayıcı miktarı	0	60	3	aralıkta
Agrega tipi	C	D	3	aralıkta
Kuru yığın yoğunluk	2,02	2,57	3	minimize
Basınc dayanımı	17,8	41,9	5	maksimize
Eğilme dayanımı	2,4	5,2	5	maksimize
Su emme	9,5	14,2	4	minimize
EM kalkanlama	5,14	26,06	5	maksimize

Çizelge 4.15. Birinci amaca dayanan Design-Expert tarafından elde edilen en uygun çözüm

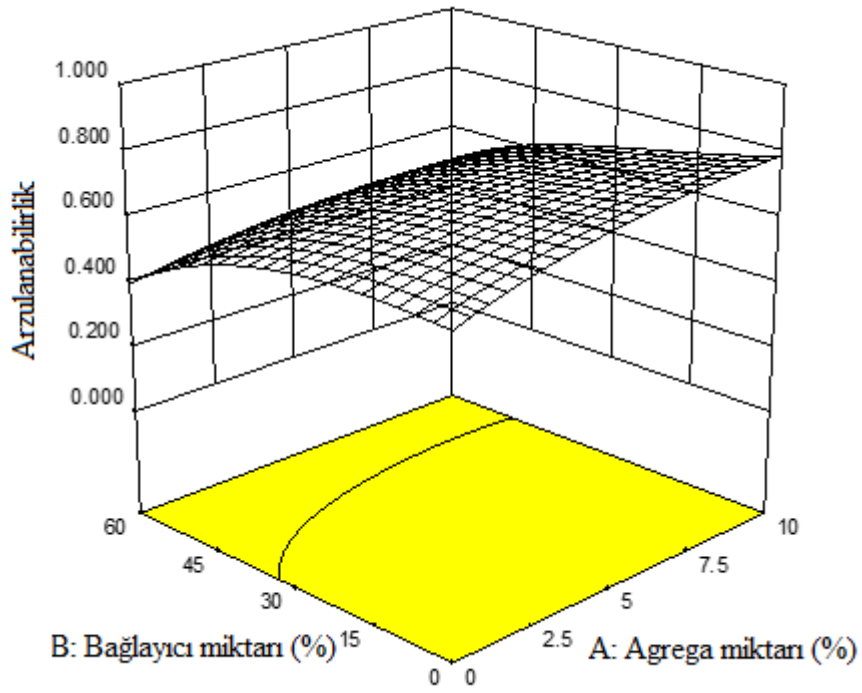
Numara	Agrega Miktarı	Bağlayıcı Miktarı	Agrega Tipi	Kür Koşulu	Kuru y. yoğunluk	Basınc Dayanımı	Eğilme Dayanımı	Su Emme	Arzulanabilirlik
1	10,000	0,000	C	SK	2,168	52,475	6,379	10,170	0,789
2	10,000	20,000	C	SK	2,122	48,012	6,164	11,131	0,712
2	10,000	20,000	D	SK	2,234	50,921	5,599	10,276	0,705
2	10,000	0,000	D	SK	2,244	49,206	4,657	9,407	0,653
6	10,000	40,000	C	SK	2,091	43,280	5,997	11,778	0,639
7	10,000	40,000	D	SK	2,238	43,408	5,744	10,830	0,637
9	10,000	60,000	C	SK	2,073	31,549	5,496	12,111	0,495
10	20,000	40,000	D	NK	2,316	32,858	4,928	11,269	0,466
12	10,000	0,000	C	NK	2,123	35,710	3,794	12,319	0,406
13	40,000	0,000	D	NK	2,557	39,623	4,355	10,357	0,367

Çizelge 4.16. İkinci amaca dayanan Design-Expert tarafından elde edilen en uygun çözüm

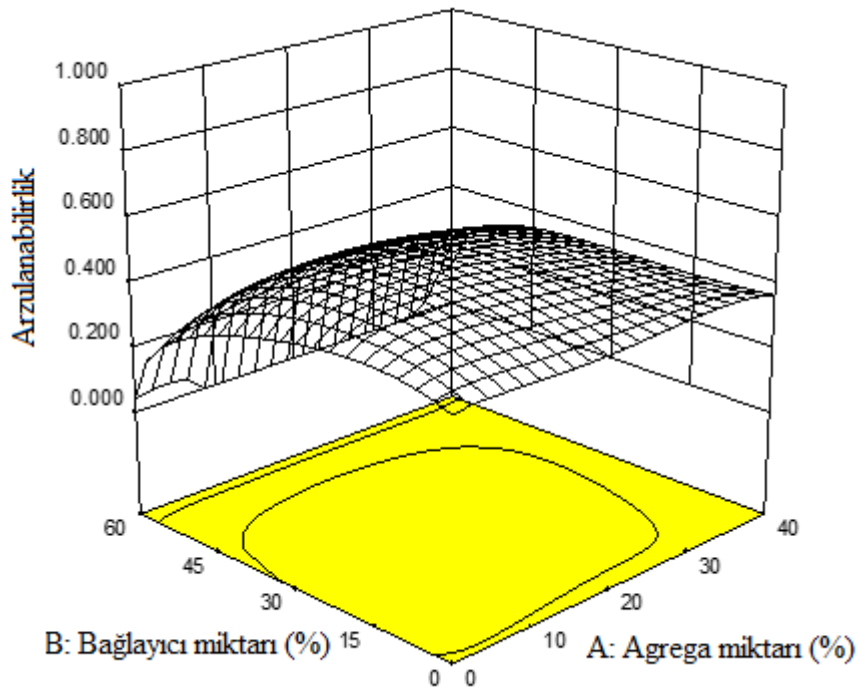
Numara	Agrega Miktarı	Bağlayıcı Miktarı	Agrega Tipi	Kuru y. yoğunluk	Basınç Dayanımı	Eğilme Dayanımı	Su Emme	EM	Arzulanabilirlik
1	10,000	40,000	C	2,073	36,170	4,746	12,638	19,738	0,672
2	10,000	20,000	C	2,093	37,028	4,362	12,603	20,682	0,660
3	10,000	0,000	C	2,113	32,235	3,906	12,567	21,625	0,589
4	30,000	20,000	D	2,430	35,438	4,370	10,552	16,175	0,589
5	10,000	60,000	C	2,053	29,662	4,343	12,674	18,794	0,575
6	20,000	20,000	D	2,309	35,652	4,452	11,300	12,268	0,564
7	7,500	0,000	C	2,099	31,969	3,773	12,754	17,952	0,533
8	40,000	40,000	D	2,531	29,291	4,736	9,838	19,780	0,514
2	10,000	40,000	D	2,202	32,294	4,965	12,085	9,440	0,499
9	40,000	20,000	D	2,551	36,324	4,194	9,803	20,083	0,493
2	10,000	20,000	D	2,189	36,966	4,643	12,049	8,360	0,487
10	5,000	0,000	C	2,085	31,772	3,515	12,942	14,278	0,459
11	20,000	60,000	D	2,314	19,084	4,440	11,372	13,506	0,319



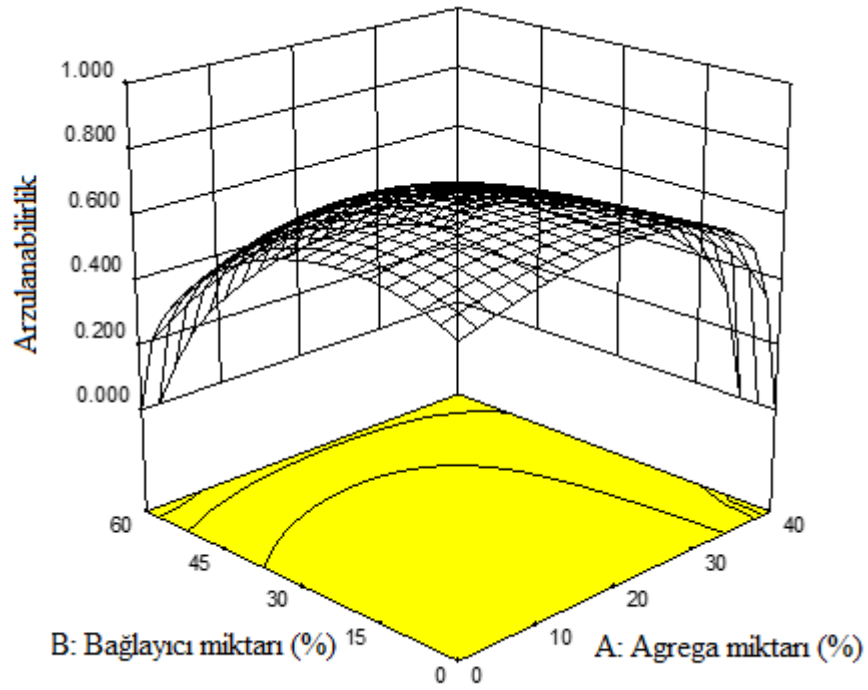
Şekil 4.133. Birinci amaca dayanan normal kür koşullarındaki çelik agregasının arzulanabilirliği



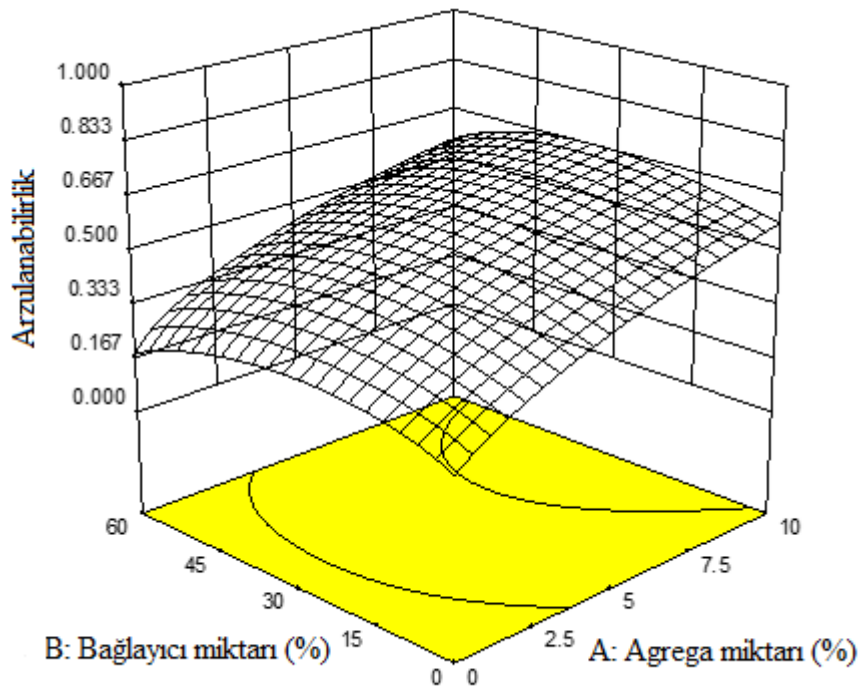
Şekil 4.134. Birinci amaca dayanan sıcak kür koşullarındaki çelik agregasının arzulanabilirliği



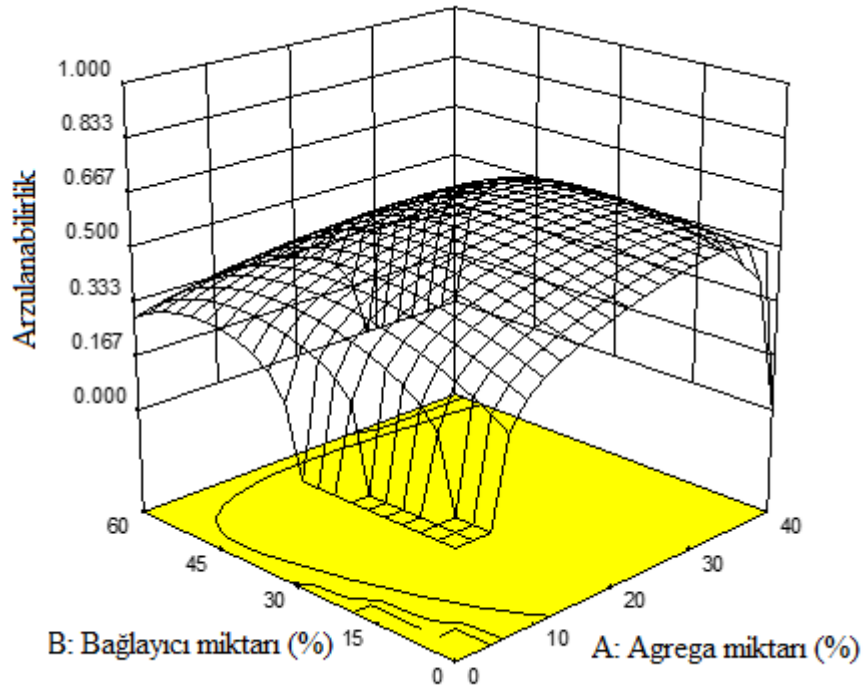
Şekil 4.135. Birinci amaca dayanan normal kür koşullarındaki demir agregasının arzulanabilirliği



Şekil 4.136. Birinci amaca dayanan sıcak kür koşullarındaki demir agregasının arzulanabilirliği



Şekil 4.137. İkinci amaca dayanan çelik agregasının arzulanabilirliği



Şekil 4.138. İkinci amaca dayanan demir agregasının arzulanabilirliği

5. TARTIŞMA

Atık halde kullanılan düzensiz şekillere sahip çelik malzemenin matris içerisinde, bağlayıcı tipine de bağlı olarak farklı oranlarda boşluklar oluşturarak kuru ve doygun yüzey kuru yığın yoğunluk değerlerinde değişimlere yol açmıştır. Böylece yığın yoğunlukların agrega ve bağlayıcı tipi kombinasyonundan önemli derecede etkilendiği söylenebilir. Ayrıca bu artış ve azalışların hem normal kür hem de sıcak küre tabii tutulan bütün numunelerde geçerli olmak üzere birbirine paralel giden bir eğilim gösterdiği görülmüştür. Karışımlardaki demir tozu yüzdelerinin artışı ise, bütün curuf/silis dumanı oranlarında, kuru ve doygun yüzey kuru yığın yoğunluklarını neredeyse doğrusal olarak kademeli şekilde arttırmıştır. Bu durum demir tozunun, çelik parçacıklarından daha küçük boyutları ve nispeten daha düzenli şekillerine atfedilmiştir.

Bağlayıcı olarak %100 curufun kullanıldığı karışımların su emme yüzdesi, genel olarak çelik içermeyen numunelere kıyasla çelik ilavesiyle birlikte bir artış eğilimi göstermiştir. Ancak karışımdaki curuf yerine belirli oranlardaki silis dumanı ikamesiyle, tam tersi bir durum olarak çelik hacminin artışı ile birlikte su emme yüzdesinde bir azalış eğilimi gözlenmeye başlanmıştır. Bernal vd. (2010) su emme yüzdesi sonuçlarına dayanarak curuf esaslı geopolimer betonun, bütün kütleme yaşlarında ve çalışılan bütün lif miktarlarında standart portland çimentosu betonundan daha geçirgen olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca, su emme ve geçirgen gözenek miktarı gibi durabilite performansı ile ilgili özelliklerin, çelik liflerin ilavesi ile belirgin şekilde arttığını gözlemlemişlerdir.

Curuf bağlayıcısı ile üretilen çelik lif içermeyen numunelere kıyasla çelik ilavesinin numunelerin porozitesini arttırdığı gözlenmiştir. Fakat curuf yerine silis dumanının ikamesiyle, porozite azalma eğilimi göstermeye başlamıştır. Gao vd. (2017) tarafından curuf ve uçucu kül esaslı geopolimer harca hacimsel olarak %1'e kadar %0,25 aralığı ile çelik lifler ilave edildiği çalışmada geopolimer karışımların tamamı, genel olarak benzer seviyelerde porozite göstermiştir ve lif ilavesinin porozite üzerinde sınırlı ancak saptanabilir bir etki gösterdiği belirtilmiştir. Lif ilave edilmemiş numuneler için 28 günde porozite %17,2 iken, %1 kısa lif eklenmesi durumunda porozite neredeyse doğrusal olarak %17,8'e çıkmıştır. Benzer şekilde, uzun liflerin dahil edilmesi de poroziteyi %18,1'e kadar arttırmıştır. Lif eklenmesinden dolayı porozitenin artmasının, granüler iskelet yapısını değiştiren ve paketleme yoğunluğunu düşüren lifler ve agregalar arasındaki iç kuvvetlere atfedildiği ileri sürülmüştür. Basınç ve eğilme dayanımı genel olarak artan lif içeriği artar ancak porozite de aynı anda artmaktadır. Nihai mekanik özellik, çelik lif ve porozitenin kombine etkisinin belirgin bir sonucu olduğu düşünülmüştür. Bir yandan, çelik lif ilavesi çatlakların oluşmasını ve büyümesini etkin bir şekilde önleyebilir, bu nedenle mekanik özellikler genel olarak iyileştirilir, öte yandan lif ilavesi nedeniyle porozitenin artması dayanım azalmasına neden olabilir. Araştırmacılar çalışmalarında lif eklenmesine bağlı olarak çatlak köprüleme davranışının gözeneklilik artışından daha güçlü bir etki ortaya koyduğunu ve sonrasında mekanik özelliklerin genel bir artış sergilediğini belirtmişlerdir. Ayrıca %1'lik lif dozajının ötesinde basınç dayanımı artışının artık önemsiz olduğunu gözlemlemişlerdir. Ek olarak uzun lif karışımlarının nispeten daha zayıf akıcılık göstermesinin de gözenekliliğin daha yüksek olmasının bir nedeni olduğu düşünülmüştür.

Daha düşük curuf içeriğine sahip karışımların daha yüksek porozite sergilediği ve porozitenin, aktivatör modülünün artması ile birlikte hafifçe azaldığı açıktır (Gao vd. 2016). Aktivatör modülü 1,0 olan karışımlar için porozite, curuf/uçucu kül oranı 80/20 olan numuneler için 7 günde %21,4 iken, curuf/uçucu kül oranını 40/60'a kaydırırken %23,6'ya yükselmektedir. Porozite sonuçlarının, optimum aktivatör modülü gösterildiğinde, basınç dayanımı ile yeterince ilişkili olmadığı görülmüştür. Bu durumda porozitenin basınç dayanımının tek göstergesi olmadığını ortaya koyduğu belirtilmiştir. Aktivatör tarafından sağlanan ilave silikatların reaksiyon sürecine katılması ve nihayetinde reaksiyon ürünlerinin bir parçası haline getirildiği iyi bilindiği için, aktivatörün neden olduğu tepkimeye giren jellerin bileşimsel farkının, dayanımın belirlenmesinde rol oynadığı çok muhtemel ve mekanik özelliklerle ilgili optimum bir jel kompozisyonu mevcut olabileceği açıklanmıştır.

Yarmada çekme dayanımları kompozisyonda kullanılan bütün curuf/silis dumanı oranlarında benzer davranış sergileyerek, artan lif hacmi ile birlikte, lif takviyesi olmayan kontrol numunesine kıyasla bir artış göstermiştir. Çelik liflerin yarmada veya eğilmede çekme dayanımını arttırdığı iyi bilinmektedir, ayrıca çatlakları köprüleyebilmekte ve basınç yükleri esnasında bir miktar yayılmalarını da geciktirebilmektedir. Mo vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada hacimce %0,5 çelik liflerin eklenmesiyle yarmada çekme dayanımında %57 artış görülmüştür. Yarmada çekme dayanımındaki artış, liflerin çatlak köprüleme kabiliyetine atfedilerek, çekme gerilmesinin lifler arasında aktarıldığı ve çatlakların gecikmeli olarak yayılması betonun çekme dayanımının artışına sebep olmuştur. Bernal vd. (2010), çelik lif takviye edilmiş curuf esaslı geopolimer betonların 28 gün kürelemede, artan lif hacmiyle birlikte yarmada çekme dayanımlarının 3,75 ve 4,64 MPa arasında büyük ölçüde iyileştiğini gözlemlemiştir.

Curuf esaslı geopolimer beton içerisine hacimsel olarak %0,5, %1 ve %1,5 farklı dozajlarda çelik lifler eklenerek, yarmada çekme dayanımları araştırılmıştır (Karunanithi ve Anandan 2014). En yüksek yarmada çekme dayanımı, %1,5 maksimum çelik lif eklenmesiyle 6,51 MPa olarak kaydedilmiştir. Bununla birlikte, tüm geopolimer karışımları için 3 gün içerisinde, 28 günlük nihai dayanımın %85'ine kadar maksimum bir dayanım artışı gözlenmiştir. Ayrıca artan lif dozajı çekme yönünde daha yüksek gerilme kapasitesi sağlamıştır. Buna ek olarak, tüm geopolimer beton karışımları için 3 gün içinde erken bir dayanım artışı fark edilmiştir. Basınç gerilmesinin aksine yarmada çekme özellikleri, geopolimer beton içerisindeki çelik lif ilavesi ile çok etkilendiği belirtilmiştir.

Agrega olarak kullanılan curufun, demir tozları ile kısmi olarak yer değiştirilmesi neticesinde bütün curuf/silis dumanı oranlarında yarmada çekme dayanımları belirli bir yüzdeye kadar artış sonrasında bir azalış eğilimi göstermiştir. Ghannam vd. (2016), bağlayıcısı çimento olan beton içerisinde ince agrega olarak kullanılan kumun, demir tozu ile kısmi olarak yer değiştirilmesiyle yarmada çekme dayanımlarını araştırmışlardır. Demir tozu kullanılmadan üretilen betonun 7 günlük yarmada çekme dayanımı 1,95 N/mm² olarak bulunmuştur. %5, %10, %15 ve %20 demir tozu ikamesiyle ise yarmada çekme dayanımlarında sırasıyla %7,7, %7,7, %12,8 ve %15,4 artışları gözlenerek en yüksek yarmada çekme dayanımı 2,25 N/mm² olarak %20 demir tozu içeren numunelerde gözlenmiştir. Ayrıca araştırmacılar demir tozu ikamesiyle yarmada çekme

dayanımındaki artış oranının, eğilmede çekme dayanımındakinden daha düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Demir tozlarının, çimento bağlayıcılı betonun yarmada çekme dayanımı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir (Alzaed 2014). Demir tozu kullanılmayan numunenin 28 günlük çekme dayanımı ortalama olarak 2,50 MPa olarak bulunmuştur ve demir tozlarının, çimentoyla kısmi olarak %10, %20 ve %30 yer değiştirilmesi ile yarmada çekme dayanımlarındaki artış sırasıyla %13,6, %15,2, %16,4 olarak belirlenmiştir. Olutoge vd. (2016), ince agrega olarak kullanılan kum ile yer değiştirilen demir tozlarının betonun yarmada çekme dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Su içerisinde kürlenmiş 28 günlük numuneler üzerindeki sonuçlar, demir tozlarının, kum ile ağırlıkça %10 ve %20 oranında yer değiştirilerek kullanılmasının beton yarmada çekme dayanımını, demir kullanılmayan kontrol karışımına kıyasla %12,7 ve %0,9 oranında arttırdığını, %30 yer değiştirmenin ise dayanımı %1,7 oranında düşürdüğünü göstermiştir. %10 demir tozu ikamesi ile elde edilen maksimum yarmada çekme dayanımı 2,66 N/mm² olarak bulunmuştur.

%100 curuf bağlayıcının kullanıldığı karışımlarda artan lif içeriği ile eğilmede çekme dayanımı doğrusala yakın bir artış gösterirken, diğer curuf/silis dumanı içeriklerinde eğilmede çekme dayanımları belirli bir orana kadar çelik lif içeriği ile artan ve sonrasında azalan bir eğilim göstermede eş değer bir performans sergilediği görülmüştür. Çelik liflerin doğru dağılımı ve rastgele yönlendirilmesi harçlarda yüksek sinerji sağlaması nedeniyle eğilme esnasında önemli bir rol oynamıştır. Ek olarak, çelik takviyeli geopolimer, takviye etkisi nedeniyle aynı statik yüklerde çatlak yayılımını önleyen bir tutucu veya bariyer olarak görev yapmasına izin veren yüksek bir yoğunluk sergilemiştir. Bernal vd. (2010) tarafından çelik lif takviyeli curuf esaslı geopolimer betonların eğilme çekme dayanımlarının 28 günde 6,40 ile 8,86 MPa arasında, artan lif hacmiyle birlikte büyük ölçüde arttığı bulunmuştur. Kürlenmenin erken yaşlarında eğilme dayanımının gelişimi, silika jelden C-S-H jelinin oluşması nedeniyle matrisin kendi etkisine bağlanabileceği belirtilmiştir. Ek olarak, lif takviyeli geopolimer bir kıkılamaya etkisi ve lif etkisi nedeniyle aynı statik yüklerde çatlak yayılımını önleyen gözenekli tıkaç olarak görev yapmasına izin veren yüksek bir yoğunluk sergilemiştir, böylece çatlak tutucu veya bariyerler gibi işlev gören lifler, ilerleyen bir çatlakta dolambaçlılığı arttırmıştır.

Aydın ve Baradan (2013), çelik lif içeriği ve uzunluğunun curuf/silis dumanı esaslı geopolimer harçların eğilmede çekme dayanımı üzerindeki pozitif etkisinin basınç dayanımından daha önemli olduğunu açıklamışlardır. Bununla birlikte artan lif içeriğiyle birlikte eğilme dayanımındaki iyileşmenin, 6 mm uzunluğundaki çelik lifler için hacimsel olarak %1,5'in ötesinde önemsiz olduğunu belirtmişlerdir.

Alkali aktive edilmiş curuf betonda, 13,2 MPa maksimum eğilmede çekme dayanımı, hacimsel olarak %1,5'a kadar daha yüksek çelik lif ikamesinde kaydedilmiştir (Karunanithi ve Anandan 2014). Bu artış, lif takviyesiz geopolimer karışımdan %46 daha fazla olmuştur ve matristeki yüksek lif içeriğinin yeterli eğilme dayanımı sağladığı gerçeğini ortaya koymuştur. Çelik liflerin doğru dağılımı ve rastgele yönlendirilmesi betonda yüksek sinerji sağlaması nedeniyle eğilme esnasında önemli bir rol oynamıştır. Deneysel eğilimlerden, çelik liflerin varlığının, pik sonrası yumuşama özellikleri yanında iyi ön-pik deformasyon sertleşmesi özellikleri de sağladığı

söylenbilir. Bununla birlikte, çelik liflerin dozajındaki artış, beton numunelerinin çatlak sonrası direncinde iyi bir gelişme göstermiştir.

%100 curuf bağlayıcının kullanıldığı karışımlarda artan demir tozu içeriği ile eğilmede çekme dayanımı artış gösterirken, diğer curuf/silis dumanı içeriklerinde agrega olarak kullanılan demir tozunun belirli bir yüzdeye kadar artan içeriği ile artış sonrasında ise önemsiz derecede olan bir azalış gözlenmiştir. Ghannam vd. (2016) tarafından bağlayıcısı çimento olan beton içerisinde ince agrega olarak kullanılan kum, demir tozu ile kısmi olarak yer değiştirilerek eğilmede çekme dayanımları tespit edilmiştir. Demir tozu kullanılmadan üretilen betonun 7 günlük eğilmede çekme dayanımı $2,35 \text{ N/mm}^2$ olarak bulunmuştur. %5, %10, %15 ve %20 demir tozu ikamesiyle ise eğilmede çekme dayanımlarında sırasıyla %16,6, %27,6, %37,4 ve %45,1 artışları gözlenerek en yüksek eğilmede çekme dayanımı $3,41 \text{ N/mm}^2$ olarak %20 demir tozu içeren numunelerde gözlenmiştir. Ayrıca araştırmacılar demir tozu ikamesiyle eğilmede çekme dayanımındaki artışın, basınç dayanımındaki artış oranından daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Olutoge vd. (2016), ince agrega olarak kullanılan kum ile yer değiştirilen demir tozlarının betonun eğilmede çekme dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Su içerisinde kürlenmiş 28 günlük numuneler üzerindeki sonuçlar, demir tozlarının, kum ile ağırlıkça %10 ve %20 oranında yer değiştirilerek kullanılmasının beton eğilmede çekme dayanımını, demir kullanılmayan kontrol karışımına kıyasla %11,1 ve %4,8 oranında arttırdığını, %30 yer değiştirmenin ise dayanımı %1,6 oranında düşürdüğünü göstermiştir. %10 demir tozu ikamesi ile elde edilen maksimum eğilmede çekme dayanımı $7,0 \text{ N/mm}^2$ olarak bulunmuştur.

Portland çimentosu sisteminde hazırlanan beton karışımlarında atık demir tozu yüzdesinin artmasıyla birlikte eğilmede çekme dayanımının arttığı gözlenmiştir (Ismail ve Al-Hashmi 2008). İnce agrega olarak kullanılan kumun yerine %10, %15, %20 oranlarında demir tozunun ikamesi ile birlikte, suda kürlenmiş 3 günlük numunelerin eğilmede çekme dayanımının demir içermeyen referans karışıma göre sırasıyla %12,1, %26,9 %37,98 oranında arttığı belirtilmiştir.

Karışımlardaki curuf/silis dumanı oranı azaltıldığı zaman, çelik yüzdesindeki değişimin basınç dayanımı üzerinde etkisinin giderek önemsizleştiği sonucuna varılmıştır. Yani basınç dayanımı açısından optimum lif içeriği farklı durumda farklılık gösterebilmektedir dolayısıyla belirli bir uygulama için karışım tasarımı süresince çelik dozajı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki göz önüne alınmalıdır. Kim vd. (2015) curuf esaslı geopolimer betonuna çelik liflerin eklenmesinin 28 günde basınç dayanımının %1,9 - %17,8 oranında artmasında önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca lif katkısına ek olarak, beton basınç dayanımı gelişiminin kür yöntemlerinden de etkilendiğini gözlemlemişlerdir. Su kürünün, kuru küremeye göre betonun dayanım gelişimi açısından daha etkili olduğunu ve bu durumun ıslak kürlenmenin, curuf esaslı bağlayıcılar için lif ve harç fazı arasındaki bağlanma özelliklerini geliştirdiğine atfedildiğini açıklamışlardır. Buna karşılık olarak, Bernal vd. (2010), çelik liflerle takviye edilen curuf esaslı geopolimer betonun erken yaştaki mekanik özelliklerini araştırdıklarında, deney sonuçları basınç dayanımlarının artan lif içeriği ile azaldığını ortaya koymuştur.

Curuf/silis dumanı esaslı geopolimer harçların basınç dayanımı çelik lif hacmi ve uzunluğu ile önemli derecede artmıştır (Aydın ve Baradan 2013). Hacimsel olarak %0,5 lif dozajında basınç dayanımındaki artış %30, %2 lif içeriğinde ise %48'dir. Basınç dayanımının lif takviyesi ile artmasının, liflerin nispeten küçük boyutlarına bağlanabileceğini ve bu durumun liflere mikroçatlak oluşumunu geciktirme ve sonradan belirli bir seviyeye kadar olan yayılmalarını durdurma ve önleme yeteneği verdiğini belirtmişlerdir.

Karunanithi ve Anandan (2014), çelik lif dozajındaki artışın curuf esaslı geopolimer betonların basınç dayanımı üzerinde makul bir iyileşme gösterdiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, hacimsel olarak %1,0'a kadar optimum çelik lif dozajı, takviyesiz geopolimer karışımı ile kıyaslandığında %8'e kadar iyi bir dayanım artışı göstermiştir ve maksimum basınç dayanımı 60,3 MPa olarak bildirilmiştir. Mikroyapısal iyileştirmelerindeki azalma nedeniyle, hacimsel %1,5 çelik lif eklenmesi durumunda ise basınç dayanımında bir artış olmadığı belirtilmiştir. Temel lif mekaniğinden kırılma, sünek kırılmaya bağlı olmadığı için, liflerin katkısının basınç yönünde gerçekleştirilemediği iyi bilinmektedir. Sonuç olarak basınç yönünde liflerin germesi/gerilmesi gerçekleşmez, bu nedenle lifler yük paylaşımında aktif olarak katkıda bulunmaz. Çalışmada üretilen lif takviyesiz yüksek mukavemetli geopolimer betonların basınç deneyi esnasında, patlama kırılması belirtisi görülmemiştir. Buna karşılık, çelik lif takviyeli geopolimer betonlarında kırılma, sünek kırılma modunun bir sonucu olarak birden fazla çatlamaya bağlı olarak meydana gelmiştir. Ayrıca kırık numuneler üzerinde yapılan dikkatli inceleme, polimer zincirinin plastik deformasyonunun bir sonucu olarak matris bölgesindeki ayrı mikro-çatlamaların, sünek hasarı başlattığını ortaya koymuştur.

Ortam koşullarında kürlenmiş, uçucu kül, curuf ve silis dumanı esaslı geopolimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin araştırılması kapsamında, çelik lif takviyesiz geopolimer harcın ortalama basınç dayanımı 43,7 MPa olarak bulunmuştur (Al-Majidi vd. 2016). Çelik liflerin dahil edilmesi, lif uzunluğu ve dozaj oranlarına bağlı olarak ortalama basınç dayanımı değerlerini 15-25 MPa arttırmıştır. Takviye edilen çelik liflerin boy/çap oranının ve hacim fraksiyonunun artması, basınç dayanımı performansında sistematik bir artışa neden olmadığı gözlenmiştir.

Curuf ve uçucu kül esaslı geopolimer harca hacimsel olarak %1'e kadar %0,25 aralığı ile çelik lifler ilave edilmiştir (Gao vd. 2017). Çelik lif takviyesiz referans örneği için basınç dayanımı 7 günde 65,4 MPa'dır. %1'e kadar kısa lifler ilave edildiğinde, basınç dayanımı 73,35 MPa'ya yükselmiştir. Lifin, çekme veya eğilme dayanımını arttırdığı iyi bilinmektedir, ayrıca çatlakları köprüleyebilmekte ve basınç yükleri esnasında bir miktar yayılmalarını da geciktirebilmektedir. %0,75 ve %1 lif içeriğine sahip karışımların, dayanımda önemli bir farklılık göstermediği, bunun da çelik lifler tarafından basınç dayanımına katkıda bulunmada bir sınırlamanın ortaya çıkmasına bağlı olduğu belirtilmektedir yani basınç dayanımı açısından optimum lif içeriği farklı durumlarda farklılık gösterebilmektedir dolayısıyla belirli bir uygulama için karışım tasarımı süresince lif dozajı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki göz önüne alınmalıdır.

Hammade bileşiminin etkisi ile ilgili olarak, curuf/uçucu kül oranını düşürürken basınç dayanımında da kademeli bir düşüş olduğu gözlenmiştir. 1,4 sabit aktivatör modülü için, curuf/uçucu kül oranı 80/20 olan karışımlar için 7 günlük basınç dayanımı 68,4 MPa'dır ve curuf içeriği %60 ve %40'a düşürüldüğünde sırasıyla 62,6 MPa ve

58,4 MPa'ya hafifçe düştüğü belirlenmiştir (Gao vd. 2016). Curuf içeriğinin basınç dayanımı üzerindeki pozitif etkisi sıklıkla daha önceki çalışmalarda bildirilmiş olup (Weiguo vd. 2011), yararlı etki esas olarak ortam sıcaklığındaki uçucu küllere göre daha yüksek reaktiviteye ve curuftaki ağ değiştiren katyonlarının daha yüksek içeriğine bağlanmıştır. Curuf daha fazla C-A-S-H tipi jel ile reaksiyon ürünlerinin oluşumuna yol açmakta ve sonuç olarak daha yüksek bir dayanım sunmaktadır (Kumar vd. 2010). Ek olarak, hammadde bileşiminin sebep olduğu dayanım değişimlerinin, aktivatör modülünden daha büyük olduğu ve mekanik özelliklerin belirlenmesinde nispeten yüksek baskın rolü olduğu gösterilmektedir. Alkali aktive edilmiş malzemelerin mekanik özellikleri, aktivatör türü ve dozaj, hammadde bileşimi ve kökeni, kür koşulları gibi önemli üretim parametrelerine özellikle duyarlıdır. Dolayısıyla, bahsedilen faktörlerin büyük bir çeşitliliği nedeniyle, mevcut literatürler arasında etkili bir karşılaştırma yapmak zordur.

Bağlayıcı olarak %100 curufun kullanıldığı numunelerde agregaya olarak demir tozunun artan içeriği ile basınç dayanımları neredeyse doğrusal bir artış göstermiştir. Ancak curuf/silis dumanı oranındaki azalış ile birlikte artış eğilimi yerini azalış eğilimine bırakmış ve en son oran 40/60'a ulaştığında tamamen farklı bir eğilime geçerek, önce belirli bir yüzdeye kadar artış sonrasında azalış ile sonuçlanmıştır. Ghannam vd. (2016) tarafından bağlayıcısı çimento olan beton içerisinde ince agregaya olarak kullanılan kum, demir tozu ile kısmi olarak yer değiştirilerek basınç dayanımları tespit edilmiştir. Demir tozu kullanılmadan üretilen betonun 7 günlük basınç dayanımı $25,1 \text{ N/mm}^2$ olarak bulunmuştur. %5, %10, %15 ve %20 demir tozu ikamesiyle ise basınç dayanımlarında sırasıyla %13,1, %18,9, %32,7 ve %33,3 artışları gözlenerek en yüksek basınç dayanımını, $33,4 \text{ N/mm}^2$ olarak %20 demir tozu içeren numuneler göstermiştir.

Alzaed (2014), demir tozlarının beton karışım bileşenlerinden biri olarak kullanılma olasılığını değerlendirmek üzere araştırma yapmıştır. Çalışma kapsamında demir tozları, çimentoyla kısmi olarak yer değiştirilerek basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Demir tozu kullanılmayan numunenin 28 günlük basınç dayanımı ortalama olarak 27,53 MPa iken, %10, %20 ve %30 demir tozunun ikamesi ile basınç dayanımlarındaki artış sırasıyla %5,4, %11,9, %17,8 olarak bulunmuştur.

Olutoge vd. (2016), ince agregaya olarak kullanılan kum ile yer değiştirilen demir tozlarının beton basınç dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Su içerisinde kürlenmiş 28 günlük numuneler üzerindeki sonuçlar, demir tozlarının, kum ile %10 ve %20 oranında yer değiştirilerek kullanılmasının beton basınç dayanımını, demir kullanılmayan kontrol karışımına kıyasla %3,5 ve %13,5 oranında arttırdığını, %30 yer değiştirmenin ise dayanımı %8 oranında düşürdüğünü göstermiştir. %20 demir tozu ikamesi ile elde edilen maksimum basınç dayanımı $39,5 \text{ N/mm}^2$ olarak bulunmuştur.

Portland çimentosu sisteminde hazırlanan beton karışımlarında atık demir tozu yüzdesinin artmasıyla birlikte basınç dayanımının arttığı gözlenmiştir (Ismail ve Al-Hashmi 2008). İnce agregaya olarak kullanılan kumun yerine %10, %15, %20 oranlarında demir tozunun ikamesi ile birlikte, suda kürlenmiş 3 günlük numunelerin basınç dayanımının, demir içermeyen referans karışımına göre sırasıyla %8,2, %15,2 %22,6 arttığı belirtilmiştir. En yüksek basınç dayanımını ise 51,64 MPa olarak, %20 atık demir

tozu içeren 28 günlük kürlenmiş nunumenin verdiği bulunmuştur. Bu artan eğilimin, atık demir agregasının yüksek yoğunluğuna ve dayanımına bağlı olduğu açıklanmıştır.

Curuf bağlayıcısı ile hazırlanmış olan geopolimer harçların kuruma büzülmesi, artan çelik yüzdesi ile birlikte sistematik bir azalış göstermiştir. Ancak curuf/silis dumanı oranının giderek düşürülmesi, çelik yüzdesindeki değişimin kuruma büzülmesi üzerindeki etkisini yitirdiği sonucunu beraberinde getirmiştir. Büzülmedeki farklılıkların, farklı uygulanan hammadelerden kaynaklandığı ve başlangıç malzemesi doğasının (kimyasal bileşim ve incelik gibi), büzülme davranışı üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olduğu açıkça görülmüştür. Aydın ve Baradan (2013) tarafından, çelik liflerin uzunluk ve hacim fraksiyonunun, curuf/silis dumanı esaslı geopolimer harçların kuruma büzülmesi davranışına etkileri araştırılmıştır. Karışımlarda %0,5, %1, %1,5 ve %2 olarak farklı hacim yüzdelerinde çelik lifler kullanılmıştır. Çelik lif ilavesi, harçların kuruma büzülmesi davranışını pozitif yönde etkilemiştir. Lif içermeyen curuf/silis dumanı esaslı geopolimer harçların kuruma büzülmesi değerleri, lif katkısı ile %24'e kadar düşürülmüştür.

Kuruma büzülmesine sıklıkla, sertleşmiş matrisin gözeneklerinden gelen serbest suyun buharlaşması neden olur ve genel olarak Portland çimentosu esaslı malzemelere kıyasla alkali aktive edilmiş malzemeler daha yüksek kuruma büzülmesi göstermektedir (Kheradmand vd. 2017). Gao vd. (2017), çelik lif içeriğinin %1'e kadar artmasıyla büzülmenin azaldığını gözlemlemişlerdir. Bu durum lif ilavesinin, alkali aktive edilmiş malzemelerin kuruma büzülmesini engellemenin etkin bir yaklaşımı olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Curuf/uçucu kül karışımlarında, daha düşük curuf içeriği kullanılması halinde kuruma büzülmesinde önemli bir azalma görülmüştür (Gao vd. 2016). Sabit aktivatör modülü 1,4 alındığında, curuf/uçucu kül oranı 80/20 olan karışımlar için 28 günlük uzunluk değişimi -3996×10^{-6} iken, curuf/uçucu kül oranı 40/60'a düşürüldüğünde uzunluk değişiminin -2797×10^{-6} 'ya (yaklaşık %30 oranında) düştüğü belirlenmiştir. Bu da curufun uçucu kül ile değiştirilmesinin kuruma büzülmesini azaltmak için ideal bir yaklaşım olduğunu düşündürmüştür. Bu sonuç, curuf-uçucu kül karışımlarındaki curuf miktarının azaltılmasının kuruma büzülmesini azalmasına neden olacağı önceki araştırmalarla uyumludur (Ma ve Ye 2015). Çalışmanın FTIR analizinde, alkali ile aktive edilen curuf-uçucu kül karışımlarındaki ana reaksiyon ürünü, alkali ile aktive edilen saf curuftakine benzer bir C-A-S-H tipi jeldir, ve reaksiyona girmemiş curufun spektrum eğrisiyle karşılaştırıldığında Si, Al gruplarının birikimi, ana absorpsiyon piklerinin dalga sayılarındaki artış ile gözlenmiştir. Curufun reaksiyon sürecinin, silikat birikimi ile beraber nispeten yüksek küçülmenin bir nedeni olabileceği açıklanmıştır. Bu süreç uçucu kül için daha ılımlı gibi görünmektedir. Düşük Ca/Si oranına sahip tipik C-A-S-H jellerinin, doğası gereği yüksek büzülme eğilimi sergilemesi ve reaksiyona giren jel içerisine ekstra Si, Al gruplarının ilavesinin bu özellik üzerinde değişiklik yapması mümkündür. Genel olarak, uçucu küllerin curufa dahil edilmesi ve aktivatörden silikat içeriğinin düşürülmesi büzülme azaltmak için etkili yöntemler olarak sunulmuştur.

Jin vd. (2014), MgO'nun alkali aktive edilmiş curuf malzemelerin kuruma büzülmesini azaltmasına yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sodyum hidroksit ve cam suyu ile aktive edilmiş curufun ağırlıkça %2,5 ve %7,5 içeriğinde, karışıma iki farklı reaktif MgO ilave edilmiştir. Reaktif MgO ile yer değiştirilmiş alkali aktive

edilmiş hamurların dayanımı ve kuruma büzülmesi 90. güne kadar ölçülmüştür ve kuruma büzülmesinin yüksek reaktif MgO ile önemli ölçüde azaltılmış olduğu ancak kuru koşullar altında ciddi çatlaklara sebep olduğu gözlenmiştir. XRD, termogravimetrik analizler ve SEM teknikleri ile analiz edilen hidratasyon ürünleri, Mg'nin esas olarak hidrokalsit benzeri fazlara dahil edildiğini göstermiştir. Sonuç olarak, reaktif MgO'nun içeriğine oldukça bağımlı olan AAC'nin geliştirilmiş dayanım ve azaltılmış büzülme özellikleri üzerinde kür koşulları ve hidrokalsit benzeri faz oluşumunun zamanı ve miktarının önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Bağlayıcı olarak kullanılan silis dumanı ve curuf bileşenlerinin kimyasal kompozisyonları incelendiğinde, silis dumanının curuftan daha yüksek oranda MgO içeriğine sahip olduğu görülmektedir. Literatüre bakıldığında büzülme azaltıcı bir mineral katkı maddesi olarak kullanılan MgO'nin daha yüksek içeriği, silis dumanı ile hazırlanan harçların, curuf bağlayıcısı ile hazırlanan harçlardan daha düşük kuruma büzülmesi göstermesi sonucunu açıklamaktadır.

Mevcut sonuçlar, daha önceki araştırmalardaki genel sonuçlarla birlikte, çelik lif ilavesinin kuruma büzülmesini etkili bir şekilde azaltabileceğini göstermiştir. Bununla birlikte, başlangıç malzemesinin kökeninin (hem uygulanan bağlayıcılar hem de çelik lifler), numune şekli ve deney koşullarının, nihai sonuçlar üzerinde etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.

Tüm karışım serileri dikkate alındığında, çelik agregası içeren harçlar içerisinde, en yüksek elektromanyetik kalkanlama etkinliğini 6 GHz frekansta 26,1 dB olarak S0C10 numunesi gösterirken, demir agregası içeren harçlar içerisinde ise 6 GHz frekansta 23,1 dB olarak S40D40 numunesi göstermiştir. Ayrıca genel olarak, tamamen curuf bağlayıcısı içeren harçlar, silis dumanı içeren harçlara nispeten daha yüksek elektromanyetik kalkanlama etkinliği göstermiştir. Bu durum ise, curufun elementel kompozisyonunda bulunan kalkanlama etkinliği gösterebilecek Al, Mn, Fe, Cu gibi metal elementlerinin daha yüksek içeriğine bağlanabilir. Cao ve Chung (2004), uçucu kül ve silis dumanı ile yaptıkları çalışmada, çimento hamurunda silis dumanının kullanılmasının kalkanlama etkinliği üzerinde ihmal edilebilir sonuç vermesine karşılık, uçucu kül kullanımının elektromanyetik kalkanlama etkinliğini 1GHz frekansta 4dB'den 8dB'e kadar arttırdığı sonucuna varmışlardır. Çalışmada, kalkanlama için uçucu külün etkinliği, uçucu külde bulunan ağırlıkça %15,4 Fe₂O₃ bileşenine atfedilmiştir. Chiou vd. (1989), normal çimento hamuruna 3 mm uzunlukta karbon lifler ekleyerek, elektromanyetik kalkanlama etkinliğinin 3,6 mm kalınlıklı numune ile 1.5 GHz frekansta 0,5 dB' den 10,2 dB'ye arttığını tespit etmişlerdir. Muthusamy ve Chung (2010), çimento hamuru matrisinde kısa karbon lif kullanarak, 1 GHz ve 1,5 GHz frekansta 20 dB ile 30 dB arasında elektromanyetik kalkanlama değerleri elde etmişlerdir. Singh vd. (2011), çimento hamuruna ferrofluid ile birlikte ağırlıkça %30 grafen oksit ilave ederek, 3,25 mm kalınlıklı numune ile 8,2-12,4 GHz frekans aralığında 46 dB kalkanlama etkinliğine ulaşmışlardır. Wen ve Chung (2004), çimento hamuruna paslanmaz çelik lif ilavesiyle, 4.47 mm kalınlıklı numune ile 70 dB kalkanlama etkinliğine ulaşmışlardır.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar:

- ~ Sonuçlar, hem çelik parçacıkları hem de demir tozu ilavesinin alkali aktive edilmiş sistemde akışkanlık üzerinde olumsuz bir etki yarattığını göstermiştir. Ayrıca curuf/silis dumanı esaslı geopolimer harçların işlenebilirliğinin silis dumanı içeriğindeki artışa paralel olarak arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum curuf ile silis dumanı arasındaki morfolojik farklılıkların sebep olduğu farklı su ihtiyacı ile açıklanabilmektedir ki curuf genellikle daha açısız bir parçacık şekli sunarken, silis dumanı daha çok küresel ve daha geniş bir özgül yüzey alanı sergilemektedir.
- ~ Bağlayıcı olarak %100 curufun kullanıldığı numunelerde, karışımdaki çelik yüzdesi arttıkça kuru ve doymuş yüzey kuru yığın yoğunluk değerleri genel olarak artmıştır. Curuf/silis dumanı oranı 80/20'ye kaydırılırken en yüksek yığın yoğunluklar %10 çelik içeriğinde, 60/40 oranında %7,5 çelik içeriğinde ve 40/60 oranında ise %5 çelik içeriğinde elde edilmiştir.
- ~ Curuf/silis dumanı esaslı geopolimer harçların su emme ve görünür porozitelerinin silis dumanı içeriğindeki artışa paralel olarak arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca curuf yerine silis dumanı ikamesinin yapıldığı tüm oranlarda, hem çelik hem de demir tozu ilavesiyle su emme ve görünür porozite yüzdelерinde genel olarak düşüşler gözlenmiştir.
- ~ Deneysel sonuçlardan, porozite sonuçlarının basınç dayanımı ile yeterince ilişkili olmadığı görülmüştür. Bu durumda geopolimer harçlar için porozitenin basınç dayanımının tek göstergesi olmadığı ve dolayısıyla nihai mekanik özelliğın, agrega içeriğı ve tipi, bağlayıcı içeriğı ve tipi, kür koşulları ve ayrıca fiziksel özelliklerinin kombine etkisinin belirgin bir sonucu olduğu yargısına varılmıştır.
- ~ Basınç dayanımı değerlerinin karışımdaki silis dumanı içeriğinin artışıyla azaldığı sonucuna varılmıştır. Bağlayıcı olarak %100 curuf içeren numunelerin SEM görüntülerinde, numunenin mikroyapısının çok kompakt olup, harç hamurundaki gözenekleri curuf parçacıklarının doldurduğu ve aynı zamanda matristeki parçacıklar arası boş alanları da dolduran C-S-H jelini oluşturduğu gözlenmiştir. %60 oranında silis dumanı içeren numunelerin hamur matrisi içerisinde ise, gözenekler ve curuf tanecikleri arasında çok sayıda boş alan bulunduğu gözlenmiştir. Bu boş alanlar ve gözenekler harçların geçirgenliği üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Böylece, belirli bir orana kadar (%20) silis dumanının kullanılması geopolimer harçta iyileşme sağlasa da, belirli bir orandan sonra porozite ve kılcal geçirimsizliği artırarak, curuf esaslı geopolimer harçların durabilitesini ve mekanik özelliklerini azaltabileceği sonucuna varılmıştır.
- ~ Silis dumanının %40 ve %60 ikamesinin yapıldığı harçlarda çelik parçacık içeriğinin artırılmasının, basınç dayanımında önemli bir farklılık göstermediği ve bunun da çelik parçacıklar tarafından basınç dayanımına katkıda bulunmada bir sınırlamanın ortaya çıkmasına bağlı olduğu gözlenmiştir. Curuf bağlayıcısı ile hazırlanmış olan geopolimer harçların basınç dayanımları artan demir tozu yüzdesi ile sistematik bir artış göstermiştir. Bu durum, demir tozları ile curuf esaslı geopolimer matrisi

arasındaki iyi bağa bağlanabilir ve hem demir tozu hem de curuf matrisi yükleri paylaşır ki bu da geopolimer kompozitlerin dayanımını belirgin ölçüde arttırmıştır. Ancak silis dumanı ikamesi arttırıldıkça, artan demir tozu yüzdesi ile birlikte basınç dayanımları düşüş eğilimine geçmiştir. Dolayısıyla curuf/silis dumanı oranı bir eşik değere sahiptir ve bu kritik değer dışında, demir tozu oranının artmasıyla basınç dayanımı da önemli ölçüde azalacaktır. Deneysel sonuçlar, daha düşük curuf/silis dumanı oranının daha yüksek akışkanlığa yol açtığını göstermiştir. Bu nedenle fazla akışkanlık, geçiş bölgesinin kohezyonunu düşürdüğü ve bu şekilde basınç dayanımında bir azalmaya neden olduğu söylenebilir.

- ~ Karışımlardaki çelik yüzdesi arttıkça sıcak kür koşullarına tabii tutulan numunelerde kılcal su emme katsayısı değerlerinde belirgin bir artış görülürken, normal kür koşullarına tabii tutulan numuneler, genel olarak benzer seviyeler göstermiştir. Dolayısıyla, normal kür koşulları ortamında, çelik ilavesi ile agrega tipinde yapılan değişikliğin kılcal su emme katsayısı üzerinde sınırlı, ancak saptanabilir bir etki gösterdiği sonucuna varılmıştır. Demir tozu yüzdesi arttıkça normal kür koşullarına tabii tutulan numunelerin kılcal su emme yüzdelerinde ise bir düşme eğilimi görülmüştür. Ayrıca, karışımlardaki silis dumanı ilavesi arttıkça her iki agrega tipi için de geçerli olmak üzere sıcak ve normal kür koşulları değerlerinin giderek birbirlerine yaklaştığı ve kür koşullarının geopolimer harçların durabilitesi üzerindeki etkisini giderek yitirdiği sonucuna varılmıştır.
- ~ Yarmada çekme dayanımları bütün curuf/silis dumanı oranlarında çelik yüzdesindeki artış ile artmıştır. Demir tozu içeren numunelerde ise, bütün curuf/silis dumanı oranlarında %30 demir tozu ikamesine kadar artış daha sonra bir azalış eğilimi görülmüştür. Artan çelik ve demir dozajı çekme yönünde daha yüksek gerilme kapasitesi sağlamış ve basınç gerilmesinin aksine yarmada çekme özelliklerinin, geopolimer harç içerisindeki çelik ve demir ilavesi ile çok fazla etkilendiği gözlenmiştir.
- ~ Eğilmede çekme dayanımı, bağlayıcı olarak %100 curuf içeren harçlarda hem çelik hem de demir tozu yüzdesinin artışı ile artış göstermiştir. Ancak curuf yerine silis dumanı ikame edilen diğer oranlardaki sıcak kür koşullarına tabii tutulan çelik numunelerinde %5 çelik ikamesine kadar ve demir tozu içeren numunelerde ise genel olarak %30 demir tozu ikamesine kadar kademeli olarak artış göstermiş sonrasında ise bir azalma gözlenmiştir.
- ~ Curuf/silis dumanı esaslı geopolimer harçların tüm karışım oranlarında geçerli olmak üzere kür yöntemlerinden oldukça fazla etkilendiği ve su kürü sıcaklığının 23°C'den 60°C'ye çıkarılmasının geopolimer harçların fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerinin gelişimi açısından daha etkili olduğu yapılan tüm deneylerde açıkça gözlenmiştir.
- ~ %100 curuf bağlayıcının kullanıldığı karışımlarda, curuf agregasının çelik ve demir tozunun artan hacimleriyle yer değiştirilmesi neticesinde kuruma büzülmesi giderek azalan bir davranış sergilemiştir. Bu durum atık metal olarak karışıma dahil edilen çelik ve demir tozlarının büzülme engelleyici görev üstlendiğini açıkça ortaya koymaktadır. Ancak karışımlardaki silis dumanının artan içeriklerinde, harçların katı

iskeleti olarak çelik ve demir tozlarının kuruma büzülmesinde işlevlerini yitirdikleri ve büzülmenin agrega tipi ve içeriğinden bağımsız olarak davrandığı gözlenmiştir.

- ~ Mutlak korozyon potansiyeli, karışımlardaki artan çelik ve demir tozu ilavesi ile daha negatif değerler almıştır. Ayrıca ASTM C876'ya göre, 90 günlük harç numunelerin korozyon potansiyelinin -0.20 V ve -0.35 V aralığında olduğu ve dolayısıyla korozyon aktivitesinin belirsiz olduğu tespit edilmiştir.
- ~ Elektromanyetik kalkanlama etkinliği genel olarak, karışımlardaki çelik ve demir tozu metal atıklarının artışı ile artış göstermiştir. Çelik parçacık fraksiyonu arttıkça, parçacıklar iletken bir ağ oluşturmak üzere birbiri üzerine bindirilmiş, böylece elektromanyetik kalkanlama performansı artmıştır. Ayrıca kullanılan metal çelik parçacıkları nispeten yüksek bir boy/çap oranına sahiptir. Dolayısıyla metal tozu ile aynı miktardaki dolumda, metal liflerin iletken ağ oluşturma eğiliminde olduğu ve metal toza kıyasla daha az bir yük ile daha iyi bir kalkanlama etkisi sağlayabildiği açıkça gözlenmiştir.
- ~ Optimizasyon sonuçları, düşük kuru yığın yoğunluk, düşük su emme ve yüksek dayanıma sahip olacak tüm harçlar arasında en fazla arzulanan özelliklere, sıcak kür koşullarına tabii tutulan çelik agregası ve demir agregası numuneleri içerisinde sırasıyla S0C10, S20D10 harçlarının sahip olduğunu göstermiştir. İkinci optimizasyon amaçları değerlendirildiğinde ise, düşük kuru yığın yoğunluk, düşük su emme, yüksek dayanım ve yüksek elektromanyetik kalkanlama özelliklerine sahip olacak tüm harçlar içerisinde en fazla arzulanan özelliklere, çelik agregası ve demir agregası içeren numuneler arasında sırasıyla S40C10, S20D30 harçlarının sahip olduğunu göstermiştir.

Gelecekte yapılacak olan çalışmalar için öneriler;

- ~ Bu çalışmada, elektromanyetik kalkanlama özelliklerini geliştirmeye yönelik olarak metal işleme sektörü atıklarından çelik ve demir tozu kullanılmıştır, ilerleyen çalışmalarda maliyet göz ardı edilerek bakır, krom, alüminyum, çinko, kurşun, molibden, manganez, tungsten, kalay, kadmiyum ve nikel gibi farklı metal türleri kullanılarak bu çalışmada elde edilen değerlerin üzerine çıkılmaya çalışılmalıdır.
- ~ Bu çalışmada yapılan durabilite araştırması kılcal su emme, kuruma büzülmesi ve korozyon ile sınırlıdır. İdeal bir laboratuvar ortamı sunulmuş olan numunelerin, karbonatlaşma, deniz suyu, asit ve sülfatlara maruz kalması gibi agresif ortamlara karşı performansı araştırılmalıdır. Ayrıca bu çalışma 90 günlük kısa vadeli yapısal ve dayanım özellikleriyle sınırlıdır. Metal katkılı karışımların uzun vadedeki performansı araştırılmalıdır.
- ~ Daha önceki araştırmalardaki genel sonuçlarla birlikte, uygulanan bağlayıcılar açısından başlangıç malzemesinin kökeninin nihai sonuçlar üzerinde etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla hem curuf hem de silis dumanı için farklı kökenlere sahip malzemeler üzerinde araştırmalar yapılarak bir veri tabanı oluşturulması yoluna gidilebilir. Bu sayede, bu malzemelerin kullanılabilirliği açısından geniş bir ağ oluşturulması hedeflenebilir.

7. KAYNAKLAR

- ACI Committee 234, 2000. Guide for the use of silica fume in concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills.
- Al-Majidi, M.H., Lampropoulos, A., Cundy, A. 2016. Mechanical properties of steel fibre reinforced geopolymer composites cured under ambient temperature. Fib Symposium, 21-23 November, University of Cape Town's Graduate School of Business.
- Alonso, M.M., Gismera, S., Blanco, M.T., Lanzon, M., Puertas, F. 2017. Alkali-activated mortars: Workability and rheological behaviour. *Constr. Build. Mater.* 145: 576-587.
- Alzaed, A.N. 2014. Effect of iron filings in concrete compression and tensile strength. *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology*, 3(4): 121-125.
- Andrade, C., Alonso, C., Gulikers, J., Polder, R., Cigna, R., Vennesland, Q., Salta, M., Raharinaivo, A., Elsener, B. 2004. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Mater. Struct.* 37: 623-643.
- Anderson, D., Roy, A., Seals, R.K., Cartledge, F.K., Akhter, H., Jones, S.C. 2000. A preliminary assessment of the use of an amorphous silica residual as supplementary cementing material. *Cem. Concr. Res.* 30: 437-445.
- Aperador, W., Gutierrez, R.M., Bastidas, D.M. 2009. Steel corrosion behaviour in carbonated alkali-activated slag concrete. *Corros. Sci.* 51: 2027-2033.
- Ashrit, S., Banerjee, P.K., Ghosh, T.K., Rayasam, V., Nair, U.G. 2015. Characterisation of LD slag fines by x-ray diffraction. *Metall. Res. Technol.* 112(502): 1-9.
- Aydın, S., Baradan, B. 2012. Mechanical and microstructural properties of heat cured alkali-activated slag mortars. *Mater. Des.* 35: 374-383.
- Aydın, S., Baradan, B. 2013. The effect of fiber properties on high performance alkali-activated slag/silica fume mortars. *Composites: Part B*, 45: 63-69.
- Babae, M., Castel, A. 2016. Chloride-induced corrosion of reinforcement in low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. *Cem. Concr. Res.* 88: 96-107.
- Balczar, I., Korim, T., Hullar, H., Boros, A., Mako, E. 2017. Manufacture of air-cooled slag-based alkali-activated cements using mechanochemical activation. *Constr. Build. Mater.* 137: 216-223.
- Bernal, S., De Gutierrez, R., Delvasto, S., Rodriguez, E. 2010. Performance of an alkali-activated slag concrete reinforced with steel fibers. *Constr. Build. Mater.* 24: 208-214.
- Bezerra, M.A., Santelli, R.E., Oliveira, E.P., Villar, L.S., Escaleira, L.A. 2008. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 76: 965-977.

- Bihua, Z., Cheng, G., Bin, C., Ziming, C. 2000. Experimental investigation of EMP shielding effectiveness of reinforced-concrete cell model. Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, pp. 296-300, 3-7 May, Shanghai, China.
- Botrill, R.S. 1991. Silica fume analysis-A preliminary report. *Tasmania Department of Resources Energy*, No:12, pp. 1-16.
- Cao, J., Chung, D.D.L. 2004. Use of fly ash as an admixture for electromagnetic interference shielding. *Cem. Concr. Res.* 34: 1889–1892.
- Chehrehghani, S., Noaparast, M., Rezai, B., Shafaei, S.Z. 2017. Bonded-particle model calibration using response surfacemethodology. *Particuology*, 32: 141–152.
- Chen, J.J., Thomas, J.J., Taylor, H.F.W., Jennings, H.M. 2004. Solubility and structure of calcium silicate hydrate. *Cem. Concr. Res.* 34: 1499–1519.
- Chi, M.C., Chang, J.J., Huang, R. 2012. Strength and drying shrinkage of alkali-activated slag paste and mortar. *Advances in Civil Engineering*, 1-7.
- Chiou, J.M., Zheng, Q., Chung, D.D.L. 1989. Electromagnetic interference shielding by carbon fibre reinforced cement. *Composites*, 20(4): 379-380.
- Chung, D.D.L. 2002. Review improving cement-based materials by using silica fume. *Journal of Materials Science*, 37: 673-682.
- Collins, F., Sanjayan, J.G. 1999. Effects of ultra-fine materials on workability and strength of concrete containing alkali-activated slag as the binder. *Cem. Concr. Res.* 29: 459–462.
- Collins, F., Sanjayan, J.G. 2000. Effect of pore size distribution on drying shrinkage of alkali-activated slag concrete. *Cem. Concr. Res.* 30: 1401-1406.
- Cakir, M., Kockal, N.U., Ozen, S., Kocakusak, A., Helhel, S. 2017. Investigation of electromagnetic shielding and absorbing capabilities of cementitious composites with waste metallic chips. *J. Microwave Power Electromagn. Energy*, 51(1): 31-42.
- Davidovits, J. 1989. Geopolymers and geopolymeric materials. *J. Therm. Anal.* 35: 429-441.
- Davidovits, J. 2005. Geopolymer, Green Chemistry and Sustainable Development Solutions. The Poly(sialate) terminology: a very useful and simple model for the promotion and understanding of green-chemistry. Proceedings of the World Congress Geopolymer, pp. 9-16, Saint-Quentin, France.
- Davidovits, J. 2008. Geopolymer Chemistry & Applications. Institut Geopolymere, 2th edition, Saint-Quentin, France, 593 p.
- Davidovits, J. 2011. Application of Ca-based geopolymer with blast furnace slag, a review. 2nd International Slag Valorisation Symposium, pp.33-49, 18-20 April, Leuven, Belgium.
- Deb, P.S., Nath, P., Sarker, P.K. 2015. Drying shrinkage of slag blended fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. *Procedia Engineering*, 125: 594-600.

- Deventer, J.S.J., Nicolas, R.S., Ismail, I., Bernal, S.A., Brice, D.G., Provis, J.L. 2014. Microstructure and durability of alkali-activated materials as key parameters for standardisation. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 4(2): 116-128.
- Duan, P., Shui, Z., Chen, W., Shen, C. 2013. Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete. *Constr. Build. Mater.* 44: 1-6.
- Eshel, G., Levy, G.J., Mingelgrin, U., Singer, M.J. 2004. Critical evaluation of the use of laser diffraction for particle-size distribution analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:736-743.
- Farhana, Z.F., Kamarudin, H., Rahmat, A., Mustafa Al Bakri, A.M. 2015. The relationship between water absorption and porosity for geopolymer pasta. *Mater. Sci. Forum*, 803: 166-172.
- Ferdosian, I., Camoes, A. 2017. Eco-efficient ultra-high performance concrete development by means of response surface methodology. *Cem. Concr. Compos.* 84: 146-156.
- Fernandez-Jimenez, A., Puertas, F. 2003. Structure of calcium silicate hydrates formed in alkaline-activated slag: Influence of the type of alkaline activator. *J. Am. Ceram. Soc.* 86(8): 1389-1394.
- Fu, X., Chung, D.D.L. 1996. Submicron carbon filament cement-matrix composites for electromagnetic interference shielding. *Cem. Concr. Res.* 26(10): 1467-1472.
- Gao, X., Yu, Q.L., Brouwers, H.J.H. 2016. Assessing the porosity and shrinkage of alkali activated slag-fly ash composites designed applying a packing model. *Constr. Build. Mater.* 119: 175-184.
- Gao, X., Yu, Q.L., Yu, R., Brouwers, H.J.H. 2017. Evaluation of hybrid steel fiber reinforcement in high performance geopolymer composites. *Mater. Struct.* 50(165): 1-14.
- Gastuche, M.C., Brown, G., Mortland, M.M. 1967. Mixed Magnesium-Aluminium Hydroxides. *Clay Miner.* 7: 177-192.
- Gebregziabiher, B.S., Thomas, R., Peethamparan, S. 2015. Very early-age reaction kinetics and microstructural development in alkali-activated slag. *Cem. Concr. Compos.* 55: 91-102.
- Ghannam, S., Najm, H., Vasconez, R. 2016. Experimental study of concrete made with granite and iron powders as partial replacement of sand. *Sustainable Materials and Technologies*, 9: 1-9.
- Glukhovskiy V. 1989. Some Aspects of Admixtures and Industrial By-Products on the Durability of Concrete. Proceedings of the 2nd International Seminar, pp. 53-62, June 26-27, Gothenburg, Sweden.
- Gruskovnjak, A., Lothenbach, B., Holzer, L., Figi, R., Winnefeld, F. 2006. Hydration of alkali-activated slag: comparison with ordinary Portland cement. *Advances in Cement Research*, 18(3): 119-128.

- Guan, H., Liu, S., Duan, Y., Cheng, J. 2006. Cement based electromagnetic shielding and absorbing building materials. *Cem. Concr. Compos.* 28: 468-474.
- Guan, H., Liu, S., Duan, Y., Zhao, Y. 2007. Investigation of the electromagnetic characteristics of cement based composites filled with EPS. *Cem. Concr. Compos.* 29: 49–54.
- Gunaraj, V., Murugan, N. 1999. Application of response surface methodology for predicting weld bead quality in submerged arc welding of pipes. *J. Mater. Process. Technol.* 88: 266–275.
- Haha, M.B., Saout, G.L., Winnefeld, F., Lothenbach, B. 2011. Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag - Part I: Effect of MgO. *Cem. Concr. Res.* 41: 955–963.
- Haha, M.B., Lothenbach, B., Saout, G.L., Winnefeld, F. 2012. Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag - Part II: Effect of Al₂O₃. *Cem. Concr. Res.* 42: 74-83.
- Hansen, W. 1987. Drying Shrinkage Mechanisms in Portland Cement Paste. *Journal of the American Ceramic Society*, 70(5): 323-328.
- He, Z., Liu, B., Fu, Q., Chang, L., Gao, Z. 2012. Phase transformation and melting behavior of silica fumes. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 40(9): 1376-1382.
- He, J., Jie, Y., Zhang, J., Yu, Y., Zhang, G. 2013. Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites. *Cem. Concr. Compos.* 37: 108–118.
- Hiraskar, K.G., Patil, C. 2013. Use of Blast Furnace Slag Aggregate in Concrete. *International Journal Of Scientific & Engineering Research*, 4(5): 95-98.
- Hosseini, S., Soltani, S.M., Fennell, P.S., Choong, T.S.Y., Aroua, M.K. 2016. Production and applications of electric-arc-furnace slag as solid waste in environmental technologies: a review. *Environmental Technology Reviews*, 1-11.
- Hot, J., Cyr, M., Augeard, E., Eekhout, M. 2015. An investigation of CaSi silica fume characteristics and its possible utilization in cement-based and alkali-activated materials. *Constr. Build. Mater.* 101: 456-465.
- Hu, S., Wang, H., Zhang, G., Ding, Q. 2008. Bonding and abrasion resistance of geopolymeric repair material made with steel slag. *Cem. Concr. Compos.* 30: 239–244.
- Huang, X., Huang, T., Li, S., Muhammad, F., Xu, G., Zhao, Z., Yu, L., Yan, Y., Li, D., Jiao, B. 2016. Immobilization of chromite ore processing residue with alkali-activated blast furnace slag-based geopolymer. *Ceram. Int.* 42: 9538–9549.
- Ismail, Z.Z., Al-hashmi, E.A. 2008. Reuse of waste iron as a partial replacement of sand in concrete. *Waste Manage.* 28: 2048–2053.
- Izzat, A.M., Mohd, A., Mustafa Al Bakri, A.M., Kamarudin, H., Sandu, A.V., Ruzaidi, G.C.M., Faheem, M.T.M., Moga, L.M. 2013. Sulfuric acid attack on ordinary portland cement and geopolymer material. *Rev. Chim.* 64(9): 1011-1014.

- Jaarsveld, J.G.S., Deventer, J.S.J. 1999. Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based geopolymers. *Ind. Eng. Chem. Res.* 38: 3932-3941.
- Jin, F., Gu, K., Al-Tabbaa, A. 2014. Strength and drying shrinkage of reactive MgO modified alkali-activated slag paste. *Constr. Build. Mater.* 51: 395-404.
- Karunanithi, S., Anandan, S. 2014. Flexural toughness properties of reinforced steel fibre incorporated alkali activated slag concrete. *Advances in Civil Engineering*, 2014: 1-12.
- Kheradmand, M., Abdollahnejad, Z., Pacheco-torgal, F. 2017. Shrinkage performance of fly ash alkali-activated cement based binder mortars. *KSCE J. Civ. Eng.* 1-11.
- Khuri, A.I., Mukhopadhyay, S. 2010. Response surface methodology. *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat.* 2(2): 128-149.
- Kim, B.R., Lee, H.K., Kim, E., Lee, S.H. 2010. Intrinsic electromagnetic radiation shielding/absorbing characteristics of polyaniline-coated transparent thin films. *Synth. Met.* 160: 1838-1842.
- Kim, S.W., Jang, S.J., Kang, D.H., Ahn, K.L., Yun, H.D. 2015. Mechanical properties and eco-efficiency of steel fiber reinforced alkali-activated slag concrete. *Materials*, 8: 7309-7321.
- King, D. 2012. The effect of silica fume on the properties of concrete as defined in concrete society report 74, cementitious materials. 37th Conference on Our World In Concrete & Structures, 29-31 August, Singapore.
- Kockal, N.U. 2008. Effects of Lightweight Fly Ash Aggregate Properties on the Performance of Lightweight Concretes. PhD Thesis, Bogazici University, Istanbul, 307 p.
- Kockal, N.U., Ozturan, T. 2008. Properties of lightweight concretes made from lightweight fly ash aggregates. In: M.C. Limbachiya, H.Y. Kew (Editors), Excellence in Concrete Construction through Innovation, Taylor&Francis Group, pp.251-261, London.
- Koçkal, N.U. 2002. Akıcı ve çok akıcı betonlarda kuruma büzülmesine çimento ve katkı maddesi türünün etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 68 s.
- Koçkal, N.U., Oğuz, C. 2015. Alkali ile aktive edilmiş silis dumanlı ve zeolitli harçların özellikleri. 9. Ulusal Beton Kongresi, ss. 303-311, 16-18 Nisan, Antalya.
- Krivenko, P.V. 1994. Alkaline cements. Proceedings of the 1st International Conference on Alkaline Cements and Concretes, pp. 11-129, Kiev, Ukraine.
- Kumar, S., Kumar, R., Mehrotra, S.P. 2010. Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymer. *J. Mater. Sci.* 45: 607-615.
- Kwak J.S. 2005. Application of Taguchi and response surface methodologies for geometric error in surface grinding process. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 45: 327-334.
- Li, C., Sun, H., Li, L. 2010. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements. *Cem. Concr. Res.* 40: 1341-1349.

- Li, N., Farzadnia, N., Shi, C. 2017. Microstructural changes in alkali-activated slag mortars induced by accelerated carbonation. *Cem. Concr. Res.* 100: 214–226.
- Ma, Y., Ye, G. 2015. The shrinkage of alkali activated fly ash. *Cem. Concr. Res.* 68: 75–82.
- Mallicoat, S., Sarin, P., Kriven, W.M. 2005. Novel, alkali-bonded, ceramic filtration membranes. *Ceram. Eng. Sci. Proc.* 26: 37-44.
- Meshram, M.R., Agrawal, N.K., Sinha, B., Misra, P.S. 2004. Characterization of M-type barium hexagonal ferrite-based wide band microwave absorber. *J. Magn. Mater.* 271: 207–214.
- Mijarsh, M.J.A., Megat Johari, M.A., Ahmad, Z.A. 2015. Compressive strength of treated palm oil fuel ash based geopolymer mortar containing calcium hydroxide, aluminum hydroxide and silica fume as mineral additives. *Cem. Concr. Compos.* 60: 65–81.
- Mo, K.H., Yeoh, K.H., Bashar, I.B., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z. 2017. Shear behaviour and mechanical properties of steel fibre-reinforced cement-based and geopolymer oil palm shell lightweight aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 148: 369–375.
- Mozgawa, W., Deja, J. 2009. Spectroscopic studies of alkaline activated slag geopolymers. *J. Mol. Struct.* 924–926: 434–441.
- Muthusamy, S., Chung, D.D.L. 2010. Carbon-fiber cement-based materials for elektromagnetic shielding. *ACI Mater. J.* 107(6): 602-610.
- Nam, I.W., Lee, H.K. 2016. Synergistic effect of MWNT/fly ash incorporation on the EMI shielding/absorbing characteristics of cementitious materials. *Constr. Build. Mater.* 115: 651–661.
- Okoye, F.N., Prakash, S., Singh, N.B. 2017. Durability of fly ash based geopolymer concrete in the presence of silica fume. *J. Cleaner Prod.* 149: 1062-1067.
- Olutoge, F.A., Onugba, M.A., Oholi, A. 2016. Strength properties of concrete produced with iron filings as sand replacement. *British Journal of Applied Science & Technology*, 18 (3): 1-6.
- Pacheco-Torgal, F., Tam, V.W.Y., Labrincha, J.A., Ding, Y., de Brito J. 2013. Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, 624 p.
- Palanna, O.G. 2009. Engineering Chemistry. Tata McGraw-Hill Education, New Delhi, 629 p.
- Palomo, A., Palacios, M. 2003. Alkali-activated cementitious materials: Alternative matrices for the immobilisation of hazardous wastes Part II. Stabilisation of chromium and lead. *Cem. Concr. Res.* 33: 289-295.
- Papa, E., Medri, V., Kpogbemabou, D., Moriniere, V., Laumonier, J., Vaccari, A. 2016. Porosity and insulating properties of silica-fume based foams. *Energy Build.* 131: 223–232.
- Park, J.W., Ann, K.Y., Cho, C.G. 2015. Resistance of Alkali-Activated Slag Concrete to Chloride-Induced Corrosion. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 1-7.

- Pedro, D., de Brito J., Evangelista L. 2017. Evaluation of high-performance concrete with recycled aggregates: Use of densified silica fume as cement replacement. *Constr. Build. Mater.* 147: 803-814.
- Piatak, N.M., Seal, R.R., Hoppe, D.A., Green, C.J., Buszka, P.M. 2017. Slag: What is it good for? Utilization of steelmaking slag to remove phosphate and neutralize acid. IMWA, pp. 869-877, 25-30 June, Lappeenranta, Finland.
- Proctor, D.M., Fehling, K.A., Shay, E.C., Wittenborn, J.L., Green, J.J., Avent, C., Bigham, R.D., Connolly, M., Lee, B., Shepker, T.O., Zak, M.A. 2000. Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags. *Environ. Sci. Technol.* 34(8): 1576-1582.
- Provis J. L., Deventer, J.S.J. 2009. Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, 464 p.
- Puertas, F., Fernandez-Jimenez, A., Blanco-Varela, M.T. 2004. Pore solution in alkali-activated slag cement pastes. Relation to the composition and structure of calcium silicate hydrate. *Cem. Concr. Res.* 34: 139–148.
- Puertas, F., Palacios, M., Vazquez, T. 2006. Carbonation process of alkali-activated slag mortars. *J. Mater. Sci.* 41: 3071–3082.
- Rahier, H., Mele, B., Wastiels, J. 1996. Low-temperature synthesized aluminosilicate glasses. *Journal of Materials Science*, 31: 80-85.
- Reineix, A., Boijaud, A., Jecko, B., 1987. Electromagnetic pulse penetration into reinforced-concrete buildings. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 29(1): 72-78.
- Richardson, I.G., Groves, G.W. 1992. Microstructure and microanalysis of hardened cement pastes involving ground granulated blast-furnace slag. *Journal of Materials Science*, 27: 6204-6212.
- Rostami, M., Behfarnia, K. 2017. The effect of silica fume on durability of alkali activated slag concrete. *Constr. Build. Mater.* 134: 262–268.
- Sadowski, L. 2013. Methodology for assessing the probability of corrosion in concrete structures on the basis of half-cell potential and concrete resistivity measurements. *The Scientific World Journal*, 2013: 1-8.
- Santosh, P.H., Dwivedi, A.K., Chatterjee, A.M. 2017. Optimize properties of concrete with silica fume. *MAYFEB Journal of Materials Science*, 2: 1-4.
- Sayed, M., Zeedan, S.R. 2012. Green binding material using alkali activated blast furnace slag with silica fume. *HBRC Journal*, 8: 177–184.
- Shaikh, F.U.A. 2016. Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5: 277–287.
- Shi, Z.Q., Chung, D.D.L. 1995. Concrete for Magnetic Shielding. *Cem. Concr. Res.* 25(5): 939-944.
- Shi, C., Day, R.L. 1995. A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cement. *Cem. Concr. Res.* 25(6): 1333–1346.

- Shi, C., Xie, P. 1998. Interface between cement paste and quartz sand in alkali-activated slag mortars. *Cem. Concr. Res.* 28(6): 887–896.
- Shi, C., Krivenko, P.V., Roy, D. 2006. Alkali-Activated Cements and Concretes. Taylor & Francis, London, 376 p.
- Siddique, R., Khan M.I. 2011. Supplementary Cementing Materials. Springer, Berlin, 365 p.
- Singh, A.P., Mishra, M., Chandra, A., Dhawan, S.K. 2011. Graphene oxide/ferrofluid/cement composites for electromagnetic interference shielding application. *Nanotechnology*, 22: 1-9.
- Sofi, M., Deventer, J.S.J., Mendis, P.A. 2007. Bond performance of reinforcing bars in inorganic polymer concrete (IPC). *Journal of Materials Science*, 42: 3107–3116.
- Song, K.I., Song, J.K., Lee, B.Y., Yang, K.H. 2014. Carbonation characteristics of alkali-activated blast-furnace slag mortar. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2014: 1-11.
- Srinivas, T., Rao, N.V.R. 2017. Water absorption capacity of low calcium fly ash and slag based geopolymer concrete. *IJRCMCE*, 4: 52-55.
- Srinivasan, K., Sivakumar, A. 2013. Geopolymer binders: A need for future concrete construction. *ISRN Polymer Science*, 2013:1-8.
- Tailby, J., Mackenzie, K.J.D. 2010. Structure and mechanical properties of aluminosilicate geopolymer composites with portland cement and its constituent minerals. *Cem. Concr. Res.* 40: 787–794.
- Torres-Carrasco, M., Rodriguez-Puertas, C., Mar Alonso, M., Puertas, F. 2015. Alkali activated slag cements using waste glass as alternative activators. Rheological behaviour. *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidrio*, 54: 45–57.
- Tran, N.T., Pyo, S., Kim, D.J. 2015. Corrosion resistance of strain-hardening steel-fiber-reinforced cementitious composites. *Cem. Concr. Compos.* 63: 17-29.
- Vaclavik V., Dirner, V., Dvorsky, T., Daxner, J. 2012. The use of blast furnace slag. *Metallurgija*, 51(4): 461-464.
- Visintin, P., Mohamed Ali, M.S., Albitar, M., LUCAS, W. 2017. Shear behaviour of geopolymer concrete beams without stirrups. *Constr. Build. Mater.* 148: 10-21.
- Wang, S.D., Scrivener, K.L. 1995. Hydration products of alkali activated slag cement. *Cem. Concr. Res.* 25(3): 561-571.
- Wang, B., Guo, Z., Han, Y., Zhang, T. 2013. Electromagnetic wave absorbing properties of multi-walled carbon nanotube/cement composites. *Constr. Build. Mater.* 46: 98–103.
- Wardhono, A., Gunasekara, C., Law, D.W., Setunge, S. 2017. Comparison of long term performance between alkali activated slag and fly ash geopolymer concretes. *Constr. Build. Mater.* 143: 272-279.
- Weigu, S., Yiheng, W., Tao, Z., Mingkai, Z., Jiasheng, L., Xiaoyu, C. 2011. Magnesia modification of alkali-activated slag fly ash cement. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 26(1): 121-125.

- Weiss, J., Lura, P., Rajabipour, F., Sant, G. 2008. Performance of shrinkage-reducing admixtures at different humidities and at early ages, *ACI Mater. J.* 105(5): 478-486.
- Wen, S., Chung, D.D.L. 2004. Electromagnetic interference shielding reaching 70 dB in steel fiber cement. *Cem. Concr. Res.* 34: 329–332.
- White, C.E., Daemen, L.L., Hartl, M., Page, K. 2015. Intrinsic differences in atomic ordering of calcium (alumino)silicate hydrates in conventional and alkali-activated cements. *Cem. Concr. Res.* 67: 66-73.
- Wianglor, K., Sinthupinyo, S., Piyaworapaiboon, M., Chaipanich, A. 2017. Effect of alkali-activated metakaolin cement on compressive strength of mortars. *Appl. Clay Sci.* 141: 272-279.
- Yang, H., Li, J., Ye, Q., Zhang, X. 2002. Research on absorbing EMW properties of steel-fiber concrete. *J. Funct. Mater.* 33(3):341–3 (in Chinese).
- Yao, W., Xiong, G., Yang, Y., Huang, H., Zhou, Y. 2017. Effect of silica fume and colloidal graphite additions on the EMI shielding effectiveness of nickel fiber cement based composites. *Constr. Build. Mater.* 150: 825–832.
- Ye, H., Radlinska, A. 2016. Shrinkage mechanisms of alkali-activated slag. *Cem. Concr. Res.* 88: 126–135.
- Ye, H., Cartwright, C., Rajabipour, F., Radlinska, A. 2017. Understanding the drying shrinkage performance of alkali-activated slag mortars. *Cem. Concr. Compos.* 76: 13-24.
- Yildirim, I.Z., Prezzi, M. 2011. Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. *Advances in Civil Engineering*, 2011: 1-13.
- Zhang, X., Wei, S. 2012. Electromagnetic shielding and absorption properties of fiber reinforced cementitious composites. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 27(1): 172-176.
- Zornoza, E., Catala, G., Jimenez, F., Andion, L.G., Garces, P., 2010. Electromagnetic interference shielding with Portland cement paste containing carbon materials and processed fly ash, *Materiales De Construcción*, 60 (300): 21-32.

8. EKLER

EK-A

Geçmiş Veri Tasarımı ile Tepkilerin Gerçek ve Tahmini Değerleri
(Birinci Amaç için)

Çizelge A.1. Kuru yığın yoğunluk tahmini ve gerçek değerleri

İşlem Sırası	Agrega miktarı	Bağlayıcı miktarı	Agrega tipi	Kür koşulları	Gerçek Değer	Tahmini Değer	Kalan	Hata
1	0	0	C	NK	2,06	2,07	-8,183E-003	0,49
2	2,5	0	C	NK	2,04	2,08	-0,044	1,96
3	5	0	C	NK	2,10	2,10	1,933E-003	0,00
4	7,5	0	C	NK	2,11	2,11	-1,142E-003	0,00
5	10	0	C	NK	2,15	2,12	0,027	1,40
6	10	0	D	NK	2,18	2,17	7,673E-003	0,46
7	20	0	D	NK	2,31	2,32	-0,011	0,43
8	30	0	D	NK	2,46	2,45	0,011	0,41
9	40	0	D	NK	2,57	2,56	0,013	0,39
10	0	20	C	NK	2,06	2,04	0,020	0,97
11	2,5	20	C	NK	2,04	2,05	-0,014	0,49
12	5	20	C	NK	2,04	2,07	-0,026	1,47
13	7,5	20	C	NK	2,05	2,08	-0,027	1,46
14	10	20	C	NK	2,08	2,09	-6,383E-003	0,48
15	10	20	D	NK	2,20	2,17	0,028	1,36
16	20	20	D	NK	2,30	2,31	-0,011	0,43
17	30	20	D	NK	2,43	2,43	-3,892E-004	0,00
18	40	20	D	NK	2,55	2,53	0,020	0,78
19	0	40	C	NK	2,04	2,03	0,013	0,49
20	2,5	40	C	NK	2,06	2,04	0,022	0,97
21	5	40	C	NK	2,07	2,05	0,022	0,97
22	7,5	40	C	NK	2,09	2,06	0,033	1,44
23	10	40	C	NK	2,08	2,06	0,016	0,96
24	10	40	D	NK	2,19	2,19	4,817E-003	0,00
25	20	40	D	NK	2,29	2,32	-0,026	1,31
26	30	40	D	NK	2,41	2,43	-0,016	0,83
27	40	40	D	NK	2,49	2,52	-0,027	1,20
28	0	60	C	NK	2,02	2,03	-8,216E-003	0,50
29	2,5	60	C	NK	2,05	2,04	0,013	0,49
30	5	60	C	NK	2,06	2,04	0,015	0,97
31	7,5	60	C	NK	2,04	2,05	-0,011	0,49
32	10	60	C	NK	2,02	2,06	-0,037	1,98
33	10	60	D	NK	2,20	2,21	-0,013	0,45
34	20	60	D	NK	2,34	2,34	4,977E-003	0,00
35	30	60	D	NK	2,44	2,44	3,155E-003	0,00
36	40	60	D	NK	2,53	2,52	0,011	0,40
37	0	0	C	SK	2,13	2,12	0,013	0,47
38	2,5	0	C	SK	2,11	2,13	-0,022	0,95
39	5	0	C	SK	2,16	2,15	0,015	0,46
40	7,5	0	C	SK	2,17	2,16	0,013	0,46

(devamı arkada)

Çizelge A.1'in devamı.

41	10	0	C	SK	2,20	2,17	0,032	1,36
42	10	0	D	SK	2,26	2,24	0,016	0,88
43	20	0	D	SK	2,38	2,39	-7,845E-003	0,42
44	30	0	D	SK	2,52	2,51	7,977E-003	0,40
45	40	0	D	SK	2,60	2,62	-0,016	0,77
46	0	20	C	SK	2,08	2,08	-1,382E-004	0,00
47	2,5	20	C	SK	2,08	2,09	-0,012	0,48
48	5	20	C	SK	2,07	2,10	-0,034	1,45
49	7,5	20	C	SK	2,08	2,11	-0,033	1,44
50	10	20	C	SK	2,13	2,12	8,006E-003	0,47
51	10	20	D	SK	2,22	2,23	-0,014	0,45
52	20	20	D	SK	2,33	2,37	-0,039	1,72
53	30	20	D	SK	2,49	2,48	5,750E-003	0,40
54	40	20	D	SK	2,57	2,58	-9,683E-003	0,39
55	0	40	C	SK	2,06	2,06	2,517E-003	0,00
56	2,5	40	C	SK	2,08	2,07	0,012	0,48
57	5	40	C	SK	2,09	2,08	0,014	0,48
58	7,5	40	C	SK	2,11	2,08	0,026	1,42
59	10	40	C	SK	2,10	2,09	9,484E-003	0,48
60	10	40	D	SK	2,25	2,24	0,012	0,44
61	20	40	D	SK	2,39	2,36	0,026	1,26
62	30	40	D	SK	2,49	2,47	0,019	0,80
63	40	40	D	SK	2,54	2,56	-0,018	0,79
64	0	60	C	SK	2,03	2,05	-0,019	0,99
65	2,5	60	C	SK	2,07	2,06	0,013	0,48
66	5	60	C	SK	2,09	2,06	0,026	1,44
67	7,5	60	C	SK	2,05	2,07	-0,019	0,98
68	10	60	C	SK	2,03	2,07	-0,043	1,97
69	10	60	D	SK	2,23	2,26	-0,027	1,35
70	20	60	D	SK	2,39	2,37	0,016	0,84
71	30	60	D	SK	2,49	2,47	0,018	0,80
72	40	60	D	SK	2,56	2,55	0,010	0,39

Çizelge A.2. Su emme yüzdesi tahmini ve gerçek değerleri

İşlem Sırası	Agrega miktarı	Bağlayıcı miktarı	Agrega tipi	Kür koşulları	Gerçek Değer	Tahmini Değer	Kalan	Hata
1	0	0	C	NK	12,30	12,81	-0,51	4,15
2	2,5	0	C	NK	13,20	12,66	0,54	4,09
3	5	0	C	NK	12,30	12,53	-0,23	1,87
4	7,5	0	C	NK	12,40	12,41	-0,012	0,08
5	10	0	C	NK	13,40	12,32	1,08	8,06
6	10	0	D	NK	12,00	12,03	-0,028	0,25
7	20	0	D	NK	11,30	11,15	0,15	1,33
8	30	0	D	NK	10,10	10,59	-0,49	4,85
9	40	0	D	NK	10,10	10,36	-0,26	2,57
10	0	20	C	NK	13,40	13,39	0,011	0,07
11	2,5	20	C	NK	13,20	13,20	-1,639E-003	0,00
12	5	20	C	NK	13,10	13,03	0,065	0,53
13	7,5	20	C	NK	12,70	12,89	-0,19	1,50
14	10	20	C	NK	12,30	12,76	-0,46	3,74
15	10	20	D	NK	12,60	12,38	0,22	1,75
16	20	20	D	NK	12,00	11,37	0,63	5,25
17	30	20	D	NK	10,50	10,68	-0,18	1,71
18	40	20	D	NK	9,70	10,31	-0,61	6,29
19	0	40	C	NK	13,30	13,65	-0,35	2,63
20	2,5	40	C	NK	13,50	13,43	0,071	0,52
21	5	40	C	NK	13,50	13,23	0,27	2,00
22	7,5	40	C	NK	13,10	13,05	0,051	0,38
23	10	40	C	NK	12,50	12,89	-0,39	3,12
24	10	40	D	NK	12,00	12,41	-0,41	3,42
25	20	40	D	NK	11,50	11,27	0,23	2,00
26	30	40	D	NK	10,60	10,45	0,15	1,42
27	40	40	D	NK	10,60	9,95	0,65	6,13
28	0	60	C	NK	13,40	13,60	-0,20	1,49
29	2,5	60	C	NK	14,20	13,34	0,86	6,06
30	5	60	C	NK	13,00	13,11	-0,11	0,85
31	7,5	60	C	NK	12,30	12,90	-0,60	4,88
32	10	60	C	NK	12,80	12,70	0,097	0,78
33	10	60	D	NK	11,90	12,13	-0,23	1,93
34	20	60	D	NK	10,90	10,86	0,042	0,37
35	30	60	D	NK	9,80	9,90	-0,10	1,02
36	40	60	D	NK	9,50	9,27	0,23	2,42
37	0	0	C	SK	9,00	10,47	-1,47	16,33
38	2,5	0	C	SK	10,60	10,36	0,24	2,26
39	5	0	C	SK	9,40	10,28	-0,88	9,36
40	7,5	0	C	SK	10,00	10,21	-0,21	2,10
41	10	0	C	SK	11,60	10,17	1,43	12,33
42	10	0	D	SK	9,00	9,41	-0,41	4,56
43	20	0	D	SK	8,90	8,73	0,17	1,91
44	30	0	D	SK	8,20	8,37	-0,17	2,07
45	40	0	D	SK	8,90	8,33	0,57	6,40
46	0	20	C	SK	12,20	11,56	0,64	5,25
47	2,5	20	C	SK	12,10	11,42	0,68	5,62
48	5	20	C	SK	11,70	11,31	0,39	3,33

(devamı arkada)

Çizelge A.2'nin devamı.

49	7,5	20	C	SK	11,10	11,21	-0,11	0,99
50	10	20	C	SK	10,60	11,13	-0,53	5,00
51	10	20	D	SK	10,90	10,28	0,62	5,69
52	20	20	D	SK	10,90	9,46	1,44	13,21
53	30	20	D	SK	8,30	8,97	-0,67	8,07
54	40	20	D	SK	8,30	8,80	-0,50	6,02
55	0	40	C	SK	12,00	12,34	-0,34	2,83
56	2,5	40	C	SK	12,50	12,17	0,33	2,64
57	5	40	C	SK	12,20	12,02	0,18	1,48
58	7,5	40	C	SK	11,80	11,89	-0,088	0,76
59	10	40	C	SK	11,10	11,78	-0,68	6,13
60	10	40	D	SK	10,30	10,83	-0,53	5,15
61	20	40	D	SK	9,20	9,89	-0,69	7,50
62	30	40	D	SK	8,70	9,26	-0,56	6,44
63	40	40	D	SK	9,60	8,96	0,64	6,67
64	0	60	C	SK	13,20	12,81	0,39	2,95
65	2,5	60	C	SK	13,40	12,60	0,80	5,97
66	5	60	C	SK	11,90	12,42	-0,52	4,37
67	7,5	60	C	SK	11,80	12,25	-0,45	3,81
68	10	60	C	SK	12,30	12,11	0,19	1,54
69	10	60	D	SK	11,20	11,07	0,13	1,16
70	20	60	D	SK	10,00	9,99	6,386E-003	0,10
71	30	60	D	SK	9,20	9,24	-0,038	0,43
72	40	60	D	SK	8,80	8,80	-3,775E-003	0,00

Çizelge A.3. Basınç dayanımı tahmini ve gerçek değerleri

İşlem Sırası	Agrega miktarı	Bağlayıcı miktarı	Agrega tipi	Kür koşulları	Gerçek Değer	Tahmini Değer	Kalan	Hata
1	0	0	C	NK	29,10	31,21	-2,11	7,25
2	2,5	0	C	NK	30,20	31,22	-1,02	3,38
3	5	0	C	NK	32,70	31,97	0,73	2,23
4	7,5	0	C	NK	33,50	33,47	0,034	0,09
5	10	0	C	NK	37,10	35,71	1,39	3,75
6	10	0	D	NK	34,70	33,80	0,90	2,59
7	20	0	D	NK	35,70	34,30	1,40	3,92
8	30	0	D	NK	36,40	36,12	0,28	0,77
9	40	0	D	NK	40,10	39,62	0,48	1,20
10	0	20	C	NK	41,40	36,72	4,68	11,30
11	2,5	20	C	NK	38,20	35,38	2,82	7,38
12	5	20	C	NK	34,40	34,76	-0,36	1,05
13	7,5	20	C	NK	30,70	34,86	-4,16	13,55
14	10	20	C	NK	30,10	35,69	-5,59	18,57
15	10	20	D	NK	36,90	39,22	-2,32	6,29
16	20	20	D	NK	34,70	36,21	-1,51	4,35
17	30	20	D	NK	34,40	34,17	0,23	0,67
18	40	20	D	NK	33,40	33,44	-0,037	0,12
19	0	40	C	NK	37,20	39,38	-2,18	5,86
20	2,5	40	C	NK	34,70	37,51	-2,81	8,10
21	5	40	C	NK	39,80	36,33	3,47	8,72
22	7,5	40	C	NK	41,90	35,86	6,04	14,42
23	10	40	C	NK	39,70	36,09	3,61	9,09
24	10	40	D	NK	37,60	36,11	1,49	3,96
25	20	40	D	NK	31,10	32,86	-1,76	5,66
26	30	40	D	NK	28,80	30,21	-1,41	4,90
27	40	40	D	NK	28,30	28,52	-0,22	0,78
28	0	60	C	NK	31,20	32,47	-1,27	4,07
29	2,5	60	C	NK	31,10	30,89	0,21	0,68
30	5	60	C	NK	28,80	29,98	-1,18	4,10
31	7,5	60	C	NK	28,40	29,74	-1,34	4,72
32	10	60	C	NK	29,20	30,18	-0,98	3,36
33	10	60	D	NK	18,10	17,74	0,36	1,99
34	20	60	D	NK	18,40	17,51	0,89	4,84
35	30	60	D	NK	19,10	17,53	1,57	8,22
36	40	60	D	NK	17,80	18,14	-0,34	1,91
37	0	0	C	SK	44,40	47,12	-2,72	6,13
38	2,5	0	C	SK	48,40	47,54	0,86	1,78
39	5	0	C	SK	49,10	48,57	0,53	1,08
40	7,5	0	C	SK	46,20	50,21	-4,01	8,68
41	10	0	C	SK	58,70	52,47	6,23	10,61
42	10	0	D	SK	49,20	49,21	-6,252E-003	0,02
43	20	0	D	SK	50,20	51,32	-1,12	2,23
44	30	0	D	SK	52,00	52,74	-0,74	1,42
45	40	0	D	SK	52,70	53,79	-1,09	2,07
46	0	20	C	SK	52,90	48,11	4,79	9,05
47	2,5	20	C	SK	50,40	47,19	3,21	6,37
48	5	20	C	SK	46,40	46,87	-0,47	1,01

(devamı arkada)

Çizelge A.3'ün devamı.

49	7.5	20	C	SK	45.40	47.14	-1.74	3.83
50	10	20	C	SK	45.10	48.01	-2.91	6.45
51	10	20	D	SK	51.00	50.92	0.079	0.16
52	20	20	D	SK	52.40	49.62	2.78	5.31
53	30	20	D	SK	46.70	47.25	-0.55	1.18
54	40	20	D	SK	45.20	44.16	1.04	2.30
55	0	40	C	SK	41.60	45.55	-3.95	9.50
56	2.5	40	C	SK	40.30	44.13	-3.83	9.50
57	5	40	C	SK	42.20	43.27	-1.07	2.54
58	7.5	40	C	SK	43.50	42.99	0.51	1.17
59	10	40	C	SK	43.20	43.28	-0.080	0.19
60	10	40	D	SK	42.80	43.41	-0.61	1.43
61	20	40	D	SK	42.50	41.95	0.55	1.29
62	30	40	D	SK	40.90	39.06	1.84	4.50
63	40	40	D	SK	35.50	35.10	0.40	1.13
64	0	60	C	SK	34.30	32.73	1.57	4.58
65	2.5	60	C	SK	33.50	31.61	1.89	5.64
66	5	60	C	SK	32.50	31.04	1.46	4.49
67	7.5	60	C	SK	30.20	31.02	-0.82	2.72
68	10	60	C	SK	32.10	31.55	0.55	1.71
69	10	60	D	SK	20.10	19.94	0.16	0.80
70	20	60	D	SK	20.20	21.59	-1.39	6.88
71	30	60	D	SK	20.40	21.46	-1.06	5.20
72	40	60	D	SK	19.60	19.88	-0.28	1.43

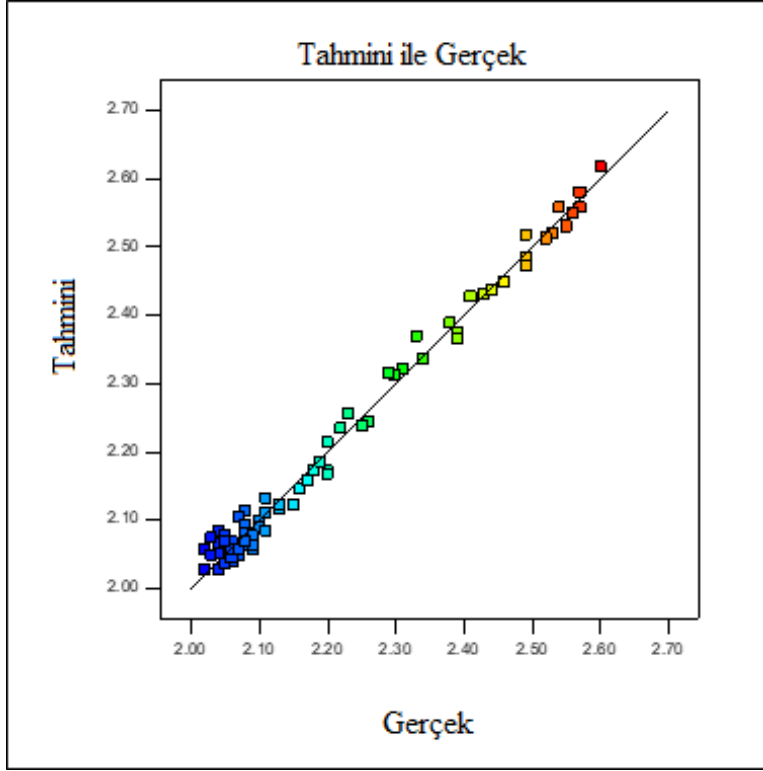
Çizelge A.4. Eğilmede çekme dayanımı tahmini ve gerçek değerleri

İşlem Sırası	Agrega miktarı	Bağlayıcı miktarı	Agrega tipi	Kür koşulları	Gerçek Değer	Tahmini Değer	Kalan	Hata
1	0	0	C	NK	2,40	2,39	0,014	0,42
2	2,5	0	C	NK	3,20	3,17	0,032	0,94
3	5	0	C	NK	3,50	3,66	-0,16	4,57
4	7,5	0	C	NK	3,80	3,87	-0,075	1,84
5	10	0	C	NK	4,20	3,79	0,41	9,76
6	10	0	D	NK	3,70	3,61	0,088	2,43
7	20	0	D	NK	3,60	3,54	0,059	1,67
8	30	0	D	NK	3,90	3,85	0,048	1,28
9	40	0	D	NK	4,10	4,36	-0,26	6,34
10	0	20	C	NK	3,80	3,45	0,35	9,21
11	2,5	20	C	NK	3,90	4,10	-0,20	5,13
12	5	20	C	NK	4,20	4,44	-0,24	5,71
13	7,5	20	C	NK	4,00	4,49	-0,49	12,25
14	10	20	C	NK	4,17	4,23	-0,062	1,44
15	10	20	D	NK	4,55	4,81	-0,26	5,71
16	20	20	D	NK	4,50	4,49	0,012	0,22
17	30	20	D	NK	4,60	4,35	0,25	5,43
18	40	20	D	NK	4,40	4,21	0,19	4,32
19	0	40	C	NK	4,30	3,80	0,50	11,63
20	2,5	40	C	NK	4,40	4,44	-0,036	0,91
21	5	40	C	NK	4,80	4,76	0,037	0,83
22	7,5	40	C	NK	4,70	4,78	-0,078	1,70
23	10	40	C	NK	4,70	4,48	0,22	4,68
24	10	40	D	NK	4,90	4,98	-0,075	1,63
25	20	40	D	NK	4,80	4,93	-0,13	2,71
26	30	40	D	NK	4,90	4,87	0,028	0,61
27	40	40	D	NK	4,60	4,62	-0,018	0,43
28	0	60	C	NK	2,90	3,05	-0,15	5,17
29	2,5	60	C	NK	3,50	3,81	-0,31	8,86
30	5	60	C	NK	4,30	4,25	0,053	1,16
31	7,5	60	C	NK	4,30	4,36	-0,064	1,40
32	10	60	C	NK	4,40	4,15	0,25	5,68
33	10	60	D	NK	3,90	3,72	0,18	4,62
34	20	60	D	NK	4,60	4,48	0,12	2,61
35	30	60	D	NK	4,80	5,04	-0,24	5,00
36	40	60	D	NK	5,20	5,20	2,826E-003	0,00
37	0	0	C	SK	3,60	4,33	-0,73	20,28
38	2,5	0	C	SK	5,70	5,31	0,39	6,84
39	5	0	C	SK	5,90	5,98	-0,078	1,36
40	7,5	0	C	SK	6,10	6,34	-0,24	3,93
41	10	0	C	SK	6,80	6,38	0,42	6,18
42	10	0	D	SK	4,90	4,66	0,24	4,90
43	20	0	D	SK	5,30	5,51	-0,21	3,96
44	30	0	D	SK	6,40	6,35	0,046	0,78
45	40	0	D	SK	7,00	7,00	-3,706E-003	0,00
46	0	20	C	SK	4,80	4,91	-0,11	2,29
47	2,5	20	C	SK	6,40	5,71	0,69	10,78
48	5	20	C	SK	6,70	6,19	0,51	7,61

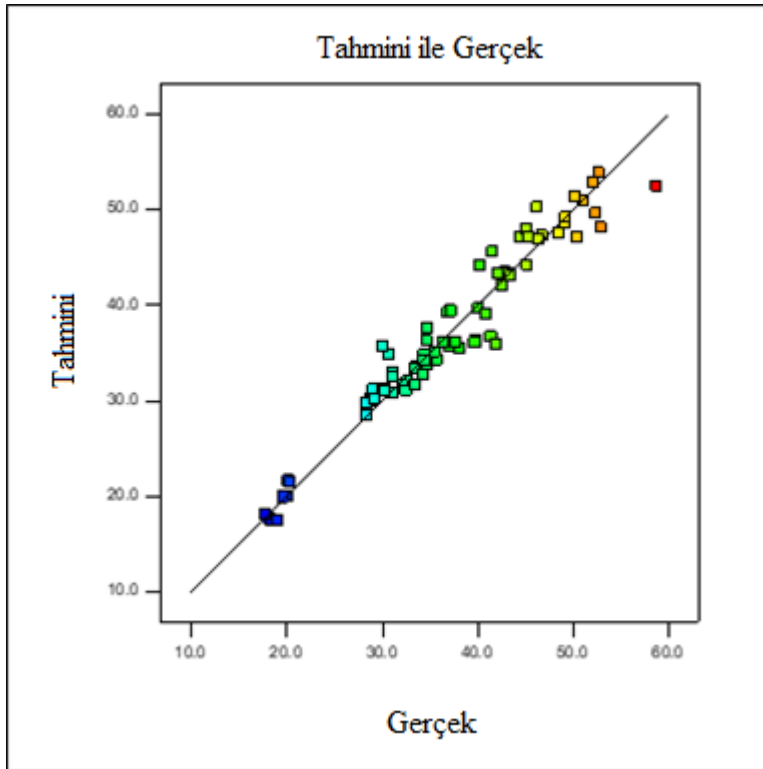
(devamı arkada)

Çizelge A.4'ün devamı.

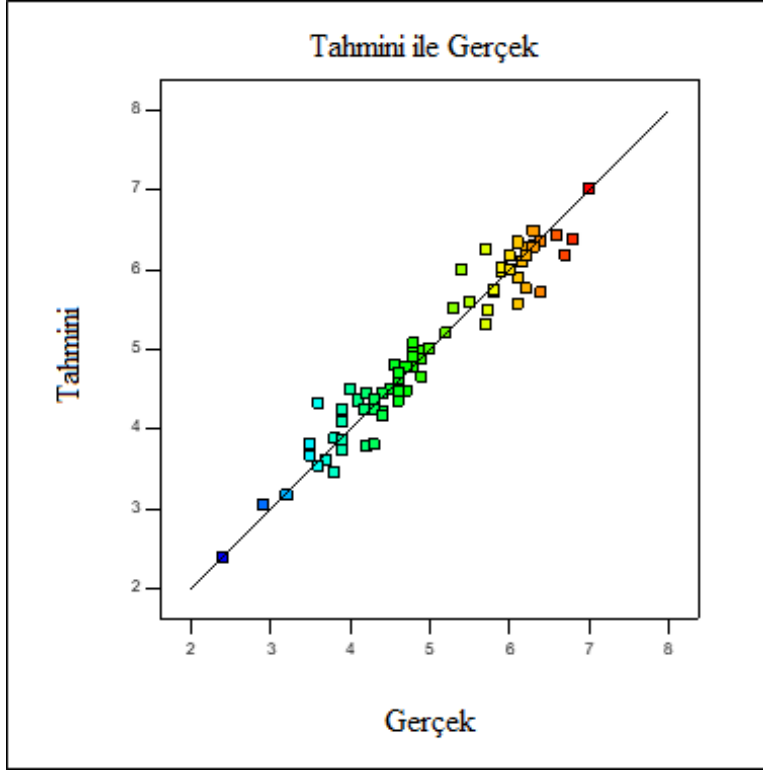
49	7,5	20	C	SK	6,10	6,34	-0,24	3,93
50	10	20	C	SK	6,00	6,16	-0,16	2,67
51	10	20	D	SK	5,50	5,60	-0,099	1,82
52	20	20	D	SK	5,90	6,03	-0,13	2,20
53	30	20	D	SK	6,20	6,26	-0,063	0,97
54	40	20	D	SK	6,16	6,10	0,056	0,97
55	0	40	C	SK	5,00	5,01	-9,689E-003	0,20
56	2,5	40	C	SK	6,20	5,76	0,44	7,10
57	5	40	C	SK	6,20	6,18	0,025	0,32
58	7,5	40	C	SK	5,70	6,26	-0,56	9,82
59	10	40	C	SK	5,40	6,00	-0,60	11,11
60	10	40	D	SK	5,80	5,74	0,056	1,03
61	20	40	D	SK	6,30	6,29	0,014	0,16
62	30	40	D	SK	6,60	6,43	0,17	2,58
63	40	40	D	SK	6,00	5,99	5,629E-003	0,17
64	0	60	C	SK	3,90	4,25	-0,35	8,97
65	2,5	60	C	SK	4,80	5,08	-0,28	5,83
66	5	60	C	SK	6,10	5,57	0,53	8,69
67	7,5	60	C	SK	5,80	5,71	0,092	1,55
68	10	60	C	SK	5,73	5,50	0,23	4,01
69	10	60	D	SK	4,60	4,71	-0,11	2,39
70	20	60	D	SK	6,10	5,89	0,21	3,44
71	30	60	D	SK	6,30	6,48	-0,18	2,86
72	40	60	D	SK	6,30	6,30	4,596E-003	0,00



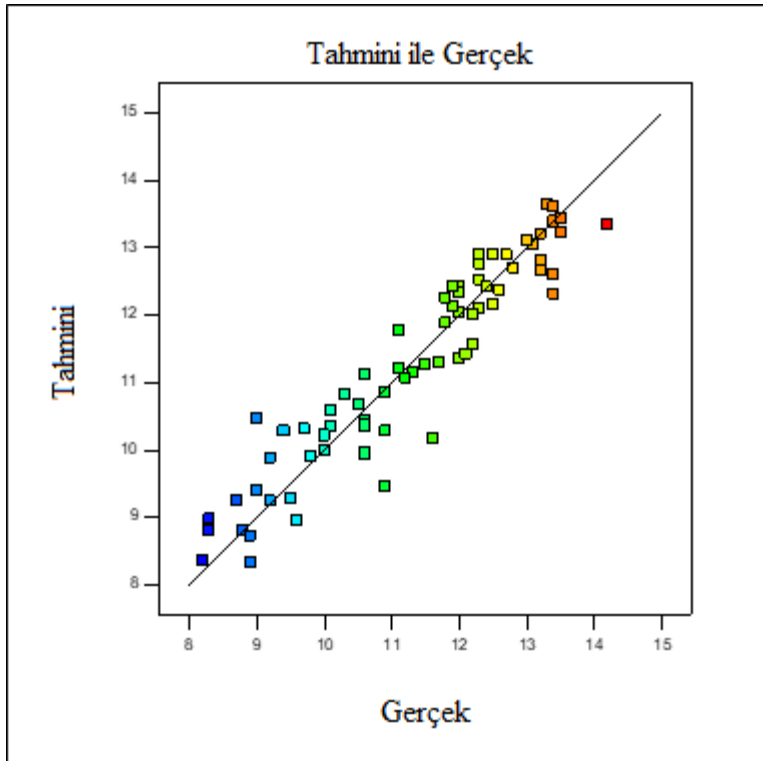
Şekil A.1. Kuru yığın yoğunluk tahmini ve gerçek değerleri



Şekil A.2. Basınç dayanımı tahmini ve gerçek değerleri



Şekil A.3. Eğilmede çekme dayanımı tahmini ve gerçek değerleri



Şekil A.4. Su emme yüzdesi tahmini ve gerçek değerleri

EK-B

Geçmiş Veri Tasarımı ile Tepkilerin Gerçek ve Tahmini Değerleri
(İkinci Amaç için)

Çizelge B.1. Kuru yığın yoğunluk tahmini ve gerçek değerleri

İşlem Sırası	Agrega miktarı	Bağlayıcı miktarı	Agrega tipi	Gerçek Değer	Tahmini Değer	Kalan	Hata
1	0	0	C	2,06	2,06	2,867E-003	0,00
2	2,5	0	C	2,04	2,07	-0,031	1,47
3	5	0	C	2,10	2,09	0,015	0,48
4	7,5	0	C	2,11	2,10	0,011	0,47
5	10	0	C	2,15	2,11	0,037	1,86
6	10	0	D	2,18	2,18	4,075E-003	0,00
7	20	0	D	2,31	2,31	2,692E-003	0,00
8	30	0	D	2,46	2,44	0,021	0,81
9	40	0	D	2,57	2,57	-7,500E-005	0,00
10	0	20	C	2,06	2,05	0,012	0,49
11	2,5	20	C	2,04	2,06	-0,019	0,98
12	5	20	C	2,04	2,07	-0,030	1,47
13	7,5	20	C	2,05	2,08	-0,032	1,46
14	10	20	C	2,08	2,09	-0,013	0,48
15	10	20	D	2,20	2,19	0,011	0,45
16	20	20	D	2,30	2,31	-9,436E-003	0,43
17	30	20	D	2,43	2,43	-6,389E-005	0,00
18	40	20	D	2,55	2,55	-6,917E-004	0,00
19	0	40	C	2,04	2,04	1,711E-003	0,00
20	2,5	40	C	2,06	2,05	0,013	0,49
21	5	40	C	2,07	2,06	0,014	0,48
22	7,5	40	C	2,09	2,06	0,026	1,44
23	10	40	C	2,08	2,07	7,089E-003	0,48
24	10	40	D	2,19	2,20	-0,012	0,46
25	20	40	D	2,29	2,31	-0,022	0,87
26	30	40	D	2,41	2,42	-0,011	0,41
27	40	40	D	2,49	2,53	-0,041	1,61
28	0	60	C	2,02	2,03	-8,867E-003	0,50
29	2,5	60	C	2,05	2,03	0,015	0,98
30	5	60	C	2,06	2,04	0,019	0,97
31	7,5	60	C	2,04	2,05	-6,767E-003	0,49
32	10	60	C	2,02	2,05	-0,033	1,49
33	10	60	D	2,20	2,21	-0,015	0,45
34	20	60	D	2,34	2,31	0,026	1,28
35	30	60	D	2,44	2,41	0,027	1,23
36	40	60	D	2,53	2,51	0,018	0,79

Çizelge B.2. Su emme yüzdesi tahmini ve gerçek değerleri

İşlem Sırası	Agrega miktarı	Bağlayıcı miktarı	Agrega tipi	Gerçek Değer	Tahmini Değer	Kalan	Hata
1	0	0	C	12,30	13,32	-1,02	8,29
2	2,5	0	C	13,20	13,13	0,071	0,53
3	5	0	C	12,30	12,94	-0,64	5,20
4	7,5	0	C	12,40	12,75	-0,35	2,82
5	10	0	C	13,40	12,57	0,83	6,19
6	10	0	D	12,00	12,01	-0,014	0,08
7	20	0	D	11,30	11,26	0,035	0,35
8	30	0	D	10,10	10,52	-0,42	4,16
9	40	0	D	10,10	9,77	0,33	3,27
10	0	20	C	13,40	13,35	0,048	0,37
11	2,5	20	C	13,20	13,16	0,036	0,30
12	5	20	C	13,10	12,98	0,12	0,92
13	7,5	20	C	12,70	12,79	-0,090	0,71
14	10	20	C	12,30	12,60	-0,30	2,44
15	10	20	D	12,60	12,05	0,55	4,37
16	20	20	D	12,00	11,30	0,70	5,83
17	30	20	D	10,50	10,55	-0,052	0,48
18	40	20	D	9,70	9,80	-0,10	1,03
19	0	40	C	13,30	13,39	-0,087	0,68
20	2,5	40	C	13,50	13,20	0,30	2,22
21	5	40	C	13,50	13,01	0,49	3,63
22	7,5	40	C	13,10	12,83	0,27	2,06
23	10	40	C	12,50	12,64	-0,14	1,12
24	10	40	D	12,00	12,08	-0,085	0,67
25	20	40	D	11,50	11,34	0,16	1,39
26	30	40	D	10,60	10,59	0,013	0,09
27	40	40	D	10,60	9,84	0,76	7,17
28	0	60	C	13,40	13,42	-0,023	0,15
29	2,5	60	C	14,20	13,24	0,96	6,76
30	5	60	C	13,00	13,05	-0,048	0,38
31	7,5	60	C	12,30	12,86	-0,56	4,55
32	10	60	C	12,80	12,67	0,13	1,02
33	10	60	D	11,90	12,12	-0,22	1,85
34	20	60	D	10,90	11,37	-0,47	4,31
35	30	60	D	9,80	10,62	-0,82	8,37
36	40	60	D	9,50	9,87	-0,37	3,89

Çizelge B.3. Basınç dayanımı tahmini ve gerçek değerleri

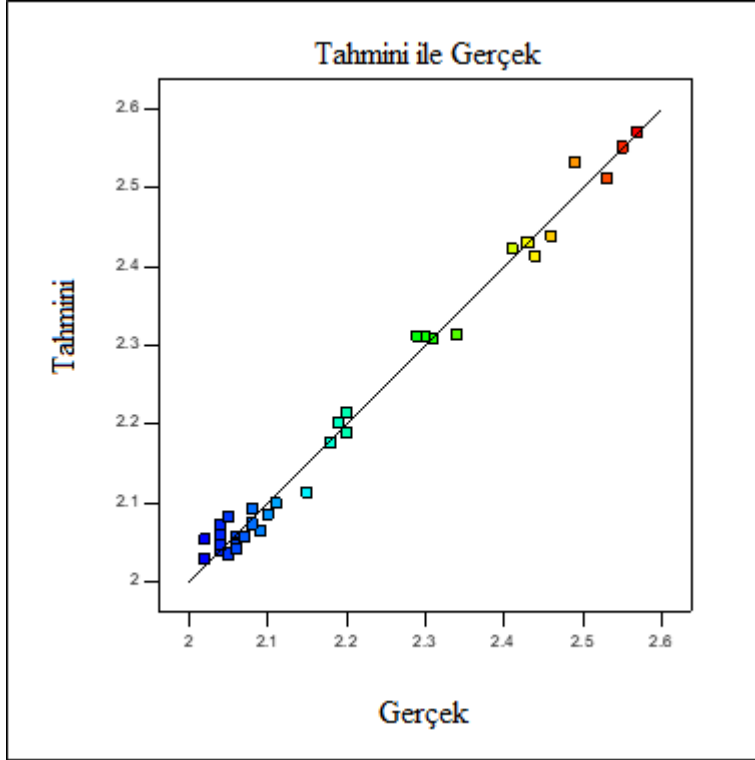
İşlem Sırası	Agrega miktarı	Bağlayıcı miktarı	Agrega tipi	Gerçek Değer	Tahmini Değer	Kalan	Hata
1	0	0	C	29,10	31,58	-2,48	8,52
2	2,5	0	C	30,20	31,64	-1,44	4,77
3	5	0	C	32,70	31,77	0,93	2,84
4	7,5	0	C	33,50	31,97	1,53	4,57
5	10	0	C	37,10	32,24	4,86	13,10
6	10	0	D	34,70	35,99	-1,29	3,72
7	20	0	D	35,70	35,46	0,24	0,67
8	30	0	D	36,40	36,03	0,37	1,02
9	40	0	D	40,10	37,71	2,39	5,96
10	0	20	C	41,40	37,16	4,24	10,24
11	2,5	20	C	38,20	37,03	1,17	3,06
12	5	20	C	34,40	36,96	-2,56	7,44
13	7,5	20	C	30,70	36,96	-6,26	20,39
14	10	20	C	30,10	37,03	-6,93	23,02
15	10	20	D	36,90	36,97	-0,066	0,19
16	20	20	D	34,70	35,65	-0,95	2,74
17	30	20	D	34,40	35,44	-1,04	3,02
18	40	20	D	33,40	36,32	-2,92	8,74
19	0	40	C	37,20	37,09	0,11	0,30
20	2,5	40	C	34,70	36,76	-2,06	5,94
21	5	40	C	39,80	36,49	3,31	8,32
22	7,5	40	C	41,90	36,30	5,60	13,37
23	10	40	C	39,70	36,17	3,53	8,89
24	10	40	D	37,60	32,29	5,31	14,12
25	20	40	D	31,10	30,19	0,91	2,93
26	30	40	D	28,80	29,19	-0,39	1,35
27	40	40	D	28,30	29,29	-0,99	3,50
28	0	60	C	31,20	31,37	-0,17	0,54
29	2,5	60	C	31,10	30,84	0,26	0,84
30	5	60	C	28,80	30,38	-1,58	5,49
31	7,5	60	C	28,40	29,99	-1,59	5,60
32	10	60	C	29,20	29,66	-0,46	1,58
33	10	60	D	18,10	21,97	-3,87	21,38
34	20	60	D	18,40	19,08	-0,68	3,70
35	30	60	D	19,10	17,30	1,80	9,42
36	40	60	D	17,80	16,61	1,19	6,69

Çizelge B.4. Eğilmelerde çekme dayanımı tahmini ve gerçek değerleri

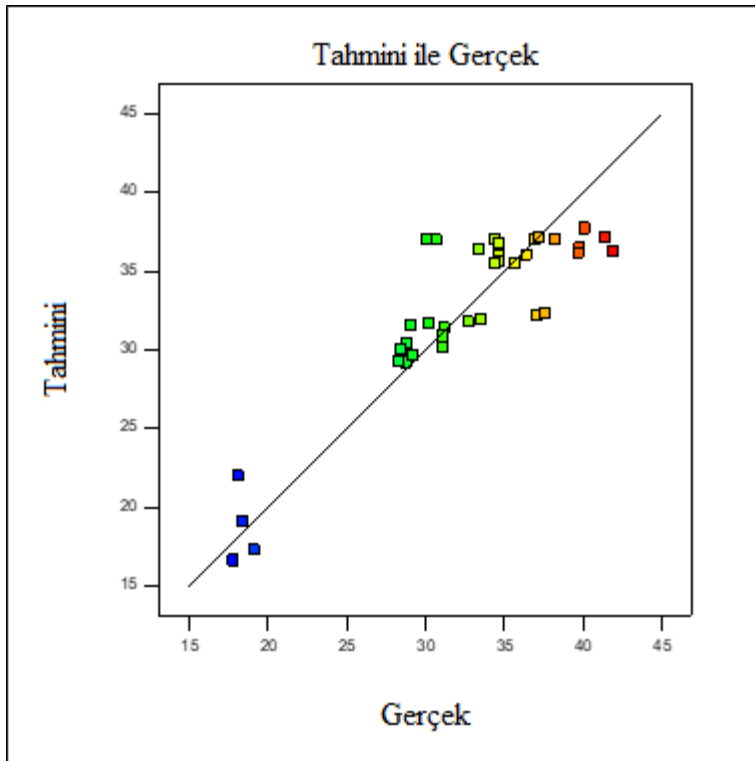
İşlem Sırası	Agrega miktarı	Bağlayıcı miktarı	Agrega tipi	Gerçek Değer	Tahmini Değer	Kalan	Hata
1	0	0	C	2,40	2,64	-0,24	10,00
2	2,5	0	C	3,20	3,14	0,064	1,88
3	5	0	C	3,50	3,52	-0,015	0,57
4	7,5	0	C	3,80	3,77	0,027	0,79
5	10	0	C	4,20	3,91	0,29	6,90
6	10	0	D	3,70	3,59	0,11	2,97
7	20	0	D	3,60	3,66	-0,063	1,67
8	30	0	D	3,90	3,94	-0,043	1,03
9	40	0	D	4,10	4,23	-0,13	3,17
10	0	20	C	3,80	3,57	0,23	6,05
11	2,5	20	C	3,90	3,96	-0,056	1,54
12	5	20	C	4,20	4,22	-0,020	0,48
13	7,5	20	C	4,00	4,36	-0,36	9,00
14	10	20	C	4,17	4,36	-0,19	4,56
15	10	20	D	4,55	4,64	-0,093	1,98
16	20	20	D	4,50	4,45	0,048	1,11
17	30	20	D	4,60	4,37	0,23	5,00
18	40	20	D	4,40	4,19	0,21	4,77
19	0	40	C	4,30	3,99	0,31	7,21
20	2,5	40	C	4,40	4,38	0,022	0,45
21	5	40	C	4,80	4,64	0,16	3,33
22	7,5	40	C	4,70	4,76	-0,059	1,28
23	10	40	C	4,70	4,75	-0,046	1,06
24	10	40	D	4,90	4,96	-0,065	1,22
25	20	40	D	4,80	4,95	-0,15	3,13
26	30	40	D	4,90	4,94	-0,041	0,82
27	40	40	D	4,60	4,74	-0,14	3,04
28	0	60	C	2,90	3,19	-0,29	10,00
29	2,5	60	C	3,50	3,69	-0,19	5,43
30	5	60	C	4,30	4,05	0,25	5,81
31	7,5	60	C	4,30	4,27	0,034	0,70
32	10	60	C	4,40	4,34	0,057	1,36
33	10	60	D	3,90	3,85	0,054	1,28
34	20	60	D	4,60	4,44	0,16	3,48
35	30	60	D	4,80	4,94	-0,14	2,92
36	40	60	D	5,20	5,14	0,058	1,15

Çizelge B.5. Elektromanyetik kalkanlama etkinliği tahmini ve gerçek değerleri

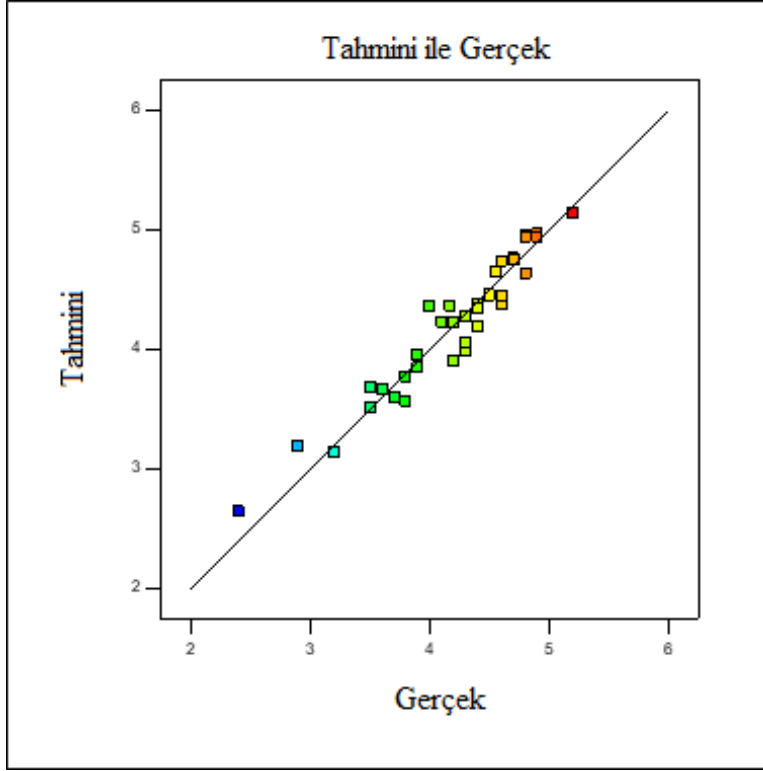
İşlem Sırası	Agrega miktarı	Bağlayıcı miktarı	Agrega tipi	Gerçek Değer	Tahmini Değer	Kalan	Hata
1	0	0	C	5,14	6,93	-1,79	34,82
2	2,5	0	C	11,99	10,60	1,38	11,59
3	5	0	C	15,25	14,28	0,97	6,36
4	7,5	0	C	13,45	17,95	-4,50	33,46
5	10	0	C	26,06	21,63	4,44	17,00
6	10	0	D	8,44	7,28	1,16	13,74
7	20	0	D	10,23	11,65	-1,42	13,88
8	30	0	D	13,84	16,02	-2,18	15,75
9	40	0	D	21,46	20,39	1,08	4,99
10	0	20	C	5,53	6,45	-0,92	16,64
11	2,5	20	C	8,21	10,01	-1,79	21,92
12	5	20	C	13,52	13,57	-0,041	0,37
13	7,5	20	C	17,39	17,12	0,26	1,55
14	10	20	C	24,03	20,68	3,35	13,94
15	10	20	D	8,67	8,36	0,31	3,58
16	20	20	D	13,05	12,27	0,79	5,98
17	30	20	D	15,28	16,18	-0,90	5,89
18	40	20	D	19,41	20,08	-0,67	3,45
19	0	40	C	5,78	5,97	-0,19	3,29
20	2,5	40	C	7,63	9,41	-1,78	23,33
21	5	40	C	17,93	12,85	5,08	28,33
22	7,5	40	C	15,08	16,30	-1,22	8,09
23	10	40	C	14,62	19,74	-5,12	35,02
24	10	40	D	12,37	9,44	2,93	23,69
25	20	40	D	14,56	12,89	1,67	11,47
26	30	40	D	13,48	16,33	-2,85	21,14
27	40	40	D	23,06	19,78	3,28	14,22
28	0	60	C	7,76	5,48	2,28	29,38
29	2,5	60	C	10,06	8,81	1,25	12,43
30	5	60	C	10,57	12,14	-1,57	14,85
31	7,5	60	C	17,34	15,47	1,87	10,78
32	10	60	C	16,83	18,79	-1,96	11,65
33	10	60	D	9,58	10,52	-0,94	9,81
34	20	60	D	10,83	13,51	-2,68	24,75
35	30	60	D	15,32	16,49	-1,17	7,64
36	40	60	D	21,07	19,48	1,59	7,55



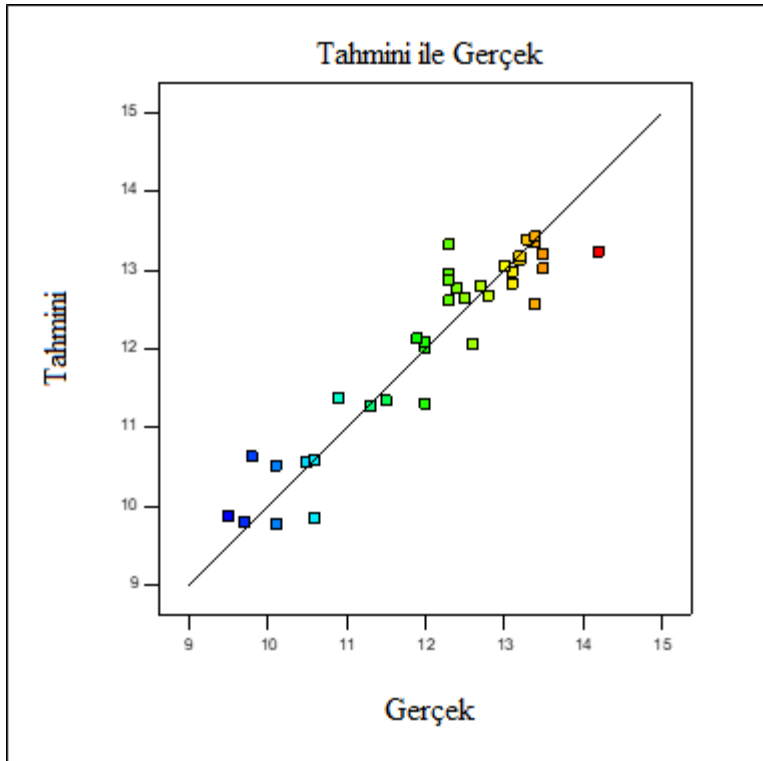
Şekil B.1. Kuru yığın yoğunluk tahmini ve gerçek değerleri



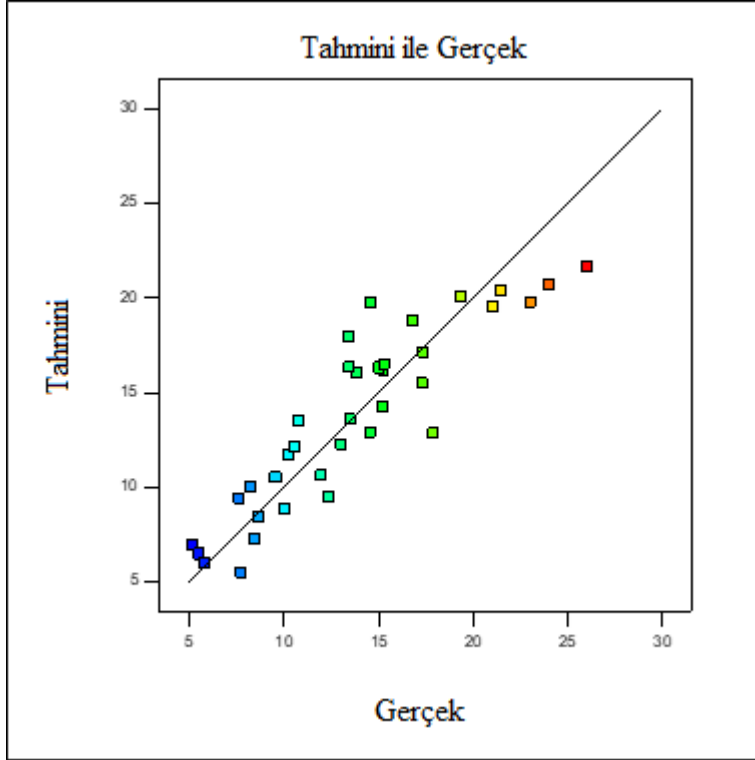
Şekil B.2. Basınç dayanımı tahmini ve gerçek değerleri



Şekil B.3. Eğilmelerde çekme dayanımı tahmini ve gerçek değerleri




Şekil B.4. Su emme yüzdesi tahmini ve gerçek değerleri



Şekil B.5. Elektromanyetik kalkanlama etkinliği tahmini ve gerçek değerleri

ÖZGEÇMİŞ

ADI SOYADI: NİHAN GÜLMEZ E-mail: nihanglmz@gmail.com	
---	---

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora 2014-2018	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans 2009-2011	Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Kayseri
Lisans 2004-2008	Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Elazığ

MESLEKİ GÖREVLER

Araştırma Görevlisi 2008-2014	Bozok Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Yozgat
----------------------------------	---

ESERLER:

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

Kockal N.U., Beycan O., Gulmez N. 2017. Physical and mechanical properties of silica fume and calcium hydroxide based geopolymers. Acta Phys. Pol., A. 131(3): 530-533.

Kockal N.U., Beycan O., Gulmez N. 2018. Effect of binder type and content on physical and mechanical properties of geopolymers. Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences, 43: 1-9.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

Kockal N.U., Gulmez N. 2017. Some Properties of Geopolymers Having Different Composition. 8th International Advanced Technologies Symposium, IATS'17, 19-22 October, Elazığ, Turkey.

Gulmez N., Kockal N.U. 2017. Mechanical Properties of Alkali Activated Mortars with Different Binders. 8th International Advanced Technologies Symposium, IATS'17, 19-22 October, Elazığ, Turkey.

Gulmez N., Kockal N.U. 2018. Effect of Partial Replacement of Slag by Silica Fume on the Mechanical Properties of Geopolymers. 7th International Conference on Advanced Technologies, ICAT'18, 28 April - 01 May, Antalya, Turkey.

Gulmez N., Kockal N.U. 2018. Combined Effects of Silica Fume and Curing Conditions on the Physical Properties of Slag based Geopolymer Mortars. 7th International Conference on Advanced Technologies, ICAT'18, 28 April - 01 May, Antalya, Turkey.

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler

Gülmez N., Kara H. B., Kaya Z., Cayabatmaz Ş. 2011. Yozgat Çevresindeki İnce Daneli Zeminlerin Geoteknik Özelliği. IV. Geoteknik Sempozyumu, 1-2 Aralık, Adana.

Kocabaş F., Ay M., Gülmez N. 2009. Yapay Sinir Ağı ve Lineer Model ile Köprü Ayaklarında Riprap Koruması Var iken Oyulma Derinliğinin Tahmini. IV. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, ss. 371-379, 6-10 Temmuz, İstanbul.

Projeler

"Bağlayıcı ve agrega olarak kullanılan endüstriyel atıkların geopolimer harçların özellikleri üzerine etkisi", BAP Arastırma Projesi, FDK-2016-1990, Araştırmacı, 2018.