



T.C.

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ ÇİMENTOSUZ CÜRUFU
BETONLARIN MEKANİK ve GEÇİRİMLİLİK ÖZELLİKLERİ ve
ÜRETİM OPTİMİZASYONU

Müzeyyen BALÇIKANLI

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HATAY
OCAK-2016



T.C.

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ ÇİMENTOSUZ CÜRUFU
BETONLARIN MEKANİK ve GEÇİRİMLİLİK ÖZELLİKLERİ ve
ÜRETİM OPTİMİZASYONU**

Müzeyyen BALÇIKANLI

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HATAY
OCAK-2016**

T.C.
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ ÇİMENTOSUZ CÜRUFUFLU
BETONLARIN MEKANİK ve GEÇİRİMLİLİK ÖZELLİKLERİ ve ÜRETİM
OPTİMİZASYONU**

MÜZEYYEN BALÇIKANLI
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Doç. Dr. Erdoğan ÖZBAY danışmanlığında hazırlanan bu tez 04/01/2016 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Erdoğan ÖZBAY
Başkan

Prof. Dr. Cengiz Duran ATIŞ
Üye

Doç.Dr. Burak UZAL
Üye

Kod No: 02

Doç. Dr. Mustafa DEMİRCİ
Enstitü Müdür Vekili

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

Proje No: 214M035

Bu çalışma MKÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir.

Proje No: 13700

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

04.01.2016

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını ve tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu beyan ederim.

Müzeyyen BALÇIKANLI

ÖZET

ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ ÇİMENTOSUZ CÜRUFU BETONLARIN MEKANİK ve GEÇİRİMLİLİK ÖZELLİKLERİ ve ÜRETİM OPTİMİZASYONU

Bu çalışmada, sodyum konsantrasyonu, silikat modülü, kür sıcaklığı ve kür süresi bağımsız değişkenlerine bağlı olarak üretilen alkalilerle aktive edilmiş cürufu betonların (AAECB) mekanik (basınç, yarmada çekme dayanımı, aşınma miktarı, çekip çıkarma yükü, ultrasonik dalga hızı) ve geçirimsizlik (basınçlı su geçirimsizliği, kılcal su emme, su emme oranı, gaz ve hızlı klor geçirimsizliği, ısı iletkenlik) özellikleri incelenmiştir. Deneysel tasarım, deney tasarımı yöntemlerinden olan Tepki Yüzeyi Yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Belirtilen bağımsız değişkenlerle 0.52 alkali çözelti-cüruf oranı, 400 kg/m³ cüruf dozajı ve 20±2 cm çökme değeri elde edilebilecek 21 farklı karışım tasarlanmıştır. Bağımsız değişkenlere bağlı olarak elde edilen bağımlı değişkenler (mekanik ve geçirimsizlik özellikleri) istatistiksel olarak analiz edilerek, bağımlı değişkenlerle bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi ortaya koyabilecek regresyon modelleri elde edilmiştir. Elde edilen regresyon modelleri kullanılarak belirlenen objektif fonksiyonlar (mekanik özellikleri maksimum, geçirimsizlik özelliklerini minimum) belirlenen kısıtlar altında çoklu objektifli olarak optimize edilmiş ve optimum bağımsız değişken parametreleri belirlenmiştir. Optimum bağımsız değişken değerleri ile laboratuvar ortamında yeniden üretimler gerçekleştirerek teorik olarak elde edilen optimum sonuçların laboratuvar şartlarında ne kadar uygulanabilir olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, AAECB mekanik ve geçirimsizlik özellikleri üzerinde en etkin bağımsız değişkenin sodyum konsantrasyonu olduğu, gerçekleştirilen çalışmanın kısıtları altında, en optimum üretim koşullarının, sodyum konsantrasyonu %5.92, silikat modülü 1.82, kür sıcaklığı 48.3°C ve kür süresinin de 8.28 saat olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alkali Aktivasyonu, Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu, Tepki Yüzeyi Yöntemi, Çoklu Objektifli Optimizasyon

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF ALKALI ACTIVATED CEMENTLESS SLAG CONCRETE PRODUCTION and DETERMINATION OF ITS MECHANICAL AND PERMEABILITY PROPERTIES

In this thesis, mechanical (compressive and split tensile strength, abrasion resistance, pullout capacity and ultrasonic pulse velocity) and transport properties (water permeability depth under pressure, sorptivity, water absorption, gas and chloride ion permeability and thermal conductivity) of alkali activated slag concretes were investigated depend on the independent variables such as sodium concentration, silicate modulus, curing temperature and curing time. An experimental program was conducted by using central composite design method. By keeping constant the alkali solution-slag ratio and slag dosage at 0.52 and 400 kg/m³, respectively, twenty one different concrete mixtures were designed. To find out the relations between the independent and dependent variables, statistically significant regression models were developed. Using the developed regression models, multi objective optimization studies were performed to find out the optimum independent variables values under the defined objective functions and constraints. Verification tests were carried out by using the optimum independent variables to reveal the how theoretically obtained optimum values might be implement in real laboratory conditions. Test results revealed that sodium concentration was the most influential independent variable on the mechanical and transport properties of alkali activated slag concretes. Moreover, it was investigated that optimum values of the sodium concentration, silicate modulus, curing temperature and curing times were %5.92, 1.82, 48.3°C and 8.28 hours, respectively, within the range of current research.

Key Words: Alkali activation, Ground granulated blast furnace slag, Response surface method, Multi objective optimization

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez konusunun belirlenmesinde, araştırılması ve yazımı sırasında sahip olduğu bilgi birikimi ve tecrübesi ile çalışmayı yönlendiren ve her türlü yardımı esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Erdoğan ÖZBAY'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında desteğini esirgemeyen saygı değer hocam Yrd. Doç. Dr. Hakan Tacettin TÜRKER'e ve sabırlarını, maddi manevi desteklerini hiçbir zaman esirgememiş olan mesai arkadaşlarım Arş. Gör. Nurullah KARACA, Arş. Gör. Kevser KESKİN, Arş. Gör. Yakup TÜREDİ, Arş. Gör. M. Musab ERDEM, Arş. Gör. Olcay GENÇ, Arş. Gör. Murat ÖZTÜRK, Arş. Gör. Bestami TAŐAR, Arş. Gör. Gökhan ÇEVİK, Arş. Gör. Hacer ÇOLAK ve İnş. Yük. Müh. Şahin BANKİR, Arş. Gör. Hüseyin YAĞLI'ya, isimlerini burada zikredemediğim ama yardımlarını esirgememiş olan herkese içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarıma maddi destek veren TUBİTAK- MAG Komitesi'ne (Proje No: 214M035) ve malzeme desteği sağlayan Adana Çimento Sanayi T.A.Ő. / İskenderun Tesisleri'ne teşekkür ederim.

Ayrıca beni bugüne kadar yetiştiren, desteklerini bir an olsun eksik etmeyen kıymetli anneme, babama ve kardeşime en içten saygı ve şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|-----|
| ÖZET | I |
| ABSTRACT | II |
| TEŞEKKÜR | III |
| İÇİNDEKİLER | IV |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | VI |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | IX |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ | X |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Üretimi | 1 |
| 1.2. ÖGYFC'nin Kimyasal Kompozisyonu ve Hidratasyon Mekanizması | 2 |
| 1.3. Çevresel Etki | 4 |
| 1.4. Türkiye'deki Mevcut Durum | 5 |
| 1.5. Alkali Aktivasyonu ve Geopolimer Teorisi | 6 |
| 1.5.1. Geopolimerlerin Özellikleri ve Uygulama Alanları | 8 |
| 1.5.2. Yüksek Fırın Cürufunun Alkali Aktivasyonu | 9 |
| 1.5.3. Tarihsel Gelişimi | 11 |
| 1.5.4. Alkalilerle Aktive Edilen Cürüflü Betonların Kullanım Alanları | 13 |
| 1.5.5. Hidratasyon Ürünlerinin Oluşumu ve Yapısı | 13 |
| 1.5.6. Alkali Aktivatörler | 14 |
| 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR | 16 |
| 3. MATERYAL ve YÖNTEM | 26 |
| 3.1. Giriş | 26 |
| 3.2. Malzemeler | 26 |
| 3.2.1. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu (ÖGYFC) | 26 |
| 3.2.2. Portland Çimentosu | 28 |
| 3.2.3. Agregası | 28 |
| 3.2.4. Sodyum Silikat (Na_2SiO_3) | 29 |
| 3.2.5. Sodyum Hidroksit (NaOH) | 30 |
| 3.2.6. Su | 30 |
| 3.3. Deney Tasarımı | 31 |
| 3.3.1. Deney Tasarımı Yönteminin Kullanım Amacı | 31 |
| 3.3.2. Tepki Yüzeyi Yöntemi (TYY) | 31 |
| 3.3.3. Deney Tasarımı ve Deneylerde Kullanılan Parametreler | 33 |
| 3.4. Deney Yöntemleri | 36 |
| 3.4.1. Çökme | 36 |
| 3.4.2. Basınç | 37 |
| 3.4.3. Basınçlı Su Geçirimsizliği | 38 |
| 3.4.4. Yarmada Çekme Dayanımı | 38 |
| 3.4.5. Çekip Çıkarma (Pull Out) | 39 |
| 3.4.6. Aşınma | 40 |
| 3.4.7. Ultrasonik Dalga Hızı | 41 |
| 3.4.8. Gaz Geçirimsizliği | 42 |
| 3.4.9. Hızlı Klor Geçirimsizliği | 44 |
| 3.4.10. Isı İletkenlik Katsayısı | 46 |
| 3.4.11. Su Emme Kapasitesi | 48 |
| 3.4.12. Kılcal Su Emme | 49 |

| | |
|---|-----|
| 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA | 50 |
| 4.1. Varyans Analizi (ANOVA) ve Regresyon Modeli..... | 52 |
| 4.2. Çoklu Objektifli Optimizasyon ve Amacı | 54 |
| 4.2.1. Çoklu Objektifli Optimizasyon | 54 |
| 4.3. Erişilebilirlik (Desirability) Fonksiyonu..... | 55 |
| 4.4. Basınç Dayanımı..... | 65 |
| 4.4.1. Basınç Dayanımının Zamana Bağlı Değişimi..... | 65 |
| 4.4.2. Bağımsız Değişkenlerin Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi | 68 |
| 4.5. Yarmada Çekme Dayanımı..... | 76 |
| 4.6. Çekip Çıkarma Yüğü | 80 |
| 4.7. Aşınma Miktarı | 88 |
| 4.8. Ultrasonik Dalga Hızı | 90 |
| 4.9. Gaz Geçirimsizliği | 97 |
| 4.10. Hızlı Klor Geçirimsizliği | 104 |
| 4.11. Isı İletkenlik Katsayısı | 110 |
| 4.12. Su Emme Oranı..... | 117 |
| 4.13. Kapiler(Kılcal) Su Emme Oranı | 124 |
| 4.14. Basınçlı Su Geçirimsizliği | 126 |
| 4.15. Doğrulama Deneşleri..... | 128 |
| 5. SONUÇ ve ÖNERİLER..... | 129 |
| KAYNAKLAR | 134 |
| ÖZGEÇMİŞ | 141 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | | |
|-------------|---|----|
| Şekil 1.1. | ÖGYFC üretim prosesi | 1 |
| Şekil 1.2. | Çimento esaslı malzemelerin CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ üçlü diyagramı ve hidrasyon fazı | 3 |
| Şekil 2.1. | Silikat ve alüminatların geopolimerleşme modeli | 8 |
| Şekil 2.2. | NaOH ve Na ₂ SiO ₃ ile aktive edilen ÖGYFC'nin reaksiyon mekanizması | 10 |
| Şekil 3.1. | ÖGYFC'nin parçacık tane dağılımı | 27 |
| Şekil 3.2. | Agrega gradasyon eğrileri | 29 |
| Şekil 3.3. | Basınç Dayanımı Deney Düzeneği | 37 |
| Şekil 3.4. | Basınçlı su geçirimsizliği deney düzeneği | 38 |
| Şekil 3.5. | Yarmada çekme dayanımı deney düzeneği | 39 |
| Şekil 3.6. | Çekip çıkarma deney düzeneği | 40 |
| Şekil 3.7. | Çekip çıkarma (Pull out) deney aleti | 40 |
| Şekil 3.8. | Dikey aşındırma deney aleti | 41 |
| Şekil 3.9. | Ultrasonik dalga hızı deney düzeneği | 42 |
| Şekil 3.10. | Gaz geçirimsizliği deney düzeneği | 43 |
| Şekil 3.11. | Gaz geçirimsizliği deney aleti | 43 |
| Şekil 3.12. | Numunenin desikatörde vakumlanması | 45 |
| Şekil 3.13. | Hızlı klor geçirimsizliği deney aleti | 45 |
| Şekil 3.14. | Hızlı klor geçirimsizliği deney düzeneği | 46 |
| Şekil 3.15. | Isı iletkenlik katsayısı ölçüm deney aleti | 48 |
| Şekil 3.16. | Isı iletkenlik ölçüm deney düzeneği | 48 |
| Şekil 3.17. | Kılcal su emme deney düzeneği | 49 |
| Şekil 4.1. | Basınç dayanımının zamana bağlı değişimi | 67 |
| Şekil 4.2. | 28 günlük basınç dayanımları | 67 |
| Şekil 4.3. | AAECB ve PÇ'li betonların basınç dayanımlarının karşılaştırılması | 68 |
| Şekil 4.4. | Kür sıcaklığının basınç dayanımı üzerindeki etkisi | 70 |
| Şekil 4.5. | Kür süresinin basınç dayanımına etkisi | 71 |
| Şekil 4.6. | Sodyum konsantrasyonunun basınç dayanımına etkisi | 72 |
| Şekil 4.7. | Silikat modülünün basınç dayanımına etkisi | 73 |
| Şekil 4.8. | Sodyum konsantrasyonu-kür sıcaklığının basınç dayanımına etkisi | 74 |
| Şekil 4.9. | Sodyum konsantrasyonu-kür süresinin basınç dayanımına etkisi | 75 |
| Şekil 4.10. | Silikat modülü-kür süresinin basınç dayanımına etkisi | 75 |
| Şekil 4.11. | Silikat modülü-sodyum konsantrasyonu basınç dayanımına etkisi | 76 |
| Şekil 4.12. | AAECB ve kontrol betonlarının yarmada çekme dayanımları | 78 |
| Şekil 4.13. | AAECB yarmada çekme dayanımlarının kontrol numunelerine oranı | 78 |
| Şekil 4.14. | Sodyum konsantrasyonunun çekme dayanımına etkisi | 79 |
| Şekil 4.15. | AAECB basınç dayanımı-yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki | 79 |
| Şekil 4.16. | AAECB ve kontrol numunelerinin çekip çıkarma yükleri | 82 |
| Şekil 4.17. | AAECB numunelerin kontrol numunelerine göre çekip çıkarma yükü oranı | 82 |
| Şekil 4.18. | K14 (60D13S7.5K1.8M) numunesine ait yük-sıyırılma grafiği | 83 |
| Şekil 4.19. | AAECB donatı çekip çıkarıldıktan sonra kırılma şekli | 83 |
| Şekil 4.20. | Kür sıcaklığının çekip çıkarma yüküne etkisi | 84 |
| Şekil 4.21. | Kür süresinin çekip çıkarma yüküne etkisi | 84 |
| Şekil 4.22. | Sodyum konsantrasyonunun çekip çıkarma yüküne etkisi | 85 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Şekil 4.23. | Silikat modülünün çekip çıkarma yüküne etkisi..... | 85 |
| Şekil 4.24. | Silikat modülü-kür sıcaklığı değişiminin çekip çıkarma yüküne etkisi..... | 86 |
| Şekil 4.25. | Kür süresi-silikat modülü değişiminin çekip çıkarma yüküne etkisi..... | 87 |
| Şekil 4.26. | Sodyum konsantrasyonu-silikat modülü değişiminin çekip çıkarma yüküne etkisi | 87 |
| Şekil 4.27. | AAECB basınç dayanımı-çekip çıkarma yükü arasındaki ilişki | 88 |
| Şekil 4.28. | AAECB ve kontrol numunelerinin aşınma miktarları | 89 |
| Şekil 4.29. | AAECB numunelerin kontrol numunelerine göre aşınma miktarı oranı | 89 |
| Şekil 4.30. | Sodyum konsantrasyonunun aşınma miktarına etkisi..... | 90 |
| Şekil 4.31. | AAECB ve kontrol numunelerinin ultrasonik dalga hızları. | 91 |
| Şekil 4.32. | AAECB numunelerin kontrol numunelerine göre ultrasonik dalga hızı oranı | 92 |
| Şekil 4.33. | Kür sıcaklığının ultrasonik dalga hızına etkisi | 92 |
| Şekil 4.34. | Kür süresinin ultrasonik dalga hızına etkisi..... | 93 |
| Şekil 4.35. | Sodyum konsantrasyonunun ultrasonik dalga hızına etkisi..... | 93 |
| Şekil 4.36. | Silikat modülünün ultrasonik dalga hızına etkisi..... | 94 |
| Şekil 4.37. | Sodyum konsantrasyonu-kür sıcaklığının ultrasonik dalga hızına etkisi..... | 94 |
| Şekil 4.38. | Silikat modülü-kür sıcaklığının ultrasonik dalga hızına etkisi | 95 |
| Şekil 4.39. | Sodyum konsantrasyonu-kür süresinin ultrasonik dalga hızına etkisi..... | 95 |
| Şekil 4.40. | Silikat modülü-kür süresinin ultrasonik dalga hızına etkisi..... | 96 |
| Şekil 4.41. | Silikat modülü-sodyum konsantrasyonunun ultrasonik dalga hızına etkisi..... | 96 |
| Şekil 4.42. | AAECB ve kontrol numunelerinin gaz geçirimsizlik katsayıları | 98 |
| Şekil 4.43. | AAECB numunelerinin kontrol numunelerine göre gaz geçirimsizlik katsayısı oranı | 99 |
| Şekil 4.44. | Kür sıcaklığının gaz geçirimsizliğine etkisi..... | 99 |
| Şekil 4.45. | Kür süresinin gaz geçirimsizliğine etkisi | 100 |
| Şekil 4.46. | Sodyum konsantrasyonunun gaz geçirimsizliğine etkisi | 100 |
| Şekil 4.47. | Silikat modülünün gaz geçirimsizliğine etkisi | 101 |
| Şekil 4.48. | Kür süresi-kür sıcaklığının gaz geçirimsizliğine etkisi..... | 101 |
| Şekil 4.49. | Sodyum konsantrasyonu-kür süresinin gaz geçirimsizliğine etkisi | 102 |
| Şekil 4.50. | Silikat modülü-kür süresinin gaz geçirimsizliğine etkisi..... | 102 |
| Şekil 4.51. | Silikat modülü-sodyum konsantrasyonunun gaz geçirimsizliğine etkisi... .. | 103 |
| Şekil 4.52. | AAECB basınç dayanımı-gaz geçirimsizliği arasındaki ilişki..... | 103 |
| Şekil 4.53. | AAECB ve kontrol numunelerinin hızlı klor geçirimsizlikleri..... | 105 |
| Şekil 4.54. | AAECB numunelerinin kontrol numunelerine göre hızlı klor geçirimsizliği oranı | 106 |
| Şekil 4.55. | Kür sıcaklığının hızlı klor geçirimsizliğine etkisi | 106 |
| Şekil 4.56. | Kür süresinin hızlı klor geçirimsizliğine etkisi | 107 |
| Şekil 4.57. | Sodyum konsantrasyonunun hızlı klor geçirimsizliğine etkisi | 107 |
| Şekil 4.58. | Silikat modülünün hızlı klor geçirimsizliğine etkisi | 108 |
| Şekil 4.59. | Kür sıcaklığı-sodyum konsantrasyonunun hızlı klor geçirimsizliğine etkisi..... | 108 |
| Şekil 4.60. | Silikat modülü-kür süresinin hızlı klor geçirimsizliğine etkisi..... | 109 |
| Şekil 4.61. | AAECB basınç dayanımı-hızlı klor geçirimsizliği arasındaki ilişki..... | 109 |
| Şekil 4.62. | AAECB gaz geçirimsizliği-hızlı klor geçirimsizliği arasındaki ilişki | 110 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Şekil 4.63. | AAECB ve kontrol numunelerinin ısı iletkenlik katsayıları..... | 111 |
| Şekil 4.64. | AAECB numunelerinin kontrol numunelerine göre ısı iletkenlik katsayısı oranı | 112 |
| Şekil 4.65. | Kür sıcaklığının AAECB ısı iletkenliğine etkisi..... | 112 |
| Şekil 4.66. | Kür süresinin AAECB ısı iletkenliğine etkisi..... | 113 |
| Şekil 4.67. | Sodyum konsantrasyonunun AAECB ısı iletkenliğine etkisi | 113 |
| Şekil 4.68. | Silikat modülünün AAECB ısı iletkenliğine etkisi..... | 114 |
| Şekil 4.69. | Kür süresi-kür sıcaklığının ısı iletkenliğe etkisi | 114 |
| Şekil 4.70. | Sodyum konsantrasyonu-kür sıcaklığının ısı iletkenliğe etkisi | 115 |
| Şekil 4.71. | Silikat modülü-kür süresinin ısı iletkenliğe etkisi | 115 |
| Şekil 4.72. | Sodyum konsantrasyonu-silikat modülünün ısı iletkenliğe etkisi | 116 |
| Şekil 4.73. | AAECB ve kontrol numunelerinin su emme miktarları | 118 |
| Şekil 4.74. | AAECB numunelerinin kontrol numunelerine göre su emme miktarı oranı | 118 |
| Şekil 4.75. | Kür sıcaklığının su emme miktarına etkisi | 119 |
| Şekil 4.76. | Kür süresinin su emme miktarına etkisi. | 119 |
| Şekil 4.77. | Sodyum konsantrasyonunun su emme miktarına etkisi..... | 120 |
| Şekil 4.78. | Silikat modülünün su emme miktarına etkisi | 120 |
| Şekil 4.79. | Kür sıcaklığı-kür süresinin su emme miktarına etkisi | 121 |
| Şekil 4.80. | Kür sıcaklığı-sodyum konsantrasyonunun su emme miktarına etkisi. | 121 |
| Şekil 4.81. | Kür sıcaklığı-silikat modülünün su emme miktarına etkisi..... | 122 |
| Şekil 4.82. | Kür süresi-sodyum konsantrasyonunun su emme miktarına etkisi | 122 |
| Şekil 4.83. | Kür süresi-silikat modülünün su emme miktarına etkisi | 123 |
| Şekil 4.84. | Silikat modülü-sodyum konsantrasyonunun su emme miktarına etkisi..... | 123 |
| Şekil 4.85. | AAECB ve kontrol numunelerinin kılcal su emme miktarları | 124 |
| Şekil 4.86. | AAECB numunelerin kontrol numunelerine göre kılcal su emme oranı | 125 |
| Şekil 4.87. | Sodyum konsantrasyonunun kılcal su emme oranına etkisi | 125 |
| Şekil 4.88. | Basınçlı su geçirimsizliği deney esnasında numunelerin durumu | 127 |
| Şekil 4.89. | Basınçlı su geçirimsizliği deney sonrasında AAECB numunelerinin su işleme derinliği | 127 |
| Şekil 4.90. | AAECB numunelerin çatlak durumu..... | 127 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | | |
|--------------|---|----|
| Çizelge 1.1. | YFC'nin farklı ülkelerdeki kimyasal kompozisyonu | 2 |
| Çizelge 1.2. | ÖGYFC kullanımıyla CO ₂ salınımının azalması | 5 |
| Çizelge 1.3. | Alkali aktivasyonunun tarihsel gelişimi | 12 |
| Çizelge 3.1. | Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu (ÖGYFC)..... | 27 |
| Çizelge 3.2. | Agrega granülometrisi ve fiziksel özellikleri | 28 |
| Çizelge 3.3. | Sodyum silikatın kimyasal ve fiziksel özellikleri..... | 29 |
| Çizelge 3.4. | Sodyum hidroksitin kimyasal analizi | 30 |
| Çizelge 3.5. | Deney tasarımında kullanılan katsayılar | 34 |
| Çizelge 3.6. | Deney tasarımı (Karışım oranları ve kür şartları)..... | 35 |
| Çizelge 3.7. | Hızlı klor geçirimsizliği sınıfları (ASTM C 1202-97)..... | 46 |
| Çizelge 4.1. | Mekanik özelliklere ait deney sonuçları..... | 50 |
| Çizelge 4.2. | Geçirimsizlik özelliklerine ait deney sonuçları | 51 |
| Çizelge 4.3. | Deney sonuçlarının istatistiksel analiz tablosu..... | 57 |
| Çizelge 4.4. | Çoklu objektifli optimizasyon gerçekleştirilirken bağımlı ve bağımsız değişkenlere ait çalışma şartları | 65 |
| Çizelge 4.5. | Beton yaşına göre basınç dayanımı değişimi | 66 |
| Çizelge 4.6. | AAECB optimum üretim parametreleri ve doğrulama deneyi sonuçları | 69 |

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

| | |
|--------------------|--|
| σ | : Gerilme |
| ρ | : Etki oranı |
| $^{\circ}\text{C}$ | : Santigrat derece |
| μ | : Oksijen gazının viskosite katsayısı (N.s/m^2) |

KISALTMALAR

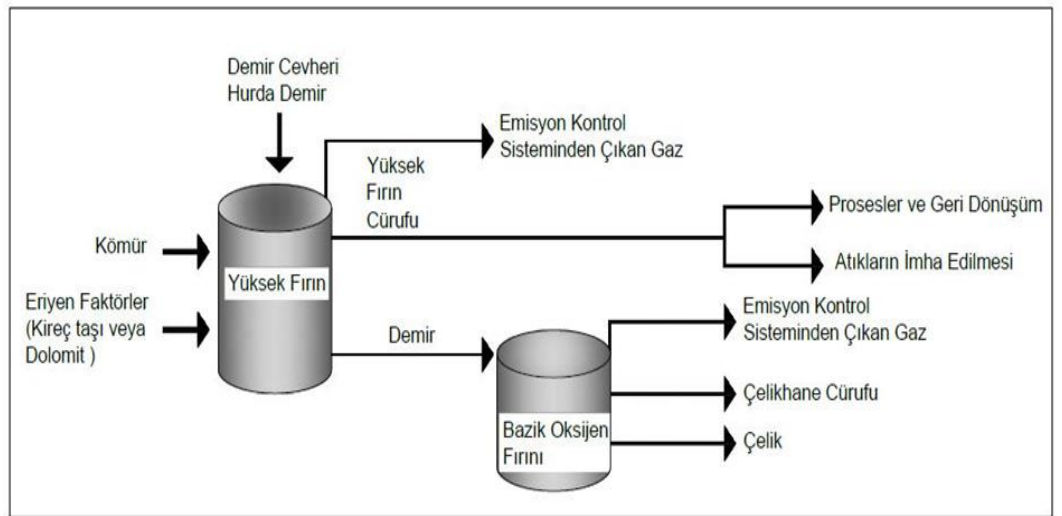
| | |
|------------------------|---|
| AAECB | : Alkalilerle aktive edilmiş cüruflu betonlar |
| ÖGYFC | : Ögütülmüş granüle yüksek fırın cürufu |
| UK | : Uçucu kül |
| SD | : Silika dumanı |
| CT | : Kür sıcaklığı |
| TC | : Kür süresi |
| SC | : Sodyum konsantrasyonu |
| SM | : Silikat modülü |
| YÇD | : Yarmada çekme dayanımı |
| PÇ | : Portland çimentosu |
| P | : Maksimum yük |
| L | : Beton numune boyu |
| D | : Beton numune çapı |
| W₁ | : Beton numunenin aşınmadan önceki ağırlığı |
| W₂ | : Beton numunenin aşınmadan sonraki ağırlığı |
| V | : Ultrasonik dalga hızı (m/s) |
| S | : Ultrasonik dalğanın beton içinde aldığı mesafe (m) |
| t | : Ultrasonik dalğanın beton yüzeyi arasındaki mesafeyi geçme süresi (μs) |
| Q | : Gaz geçirimliliği ölçme tüpüne gelen gaz debisi (m^3/s) |
| K_a | : Gaz geçirimlilik katsayısı (m^2) |
| P | : Beton numune etki eden gaz basıncı (N/m^2) |
| P_{atm} | : Atmosferik basınç (N/m^2) |
| L_f | : Gaz geçirimliliği deneyinde sabun köpüğünün aldığı mesafe (m) |
| Q_x | : Isı iletkenlik deneyinde x yönüne dik alandan geçen ısı miktarı |
| W | : Isı iletkenlik deneyinde sisteme verilen güç (Watt) |
| W_{dyk} | : Numunenin doygun yüzey kuru ağırlığı (g) |
| W_k | : Numunenin etüv kuru ağırlığı (g) |

1. GİRİŞ

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖGYFC) demir cevherinin yüksek fırınlarda eritilmesi sırasında eriyik halde oluşan silikat ve kalsiyum alümina silikatlardan oluşan bir yan üründür (ACI 116R). Eriyik haldeki yüksek fırın cürufu, su göletleri veya güçlü su jetleri yardımı ile aniden soğutulursa ince taneli camsı bir yapı elde edilmektedir (Pal ve ark., 2003). Elde edilen camsı yapı granül malzeme, öğütülüp toz haline getirilirse, Portland çimentosu ile birlikte veya alkalilerle aktive edildiğinde bağlayıcı malzeme olarak kullanılabilir (Hwang ve Lin, 1986).

1.1. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Üretimi

ÖGYFC, yüksek fırınlarda demir ile aynı anda üretilmektedir. Şekil 1.1.'de ÖGYFC'nin demir cevherinden elde edilmesi şematik olarak gösterilmiştir. Demir oksitler kireçtaşı ve dolomit gibi eriyen maddelerin ilave edilmesiyle eriyik haldeki demire indirgenirler (Nadine ve ark., 2015). Eriyik haldeki cüruf fırının üst kısmında, ham demir ise alt kısımda toplanır. Eriyik haldeki cürufun sıcaklığı 1400-1600°C arasında olup, elde edilen ham demirin sıcaklığına çok yakındır. Cüruf, zamanla fırının üst yüzeyden süpürülerek alınır. Eriyik haldeki cürufun hızlı soğutulmasıyla camsı yapıdaki Ca-Al-Mg silika camları oluşur.



Şekil 1.1. ÖGYFC üretim prosesi (Piatak N. M ve ark., 2015)

Erimiş haldeki cüruf fırından dışarı alınırken, oluktan çıkar çıkmaz 0.6 MPa basınçlı su jetleri ile aniden soğutulur. Bu yöntem ile 1 ton cürufun soğutulması için 3 m³ su gerekmekte, granül halde elde edilen cürufun bünyesinde %30 oranında su bulunmaktadır. Yüksek fırından ayrılan cürufu soğutmak için Kanada’da 1970’lerde peletleme olarak adlandırılan ikinci bir yöntem geliştirilmiştir. Peletleme yöntemi ile erimiş cüruf dakikada 300 devir yapan bir tamburdan fırlatılan su ile soğutulmakta ve 1 ton cürufun soğutulması için 1 m³ su sarf edilmektedir. Elde edilen cürufun bünyesinde %10 oranında su bulunmaktadır (Shi ve Qian, 2000). Cüruf kurutulup öğütüldükten sonra bağlayıcı özellik kazanarak çimento ve beton üretiminde kullanılabilir. Cürufun öğütülme işlemi öncesi ve sonrasında içerisindeki metalik parçalar mıknatıslar yardımı ile ayrıştırılmaktadır. ÖGYFC’nin PÇ ve diğer tüm puzolanlarda olduğu gibi inceliği arttıkça reaksiyon hızı ve hidrolik aktivitesi artış göstermektedir (ACI 233).

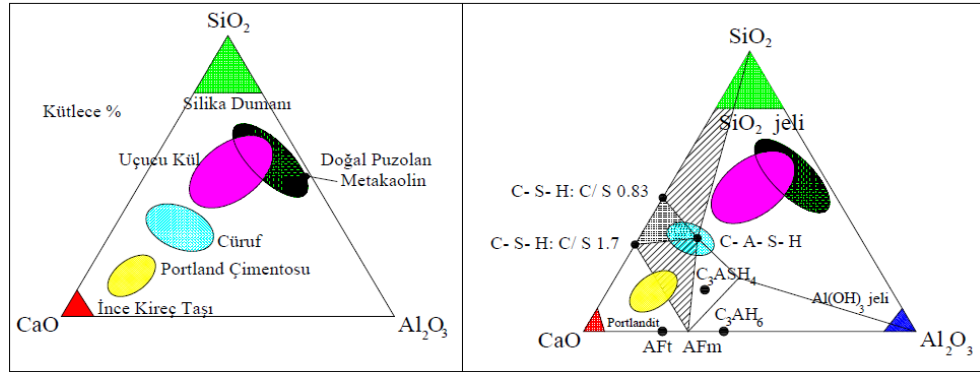
1.2. ÖGYFC’nin Kimyasal Kompozisyonu ve Hidratasyon Mekanizması

ÖGYFC, demir cevheri, kireç taşı ve kömürden gelen ve saf olmayan maddelerden oluşmaktadır. Genellikle silika, kalsiyum, alüminyum, magnezyum ve oksijen gibi bileşenler ÖGYFC’nin %95’inden fazlasını oluşturmaktadır. Farklı ülkelerde üretilen ÖGYFC’nin kimyasal kompozisyonu Çizelge 1.1’de gösterilmiştir. ÖGYFC’nin kimyasal kompozisyonu hidrolik aktivitesini belirleyen en önemli etkidir.

Çizelge 1.1. YFC’nin farklı ülkelerdeki kimyasal kompozisyonu

| Kimyasal Kompozisyon (%) | ABD | Güney Afrika | Türkiye |
|--------------------------------|---------|--------------|---------|
| CaO | 29-50 | 30-40 | 34-41 |
| SiO ₂ | 30-40 | 30-36 | 34-36 |
| Al ₂ O ₃ | 7-18 | 9-16 | 13-19 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.1-1.5 | - | 0.3-2.5 |
| MgO | 0-19 | 8-21 | 3.5-7 |
| MnO | 0.2-1.5 | - | 1-2.5 |
| S | 0-2 | 1-1.6 | 1.2 |
| SO ₃ | - | - | - |

ÖGYFC alkalilik indislerine göre sınıflandırılırlar. En basit alkalilik indisi Nkinamubanzi ve ark. (1998) tarafından önerilen CaO/SiO_2 oranı olup bu oranın 1'den büyük olması gerekmektedir. ÖGYFC'nin hidrolik aktivitesi baziklik derecesine bağlıdır. ÖGYFC alkali aktivatörlerle birlikte kullanıldığında hidrolik aktivitesi artmaktadır (Pal ve ark., 2003). Alkali oranı sabit olan ÖGYFC'de Al_2O_3 içeriği arttıkça mekanik dayanımlarda artış gözlemlenmiştir. ÖGYFC'nin bünyesinde CaO miktarının düşük olması durumunda, yüksek alümin takviyesi ile mekanik özelliklerdeki düşüklük telafi edilebilmektedir. MgO miktarının %8-10 oranlarına kadar yükseltilmesi ile mekanik özelliklerde az miktarda artış gözlemlenmekte ancak bu oranın daha da yükselmesiyle mekanik özellikler olumsuz etkilenmektedir (Pal ve ark., 2003). Ayrıca CaO , Al_2O_3 ve MgO içeriği arttıkça, hidrolik aktivitenin arttığı, SiO_2 içeriği arttıkça da hidrolik aktivitenin azaldığı belirtilmiştir. TS EN 197-1 ve İngiliz Standartlarına göre kalsiyum oksit ve magnezyum oksit miktarının silisyum oksit miktarına kütlece oranı 1'den büyük olmalıdır. Böylece yüksek alkali ortamın oluşması sağlanarak ÖGYFC'nin hidrolik aktivitesi artırılabilir (Pal ve ark., 2003; Neville, 1996). ÖGYFC'nin ve hidrasyon sonucu oluşan $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ sistemlerinin hidrasyon fazlarının nasıl olduğu Şekil 1.2.'de şematik olarak gösterilmiştir (Lothenbach ve ark., 2011).



Şekil 1.2. Çimento esaslı malzemelerin $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ üçlü diyagramı ve hidrasyon fazı (Lothenbach ve ark., 2011)

ÖGYFC'nin PÇ ve su ile hidrasyonu sonucu oluşan temel ürünün Şekil 1.2.'de gösterildiği üzere kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) olduğu birçok araştırmacı tarafından kabul edilmiştir. ÖGYFC'nin kendi başına su ile hidrasyonu PÇ'ye göre çok daha yavaş olmakta, bu nedenle ÖGYFC ile birlikte PÇ, alkali tuzlar veya kireç kullanılarak reaksiyonlar hızlandırılmaktadır. ÖGYFC, PÇ ile birlikte kullanıldığında cürufun camısı

yapısı, Portland çimentosunun hidratasyonu sırasında açığa çıkan hidroksil iyonları ile çözünmektedir. ÖGYFC tanecikleri alkali sodyum, potasyum ve kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ile hidrate olarak ilave C-S-H jelleri üretirler.

ÖGYFC su ile hidrate edildiği anda reaksiyonlar çok yavaş gerçekleşmekte, bu esnada kalsiyum ve alüminyum iyonları çözeltilmeye başlamaktadır (ACI 233, Regourd, 1980a,b,c). Kalsiyum hidroksit veya sülfatlar ortamda mevcut hale gelinceye kadar hidratasyon reaksiyonları gerçekleşmez. ÖGYFC Portland çimentosu ile birlikte kullanıldığında normal sıcaklıklarda hidratasyonu iki aşamada gerçekleşir. Hidratasyonun ilk zamanlarında alkali hidroksitler ile olan reaksiyonlar baskın durumda iken, sonraki aşamalarında kalsiyum hidroksit ile olan reaksiyonlar hakimdir (ACI 233).

1.3. Çevresel Etki

Çimento klinkeri üretilirken, kireçtaşının 900°C civarında sıcaklığa maruz kalması sonucu kireçtaşı bozunmakta ve doğaya CO_2 salınımı gerçekleşmektedir. 2013 yılı verilerine göre çimento klinkerinin üretimi esnasında doğaya %4.8 oranında CO_2 salınımının yapıldığı belirtilmiştir. Klinker üretilirken enerji için kullanılan yakıt ile de açığa çıkan CO_2 miktarı neredeyse aynı seviyededir. Bu durumda klinker üretimi yapılırken toplamda %9.5 civarında CO_2 'in doğaya salınımı yapılmaktadır (Trends in Global CO_2 Emissions, 2014). ÖGYFC kullanımıyla enerji tasarrufu, CO_2 salınımının azalması ve doğal kaynakların korunması gibi birçok fayda sağlanmaktadır (ACI 233). ÖGYFC kullanımı ile CO_2 salınımı önemli miktarda azalmakta ve endüstriyel yan ürünler kullanılarak doğal kaynakların korunumu sağlanmaktadır (Lothenbach, 2011). Dünyadaki çimento üretimi ve üretilen çimentonun öğütülmesi ve taşınması işlemleri sırasında doğaya salınan CO_2 miktarı her ton çimento için 0.91 ton dolaylarındadır. PÇ yerine tamamen ÖGYFC kullanımı ile doğaya salınan CO_2 miktarının 0.143 tona düşmesi beklenmektedir. Klinker üretimi için kalker ve kilin yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi gerekmektedir. Fırının yüksek sıcaklıklara getirilebilmesi için fazla yakıt yakılmakta ve doğaya CO_2 salınmaktadır. CO_2 salınımı bağımsız üç kaynaktan gerçekleşmektedir:

- Kireç taşının fırında dekarbonizasyonu esnasında (1 ton klinker için 0.525 ton)

- Yüksek fırınlarda enerji üretimi için kömür yakılması esnasında (1 ton çimento için 0.335 ton)
- Elektrik tüketimi ile (1 ton çimento için 0.05 ton) CO₂ salınmaktadır.

ÖGYFC'nin farklı bir endüstrinin yan ürünü olarak elde edilip, beton sektöründe kullanılması doğal çevrenin korunması adına faydalı bir örnek olup, ÖGYFC'nin öğütülmemiş halde iri agrega olarak veya beton üretiminde çimento ile %80'e varıncaya kadar yer değiştirilerek kullanımı ile CO₂ salınımı %60-70 oranlarında azaltılabilmektedir. ÖGYFC, PÇ ile genellikle %35-65 arasında yer değiştirilerek kullanılmaktadır. ÖGYFC'nin PÇ ile %50 oranında yer değiştirilerek kullanılmasıyla her ton PÇ üretimindeki CO₂ salınımı %50 oranında azaltılabilmektedir (Clean Technology Platform, 2015). Flower ve Sanjayan (2007), beton üretiminde kullanılan ince ve iri agrega, çimento, uçucu kül, cüruf gibi malzemelerin üretimi, karıştırılması, yerine yerleştirilmesi için yapılan çalışmalardan doğaya salınan CO₂ miktarındaki değişimin ne kadar olduğunu belirlemek amacı ile bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. ÖGYFC'nin Portland çimentosuyla %40 oranında yer değiştirmesi ile 25-32 MPa basınç dayanıma sahip betonlar üretilebildiğini ve bu betonların üretiminde %40 ÖGYFC kullanımı ile CO₂ salınımının %22 oranında azaldığını belirttiler. Çalışma sonuçları Çizelge 1.2' de verilmiştir.

Çizelge 1.2. ÖGYFC kullanımıyla CO₂ salınımının azalması

| Özellik | %100 PÇ | %25 UK | %40 ÖGYFC |
|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Dayanım (MPa) | 25-32 | 25-32 | 25-32 |
| Emisyon (CO ₂ - her/ton) | 0.290-0.322 | 0.253-0.273 | 0.225-0.251 |
| Azalma % CO ₂ | 0 | 13-15 | 22 |

2011 yılında dünyada 260-330 milyon ton civarında ÖGYFC ve 150-200 milyon ton civarında çelikhane cürufu üretildiği belirlenmiştir (Piatak ve ark., 2015).

1.4. Türkiye'deki Mevcut Durum

Ülkemizde yıllık 69.6 milyon ton klinker ve 113.5 milyon ton çimento üretimi yapan 50 entegre tesis ile 19 öğütme tesisi bulunmaktadır. 2014 yılında 64.2 milyon ton

klinker, 72.5 milyon ton çimento üretimi gerçekleştirilmiştir (Official web site of Turkish Cement Manufacturer Association, 2015). Ülkemizde demir cevheri kullanarak demir üretimi gerçekleştiren üç demir çelik fabrikası bulunmaktadır. Bu tesisler Ereğli (Erdemir), Karabük (Kardemir), ve İskenderun'da (İsdemir) kurulmuştur. Belirtilen üç demir çelik tesisinden yılda 3 milyon ton yüksek fırın cürufu üretilmekte olup, bu yüksek fırın cürufunun 1.3 milyon tonu hazır beton sektöründe, 1.4 milyon tonu ise çimento üretiminde kullanılmaktadır. Ülkemizde 2014 yılında 2.5 milyon ton cüruf içeren çimento (CEM II, CEM III ve CEM V) üretimi gerçekleştirilmiştir (Official web site of Turkish Cement Manufacturer Association, 2015). Cürufu çimento olarak CEM III/A 32.5, CEM III/A 42.5 ve CEM III/B 32.5 üretilmektedir.

1.5. Alkali Aktivasyonu ve Geopolimer Teorisi

Geopolimerleşme uçucu kül (UK) ve ÖGYFC gibi alümina silikat esaslı malzemelerin, hidroksit ve silikat bileşenlerinin yüksek alkalın ortamlarda kimyasal olarak birleşmesidir (Khale ve Chaudhory, 2007). Periyodik tablonun I. grubunda bulunan elementler alkali aktivatör olarak kullanılmaktadır. Silika ve alümina atomları bu aktivatörler sayesinde birleşerek, yapısal ve kimyasal olarak doğal kayalara benzeyen molekülleri oluştururlar (Hermann ve ark., 1999). Geopolimer bağlayıcılar üç grupta sınıflandırılırlar.

- Kalsiyum oranı düşük, SiO_2 ve Al_2O_3 oranı yüksek olan hammaddelerden üretilen bağlayıcılardır. Uçucu kül bu sınıfa girmektedir. Bu malzemeler alkali çözeltiler ile aktive edildiklerinde az miktarda ısı kürü uygulaması ile erken yaşlardaki mekanik dayanımı yüksek, alümina silikatlar gibi amorf yapıya geçerler (Chowdhury, 2013).

- Kalsiyum açısından zengin cüruf gibi malzemelerin alkali çözeltilerle aktivasyonu ile sentezlenen ve C-S-H jeli oluşturabilen bağlayıcılardır (Alonso ve Palomo, 2001).

- Yukarıda belirtilen her iki grup malzemenin karışımından oluşan Ca, Si ve Al açısından zengin bağlayıcılardır (Yip ve Lukey, 2005; Palomo ve ark., 2005).

Bu malzemelerin reaksiyon mekanizması geleneksel Portland çimentosundan farklıdır. Portland çimentosunun reaksiyonu kalsiyum ve silikanın birleşmesiyle C-S-H jelinin oluşması ve dayanım kazanması esasına dayanır. Geopolimerlerin dayanım

kazanması ise yüksek alkali ortamlarda silika ve alüminlerin çoklu yoğuşması şeklinde gerçekleşir (Jaarsveld ve ark., 2002).

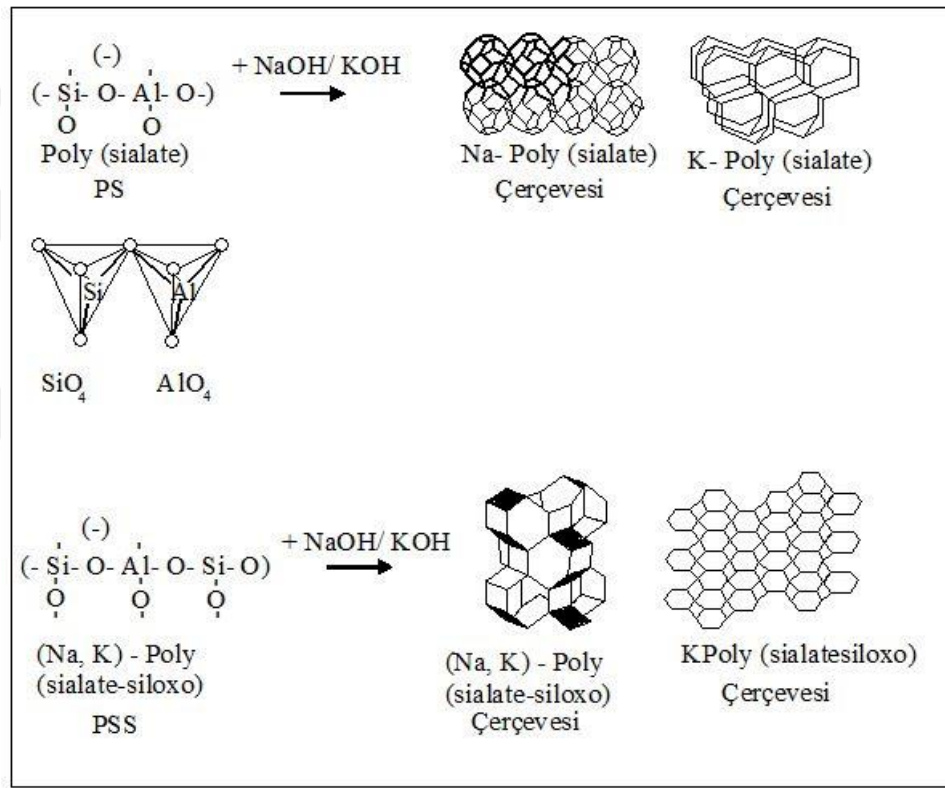
Aktive edilen hammaddedeki farklı kimyasal yapı, kullanılan aktivatörün türü ve konsantrasyonu, oluşan ürünün de farklılıklar göstermesine neden olmaktadır. Aktivasyon reaksiyonuna ve elde edilen ürünün özelliklerine etki eden en önemli parametre hammaddedeki camsı silika ve alümina miktarıdır. Alkali aktivasyon prosesinde iki farklı model tanımlanmıştır. İlk modelde kalsiyumca zengin hammadde, CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO dörütlü sistemdedir ve SiO₂/Al₂O₃ ve CaO/Al₂O₃ oranı yaklaşık 3'tür. İkinci model ise CaO oranı düşük (<%1), SiO₂ ve Al₂O₃ oranı yüksek olan hammaddeler için geçerlidir. İlk model genellikle camsı ÖGYFC'nin alkali aktivasyonuna işaret etmektedir. Ana reaksiyon ürünü, C-S-H jeline benzeyen hidrate kalsiyum silikattır. Oluşan bu yapı Portland çimentosunun hidratasyonu sonucu oluşan C-S-H jelinden farklı olup, Ca/Si oranı daha düşüktür. Diğer fazların veya hidrate bileşenlerin oluşumu, kullanılan aktivatörün tipine ve miktarına, cürufun yapısına, kompozisyonuna ve sertleşme esnasındaki kür koşullarına bağlıdır. İkinci modelde aktivasyona maruz kalacak malzeme, alümina-silikat bakımından zengin uçucu küllerdir. Bu aktivasyonda reaksiyon sıcaklığı önemli bir rol oynar. Ortam sıcaklığında, reaksiyon hızı düşük olsa da 40°C ile 85°C arasındaki sıcaklıklarda kür işleminin uygulandığında reaksiyon hızı önemli derecede artar ve 2 saatte yaklaşık 20 MPa dayanım elde edilebilir. Bu durumda oluşan reaksiyon ürünleri, hidrate alümina silikat zincirlerince oluşturulan, negatif yükleri alkalın iyonlarınca dengelenmiş amorf yapıdaki inorganik polimerlerdir (Palomo ve ark., 2005; Jaarsveld ve ark., 2002; Torgal ve ark., 2008).

Geopolimerler alüminyum silika atomlarının Na ve K gibi alkalilerle tetrahedral yapıda birleşmesi ile oluşur. Ortamdaki oksijen atomlarını dönüşümlü olarak kullanırlar. Al-O-Si yapısı Şekil 2.1.'de gösterildiği gibi geopolimer yapının temel taşlarını oluşturmaktadır. Silikat ve alüminatların alkali tuzlar veya hidroksitlerle çözünmesiyle geopolimerleşme reaksiyonları gerçekleşebilmektedir. Şekil 2.1.'de alüminat ve silikatların alkali metaller sayesinde kaynağından çözünüp polimerleşmesi ile reaktifliği yüksek yapıların oluştuğu gösterilmiştir. Torgal ve ark. (2008), Davidovits'in geopolimerlerin kimyasal tanımı için alüminasilikat oksitin kısaltılmış hali olan Polisialat'ı önerdiğini belirtmiştir. Sialat ağlarının, [SiO₄]⁴⁻ ve [AlO₄]⁵⁻ anyonlarının

molekülleri arasında oksijen atomlarının tetrahedral bağlar kurması ile oluştuğunu belirtmişlerdir. Polisialat yapıyı ifade eden genel formül denklem (1.1)'de gösterilmiştir.



Bu formülde M: sodyum ve potasyum gibi alkali kanyonları, z: polimerizasyon tekrar sayısını (z=1,2,3) n: polimerizasyon derecesini belirtmektedir.



Şekil 2.1. Silikat ve alüminatların geopolimerleşme modeli (Khale, 2007; Chaudhary, 2007)

1.5.1. Geopolimerlerin Özellikleri ve Uygulama Alanları

- Geopolimerler mükemmel mekanik dayanıma ve yüksek derecede yoğunlaşma özelliğine sahiptir. Yoğunlaşma olayı sonucunda gaz ısı kaybeder ve çevresine ısı verir ve ortamın sıcaklığını artırır. Yoğunlaşma sonucunda gaz halindeki maddenin yapısındaki

potansiyel enerji kinetik enerjiye dönüşür ve sıcaklık artar. Sıcaklığın artmasına bağlı olarak reaksiyonlar hızlanır.

- Geopolimer betonlar ve harçlar binlerce yıl fonksiyonelliklerini kaybetmeden dayanabilmektedir.
- Kolay yenilenebilir ve termal genleşmeleri kontrol altına alınabilir.
- Özelliklerini kaybetmeden 1000-1200 °C sıcaklıklara dayanabilmektedirler.
- Üretimleri esnasında düşük enerji tüketimi ve düşük oranlarda gaz salınımından dolayı “yeşil malzemeler” olarak bilinmektedirler.
- Sıcaklık kürü ile ilk dört saat içinde nihai dayanımlarının %70’ini kazanmaktadırlar (Khale ve ark., 2007).

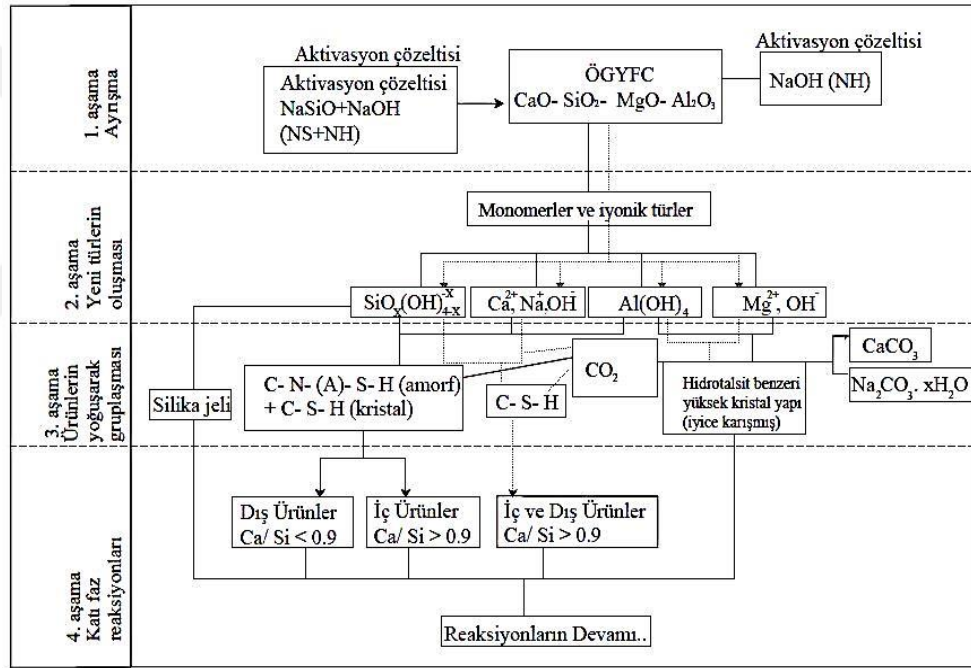
1.5.2. Yüksek Fırın Cürufunun Alkali Aktivasyonu

ÖGYFC, demir cevheri üretilirken açığa çıkan bir yan üründür. ÖGYFC genellikle metal oksit ve silisyum dioksitleri içerir ancak bazı cürufur metal sülfürler ile element haldeki saf metal atomlarını da içermektedir. Cürufur alkalilerle aktive edilerek beton sektöründe 65 yıldır çimentoya alternatif olarak kullanılmaktadır (Roy, 1999 ve Purdon, 1940).

ÖGYFC alkalilerle aktive edildiğinde, alkaliler ilk olarak cürufur taneciklerinin dış yüzeyi ile etkileşime girer ve reaksiyon ürünleri oluşuncaya kadar ÖGYFC tanecikleri parçalanır. İlk aşamada ÖGYFC çözünerek çökeler ve sonra iyonların yüzeyden merkeze difüzyonunu zorlaştıran katı bir yapı oluşur (Chithiraputhiron, 2012). Alkali katyonlar, Na, K veya Li gibi mineraller M^+ sembolüyle gösterilmek üzere, hidratasyonun ilk aşamalarında katalizör gibi davranır ve Ca^{+2} iyonları ile yer değiştirirler (Glukhovsky, 1994 ve Krivenko, 1994). Bu reaksiyonlar denklem (1.2), (1.3) ve (1.4) ile açıklanmıştır.



Alkali kanyonlar yapısal iskeleti oluştururken, anyonlar, özellikle erken yaşlarda, aktivasyon reaksiyonlarında görev alırlar (Fernandez- Jimenez ve Puertas, 2001; Fernandez- Jimenez ve ark., 2003). GYFC alkalilerle aktive edildiğinde oluşan ürünler daha düşük Ca/Si oranına sahip olmasına rağmen Portland imentosunun hidrasyon ürünleri ile (C-S-H) benzerlik gösterir. Ancak gelişen reaksiyonların oranı ve yoğunluğu Portland imentosunun hidrasyonundan farklıdır. GYFC reaktif silika içerdiğinden dolayı kalsiyum hidroksit bulunan ortamda puzolanik aktivite gösterir (Chowdhury, 2013). GYFC, Portland imentosu ile birlikte kullanıldığında üç aşamada hidrate olur. İlk olarak imento hidrate olur, cüruf hidrolik reaksiyona girer ve son olarak cüruf puzolanik aktivite gösterir (Ravikumar, 2012). Burciaga ve Garcia (2013), GYFC'nin reaksiyon mekanizmasının dört aşamada gerçekleştiğini belirtmiştir (şekil 2.2.).



şekil 2.2. NaOH ve Na₂SiO₃ ile aktive edilen GYFC'nin reaksiyon mekanizması (Burciaga-Diaz ve Escalante-Garcia, 2013)

Birinci aşamada GYFC ve alkali çözeltinin etkileşimi ile eş zamanlı hidroliz ve çözünme reaksiyonlarının meydana geldiğini belirtmiştir. Bu aşamada camsı yapıdaki Ca-O, Mg-O, Al-O-Si ve Si-O-Si bağlarının yıkımı başlamaktadır. İkinci aşamada çökelmeden daha hızlı ve fazla gerçekleşen farklı monomer yapıların oluşumu başlar. Temel olarak Si(OH)₄ ve Al(OH)₄ içeren silikat ve alüminat türleri oluşur ve daha kompleks yapıların oluşması için OH⁻ iyonları ile reaksiyonlar devam eder. Ca²⁺ ve

Mg^{2+} camsı yapıdan ayrışarak çözeltiliye katılır ve OH^- ve H_2O ile çevrelenir. Camsı yapı çözünürken reaksiyonları başlatan bileşenlerin konsantrasyonu artar ve sulu ortamın iyonsal doygunluğu ve pH seviyesi kademeli olarak azalır. ÖGYFC'nin sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktivasyonunda üçüncü aşamada, pH ve doygunluk azaldıkça $Ca/Si \sim 0.9$ olduğunda C-S-H yapısı oluşmaya başlar. Bu aşamada oluşan yarı kristal C-S-H'nin 9 Å boyutunda tobermorit şeklinde kalsiyum silikat olduğu yapılan XRD deneyleriyle belirlenmiştir. Al atomlarının da bünyeye katılmasıyla oluşan yapılar birbirine bağlanmakta ve amorf haldeki C-N-(A)-S-H yapısı oluşmaktadır. Eş zamanlı olarak, Mg ve Al açısından zengin hidrotalsit benzeri ve C-S-H ile birleşmiş ürünler çökler. Ürünler hızlı oluştuğundan, ÖGYFC reaksiyonlarının tamamlanamadığı ve bir yandan da çapraz bağlı silika jelinin oluştuğu belirtilmiştir. XRD analizi yardımıyla bazı Ca^{2+} iyonlarının C-S-H'nin yapısına katılmadığı ve atmosferik CO_2 ile reaksiyona girerek numune yüzeylerinde $CaCO_3$ 'yu oluşturduğu belirlenmiştir. Son aşamada reaksiyonların katı haldeki ürünler arasında devam ettiği belirlenmiştir (Burciaga ve Garcia, 2013).

1.5.3. Tarihsel Gelişimi

Alkalilerle aktive edilmiş ÖGYFC'li bağlayıcılar ilk olarak 1939'da Feret ve 1940'da Purdon tarafından çalışılmıştır. Krivenko 1994'de aktivatör olarak kullanılan alkaliler ile betonun yapısını oluşturan alkaliler arasındaki farkı açıklamış ve bu malzemeleri toprak silikatları olarak tanımlamıştır. Daha sonraki çalışmalarda, alkali aktivasyon sistemleri, kullanılan hammaddeye göre sınıflandırılmıştır. 1979 yılında Davidovits kaolinit ve kireçtaşının sinterlenmiş ürünlerini veya dolomit gibi alümino silikatları kullanarak yeni bir alkali bağlayıcı sistemi geliştirmiştir. Davidovits (1991) doğal kayalarda bulunan toprak mineralleri ve bu alümino silikatların birleşmesiyle elde edilen yeni bağlayıcıyı "Geopolimer" olarak adlandırmıştır (Ravikumar, 2012). Alkali aktivasyonunun tarihsel gelişimi Çizelge 1.3.'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.3. Alkali aktivasyonunun tarihsel gelişimi (Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, 54)

| Tarih | Gelişme | Yazar |
|--------------|---|------------------------------|
| 1939 | Çimentoda cüruf kullanımı | Feret |
| 1940 | Alkali-cüruf birleşiminin kullanımı | Purdon |
| 1959 | Alkalin çimentoların teorik esasları ve gelişimi | Glukhovsky |
| 1965 | Bileşen olarak doğal maddelerin kullanılmasıyla “alkalin çimentolar” adının ilk kullanımı | Glukhovsky |
| 1986 | Sentetik Melit cüruflarının aktivasyonu | Malolepsy ve Petri |
| 1989 | Cürufun alkali aktivasyonu | Talling ve Brandstetr |
| 1990 | Cürufllu çimentoların aktivasyonu | Wu ve diğer. |
| 1991 | Hızlı priz alan alkali-aktive bağlayıcıların geliştirilmesi | Roy ve diğer. |
| 1993 | Cüruf çimentosu | Roy ve Malek |
| 1994 | Alkalin bağlayıcılar | Krivenko |
| 1995 | Alkalilerle aktive edilmiş cürufun mikroyapı incelemeleri | Wang ve Scrivener |
| 1996 | Alkalilerle aktive edilmiş cürufların dayanımı, geçirimsizliği ve boşluk yapısı | Shi |
| 1997 | Alkalilerle aktive edilmiş cürufların kinetik çalışmaları | Fernández-Jiménez ve Puertas |
| 1998 | Alkali aktive edilmiş uçucu küllerin mikro yapısı | Katz |
| 1999 | Geopolimer sitemlerin kimyası ve teknoloji | Davidovits |
| 2000 | Alkalilerle aktive edilmiş uçucu kül- cüruf çimentosu | Puertas |
| 2001-2002 | Alkalilerle aktive edilmiş cürufllu beton | Bakharev |
| 2003 | Atıkların bertaraf edilmesi | Palomo |
| 2004 | Zeolit oluşumu | Grutzeck |
| 2008 | Geopolimerlerin tek başına kılınılması | Hajimohammadi ve ark. |
| 2009 | Geopolimerlerin yapısı, üretimi, özellikleri ve uygulama alanları | Provis ve van Deventer |

1.5.4. Alkalilerle Aktive Edilen Cürüflü Betonların Kullanım Alanları

Silika ve alümina içeren her malzeme teoride alkalilerle aktive edilebilir. Alkali aktivasyonun başladığı zamanlardan günümüze kadar kaolinitik killer, metakaolin, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, uçucu kül-cüruf karışımları gibi kalsine olmamış maddeler alkalilerle aktive edilmiştir. Alkalilerle aktive edilmiş cürüflü bağlayıcılar başta prefabrik sektörü olmak üzere konut ve işyerleri, sulama sistemleri, dalga kırınlar, petrol kuyuları ve sürekli asit ortamında bulunacak olan yapılarda kullanılmaktadır. Alkalilerle aktive edilen bağlayıcıların mekanik dayanımı, alüminosilikat malzemelerin yapısına bağlıdır. Yüksek mekanik dayanımlar kalsine malzemelerin (UK, ÖGYFC ve metakaolin vb.) kullanımı ile elde edilebilmektedir. Alkali aktivasyon reaktivitesi amorf alüminyum ve silis içeriğine bağlıdır (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes ve Jalali, 2008b). Alkalilerle aktive edilen bağlayıcılar yapısal veya yapısal olmayan birçok alanda kullanılabilir. Bu malzemelerin en yeni kullanım alanı ise, zehirli metallerin stabilizasyonu da dahil olmak üzere atıkların veya yan ürünlerin başka sektörlerde kullanılması yönetimidir. Alkali alüminosilikat reaksiyonları, atıkları ortadan kaldırmada önemli bir role sahiptir. Geopolimerler, prekast yapı elemanları üretiminde, taşıyıcı eleman olmayan beton kaplamalarda ve ısıya dayanıklı toksik metal taşıyan ürünlerin değerlendirilmesinde kullanılabilir. Geopolimerler aktive edildiklerinde nihai dayanımlarının %70'ini ilk 3-4 saatlik kür ile kazanabilmektedir (Khale ve ark.,2007).

1.5.5. Hidratasyon Ürünlerinin Oluşumu ve Yapısı

ÖGYFC tanecikleri ile alkalinin çözelti temas eder etmez reaksiyona giren bileşenler hidrolize uğrar ve çözünme başlar. İlk aşamada camı yapıdaki Ca-O, Mg-O, Al-O-Si ve Si-O-Si bağları kırılır. İkinci aşamada bu kırılma olayından daha hızlı gelişen farklı monomer yapılar oluşur. Silisyum ve alüminyum Si(OH)_4 ve Al(OH)_4 oluşturarak OH^- iyonları ile reaksiyonlarını devam ettirirler. Cürufun camı yapısından ayrılan Ca^{+2} ve Mg^{+2} iyonları, OH^- iyonları ve su ile çevrelenerek ortamdaki sulu çözelti doygunluğa ulaşmaya kadar pH seviyesini düşürürler. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat gibi alkali aktivatörlerle aktive edilen cürüflerde üçüncü aşamada pH seviyesi

azalır, Ca/Si oranı 0.9 seviyesindeyken tobermorit şeklinde C-S-H jelleri oluşmaya başlar. Alüminyum iyonlarının da çözeltiye katılmasıyla C-N-(A)-S-H şeklinde ikinci bir amorf yapı oluşur ve kurulan bağlar güçlenir. Üçüncü aşamada yalnızca sodyum hidroksit kullanılarak aktive edilen karışımlarda, camsı yapıdaki cüruf taneciklerinin çözünmesi daha kolaydır ve C-S-H yapısının oluşması için gerekli olan silisin tek kaynağı karışıma katılan ÖGYFC'dir. Bu durumda gelişen reaksiyonların sırası değişmektedir. Hidrotalsit şeklindeki kristal yapı oluşurken, silika jeli yoğunlaşmamaktadır. Sodyum hidroksit ve sodyum silikatın birlikte kullanıldığı sistemlerde basınç dayanımında nispeten daha yavaş artış olmaktadır (Diaz ve Garcia, 2013). Wang ve ark. (1995) alkalilerle aktive edilmiş ÖGYFC harçlarının Portland çimentolu harçlara kıyasla daha fazla jel ve daha az kapiler boşluk içerdiğini fakat C-S-H jeli oluşumunun her iki harç için benzer olduğunu belirtmiştir. Alkalilerle aktive edilmiş ÖGYFC hamurlarında C-S-H jelinin oluşumu ve uçucu kül esaslı alkalilerle aktive edilmiş hamurlarda polimerizasyonun oluşumu, genellikle kullanılan polimer malzeme, toplam bağlayıcıdaki molar Si/Al oranı, ve alkalin aktivatör konsantrasyonuna bağlıdır. Ayrıca, kaynak malzemedeki Ca^{+2} iyon miktarı C-S-H jelinin oluşumunu etkilemektedir. Dolayısıyla alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcıların mekanik dayanımı, alkali aktivatördeki SiO_2/Na_2O (silikat modülü) oranına, kaynak malzemedeki SiO_2/Al_2O_3 oranına ve Ca^{+2} içeriğine bağlıdır (Aydın, 2010).

1.5.6. Alkali Aktivatörler

Sodyum hidroksit, sodyum silikat, sodyum karbonat ve sodyum sülfat yaygın olarak kullanılan aktivatörlerdir. Alkalilerle aktive edilmiş cürufların hidrasyon ürünleri, kullanılan aktivatörün özelliklerinden doğrudan etkilenmektedir. Aktivatörde bulunan anyonlar mikro yapının gelişiminde önemli role sahiptir. Alkali aktivasyonunda kullanılan bazı aktivatörlerin yapıları ve etki mekanizmaları aşağıda açıklanmıştır.

- Sodyum Sülfat

ÖGYFC'yi aktive etmek için aktivatör olarak Na_2SO_4 kullanılarak yüksek mekanik dayanım elde edilebilmektedir. Na_2SO_4 yüksek oranda alkali olduğundan ince öğütülmüş cürufu çok iyi aktive edebilmektedir (Pu, 1988; Krivenko, 1993).

- Sodyum Silikat Çözeltisi

Camsuyu çözeltisi en yaygın ve en etkili kullanılan aktivatördür. $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı 1:1 ve 1:2 olan konsantre camsuyu çözeltileri temel olarak SiO_3^{2-} ve HSiO_3^- iyonlarını içermektedir. $\text{SiO}_3^{2-}/\text{HSiO}_3^-$ oranı 50:1 ile 10:1 arasında olan çözeltilerdeki Si oranı daha yüksek olduğundan bu çözeltilerle aktive edilen cüruflarda çok küçük, sıkıştırılmış polimerler oluşmaktadır. Hem ÖGYFC'nin aktivasyonu hem de silika jellerinde bulunan silika iyonları dayanıma katkı sağlamaktadır. Oluşan silika jelleri Ca ile reaksiyona girerek silika oranı yüksek olan C-S-H jellerini oluştururlar. Alkali silikatların oluşturduğu ürünlerin daha yüksek dayanım sağladığı ancak daha fazla kuruma büzülmesine neden olduğu bilinen bir gerçektir (Pu, 1988; Krivenko, 1993).

- Karışık Aktivatörler

Camsuyu ile sodyum sülfat veya sodyum karbonat gibi aktivatörlerin birlikte kullanılmasıyla aktive edilen ÖGYFC içeren betonların özellikleri ve maliyeti açısından uygun şartlar sağlanabilmektedir. Örneğin; sodyum karbonat ile aktivasyon yapıldığında, camsuyuna göre erken yaşlarda daha düşük dayanıma ulaşmakta ancak daha az kuruma büzülmesi ile karşılaşmaktadır (Ravikumar, 2012).

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Alkalilerle aktive edilmiş çimento esaslı kompozitler ve geopolimerler hem ekonomik hem de çevre dostu olmaları nedeniyle yüksek performanslı yapı malzemeleri olarak kullanılmaktadır. Geopolimer üretimi endüstriyel yan ürünlerin değerlendirilmesi açısından önemlidir. Puzolanların endüstriyel alanda kullanılması ile atıklar değerlendirilmekte ve depolama sorununa ekonomik bir çözüm üretilmiş olmaktadır. Geopolimerler, üretilmeleri için az enerji sarfiyatı gerektiren çevre dostu malzemelerdir. Geopolimer malzemeler alümin ve silis esaslı inorganik malzemeler olup yüksek alkali ortamlarda sentezlenmektedirler. ÖGYFC gibi puzolanik malzemeler tek başlarına kullanıldıklarında hidrasyon reaksiyonları çok yavaş gelişmekte ve puzolanların bünyesinde yeterli miktarda bulunmayan bileşenler ilave edilerek erken yaşlarda yüksek dayanımlı betonlar üretilebilmektedir. Yüksek dayanımlı, alkali ile aktive edilmiş geopolimer üretebilmek için reaktifliği yüksek puzolanik malzemeler kullanılması gerekmektedir (Jaarsveld ve ark., 1997). Puzolanlar alümin ve silis içerdiğinden alkalilerle birleştirildiklerinde oluşan ürünler dayanımı artırmaktadır. ÖGYFC'nin alkalilerle aktive edilmesiyle üretilen betonların mekanik ve geçirimsizlik özellikleri üzerinde etkin olan faktörlerin, kullanılan aktivatörün konsantrasyonu ve aktivatör çözeltisinin silisyum/sodyum oranı (modülü), uygulanan kür sıcaklığı, kür süresi, hidroksil iyonu oranı, pH, alüminyum miktarı, bağıl nem ve beton yaşı olduğu yapılan çalışmalarla literatürde belirlenmiştir. Woolard ve ark. (2000), geopolimer oluşumunda en baskın faktörlerin, Al_2O_3/SiO_2 oranı, alkali konsantrasyonu, kür sıcaklığı ve süresi olduğunu belirtmiştir. Fernandez ve ark. (1999), ÖGYFC'yi farklı konsantrasyonlarda farklı aktivatörlerle aktive ederek, aktivatör tipinin üretilen harç numunelerin mekanik özelliklerine olan etkilerini incelediler. Kür sıcaklığı, kullanılan ÖGYFC'nin özgül yüzey alanı, aktivatör konsantrasyonu ve alkali aktivatör tipi gibi parametrelerin etkisini açığa çıkarabilmek için dört parametrelili deneysel tasarım gerçekleştirdiler. Elde edilen deney sonuçlarını istatistiksel olarak analiz ederek deney sonuçları üzerinde en etkin deneysel parametrenin kullanılan aktivatör tipi olduğunu belirlediler. $Na_2SiO_3 \cdot nH_2O$ ve NaOH aktivatör karışımı kullanılarak üretilen harçların en yüksek mekanik özelliklere sahip olduğunu, sonraki en etkili parametrelerin ise sırasıyla aktivatör konsantrasyonu, kür sıcaklığı ve kullanılan cürufun inceliği olduğunu belirlediler. Farklı puzolanik malzeme ve aktivatör tipinin üretilen geopolimer hamurların (puzolan+su+aktivatör)

mekanik ve durabilite özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek için Bondar ve ark. (2013), farklı puzolanları KOH ve Na₂SiO₃ çözeltileri ile aktive ettiler. Aktivatör olarak KOH ve Na₂SiO₃ çözeltilerinin birlikte kullanımının betonun özellikleri açısından daha iyi sonuçlar verdiğini, bazikliği düşük, çözünebilen silikat miktarı yüksek puzolanlar ile daha düşük silikat modülünde daha yüksek dayanımlara ulaşılabileceğini belirlediler.

Uygun aktivatör ile aktive edilen ÖGYFC'nin mekanik ve geçirimsizlik özelliklerinin Portland çimentosu ile kıyaslanabilir olduğu literatürdeki çalışmalarda görülmektedir. Fernandez-Jimenez (1999), NaOH ile aktive edilen cürüflü betonlarda daha homojen bir yapının oluştuğunu, ÖGYFC'nin Na₂CO₃ yerine sadece NaOH ile aktive edildiğinde üç günlük basınç dayanımının daha yüksek olduğunu, bunun nedeninin ise Na₂CO₃'ün pH seviyesinin daha düşük olması nedeniyle erken yaşlardaki aktivasyonun daha yavaş gerçekleşmesinden kaynakladığını belirttiler. Wang ve ark. (1994), ÖGYFC'yi farklı modüllerde camsuyu kullanarak, farklı kür sıcaklıklarında ve farklı aktivatör konsantrasyonlarında aktive ettiler. Aktivatör dozajı, aktivatör tipi, kür sıcaklığı ve silikat modülü gibi deneysel parametrelerin beton özelliklerine etkilerini araştırdılar. Belirtilen parametrelerin bazılarının tek başına mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını, ancak diğer bir faktörle birlikte değerlendirildiğinde etkin olabildiğini gördüler. NaOH, NaSO₄, Na₂CO₃ gibi alkalilerin, ÖGYFC'nin aktivasyonunda yaygın olarak kullanıldığı ancak camsuyunun (sodyum silikat) arzulan mekanik özellikleri elde edebilme açısından en çok tercih edilen aktivatör tipi olduğunu belirttiler.

Alkalilerle aktive edilen cürüflü betonların boşluk yapısı, boşluk büyüklüğü, mikroyapısı ve hidrasyon özellikleri, aktivatör olarak kullanılan alkalinin özelliğine bağlıdır (Tanzer, 2010). Hermann ve ark. (1999), geopolimerleşmenin doğal olarak gelişen silika-alüminatların birleşme işlemi olduğunu, silikat ve alüminatların reaksiyona girerek, doğal kayalarla kıyaslanabilecek moleküler yapıları oluşturabildiklerini belirttiler. Xu ve Deventer (2000), her silika-alümin kaynağı malzemenin ve puzolanik bileşenin alkali çözeltilerde çözünmeye uygun olduğunu belirttiler. Xiong ve ark. (2004), periyodik tablonun I. grubunda olan elementlerin alkali aktivatör olarak kullanılabileceğini belirttiler.

ÖGYFC alkalilerle aktive edildiğinde alkali konsantrasyonunun betonun dayanımı üzerinde önemli bir etkisinin olduğu bu konuda yapılan bir çok literatür çalışmasıyla belirlenmiştir. Gasteiger ve ark.(1992)'na göre hidroksil iyonlarının konsantrasyonu arttıkça, alümina silikatların çözünürlüğü de artmakta, bu nedenle NaOH konsantrasyonunun artırılması ile yüksek basınç dayanımlarına ulaşılabilmektedir. Ryu ve ark. (2013), alkali aktivatörlerin yüksek molariteli kimyasal derişimlerinin basınç dayanımı üzerinde etkin olduğunu, yüksek alkaliteden dolayı Si ve Al bileşenlerin aktivasyonu ile uçucu kül gibi puzolanların camsı zincir yapısının kırıldığını ve yüksek dayanım kazanmak için ideal çözeltinin molaritesinin dokuz olması gerektiğini belirttiler. Cheng ve ark. (2003), yaptıkları çalışmada KOH miktarının gereğinden fazla kullanılması ile ortamda bulunan fazla K^+ iyonlarının dayanımın azalmasına neden olduğunu, K_2O/Na_2O oranı ve alkali konsantrasyonun artması ile betonların mekanik dayanımları ve yüksek sıcaklığa karşı dirençlerinin arttığını belirttiler. Bilim ve Atış (2012), ÖGYFC'yi Portland çimentosu ile farklı oranlarda yer değiştirerek sıvı sodyum silikat ile aktive ettiler. Üç farklı sodyum dozajında üretilen numunelerin basınç, eğilme dayanımları ve karbonatlaşma direncini ölçtüler. ÖGYFC'nin Portland çimentosu ile yer değiştirme oranı ve aktivatör konsantrasyonu arttıkça basınç ve eğilme dayanımlarının arttığını belirlediler. Portland çimentosu-ÖGYFC karıştırılarak üretilen numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarının sadece ÖGYFC kullanılarak üretilen numunelere göre daha düşük olduğu, karışımlarda kullanılan aktivatörün sodyum dozajı arttıkça, karbonatlaşma derinliğinin azaldığı görüldü. Wang ve ark. (2004), alkali aktivasyonu sırasında fazla miktarda NaOH bulunduğunda kimyasal çözünmenin hızlandığını ancak hidratasyon süresince etrenjit ve C-S-H oluşumunun yavaşladığını belirttiler (2004). Wang ve ark. (1994), karışımdaki NaOH ve Na_2SiO_3 konsantrasyonu arttıkça basınç dayanımının arttığını, karışımdaki ÖGYFC miktarının ağırlıkça %3-5 oranında sodyum konsantrasyonu kullanımı ile basınç dayanımın en yüksek seviyeye ulaştığını, sodyum konsantrasyonunun daha yüksek seviyelere çıkarılması durumunda ise çiçeklenme ve aşırı gevrek bir yapının oluşabileceğini belirttiler. Gebregziabiher ve ark.(2014) ÖGYFC'yi alkalilerle aktive ederek ısı kürüne maruz bırakıp, cürufun dayanım kazanma mekanizmasını ve mikro yapısını incelediler. Pelet haldeki NaOH ile 5, 8 ve 12 M, Na_2SiO_3 ile de (SiO_2/Na_2O) modülü 1.5 ve 2.5 olan çözeltiler hazırlayıp, aktivatör olarak kullandılar. ÖGYFC'nin Portland çimentosuna göre çok yavaş hidrate

olduğunu kalorimetrik eğrilerle belirlediler. Yapılan deneyler sonucunda NaOH ile aktive edilen cürufların kısa sürede ve hızla dayanım kazandığı, Na₂SiO₃ ile aktive edilen cüruflu betonların ise dayanım kazanması için ortam sıcaklığında daha uzun süre kür edilmesi gerektiğini belirlediler.

ÖGYFC'nin bünyesinde bulunan ve jel oluşması için gerekli olan silisyum ve sodyumun yetersiz olması durumunda, karışıma dışarıdan yetersiz olan bu maddeler eklenerek ÖGYFC'nin alkali aktivasyonu sağlanabilmektedir. Dayanımın artmasında silika jellerinin çok önemli rolü vardır. Silikat modülü ile Na₂O içeriği arasında net bir ilişki bulunmaktadır. M alkali metalleri belirtmek üzere, M₂O/SiO₂ oranında Na, K gibi metal iyonlarının artması veya ilave silikat miktarının azalması basınç dayanımını arttırmaktadır (Hardjito ve ark., 2004; Jaarsveld ve ark., 1997; Terzano ve ark., 2005). En iyi mekanik özelliklerin elde edilebilmesi için Wang ve ark. (1994), alkali aktivasyonunda sodyum silikat modülünün en iyi oranının %1- 1.5 olduğunu belirttiler. Diaz ve ark. (2013), ÖGYFC'yi alkalilerle aktive ederek harç numuneler üretilip, mikroyapı ve basınç dayanımlarının silikat modülüne bağlı olarak nasıl değiştiğini araştırdılar. 28 gün sonunda harç numunelerin basınç dayanımlarının 90 MPa'ya ulaştığı ve alkali aktivasyonu için uygun silikat modülünün 1- 1.5 aralığında olduğunu belirlediler. XRD (X-ışını difraksiyonu) ve NMR (nükleer magnetik rezonans) analizlerine göre amorf ve kısmen kristal yapıda olmak üzere iki tür C-S-H jeli oluşumu ile yüksek basınç dayanımlarına sahip harçların üretilebileceğini belirlediler. Alkali aktivasyonunda karışımdaki silikat miktarının dayanım üzerinde olumlu etkisinin bulunduğunu Fernández-Jiménez ve Palomo (2005) çalışmalarında belirttiler. Uçucu külü sodyum hidroksit ile aktive edip 85 °C'de 24 saat kür ederek basınç dayanımının 35-40 MPa arasında dayanım değerlerine erişebildiğini, karışıma sodyum silikat ilavesi ile basınç dayanımının 90 MPa'ya kadar yükseldiğini belirlediler. Çözeltinin alkali konsantrasyonu betonun basınç dayanımı dışında priz süresi ve kıvam gibi diğer özelliklerini de etkilemektedir. Alkali çözeltinin pH seviyesi de alkali miktarından doğrudan etkilenir ve Si-OH iyonlarının reaksiyonları için son derece önemli bir etkidir. Aktivasyon çözeltisinin pH derecesi arttıkça, çimentonun priz süresinin azaldığı, düşük pH seviyelerinde geopolimerli karışımların viskoz durumda kaldığı, yüksek pH seviyelerinde çimento gibi davrandığı ve karışımın daha akışkan kıvama eriştiği, işlenebilirliğin arttığı belirtildi (Roy ve ark., 1995; Phair, 2001). Yüksek

mekanik dayanım elde edilebilmesi için en uygun pH seviyesini 13-14 olduğu ifade edildi (Khale ve ark., 2007).

Alkalilerle aktive edilmiş betonlar üretildikten sonra Ca, Si, Na ve OH⁻ iyonlarının reaksiyonları ortam sıcaklığından etkilenmektedir. Dolayısıyla alkali aktivasyonu veya geopolimer üretiminden sonraki ürünün maruz kalacağı kür sıcaklığı ve kür süresi de betonun mekanik özellikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Geopolimerler bağlayıcılık özelliği kazanabilmek için yüksek aktivasyon enerjisine ihtiyaç duymaktadır. Yeterli aktivasyon enerjisini sağlamak için ısı kürü uygulanmaktadır. Bakharev (2005), ısı kürü uygulanması ile betonların dayanımlarındaki artışı, normal hava koşullarında 1 ayda kazanılabilecek dayanım değerlerinin, yüksek sıcaklık kürü uygulanmasıyla 24 saatte kazanılabileceğini ifade etmiştir. Kür sıcaklığı arttıkça puzolanik reaksiyon hızının arttığı ve (Hardjito, 2003; Swanepoel, 2002; Wang, 2004) uygulanan kür sıcaklığının betonun özellikleri üzerinde etkili olduğu belirtildi. Cheng ve Chiu (2003), iklimik test kabiniinde sıcaklık kürüne maruz bırakılan numunelerin hızlı dayanım kazandığını ancak normal ortam sıcaklığında kür edilen numunelerin ise uzun süre beklenildiğinde dayanım değerlerinin sıcaklık kürüne maruz bırakılmış numunelerin dayanım değerlerine çok yakın olduğunu belirttiler. Kür süresi sabit kalmak koşuluyla 70 °C sıcaklık kürüne tabi tutulan betonların basınç dayanımının 30 °C’de kür edilen betonların basınç dayanımından yüksek olduğu belirtildi (Hardjito, 2004; Swanepoel, 2002). Wang ve ark. (2004), uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer betonların 24 °C’de kür edilmesiyle 28 ve 56 günlük basınç dayanımlarının 6.9 ve 13.8 MPa’ya ulaştığını, kür sıcaklığının artması ile basınç dayanımının 24 °C’de kür edilen geopolimer betonların dayanımının iki katına kadar çıkabildiğini belirlediler. Brooks (2002), Tip I çimento ve uçucu kül ile üretilen betonlarda kür sıcaklığının 6 °C’den 80 °C’ye yükseltilmesiyle priz süresinin kısaldığını ve kür sıcaklığının 30 °C’den 90 °C’ye yükseltilmesi ile basınç dayanımının kayda değer miktarlarda artış gösterdiğini belirledi. Yapılan çalışmalarda kür sıcaklığı arttıkça cüruf aktivasyonunun hızlandığını ve dolayısıyla erken yaşlardaki dayanımın arttığı belirlendi (Talling, 1989; Fernandez- Jimenez, 1997). Alkalilerle aktive edilmiş cürufların hidrate ürünleri genellikle amorf yapıdadır ancak yüksek sıcaklık kürüne maruz bırakılanlarda kristal yapıda ürünler de oluşabilmektedir. Dolayısıyla kür sıcaklığının belirli değerlerin üzerine çıkarılması durumunda kristal yapıdaki hidrate

ürünlerin artış göstermesiyle basınç dayanımında azalma görülebilir. Camsuyu kullanılarak aktive edilen cürufllu betonlarda, kür sıcaklığının belirli bir seviyeye kadar artırılmasıyla basınç dayanımlarında artış gözlemlenmiştir. Alkalilerle aktive edilen betonlara uygulanan kür sıcaklığı betonun basınç dayanımı dışındaki diğer özellikleri de etkilemektedir. Kirschner ve Harmuth (2004) ortam sıcaklığında kür uygulanmasının priz süresinin gecikmesine yol açacağını, 75°C’de 4 saat kür uygulanması ile geopolimerleşme sürecinin büyük bir kısmının tamamlanarak yeterli dayanıma ulaşabileceğini, bu aşamadan sonra herhangi bir müdahaleye gerek olmadığını belirttiler. Suvanepoel ve Strydom (2002) uçucu kül ve kaolinit kilinin alkalilerle aktive edildiğinde, kür sıcaklığının 45°C’den 65°C’ye yükselmesiyle karışımın viskozitesinin 5 kat, kür sıcaklığının 65°C’den 85°C’ye yükselmesiyle ise 10 kat arttığını belirttiler. Talling (1989), camsuyu ile aktive edilen ÖGYFC içeren betonların 50 °C’de 7 saat kür edilmesiyle mekanik dayanımlarında ciddi artışlar olduğunu, Andersson ve ark. (1988), camsuyu ile aktive edilen ÖGYFC içeren harç numunelerinin 80°C’de 16 saat kür edilmesiyle basınç dayanımlarında normal şartlarda kür edilen betonlara göre belirgin artışlar gerçekleştiğini belirlediler. Fernandez-Jimenez (1999), kür sıcaklığı ile reaksiyon süresinin doğrudan ilişkili olduğunu, erken yaşlarda (< 3 gün) 45°C’de kür edilen numunelerin mekanik dayanımlarının 25°C’de kür edilen numunelerin dayanımlarından daha yüksek olduğunu ancak kür süresi uzadıkça bu etkinin tersine döndüğünü belirtti. Yüksek sıcaklık kürüne maruz kalan betonlarda erken yaşlarda reaksiyon ürünlerinin fazla oluşmasıyla heterojen bir yapının meydana geldiği, dolayısıyla difüzyonun zorlaştığı ve nihai dayanımın azaldığı belirtildi.

Alkalilerle aktive edilmiş ve/veya geopolimer betonların kür işlemi başladıktan 3-4 saat sonra nihai dayanımlarının yaklaşık %70’ini kazanabildiği, (Palomo ve ark., 2003a; Palomo ve ark., 2003b) yüksek nem oranına sahip kapalı kaplar içerisinde kür işlemi uygulaması ile ÖGYFC aktive edilerek üretilen betonların, Portland çimentosu ile üretilen betonların aksine dayanım kazanmadığı belirtildi (Khale, 2007). Alkalilerle aktive edilen ÖGYFC’li beton ve harçlarda kür süresinin artması, polimerleşmeyi etkileyerek basınç dayanımının artmasına katkı sağlamaktadır. Ancak 48 saatten fazla uygulanan ısı kürünün dayanım kazanma üzerinde kayda değer bir katkısının bulunmadığı, kür süresinin daha da artmasıyla dayanımda azalma meydana geldiği belirtilmektedir. Bu durumun nedeni olarak ise geopolimerlerin granül yapısının

bozulması gösterilmektedir. Bu olay, yapının yarı kristal hale geçmeden su miktarının azalıp, jel yapıda büzülme meydana gelmesi şeklinde sonuçlanır. Khale ve ark. (2007), geopolimerlerin kristalleşen kısmının uzun kür süresinden etkilenmediğini, AAECB basınç dayanımının betonun yapısında bulunan amorf faz ile doğrudan ilişkili olduğunu belirttiler. Zhang ve ark. (2008), ÖGYFC'yi silikat modülü 1 olan camsuyu ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) ile aktive ederek oluşan ürünün mikro yapısını incelediler. Tobermorit ve C-S-H gibi yeni fazlar ile birlikte kür süresindeki artışa bağlı olarak diğer mineral yapıların da geliştiğini belirttiler. Deney sonuçlarına göre, hidrasyonun ilk aşamalarında camsı yapının bozulduğunu ancak yeni bir fazın oluşmadığını, hidrasyonun ilerlemesiyle $[\text{SiO}_4]^{-4}$ ve $[\text{AlO}_4]^{-5}$ arasında çoklu yoğunlaşma reaksiyonlarının gerçekleşmesi ile yeni mineral fazların oluştuğunu belirttiler.

AAECB üretiminde belirlenen faktörler betonun içeriği ve uygulama şartları göz önüne alındığında mekanik özellikleri etkilemekte ve bu etkilerin ne derecede önemli olduğu araştırılmaktadır. Hardjito ve ark. (2004), uçucu kül ile üretilen geopolimerler ile Portland çimentosu ile üretilen harçların gerilme-birim şekil değiştirme davranışlarını, farklılık olup olmadığını araştırdılar. Geopolimerlerin Young modülü, Poisson oranı ve çekme dayanımının çimentolu betonlar ile benzer olduğunu, belirgin bir fark olmadığını belirttiler. Alkalilerle aktive edilen ÖGYFC'li betonların mekanik özellikleri dışında, geçirimsizlik ve aderans özelliklerinin de aktivatör tipi ve dozajından, silikat modülünden ve kür şartlarından etkilendiği literatürde belirtilmektedir. Thomas ve ark. (2012), puzolan katkı kullanımının, betonun çevresel ve zararlı etkilere karşı direncini artırdığını dolayısıyla durabilitesini de etkilediğini belirtmişlerdir. Palomo ve ark. (1999), alkali çözeltideki silikat iyonlarının mekanik dayanımı ve elastik özelliği artırdığını ancak matris-agrega ve matris-çelik arasındaki bağı zayıflattığını belirttiler. Palomo (1999), polimer katkılı betonlarda bünyedeki serbest suyun beton içerisinde fazla boşluk oluşturmasından dolayı puzolan katkılı betonların gaz geçirimsizliğinin aynı şartlardaki Portland çimentolu betonlara göre %20 daha fazla olduğunu, geopolimer betonların yüksek sıcaklıklarda kür edilmeleri şartıyla geçirimsizliklerinin azaldığını belirtti. Yüksek sıcaklık kürü uygulaması ile gaz geçirimsizliğinin azalmasını beton bünyesindeki serbest suyun polimerleşme olayını düzenleyen bir aracı gibi davranmasından kaynaklanabileceği şeklinde açıkladılar. Palomo (1999), yüksek sıcaklıklarda serbest suyun beton bünyesinden uzaklaşırken Si-O-Si veya Si-O-Al gibi

çapraz bağlar oluşarak daha az büzülme gerçekleştiğini ve daha güçlü bir yapının oluştuğunu belirtti. Yoğun mikro yapının oluşması beton ve çimento harcının durabilite özelliklerini geliştiren bir faktördür. Betonların gözenekliliği, boşlukların boyutu, dağılımı ve boşluklar arasındaki bağlantılar betonların su emme kapasitesi, ısı iletkenliği gibi geçirimsizlik özelliklerini direkt olarak etkilemektedir. Çözünebilen silikat oranı arttıkça daha yoğun ve homojen mikro yapı oluşmakta, dolayısıyla su emme kapasitesi azalmaktadır. Qureshi ve Ghosh (2013), silikat modülünün 1.6'dan 4.8'e yükselmesiyle açık boşluk ve su emme miktarının arttığını, silikat modülünün 6.4'e ulaşmasıyla su emme miktarı ve açık boşluk miktarında ani bir azalmanın olduğunu belirledi. Thokchom ve ark. (2009), alkalilerle aktive edilen harçların su emme kapasitelerinin alkali oranına bağlı olduğunu, alkali oranı yüksek olan harçların su emme kapasitesinin daha düşük olduğunu belirtti. Aynı zamanda alkali içeriği düşük olan betonların ise boşluk miktarının fazla olduğunu, dolayısıyla bu tür betonların kapiler ve normal yolla su emme kapasitelerinin de yüksek olduğunu belirtti. ÖGYFC'li harçların alkali aktivasyonunda kullanılan aktivatörlerin $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı ve Na_2O içeriğinin de boşluk miktarını önemli derecede etkilediği belirtildi. Sodyum silikatın optimum oranda kullanılmasıyla aktive edilen cürüflü harçların basınç dayanımı ve işlenebilirliği Portland çimentolu ve/veya sadece sodyum hidroksit ile aktive edilen numunelere göre daha yüksek olduğu belirtildi. Sadece sodyum hidroksit ile aktive edilen numunelerde boşluk oranı ve su emme kapasitesinin daha düşük ancak kuruma rötresinin daha fazla meydana geldiği belirtildi (Aydın ve Baradan, 2014).

Betonun geçirimsizliği kılcal su emme, klor geçirimsizliği, gaz geçirimsizliği gibi deneylerle belirlenebilmektedir. AAECB hızlı klor geçirimsizlikleri ölçülerek, betonların elektriksel öz direnci hakkında yorum yapılabilen ve betonun servis ömrü tahmin edilebilmektedir. Doğan ve ark.(2009), AAECB ve UK numunelerini havada ve suda 90 gün kür ederek klor iyonu geçirimsizliklerini belirlediler. Çalışma kapsamında merkezi kompozit tasarım yöntemi ile istatistiksel deney tasarımı gerçekleştirilerek karışım oranları belirlendi. Toplam bağlayıcı miktarı, puzolanik malzeme miktarı ve su/toplam bağlayıcı oranı deney tasarımında bağımsız değişkenler olarak belirlendi. Üretilen numuneler üzerinde hızlı klor geçirimsizliği testi yapılarak, test sonuçları üzerinde hangi bağımsız değişkenin etkin olduğu, etkin olan bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerinde etkisinin ne kadar olduğu istatistiksel analiz yapılarak tespit

edildi. Alkalilerle aktive edilen puzolan katkılı betonların klor geçirimsizliğinin daha az olduğu, puzolanlı betonların bünyesindeki bağlantılı boşluk miktarı arttıkça geçirimsizlik ve su emme kapasitesinin artış gösterdiği ve dolayısıyla ısı iletkenliğinin azaldığı belirtildi. Literatürdeki çalışmalarda boşluk oranı arttıkça, ısı iletkenlik katsayısının da lineer olarak azaldığı belirtilmektedir (Pia ve Sanna, 2013; Kou ve ark., 2000).

Tang ve ark. (2015), yaptıkları bir çalışmada UK, ÖGYFC ve silika dumanı (SD) ile üretilen, su/bağlayıcı oranı 0.4, ÖGYFC katılım oranı %10, %30, %50 ve %70 olarak çimento ile yer değişen cüruf-çimento pastalarının ısı iletkenliklerini belirlemeye çalıştılar. Numuneleri 20°C'de %100 nemli ortamda ve havada kür işlemine maruz bırakarak numunelerin farklı hidrasyon aşamalarındaki termal iletkenliklerini ölçtüler. Kür süresi arttıkça, hidrasyonun hızlanmasına bağlı olarak katı fazların oluşmaya başladığını ve ısı iletkenliğinde arttığı belirlediler. Çimento yerine UK ve ÖGYFC kullanılması durumunda reaksiyonların yavaşladığını ve hidrasyonun ilk aşamalarında ısı iletkenliğinin az olduğunu bildirdiler.

Kim ve ark. (2003), 20°C ve 60°C de 7 gün kür edilen çimento pastalarının ısı iletkenlik katsayılarının sırasıyla 1.16 W/mK ve 1.04 W/mK olduğunu belirlediler. Demirboğa (2006), SD, UK ve ÖGYFC ve bunların farklı kompozisyonları ile üretilen betonların ısı iletkenlikleri ve basınç dayanımlarını araştırdı. Puzolan katkısı olmadan üretilen kontrol betonlarının ısı iletkenlik katsayısının puzolan katkılı betonlara göre daha yüksek olduğunu ve 1.233 W/mK olarak belirledi. Kristal yapıdaki silikanın ısı iletkenliğinin amorf yapıdaki silikanın ısı iletkenliğinden 15 kat daha fazla olduğu, bu nedenle puzolan katkılı betonların ısı iletkenliklerinin erken yaşlarda yüksek, ilerleyen yaşlarda amorf yapının artmasına bağlı olarak daha düşük olduğu belirtildi (Onaran, 1993; London, 1979; Fu ve Chung, 1999). Cheng ve Chin (2003), geopolimer olarak üretilmiş beton bir paneli, bir tarafından 1100 °C sıcaklığa 35 dakika maruz bırakarak panelin diğer yüzeyindeki sıcaklığı 240-283°C olarak ölçtüler. Geopolimer betonların yüksek sıcaklık direnci ve ısı iletkenliğinin alkali konsantrasyonunun artmasına bağlı olarak arttığı belirtildi. Moseson ve ark. (2012), soda külü (sodyum karbonat), granüle kireç taşı ve MgCO₃ kullanılarak ÖGYFC'yi aktive ettiler. Uygun deney tasarımı ile farklı aktivatörlerin karışıma katılım oranlarını değiştirerek üretilen betonları test edip deney sonuçlarını istatistiksel olarak analiz ettiler. Üç farklı istatistiksel model oluşturup, test edilen oranlar dışındaki karışımlarda numune özelliklerinin nasıl

değişeceğini tahmin etmeye çalıştılar. Na_2CO_3 ile aktive edilen ÖGYFC'li beton ve %68 granül kireç taşı kullanılarak üretilen betonların özelliklerinin Portland çimentolu betonlarla aynı olduğu belirlenmiş olup, deney tasarımında kullanılan bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenler üzerindeki etkisi daha az sayıdaki karışım ile belirlenebildiğinden deney tasarımı ile malzeme ve zaman tasarrufu sağlandığı test edilmiştir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Giriş

Bu çalışmada tepki yüzeyi yöntemi kullanılarak AAECB mekanik ve geçirimsizlik özellikleri ve bu özelliklere etki eden faktörlerden hangisinin daha etkin olduğu belirlenmeye çalışılmıştır. Design Expert 7.0.3 programı kullanılarak Tepki Yüzeyi Yöntemi ile alkali konsantrasyonu, silikat modülü, uygulanan kür sıcaklığı ve kür süresi bağımsız değişkenler olarak tanımlanmıştır. Tepki Yüzeyi Yöntemi ile belirlenen karışım özellikleri ve kür şartları sağlanarak ÖGYFC alkalilerle aktive edilmiştir. PÇ ile ÖGYFC'siz kontrol numuneleri üretilmiştir. Çökme değeri, üretilen tüm betonlar için 20 ± 2 cm olacak şekilde sabit tutulmuştur. Üretilen beton numunelerin mekanik ve geçirimsizlik özellikleri belirlenmiştir. Sertleşmiş beton numunelerinin 1, 7, 28, 90 ve 180 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. 28 günlük numunelerin aşınma direnci, yarmada çekme dayanımı, çekip çıkarma yükü gibi mekanik özellikleri belirlenmiştir. Numunelerin basınçlı su geçirimsizliği, kılcal su emmesi, su emme oranı, gaz geçirimsizliği, hızlı klor geçirimsizliği, ısı iletkenliği ölçülerek geçirimsizlik özellikleri tespit edilmiştir.

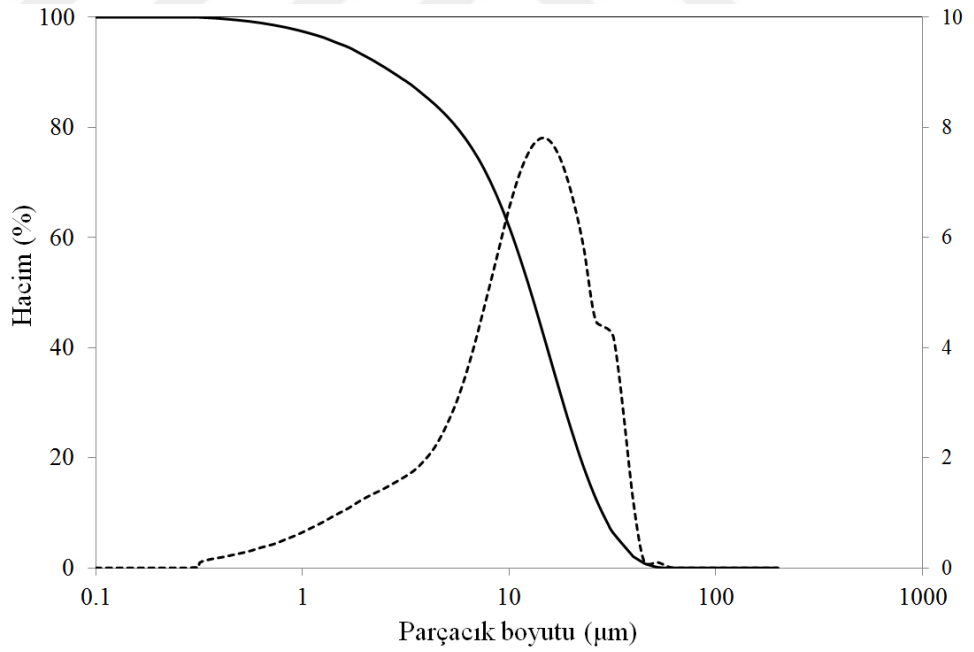
3.2. Malzemeler

3.2.1. Ögütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu (ÖGYFC)

Çalışmada kullanılan ÖGYFC ADANA Çimento Sanayi T.A.Ş. / İskenderun Tesisleri'nden alınmıştır. ÖGYFC'nin özgül ağırlığı 2.89 g/cm^3 ve Blaine inceliği $540 \text{ m}^2/\text{kg}$ 'dir. ÖGYFC'nin kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.1'de, ÖGYFC'nin parçacık tane dağılımı ise Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. ÖGYFC ve Portland çimentosunun kimyasal analizi

| Kimyasal kompozisyon | ÖGYFC'nin analiz sonuçları (%) | PÇ'nin analiz sonuçları (%) |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| CaO | 36.25 | 62.58 |
| SiO ₂ (Çözünen) | 34-36 | 20.25 |
| SO ₃ | 0.60 | 2.73 |
| Na ₂ O | 0.28 | 0.22 |
| K ₂ O | 0.75 | 0.92 |
| S ⁻² | 0.51 | - |
| Al ₂ O ₃ | 11.34 | 5.31 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.74 | 4.04 |
| MgO | 6.10 | 2.82 |
| Kızdırma kaybı | 0 | 3.02 |
| Serbest Kireç | 0 | - |



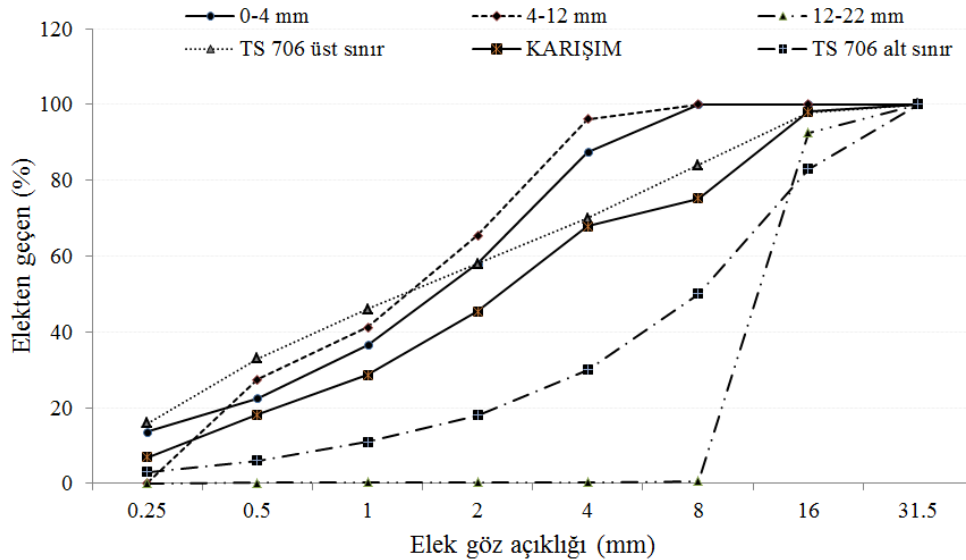
Şekil 3.1. ÖGYFC'nin parçacık tane dağılımı

3.2.2. Portland Çimentosu

Kontrol numunelerinin üretiminde ADANA Çimento Sanayii T.A.Ş. tarafından üretilen standart CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun yoğunluğu 3.15 g/cm^3 olup, Blaine özgül yüzeyi ise $3250 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'dir. Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

3.2.3. Agregası

Çalışmada, İskenderun bölgesinde yer alan taş ocaklarından elde edilen dolomitik kireçtaşı orijinli agregası kullanılmıştır. Beton üretiminde, tane çapı 0-4 mm olan agreganın kullanım oranı ağırlıkça % 50, tane çapı 4-12 mm olan agreganın kullanım oranı ağırlıkça % 25 ve tane çapı 12-22 mm olan agreganın ağırlıkça kullanım oranı ise % 25'tir. Agregalara ait yoğunluk değerleri, 0-4 mm için 2.62 oranları, 0-4 mm için % 2.7, 4-12 mm için % 0.5, 12-22 mm için % 0.4'tür. Karışımlarda kullanılan agregaların elekten geçen miktarları ve TS 706 EN 12620 (2009)'da belirtilen en büyük tane çapı 31.5 mm olan agreganın sınır değerleri ile fiziksel özellikleri Çizelge 3.2' de, bu agregaların granülometri eğrileri ise Şekil 3.2.'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Agregası gradasyon eğrileri

Çizelge 3.2. Agrega granülometrisi ve fiziksel özellikleri

| Elek boyutu (mm) | Elekten geçen (%) | | | | |
|---------------------|-------------------|-----------|----------|---------------------|---------------------|
| | İnce agr. | Orta agr. | İri agr. | TS 706 (Alt sınıır) | TS 706 (Üst sınıır) |
| 31.5 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 16 | 100 | 100 | 92.6 | 83 | 98 |
| 8 | 100 | 62.5 | 0.7 | 50 | 84 |
| 4 | 87.5 | 1 | 0.4 | 30 | 70 |
| 2 | 58 | 1 | 0.3 | 18 | 58 |
| 1 | 36.6 | 1 | 0.3 | 11 | 46 |
| 0.5 | 22.5 | 1 | 0.2 | 6 | 33 |
| 0.25 | 13.7 | 0.1 | 0.1 | 3 | 16 |
| İncelik modülü | 2.8 | 2.5 | 6.1 | | |
| Özgül ağırlık | 2.6 | 2.7 | 2.7 | | |
| Su emme (%) | 2.70 | 0.5 | 0.4 | | |

3.2.4. Sodyum Silikat (Na_2SiO_3)

ÖGYFC'yi aktive etmek için kullanılan camsuyu Bereket Kimya firmasından temin edilmiştir. Sodyum silikat camsuyu olarak da bilinmektedir. Karışımlarda kullanılan sodyum silikatın kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.3'de gösterilmiştir. Beton karışımlarına eklenen sodyum silikatın ağırlıkça silikat modülü Çizelge 3.3'de görüldüğü gibi 3.19'dur.

Çizelge 3.3. Sodyum silikatın kimyasal ve fiziksel özellikleri

| Fiziksel ve kimyasal özellikler | Analiz Sonuçları (%) |
|--|---------------------------------------|
| Görünüş | Filtre edilmiş, renksiz, kıvamlı sıvı |
| Ağırlıkça modül ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) | 3.19 |
| Moleküler modül ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) | 3.30 |
| Be (20 °C'de) | 39.4 |
| Yoğunluk (20 °C'de g/cm^3) | 1.37 |
| Na_2O (%) | 8.52 |
| SiO_2 (%) | 27.1 |
| Viskozite (20 °C'de) | 202 |

Silikat modülünün deney tasarımında belirlenen değerlere indirgenebilmesi için, sodyum silikatın aktivasyon çözeltisindeki miktarı değiştirilmiş ve dışarıdan sodyum hidroksit ilave edilmiştir. Modül kavramı aktivatör çözeltisindeki Si/Na oranını ifade ettiğinden karışımdaki Na oranı arttıkça, çözeltinin silikat modülü azalmıştır.

3.2.5. Sodyum Hidroksit (NaOH)

Yüksek fırın cürufunu aktive etmek ve karışımın sodyum konsantrasyonunu ayarlamak için sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır. Sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri Çizelge 3.4’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Piyasada kostik soda olarak da bilinen sodyum hidroksit ucuz ve kolay temin edilebilen bir aktivatördür. Beyaz renkli ve katı halde olan sodyum hidroksit 320°C’de erir, suda ısı vererek çözünür.

Çizelge 3.4. Sodyum hidroksitin kimyasal analizi

| Kimyasal özellikler | Birim | Analiz Sonuçları (%) |
|--|-------|----------------------|
| Toplam baziklik (NaOH) | g/kg | ≥ 990 |
| Sodyum karbonat (Na ₂ CO ₃) | g/kg | ≤ 4 |
| Sodyum sülfat (Na ₂ SO ₄) | mg/kg | ≤ 80 |
| Sodyum klorür (NaCl) | mg/kg | ≤ 200 |
| Demir (Fe) | mg/kg | ≤ 10 |
| Civa (Hg) | mg/kg | ≤ 0.1 |
| Arsenik (As) | mg/kg | ≤ 1 |
| Kadmiyum (Cd) | mg/kg | ≤ 1 |
| Krom (Cr) | mg/kg | ≤ 1 |
| Kurşun (Pb) | mg/kg | ≤ 0.5 |
| Antimon (Sb) | mg/kg | ≤ 5 |
| Selenyum (Se) | mg/kg | ≤ 5 |
| Nikel (Ni) | mg/kg | ≤ 2 |

3.2.6. Su

Beton üretiminde kullanılan karışım suyu ve kür suyu İskenderun şehir şebeke suyudur. Beton karışım ve kür suyu TS EN 1003’e uygun olarak kullanılmıştır. Kaynaklarda karışım suyu, genel anlamda içilebilir su olarak ifade edilmektedir.

3.3. Deney Tasarımı

3.3.1. Deney Tasarımı Yönteminin Kullanım Amacı

AAECB mekanik ve geçirimsizlik özellikleri üzerinde etkili olan faktörler literatür yardımıyla belirlenmiştir. ÖGYFC aktive edilirken kullanılan alkali aktivatörün konsantrasyonu, aktivasyon çözeltisinin silikat modülü (Si/Na), üretilen betonlara uygulanan kür sıcaklığı ve kür süresi bu deneysel çalışmada etkileri incelenen faktörler (bağımsız değişkenler) olarak belirlenmiştir. Bu faktörlerin hangi aralıkta ne kadar etkili olduğunu, birbirleriyle etkileşimlerini, betonun mekanik ve geçirimsizlik özellikleri açısından optimum değerlerin neler olduğunu belirlemek, bunları formülize ederek çalışılan aralık dışındaki özelliklerini de tahmin edebilmek, aynı zamanda malzeme, işçilik ve zamandan tasarruf sağlamak için deney tasarımına ihtiyaç duyulmuştur. Deney tasarımı Tepki Yüzeyi Yöntemi kullanılarak ticari program (Design Expert 7.0.3) yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

3.3.2. Tepki Yüzeyi Yöntemi (TYT)

TYT, ilgilenilen tepkinin birkaç değişken tarafından etkilendiği ve amacın bu tepkiyi optimize etmek olduğu problemlerin modellenmesi ve analizi için kullanılan istatistiksel tekniklerin ve matematiksel ifadelerin birleşimidir. TYT yeni bir ürünün formülasyonunda, var olan ürün tasarımının iyileştirilmesinde, süreç optimizasyonunda, sürecin geliştirilmesinde ve iyileştirilmesinde yaygın olarak kullanılır (Yalçın, 2009). TYT'nin temelleri 1930'lu yıllarda atılmıştır. Box ve Wilson'nın 1951'de yapmış oldukları çalışmanın istatistik komitesi tarafından kabul görmesiyle TYT yaygın olarak kullanılan bir yöntem haline gelmiştir. Bu yöntemde iki değişken grubu arasındaki ilişki belirlenmektedir. Çalışmada etkisi incelenen faktörler bağımsız değişkenler, optimize edilecek olan tepkiler ise bağımlı değişkenler olarak anılmaktadır. Özellikle mühendislik alanlarında uygulanması kolay ve deney sayısını azaltması nedeniyle ekonomik olan TYT, modelleme aşamasında kullanılmaktadır. TYT, bağımsız parametrelerin ve seviyelerinin belirlenmesi, yapılan deneyler sonucunda verilerin elde edilmesiyle tahmini model denkleminin belirlenmesi, bağımsız değişkenlere bağlı

fonksiyonu olarak tepkinin, tepki yüzeyi eğrisi ve izdüşümünün elde edilerek optimum noktaların belirlenmesi gibi üç temel adımdan oluşmaktadır.

TYY, beton gibi kompozit malzemelerin deney aşamasında etkin şekilde uygulanabilmektedir. TYT'de istatistiksel deney tasarımı, regresyon modeli teknikleri ve optimizasyon teknikleri kullanılmaktadır. TYT'nin diğer deneysel ve optimizasyon metodlarına göre avantajları vardır. Çok sayıda deney yapmadan kısa zamanda önemli düzeyde bilgi verebilmekte ve bağımlı değişkenlerin ikili etkileşimlerini matematiksel denklem modelleri ile inceleme fırsatı sunmaktadır. Kurulan matematiksel model, optimizasyonda hedef fonksiyon olarak tanımlanmakta ve optimum sonuçları elde etmek için çeşitli sayısal yaklaşımlar kullanılarak optimize edilebilmektedir. Matematiksel modelin grafiksel gösterimi, TYT'yi ortaya koymaktadır. Bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki genel bağıntı denklem (3.1) ile gösterilmektedir (Yalçın, 2009).

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + e \quad (3.1)$$

Burada; y: bağımlı değişkeni (tepki), f: Tepkinin fonksiyonunu, x_k : bağımsız değişkenleri, k: Bağımsız değişken sayısını, e: istatistiksel hatayı ifade etmektedir.

Regresyon denkleminin anlamlı bir ilişkiyi ifade edip etmediği bazı testlerle kontrol edilebilir. Karmaşık bir modelin bağımsız değişken sayısı m'den daha az olan k sayıda değişkenli daha basit bir modele göre y'nin değişimini kontrol etmek için denklem (3.2)'de gösterilen hipotez, en az bir β_{k+i} katsayısının sıfıra eşit olmadığı karşıt hipotezine göre test edilir. Basit modelin kalıntılarının karelerinin toplamı ile karmaşık modelin kalıntılarının karelerinin toplamı arasında tanımlanabilecek parametrenin dağılımı F istatistiğini verir. Hesaplanan değer F (Fisher) tablosundan okunan kritik değerden büyük olması karmaşık modelin daha iyi olduğu anlamını taşır (Myers ve Montgomery, 2002).

$$H_0: \beta_{k+1} = \beta_{k+2} = \dots = \beta_m = 0 \quad (3.2)$$

Çok amaçlı optimizasyon çalışmalarında, optimum değerlerin elde edilebilmesi için doğrusal olmayan çözüm yöntemleri de kullanılmaktadır. Derringer ve Suich

(1980), çok amaçlı optimizasyon yönteminde, tepki fonksiyonunda amaca uygunluk ölçütünü belirlemek için erişilebilirlik fonksiyonları tanımlamışlardır. Erişilebilirlik fonksiyonu $0 \leq d_j \leq 1$ aralığında değişen değerler alan, $d=1$ durumunda o değişken için başlangıçta tanımlanan hedefin tam olarak karşılandığı, $d=0$ durumunda ise belirlenen aralığın içinde kalmadığı anlamını taşımaktadır. Çok amaçlı optimizasyonda bir tepkinin maksimum yapılması için erişilebilirlik fonksiyonunun (d_j) değeri denklem (3.3) ile hesaplanmaktadır (Myers ve Montgomery, 2002).

$$d_j = \begin{cases} 0 & y_i \leq L \\ \left(\frac{y_i-L}{M-L}\right)^r & L < y_i < M \\ 1 & y_i \geq M \end{cases} \quad (3.3)$$

Bir tepkinin minimum yapılması için ise erişilebilirlik fonksiyonu denklem (3.4) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$d_j = \begin{cases} 1 & y_j \leq L \\ \left(\frac{M-y_j}{M-L}\right)^r & L < y_j < M \\ 0 & y_j \geq M \end{cases} \quad (3.4)$$

Bu denklemlerde d_j : j. tepkinin erişilebilirlik fonksiyonunun değeri, y_j : j. tepkinin TYY’de oluşturulan modeldeki hesaplanan değeri, L: tüm deney setinde hesaplanan en küçük değeri (alt sınır), M: tüm deney setinde hesaplanan en büyük değeri (üst sınır), r: j. tepkinin ağırlık faktörünü (tepkiye verilen önemi) ifade etmektedir. Ağırlık faktörü $r = 1$ iken erişilebilirlik fonksiyonu lineer olmakta, $r > 1$ iken tepkinin önemi artmakta, $0 < r < 1$ durumunda ise tepkinin önemi azalmaktadır (Yardımcı, 2007).

3.3.3. Deney Tasarımı ve Deneylerde Kullanılan Parametreler

Bu çalışmanın deneysel tasarımı TYY kullanılarak Design Expert 7.0.3 programı ile gerçekleştirilmiştir. ÖGYFC’nin alkali aktivasyonu üzerinde anlamlı olan faktörlerin etkileri incelenmiştir. Tepki yüzeyi yöntemi ve merkezi kompozit tasarım kullanılarak aktivasyon çözeltisinin sodyum konsantrasyonu ve silikat modülü, kür sıcaklığı ve kür süresi bağımsız değişkenler olarak belirlenmiş ve dört faktörlü bir deney programı

oluşturulmuştur. Küçük ölçekli ve tek blok oluşturacak şekilde deney tasarımı tercih edilerek α katsayısı 1.68179 olarak belirlenmiştir. Merkezi kompozit yöntemde her sayısal faktör beş farklı değerde ($+\alpha$, $-\alpha$, $+1$, -1 ve merkez nokta) olacak şekilde, tasarım %95 güvenlik seviyesi sağlanacak şekilde belirlenmiştir. 21 deney seti sunulmuştur. Bu deney setlerinden beş tanesi merkezi noktalar, on altı tanesi de merkezi olmayan noktalar olarak tanımlanmıştır. Deney tasarımının sayısal katsayılar ile gösterimi Çizelge 3.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. Deney tasarımında kullanılan katsayılar

| Blok | Faktör 1 | Faktör 2 | Faktör 3 | Faktör 4 |
|--------|----------|----------|----------|----------|
| Blok 1 | 0 | -1.68179 | 0 | 0 |
| Blok 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Blok 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Blok 1 | 1.68179 | 0 | 0 | 0 |
| Blok 1 | 0 | 0 | -1.68179 | 0 |
| Blok 1 | -1.68179 | 0 | 0 | 0 |
| Blok 1 | -1 | -1 | 1 | -1 |
| Blok 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Blok 1 | 0 | 0 | 1.68179 | 0 |
| Blok 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Blok 1 | -1 | 1 | 1 | 1 |
| Blok 1 | 1 | -1 | 1 | 1 |
| Blok 1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| Blok 1 | 1 | 1 | 1 | -1 |
| Blok 1 | -1 | 1 | -1 | 1 |
| Blok 1 | 1 | 1 | -1 | -1 |
| Blok 1 | 0 | 1.68179 | 0 | 0 |
| Blok 1 | 0 | 0 | 0 | -1.68179 |
| Blok 1 | 1 | -1 | -1 | 1 |
| Blok 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Blok 1 | 0 | 0 | 0 | 1.68179 |

Literatürde bulunan çalışmalardan yararlanılarak bağımsız faktörlerin çalışma aralığı belirlenmiştir. Deney tasarımı Çizelge 3.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. Deneý tasarımı (Karışım oranları ve kür şartları)

| Karışım no | Karışımın adı | Kür sıcaklığı (°C) | Kür süresi (Saat) | Sodyum konsantrasyonu (%) | Silikat modülü (Si/ Na) |
|------------|------------------|----------------------|-------------------|---------------------------|-------------------------|
| K1 | 26D13S3.8K1.8M | 26 | 13 | 3.8 | 1.8 |
| K2 | 40D20S6K2.6M | 40 | 20 | 6 | 2.6 |
| K3 | 40D6S1.6K1M | 40 | 6 | 1.6 | 1 |
| K4 | 40D20S1.6K2.6M | 40 | 20 | 1.6 | 2.6 |
| K5 | 40D6S6K1M | 40 | 6 | 6 | 1 |
| K6 | 60D13S3.8K0.45M | 60 | 13 | 3.8 | 0.45 |
| K7 | 60D13S3.8K1.8M | 60 | 13 | 3.8 | 1.8 |
| K8 | 60D13S3.8K1.8M | 60 | 13 | 3.8 | 1.8 |
| K9 | 60D13S3.8K1.8M | 60 | 13 | 3.8 | 1.8 |
| K10 | 60D13S3.8K1.8M | 60 | 13 | 3.8 | 1.8 |
| K11 | 60D13S3.8K1.8M | 60 | 13 | 3.8 | 1.8 |
| K12 | 60D25S3.8K1.8M | 60 | 25 | 3.8 | 1.8 |
| K13 | 60D13S3.8K3.15M | 60 | 13 | 3.8 | 3.15 |
| K14 | 60D13S7.5K1.8M | 60 | 13 | 7.5 | 1.8 |
| K15 | 60D13S0.1K1.8M | 60 | 13 | 0.1 | 1.8 |
| K16 | 60D1.23S3.8K1.8M | 60 | 1.23 | 3.8 | 1.8 |
| K17 | 80D20S1.6K1M | 80 | 20 | 1.6 | 1 |
| K18 | 80D6S1.6K2.6M | 80 | 6 | 1.6 | 2.6 |
| K19 | 80D6S6K2.6M | 80 | 6 | 6 | 2.6 |
| K20 | 80D20S6K1M | 80 | 20 | 6 | 1 |
| K21 | 94D13S3.8K1.8M | 94 | 13 | 3.8 | 1.8 |
| K22 | KONTROL N. | Suda kür edilmiştir. | | | |

K1 (26D13S3.8K1.8M) ifadesi 26°C’de 13 saat kür edilen %3.8 sodyum konsantrasyonu ve 1.8 silikat modülü ile üretilen AAECB temsil etmektedir. Sodyum konsantrasyonu %1.6 ile %6 arasında değişen oranlarda, silikat modülü 1 ile 2.6 oranlarında üretilen betonlara 40°C-80°C arasında ısı kürü uygulanarak kür sıcaklığının etkisi ve kür süresinin etkisini inceleyebilmek için numunelere 6-20 saat sıcaklık kürü uygulanıp test edilmiştir. Sodyum konsantrasyonu %0.1 ile %7.5 arasında değişen oranlarda, silikat modülü 0.45 ile 3.15 oranlarında üretilen betonlarda kür sıcaklığının etkisini inceleyebilmek için üretilen numuneler ticari program tarafından belirlenen

26°C-94 °C aralığında, kür süresinin etkisini inceleyebilmek için de 1.23 saat ile 25 saat süreyle kür edilmişlerdir.

Aktivasyon çözeltisine katılan sodyum silikatın bünyesindeki su miktarının bazı karışım oranları için karışımda olması gereken toplam su miktarından fazla olması nedeniyle sistemden suyun buharlaştırılması gerektiği için 0.52 alkali çözelti/cüruf oranı uygun bulunmuştur. Böylece tüm karışımlar için su miktarı kontrol edilebilir düzeyde tutulmuştur. Kontrol betonlarında 400 kg/m³ çimento dozajı, AAECB ise 400 kg/m³ ÖGYFC bağlayıcı olarak kullanılmıştır.

Sodyum hidroksit su ile egzotermik reaksiyon gerçekleştirdiğinden aktivasyon çözeltisi hazırlanırken sulu ortama ısı vermektedir. Çözelti hazırlanırken ortaya çıkan bu ısının ÖGYFC ile reaksiyonları hızlandıracağı da düşünüldüğünden üretim esnasında tasarımda belirlenen oranlarda sodyum hidroksit, sodyum silikat ve su kullanılarak aktivasyon çözeltisi hazırlanmıştır. AAECB üretimi için gerekli olan malzemeler beton mikserinde karıştırılıp, önceden hazırlanmış olan kalıplara yerleştirilerek 24 saat kalıpta bekletilmiştir. 24 saat sonra kalıplardan çıkarılan numuneler deney tasarımında belirlenen sıcaklık ve sürelerde laboratuvar etüvünde kür edilmiştir. Kür işlemi tamamlanan numuneler deney gününe kadar ortam şartlarında bekletilmişlerdir.

AAECB özelliklerini normal PÇ betonlar ile karşılaştırmak için çimento dozajı 400 kg/m³, su/çimento oranı 0.52 ve AAECB kullanılan agrega tipi ve miktarı aynı olacak şekilde PÇ ile üretimler yapılmıştır.

3.4. Deney Yöntemleri

3.4.1. Çökme (İşlenebilirlik)

Betonun taze haldeki kıvamını belirlemek için yapılan deneydir. Taban çapı 200 mm, üst çapı 100 mm ve yüksekliği 300 mm olan çökme konisi ve şişleme çubuğu kullanılır. Düz bir zeminde koniye taze beton üç kademe halinde ve her kademe 25 kez şişlenerek doldurulur ve üzeri masterlandıktan sonra Slump konisi yavaşça yukarı doğru kaldırılır, bu sırada taze beton kendi ağırlığıyla çöker. Şişleme çubuğu huninin üzerine konur ve çöken betonun üst seviyesinden çubuğun altına kadar olan mesafe ölçülür. Bu

uzunluk, taze betonun çökme (slump) değeri olarak adlandırılır. Bu çalışmada kontrol betonu da dahil üretilen tüm betonların çökme değeri 20 ± 2 cm olarak sabit tutulmuştur.

3.4.2. Basınç

Basınç dayanımı, eksenel basma yükü etkisi altındaki betonun kırılmamak için gösterebileceği direnme yeteneği (eksenel basınç etkisinde, betonda meydana gelen maksimum gerilme) olarak tanımlanmaktadır. Betonun en temel özelliği olan basınç dayanımı zamana bağlı artan bir fonksiyondur ve dayanım artışı çok uzun yıllar sürebilir. İlk günlerde çok hızlı olan dayanım artışı, yavaşlayarak devam eder. Bu nedenle standart dayanımın belirli bir beton yaşı ile ifade edilme zorunluluğu doğmuştur. Betonarme elemanlarda 28 günlük dayanım esas alınarak, emniyet gerilmeleri saptanmaktadır. Bugün tüm ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde 28 günlük dayanım, standart dayanım olarak kabul edilmiştir. Bu çalışmada üretilen numunelerin basınç değerleri ASTM C 39 standardına göre belirlenmiştir. Deneysel çalışmada beton numunelerin basınç dayanımları 100x100x100 mm boyutlarındaki küp numuneler ile belirlenmiştir. Üretilen beton numunelerin 1, 7, 28, 90 ve 180 günlük basınç dayanımları 3 kN/s yükleme hızıyla beton presi kullanılarak belirlenmiştir. Basınç dayanımı belirlenirken kullanılan düzeneğ Şekil 3.3.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Basınç dayanımı deney düzeneği

3.4.3. Basınçlı Su Geçirirliği

Belirli bir basınç altındaki sıvının, pratikte en çok karşılaşılan suyun, cismin bir yüzünden girmesi, cismin içerisinde ilerlemesi ve karşı yüzden dışarı çıkması geçirirlik olayı olarak tanımlanmaktadır. Çalışmada TS EN 12390-8'e göre 28 günlük 150x150x150 mm boyutlarındaki küp numuneler 72 saat boyunca 500±50 KPa basınçlı su ile test edilmektedir. Deney 72 saat sonunda numunelerin pres ile yarılarak en büyük su işleme derinliklerinin ölçülmesi şeklinde tamamlanır. Basınçlı su geçirirliği deney düzeneği Şekil 3.4.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Basınçlı su geçirirliği deney düzeneği

3.4.4. Yarmada Çekme Dayanımı

Yarmada çekme dayanımı deneyleri 28 günlük 150x150x150 mm boyutlu küp numuneler üzerinde ASTM C 496 standardında belirtilen esaslara uygun olarak yapılmıştır. Küp numunelerin alt ve üst yüzeylerine çitalar yerleştirilip pres ile uygulanan yayılı yük çizgisel hale dönüştürülür. Yükleme doğrultusuna dik doğrultuda oluşan çekme kuvvetleri sonucunda oluşan çekme gerilmeleri numunenin kırılmasına neden olur ve Şekil 3.5.'de görüldüğü gibi betonlar ortadan yarılıp iki parçaya ayrılır. Numunenin kırıldığı maksimum yük belirlenip, denklem (3.5) kullanılarak yarmada çekme dayanımı hesaplanır.

$$\sigma_e = \frac{2P}{\pi a^2} \quad (3.5)$$

Burada;

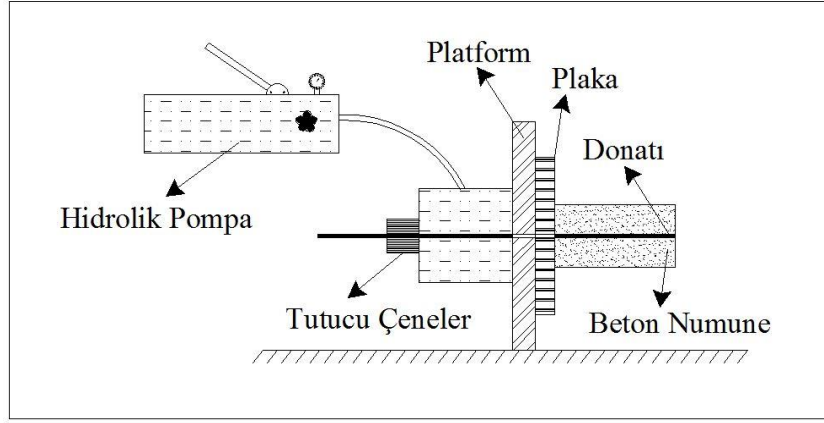
σ_e : Yarmada çekme dayanımını (MPa), P: numunenin kırıldığı maksimum yükü (N) a: küp numunenin bir kenarının ölçüsünü (mm) ifade etmektedir.



Şekil 3.5. Yarmada çekme dayanımı deney düzeneği

3.4.5. Çekip Çıkarma (Pull Out)

Betona gömülü demir çubukların aderans dayanımını belirlemek için 28 günlük $\phi 100/200$ mm ebatlarındaki silindir numunelerin orta eksenine yerleştirilmiş, donatı çevresindeki beton örtü kalınlığı aynı ve kenetlenme boyu tüm numunelerde 200 mm olan $\phi 14$ mm donatılar, Şekil 3.6.'daki deney düzeneği kullanılarak çekip çıkarılmıştır. Deney düzeneğinde Şekil 3.7.'deki görüldüğü gibi pompa, hidrolik sistem, yük hücresi, donatıyı sıkıca kavrayacak çeneler ve uygulanan yükü kayıt edebilmek için uygun bilgisayar programı kullanılmıştır. Donatının beton içinden sıyrılırken göstermiş olduğu zorlanmaya karşılık gelen yük miktarına göre aderans özellikleri belirlenmiştir.



Şekil 3.6. Çekip çıkarma deney düzeneği



Şekil 3.7. Çekip çıkarma (Pull out) deney aleti

3.4.6. Aşınma

Betonların aşınma miktarı dikey aşındırma cihazı yardımı ile 28 günlük 100x100x100 mm boyutlarında küp numuneler kullanılarak belirlenmiştir. Aşınma deneyi TS EN 2824'e göre yapılmış olup aşınma kaybı, numunenin kütleindeki azalma olarak tayin edilmiştir. Küp numunelerin aşındırılmadan önceki kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Beton numunenin aşınan yüzeyinin net görülebilmesi için, aşındırılacak yüzey boyanmıştır. Deney aletinin 70 mm genişliğindeki döner diski numuneye temas

ettirilmiştir. Baskı pistonu yükleme koluna asılan ağırlık vasıtası ile numunenin geri kaçması engellenmiştir.



Şekil 3.8. Dikey aşındırma deney aleti

Şekil 3.8.'deki düzeneğe yerleştirilen numune ile temas eden disk 75 devir döndürüldükten sonra aşınan yüzey temizlenip yeniden tartılarak aşınmadan önceki ve sonraki ağırlık kaybı belirlenmiştir. Aşınan kütle oranı denklem 3.6. kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Aşınan kütle oranı (\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100 \quad (3.6)$$

Burada, W_1 : beton numunenin aşınmadan önceki ağırlığını, W_2 : beton numunenin aşınmadan sonraki ağırlığını ifade etmektedir.

3.4.7. Ultrasonik Dalga Hızı

100x100x100 mm boyutlarında üretilen 28 günlük beton numuneler ile ASTM C 597-02'ye göre ultrasonik dalga hızı deneyi yapılmıştır. Deney düzeneği ve ölçüm cihazı Şekil 3.9.' da gösterilmiştir. Beton numunenin bir yüzeyinden gönderilen ses üstü dalganın diğer yüzeye geçiş süresi ölçülerek, ses üstü dalga hızı denklem 3.7. kullanılarak hesaplanmıştır.

$$V = \frac{S}{t} \times 100 \quad (3.7)$$

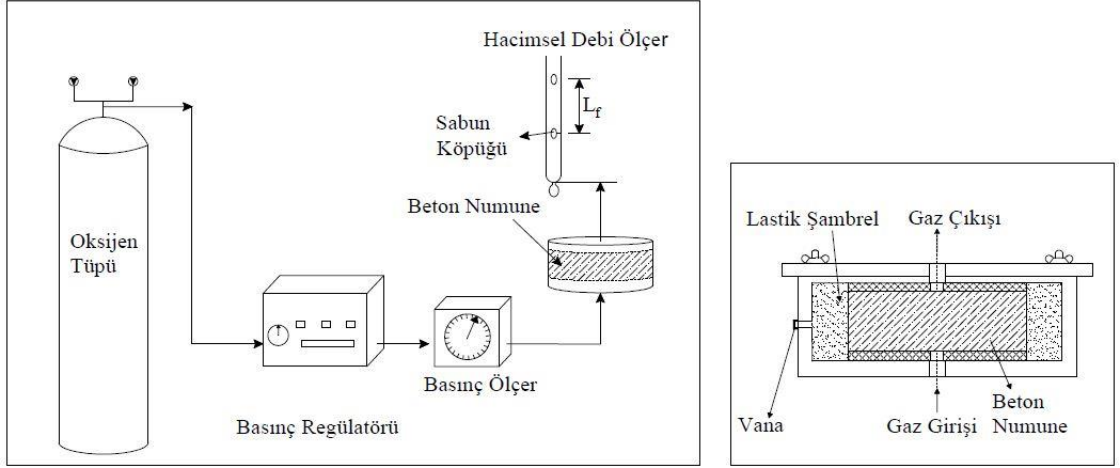
Burada; V: ultrasonik dalga hızını (m/sn), S: dalganın aldığı mesafeyi (m), t: dalganın numune yüzeyleri arasındaki mesafeyi alma süresini (μ s) ifade etmektedir.



Şekil 3.9. Ultrasonik dalga hızı deney düzeneği

3.4.8. Gaz Geçirimsizliği

Çapı ϕ 150 mm ve yüksekliği 300 mm boyutlarında üretilen beton numuneler beton testeresi yardımı ile 50 mm kalınlığında kesilerek içerisinde su kalmayana kadar etüvde kurutulmuştur. Ortam sıcaklığına gelen numuneler deney düzeneğine yerleştirilerek, 6 bar basınçta şişirilen lastik şambrel ile numunenin çevresinden hava geçmesi engellenmiştir. Deney aletinin kapağı kapatılıp, üstündeki vidalar ile sıkıştırılmıştır. Deney düzeneğine bağlanan oksijen tüpü 9 bar basınca ayarlanarak açılıp gaz akışı başlatılmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.10.'da ve deney aleti Şekil 3.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Gaz geçirimsizliği deney düzeneği



Şekil 3.11. Gaz geçirimsizliği deney aleti

İtalyan standartları (UNI)'nda belirtilen Cambrea metoduna göre numunelere 0.5 MPa basınç altında oksijen gazı gönderilmiştir. Numunenin alt yüzeyinden giren gaz, betonun geçirimsizliği ölçüsünde diğer yüzeyinden çıkarak köpük dolu dereceli ölçme tüpüne geçip, sabun köpüğünü hareket ettirerek önceden belirlenen mesafeyi (300 mm) alma süresi ölçülmüştür. Ölçme tüpüne gelen gaz debisi (Q) hesaplanıp Hagen-

Poiseuille eşitliği kullanılarak betonların gaz geçirimsizlik katsayısı (K_a) denklem (3.8), (3.9) ve (3.10) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$K_a = \frac{2 \cdot Q \cdot P_{atm} \cdot L_f \cdot \mu}{A(P^2 - P_{atm}^2)} \quad (3.8)$$

Burada, K_a : gaz geçirimsizlik katsayısı (m^2), Q :ölçme tüpüne gelen gaz debisi (m^3/sn), P : numuneye etkiyen gaz basıncı (N/m^2), P_{atm} : atmosferik basınç (N/m^2), L_f : sabun köpüğünün aldığı mesafe (m), μ : oksijen gazının viskozite katsayısı ($N.sn/m^2$), A : numunenin kesit alanını (m^2) ifade etmektedir.

$$Q = \frac{V_f}{T_{son} - T_{ilk}} \quad (3.9)$$

Burada; V_f : ölçme tüpünde belirlenen mesafenin hacmi (m^3), $T_{son} - T_{ilk}$: sabun köpüğünün belirlenen mesafeyi alması için geçen süreyi (sn) ifade etmektedir.

$$V_f = S_f \cdot L_f \quad (3.10)$$

Burada; S_f : ölçme tüpünün kesit alanını (m^2) ifade etmektedir.

3.4.9. Hızlı Klor Geçirimsizliği

Hızlı klor geçirimsizliği deneyi, betonun elektriksel iletkenliği esasına dayanmaktadır. ASTM C 1202-97 standardı referans alınarak, beton numunelerin hızlı klor geçirimsizlikleri ölçülmüştür. $\phi 100$ mm çapında ve 200 mm yüksekliğinde üretilen 28 günlük silindirik numuneler uç kısımlarından beton testere ile kesilerek ortada kalan 50 mm boyutundaki parça deneyde kullanılmıştır. Kesilen bu numune deneye başlanmadan önce Şekil 3.12.'de gösterildiği gibi desikatörde 3 saat vakumlanarak betonun boşluklarındaki hava alınmıştır. Daha sonra vakum haznesine kaynatılıp soğutulmuş su veya saf su doldurularak numunelere vakum altında 1 saat su emdirilmiştir. Beton numuneler su içerisinde 18 saat bekletildikten sonra numuneler Şekil 3.13.'de gösterilen deney düzeneğine yerleştirilmiştir.

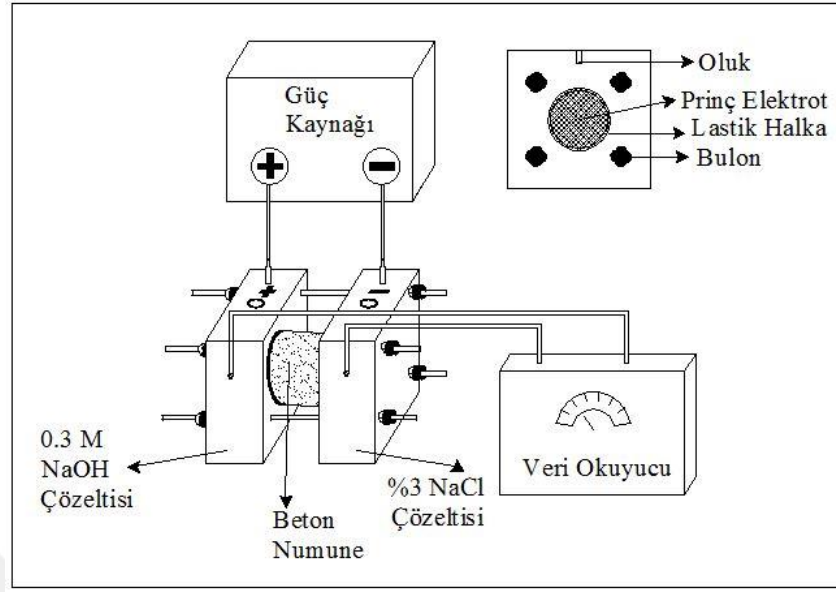


Şekil 3.12. Numunenin desikatörde vakumlanması



Şekil 3.13. Hızlı klor geçirimsizliği deney aleti

Ölçme ünitesi fleksi-glas ile üretilmiş iki adet hücreden oluşmaktadır. Mevcut iki test hücresinin birine % 3'lük (30 g saf NaCl+970 g saf su) kütleli olarak saf su ile hazırlanmış NaCl çözeltisi, diğerine ise 0.3 M (12 gr saf NaOH+988 gr saf su) NaOH çözeltisi konulmuştur. Deney numunelerine 60 V sabit potansiyel farkı uygulanarak $\phi 100$ mm çapında ve 50 mm kalınlığındaki numuneden geçen elektrik akım şiddeti miktarı cihaz tarafından otomatik olarak 30 dakika aralıklarla kaydedilmiştir. 6 saat boyunca numunelerden geçen akım şiddeti ölçülerek bu sürede iletilen elektrik akımı miktarı Coulomb olarak hesaplanmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.14.'de gösterilmiştir. İlgili standartta beton geçirimsizliği sınıfları Çizelge 3.7.'de belirtilmiştir.



Şekil 3.14. Hızlı klor geçirimsizliği deney düzeneği

Çizelge 3.7. Hızlı klor geçirimsizliği sınıfları (ASTM C 1202-97)

| Yük (Coulomb) | Geçirimsizlik Sınıfı |
|---------------|----------------------|
| > 4000 | Yüksek |
| 4000-2000 | Orta |
| 2000-1000 | Düşük |
| 1000-100 | Çok Düşük |
| <100 | İhmal edilebilir |

3.4.10. Isı İletkenlik Katsayısı

Isı iletimi bir katı malzeme veya durgun akışkan içerisindeki sıcak bir bölgeden daha soğuk bir bölgeye doğru ısının geçmesidir. Bir katı cisim içinde sıcaklık farkları varsa yüksek sıcaklık bölgesinden düşük sıcaklık bölgesine ısı, iletim yolu ile geçer. İletimle ısı geçişi deneysel gözlemlere dayanan Fourier kanunu ile belirlenir. Fourier kanununa göre herhangi bir yönde (örneğin x yönünde) geçen ısı miktarı, x yönündeki sıcaklık gradyanı (sıcaklık değişim miktarı) dT/dx ve ısı geçiş yönüne dik alan A ile orantılıdır. Fourier kanununun matematiksel ifadesi denklem (3.11) ile ifade edilmektedir.

$$Q_x = -k \cdot A \frac{\Delta T}{\Delta x} = k \cdot A \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (3.11)$$

Burada; Q_x , x yönünde ve x yönüne dik A alanından geçen ısı miktarıdır. Orantı sabiti k, malzemenin ısı iletim katsayısı olup SI birim sistemindeki birimi W/mK'dir.

Yapı malzemelerinin ısı iletenlikleri ve ısı iletim sistemlerinin bilinmesi enerji korunumu ve dönüşümü için önemlidir. Beton geniş uygulama alanına sahip olduğundan ısı iletim davranışının bilinmesi gerekir. Bu sebeple bu çalışmada AAECB ve kontrol betonlarının ısı iletenlikleri araştırılmıştır. 100x100x100 mm boyutlarında üretilen numunelerden $\phi 30$ mm ve yüksekliği 30 mm beton numuneler karot yardımıyla kesilerek çıkarılıp Şekil 3.15.'de gösterilen deney aleti kullanılarak numunelerin ısı iletenlik katsayıları ölçülmüştür. Kesilen beton numunesinin iki yüzeyi de termal macun ile kaplanarak ısıtma ve soğutma plakaları ile arada başka bir faz olmadan direk temas etmesi sağlanmıştır. Rezistans ile ısıtma bölümündeki sıcaklık 35°C'ye, soğutma bölümünün içinden geçen su yardımıyla soğutma bölümündeki sıcaklık 25 °C'ye ayarlanmıştır. Sisteme iletilen gerilim 2.75 volt (V) ve akım 0.62 amperdir (A). Dolayısıyla sistemde oluşan güç denklem (3.12)'ye göre hesaplanmış ve her numune için sabit tutulmuştur.

$$W = V \times A \quad (3.12)$$

$$W = 2.75 \times 0.62 = 1.705$$

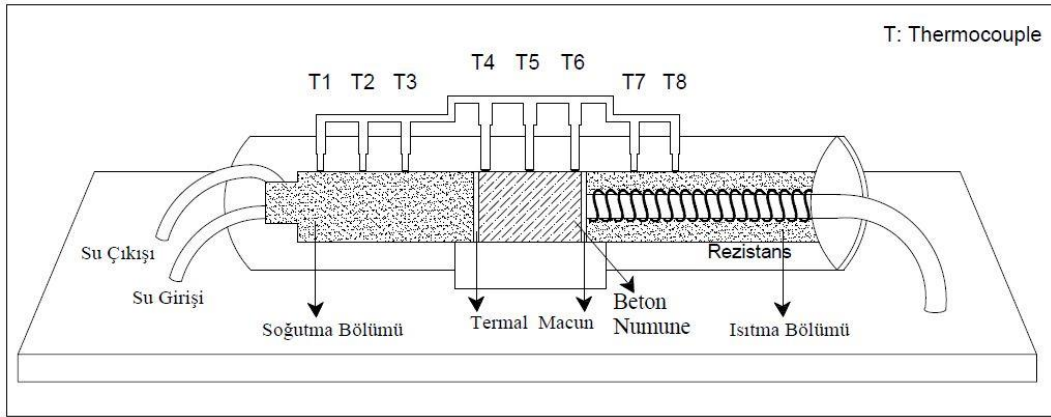
Isı transferi başladığında sekiz adet thermocouple (ısı çifti) ile numuneden ve ısıtma soğutma bölümlerinden sıcaklık değerleri alınmıştır. Değerlendirme ünitesine iletilen değerler ile ısı iletenlik katsayısı "k" denklem 3.13'e göre hesaplanmıştır.

$$k = \frac{W \times L}{A \times \Delta T} \quad (3.13)$$

Burada, k: ısı iletenlik katsayısını, W: gücü, L: numune boyunu, A: kesit alanını, ΔT : sıcaklık farkını temsil etmektedir. Deney düzeneği Şekil 3.16.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Isı iletkenlik katsayısı ölçüm deney aleti



Şekil 3.16. Isı iletkenlik ölçüm deney düzeneği

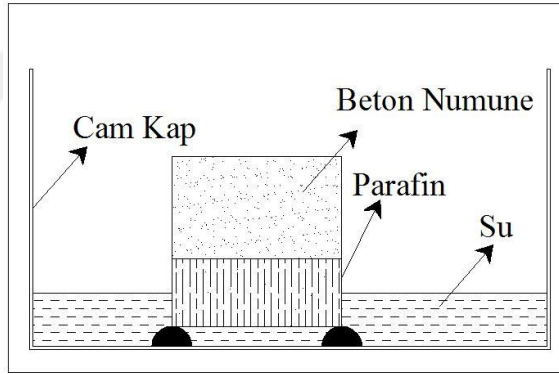
3.4.11. Su Emme Kapasitesi

100x100x100 mm boyutlarındaki 28 günlük küp numuneler ASTM C 642'ye uygun olacak şekilde sabit ağırlığa gelene kadar 105 ± 5 °C'de etüvde kurutulmuştur. Kurutulan numuneler tartılarak etüv kuru ağırlıkları (W_k) ölçülmüştür. Numuneler bünyelerine suyu tamamen alabilmesi için 24 saat suda bekletilip çıkarıldıktan sonra yüzeyleri kurutulup doygun yüzey kuru (W_{dyk}) ağırlıkları ölçülmüştür. Denklem (3.14) kullanılarak beton numunelerin su emme kapasiteleri belirlenmiştir.

$$\text{Su Emme Kapasitesi (\%)} = \frac{W_{dyk} - W_k}{W_k} \times 100 \quad (3.14)$$

3.4.12. Kılcal Su Emme

Kılcal su emme deneyi ile beton boşluklarından birim alandan birim zamanda geçen su miktarı belirlenmektedir. Su emme ve aşınma deneyi için üretilen 100x100x100 mm boyutlarındaki numuneler 105±5 °C’de etüvde kurutulup, ortam sıcaklığına gelene kadar soğutulmuştur. Beton numunenin yan yüzeyleri parafin ile kaplanarak belirlenen kesit alanı dışında betona su girmesi engellenmiştir. Parafin ile yüzeyleri kaplanan numunelerin alt yüzeyi cam bilyeler üzerinde duracak şekilde cam kap içinde su ile temas ettirilmiştir. Numuneler belli zaman aralıklarında çıkarılıp, tartılarak 6 saat boyunca bünyeye alınan su miktarı ölçülmüştür. Deney düzeneği Şekil 3.17.’de gösterilmektedir. 100x100 mm alandan 6 saat boyunca 1 mm² alandan emilen su miktarı ve zamanın karekökü grafiği çizilerek, grafiğin eğimi ile kılcallık katsayısı bulunmuştur.



Şekil 3.17. Kılcal su emme deney düzeneği

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Alkalilerle aktive edilmiş öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufllu betonlar (AAECB) ve Portland çimentolu kontrol karışımlarının mekanik ve geçirimsizlik özelliklerine ait sonuçlar Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Mekanik özelliklere ait deney sonuçları

| Karışım no | Karışım adı | Basınç dayanımı (MPa) | Yarmada çekme dayanımı (MPa) | Çekip çıkarma yükü (kg) | Aşınma kaybı (%) | UPV (m/s) |
|------------|------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------|------------------|-----------|
| K1 | 26D13S3.8K1.8M | 29.8 | 1.8 | 4504 | 0.253 | 2907 |
| K2 | 40D20S6K2.6M | 58.4 | 2.7 | 5068 | 0.239 | 3327 |
| K3 | 40D6S1.6K1M | 8.2 | 0.7 | 10 | 0.621 | 2055 |
| K4 | 40D20S1.6K2.6M | 3.3 | 0.8 | 328 | 0.666 | 2020 |
| K5 | 40D6S6K1M | 33.9 | 2.3 | 5394 | 0.415 | 3137 |
| K6 | 60D13S3.8K0.45M | 36.7 | 2.0 | 5782 | 0.289 | 3813 |
| K7 | 60D13S3.8K1.8M | 50.2 | 1.9 | 5257 | 0.268 | 2870 |
| K8 | 60D13S3.8K1.8M | 48.8 | 1.9 | 5280 | 0.292 | 2610 |
| K9 | 60D13S3.8K1.8M | 50.5 | 2.0 | 5142 | 0.221 | 2540 |
| K10 | 60D13S3.8K1.8M | 48.8 | 1.9 | 5210 | 0.254 | 2965 |
| K11 | 60D13S3.8K1.8M | 49.9 | 2.1 | 5326 | 0.216 | 2785 |
| K12 | 60D25S3.8K1.8M | 44.2 | 1.8 | 5447 | 0.463 | 2820 |
| K13 | 60D13S3.8K3.15M | 45.0 | 2.2 | 3458 | 0.395 | 3817 |
| K14 | 60D13S7.5K1.8M | 47.2 | 2 | 7075 | 0.083 | 3197 |
| K15 | 60D13S0.1K1.8M | - | - | - | - | - |
| K16 | 60D1.23S3.8K1.8M | 33.7 | 2.3 | 4705 | 0.269 | 2923 |
| K17 | 80D20S1.6K1M | 10.6 | 1.2 | 2093 | 0.681 | 2653 |
| K18 | 80D6S1.6K2.6M | 3.5 | 0.5 | 151 | 0.737 | 1900 |
| K19 | 80D6S6K2.6M | 36.2 | 1.9 | 5046 | 0.354 | 2807 |
| K20 | 80D20S6K1M | 32.7 | 2.3 | 8998 | 0.429 | 2927 |
| K21 | 94D13S3.8K1.8M | 33.7 | 1.8 | 4966 | 0.378 | 2690 |
| K22 | KONTROL | 50.3 | 4.3 | 5258 | 0.269 | 2864 |

Çizelge 4.2. Geçirimsizlik özelliklerine ait deney sonuçları

| Karışım no | Karışım adı | Gaz geçirimsizliği ($\times 10^{-17} \text{ m}^2$) | Hızlı klor geçirimsizliği (Coulomb) | Isı iletkenlik katsayısı (W/mK) | Su emme miktarı (%) | Kılcallık katsayısı ($\text{mm/dak}^{0.5}$) |
|------------|------------------|--|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------|---|
| K1 | 26D13S3.8K1.8M | 2.52446 | 9426 | 0.586 | 6.12 | 0.3990 |
| K2 | 40D20S6K2.6M | 1.59882 | 5890 | 0.95722 | 3.2 | 0.2504 |
| K3 | 40D6S1.6K1M | 3.19764 | 10479 | 0.95457 | 5.6 | 0.7916 |
| K4 | 40D20S1.6K2.6M | 3.68959 | 11020.5 | 0.82862 | 7.37 | 0.8382 |
| K5 | 40D6S6K1M | 2.82145 | 4561.5 | 0.65892 | 4.08 | 0.4437 |
| K6 | 60D13S3.8K0.45M | 2.52446 | 7147 | 0.95457 | 4.22 | 0.5102 |
| K7 | 60D13S3.8K1.8M | 1.71302 | 6336.5 | 0.89624 | 4.16 | 0.4500 |
| K8 | 60D13S3.8K1.8M | 1.71302 | 6245 | 0.92143 | 4.22 | 0.4400 |
| K9 | 60D13S3.8K1.8M | 1.68400 | 6280 | 0.91480 | 4.10 | 0.4700 |
| K10 | 60D13S3.8K1.8M | 1.70679 | 6455 | 0.91215 | 4.31 | 0.4655 |
| K11 | 60D13S3.8K1.8M | 1.74058 | 6410 | 0.91215 | 4.35 | 0.4687 |
| K12 | 60D25S3.8K1.8M | 1.73832 | 6023.5 | 0.84586 | 4.80 | 0.4660 |
| K13 | 60D13S3.8K3.15M | 1.88097 | 6667 | 0.84055 | 3.43 | 0.3469 |
| K14 | 60D13S7.5K1.8M | 2.28403 | 6671 | 0.89624 | 3.64 | 0.3777 |
| K15 | 60D13S0.1K1.8M | - | - | - | - | - |
| K16 | 60D1.23S3.8K1.8M | 2.52446 | 7072 | 0.77161 | 3.9 | 0.2892 |
| K17 | 80D20S1.6K1M | 2.74084 | 10160 | 1.12162 | 7.62 | 0.8783 |
| K18 | 80D6S1.6K2.6M | 5.32941 | 11020.5 | 0.85514 | 7.53 | 0.8169 |
| K19 | 80D6S6K2.6M | 1.84480 | 6408.5 | 0.879 | 4.40 | 0.4997 |
| K20 | 80D20S6K1M | 3.19764 | 7395.5 | 0.64036 | 4.31 | 0.4091 |
| K21 | 94D13S3.8K1.8M | 2.15088 | 7155 | 0.88033 | 5.29 | 0.5543 |
| K22 | KONTROL | 1.72302 | 6336 | 1.233 | 4.17 | 0.0910 |

Elde edilen deney sonuçları kullanılarak bağımsız değişkenlerle (kür sıcaklığı, kür süresi, sodyum konsantrasyonu ve silikat modülü) bağımlı değişkenler (basınç ve yarmada çekme dayanımı, aşınma miktarı, ultrasonik dalga hızı, su emme miktarı, kılcal su emme miktarı, gaz ve hızlı klor geçirimsizliği, ısı iletkenlik, basınçlı su geçirimsizliği) arasında varyans analizi gerçekleştirilip, elde edilen bulgular Çizelge 4.3’de verilmiştir. Regresyon modelleri ile her bir bağımlı değişken üzerinde istatistiksel olarak anlamlı

olan bağımsız değişkenler, bağımsız değişkenlerin ikili etkileşimi ile oluşan parametreler ve her bir bağımsız değişkenin varsa istatistiksel olarak anlamlı ikinci dereceden etkin parametreleri belirlenmiştir. İstatistiksel olarak etkin olan parametrelerin fiziksel olarak da anlamlı olanları dikkate alınarak, bağımlı değişkenler üzerinde etki oranları belirlenmiştir. İstatistiksel olarak anlamlı parametrelerin bağımlı değişkenler üzerinde ne oranda etkin oldukları da Çizelge 4.3'de verilmiştir. Varyans analizi ile etkileri belirlenen bağımsız değişkenlerin optimum değerleri, çoklu objektifli optimizasyon ile belirlenmiş ve çoklu objektifli optimizasyon gerçekleştirilirken bağımlı ve bağımsız değişkenlere ait çalışma şartları Çizelge 4.4'de verilmiştir. Belirlenen optimum değerler kullanılarak doğrulama deneyleri yapılmıştır. Teorik olarak elde edilen optimum üretim koşullarının, arzulanan bağımlı değişken değerlerini elde edebilmek için yeterli olup, olamayacakları ortaya konulmuştur.

4.1. Varyans Analizi (ANOVA) ve Regresyon Modeli

DeneySEL çalışmalarda elde edilen sonuçlar kullanılarak karşım parametreleri (bağımsız değişkenler) arasında istatistiksel olarak anlamlı lineer ve/veya ikinci derece (quadratic) regresyon modelleri oluşturulmuştur. Regresyon modellerinin oluşturulmasında Design-Expert 7.0.3 programı kullanılmıştır. Program tarafından, her bir bağımlı değişkeni istatistiksel olarak anlamlı ve temsil edebilecek farklı modeller analiz edilerek kullanıcıya önerilmektedir. Programda regresyon analizinde kullanılan modeller aşağıdaki gibidir:

- Lineer Model: Faktörlerin tekli etkilerinin temsil edilebildiği lineer regresyon modeli (kür süresi, kür sıcaklığı gibi),
- 2FI (İki faktörlü etkileşim) modeli: Faktörlerin tekli ve ikili etkileşimleri dikkate alınarak oluşturulan lineer regresyon modeli (kür sıcaklığı, kür süresi, kür sıcaklığı*kür süresi gibi),
- Kuadratik Model: Faktörlerin tekli, ikili etkileşimleri ve ikinci dereceden etkin parametreleri dikkate alınarak oluşturulan kuadratik regresyon modeli (kür sıcaklığı, kür süresi, kür sıcaklığı*kür süresi, (kür sıcaklığı)², (kür süresi)² gibi) ;
- Kübik Model: Faktörlerin tekli, ikili ve üçlü etkileşimleri, ikinci ve üçüncü dereceden etkin parametreler dikkate alınarak oluşturulan regresyon modeli (kür

sıcaklığı, kür süresi, silikat modülü, kür sıcaklığı*kür süresi, kür sıcaklığı*kür süresi*silikat modülü, (kür süresi)²*kür sıcaklığı, (kür süresi)³ gibi).

Bu çalışmada deney sonuçları kullanılarak dört bağımsız değişkeni (CT, TC, SC ve SM) kapsayan kuadratik modeller denklem (4.1) ile ifade edilmiştir.

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum \sum_{i \leq j} b_{ij} x_i x_j + \sum b_i x_i^2 + \varepsilon \quad (4.1)$$

Bu denklemde,

x_i ve x_j : i. ve j. faktörleri,

y: tepkiyi (deney sonucunu),

b_0 , b_i ve b_j : bağımsız değişkenlerin tepkideki regresyon katsayısını,

$\sum_{i=1}^k b_i x_i$: x_i faktörünün lineer etkisini,

$\sum \sum_{i \leq j} b_{ij} x_i x_j$: x_i ve x_j 'nin ikili etkileşimini,

$\sum b_i x_i^2$: x_i 'nin karesel etkisini,

ε : kontrol edilemeyen rastgele meydana gelen hataları temsil etmektedir (Sonebi, 2004; Sonebi ve ark., 2013). Modellerdeki sabitler, normal dağılımda çoklu lineer regresyon analizi ile belirlenmiştir (Sahmaran ve ark., 2013; Yahia ve Khayat, 2001). Her bağımlı değişken için etkin olan regresyon modeller belirlenirken etkin olmayan parametreler modelden çıkarılmıştır. Her bağımlı değişken için regresyon modeli %95 güvenlik düzeyinde oluşturulmuş ve Çizelge 4.3'de verilmiştir. Örnek olarak basınç dayanımı için oluşturulan regresyon modeli denklem (4.2)'de gösterilmiştir.

$$\text{Basınç dayanımı} = -95.95 + 2.32(\text{CT}) + 1.072(\text{TC}) + 23.36(\text{SC}) + 3.43(\text{SM}) - 0.06(\text{CT}-\text{SC}) + 0.12(\text{TC}-\text{SC}) + 0.59(\text{TC}-\text{SM}) + 3.07(\text{SC}-\text{SM}) - 0.01(\text{CT})^2 - 0.08(\text{TC})^2 - 2.45(\text{SC})^2 - 5.50(\text{SM})^2 \quad (4.2)$$

Bu denklemde CT: Kür sıcaklığını, TC: Kür süresini, SC: Sodyum konsantrasyonunu, SM: Silikat modülünü temsil etmektedir. Bu parametrelerin birlikte gösterimleri ise ikili ilişkilerini ifade etmektedir. Önerilen modellerin Basınç dayanımı, UPV, su emme miktarı, gaz geçirimsizliği, ısı iletkenliği ve çekip çıkarma yükü için önerilen regresyon modellerinin korelasyon katsayısı 0.99; çekme dayanımı, kılcal su emme, aşınma miktarı, hızlı klor geçirimsizliği için önerilen modellerin ise korelasyon

katsayıları sırasıyla 0.52, 0.83, 0.66 ve 0.95 olarak belirlenmiştir. Korelasyon katsayısının yüksek olması önerilen modellerin %95 güvenlik düzeyinde deney sonuçlarını temsil edebilme yeteneğini göstermektedir.

4.2. Çoklu Objektifli Optimizasyon ve Amacı

Bağımsız değişkenlerle (kür sıcaklığı, kür süresi, sodyum konsantrasyonu ve silikat modülü) bağımlı değişkenler (basınç, yarmada çekme, aşınma ve çekip çıkarma dayanımları, ultrasonik dalga hızı, su emme, kılcal su emme, gaz ve hızlı klor geçirimsizlikleri ve ısı iletkenlik katsayısı) arasındaki ilişkiyi temsil eden yüksek korelasyon katsayılı regresyon modelleri elde edildiğine göre bu modellerin belirlenen objektif ve kısıtlar altında optimizasyonu gerçekleştirilerek, optimum bağımsız değişken değerleri elde edilebilir. Elde edilen optimum bağımsız değişken değerleri, tanımlanmış olduğumuz tüm hedefleri, belirlemiş olduğumuz kısıtlar altında gerçekleştirebileceğimizi belirten teorik değerlerdir. Regresyon modellerinin oluşturulması ve çoklu objektifli optimizasyon çalışmaları, matematiksel ve istatistiksel yöntemlerin ortak kullanılması esasına dayanan Tepki Yüzeyi Yöntemi (TYYY) ile Design-Expert 7.0.3 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4.2.1. Çoklu Objektifli Optimizasyon

Farklı parametrelerin sayısal metotlar kullanılarak aynı anda değerlendirilmesini sağlayan optimizasyon türü çoklu objektifli optimizasyon olarak tanımlanmaktadır. Birden fazla tepkinin optimizasyonu, genel olarak, mühendislik alanında erişilebilirlik fonksiyonunun kullanılmasıyla yapılabilmektedir. Çoklu objektifli problemlerin çözümünde, her bir tepki için kontur çizgisi, sınırlandırılmış optimizasyon problemleri ve erişilebilirlik yöntemi gibi pek çok istatistiksel teknik kullanılmaktadır. Erişilebilirlik yöntemi kolay olması ve her bir tepki için verilen etki ağırlığının belirlenebilir ve değiştirilebilir olması nedeniyle tercih edilmektedir (Benyounis ve ark., 2007).

4.3. Erişilebilirlik (Desirability) Fonksiyonu

Erişilebilirlik fonksiyonu, tahmin edilen her bir tepkinin (Y_i), $0 < d_i < 1$ arasında sınırlandırılmış birimsiz bir değer olan erişilebilirlik değerine dönüştürülmesini içermektedir. Daha yüksek d_i değeri, daha uygun tepki (Y_i) değerinin mümkün olduğunu göstermektedir. Erişilebilirlik değerinin sıfır olması ($d_i=0$) ise istenilmeyen bir tepki değeri veya gerçekleşmesi mümkün olmayan bir olay anlamına gelmektedir. Erişilebilirlik değeri her bir tepkinin ayrı ayrı arzu edilebilirlik (d_i) değeri denklem (4.3) ve (4.4) yardımıyla hesaplanmaktadır. Etki ağırlık düzeyi, alt ve üst sınırlara daha fazla etki vermek için veya hedef değerine yakın tutabilmek için kullanılmaktadır. Toplam erişilebilirlik fonksiyonunda (D), her bir tepki için farklı önem (r) verilebilmektedir. Önem değişimleri '+' ile gösterilen en küçük önem değeri olan 1'den '+++++' ile gösterilen en büyük önem değeri olan 5'e kadar değişmektedir. Maksimum hedef için erişilebilirlik fonksiyonu denklem (4.3)'de verilmiştir.

$$d_i = \begin{cases} 0 & Y_i \leq \min f_i \\ \left(\frac{Y_i - \min f_i}{\max f_i - \min f_i} \right)^{wt_i} & \min f_i < Y_i < \max f_i \\ 1 & Y_i \geq \max f_i \end{cases} \quad (4.3)$$

Minimum hedef için erişilebilirlik fonksiyonu denklem (4.4)'de verilmiştir.

$$d_i = \begin{cases} 1 & Y_i \leq \min f_i \\ \left(\frac{Y_i - \min f_i}{\max f_i - \min f_i} \right)^{wt_i} & \min f_i < Y_i < \max f_i \\ 0 & Y_i \geq \max f_i \end{cases} \quad (4.4)$$

Burada belirtilen, d_i : Erişilebilirlik fonksiyonu, Y_i : TYY ile bulunan sonucu, $\min f_i$: Deneylerden elde edilen en küçük değeri, $\max f_i$: Deneylerden elde edilen en büyük değeri, t_i : hedef değeri, wt_i : etki ağırlık düzeyini temsil etmektedir. Tüm sonuçlar için erişilebilirlik fonksiyonunu maksimum seviyeye getirmek için denklem (4.5) uygulanmaktadır.

$$\sqrt[m]{d_1 \cdot d_2 \dots d_m} \quad (4.5)$$

Burada “m” tepki sayısını ifade etmektedir (Yalçın, 2009). Çoklu objektifli optimizasyon gerçekleştirilirken hedeflenen değer için hiç biri, maksimum, minimum, hedef veya aralıktaki seçeneklerden biri belirlenmelidir. Bu alışma kapsamında çoklu objektifli optimizasyon gerçekleştirilirken belirlenen çalışma şartları izelge 4.4’de verilmiştir. Bu izelgede CT: Kr sıcaklığını, TC: Kr süresini, SC: Sodyum konsantrasyonunu, SM: Silikat modülünü temsil etmektedir. Bu parametrelerin birlikte gösterimleri ise ikili ilişkilerini ifade etmektedir.



Çizelge 4.3. Deneysel sonuçlarının istatistiksel analiz tablosu

| Bağımlı değişken | Bağımsız değişken | Regresyon modeli | R ² | Serbestlik derecesi | Hatalar karesi toplamı | Hatalar karesi ortalaması | F dağılımı değeri | P değeri | % ρ |
|-----------------------|--------------------------|------------------|----------------|---------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|----------|----------|
| Basınç dayanımı (MPa) | Sabit | -95.95 | | | - | - | - | - | - |
| | CT | 2.32 | | 1 | 7.56 | 7.56 | 11.93 | 0.0106 | 0.1 |
| | TC | 1.072 | | 1 | 102.76 | 102.76 | 162.08 | < 0.0001 | 1.9 |
| | SC | 23.36 | | 1 | 2697.75 | 2697.75 | 4254.87 | < 0.0001 | 48.9 |
| | SM | 3.43 | | 1 | 80.96 | 80.96 | 127.69 | < 0.0001 | 1.5 |
| | CT-SC | -0.06 | | 1 | 64.52 | 64.52 | 101.76 | < 0.0001 | 1.2 |
| | TC-SC | 0.12 | | 1 | 29.33 | 29.33 | 46.2 | 0.0003 | 0.5 |
| | TC-SM | 0.59 | 0.99 | 1 | 36.99 | 36.99 | 58.35 | 0.0001 | 0.7 |
| | SC-SM | 3.07 | | 1 | 233.92 | 233.92 | 368.94 | < 0.0001 | 4.2 |
| | CT ² | -0.01 | | 1 | 637.60 | 637.60 | 1005.61 | < 0.0001 | 11.6 |
| | TC ² | -0.08 | | 1 | 247.60 | 247.60 | 390.51 | < 0.0001 | 4.5 |
| | SC ² | -2.45 | | 1 | 1198.27 | 1198.27 | 1889.91 | < 0.0001 | 21.7 |
| | SM ² | -5.50 | | 1 | 174.52 | 174.52 | 275.25 | < 0.0001 | 3.2 |
| | Uyuşmazlık (Lack of fit) | 1 | | 3 | 4.44 | 1.48 | 5916.37 | < 0.0001 | - |
| | Net hata | 1 | | 4 | 0.001 | 2.5E-04 | - | - | - |

Çizelge 4.3. (Devam) Deney sonuçlarının istatistiksel analiz tablosu

| Bağımlı değişken | Bağımsız değişken | Regresyon modeli | R ² | Serbestlik derecesi | Hatalar karesi toplamı | Hatalar karesi ortalaması | F dağılımı değeri | P değeri | %ρ |
|-------------------------------|-------------------|------------------|----------------|---------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|----------|------|
| Yarmada çekme dayanımı (MPa) | Sabit | | | | | | | | |
| | SC | +1.269 | | 1 | 5.75 | 5.75 | 16.4 | 0.0008 | 66.2 |
| | SC ² | -0.1197 | 0.52 | 1 | 2.94 | 2.94 | 8.38 | 0.0001 | 33.8 |
| | Uyuşmazlık | | | | 1.44 | 1.13 | 4 | 0.9994 | |
| | Net Hata | | | | 4.52 | | 19 | | |
| Çekip çıkarma yükü (Pull out) | Sabit | -12998.6 | | | 106722.0 | 106722.0 | | | |
| | CT | 137.1 | | 1 | 275282.0 | 275282.0 | 0.8 | 0.3909 | 0.1 |
| | TC | 207.9 | | 1 | 71362390.4 | 71362390.4 | 2.1 | 0.1816 | 0.3 |
| | SC | 3452.2 | | 1 | 7047424.3 | 7047424.3 | 543.3 | < 0.0001 | 75.0 |
| | SM | 4608.3 | | 1 | 879397.5 | 879397.5 | 53.7 | < 0.0001 | 7.4 |
| | CT-SM | -32.2 | 0.99 | 1 | 997469.6 | 997469.6 | 6.7 | 0.0293 | 0.9 |
| | TC-SM | -98.0 | | 1 | 880464.5 | 880464.5 | 7.6 | 0.0223 | 1.0 |
| | SC-SM | -188.5 | | 1 | 828543.7 | 828543.7 | 6.7 | 0.0293 | 0.9 |
| | CT ² | -0.6 | | 1 | 11657108.8 | 11657108.8 | 6.3 | 0.0332 | 0.9 |
| | SC ² | -240.6 | | 1 | 1131654.1 | 1131654.1 | 88.7 | < 0.0001 | 12.2 |
| | SM ² | -440.1 | | 1 | 1.182E+06 | 2.364E+05 | 8.6 | 0.0166 | 1.2 |
| | Uyuşmazlık | | | 5 | 5.20 | 1.30 | 1.819E+05 | < 0.0001 | |
| | Net hata | | | 4 | 106722.0 | 106722.0 | | | |

Çizelge 4.3. (Devam) Deney sonuçlarının istatistiksel analiz tablosu

| Bağımlı değişken | Bağımsız değişken | Regresyon modeli | R ² | Serbestlik derecesi | Hatalar karesi toplamı | Hatalar karesi ortalaması | F dağılımı değeri | P değeri | %ρ |
|-------------------------------------|-------------------|------------------|----------------|---------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|----------|------|
| Hızlı klor geçirimsizliği (Coulomb) | Sabit | +19627.17941 | | | | | | | |
| | CT | -253.89028 | | 1 | 2.579E+06 | 2.579E+06 | 9.27 | 0.0111 | 3.4 |
| | TC | +341.34013 | | 1 | 3980.01 | 3980.01 | 0.014 | 0.9069 | 0.0 |
| | SC | -3759.23706 | | 1 | 4.658E+07 | 4.658E+07 | 167.48 | < 0.0001 | 64.0 |
| | SM | +2533.31424 | | 1 | 64183.47 | 64183.47 | 0.23 | 0.6404 | 0.2 |
| | CT-SC | +10.43040 | 0.95 | 1 | 1.685E+06 | 1.685E+06 | 6.06 | 0.0316 | 4.4 |
| | TC-SM | -188.27854 | | 1 | 3.684E+06 | 3.684E+06 | 13.25 | 0.0039 | 3.2 |
| | TC ² | +1.50413 | | 1 | 5.224E+06 | 5.224E+00 | 18.78 | 0.0012 | 4.5 |
| | SC ² | +276.96384 | | 1 | 1.560E+07 | 1.560E+07 | 56.09 | < 0.0001 | 13.5 |
| | Uyuşmazlık | | | 7 | 3.059E+06 | 4.370E+05 | 7.601E+05 | < 0.0001 | |
| Net hata | | | 4 | 2.30 | 0.57 | | | | |
| Aşınma oranı (%) | Sabit | 0.99574 | | | | | | | |
| | SC | -0.25200 | | 1 | 0.37715687 | 0.37715687 | 33.1367450 | < 0.0001 | 80.6 |
| | SC ² | +0.021066 | 0.66 | 1 | 0.09099538 | 0.09099538 | 7.9947920 | 0.0116 | 19.4 |
| | Uyuşmazlık | | | 13 | 0.19 | 0.015 | 8754.95 | < 0.0001 | |
| | Net hata | | | 4 | 6.8E-06 | 1.700E-06 | | | |

Çizelge 4.3. (Devam) Deney sonuçlarının istatistiksel analiz tablosu

| Bağımlı değişken | Bağımsız değişken | Regresyon modeli | R ² | Serbestlik derecesi | Hatalar karesi toplamı | Hatalar karesi ortalaması | F dağılımı değeri | P değeri | %ρ | |
|-----------------------------|-------------------|------------------|----------------|---------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|----------|--------|--|
| Ultrasonik dalga hızı (m/s) | Sabit | -832.44796 | | 1 | | | | | | |
| | CT | +71.63928 | | 1 | 23544.50 | 23544.50 | 10.92 | 0.0163 | 0.5 | |
| | TC | +26.30766 | | 1 | 1250.00 | 1250.00 | 0.58 | 0.4753 | 0.0 | |
| | SC | +771.93546 | | 1 | 2.319E+06 | 2.319E+06 | 1075.58 | < 0.0001 | 51.4 | |
| | SM | +54.14433 | | 1 | 7645.57 | 7645.57 | 3.55 | 0.1087 | 0.2 | |
| | CT-SC | -2.85511 | | 1 | 1.263E+05 | 1.263E+05 | 58.55 | 0.0003 | 2.8 | |
| | CT-SM | -4.10999 | | 1 | 14329.69 | 14329.69 | 6.64 | 0.0419 | 0.3 | |
| | TC-SC | +5.64123 | | 1 | 60378.13 | 60378.13 | 28.00 | 0.0018 | 1.3 | |
| | TC-SM | +14.70723 | | 1 | 22477.73 | 22477.73 | 10.42 | 0.0179 | 0.5 | |
| | SC-SM | +62.57102 | | 1 | 97020.12 | 97020.12 | 44.99 | 0.0005 | 2.1 | |
| | CT ² | -0.47181 | | 1 | 5.004E+05 | 5.004E+05 | 232.06 | < 0.0001 | 11.1 | |
| | TC ² | -2.77284 | | 1 | 2.594E+05 | 2.594E+05 | 120.28 | < 0.0001 | 5.7 | |
| | SC ² | -72.70457 | | 1 | 1.051E+06 | 1.051E+06 | 487.24 | < 0.0001 | 23.3 | |
| | SM ² | -73.91239 | | 1 | 31440.11 | 31440.11 | 14.58 | 0.0088 | 0.7 | |
| | Uyuşmazlık | | | | 2 | 6519.08 | 3259.54 | 2.03 | 0.2462 | |
| | Net Hata | | | | 4 | 6420.00 | 1605.00 | | | |

Çizelge 4.3. (Devam) Deney sonuçlarının istatistiksel analiz tablosu

| Bağımlı değişken | Bağımsız değişken | Regresyon modeli | R ² | Serbestlik derecesi | Hatalar karesi toplamı | Hatalar karesi ortalaması | F dağılımı değeri | P değeri | %ρ |
|---|-------------------|------------------|----------------|---------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|----------|------|
| | Sabit | +5.31328 | | | | | | | |
| | CT | -0.055219 | | 1 | 0.070 | 0.070 | 4.59 | 0.0694 | 0.4 |
| | TC | +3.42774E-03 | | 1 | 0.60 | 0.60 | 39.14 | 0.0004 | 3.7 |
| | SC | -0.87535 | | 1 | 4.38 | 4.38 | 288.10 | < 0.0001 | 27.0 |
| | SM | +0.96316 | | 1 | 0.21 | 0.21 | 13.62 | 0.0078 | 1.3 |
| | CT-TC | -1.81744E-03 | | 1 | 0.21 | 0.21 | 14.11 | 0.0071 | 1.3 |
| | TC-SC | +0.018075 | | 1 | 0.62 | 0.62 | 40.77 | 0.0004 | 3.8 |
| Gaz geçirimsizliği (m²) | TC-SM | -0.060128 | 0.99 | 1 | 0.38 | 0.38 | 24.71 | 0.0016 | 2.3 |
| | SC-SM | -0.40170 | | 1 | 4.00 | 4.00 | 263.01 | < 0.0001 | 24.6 |
| | CT ² | +6.10768E-04 | | 1 | 0.84 | 0.84 | 55.16 | 0.0001 | 5.2 |
| | TC ² | +4.43623E-03 | | 1 | 0.66 | 0.66 | 43.67 | 0.0003 | 4.1 |
| | SC ² | +0.13708 | | 1 | 3.74 | 3.74 | 245.69 | < 0.0001 | 23.0 |
| | SM ² | +0.30718 | | 1 | 0.54 | 0.54 | 35.72 | 0.0006 | 3.3 |
| | Uyuşmazlık | | | 3 | 0.11 | 0.54 | 35.72 | 0.0006 | |
| | Net hata | | | 4 | 5.200E-04 | 1.300E-04 | 271.56 | < 0.0001 | |

Çizelge 4.3. (Devam) Deney sonuçlarının istatistiksel analiz tablosu

| Bağımlı değişken | Bağımsız değişken | Regresyon modeli | R ² | Serbestlik derecesi | Hatalar karesi toplamı | Hatalar karesi ortalaması | F dağılımı değeri | P değeri | % ρ | |
|-----------------------|-------------------|------------------|----------------|---------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|----------|----------|--|
| Isı iletkenlik (W/mK) | Sabit | -0.60476 | | | | | | | | |
| | CT | 0.029868 | | 1 | 0.043 | 0.043 | 141.30 | < 0.0001 | 13.2 | |
| | TC | 0.018267 | | 1 | 7.737E-03 | 7.737E-03 | 25.24 | 0.0010 | 2.4 | |
| | SC | -0.18039 | | 1 | 0.057 | 0.057 | 184.41 | < 0.0001 | 17.3 | |
| | SM | -0.46825 | | 1 | 6.500E-03 | 6.500E-03 | 21.20 | 0.0017 | 2.0 | |
| | CT-TC | -3.71E+01 | | 1 | 8.947E-03 | 8.947E-03 | 29.19 | 0.0006 | 2.7 | |
| | CT-SC | -8.25E+01 | | 1 | 0.011 | 0.011 | 34.38 | 0.0004 | 3.2 | |
| | TC-SM | 0.013465 | | 1 | 0.019 | 0.019 | 61.46 | < 0.0001 | 5.8 | |
| | SC-SM | 0.066006 | | 1 | 0.11 | 0.11 | 352.19 | < 0.0001 | 33.0 | |
| | CT ² | -1.46E+01 | | 1 | 0.049 | 0.049 | 158.92 | < 0.0001 | 14.9 | |
| | TC ² | -6.47E+01 | | 1 | 0.014 | 0.014 | 46.83 | 0.0001 | 4.4 | |
| | SC ² | 9.86E+02 | | 1 | 0.020 | 0.020 | 63.83 | < 0.0001 | 6.0 | |
| | Uyuşmazlık | | | | 4 | 1.066E-03 | 2.664E-04 | 0.77 | | |
| | Net hata | | | | 4 | 1.387E-03 | 3.467E-04 | | | |

Çizelge 4.3. (Devam) Deney sonuçlarının istatistiksel analiz tablosu

| Bağımlı değişken | Bağımsız değişken | Regresyon modeli | R ² | Serbestlik derecesi | Hatalar karesi toplamı | Hatalar karesi ortalaması | F dağılımı değeri | P değeri | % ρ |
|--------------------------|-------------------|------------------|----------------|---------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|----------|----------|
| | Sabit | +8.21702 | | | | | | | |
| | CT | -0.16058 | | 1 | 0.34 | 0.34 | 42.58 | 0.0013 | 1.0 |
| | TC | +0.45014 | | 1 | 0.41 | 0.41 | 50.06 | 0.0009 | 1.1 |
| | SC | -1.16674 | | 1 | 20.67 | 20.67 | 2554.70 | < 0.0001 | 58.2 |
| | SM | +1.94174 | | 1 | 0.31 | 0.31 | 38.57 | 0.0016 | 0.9 |
| | CT-TC | -2.47227E-03 | | 1 | 0.40 | 0.40 | 49.07 | 0.0009 | 1.1 |
| | CT-SC | -2.13068E-03 | | 1 | 0.070 | 0.070 | 8.69 | 0.0320 | 0.2 |
| Su emme oranı (%) | CT-SM | +9.7701E-03 | 0.99 | 1 | 0.081 | 0.081 | 10.01 | 0.0250 | 0.2 |
| | TC-SC | -0.022971 | | 1 | 1.00 | 1.00 | 123.75 | 0.0001 | 2.8 |
| | TC-SM | -0.12464 | | 1 | 1.61 | 1.61 | 199.57 | < 0.0001 | 4.5 |
| | SC-SM | -0.17543 | | 1 | 0.76 | 0.76 | 94.27 | 0.0002 | 2.1 |
| | CT ² | +1.4241E-03 | | 1 | 4.56 | 4.56 | 563.59 | < 0.0001 | 12.8 |
| | TC ² | +1.8487E-03 | | 1 | 0.12 | 0.12 | 14.25 | 0.0130 | 0.3 |
| | SC ² | +0.15926 | | 1 | 5.04 | 5.04 | 623.21 | < 0.0001 | 14.2 |
| | SM ² | -0.14848 | | 1 | 0.13 | 0.13 | 15.68 | 0.0107 | 0.4 |
| | Uyuşmazlık | | | 1 | 0.040 | 0.040 | 307.15 | < 0.0001 | |
| | Net hata | | | 4 | 5.200E-04 | 1.300E-04 | | | |

Çizelge 4.3. (Devam) Deney sonuçlarının istatistiksel analiz tablosu

| | | | | | | | | | |
|--|-----------------|-----------|------|----|-----------|-----------|-------|----------|------|
| Kılcal su emme (mm/dak^{0.5}) | Sabit | +1.26127 | | | | | | | |
| | SC | -0.32092 | | 1 | 0.49 | 0.49 | 78.61 | < 0.0001 | 74.8 |
| | SC ² | +0.028411 | 0.83 | 1 | 0.17 | 0.17 | 26.43 | < 0.0001 | 25.2 |
| | Uyuşmazlık | | | 13 | 0.11 | 8.150E-03 | 62.69 | 0.0006 | |
| | Net hata | | | 4 | 5.200E-04 | 1.300E-04 | | | |

Çizelge 4.4. Çoklu objektifli optimizasyon gerçekleştirilirken bağımlı ve bağımsız değişkenlere ait çalışma şartları

| Bağımlı ve bağımsız değişkenler | Amaç | Alt sınır | Üst sınır | Önem faktörü |
|---|----------|-----------|-----------|--------------|
| Kür sıcaklığı (°C) | Aralıkta | 26.36 | 93.64 | +++ |
| Kür süresi (saat) | Aralıkta | 1.23 | 24.77 | +++ |
| Sodyum konsantrasyonu (%) | Aralıkta | 0.1 | 7.5 | +++ |
| Silikat modülü | Aralıkta | 0.45 | 3.15 | +++ |
| Basınç dayanımı (MPa) | Maksimum | 3.29 | 58.38 | +++ |
| Yarmada çekme dayanımı (MPa) | Maksimum | 0.45 | 4.328 | +++ |
| Kılcal su emme (mm/dak ^{0.5}) | Minimum | 0.2504 | 0.8783 | +++ |
| Çekip çıkarma yükü (kg) | Maksimum | 10 | 8998 | +++ |
| Hızlı klor geçirimsizliği (Coulomb) | Minimum | 4561.5 | 11020.5 | +++ |
| Gaz geçirimsizliği (m ²) | Minimum | 1.59882 | 5.32941 | +++ |
| Isı iletkenlik katsayısı (W/mK) | Minimum | 0.586 | 1.21162 | +++ |

4.4. Basınç Dayanımı

Deneysel tasarımda belirlenen üretim ve kür şartlarına uygun olarak üretilmiş olan AAECB ve kontrol numunelerinin 1, 7, 28, 90 ve 180. yaşlarda basınç dayanımları belirlenmiş ve Çizelge 4.5’de verilmiştir. K15 (60D13S0.1K1.8M) karışımı ile üretilen numuneler priz almadığından bu karışıma ait deney sonuçları verilememiştir.

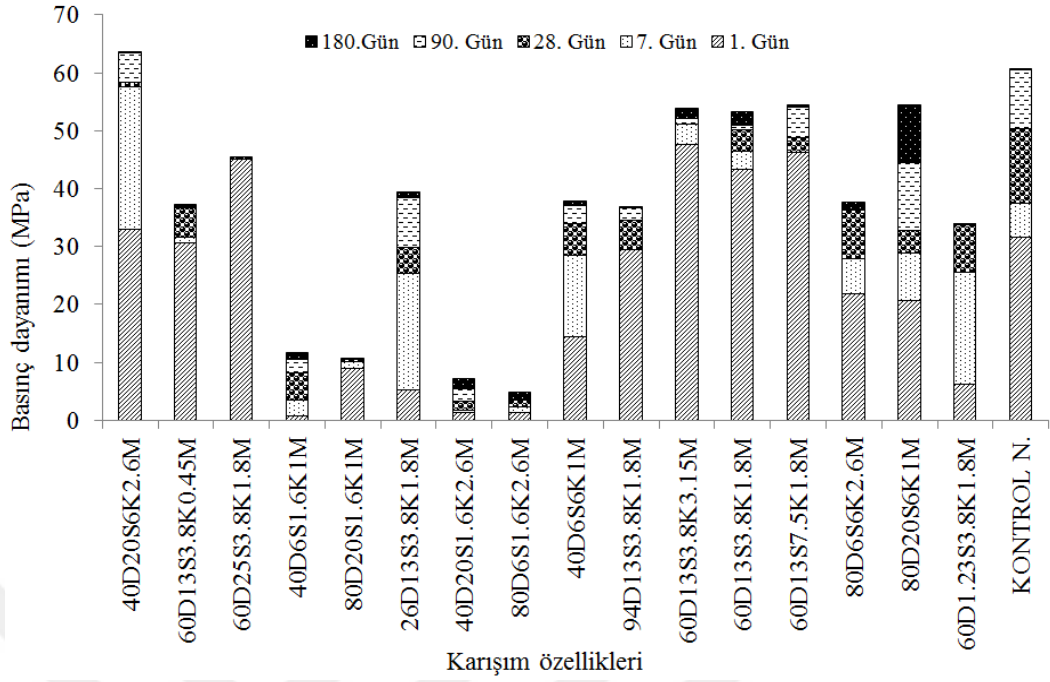
4.4.1. Basınç Dayanımının Zamana Bağlı Değişimi

AAECB 28 günlük basınç dayanımlarının 3.3 MPa ile 58.4 MPa arasında değiştiği görülmüştür. AAECB nihai dayanımlarının (180. günlük) büyük bir kısmını 1 günlükken kazandığı görülmüştür. Silikat modülü düşük, sodyum konsantrasyonu yüksek olan karışımların basınç dayanımlarının beton yaşı arttıkça artmaya devam ettiği tespit edilmiştir. AAECB ile Portland çimentolu (PÇ) betonların basınç dayanımlarının zamana bağlı değişimleri Şekil 4.1.’de gösterilmiştir. Şekil 4.1.’de sütunların üst noktaları, belirtilen gün sonunda o betonun eriştiği nihai basınç dayanımını resmetmektedir. Örneğin, Şekil 4.1.’de K20 (80D20S6K1M) karışımına ait numunelerin

1. gün sonunda 20.7 MPa basınç dayanımına ulaştığı, 7. gün sonunda 8.2 MPa, 28. gün sonunda 3.8 MPa, 90. gün sonunda hiç artış göstermeyeyip, 180. gün sonunda 11.8 MPa artış göstererek 44.5 MPa nihai basınç dayanımına ulaştığı görülmektedir.

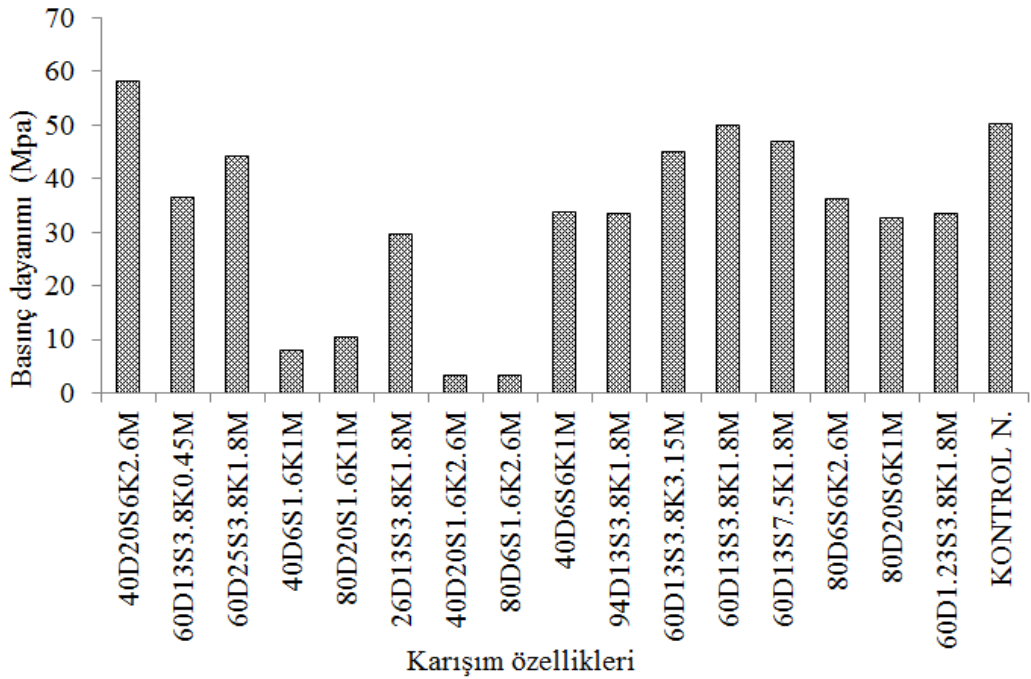
Çizelge 4.5. Beton yaşına göre basınç dayanımı değişimi

| Karışım no | Karışım adı | 1.Gün (MPa) | 7.Gün (MPa) | 28.Gün (MPa) | 90. Gün (MPa) | 180. Gün (MPa) |
|------------|------------------|-------------|-------------|--------------|---------------|----------------|
| K1 | 26D13S3.8K1.8M | 5.2 | 25.4 | 29.8 | 38.5 | 39.4 |
| K2 | 40D20S6K2.6M | 33.1 | 57.7 | 58.34 | 63.4 | 63.5 |
| K3 | 40D6S1.6K1M | 0.7 | 3.5 | 8.2 | 10.5 | 11.6 |
| K4 | 40D20S1.6K2.6M | 1.3 | 1.8 | 3.3 | 5.4 | 7.2 |
| K5 | 40D6S6K1M | 14.4 | 28.6 | 34.0 | 37.1 | 37.8 |
| K6 | 60D13S3.8K0.45M | 30.6 | 31.6 | 36.7 | 34.2 | 34.6 |
| K7 | 60D13S3.8K1.8M | 43.23 | 46.5 | 50.2 | 50.9 | 53.3 |
| K8 | 60D13S3.8K1.8M | 40.4 | 44.4 | 48.8 | 48.6 | 51.2 |
| K9 | 60D13S3.8K1.8M | 41.7 | 42.5 | 50.5 | 47.8 | 51.7 |
| K10 | 60D13S3.8K1.8M | 43.6 | 45.7 | 48.8 | 49.2 | 54.9 |
| K11 | 60D13S3.8K1.8M | 44.2 | 45.4 | 49.9 | 49.34 | 56.4 |
| K12 | 60D25S3.8K1.8M | 45.2 | 45.0 | 44.2 | 44.2 | 44.4 |
| K13 | 60D13S3.8K3.15M | 47.6 | 44.1 | 45.0 | 46.0 | 47.8 |
| K14 | 60D13S7.5K1.8M | 46.3 | 44.7 | 47.2 | 52.5 | 53.0 |
| K15 | 60D13S0.1K1.8M | - | - | - | - | - |
| K16 | 60D1.23S3.8K1.8M | 6.2 | 25.6 | 33.7 | 33.8 | 34.0 |
| K17 | 80D20S1.6K1M | 8.9 | 10.1 | 10.6 | 8.9 | 8.9 |
| K18 | 80D6S1.6K2.6M | 1.3 | 2.4 | 3.5 | 3.5 | 4.8 |
| K19 | 80D6S6K2.6M | 21.9 | 27.9 | 36.2 | 36.3 | 37.7 |
| K20 | 80D20S6K1M | 20.7 | 28.9 | 32.7 | 32.7 | 44.5 |
| K21 | 94D13S3.8K1.8M | 29.4 | 28.5 | 33.7 | 35.8 | 35.8 |
| K22 | KONTROL | 31.6 | 37.4 | 50.3 | 60.6 | 60.8 |



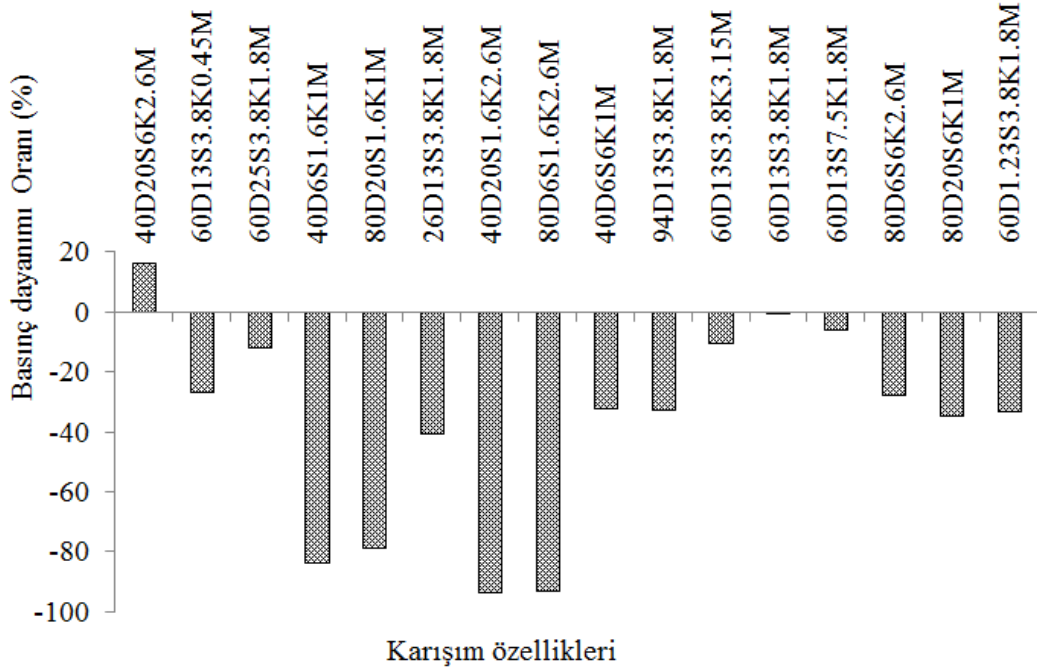
Şekil 4.1. Basınç dayanımının zamana bağlı değişimi

AAECB ve Portland çimentosu ile üretilmiş kontrol numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları Şekil 4.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. 28 günlük basınç dayanımları

AAECB numunelerin 28 günlük basınç dayanımları Portland çimentosu ile üretilmiş kontrol numunelerinin basınç dayanımı ile karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.3.'de gösterilmiştir. Şekil 4.3. detaylı olarak incelendiğinde, K2 (40D20S6K2.6M) numunesinin 28 günlük basınç dayanımının kontrol betonundan %16 daha yüksek, K4 (40D20S1.6K2.6M) numunesinin ise %93 daha düşük olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.3. AAECB ve PÇ'li betonların basınç dayanımlarının karşılaştırılması

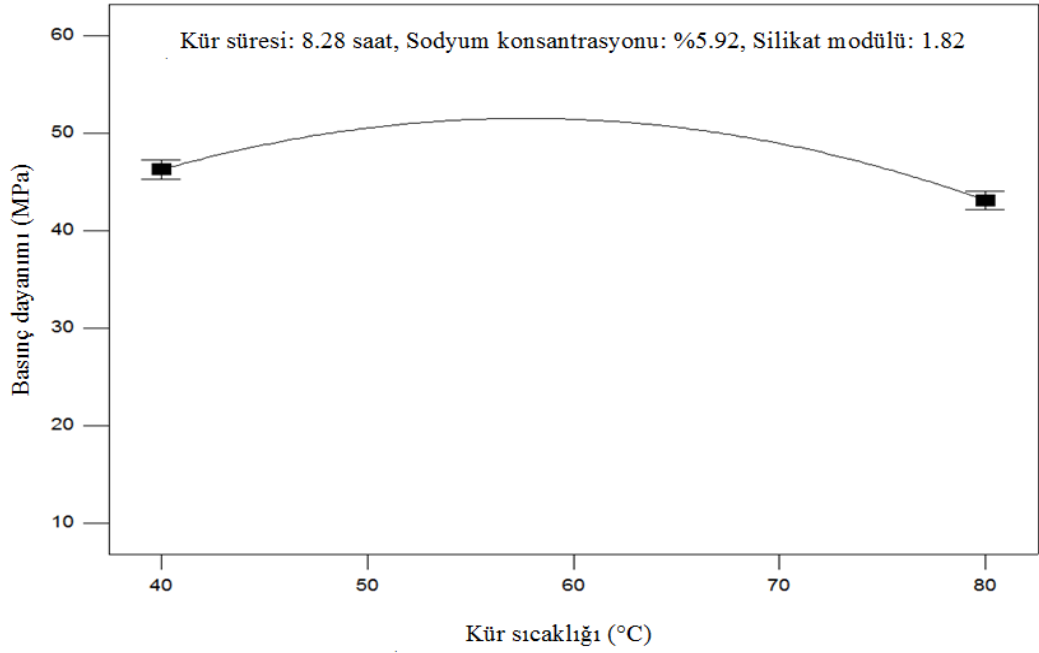
4.4.2. Bağımsız Değişkenlerin Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi

Bu bölümde, istatistiksel olarak anlamlı bağımsız değişkenler, ikili etkileşimleri ve ikinci dereceden etkin parametrelerin, basınç dayanımına etkileri şekillerle açıklanmaya çalışılmıştır. Her bir parametrenin etkisi gösterilirken diğer parametreler optimizasyon çalışması ile belirlenen ve Çizelge 4.6.'da verilen ideal değerlerinde sabit tutulmuştur.

Çizelge 4.6. AAECB optimum üretim parametreleri ve doğrulama deneyi sonuçları

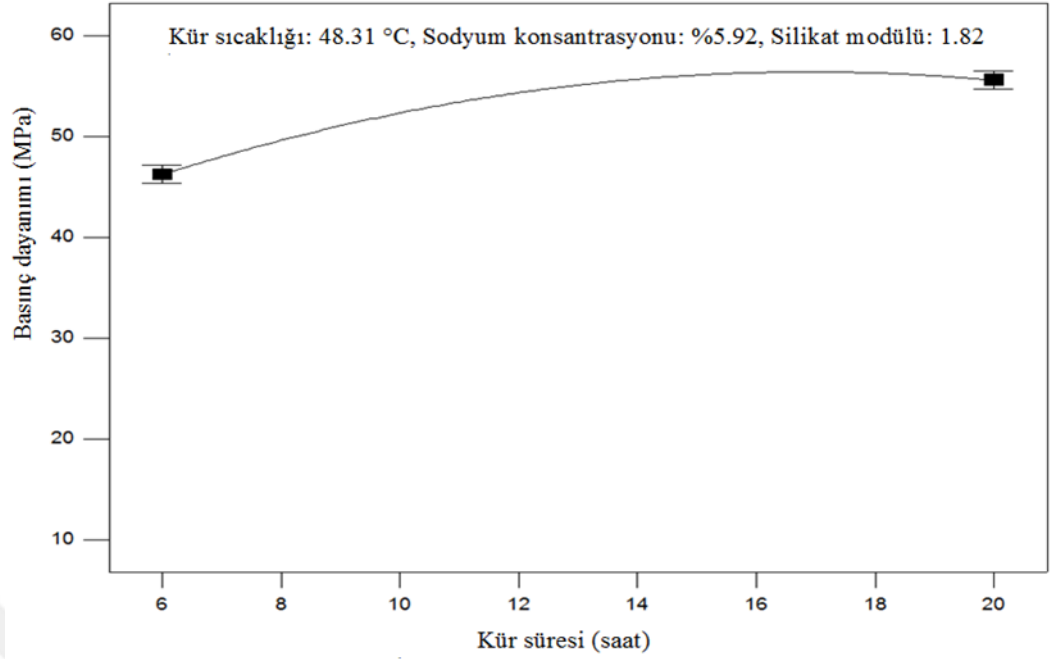
| Bağımlı ve bağımsız değişkenler | Optimum şartlar ve tahmini sonuçlar | Doğrulama deneyi sonuçları | Hata oranı |
|---|--|-----------------------------------|-------------------|
| Kür sıcaklığı (°C) | 48.31 | 48.31 | %0 |
| Kür süresi (saat) | 8.28 | 8.28 | %0 |
| Sodyum konsantrasyonu (%) | 5.92 | 5.92 | %0 |
| Silikat modülü | 1.82 | 1.82 | %0 |
| Basınç dayanımı (MPa) | 50.0 | 51.9 | %3.8 |
| Yarmada çekme Dayanımı (MPa) | 2.42 | 2.6 | %7.4 |
| Kılcal su emme (mm/dak ^{0.5}) | 0.36 | 0.41 | %13.8 |
| Çekip çıkarma yükü (kg) | 6536 | - | - |
| Hızlı klor geçirimsizliği (Coulomb) | 5905 | 6600 | %11.7 |
| Gaz geçirimsizliği (m ²) | 1.722 | 1.845 | %7.1 |
| Isı iletkenlik katsayısı (W/mK) | 0.77 | 0.79 | %2.6 |

Şekil 4.4.'de kür sıcaklığı değişiminin basınç dayanımı üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Şekilden açıkça görüleceği üzere, kür sıcaklığının 40°C'den 80°C'ye yükseltilmesi, basınç dayanımında belirgin bir değişime yol açmamıştır. 50°C-60°C arası kür sıcaklığında basınç dayanımının en yüksek olduğu görülmektedir. Literatürde AAECB oda sıcaklıklarında kür edildiğinde yüksek dayanım kazanamadığı belirtilmektedir. Altan ve Erdoğan (2012), AAECB kür sıcaklığı arttıkça basınç dayanımının arttığını, dayanımdaki artışın belirli bir eşik kür sıcaklığına (80°C) kadar çok belirgin olduğunu, bu sınırın aşılması ile beton basınç dayanımındaki artışın devam ettiğini ancak dayanımda meydana gelen artışın 80°C'deki dayanımla karşılaştırıldığında ihmal edilebilir düzeylerde olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 4.4. Kür sıcaklığının basınç dayanımı üzerindeki etkisi

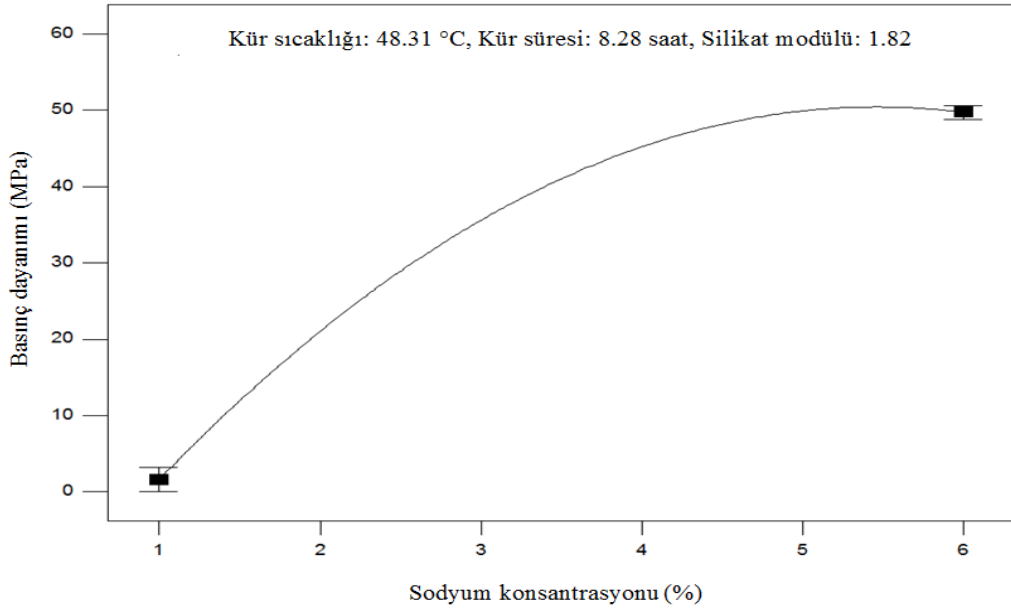
AAECB ve harçlarda kür süresinin artması ile polimerleşme miktarının arttığı, bu artışa bağlı olarak da basınç dayanımının arttığı belirtilmektedir. Ancak 48 saatten fazla uygulanan ısı kürünün, dayanım kazanma üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı, hatta dayanımda azalmaların meydana gelebileceği Khale (2007) tarafından belirtilmiştir. Şekil 4.5. kür süresinin basınç dayanımı üzerinde etkisini göstermektedir. Şekilde görüleceği üzere, kür süresi arttıkça basınç dayanımı da belirgin şekilde artmaktadır. Literatürde belirtildiği gibi kür süresi eşik değerini üzerine çıktıkça (bu çalışmada eşik kür süresi 16 saat olarak belirlenmiştir) AAECB ısı etkisi altında uzun süre kalmasıyla geopolimer yapının bozulmasına bağlı olarak basınç dayanımının azaldığı belirtilmiştir (Khale, 2007). Şekil 4.6. sodyum konsantrasyonundaki değişimin basınç dayanımı üzerindeki etkisini göstermektedir. Görüleceği üzere, sodyum konsantrasyonu %1 den %6 ya doğru arttıkça basınç dayanımı 0.05 MPa'dan 58.34 MPa'ya yükselmiştir. AAECB, ÖGYFC bünyesinde bulunan anyon iyonları ile alkali çözeltide bulunan katyon iyonlarının sentezlenmesi ile dayanım kazanmaktadır. Bu iyon değişimi ile silika jelleri oluşmakta ve ÖGYFC'de bulunan kalsiyum ile reaksiyona girerek C-S-H jelleri oluşmaktadır (Bilim ve ark., 2015; Yang ve ark., 2008).



Şekil 4.5. Kür süresinin basınç dayanımına etkisi

K15 (60D13S0.1K1.8M) karışımından üretilen numuneler priz almamış ve deneylere tabii tutulamamıştır. Bu durumun, %0.1 sodyum konsantrasyonunun jellerin oluşması için gerekli olan reaksiyonların başlamasına ve devam etmesine yeterli olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Wang ve ark. (1994), ÖGYFC'nin alkalilerle aktivasyonunda karışımdaki NaOH konsantrasyonu arttıkça basınç dayanımının arttığını, ancak sodyum konsantrasyonunun aşırı artmasıyla çiçeklenme ve aşırı gevrekleşme (brittleness) sorunları ile karşılaştığını, optimum bir sodyum konsantrasyonu olduğunu ve bu değer belirlenmesi gerektiğini belirttiler. Çizelge 4.3'de AAECB 28 günlük basınç dayanımlarının istatistiksel analizi ve regresyon modeli verilmiş ve basınç dayanımı üzerinde en etkin parametrenin %48.9 etki oranı ile sodyum konsantrasyonu olduğu belirtilmiştir. Sodyum konsantrasyonunun ikinci dereceden değişiminin de basınç dayanımı üzerinde %21.7 katkı payı ile etkin olduğu görülmektedir. Basınç dayanımı üzerinde sodyum konsantrasyonunun kür süresi ve silikat modülünden 25 kat daha etkin olduğu belirlenmiştir. Literatür çalışmalarında sabit SC ve değişen SM ile üretilen AAECB silikat modülünün artması ile kinetik reaksiyonların arttığı ve basınç dayanımında artışların olduğu belirtilmiştir (Gebregziabihher ve ark., 2015). Ancak bu çalışma kapsamında, literatür ile uygun sonuçlar elde edilmemiş ve bunun nedeninin sadece silikat modülünün değişmesi değil,

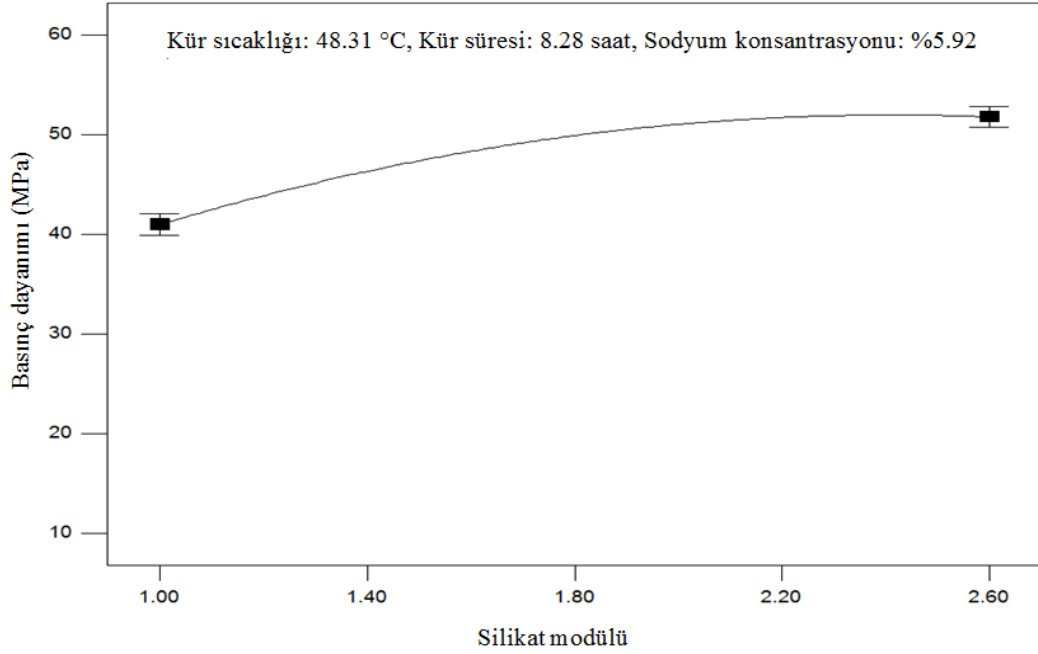
SM ile birlikte SC, TC ve CT'nin de değişiyor olması ve SM'nin erken yaşlarda basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisinin olmamasından kaynaklandığı düşünölmektedir. Diaz ve Garcia (2013), sodyum hidroksit ve sodyum silikatın birlikte kullanıldığı aktivasyon sistemlerinde, erken yaş basınç dayanımının sodyum silikat değişiminden etkilendiğini ve erken yaş dayanımlarının düşük seviyelerde kalabileceğini belirtmişlerdir.



şekil 4.6. Sodyum konsantrasyonunun basınç dayanımına etkisi

AAECB, mekanik özelliklerinin silikat modölu ile doğrudan ilişkili olduğu, silikat modölu 1.0-2.4 arasında bir değer aldığında yüksek mekanik özelliklerin elde edilebileceği bir çok araştırmacı tarafından belirtilmiştir (Wang ve ark., 1994; Bernal ve ark., 2010; Komljenovic ve ark.,2010; Sathonsaowaphak ve ark., 2009). Hedef basınç dayanımı için zaman ve malzeme tasarrufu ağıısından çoklu objektifli optimizasyon ile daha ekonomik ve bilimsel bir yöntemle optimum şartlar belirlenebilmektedir. Bu çalışmada diğer bağımsız değişkenlerin etkileri de göz önünde bulundurularak optimum silikat modölu AAECB için 1.82 olduğu belirlenmiş ve literatürde belirtilen aralıklarda olduğu görölmüştür. 28 günlük AAECB basınç dayanımı için silikat modölu'nün etkisi şekil 4.7.'de gösterilmiştir. şekilden, silikat modölu'nün 1.0 den 2.6 ya doğru arttıķa basınç dayanımının arttığı, ancak silikat modölu'nün 1.82 den daha büyük değerler

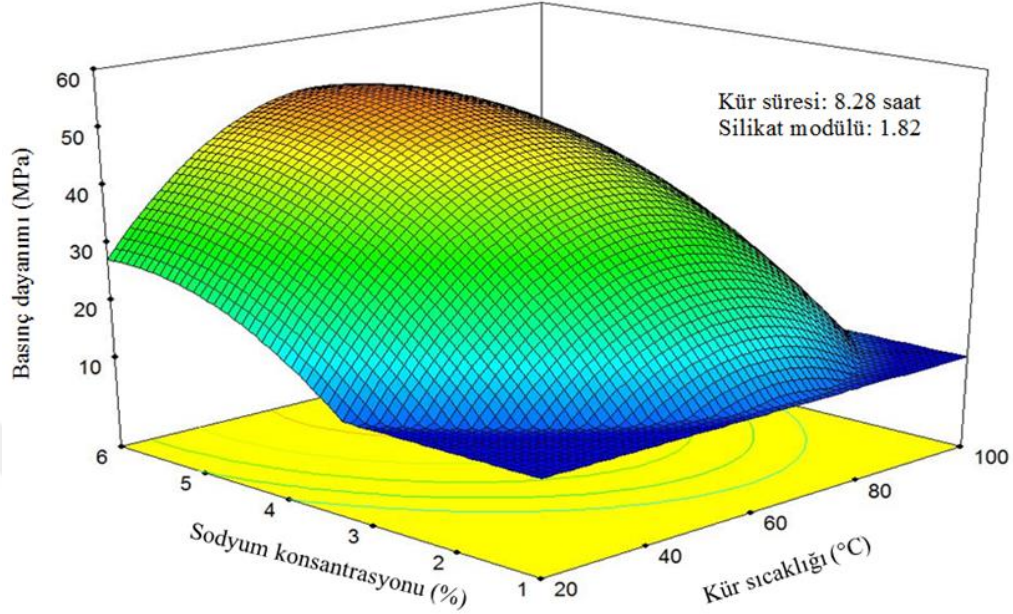
aldığında basınç dayanımında meydana gelen değişimlerin önemsiz olduğu görülmektedir.



Şekil 4.7. Silikat modülünün basınç dayanımına etkisi

Bağımsız faktörlerin basınç dayanımı üzerindeki etkileri incelendiğinde her faktörün basınç dayanımını maksimum yapan bir değerinin mevcut olduğu belirlenmiştir. Bağımsız değişkenlerin basınç dayanımı üzerinde yalnızca tekli etkilerinin değil, ikili etkileşimlerinin de istatistiksel olarak etkin olduğu Çizelge 4.3’de görülmektedir. Bağımsız değişkenlerin (CT-SC, SC-TC, TC-SM ve SC-SM) ikili etkileşimleri basınç dayanımına ait regresyon modeli üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip olduğundan, bu parametrelerin etkisi grafiksel olarak gösterilirken diğer iki bağımsız değişken çoklu objektifli optimizasyon çalışmasından elde edilen optimum değerlerinde tutularak grafikler oluşturulmuştur. İstatistiksel olarak anlamsız olan etkileşimler göz önüne alınmamıştır. Şekil 4.8.’de kür süresi (8.28 saat) ve silikat modülü (1.82) optimum değerlerinde iken sodyum konsantrasyonu-kür sıcaklığı (SC-CT) ikili etkileşiminin basınç dayanımı üzerindeki etkisi (istatistiksel analize göre basınç dayanımı üzerindeki etkisi %1.2) gösterilmiştir. Sodyum konsantrasyonu %3’ün altında iken basınç dayanımının 10 MPa’dan az olduğu ve %5.5’in üzerine çıktığında da basınç dayanımının azalmaya başladığı belirlenmiştir. Şekilde, kür sıcaklığının 55°C

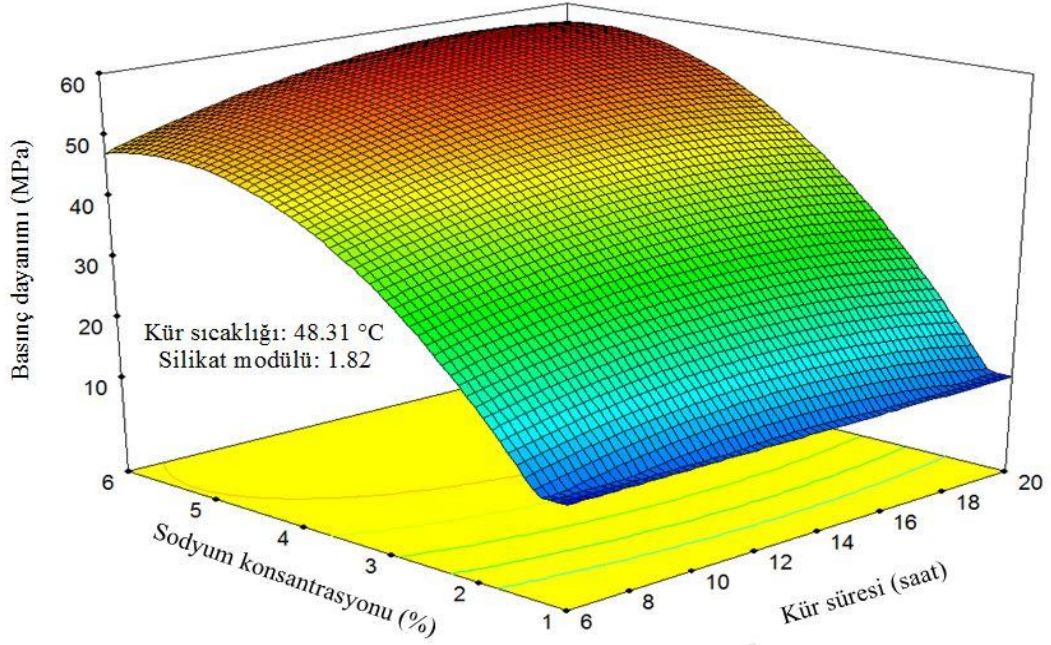
olduğu durumda ideal şartlarda 51 MPa maksimum basınç dayanımına ulaştığı (kırmızı bölge) görülmektedir.



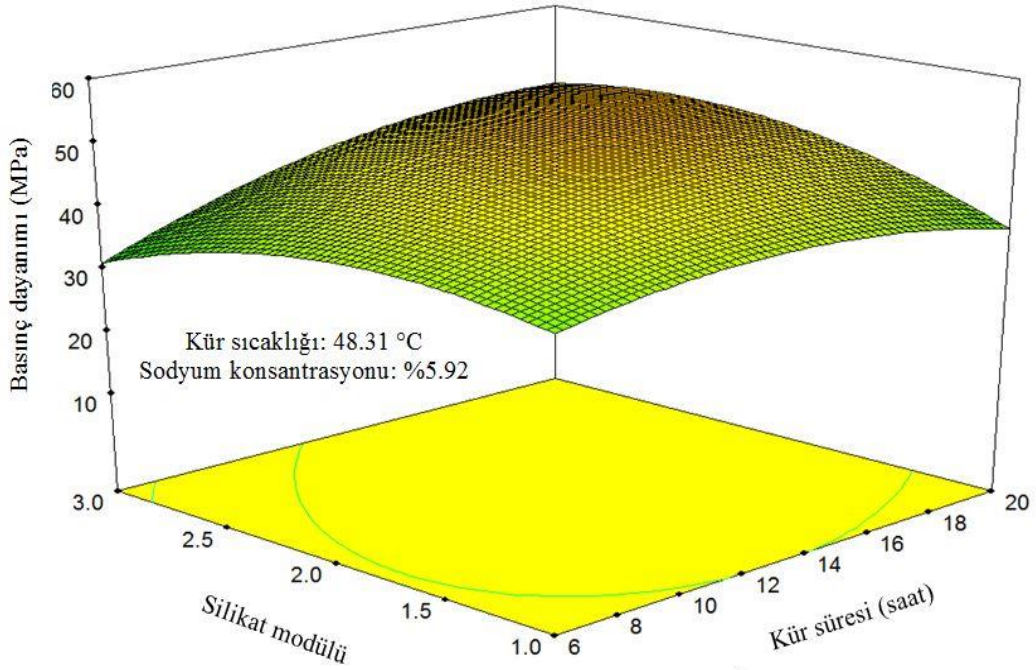
Şekil 4.8. Sodyum konsantrasyonu-kür sıcaklığının basınç dayanımına etkisi

Şekil 4.9.'da 28 günlük basınç dayanımı değeri üzerinde sodyum konsantrasyonu-kür süresi (SC-TC) ikili etkisi gösterilmiştir. Grafik oluşturulurken kür sıcaklığı ve silikat modülü optimum şartlarda tutulmuştur (CT=48.31°C, SM=1.82). Varyans analizi sonuçlarına göre SC-TC ikili etkileşiminin basınç dayanımı üzerindeki etkisi %0.5 olarak görülmektedir. SC ve TC'nin birlikte artmasıyla basınç dayanımının maksimum seviyeye ulaştığı kırmızı bölge olarak gösterilmiştir. Düşük SC karışımlarında TC artışı basınç dayanımı üzerinde ciddi etki oluşturmazken, yüksek sodyum konsantrasyonunda kür süresinin önemi görülebilmektedir. Silikat modülü ile kür süresinin birlikte değişimi basınç dayanımını %0.7 oranında etkilediği ANOVA ile belirlenmiş ve Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Şekil 4.10.'da da kür sıcaklığı ve sodyum konsantrasyonu optimum değerlerinde iken SM-TC değişiminin basınç dayanımını ciddi oranda etkilemediği görülmektedir. Basınç dayanımını etkileyen en önemli faktörün SC olduğu daha önce belirtilmişti. Alkali aktivatörlerin konsantrasyon ve modülünün birlikte değişmesi uygulanan kür şartları sabit tutulduğunda basınç dayanımı üzerinde %4.2'lik bir etkiye sahiptir (Çizelge 4.3). Şekil 4.11.'de CT ve TC optimum seviyelerinde iken SC ve SM değişiminin basınç dayanımını nasıl etkilediği gösterilmiştir. Görüleceği üzere SM ve

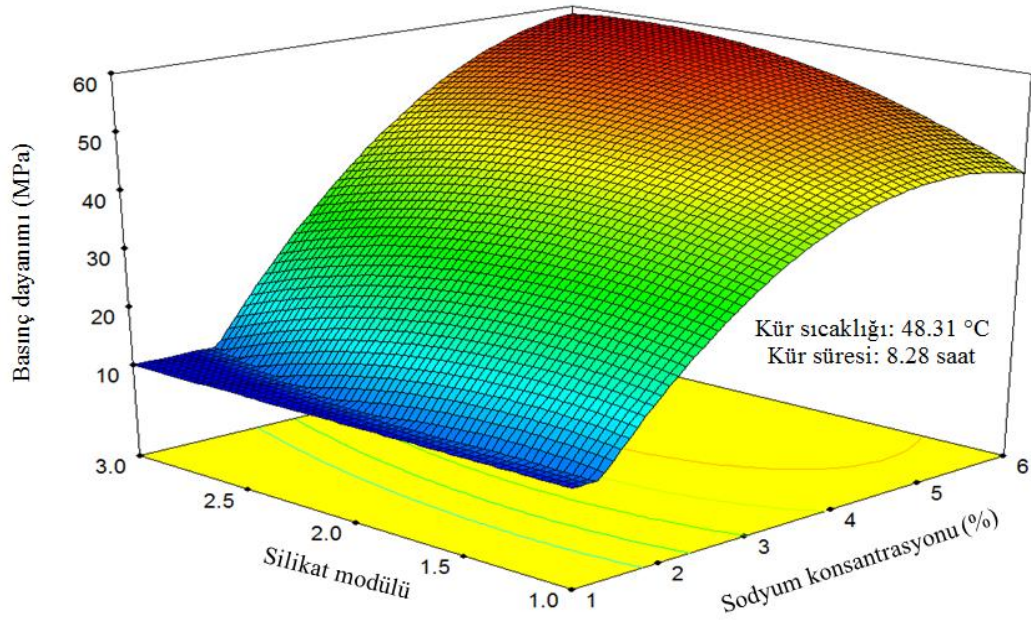
SC'nin çalışılan aralıktaki maksimum seviyelerinde basınç dayanımını da maksimum değerini almıştır.



Şekil 4.9. Sodyum konsantrasyonu-kür süresinin basınç dayanımına etkisi



Şekil 4.10. Silikat modülü-kür süresinin basınç dayanımına etkisi



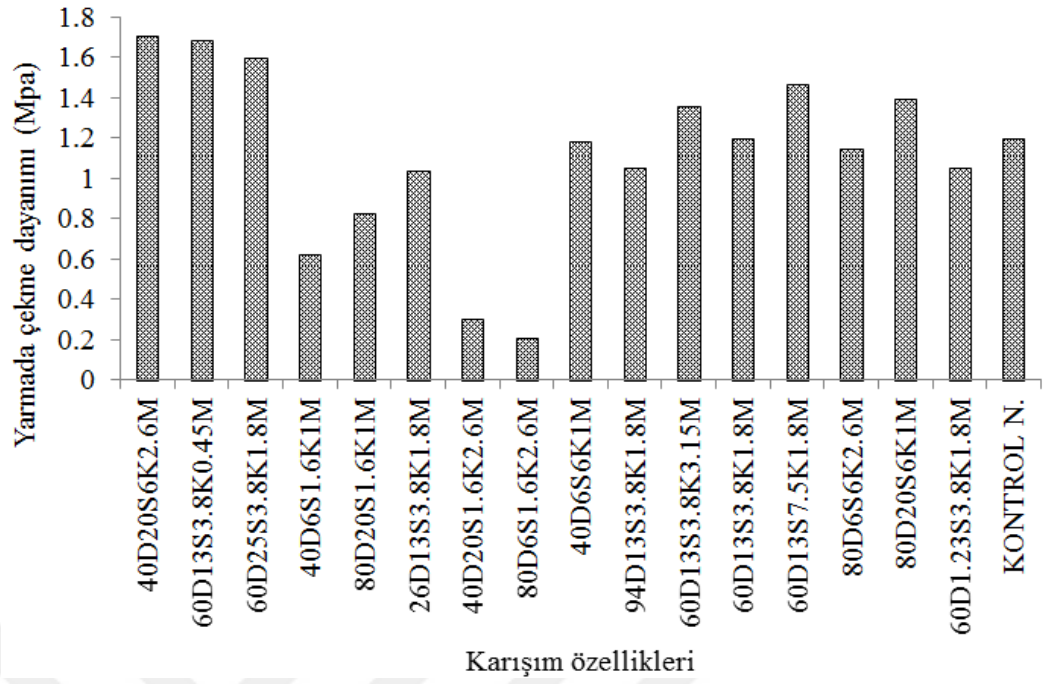
Şekil 4.11. Silikat modülü-sodyum konsantrasyonu basınç dayanımına etkisi

4.5. Yarmada Çekme Dayanımı

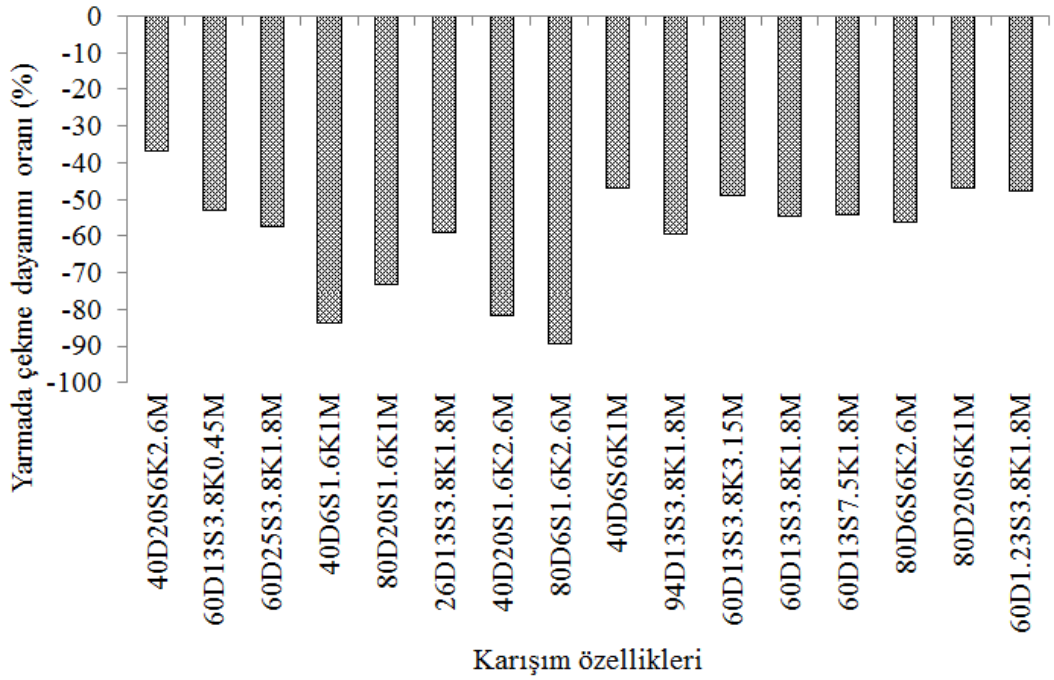
150x150x150 mm boyutlarındaki AAECB ve kontrol numunelerinin yarmada çekme dayanımları (YÇD) Çizelge 4.1’de verilmiştir. AAECB yarmada çekme dayanımları 0.45-2.72 MPa arasında değerler almıştır. Çizelge 4.1 dikkatli incelendiğinde AAECB yarmada çekme dayanımlarının PÇ betonların yarmada çekme dayanımından kayda değer oranlarda düşük olduğu görülmektedir. AAECB yüksek basınç dayanımına sahip olmasına rağmen yarmada çekme dayanımları daha düşüktür. Numune bünyesinde meydana gelen mikro boyuttaki çatlaklar bile yarmada çekme dayanımını olumsuz olarak etkilemektedir (Aydın, 2013). Ya-min ve ark. (2015), yüksek sıcaklıklarda kür edilen AAECB’de erken yaşlarda reaksiyonlar hızlı geliştiğinden kimyasal rötre ve matriste fazla sayıda mikro çatlak oluştuğundan dolayı çekme dayanımının sıcaklık kürüne bağlı olarak daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Zaman ilerledikçe sertleşmiş cüruf ve çimento hamurlarının matrisleri daha sıkı hale gelmesine rağmen bu çatlakların ilerlediğini belirtmişlerdir. Türker ve ark.(2015), laboratuvar şartlarında kür edilen alkalilerle aktive edilmiş cürufllu harçlarda mikro çatlakların oluşmadığını ve sıcaklık kürü (60°C) uygulanan alkalilerle aktive edilmiş cürufllu harçlarda oluşan mikro çatlaklardan dolayı çekme dayanımının daha düşük

olduğunu belirtmişlerdir. AAECB ve Portland çimentolu kontrol karışımlarının yarmada çekme dayanımları ve PÇ betona göre yarmada çekme dayanımının nasıl değiştiği sırasıyla Şekil 4.12. ve Şekil 4.13.'de gösterilmiştir. Şekil 4.13.'de AAECB yarmada çekme dayanımlarının % 37 (K2) (40D20S6K2.6M) ile % 89 (K18) (80D6S1.6K2.6M) arasında kontrol betonlarına göre daha düşük olduğu görülmektedir. Betonun çekme dayanımı basınç dayanımının yaklaşık %10'u kadardır (Ersoy, 1985). Ancak AAECB özellikle erken yaşlarda reaksiyonların hızlı gelişmesine bağlı olarak fazla sayıda mikro çatlak oluşmakta ve çekme dayanımı %6 dolaylarında olmaktadır. ÖGYFC ile üretilen betonların yarmada çekme dayanımları gerek karışımdaki madde yoğunlukları gerekse kür şartlarından etkilenecek farklı davranış sergilemişlerdir. Sodyum konsantrasyonu yüksek olan karışımlarda yarmada çekme olayının gevrek bir şekilde gerçekleştiği, silikat modülü yüksek olan karışımlarda ise daha sünek bir davranışın olduğu gözlemlenmiştir.

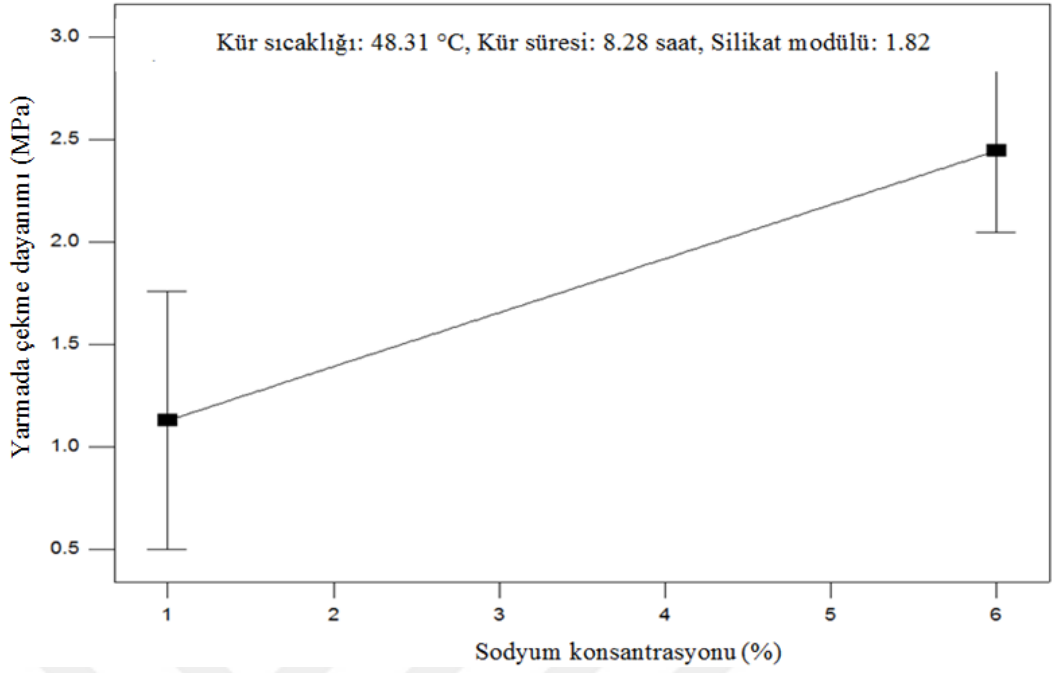
Yapılan istatistiksel analiz sonuçlarına göre yarmada çekme dayanımını etkileyen tek bağımsız değişkenin sodyum konsantrasyonu ve karesel etkisinin olduğu belirlenmiş, oluşturulan regresyon modeli ve etki oranı Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Diğer bağımsız değişkenler yarmada çekme dayanımı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip olmadıkları için sadece sodyum konsantrasyonu değişiminin yarmada çekme dayanımı üzerindeki etkisi grafiksel olarak gösterilmiştir. Şekil 4.14.'de sodyum konsantrasyonuna bağlı olarak yarmada çekme dayanımının nasıl değiştiği görülmektedir. Şekilden açıkça görüleceği üzere, sodyum konsantrasyonu arttıkça yarmada çekme dayanımı lineer olarak artmaktadır. Beklenildiği üzere, AAECB yarmada çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasında lineer bir etkileşim vardır (Bakınız Şekil 4.15). Basınç dayanımı yüksek olan AAECB yarmada çekme dayanımları da yüksektir.



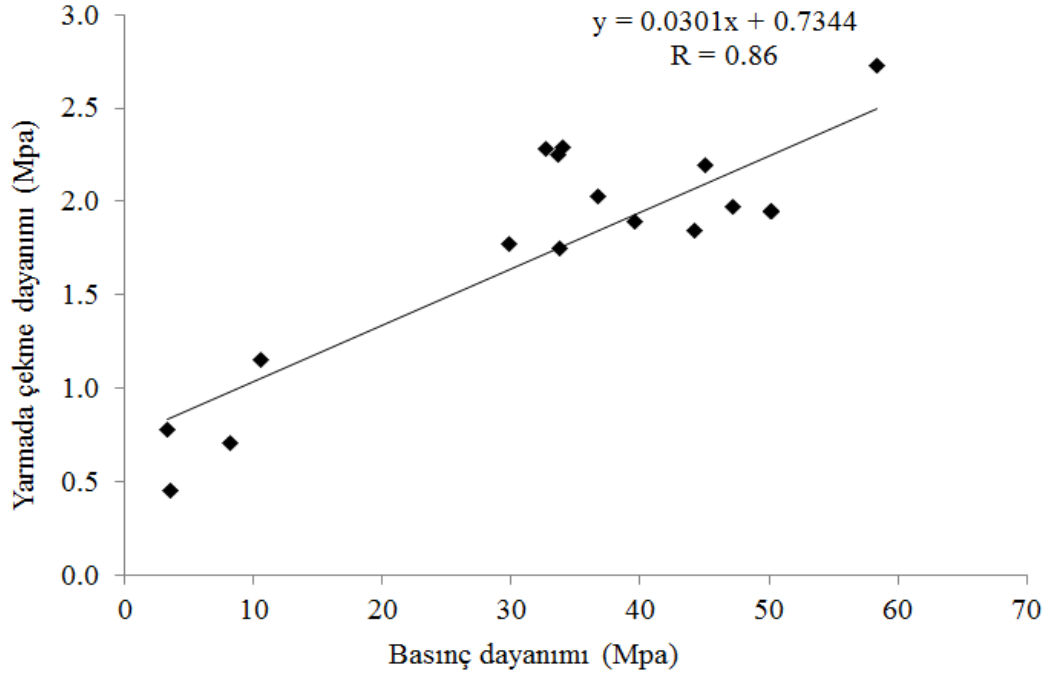
Şekil 4.12. AAECB ve kontrol betonlarının yarmada çekme dayanımları



Şekil 4.13. AAECB yarmada çekme dayanımlarının kontrol numunesine oranı



Şekil 4.14. Sodyum konsantrasyonunun çekme dayanımına etkisi



Şekil 4.15. AAECB basınç dayanımı-yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki

4.6. Çekip Çıkarma Yüğü

Donatı ile beton arasında kurulan bağ, yapısal açıdan önemlidir ve kompozit elemana gelen eksenel yükü taşıma ve aktarmadan sorumludur. Donatı ile beton arasında kurulan bu bağ betonun aderans özelliği hakkında bilgi vermektedir. Kompozit malzemelerde yükler genellikle fiziko-kimyasal (aderans) ve mekanik (sürtünme) olarak taşınırlar (Prince, 2013; Jansson, 2012; Türker, 2016). AAECB donatı ile aderans yapabilme yeteneği hakkında fikir edinmek maksadı ile Ø100x200 mm silindirik numunelerin içerisine gömülen donatı çubukları çekip çıkarma deneyine tabi tutulmuştur. Çekip çıkarma deneylerinde üç farklı davranış gerçekleşebilir:

- Beton yüksek dayanımlıdır, donatı beton aderansı iyidir, donatı akar
- Beton düşük dayanımlıdır, donatı beton arasındaki aderans zayıftır, donatı kolaylıkla sıyrılır
- Beton donatı arasındaki aderans çok iyidir, donatı sıyrılmaz ve akmaz ancak donatı beton kütleyle konkav şekilde kopararak sıyrılır.

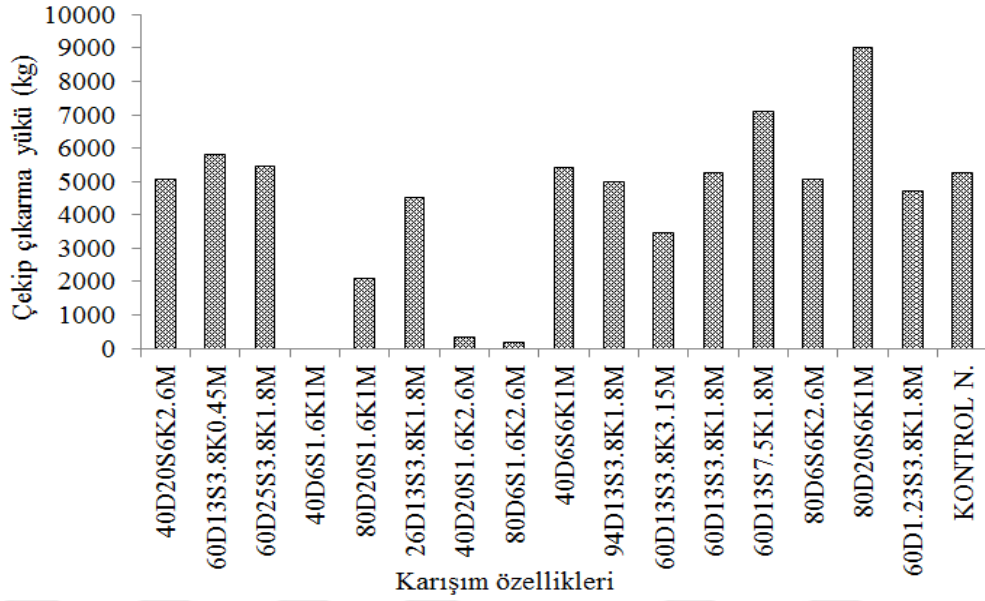
Çalışma kapsamında donatı akma olayına rastlanmamıştır. Uygulanan çekip çıkarma yüküne bağlı olarak AAECB numunelerinin 120° lik açılarla yarıldığı, donatının akmadan, sıyrılarak beton numune içerisinden çıktığı gözlemlenmiştir. Betonun basınç ve çekme dayanımı, betonun boşluk yapısı, çatlak bulunup bulunmama durumlarına bağlı olarak çekip çıkarma yükleri farklılık göstermektedir. Deney sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. AAECB ve Portland çimentolu kontrol karışımlarının çekip çıkarma (pull out) yükleri ve kontrol numunesine göre çekip çıkarma yükü değişim oranları Şekil 4.16. ve Şekil 4.17.’de gösterilmiştir. K7-K11 (60D13S3.8K1.8M) (merkezi kompozit tasarımda aynı olan) numuneleri ile kontrol numunesinin sıyrılmaya yükü birbirine çok yakın iken K20 (80D20S6K1M) numunesinin sıyrılmaya yükünün kontrol numunesinden %70 daha fazla olduğu Şekil 4.17.’de gösterilmiştir. Sodyum konsantrasyonu yüksek olan karışımlarda donatının betondan ani olarak sıyrıldığı ve betonun aniden parçalandığı, silikat modülü yüksek olan karışımlarda ise sıyrılmaya olayının daha yavaş ve gözle takip edilebilir (daha sünek) olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin; sodyum konsantrasyonu yüksek olan K14 (60D13S7.5K1.8M) karışımına ait numuneler çekip çıkarma deneyine tabi tutulduğunda gevrek ve ani bir kırılma gerçekleşmiştir. K14 (60D13S7.5K1.8M) karışımına ait numunelerin çekip çıkarma

deneyi yük-sıyrılma grafiği Şekil 4.18.'de verilmiştir. AAECB numuneler 6950 ve 7200 kg yük taşıyarak 15-20 mm sıyrılma gerŐekleŐtikten sonra donatı betondan ayrılmıştır. AAECB ve PÇ numuneler maksimum yüke ulaşana kadar donatı beton iÇinde sıyrılma yapmış ve maksimum yük kapasitesinde beton numuneler Şekil 4.19.'da gösterildiği gibi yaklaşık 120° aÇı oluşturan parŐalara ayrılmıştır.

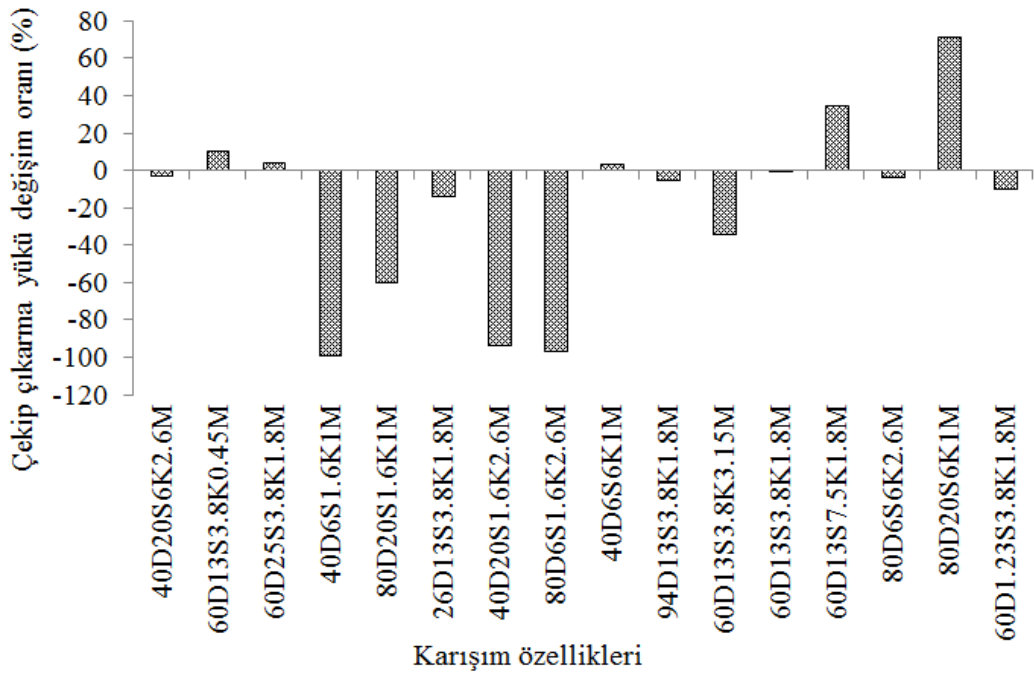
Çekip Çıkarma yükünün istatistiksel analizi ile belirlenen regresyon modeli ve ANOVA sonuÇları Çizelge 4.3'de verilmiştir. ANOVA sonuÇlarına göre numunelerin őkrip őkarma yükü üzerinde SC, SC², SM ve SM² istatistiksel olarak en anlamlı parametreler olup, sırasıyla 75, 12,2, 7.4 ve 1.2% oranlarında etkiye sahiptir. Şekil 4.20.'de kr sıcaklığındaki değişimin őkrip őkarma yükü üzerinde etkisi gösterilmiştir. Bu grafik oluşturulurken diğer Ő bağımsız değişken optimum seviyelerinde tutulmuştur. Şekil 4.20.'den aŐıkŐa görüleceği üzere kr sıcaklığının 40°C den 80°C'ye artırılması őkrip őkarma yükü üzerinde önemli bir değişim meydana getirmemiŐtir. Kr sıcaklığının őkrip őkarma yükü üzerinde istatistiksel olarak anlamlı ancak etkisinin ők düşük olduğu ANOVA sonuÇlarında da aŐıkŐa görülmektedir. Kr sıcaklığı őkrip őkarma yükü üzerinde ancak %0.1 etkiye sahiptir. Şekil 4.21.'de kr süresinin őkrip őkarma yükü üzerinde etkisi gösterilmiştir. Kr sıcaklığında olduğu gibi kr süresi de őkrip őkarma yükü üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olmasına rağmen etki oranı sadece %0.3 tür. Şekilde görüleceği üzere kr süresinin artırılması őkrip őkarma yükü değerlerinde belirgin bir değişime neden olmamıŐtır.

BasınÇ dayanımı yüksek olan karışımların őkrip őkarma yüklerinin de yüksek olduğu belirlenmiştir. BasınÇ dayanımı sodyum konsantrasyonu ile doğrudan ilişkili olduğundan sodyum konsantrasyonu arttıkÇa őkrip őkarma yükünün de arttığı Şekil 4.22.'de gösterilmiştir. Sodyum konsantrasyonu dışındaki bağımsız değişkenler (CT, TC ve SM) optimum değerlerinde iken sodyum konsantrasyonuna bağlı olarak őkrip őkarma yükünün 914 ile 6565 kg arasında değiştiği görülmektedir. TC, CT ve SC optimum değerlerinde iken silikat modülünün artması AAECB őkrip őkarma yükü üzerinde olumsuz etki meydana getirmiŐ ve silikat modülü arttıkÇa őkrip őkarma yükünün azaldığı Şekil 4.23.'de gösterilmiştir. Alkali aktivatörün silikat modülü karışımda kullanılan Na₂SiO₃ ile ilgili olduğundan silikat modülü arttıkÇa bağlayıcı fazda oluşan boşlukların artmasına bağlı olarak donatı ile beton arasındaki aderansın zayıfladığı dŐnlmektedir. Na₂SiO₃ ile aktive edilmiş GYFC'li harcın mikroyapısı

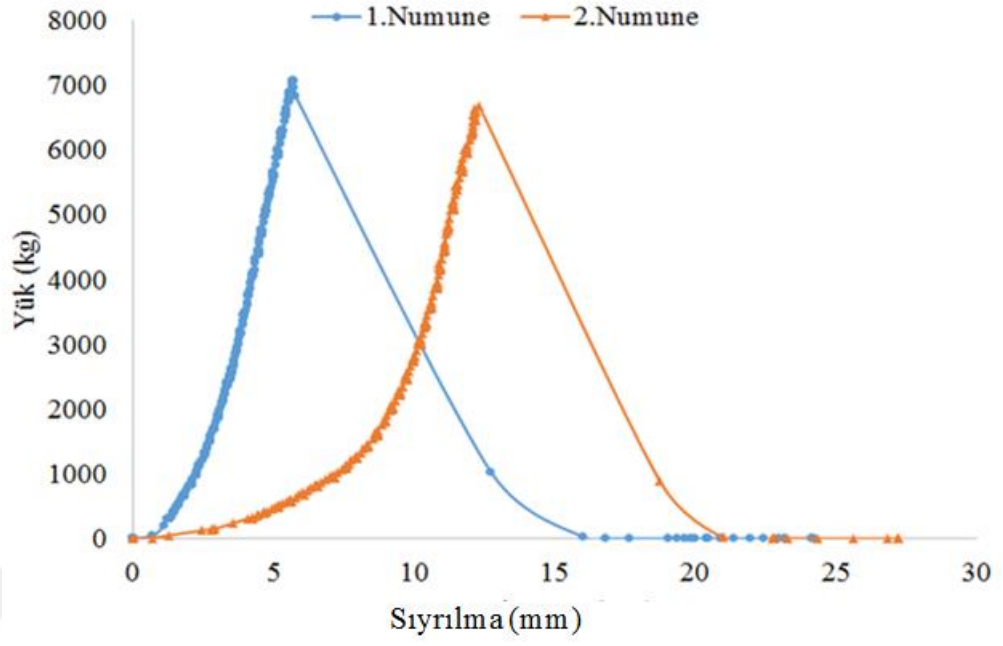
250 büyütme olarak incelendiğinde diğer aktivatörlerle aktive edilmiş ÖGYFC'li harçlara göre bağlayıcı fazda daha boşluklu bir yapının oluştuğu, agrega ile bağlayıcı faz arasındaki aderansın daha zayıf olduğu, 2000 büyütme mikroyapı incelendiğinde ise mikro yapıdaki boşluk ve çatlak oluşumlarının daha belirgin bir şekilde görülebildiği belirtilmiştir (Topçu ve ark., 2009).



Şekil 4.16. AAECB ve kontrol numunelerinin çekip çıkarma yükleri



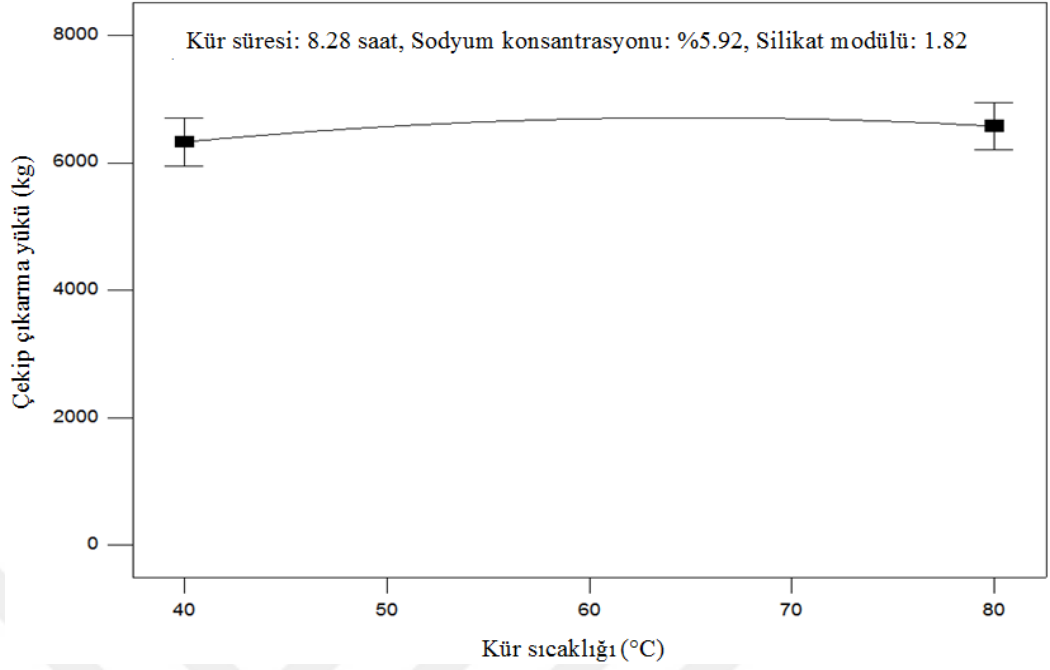
Şekil 4.17. AAECB numunelerin kontrol numunelerine göre çekip çıkarma yükü oranı



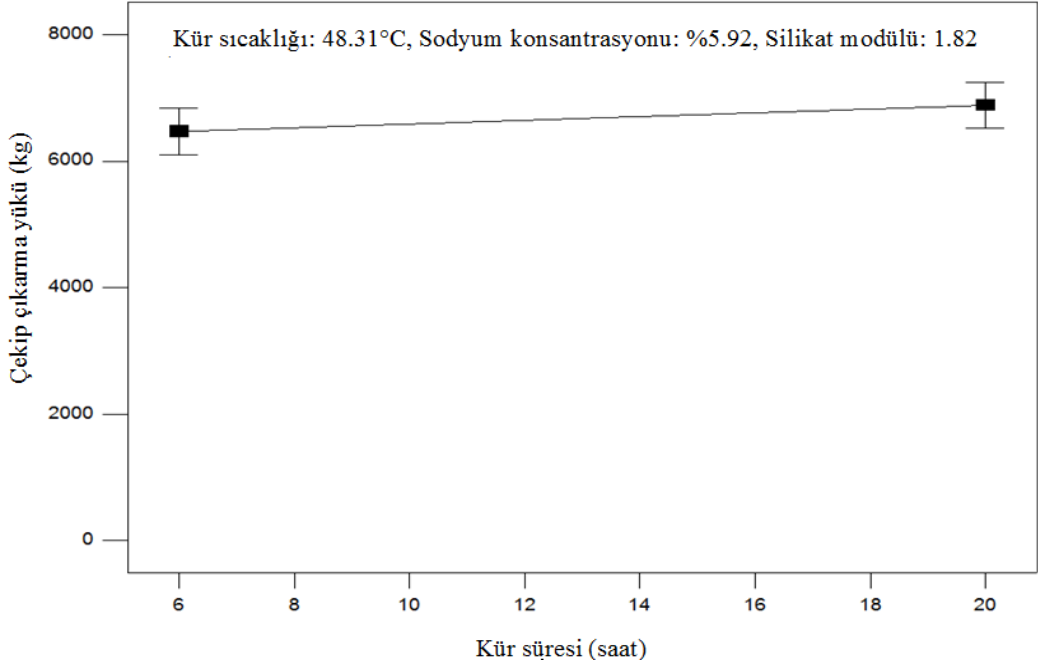
Şekil 4.18. K14 (60D13S7.5K1.8M) numunesine ait yük-sıyrılma grafiği



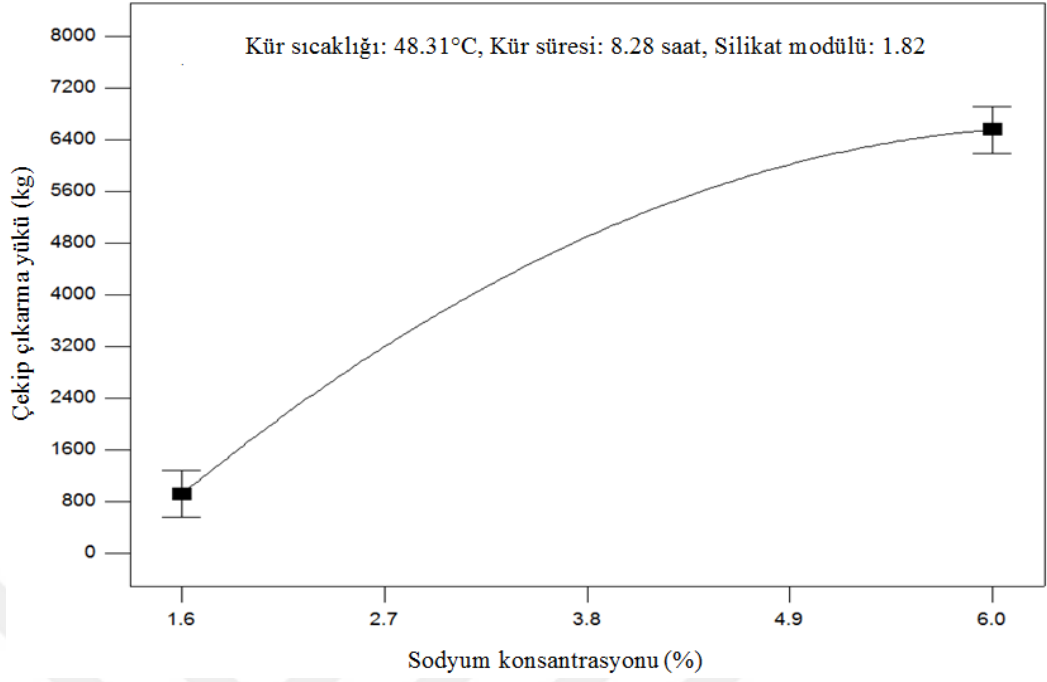
Şekil 4.19. AAECB donatı çekip çıkarıldıktan sonra kırılma şekli



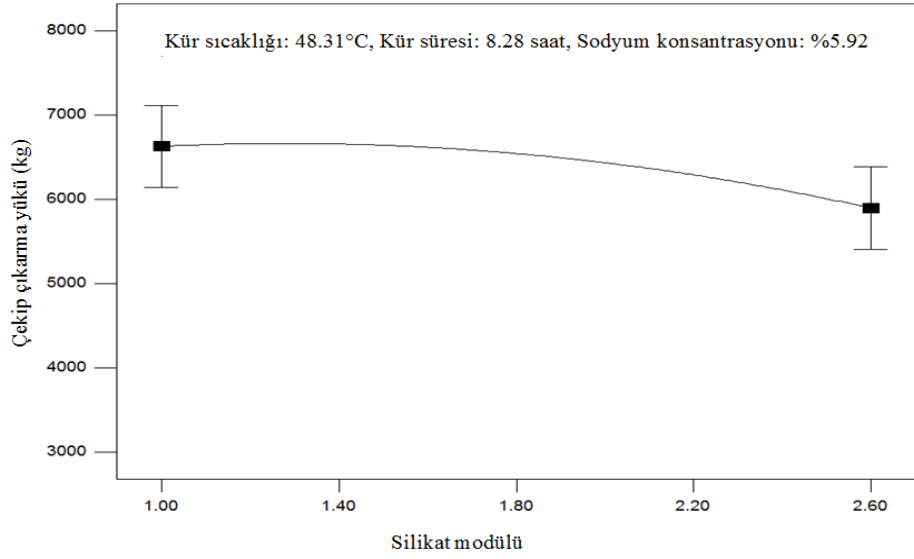
Şekil 4.20. Kır sıcaklığının çekip çıkarma yüküne etkisi



Şekil 4.21. Kır süresinin çekip çıkarma yüküne etkisi



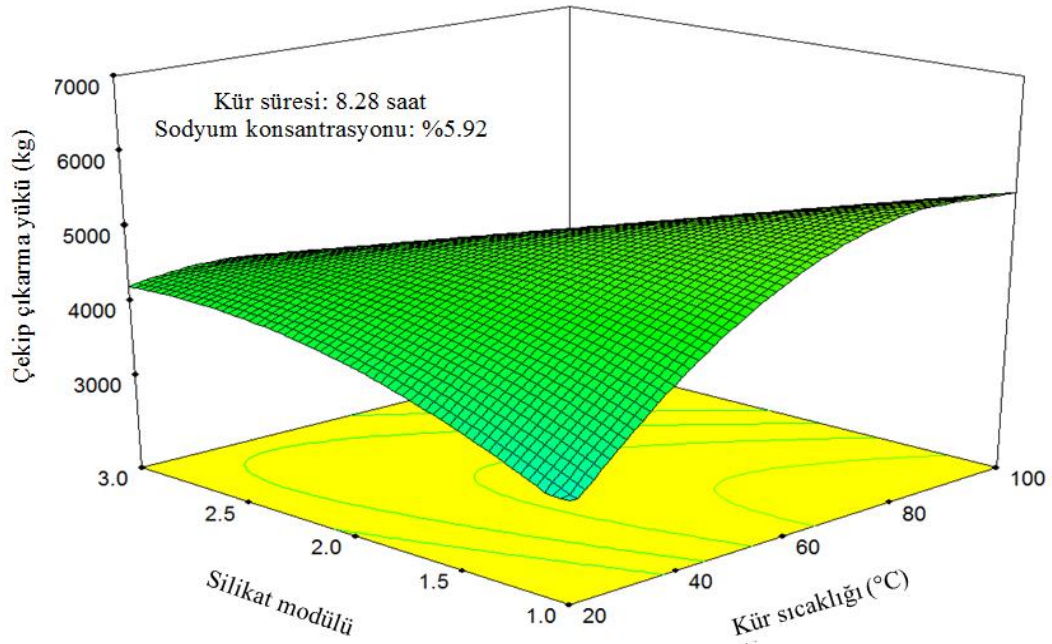
Şekil 4.22. Sodyum konsantrasyonunun çekip çıkarma yüküne etkisi



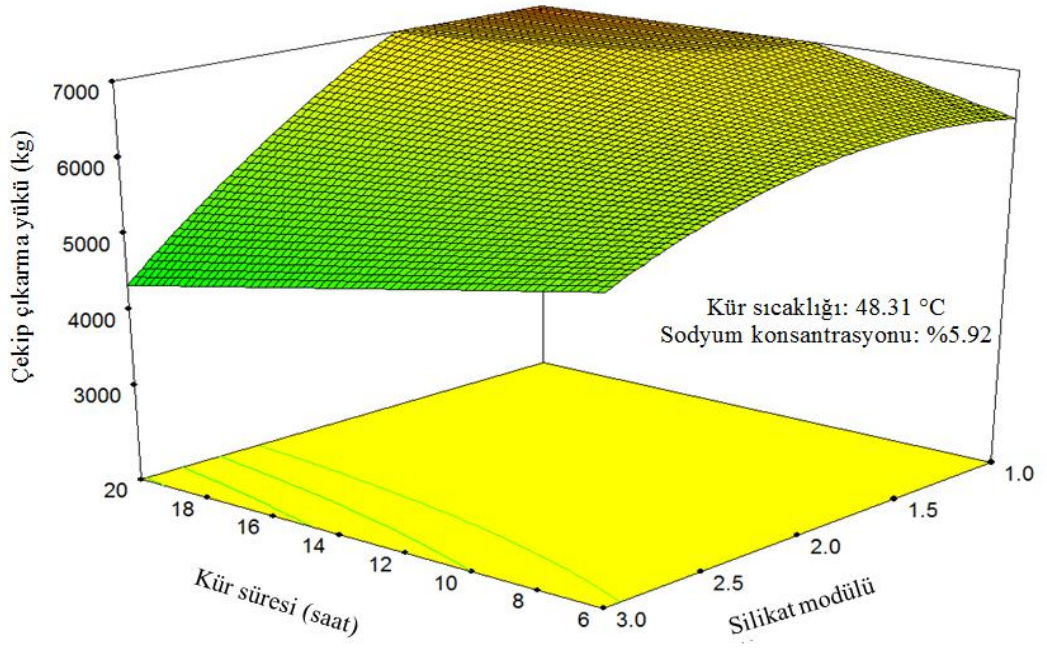
Şekil 4.23. Silikat modülünün çekip çıkarma yüküne etkisi

Çekip çıkarma yükü üzerinde istatistiksel olarak anlamlı ikili etkileşim parametrelerinin etkileri Şekil 4.24-26. ve 4.28'de gösterilmiştir. İkili etkileşim parametrelerinin çekip çıkarma yükü üzerinde etkileri gösterilirken etkisi araştırılmayan diğer iki bağımsız değişken optimizasyon çalışması ile bulunan optimum değerlerinde sabit tutulmuştur. Şekil 4.24.'de SM-CT ikili etkileşiminin çekip çıkarma yükü üzerinde etkisi görülmektedir. Kır sıcaklığı ve silikat modülünün birlikte artmasının çekip

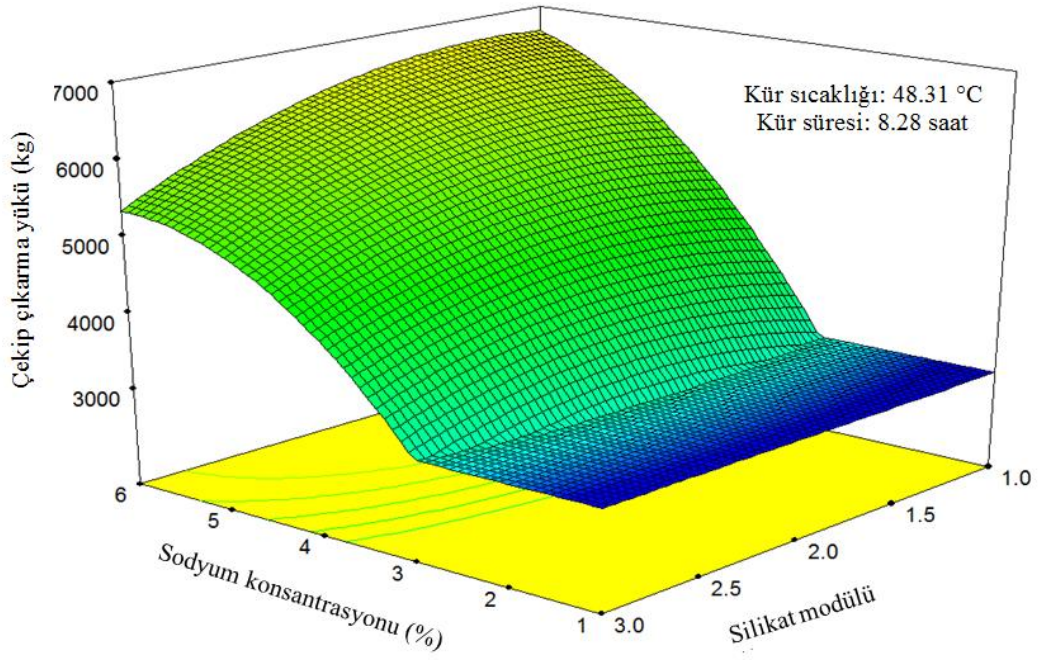
çıkarma yükü üzerinde olumsuz etkiye sahip olduğu, düşük silikat modülleriyle ancak yüksek sıcaklık kürüne maruz bırakılarak üretilen numunelerin çekip çıkarma yüklerinin yüksek olduğu görülmüştür. Varyans analizi sonuçlarına göre TC-SM ikili etkileşim parametresinin çekip çıkarma yükü üzerinde %1 etkiye sahip olduğu Tablo 4.3’de verilmiştir. Şekil 4.25.’de TC-SM ikili etkileşim parametresinin çekip çıkarma yükü üzerinde etkisi görülmektedir, şekilden görüleceği üzere SM ve TC parametrelerinin birlikte artması ile çekip çıkarma yükünde azalma meydana gelmektedir. Kür şartları optimum değerlerinde sabit tutulup SC-SM ikili etkileşim parametresinin çekip çıkarma yükü üzerindeki etkisi Şekil 4.26.’da gösterilmiştir. Şekilden açıkça görüleceği üzere, sodyum konsantrasyonundaki artış çekip çıkarma değerlerini 917 kg dan 5903 kg artırmıştır. AAECB basınç dayanımı ile çekip çıkarma yükü arasında logaritmik fonksiyon ile ifade edilen bir ilişki bulunduğu ve basınç dayanımı ile çekip çıkarma yükü arasındaki korelasyon katsayısının 0.83 olduğu Şekil 4.27.’de grafik üzerinde görülmektedir.



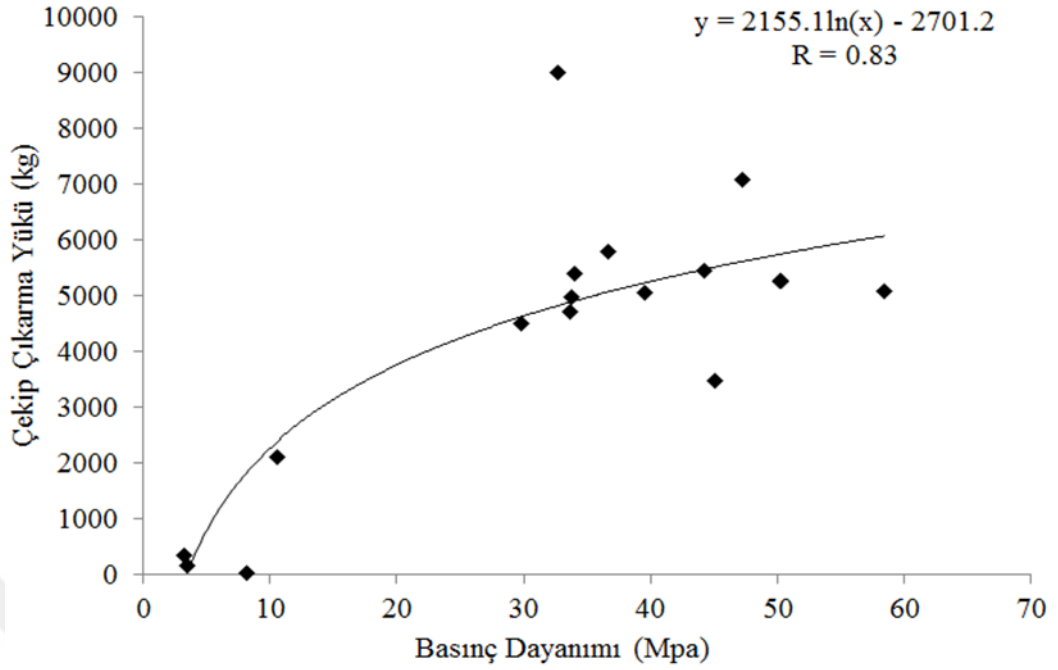
Şekil 4.24. Silikat modülü-kür sıcaklığı değişiminin çekip çıkarma yüküne etkisi



Şekil 4.25. Kür süresi-silikat modülü değişiminin çekip çıkarma yüküne etkisi



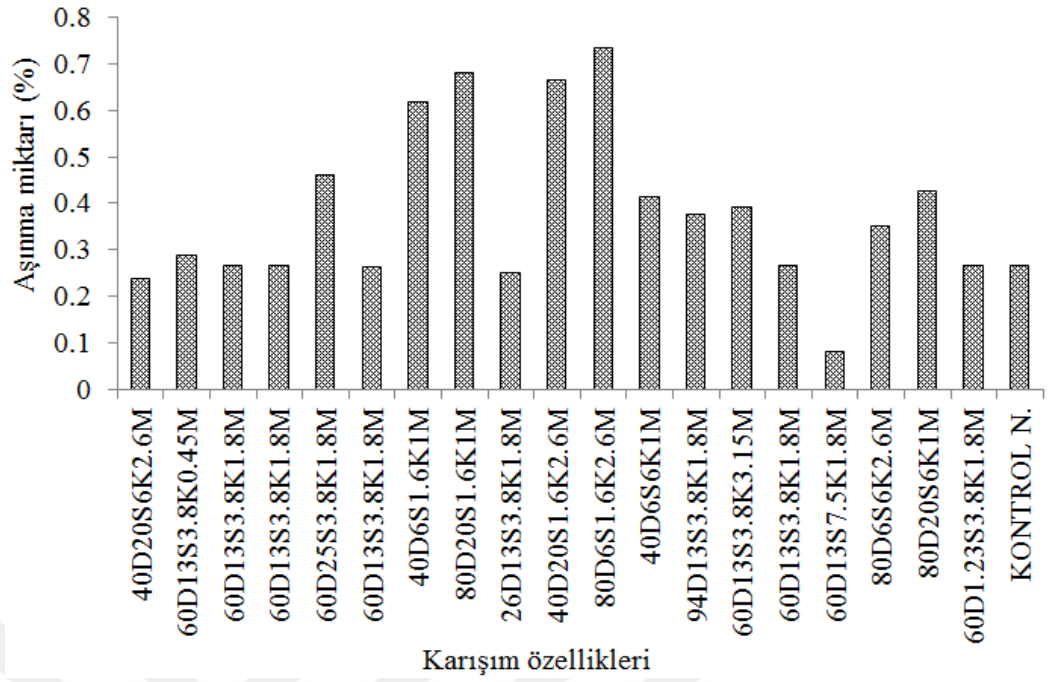
Şekil 4.26. Sodyum konsantrasyonu-silikat modülü değişiminin çekip çıkarma yüküne etkisi



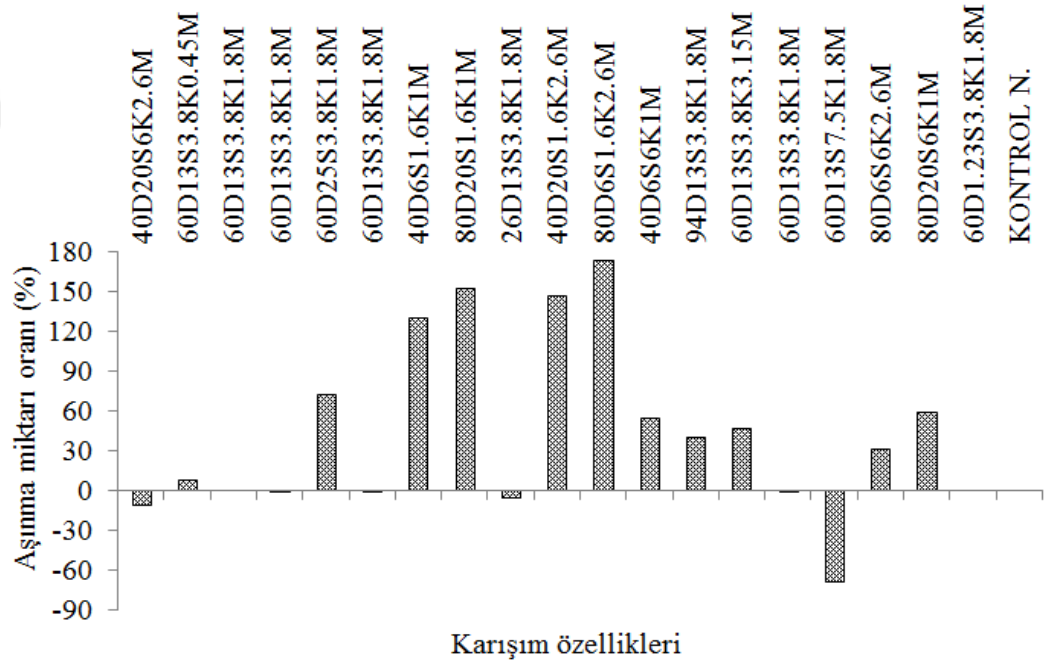
Şekil 4.27. AAECB basınç dayanımı-çekip çıkarma yükü arasındaki ilişki

4.7. Aşınma

AAECB ve PÇ kontrol karışımlarının aşınmaya karşı dirençleri aşınan kütle oranı ile belirlenmiştir. Deney sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. AAECB ve Portland çimentolu kontrol numunelerinin aşınma miktarları ve kontrol numunesine göre aşınma miktarı değişimi Şekil 4.28. ve Şekil 4.29.’da gösterilmiştir. K18 (80D6S1.6K2.6M) numunesinin kontrol numunesine göre %160 daha fazla aşındığı K14 (60D13S7.5K1.8M) numunesinin ise %70 daha az aşındığı belirlenmiştir Sodyum konsantrasyonu değişimine bağlı aşınma miktarında meydana gelen değişim Şekil 4.30.’da gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere karışımın sodyum konsantrasyonu arttıkça AAECB aşınma miktarında azalma meydana gelmiştir. Varyans analizi sonuçları ve regresyon modeli incelendiğinde AAECB aşınma miktarı üzerinde istatistiksel olarak sadece sodyum konsantrasyonu ve karesel etkisinin etkin olduğu görülmektedir. Sodyum konsantrasyonunda meydana gelen değişim aşınma miktarı üzerinde %80.6 oranında etkilidir. Sodyum konsantrasyonu arttıkça daha kompakt bir yapı oluşmakta ve basınç dayanımı artmakta ve dolayısıyla aşınma direnci artmaktadır.



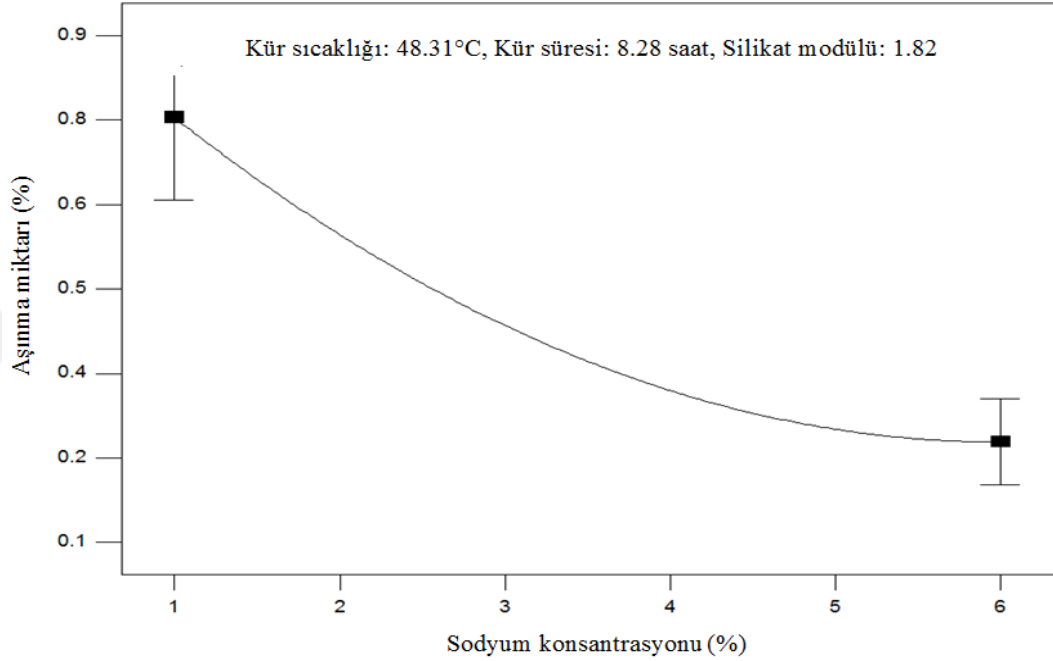
Şekil 4.28. AAECB ve kontrol numunelerinin aşınma miktarları



Şekil 4.29. AAECB numunelerin kontrol numunelerine göre aşınma miktarı oranı

Aşınma ile basınç dayanımı arasında ters orantılı bir ilişkinin olduğu bilinmektedir. Alyamaç ve Aydın (2015), basınç dayanımı ile aşınma direnci arasında lineer bir ilişki olduğunu, basınç dayanımı yüksek olan betonların aşınma direncinin de yüksek

olduğunu belirtmişlerdir. Yuksel ve ark. (2007), aşınma miktarının boşluk oranı ve aşındırma diski ile temas eden yüzey ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Betondaki boşluk miktarı arttıkça diskle temas eden beton yüzey alanı azalacağından, aşınmanın daha hızlı ve fazla olacağını ifade etmişlerdir.

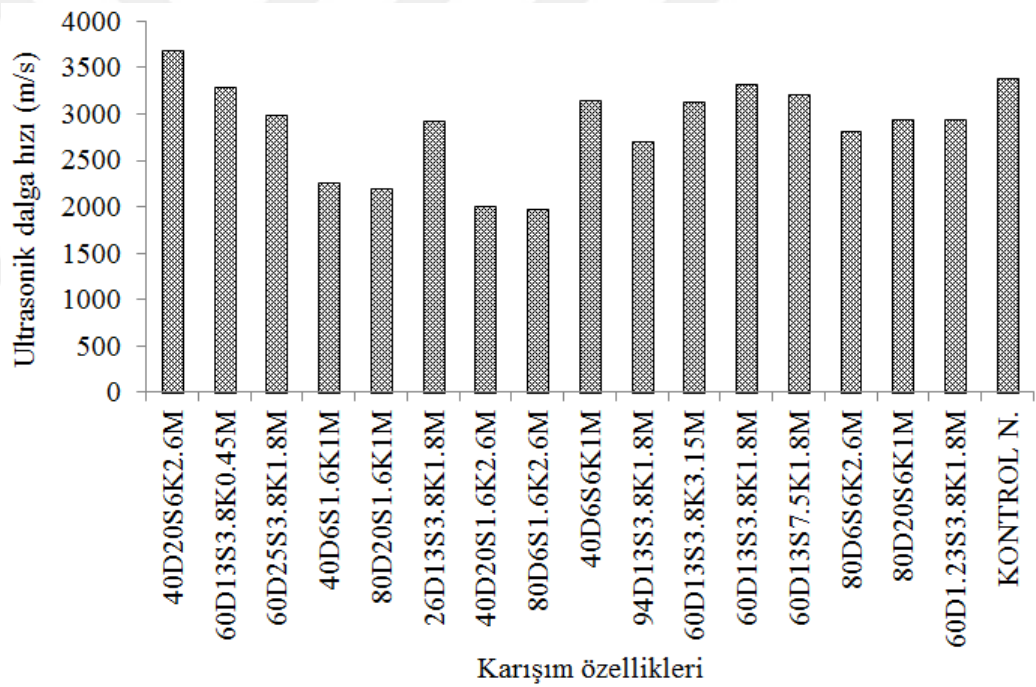


Şekil 4.30. Sodyum konsantrasyonunun aşınma miktarına etkisi

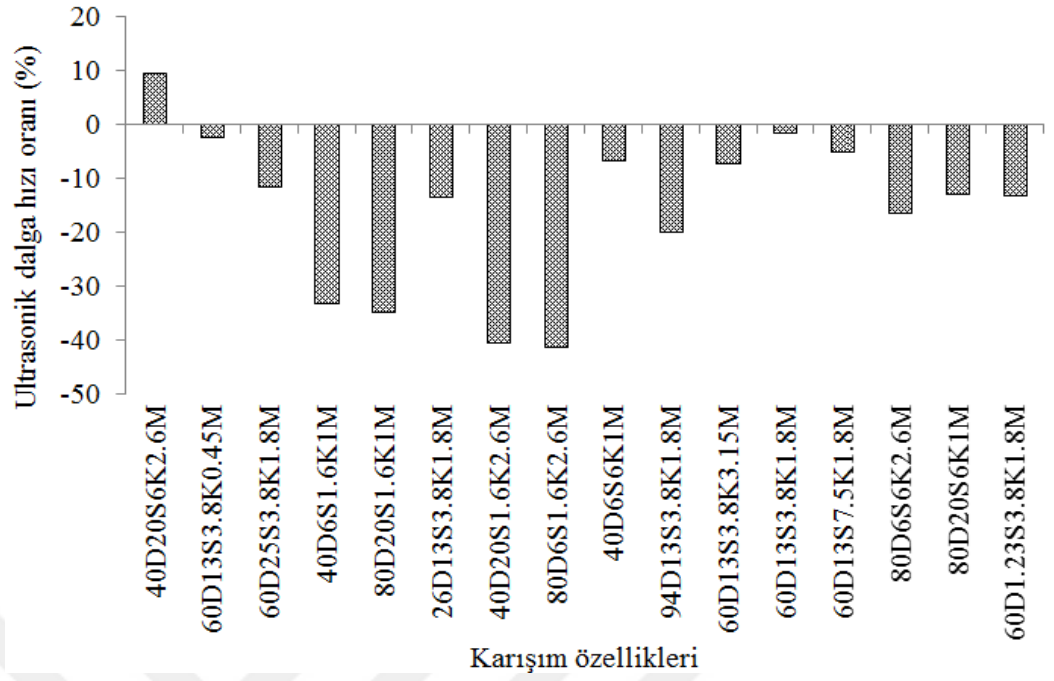
4.8. Ultrasonik Dalga Hızı

AAECB ve PÇ kontrol karışımlarının ultrasonik dalga hızları Çizelge 4.1'de verilmiştir. AAECB ve PÇ kontrol numunelerinin ultrasonik dalga hızları ve kontrol numunesine göre ultrasonik dalga hızı değişimleri Şekil 4.31. ve Şekil 4.32.'de gösterilmiştir. AAECB ultrasonik dalga hızının kontrol betonlarına göre %2 (K6) ile %41 (K18) arasında daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durumun betonda oluşan rötre çatlakları ve içyapıdaki boşluklardan ileri geldiği düşünülmektedir. AAECB ultrasonik dalga hızını etkileyen bağımsız değişkenlerin (CT, TC, SC ve SM) tekli etkileri Şekil 4.33-4.36'da gösterilmiştir. Çizelge 4.3'de görüleceği üzere ANOVA sonuçları numunelerin ultrasonik dalga hızı iletme özelliği için en etkili parametrenin sodyum konsantrasyonu olduğunu göstermektedir. Çizelge 4.3'de verilen ANOVA sonuçlarına göre CT-SC, CT-SM, TC-SC, TC-SM ve SC-SM ikili etkileşimlerinin

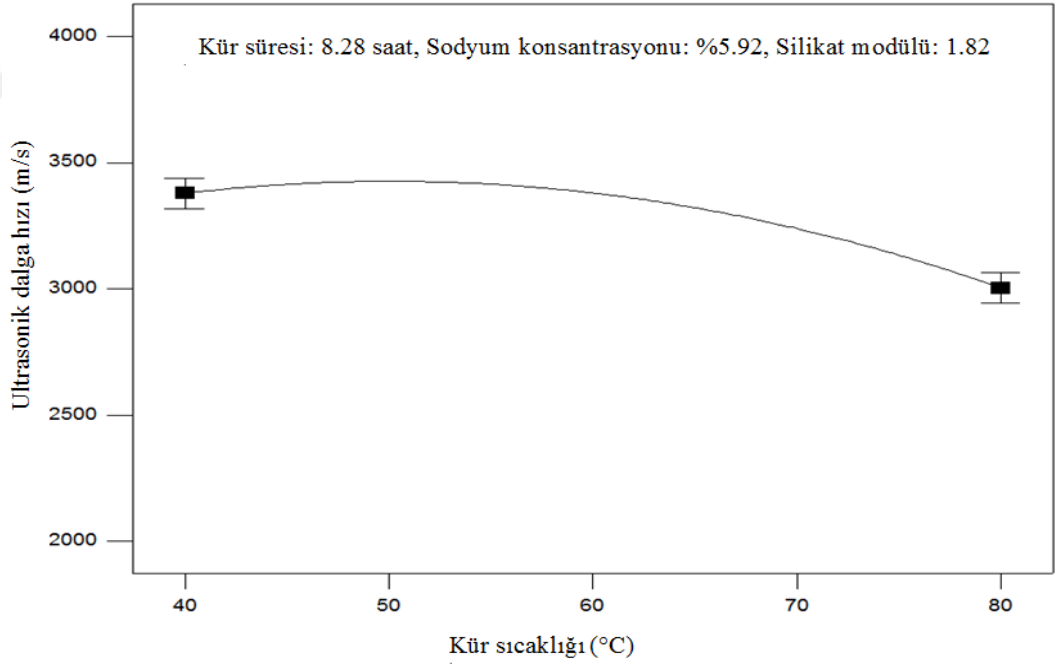
ultrasonik dalga hızını etkileyen parametreler olduğu görülmektedir. Şekil 4.37., Şekil 4.39. ve Şekil 4.41.'de sodyum konsantrasyonunun optimum kür sıcaklığı, kür süresi ve silikat modülü ile ultrasonik dalga hızına etkisi gösterilmiştir. Aktivasyon çözeltisindeki sodyum konsantrasyonu arttıkça daha yoğun bir mikroyapı elde edildiği ve buna bağlı olarak boşluk miktarının azalmasıyla ultrasonik dalga hızının arttığı düşünülmektedir. Wang ve ark. (2015), alkali çözelti oranı %0.5 ile %1.5 arasında iken 28 günlük AAECB ultrasonik dalga hızlarının 2187-4024 m/s olduğunu belirtmişlerdir. Alkali konsantrasyonu arttıkça bünyedeki fazla suyun uzaklaştığını, yapının sertleştiğini ve buna bağlı olarak boşluk miktarının azaldığını belirtmişlerdir. Şekil 4.38. ve Şekil 4.40.'da diğer bağımsız değişkenler optimum seviyelerinde sabit tutularak SM-CT ve SM-TC'nin ultrasonik dalga hızı üzerindeki ikili etkileşimleri gösterilmiştir.



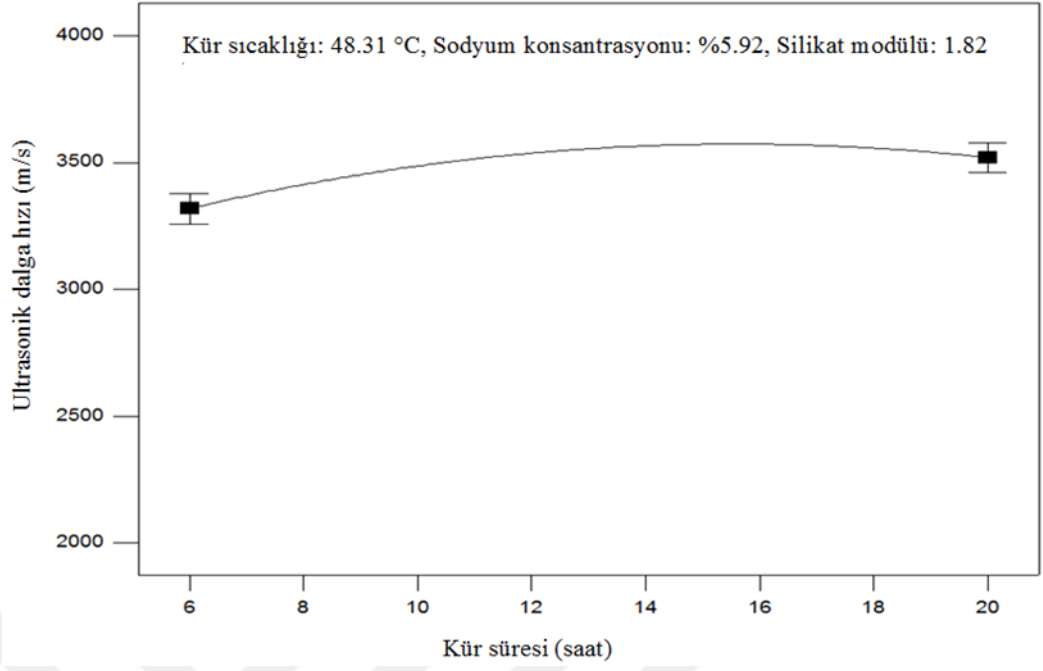
Şekil 4.31. AAECB ve kontrol numunelerinin ultrasonik dalga hızları



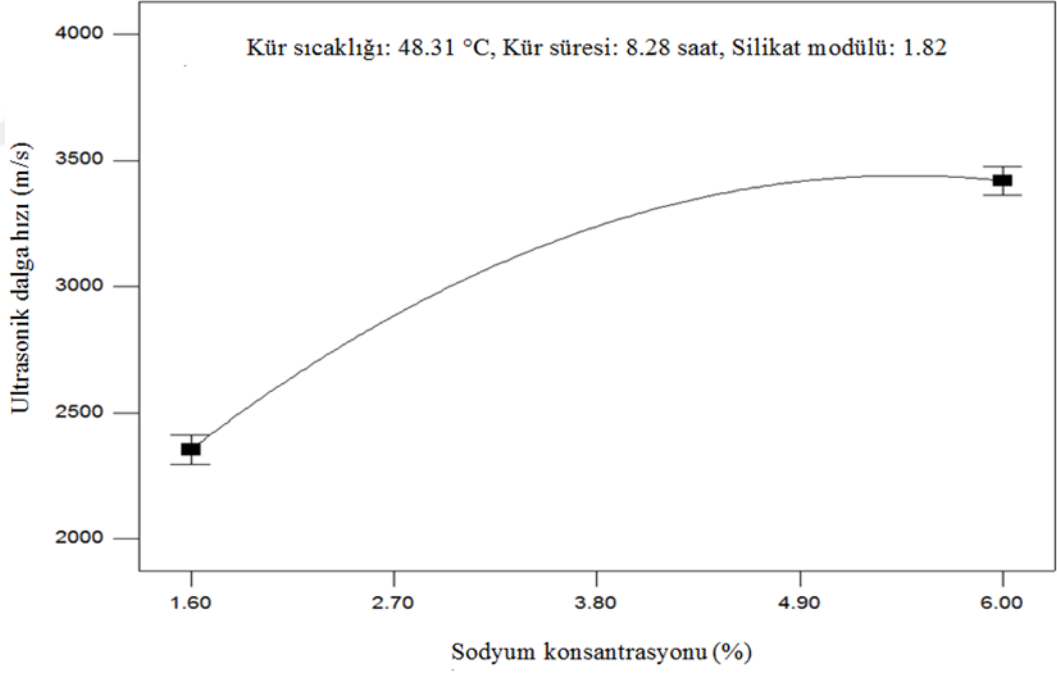
Şekil 4.32. AAECB numunelerin kontrol numunelerine göre ultrasonik dalga hızı oranı



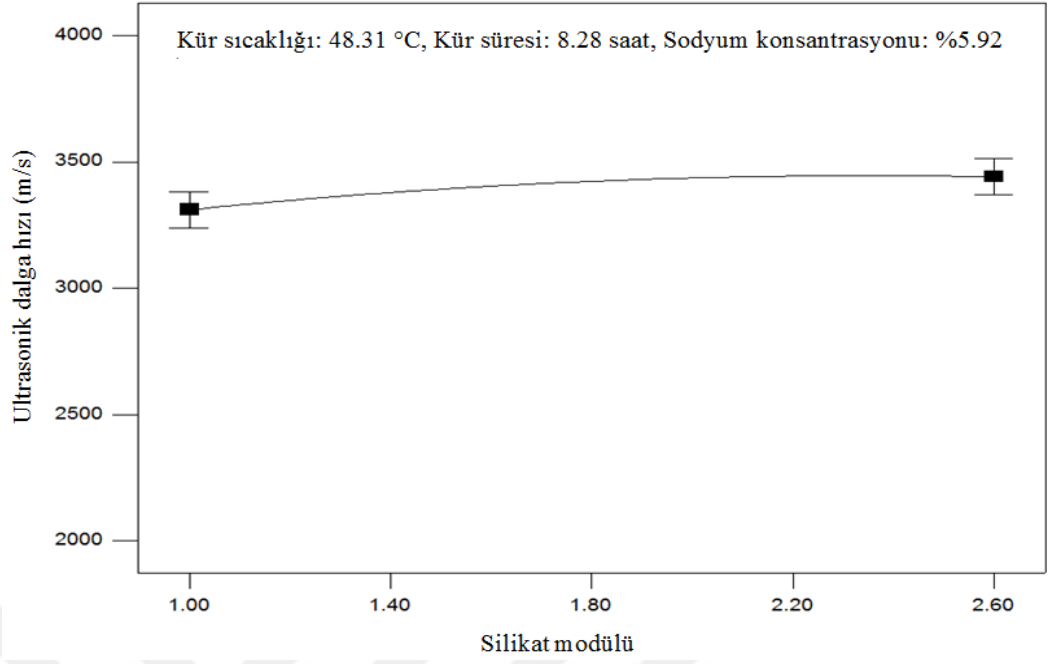
Şekil 4.33. Kür sıcaklığının ultrasonik dalga hızına etkisi



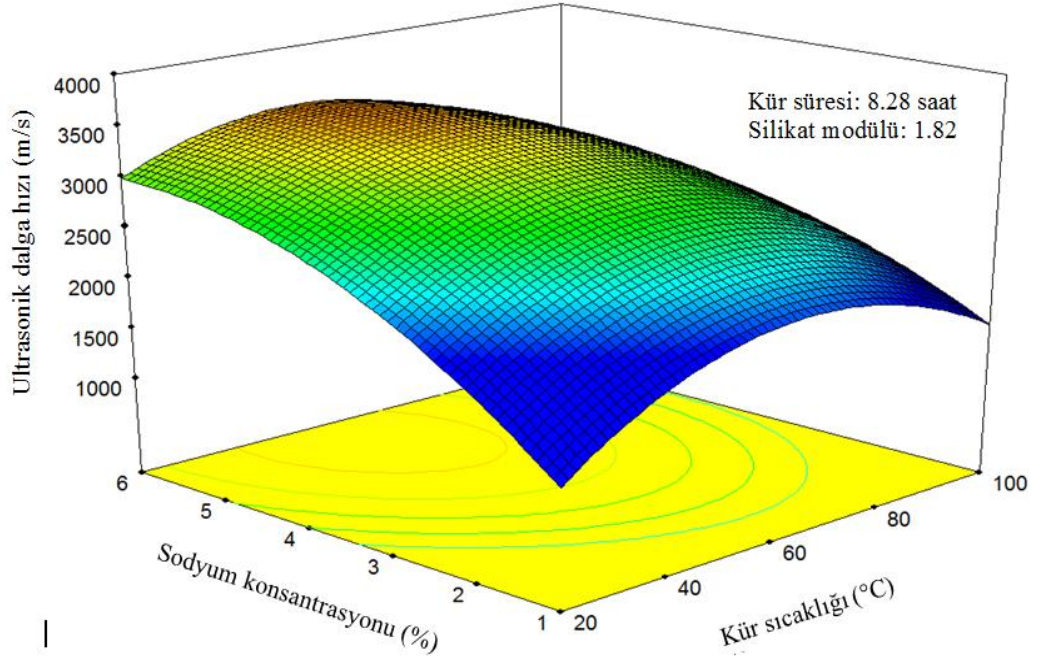
Şekil 4.34. Kür süresinin ultrasonik dalga hızına etkisi



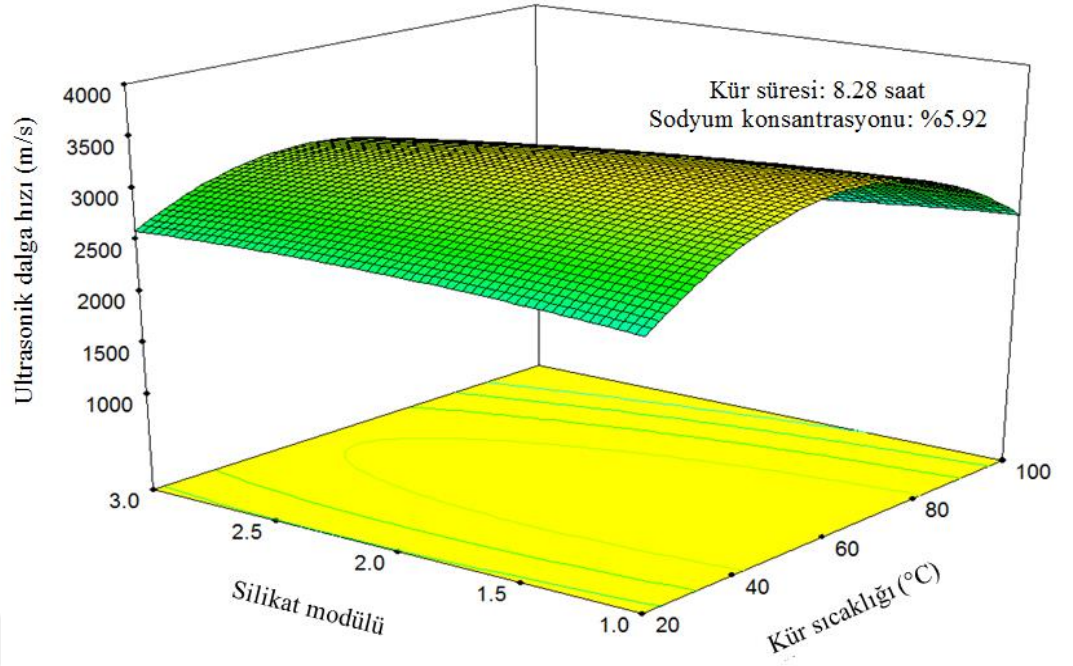
Şekil 4.35. Sodyum konsantrasyonunun ultrasonik dalga hızına etkisi



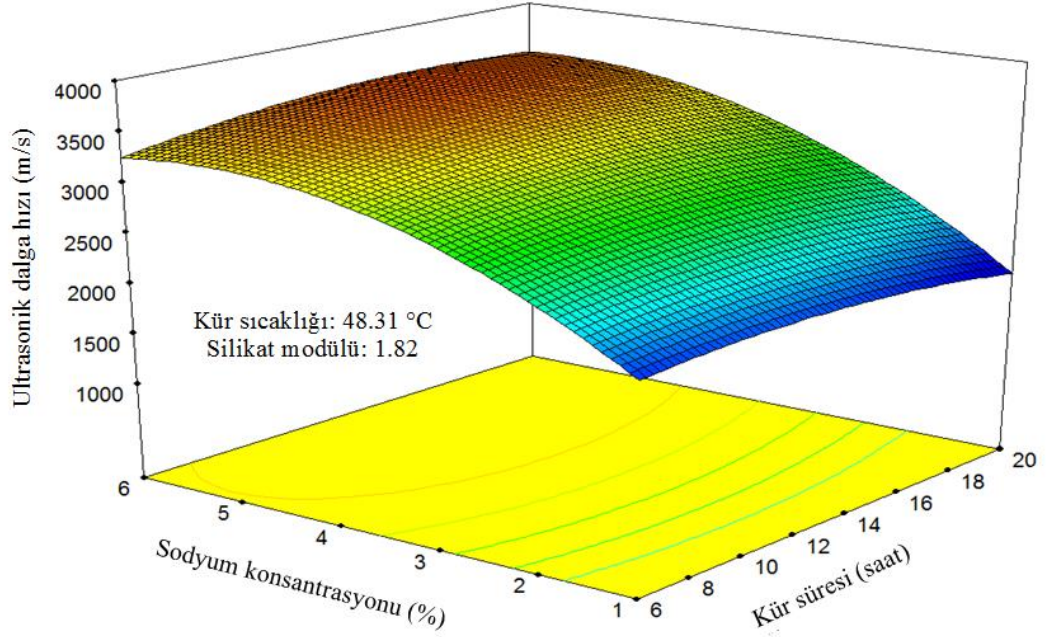
Şekil 4.36. Silikat modülünün ultrasonik dalga hızına etkisi



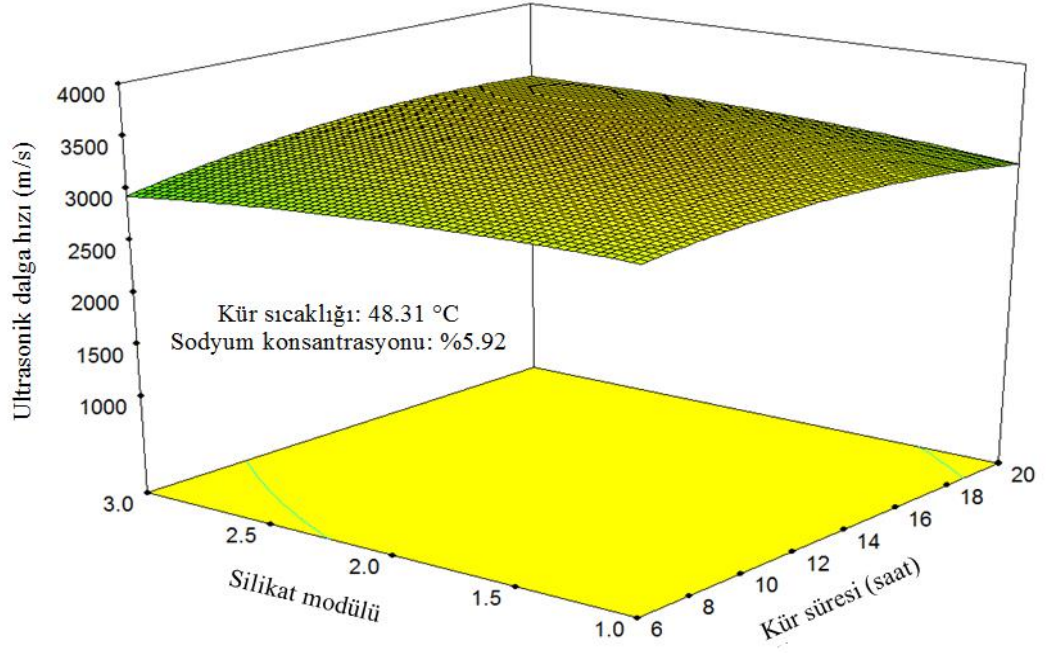
Şekil 4.37. Sodyum konsantrasyonu-kür sıcaklığının ultrasonik dalga hızına etkisi



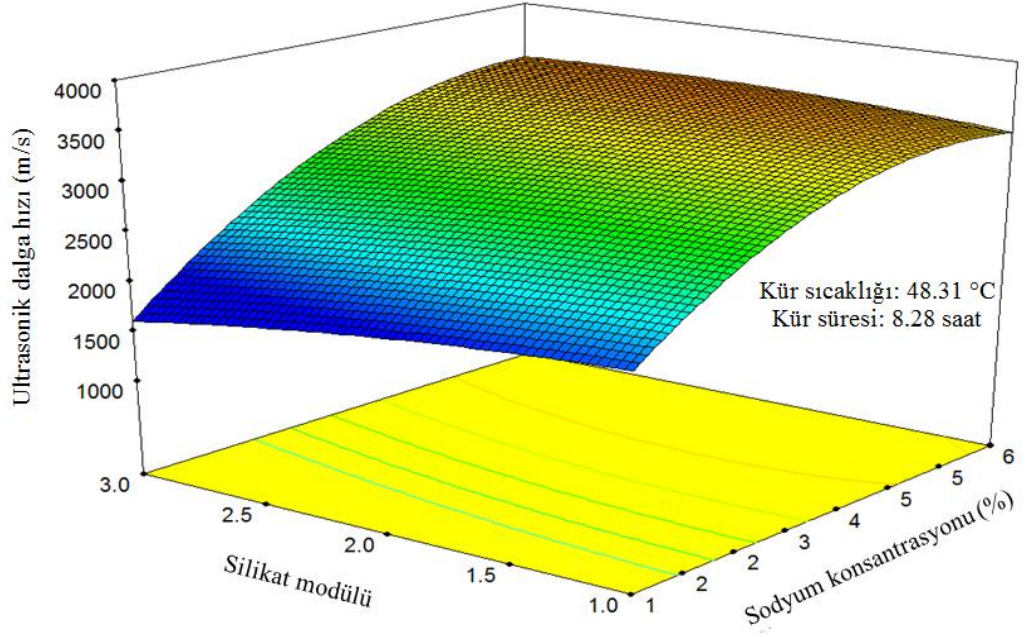
Şekil 4.38. Silikat modülü-kür sıcaklığının ultrasonik dalga hızına etkisi



Şekil 4.39. Sodyum konsantrasyonu-kür süresinin ultrasonik dalga hızına etkisi



Şekil 4.40. Silikat modülü-kür süresinin ultrasonik dalga hızına etkisi

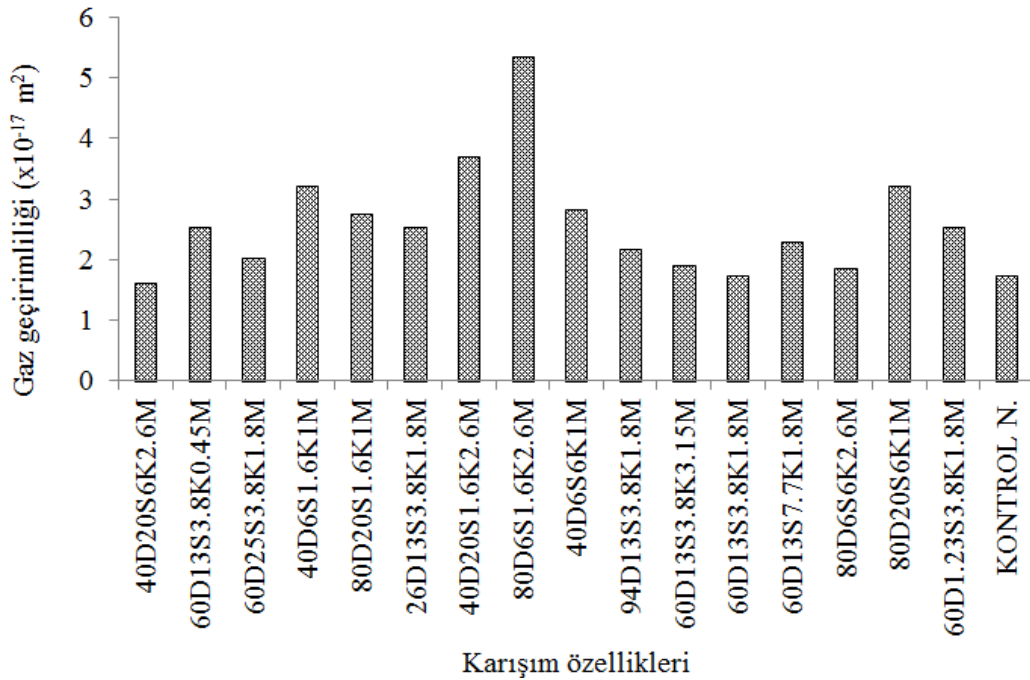


Şekil 4.41. Silikat modülü-sodyum konsantrasyonunun ultrasonik dalga hızına etkisi

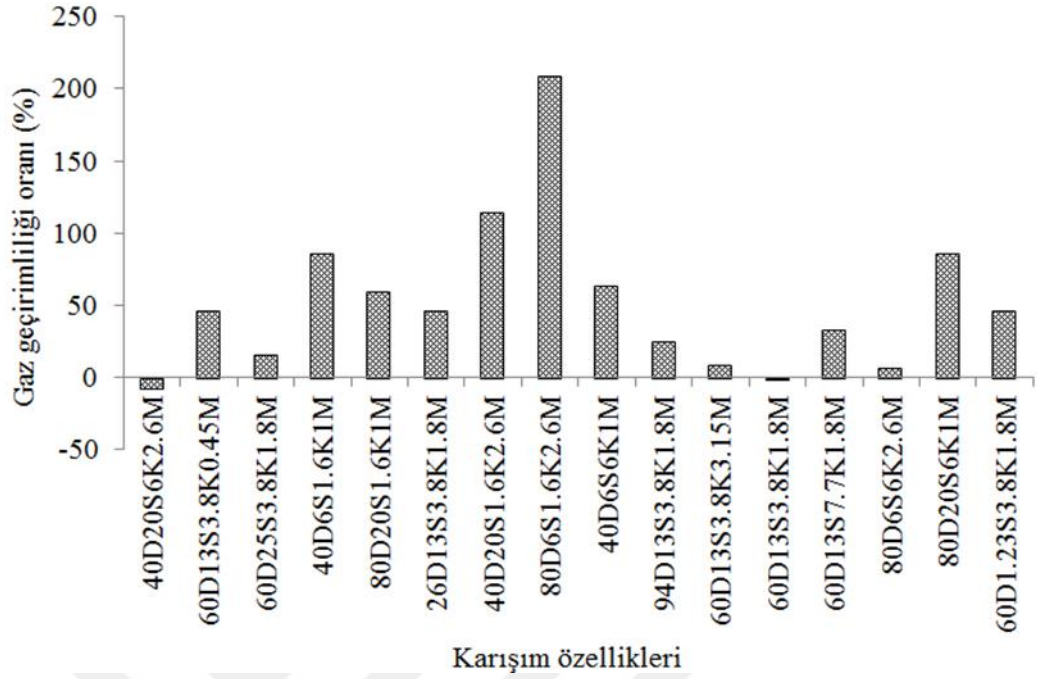
4.9. Gaz Geçirimsizliği

AAECB ve PÇ numunelerinin gaz geçirimsizlikleri üç numune test edilerek belirlenmiş ve Çizelge 4.2’de verilmiştir. AAECB gaz geçirimsizlikleri 1.59×10^{-17} ile 5.33×10^{-17} m² arasında değişmiştir. AAECB ve PÇ numunelerinin gaz geçirimsizlik katsayıları ve kontrol numunesine göre gaz geçirimsizlik katsayısı oranı Şekil 4.42. ve Şekil 4.43.’de gösterilmiştir. AAECB meydana gelen çatlaklar nedeniyle gaz geçirimsizliğinin kontrol numunesine göre %209’a varan oranlarda daha yüksek olduğu Şekil 4.43.’de gösterilmiştir. Yıldırım ve ark. (2015), 50 µm ile 100 µm arasında kontrollü çatlak oluşturulan betonların gaz geçirimsizliklerinin, çatlak olmayan betonlara göre 50 ile 100 kat daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Çizelge 4.3’de verilen ANOVA sonuçlarına göre TC, SM, SC’nin AAECB gaz geçirimsizliği üzerinde etkili olan faktörler olduğu görülmektedir. En etkili olan parametrenin ultrasonik dalga hızında olduğu gibi %27 oranda sodyum konsantrasyonu ve karesel etkisinin %21.7 ve %24.6 oranında SC-SM etkileşimi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca CT-TC, TC-SC, SM-SC gibi ikili etkileşimlerinde etkisinin olduğu belirlenmiştir. AAECB basınç dayanımları ile gaz geçirimsizliği arasındaki ilişki de bu durumu desteklemektedir. Daha önce de belirtildiği gibi sodyum konsantrasyonu arttıkça ÖGYFC’nin silikat anyonları ile sodyum silikatın katyon iyonları silika jeli oluşturarak basınç dayanımını artırmaktadır. Oluşan bu silika jelinin ÖGYFC’nin kalsiyum iyonları ile reaksiyona girmesiyle silika oranı zengin olan kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jelleri oluşmakta ve boşluk miktarı ve dolayısıyla gaz geçirimsizliği azalmaktadır. AAECB kür sıcaklığına bağlı gaz geçirimsizliği değişimleri Şekil 4.44.’de gösterilmiştir. Kür sıcaklığının az veya çok olması aktivasyon olayını ve gaz geçirimsizliğini etkilemektedir. Görüleceği üzere diğer bağımsız değişkenler optimum düzeyde tutulduğunda 55 °C kür sıcaklığı uygulanması ile gaz geçirimsizliği en aza inmektedir. Kür sıcaklığının artmasıyla oluşan boşluk miktarına bağlı olarak gaz geçirimsizliğinin de arttığı görülmektedir. Kür süresi arttıkça sıcaklığa maruz kalınan süresinin artmasına bağlı olarak içyapıda boşluk miktarının arttığı düşünülmektedir. Kür süresinin artmasıyla gaz geçirimsizliğinin de arttığı Şekil 4.45.’de gösterilmiştir. Alkali aktivatörlerin (SC ve SM) gaz geçirimsizliği üzerinde geçirimsizliği azaltıcı yönde etkilerinin olduğu Şekil 4.46.’dan anlaşılmaktadır. Sodyum konsantrasyonunun %1’den %6’ya yükselmesiyle gaz geçirimsizliğinin %65’e varan oranlarda azaldığı gösterilmiştir.

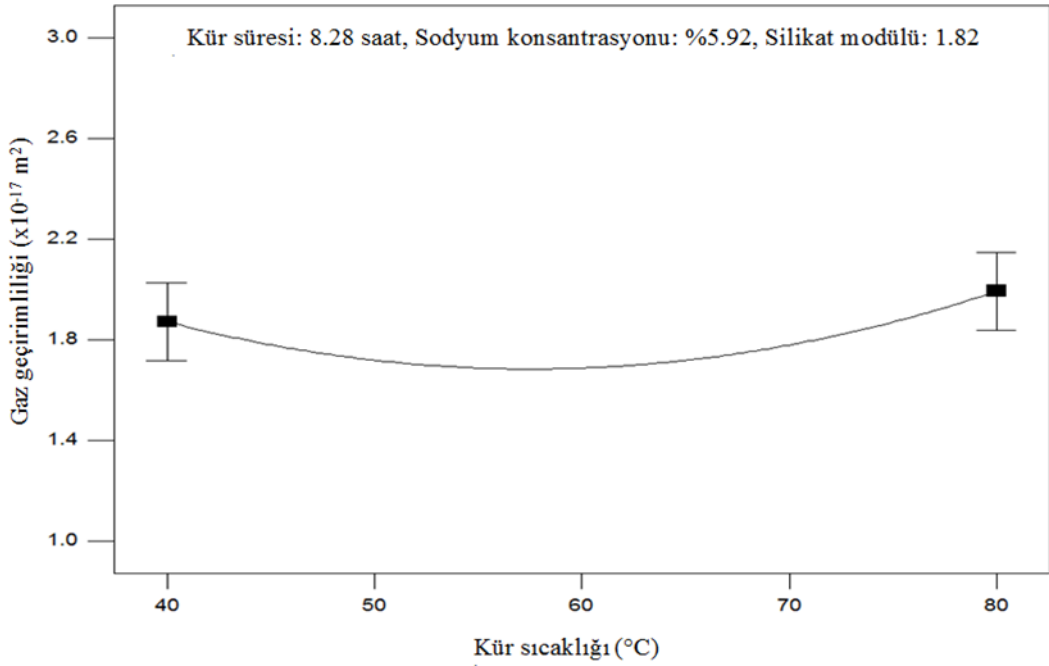
Diğer bağımsız değişkenler optimum seviyelerinde iken silikat modülünün 1’den 2.6’ya yükselmesiyle gaz geçirimsizliğinin %50 azaldığı Şekil 4.47.’de gösterilmiştir. CT-TC etkileşiminin AAECB gaz geçirimsizliğine etkisi Şekil 4.48.’de görülmektedir. CT ve TC’nin aynı anda artmasıyla betonun boşluk miktarının artması nedeni ile AAECB gaz geçirimsizliğinin arttığı düşünülmektedir. Kür sıcaklığının mekanik ve durabilite özelliklerini 80 °C’ye kadar özellikle erken yaşlarda iyileştirdiği literatürde belirtilmiştir (Bakharev ve ark., 1999; Altan ve Erdoğan, 2012). Şekil 4.49.’da diğer parametreler optimum seviyelerinde iken sodyum konsantrasyonu artışına bağlı olarak gaz geçirimsizliğinin azaldığı ve kür süresinin ciddi bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Silikat modülünün artmasıyla içyapıda meydana gelen boşluklar nedeniyle gaz geçirimsizliğinin de arttığı düşünülmüş ve Şekil 4.50.ile bu düşünce desteklenmiştir. Alkali aktivatörlerin silikat modülü en yüksek, sodyum konsantrasyonu en düşük oranda iken gaz geçirimsizliğinin arttığı belirlenmiştir. Sadece silikat modülünün artmasıyla dayanımda azalma ve gaz geçirimsizliğinde artışların olduğu bilinmektedir. Ancak Şekil 4.51.’de görüleceği üzere SC ve SM’nin birlikte artış göstermesi gaz geçirimsizliğini azaltıcı yönde etki yapmıştır. Gaz geçirimsizliği beton bünyesindeki boşluk miktarı azaldıkça azalmaktadır. Boşluk miktarının azalmasına bağlı olarak basınç dayanımı ile arasında ters ilişki bulunduğu Şekil 4.52.’de gösterilmiştir.



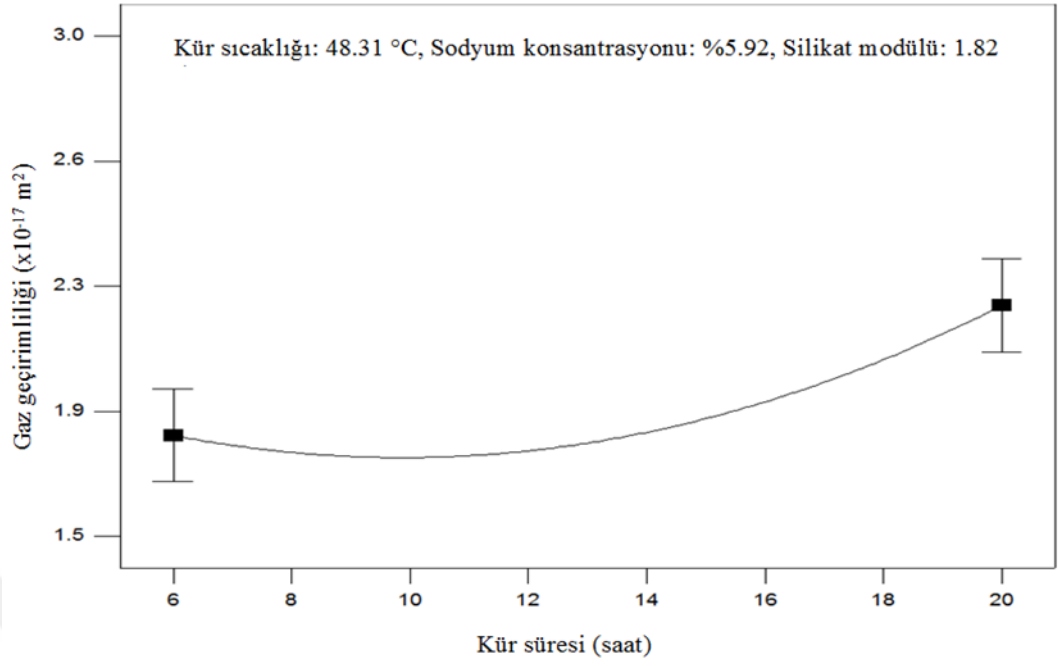
Şekil 4.42. AAECB ve kontrol numunelerinin gaz geçirimsizlik katsayıları



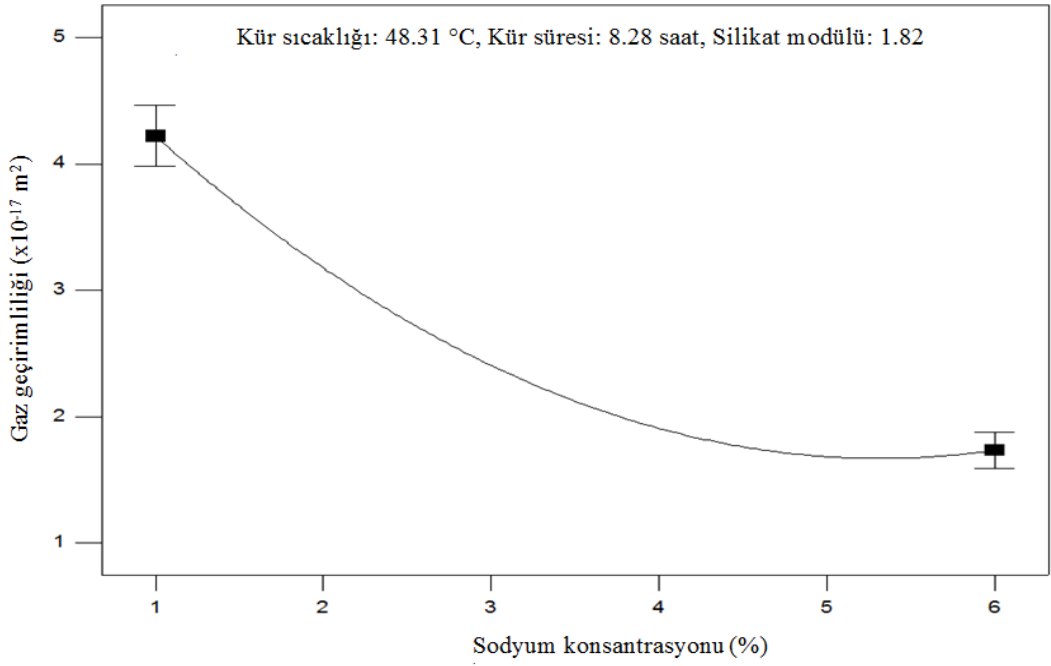
Şekil 4.43. AAECB numunelerinin kontrol numunelerine göre gaz geçirimsizlik katsayısı oranı



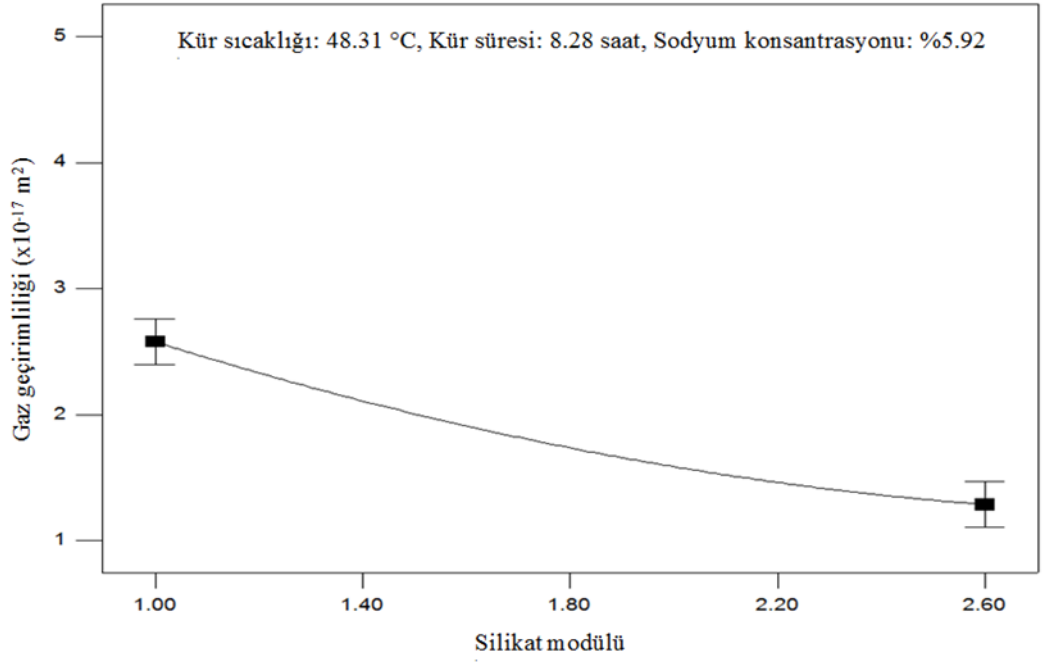
Şekil 4.44. Kür sıcaklığının gaz geçirimsizliğine etkisi



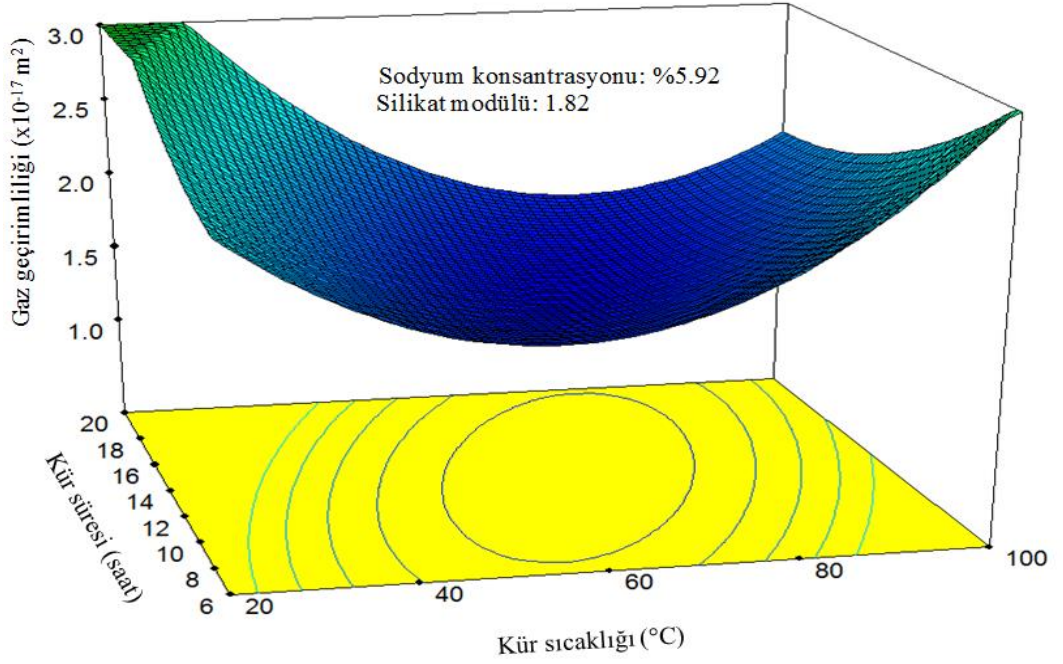
Şekil 4.45. Kür süresinin gaz geçirimliliğine etkisi



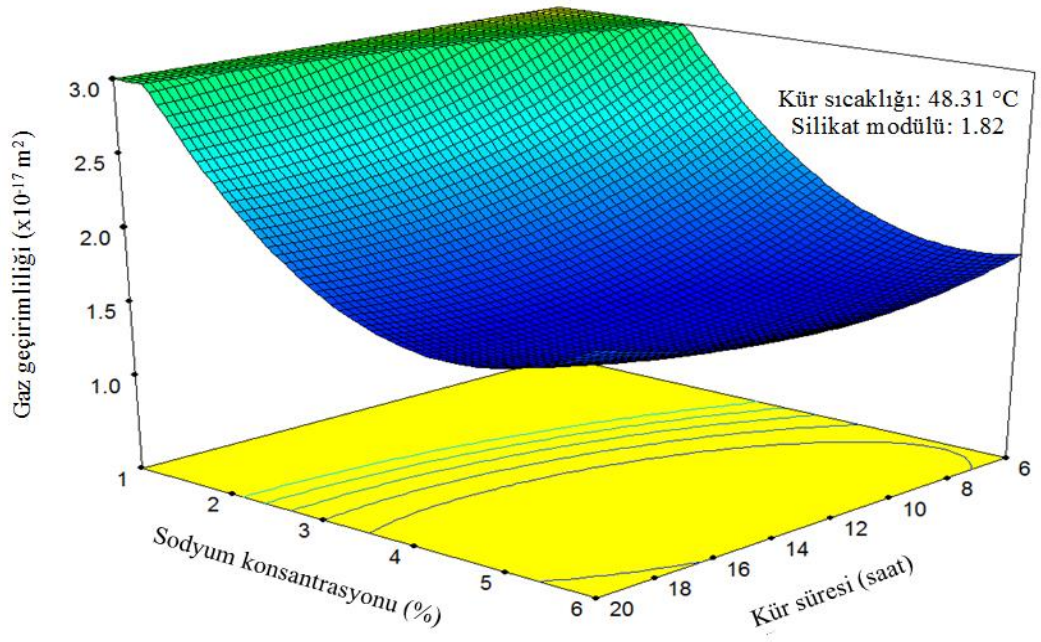
Şekil 4.46. Sodyum konsantrasyonunun gaz geçirimliliğine etkisi



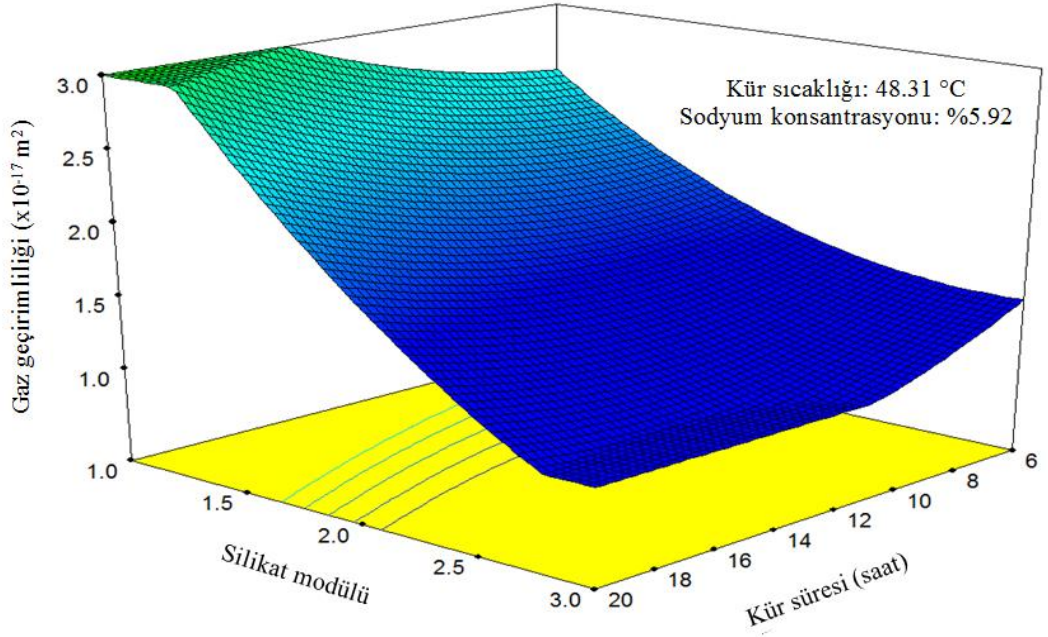
Şekil 4.47. Silikat modülünün gaz geçirimliliğine etkisi



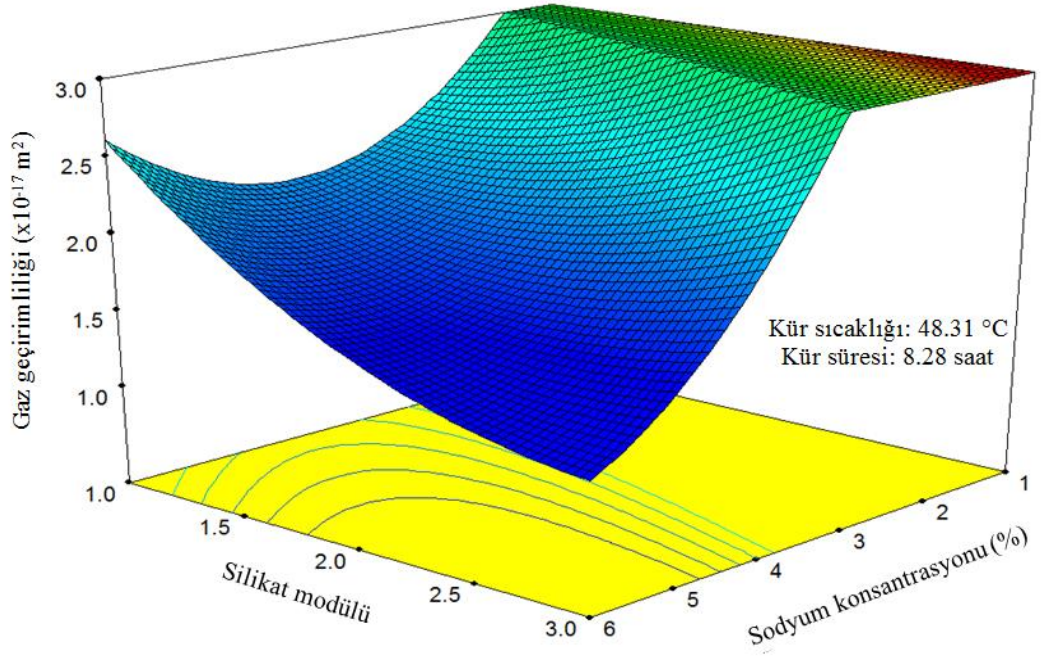
Şekil 4.48. Kür süresi-kür sıcaklığının gaz geçirimliliğine etkisi



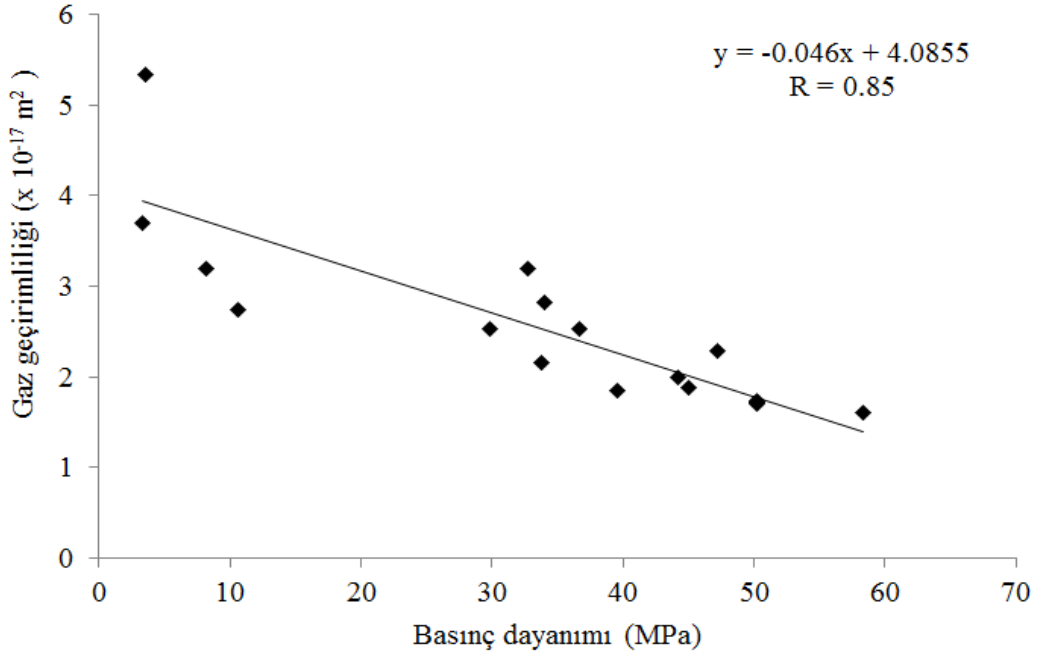
Şekil 4.49. Sodyum konsantrasyonu-kür süresinin gaz geçirirnililğine etkisi



Şekil 4.50. Silikat modülü-kür süresinin gaz geçirirnililğine etkisi



Şekil 4.51. Silikat modülü-sodyum konsantrasyonunun gaz geçirirliğine etkisi

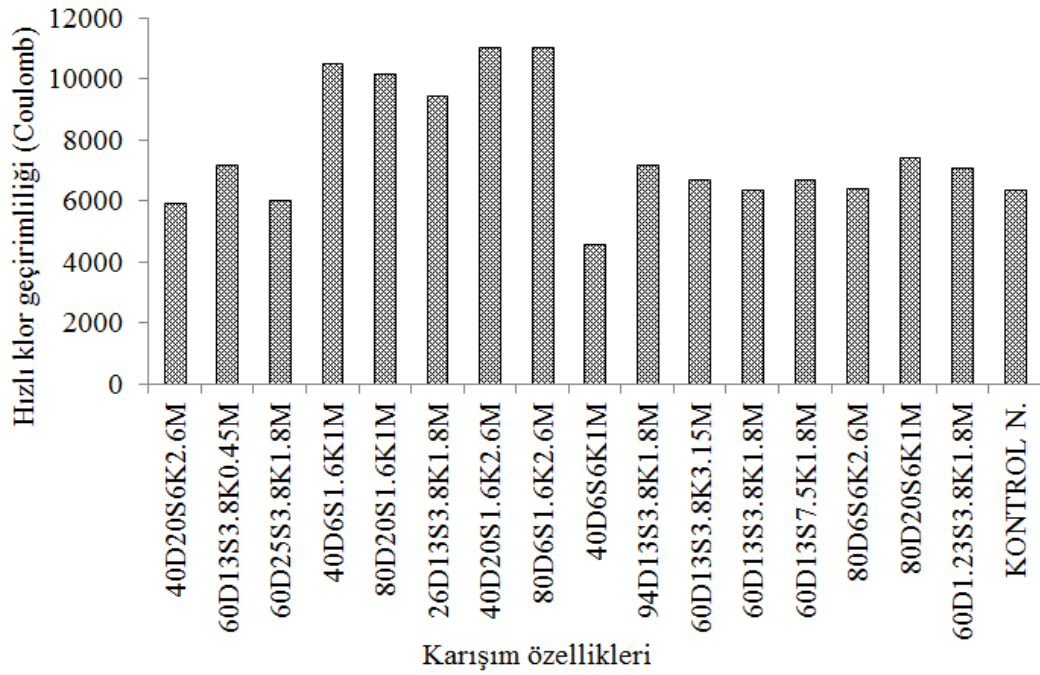


Şekil 4.52. AAECB basınç dayanımı-gaz geçirirliği arasındaki ilişki

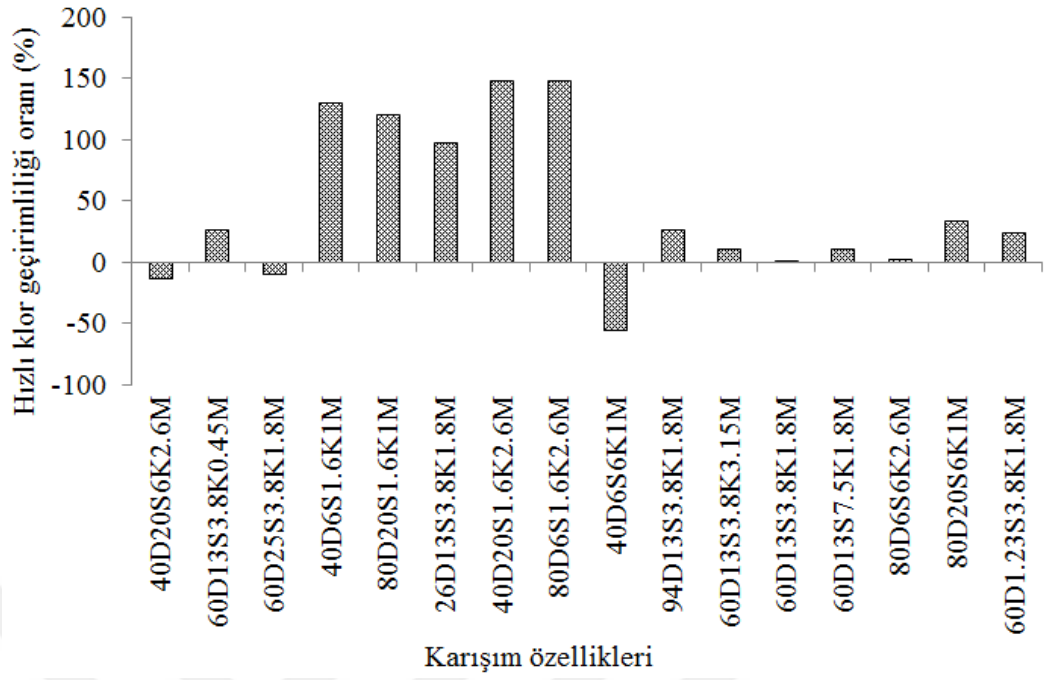
4.10. Hızlı Klor Geçirimsizliği

AAECB ve PÇ numunelerin hızlı klor geçirimsizlikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. AAECB ve PÇ numunelerinin hızlı klor geçirimsizlikleri ve kontrol numunesine göre hızlı klor geçirimsizliği değişim oranı Şekil 4.53. ve Şekil 4.54.’de gösterilmiştir. AAECB hızlı klor geçirimsizliğinin PÇ betona göre %150’ye varan oranlarda daha fazla olduğu Şekil 4.54.’den anlaşılmaktadır. K18 (80D6S1.6K2.6M) betonunun hızlı klor geçirimsizliği kontrol numunesine göre %147 daha fazla iken sodyum konsantrasyonu yüksek olan K5 (40D6S6K1M) betonunun hızlı klor geçirimsizliğinin %55 daha az olduğu belirlenmiştir. Kür sıcaklığının AAECB hızlı klor geçirimsizliğini etkileyen optimum bir değerinin olduğu Şekil 4.55.’de gösterilmiştir. Sodyum konsantrasyonu arttıkça hızlı klor geçirimsizliği 11021 Coulomb ile 4562 Coulomb arasında değişmiştir. ASTM C1202’ye göre hızlı klor geçirimsizliği 4000 Coulomb ve üzeri olan betonlar klor geçirimsizliği yüksek betonlar olarak tanımlanmaktadır. ASTM C1202’ye göre bu betonlar klor geçirimsizliği yüksek betonlar olarak değerlendirilmektedir. Hızlı klor geçirimsizliği deneyi betonların kullanım ortamlarındaki klor geçirimsizliklerini değil yüksek konsantrasyonlardaki anlık iyon geçişini ölçtüğünden gerçek klor geçirimsizliğini verememektedir. Yüksek sodyum konsantrasyonlarında iyon geçişi ölçülerek betonun kullanım ortamlarındaki performansı belirlenmeye çalışılmaktadır. İlerleyen yaşlarda hidratasyonun devam etmesi ile betonun bünyesinde bulunan alkalilerin bağlanması neticesinde geçirimsizliğin azaldığı belirtilmiştir (Al-Otaibi, 2008). Kür süresinin 80 °C’nin üzerine çıkması durumunda hızlı klor geçirimsizliğinin ciddi oranda artacağı Şekil 4.55.’de görülmektedir. Kür sıcaklığı 60 °C iken basınç dayanımı artmış ve hızlı klor geçirimsizliği azalmıştır. Boşluk yapısından dolayı geçirimsizliğin azaldığı bilinmektedir. ANOVA sonuçlarında (Çizelge 4.3) kür süresinin etkin bir parametre olmadığı görülmüş, kür süresinin 6 ile 20 saat arasında değişmesi, klor geçirimsizliği üzerinde olumlu bir etki gerçekleştirilmemiş ve Şekil 4.56.’da grafik olarak ifade edilmiştir. Çizelge 4.3’de verilen ANOVA sonuçlarına göre SC %61.8 etki oranı ile hızlı klor geçirimsizliği üzerinde en etkin faktör olarak belirlenmiştir. SC ve SM değişimine bağlı hızlı klor geçirimsizliği değişimi Şekil 4.57. ve Şekil 4.58.’de gösterilmiştir. Silikat modülü artışına bağlı olarak klor geçirimsizliğinin lineer olarak arttığı Şekil 4.58.’den anlaşılmaktadır. CT-SC ve SM-TC ikili etkileşimleri de hızlı klor geçirimsizliği üzerinde

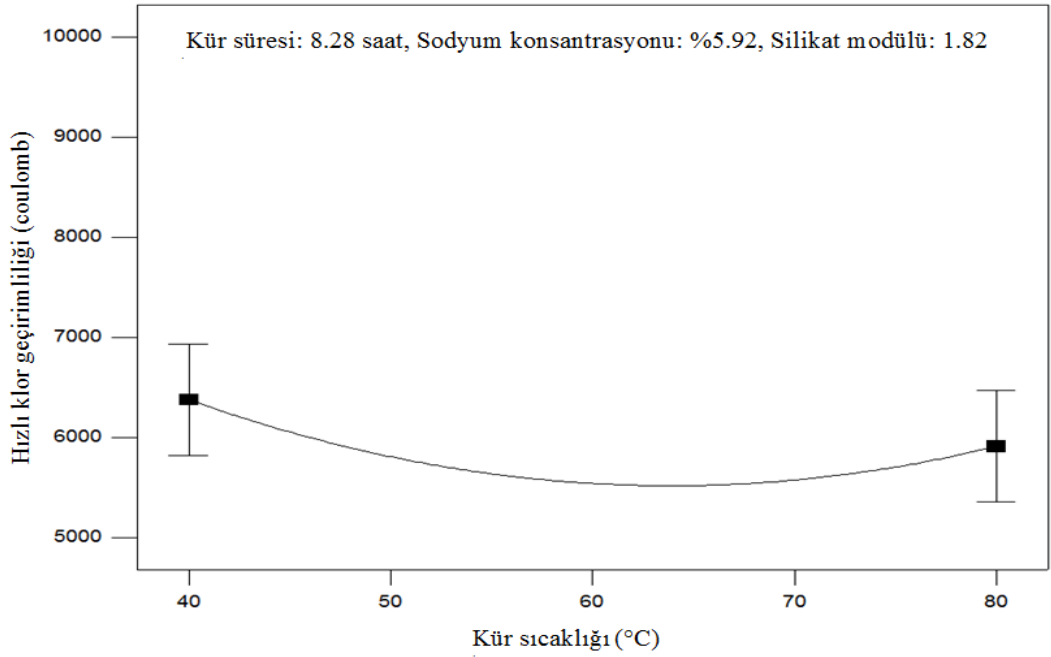
ANOVA sonuçlarına (Çizelge 4.3) göre sırasıyla %2.2 ve %4.9 oranında etkin olan faktörlerdir. Şekil 4.59.'da diğer faktörler optimum seviyelerinde iken kür sıcaklığı 80°C ve sodyum konsantrasyonu maksimum seviyesinde (%6) iken hızlı klor geçirirliliğinin minimum olduğu gösterilmiştir. Kür sıcaklığı ve sodyum konsantrasyonu azaldıkça hızlı klor geçirirliliğinin 14000 Coulomb ve üzerine çıktığı görülmektedir. SM-TC etkisi incelendiğinde SM ve CT'nin birlikte artmasıyla (her ikisi de maksimum seviyede iken) veya her iki bağımsız değişkenin birlikte azalması ile hızlı klor geçirirliliğinin minimum seviyede olduğu Şekil 4.60.'da görülmektedir. AAECB hızlı klor geçirirlilikleri ASTM C1202'ye göre yüksek geçirimli beton sınıfında kabul edilmektedir. Basınç dayanımı ile hızlı klor geçirirliliği arasında Şekil 4.61.'deki gibi bir ilişki bulunmuştur. Betonun geçirirlilik özellikleri boşluk yapısı ile ilgili olduğundan gaz ve klor geçirirliliği arasında da korelasyonu yüksek ve lineer olarak ifade edilebilen bir ilişki bulunmuş ve Şekil 4.62.'de gösterilmiştir.



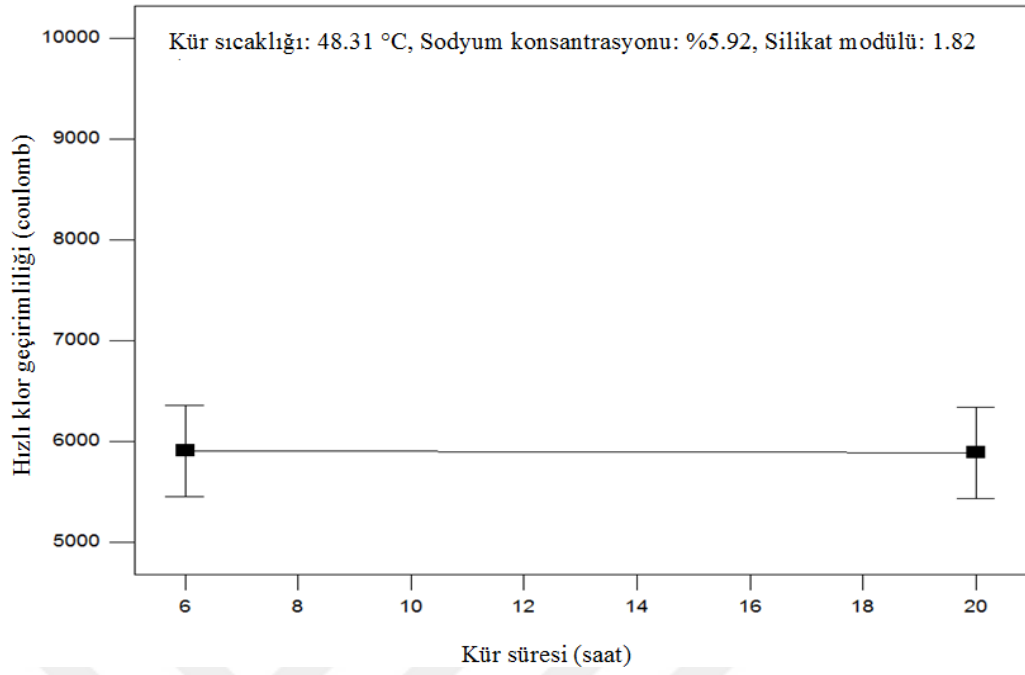
Şekil 4.53. AAECB ve kontrol numunelerinin hızlı klor geçirirlilikleri



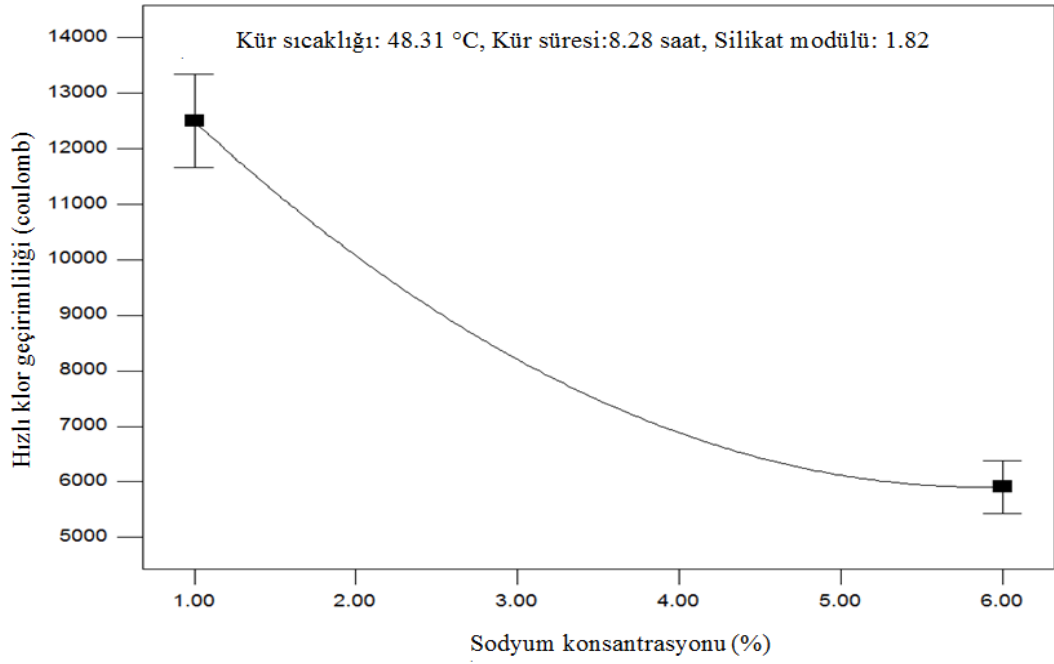
Şekil 4.54. AAECB numunelerinin kontrol numunelerine göre hızlı klor geçirirliği oranı



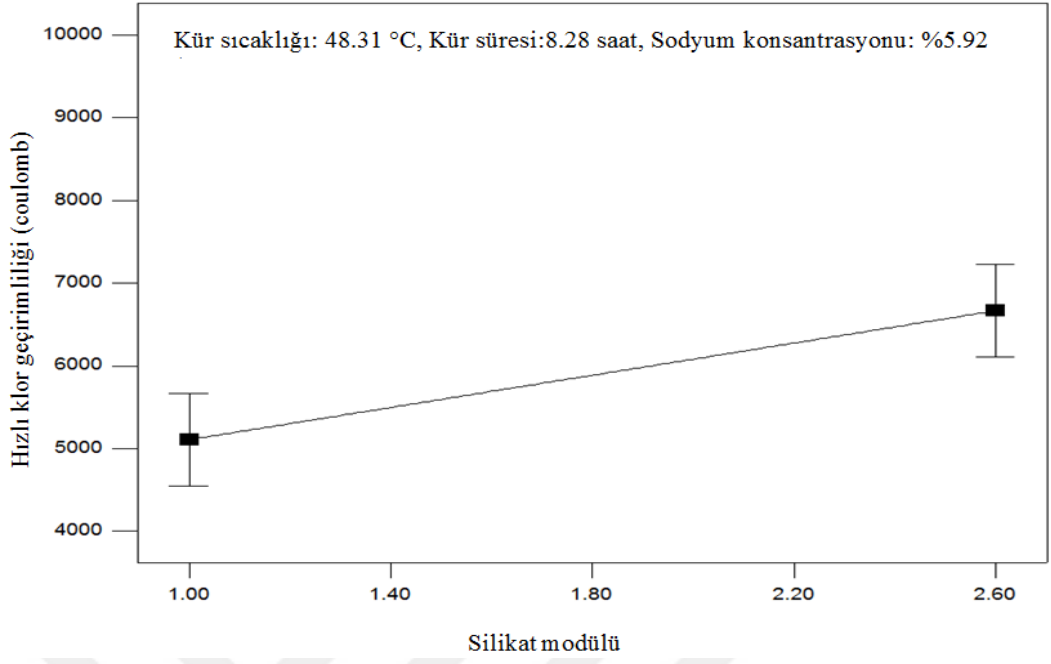
Şekil 4.55. Kür sıcaklığının hızlı klor geçirirliğine etkisi



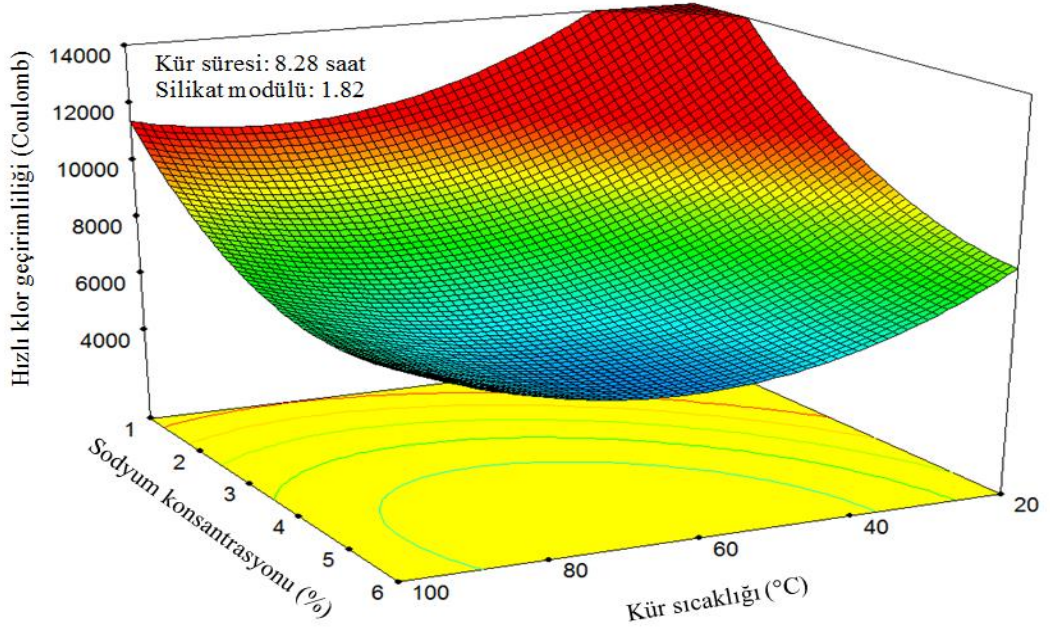
Şekil 4.56. Kır süresinin hızlı klor geçirimliliğine etkisi



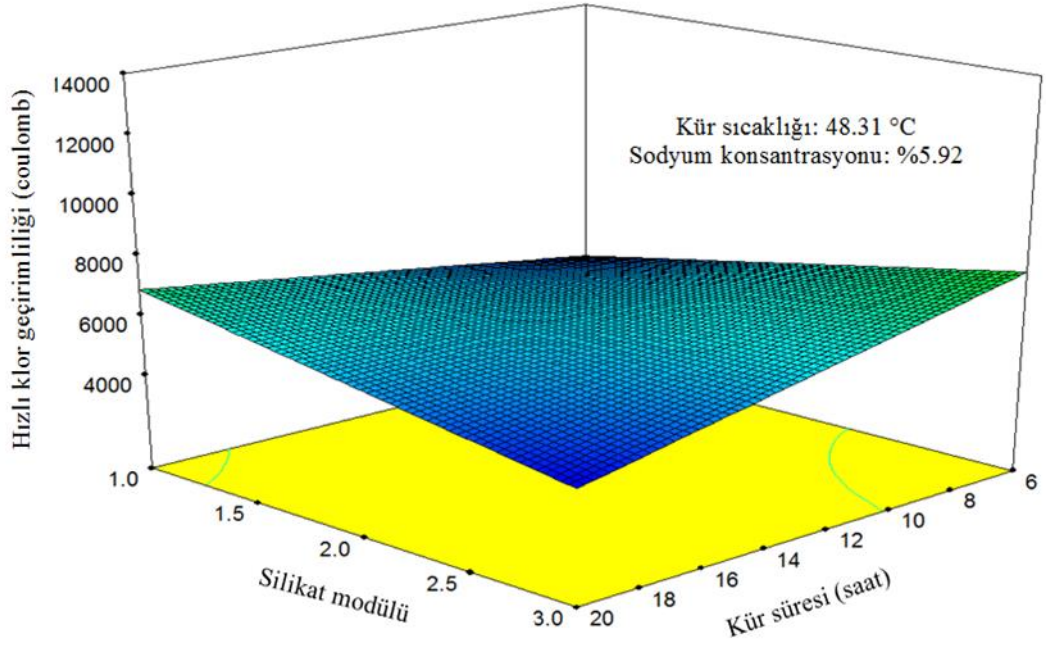
Şekil 4.57. Sodyum konsantrasyonunun hızlı klor geçirimliliğine etkisi



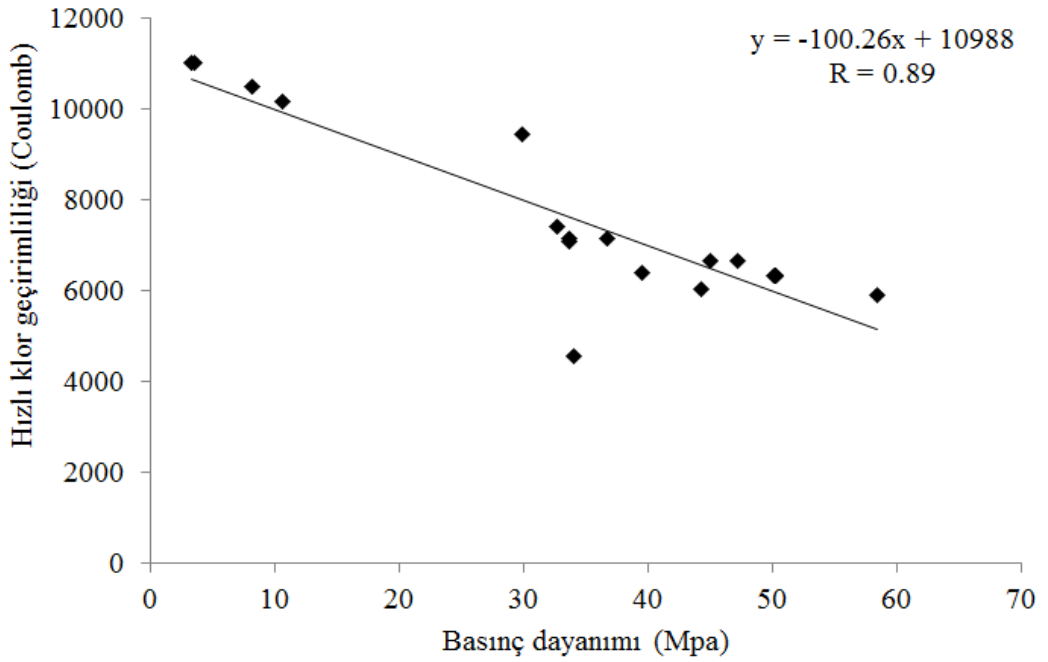
Şekil 4.58. Silikat modülünün hızlı klor geçirimliliğine etkisi



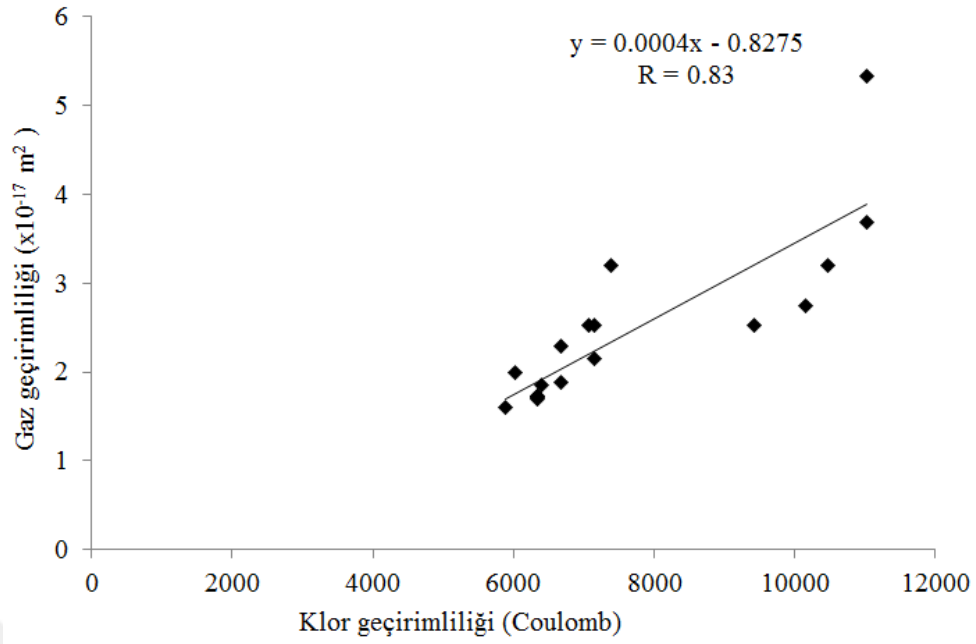
Şekil 4.59. Kür sıcaklığı-sodyum konsantrasyonunun hızlı klor geçirimliliğine etkisi



Şekil 4.60. Silikat modülü-kır süresinin hızlı klor geçirimliliğine etkisi



Şekil 4.61. AAECB basınç dayanımı-hızlı klor geçirimliliği arasındaki ilişki

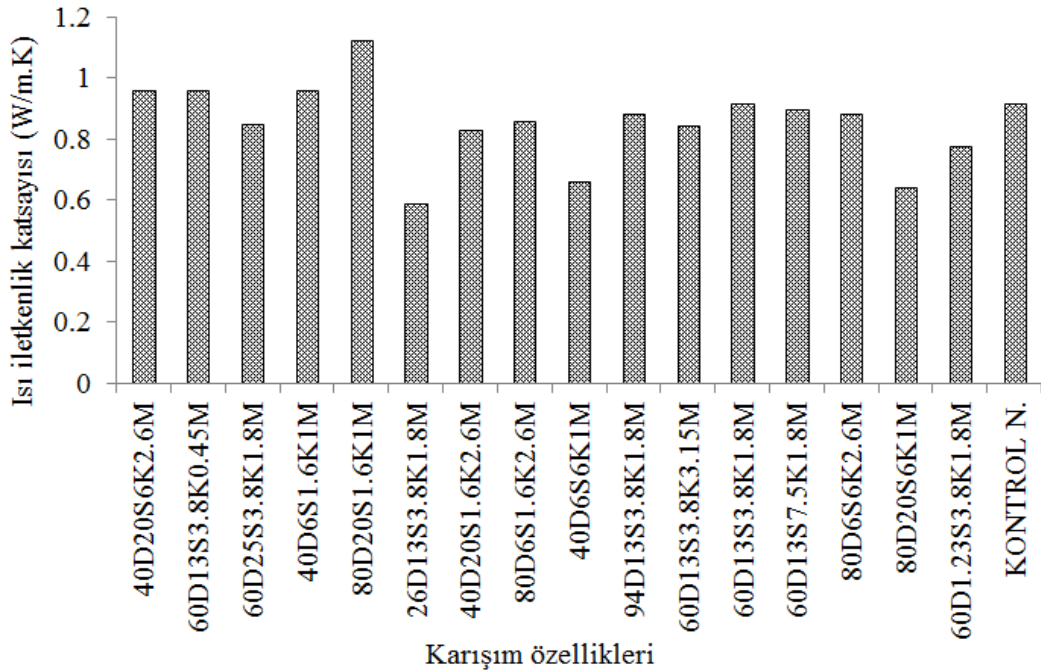


Şekil 4.62. AAECB gaz geçirirliği-hızlı klor geçirirliği arasındaki ilişki

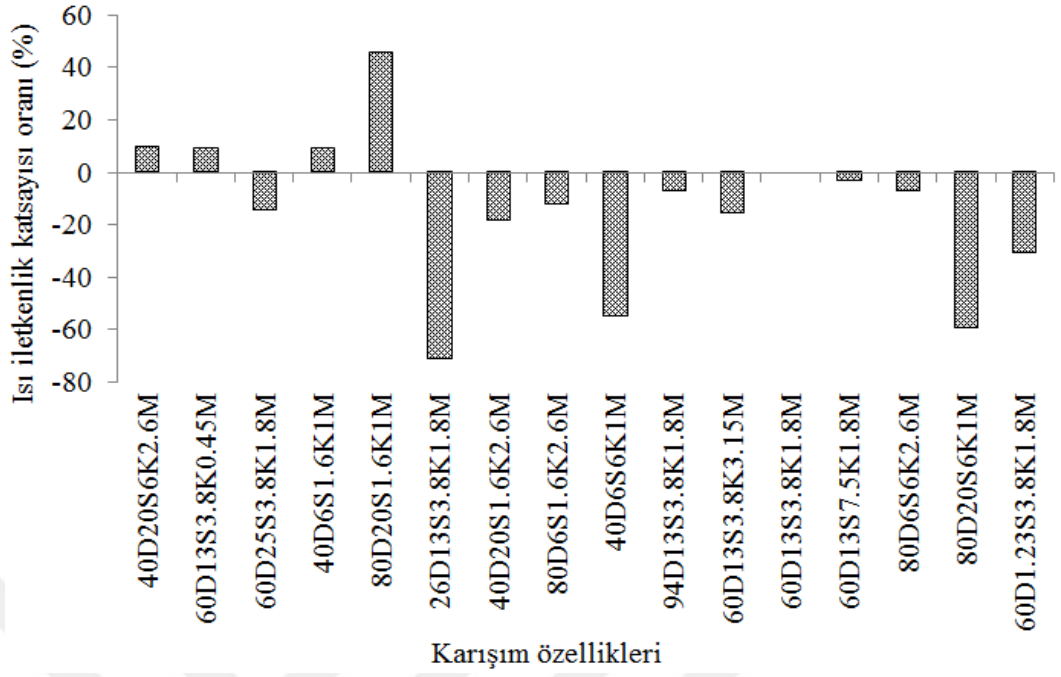
4.11. Isı İletkenlik Katsayısı

AAECB ve PÇ numunelerin hızlı klor geçirirliğilikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen AAECB ısı iletkenlikleri 0.586 W/mK ile 1.112 W/mK arasında ölçülmüştür. Literatürde, farklı aktivatörler kullanılarak aktive edilen geopolimerlerin ısı iletkenlikleri çalışma kapsamında ölçülen değerler ile uyum içindedir. Sodyum ile aktive edilerek üretilen AAECB ısı iletkenliklerinin potasyum ile aktive edilen betonlarınkinden daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Aguilar ve ark., 2010). AAECB ve Portland çimentolu kontrol numunelerinin ısı iletkenlik katsayıları ve kontrol numunesine göre ısı iletkenlik katsayılarının değişim oranı Şekil 4.63. ve Şekil 4.64.’de gösterilmiştir. AAECB klor ve gaz geçirirliğilik özellikleri yüksek olduğundan betonda bulunan boşluklardan dolayı ısı iletkenlik katsayılarının kontrol numunesine göre daha düşük olduğu görülmüştür. K1 (26D13S3.8K1.8M) numunesinin ısı iletkenliğinin kontrol numunesine göre % 71 daha az olduğu Şekil 4.64.’de gösterilmiştir. Şekil 4.65.’de gösterildiği gibi optimum üretim şartlarındaki AAECB ısı iletkenliği kür sıcaklığından olumsuz etkilenmektedir. Kür sıcaklığı 40°C’den 80°C’ye yükseldikçe ısı iletkenlik katsayısı da 0.69’dan 0.88 W/m.K değerine ulaşmıştır. Feng ve ark. (2015) kür sıcaklığının artmasıyla mikro yapının daha yoğun hale geldiğini ve AAECB ısı iletkenliklerinin de arttığını belirtmişlerdir. Kür süresinin tek başına ciddi

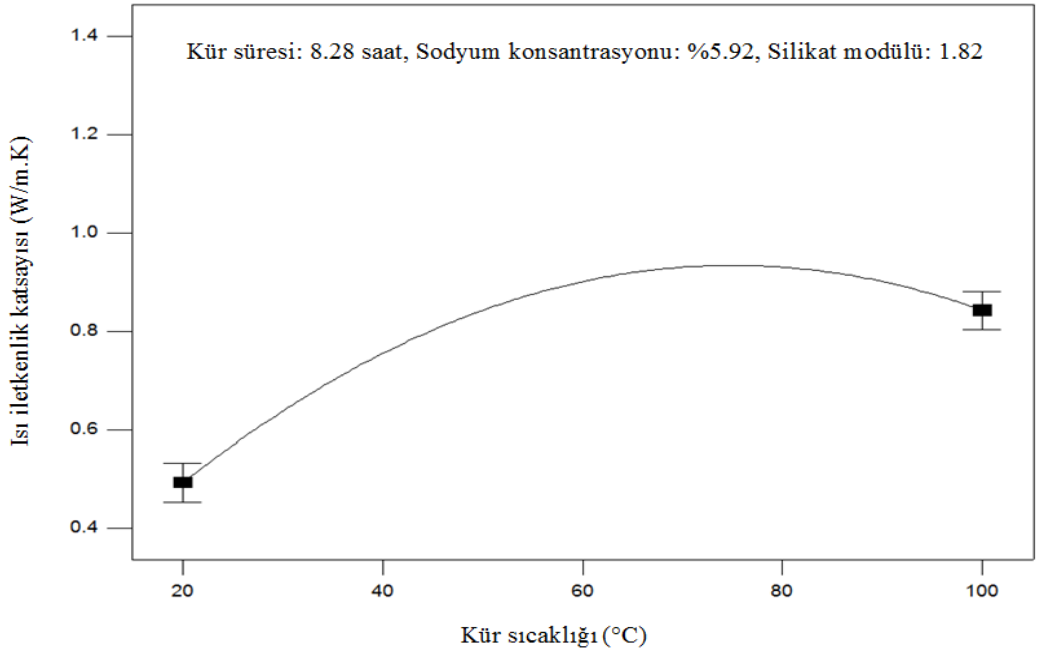
bir etkisinin olmadığı (Şekil 4.66.'dan) ancak diğer faktörlerle (CT-TC, CT-SM) birlikte değiştiğinde etkin bir parametre olduğu ANOVA sonuçlarından anlaşılmaktadır. Çizelge 4.3'de verilen istatistiksel analiz sonuçları ve regresyon modeline göre AAECB ısı iletkenliklerini etkileyen en önemli faktörlerin sodyum konsantrasyonu, silikat modülü ve kür sıcaklığı olduğu görülmektedir. Sodyum konsantrasyonu arttıkça beton daha yoğun hale geldiğinden bünyesindeki boşluk miktarı azalmakta, ısı iletkenliği artmaktadır (Bakınız Şekil 4.67). Saygılı ve Baykal (2011), boşluk oranının artmasıyla ısı iletkenliğinin azaldığını belirtmişlerdir. Şekil 4.68.'de SM arttıkça ısı iletkenliğinin azaldığı görülmektedir. Beton bünyesinde bulunan alkali aktivatörlerin silikat modülü en yüksek, sodyum konsantrasyonu en düşük oranda iken gaz ve klor geçirimsizliğini artırdığı yukarıda ifade edilmiştir. Betonun geçirimsizlik özelliği boşluk yapısı ile ilişkili olduğundan boşluk miktarını artıran her parametre (SM, CT vb.) ısı iletkenliği azaltmaktadır. Gaz ve klor geçirimsizliği yüksek olan AAECB, PÇ betona göre % 75'e varan oranlarda ısı iletimine karşı daha dirençlidir. Şekil 4.69. ile Şekil 4.72. arasındaki grafiklerde istatistiksel olarak anlamlı olan parametrelerin ısı iletkenlik üzerindeki ikili etkileşimleri gösterilmiştir.



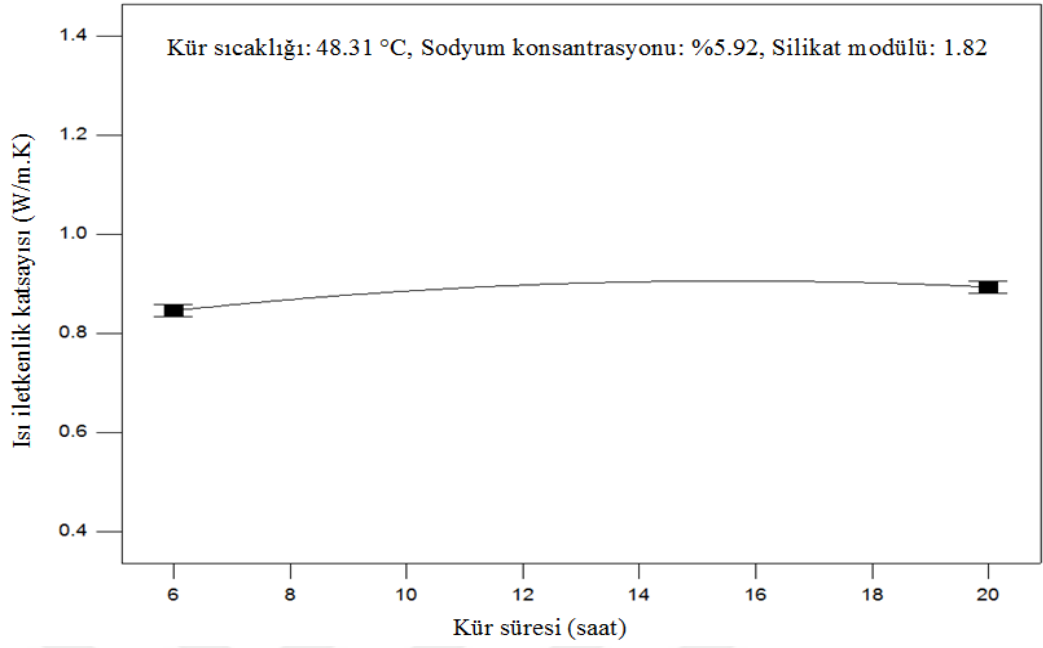
Şekil 4.63. AAECB ve kontrol numunelerinin ısı iletkenlik katsayıları



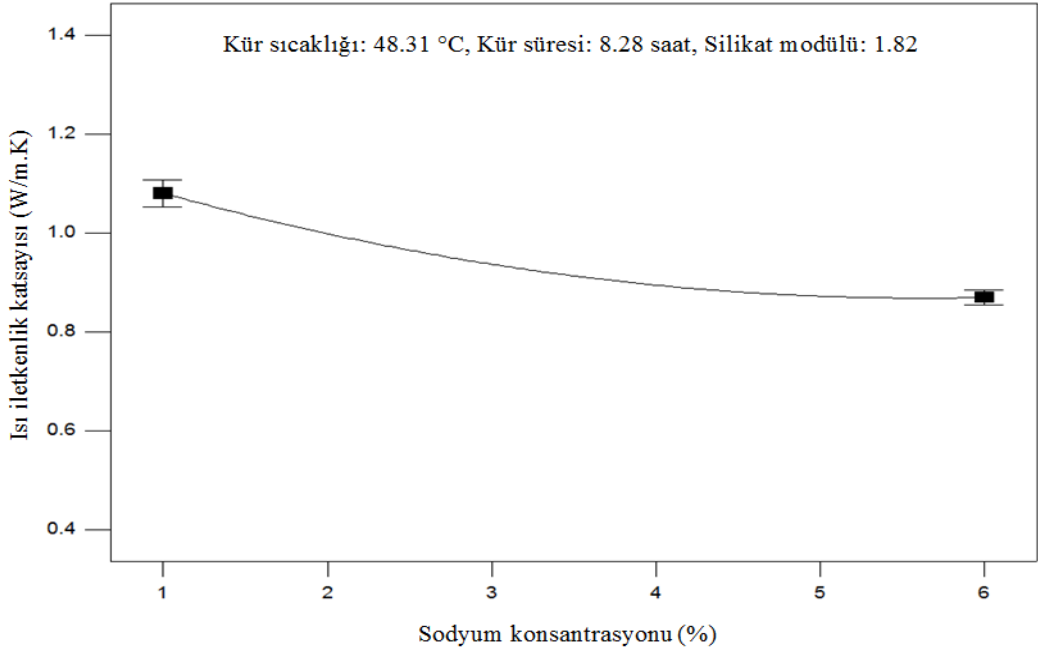
Şekil 4.64. AAECB numunelerinin kontrol numunelerine göre ısı iletkenlik katsayısı oranı



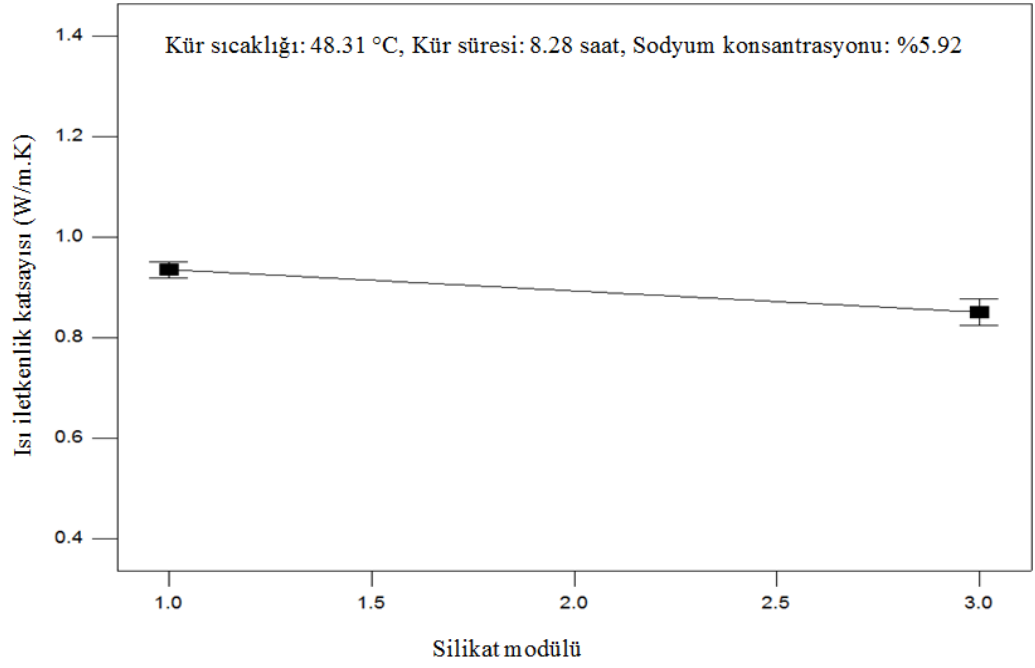
Şekil 4.65. Kür sıcaklığının AAECB ısı iletkenliğine etkisi



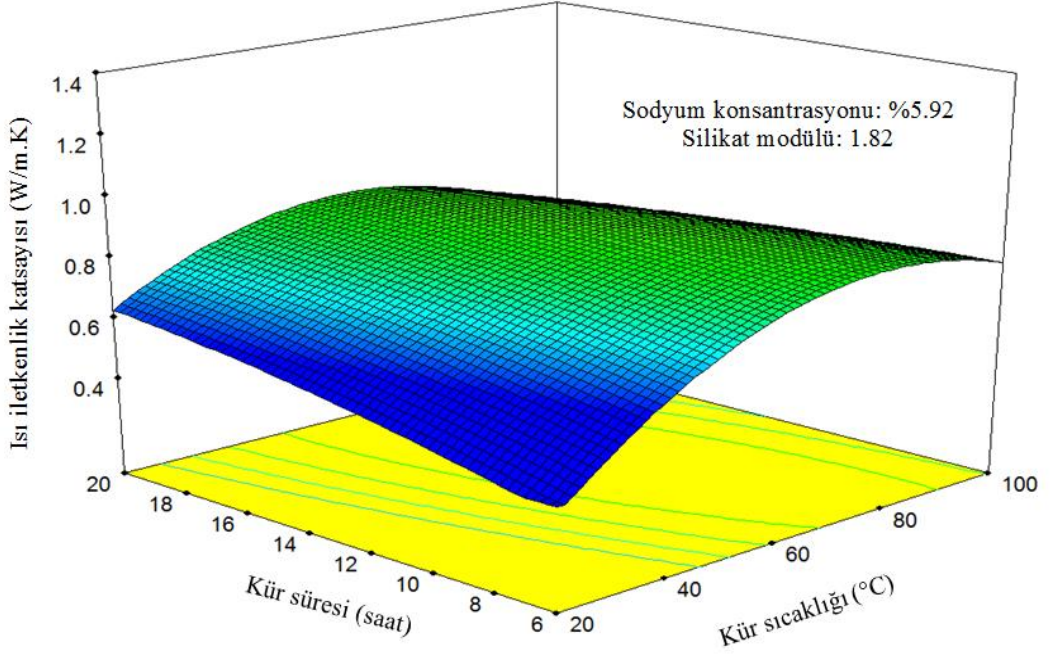
Şekil 4.66. Kür süresinin AAECB ısı iletkenliğine etkisi



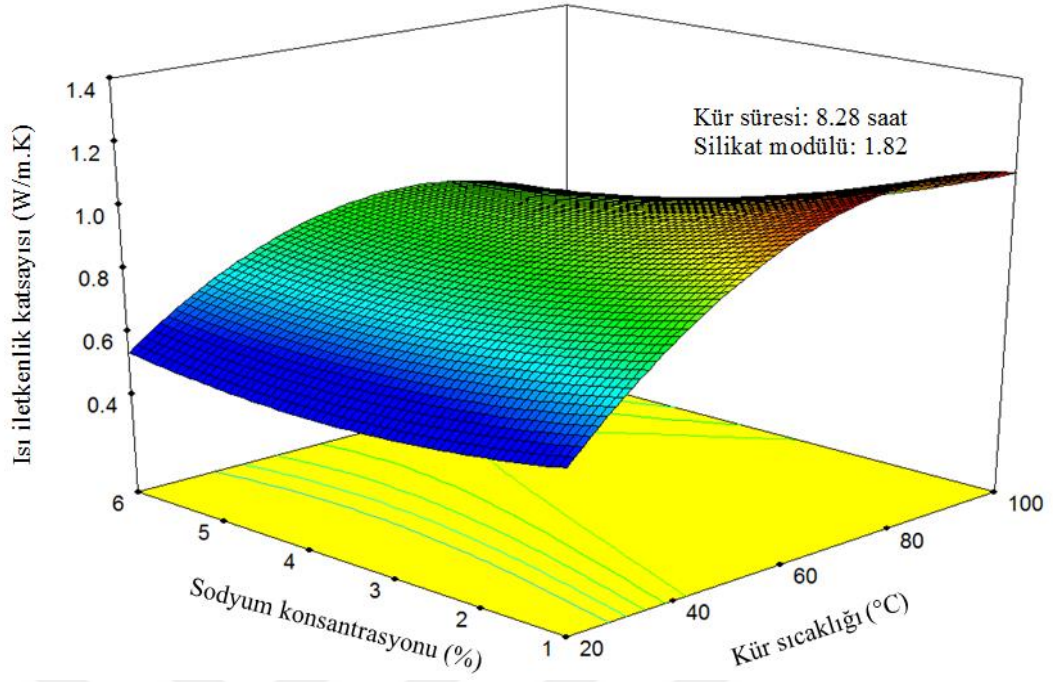
Şekil 4.67. Sodyum konsantrasyonunun AAECB ısı iletkenliğine etkisi



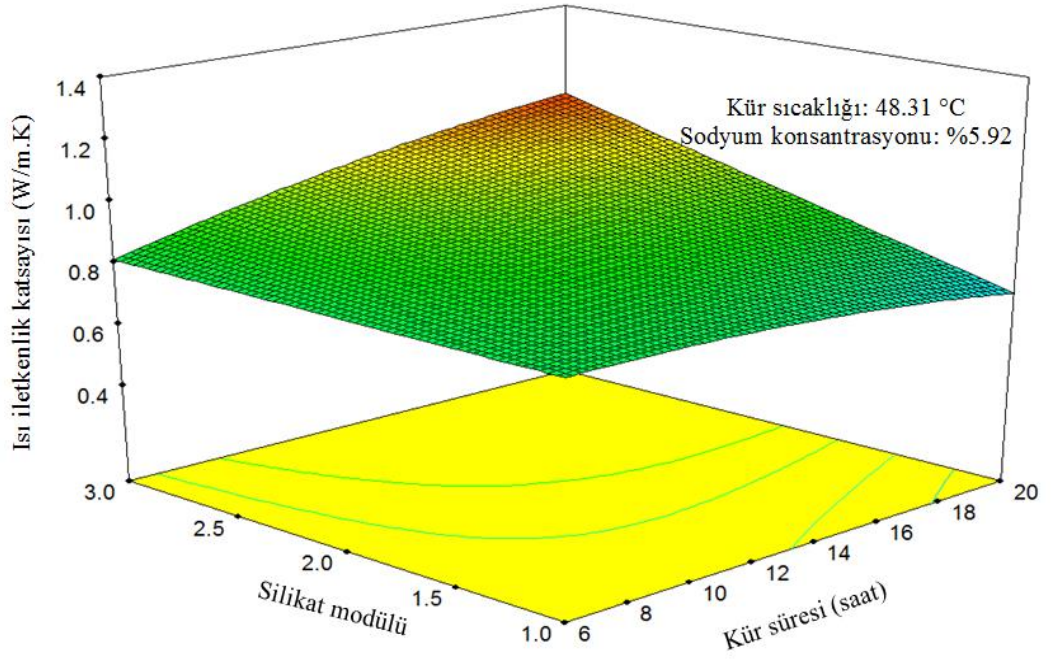
Şekil 4.68. Silikat modülünün AAECB ısı iletkenliğine etkisi



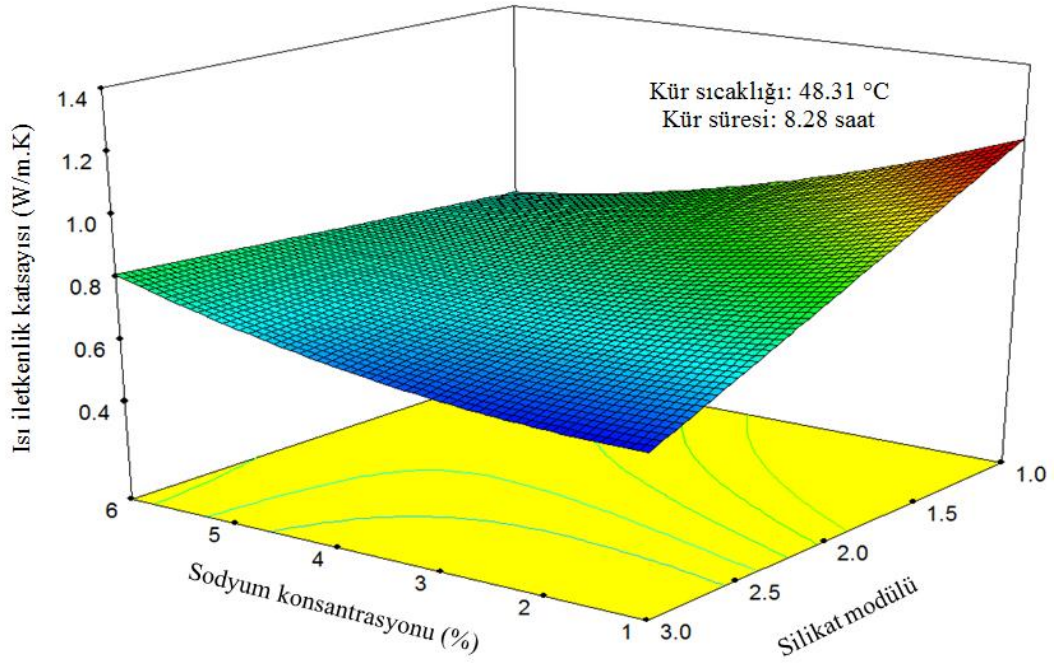
Şekil 4.69. Kır süresi-kır sıcaklığının ısı iletkenliğine etkisi



Şekil 4.70. Sodyum konsantrasyonu-kür sıcaklığının ısı iletkenliğe etkisi



Şekil 4.71. Silikat modülü-kür süresinin ısı iletkenliğe etkisi

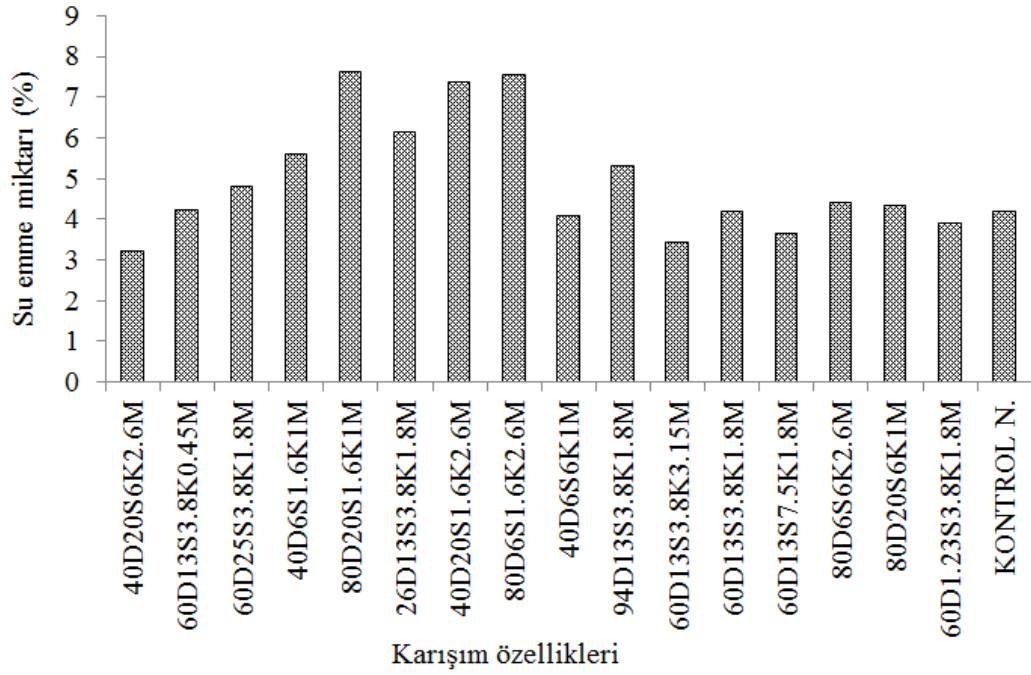


Şekil 4.72. Sodyum konsantrasyonu-silikat modülünün ısı iletkenliğe etkisi

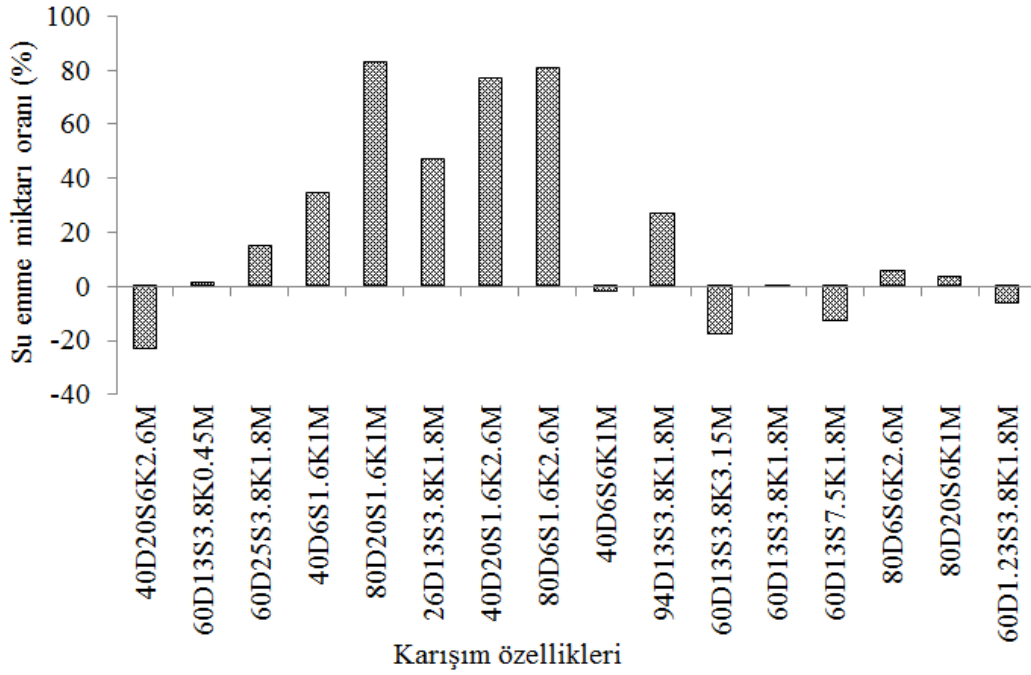
4.12. Su Emme Oranı

AAECB ve PÇ karışımlarına ait su emme oranları Çizelge 4.2’de verilmiştir. AAECB ve PÇ numunelerinin su emme oranları ve kontrol numunesine göre AAECB su emme oranlarında meydana gelen yüzdesel değişim sırası ile Şekil 4.73. ve Şekil 4.74.’da gösterilmiştir. Yukarıda açıklanan hızlı klor geçirimsizliği, gaz geçirimsizliği ve ısı iletkenlik katsayıları deney sonuçları değerlendirilirken sürekli vurgulandığı üzere, AAECB boşluk yapıları kontrol betonlarından farklı olup, AAECB daha gözenekli ve boşluklu bir yapıya sahiptir. AAECB su emme oranları incelendiğinde, kontrol karışımına kıyasla %80 e varan oranlarda daha yüksek su emme değerlerine sahip olduğu görülecektir (Bakınız Şekil 4.74.). Kür sıcaklığı ve kür süresi su emme oranları üzerinde istatistiksel olarak anlamlı parametreler olmakla birlikte etki oranları sırasıyla ancak %1 ve %1.1 düzeyindedir. Kür sıcaklığının 60°C’nin üzerine çıkması veya altına inmesi durumunda su emme oranının arttığı ve kür süresinin 6 ile 20 saat arasında değişmesinin su emme kapasitesini kayda değer oranda etkilemediği sırasıyla Şekil 4.75. ve Şekil 4.76.’de görülmektedir. Çizelge 4.3’deki ANOVA sonuçlarına göre AAECB su emme oranı üzerinde en etkin bağımsız değişken %58.2 etki oranı ile sodyum konsantrasyonudur. Şekil 4.77. sodyum konsantrasyonunda meydana gelen

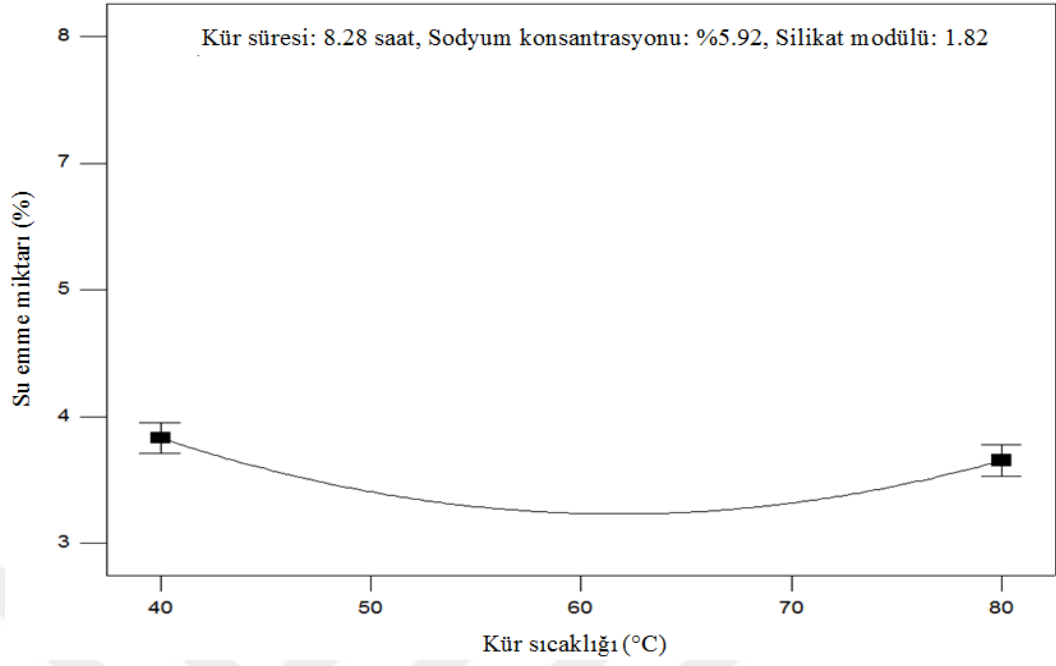
değişimin su emme oranı üzerindeki etkisini göstermektedir, beklendiği gibi sodyum konsantrasyonu arttıkça su emme oranlarında azalma meydana gelmiştir. ANOVA sonuçlarına göre silikat modülü su emme oranları üzerinde sadece %0.9 kadar etkiye sahiptir. Şekil 4.78. silikat modülü değişiminin su emme oranına etkisini göstermektedir. Şekilden görüleceği üzere, silikat modülü arttıkça su emme oranı azalma göstermiş ancak meydana gelen azalmanın önemli seviyede olmadığı belirlenmiştir. Kür şartlarındaki (kür sıcaklığı ve kür süresi) değişiminin AAECB su emme oranlarını nasıl etkilediği Şekil 4.79.'da gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere kür sıcaklığı azalıp, kür süresi eş zamanlı olarak artırıldıkça su emme oranlarında kayda değer artışlar görülmektedir. Şekil 4.80. kür sıcaklığı-sodyum konsantrasyonu ikili etkileşiminin su emme oranları üzerinde meydana getirdiği değişimi göstermektedir. Şekilden görüleceği üzere karışımın sodyum konsantrasyonu maksimum (%6) kür sıcaklığı 60°C iken su emme oranları minimum olmaktadır. Ayrıca karışımdaki sodyum konsantrasyonu minimum düzeyde iken kür sıcaklığının sınır değerler alması durumunda su emme oranları %8'in üzerine çıkmaktadır. Şekil 4.81. kür sıcaklığı-silikat modülü ikili etkileşiminin su emme oranı üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekilden görüleceği üzere kür sıcaklığı 60°C iken silikat modülünün artması ile su emme oranı değişmemektedir. Şekil 4.82. sodyum konsantrasyonu-kür süresi ikili etkileşiminin su emme oranı üzerindeki etkisini resmetmektedir. Görüleceği üzere karışımın sodyum konsantrasyonu düşük iken kür süresinin artırılmasının su emme oranını olumsuz etkilediği, düşük su emme oranları elde edebilmek için karışımın sodyum konsantrasyonunun muhakkak artırılması gerektiği görülmektedir. Şekil 4.83. kür süresi-silikat modülü ikili etkileşiminin, su emme oranını nasıl değiştirdiğini göstermektedir. Silikat modülü minimum iken kür sıcaklığının artmasına bağlı olarak su emme miktarı da artmıştır. Şekil 4.84. sodyum konsantrasyonu-silikat modülü ikili etkileşiminin su emme oranları üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekil 4.84. her iki parametrenin artması ile su emme miktarının azaldığını ancak sodyum konsantrasyonu değişiminin silikat modülü değişimine göre su emme miktarı üzerinde daha etkin olduğunu göstermektedir.



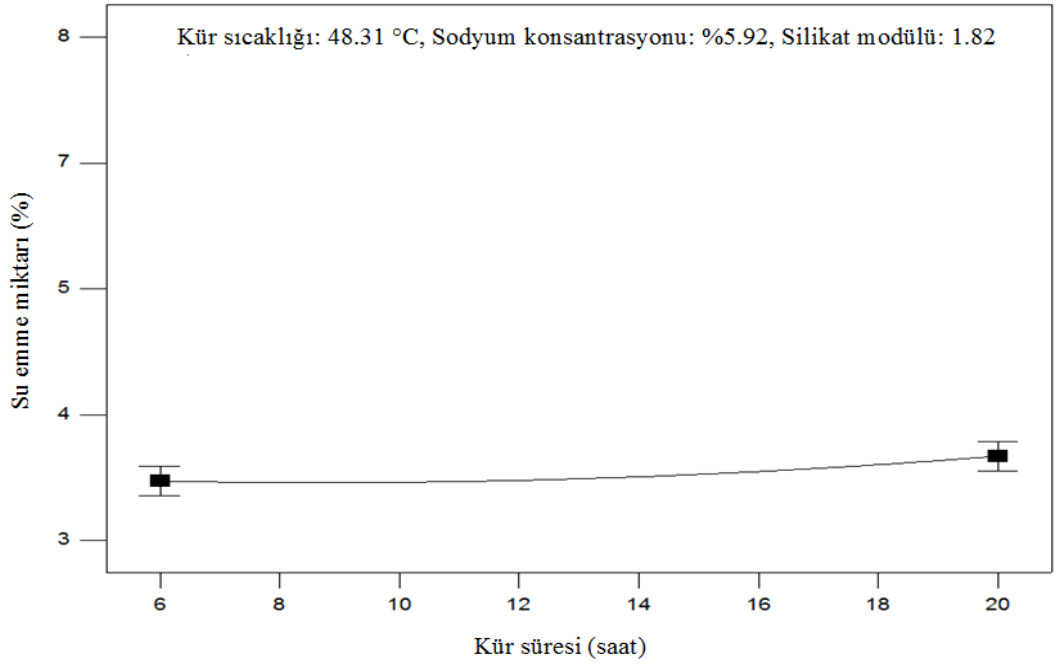
Şekil 4.73. AAECB ve kontrol numunelerinin su emme miktarları



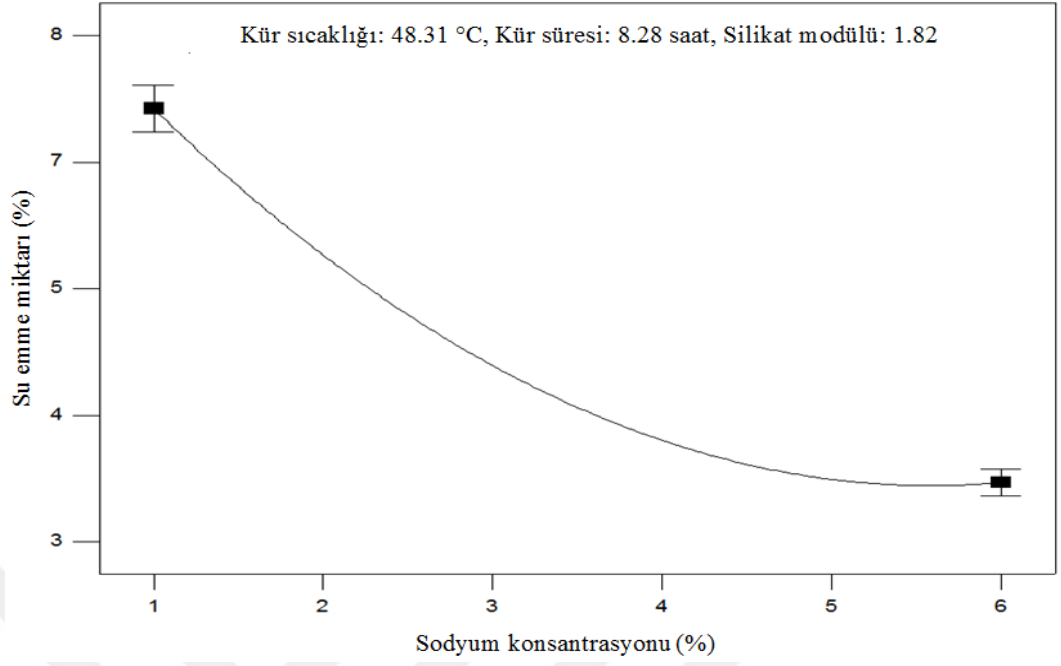
Şekil 4.74. AAECB numunelerinin kontrol numunelerine göre su emme miktarı oranı



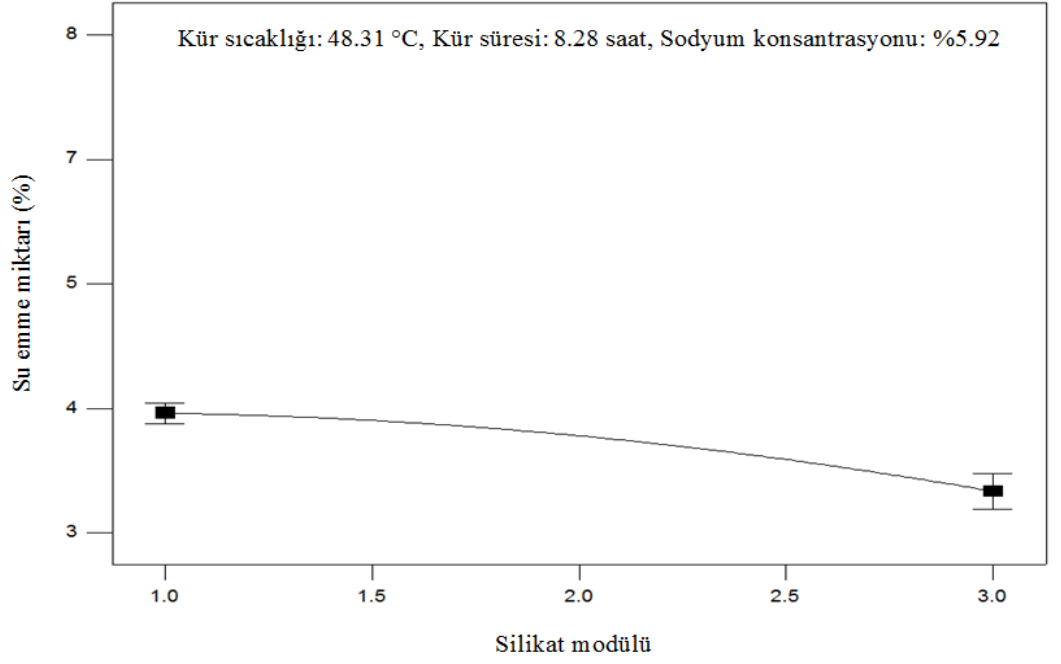
Şekil 4.75. Kür sıcaklığının su emme miktarına etkisi



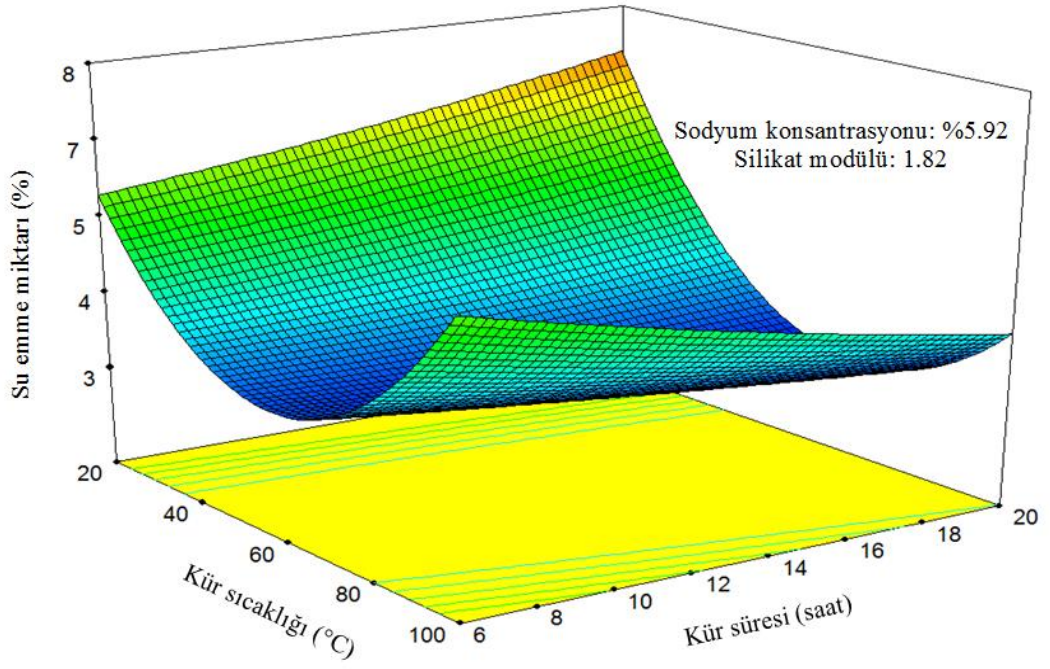
Şekil 4.76. Kür süresinin su emme miktarına etkisi



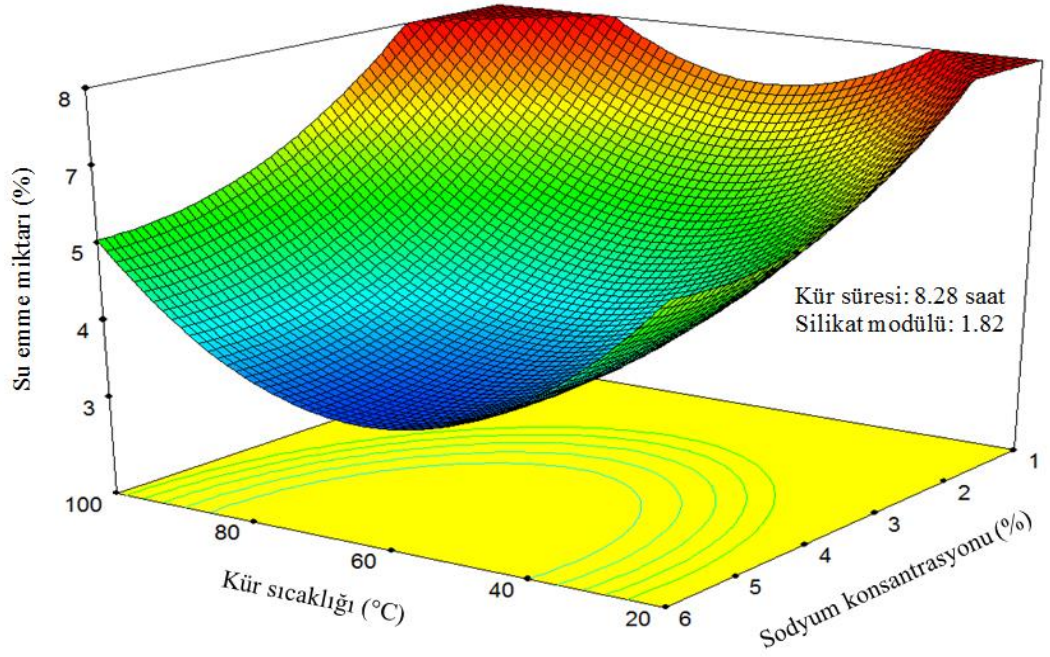
Şekil 4.77. Sodyum konsantrasyonunun su emme miktarına etkisi



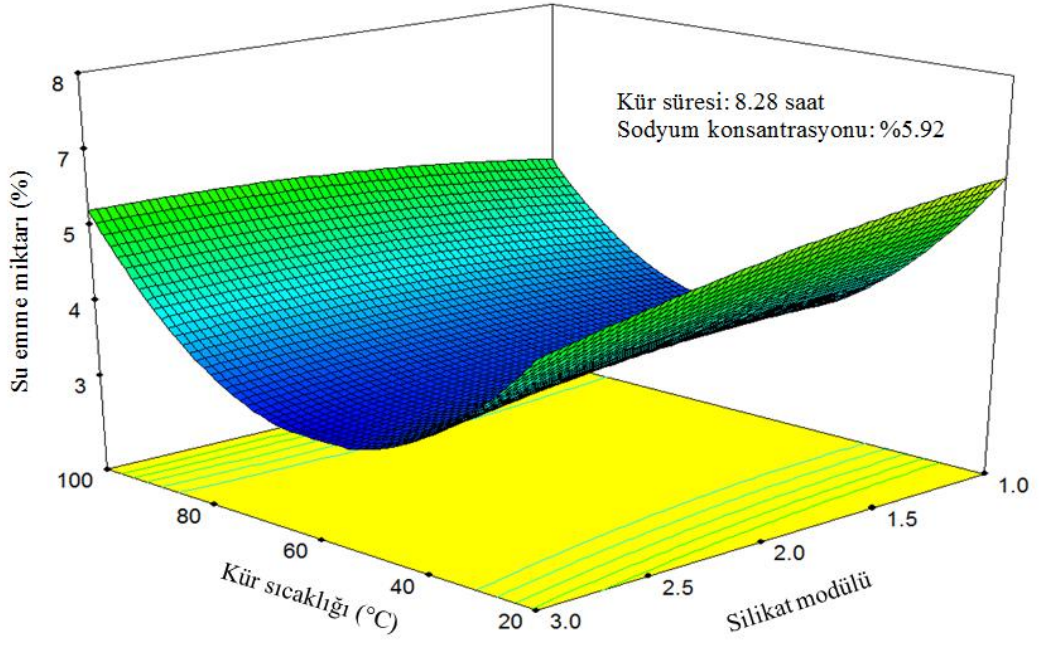
Şekil 4.78. Silikat modülünün su emme miktarına etkisi



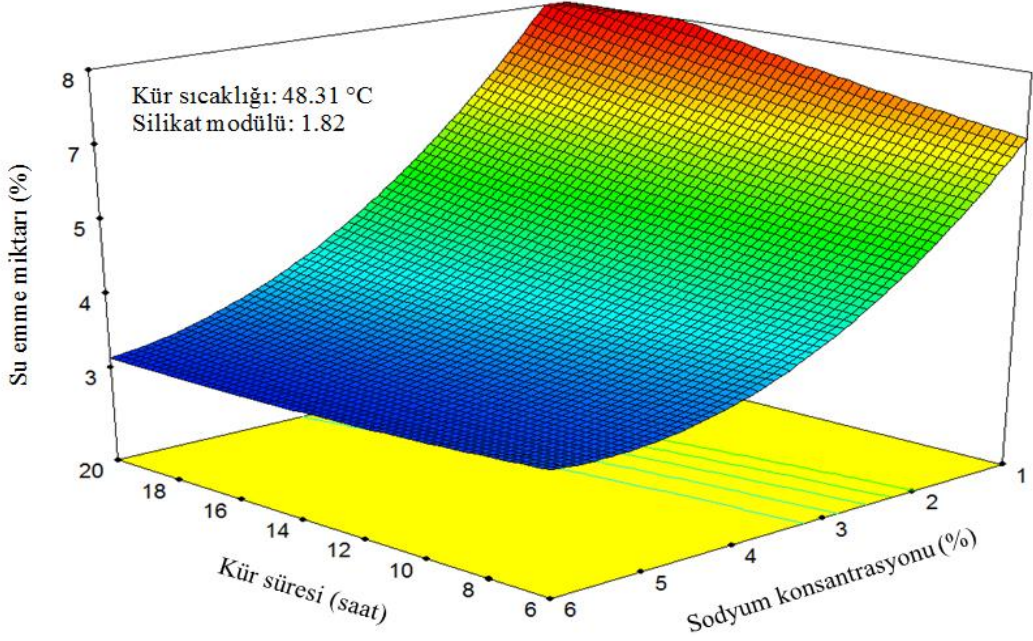
Şekil 4.79. Kür sıcaklığı-kür süresinin su emme miktarına etkisi



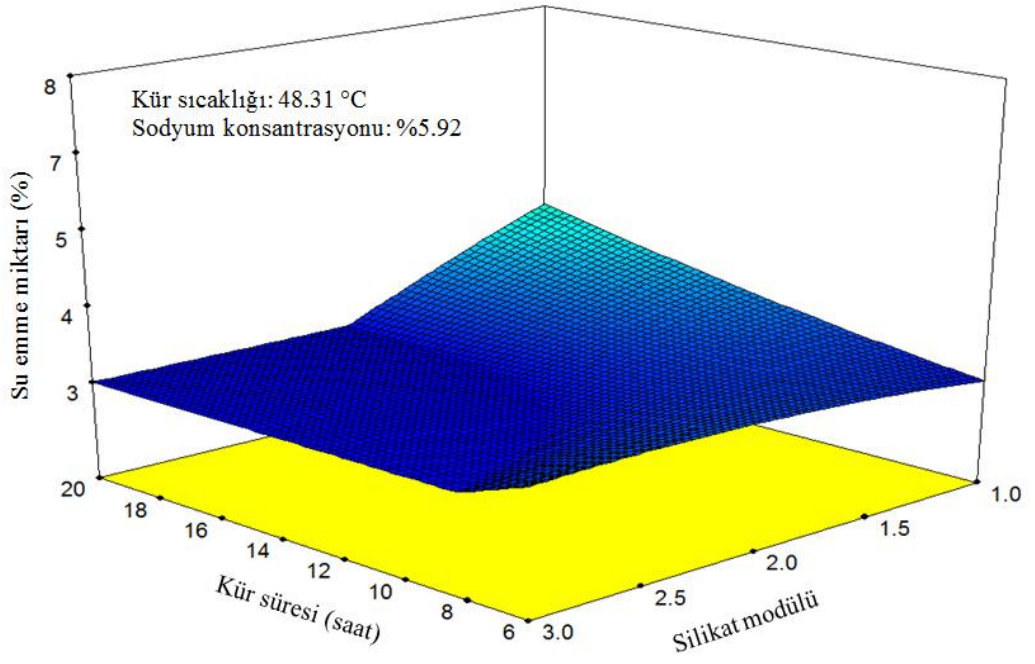
Şekil 4.80. Kür sıcaklığı-sodyum konsantrasyonunun su emme miktarına etkisi



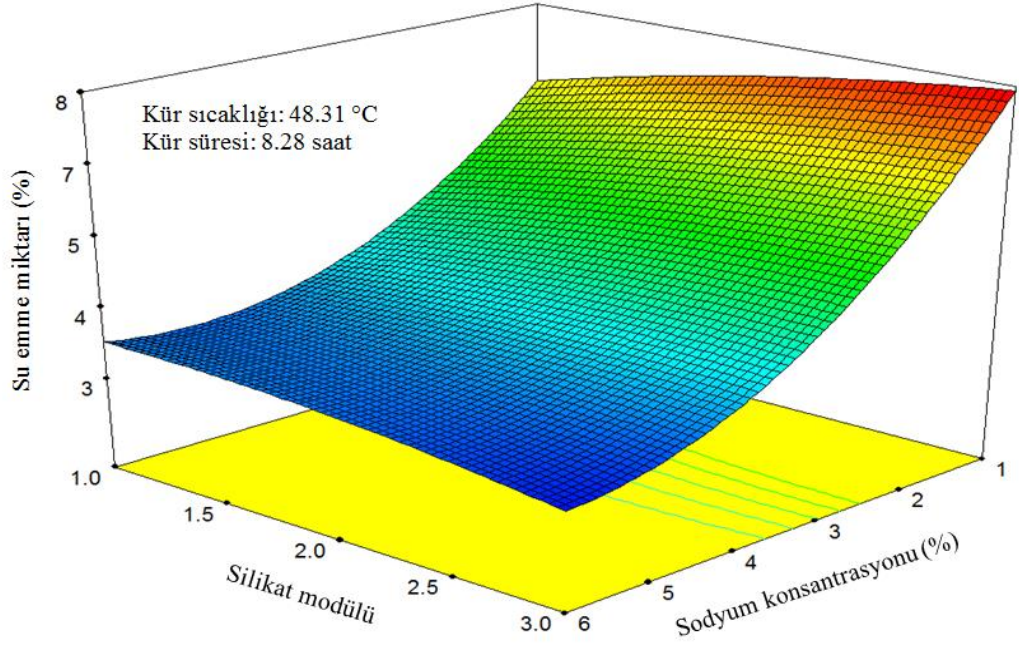
Şekil 4.81. Kür sıcaklığı-silikat modülünün su emme miktarına etkisi



Şekil 4.82. Kür süresi-sodyum konsantrasyonunun su emme miktarına etkisi



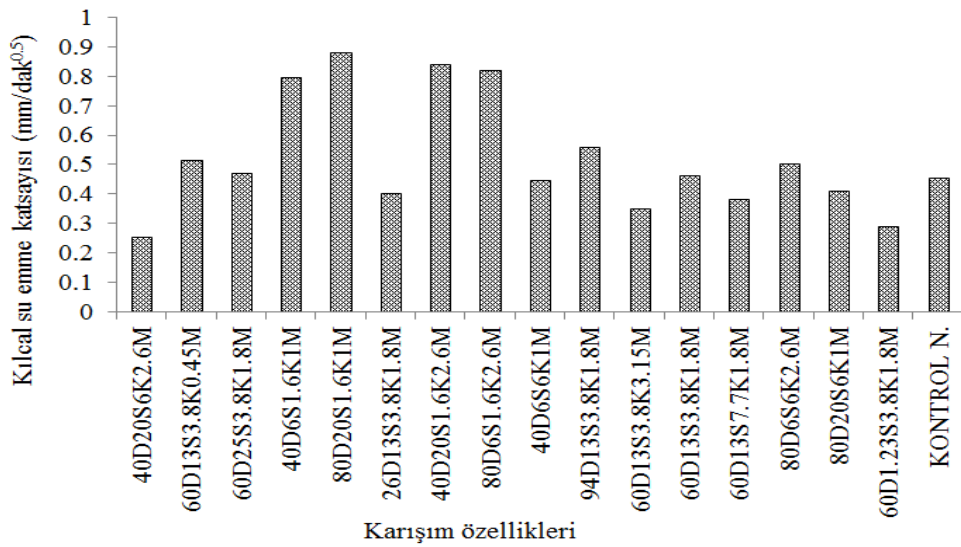
Şekil 4.83. Kür süresi-silikat modülünün su emme miktarına etkisi



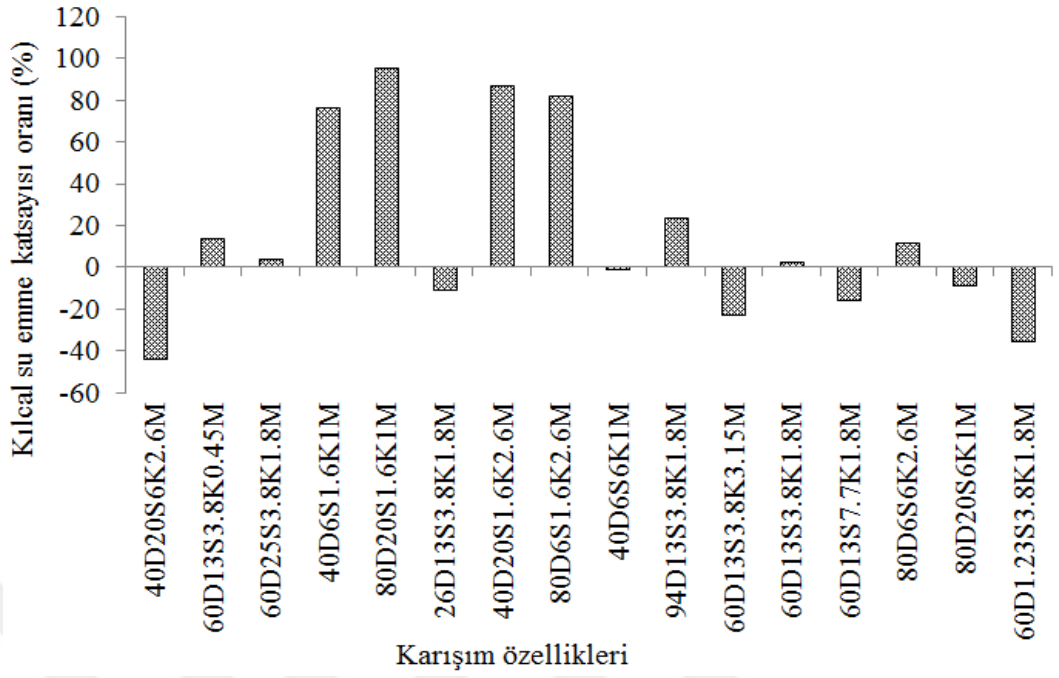
Şekil 4.84. Silikat modülü-sodyum konsantrasyonunun su emme miktarına etkisi

4.13. Kapiler (Kılcal) Su Emme Oranı

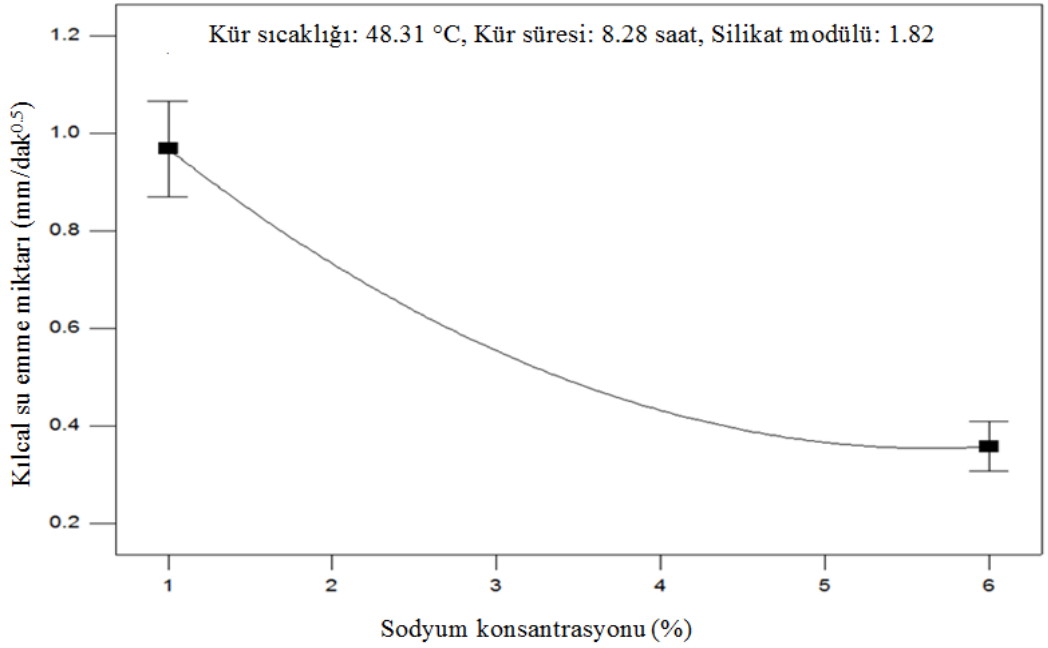
AAECB ve PÇ karışımlarının kılcallık katsayıları Çizelge 4.2’de verilmiştir. AAECB ve PÇ numunelerinin kılcallık katsayıları ve kontrol betonuna göre kılcallık katsayılarından meydana gelen yüzdesel değişimler sırası ile Şekil 4.85. ve Şekil 4.86.’da gösterilmiştir. Şekil 4.86.’da görüleceği üzere AAECB karışımlarının kılcallık katsayıları kontrol karışımına göre %95 e varan oranlarda daha yüksektir. Collins ve Sanjayan (2010), sıcaklık kürü uygulamasının AAECB mikro çatlak oluşumuna neden olduğunu ve kılcal su emme kapasitesinin aynı basınç dayanımına sahip AAECB, PÇ betonlarına göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. AAECB bünyesinde yüksek kür sıcaklığı ve alkali aktivatör kullanımından kaynaklanan mikro çatlak mevcudiyeti kılcal yolla emilen su miktarını önemli miktarda artırmıştır. Karışımdaki sodyum konsantrasyonuna bağlı olarak AAECB bünyesi göreceli olarak daha kompakt hale büründükçe kılcal yolla su emiliminde azalma meydana gelmiştir. Örneğin, K2 (40D20S6K2.6M) karışımı %6 sodyum konsantrasyonu ile üretilmiş olduğundan kılcallık katsayısı diğer AAECB karışımlarına göre daha düşüktür. Çizelge 4.3’deki varyans analizi sonuçları incelendiğinde kılcallık katsayısı üzerinde sodyum konsantrasyonu ve karesel etkisinin baskın olduğu görülecektir. Karışımdaki sodyum konsantrasyonu arttıkça kılcallık katsayısı belirgin şekilde azalmaktadır (Bakınız Şekil 4.87)



Şekil 4.85. AAECB ve kontrol numunelerinin kılcal su emme oranları



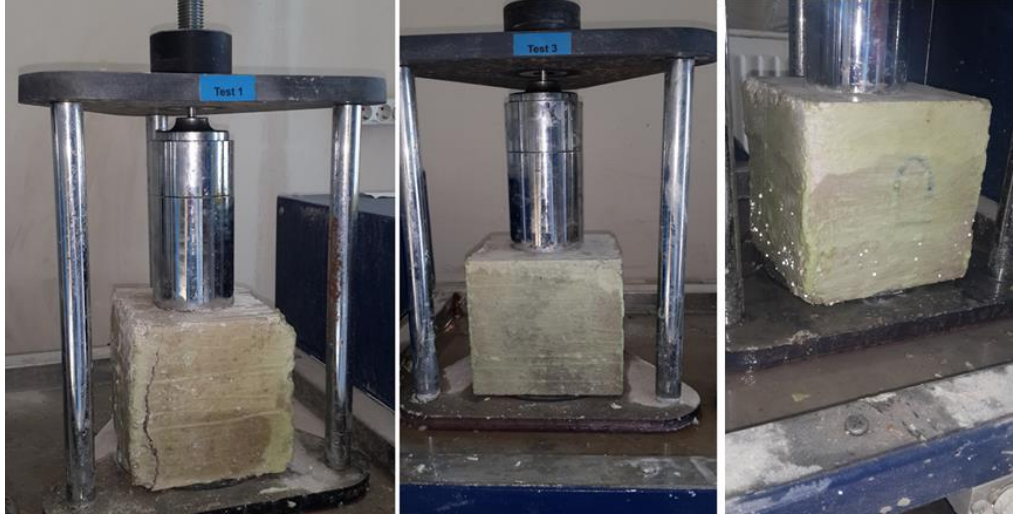
Şekil 4.86. AAECB numunelerin kontrol numunelerine göre kılcal su emme miktarı oranı



Şekil 4.87. Sodyum konsantrasyonunun kılcal su emme oranına etkisi

4.14. Basıncı Su Geçirirliği

Üretilmiş olan AAECB örnekleri TS EN 12350/8 standardında belirtildiği üzere basınçlı su geçirirliği deneyine tabi tutulmuştur. Deneye tabi tutulan tüm AAECB numunelerin deney süresi olan yetmiş iki saati tamamlayamadan üst yüzeyinde su belirdiği görülmüştür. Uygulanan kür sıcaklığı, kür süresi, sodyum konsantrasyonu ve silikat modülündeki değişiklikler basınç altında su işleme derinliği ile ilgili bir değişime yol açmamış, tüm numuneler yaklaşık bir saat içerisinde deney düzeneğinden çıkarılmak durumunda kalınmıştır. Aldea ve ark. (1999), yaptıkları çalışmada kontrollü olarak oluşturulan ve 100 mikron büyüklüğüne kadar olan çatlakların betonun geçirirliği üzerinde fazla etkisinin olmadığını ancak 100 mikrondan büyük çatlakların betonun geçirirliğini önemli ölçüde arttırdığını belirtmişlerdir. Yi ve ark. (2011), kontrollü olarak çatlak oluşturulan beton numuneleri 0.01 MPa ile 0.025 MPa arasında basınçlı su deneylerine tabi tutarak ilk 30 dakikada ve 4 gün sonunda geçirirliğliklerini ölçmüşlerdir. 30 dakika sonunda yapılan ölçümlerde betonların basınçlı su geçirirliğinin, çatlak genişliğinin 30 µm'den 50 µm'e artması ile 1.7 kat, 50 µm'den 100 µm'e artması ile 18.8 kat arttığını belirlemişlerdir. 4 gün sonunda yapılan ölçümlerde 30 µm-50 µm arasında boşluk bulunan betonların geçirirliğinin 30 dakika sonunda yapılan ölçümlerle neredeyse aynı olduğu ancak 50 µm-100 µm arasında çatlak bulunan betonların geçirirliğinin 190 kat arttığını belirtmişlerdir. Bünyesinde çok miktarda mikro çatlak barındıran AAECB örnekler yüksek (5 bar) basınca maruz bırakıldığında çatlaklar daha da büyümüş ve kısa sürede basınçlı su örnekler içerisinde ilerleme göstermiştir. Su tüm numune boyunca ilerleme gösterdiğinden su işleme derinlikleri belirlenememiştir. AAECB karışımlarına ait sayısal su işleme derinlikleri elde edilemediğinden, basınçlı su geçirirliğini temsil edebilecek regresyon modeli geliştirilememiş, bu deney sonuçları optimizasyon çalışmasına dahil edilememiştir. Şekil 4.88. ve 4.89.'da AAECB örneklerin basınçlı su geçirirliği deneyine tabi tutulmadan önceki ve sonraki hali görülmektedir. Şekil 4.90.'da 28 günlük AAECB sıcaklık küründen sonraki çatlak durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.88. Basınçlı su geçirimsizliği deney esnasında numunelerin durumu



Şekil 4.89. Basınçlı su geçirimsizliği deney sonrasında AAECB numunelerinin su işleme derinliği



Şekil 4.90. AAECB numunelerin çatlak durumu

4.15. Doğrulama Deneyleri

Çoklu objektifli optimizasyon çalışması sonucunda, program tarafından, tanımlanan sınır şartları sağlayacak dokuz farklı çözüm sunulmuştur. Sunulan çözümlerin erişilebilirlik değerleri 0.7481 ile 0.7479 arasında değişmektedir. En yüksek erişilebilirlik değerine sahip optimum üretim parametrelerine göre doğrulama deneyleri yapılmış ve beklenen deney sonuçları Çizelge 4.6'da verilmiştir. Elde edilen regresyon modellerinin deney sonuçları ile ne kadar tutarlı olduğu da oransal olarak Çizelge 4.6.'da belirtilmiştir. Anlamlı sonuçların elde edilebilmesi için ilk üretimdeki malzeme, ortam şartları ve üretim yöntemi değiştirilmeden uygulanmıştır.



5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, alkalilerle aktive edilmiş çimentosuz betonların üretim şartlarını optimize edebilmek için Tepki Yüzeyi Yöntemi kullanılarak deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Sodyum konsantrasyonu, silikat modülü, kür sıcaklığı ve kür süresi deneysel tasarımın bağımsız değişkenleri olarak tanımlanarak sodyum konsantrasyonu %1.6 ile %6, silikat modülü 1.0 ile 2.6, kür sıcaklığı 40°C ile 80°C ve kür süresi 6 saat ile 20 saat arasında değiştirilerek merkezi kompozit tasarım yöntemi ile 21 farklı karışım tasarlanmıştır. Alkalilerle aktive edilmiş betonların alkali çözeltisi-cüruf oranı 0.52, cüruf dozajı 400 kg/m³ te sabit tutularak 20±2 çökme değerlerine sahip betonlar üretildi. Üretilen betonların mekanik ve geçirimsizlik özellikleri belirlenmiştir. Deneysel tasarımın bağımsız değişkenleri ile bağımlı değişkenler (deney sonuçları) arasındaki ilişkileri temsil eden yüksek korelasyon katsayılarına sahip regresyon modelleri oluşturuldu. Oluşturulan regresyon modelleri kullanılarak belirlenen objektif ve kısıtlar altında çoklu objektifli optimizasyon çalışması yapılarak bağımsız değişkenlerin optimum üretim şartları belirlendi. Elde edilen optimum koşullarda laboratuvarında yeniden üretim yapılarak teorik verilerin doğrulaması yapılmıştır. Çalışma sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

1. AAECB basınç dayanımları 1, 7, 28, 90 ve 180. günlerde test edilerek zamana bağlı basınç dayanımı değişimi belirlenmiştir. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak aktive edilen cüruf lu betonların ilk yedi günde nihai basınç dayanımının yaklaşık %70'ini kazandığı, zaman ilerledikçe basınç dayanımının arttığı görülmüştür. Deney tasarımındaki bağımsız değişkenlerin etkisi ile basınç dayanımının kayda değer şekilde değiştiği, 28 günlük basınç dayanımının 3.3 ile 58.4 MPa arasında olduğu görülmüştür. Basınç dayanımı üzerinde en etkin bağımsız değişkenin sodyum konsantrasyonu olduğu, sodyum konsantrasyonu arttıkça basınç dayanımının kademeli olarak arttığı tespit edilmiştir. AAECB yarmada çekme dayanımlarının PÇ betona oranla daha düşük olduğu AAECB yarmada çekme yükü altında daha sünek davranış gösterdiği ancak Portland çimentolu betonlara göre daha düşük yarmada çekme dayanımına sahip olduğu görülmüştür. PÇ ile üretilen betonların çekme dayanımı basınç dayanımının yaklaşık %10'u kadar olduğu bilinmektedir. Ancak AAECB özellikle erken

yaşlarda reaksiyonların hızlı gelişmesine bağlı olarak fazla sayıda mikro çatlak oluşmakta ve çekme dayanımı %6 dolaylarında kalmaktadır.

2. AAECB numuneler 6950 ve 7200 kg yük taşıyarak 15-20 mm sıyrılma gerçekleştikten sonra donatı betondan ayrılmıştır. AAECB ve PÇ numuneler maksimum yüke ulaşana kadar donatı beton içinde deplasman yapmış ve maksimum yük kapasitesinde beton numuneler yaklaşık 120 ° açı oluşturarak ayrılmıştır. ANOVA sonuçlarından çekip çıkarma yüküne etki eden en baskın parametrelerin SC, SC², SM ve SM² ve etki oranlarının sırasıyla %75, %12,2, %7.4 ve %1.2 olduğu belirlenmiştir. Sodyum konsantrasyonundaki artış çekip çıkarma değerlerini 917 kg dan 5903 kg artırmıştır. AAECB basınç dayanımı ile çekip çıkarma yükü arasında logaritmik olarak ifade edilebilen bir fonksiyon elde edilmiştir.
3. AAECB üretim parametrelerine bağlı olarak PÇ betonlara göre daha fazla aşınmıştır. Karışımın sodyum konsantrasyonu arttıkça AAECB aşınma miktarında azalma meydana gelmiştir. ANOVA sonuçları AAECB aşınma miktarı üzerinde istatistiksel olarak sadece sodyum konsantrasyonu ve karesel etkisinin baskın olduğunu göstermiştir. Çekip çıkarma yükünün basınç dayanımı arasında doğru orantılı bir ilişkili olduğu belirlenmiştir. Basınç dayanımı 47.2 MPa olan K18 (80D6S1.6K2.6M) numunesinin kontrol numunesine göre %160 (maksimum) daha fazla ve basınç dayanımı 3.5 MPa olan K14 (60D13S7.5K1.8M) numunesinin ise %70 (minimum) daha az aşındığı belirlenmiştir.
4. AAECB ultrasonik dalga hızının kontrol betonlarına göre kür işlemine maruz kaldıktan sonra oluşan rötre çatlaklarından dolayı %2 (K6) ile %41 (K18) arasında düşük olduğu belirlenmiştir. Basınç dayanımları Portland çimentosu ile üretilen betonların basınç dayanımlarına eşit ve daha yüksek olan AAECB karışımlarının dahi ultrasonik dalga hızı değerleri çok düşük olduğu görülmüştür. AAECB ultrasonik dalga hızı değerlerinin 1900 ile 3817 m/s arasında değiştiği belirlenmiştir.. AAECB ultrasonik dalga hızını etkileyen bağımsız değişkenlerin (CT, TC, SC, SM, CT-SC, CT-SM, TC-SC, TC-SM ve SC-SM) olduğu belirlenmiştir. Ancak, ANOVA sonuçları

numunelerin ultrasonik dalga hızı iletme özelliği için en etkili parametrenin sodyum konsantrasyonu olduğunu göstermektedir.

5. AAECB boşluk yapılarının kontrol betonlarından farklı ve AAECB daha gözenekli ve boşluklu bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. AAECB su emme oranları kontrol betonuna kıyasla %80 e varan oranlarda daha yüksek su emme değerlerine ulaşmıştır. ANOVA sonuçlarına göre AAECB su emme oranları üzerinde en etkin bağımsız değişkenin %58.2 etki oranı ile sodyum konsantrasyonu olduğu belirlenmiştir. Basınç dayanımı yüksek olan betonlarda beklendiği gibi sodyum konsantrasyonu arttıkça su emme oranlarında azalma meydana gelmiştir.
6. AAECB yüzeyinde ve içyapısında çatlak sayısı ve boyutu fazla olduğundan kılcal yolla su emme miktarının kontrol numunelerine göre % 95 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Deney sonuçlarının istatistiksel analizine göre AAECB kılcal su emme miktarı sadece sodyum konsantrasyonundan etkilenmiş ve regresyon modelinde tek bağımsız değişken olarak sodyum konsantrasyonu etkimiştir. Karışımdaki sodyum konsantrasyonu arttıkça basınç dayanımı ile ters orantılı olarak kılcal su emmenin azaldığı belirlenmiştir.
7. AAECB basınçlı su geçirimsizliklerinin çok yüksek olduğu ve basınçlı su etkisinde 72 saat geçmeden beton içinde ilerleyen suyun beton numunenin en üst yüzeyine kadar ulaştığı görülmüştür. Geçirimsizliği çok yüksek olan numunelerde su basıncından dolayı çatlakların ve hatta parçalanmaların olduğu gözlenmiştir. Su işleme derinlikleri tüm numunelerde aynı olduğundan (numune yüksekliğince) sayısal ölçümler alınamamış, varyans analizi ve optimizasyon kısmına dahil edilememiştir.
8. AAECB hızlı klor geçirimsizliklerinin 4562-11021 Coulomb arasında değiştiği tespit edilmiştir. ASTM C1202'ye göre bu betonlar yüksek klor geçirimsizliğine sahip betonlar olarak tanımlanmaktadır. Kullanılan alkali aktivatörlerin gözeneklerde iletken çözelti oluşturduğu, yüksek Na⁺ ve OH⁻ konsantrasyonlarında potansiyel klor iyonu geçişlerinin arttığı, dolayısıyla alkalilerle aktive edilen betonların klor iyonu geçirimsizliklerinin yüksek olduğu kanısına varılmıştır. Klor iyonu geçirimsizliği üzerinde en etkin bağımsız değişkenin sodyum konsantrasyonu olduğu belirlenmiş ve sodyum

konsantrasyonunun artması klor iyonu geçişini kayda değer şekilde azaltmıştır.

9. AAECB karışımlarının gaz geçirimsizlik değerleri 1.56×10^{-17} - 5.33×10^{-17} m² arasında değişmiştir. ANOVA sonuçlarına göre gaz geçirimsizlik değerleri üzerinde en etkin bağımsız değişken %27 ile sodyum konsantrasyonu olmuştur. Ayrıca sodyum konsantrasyonunun silikat modülü ile ikili etkileşimi ve sodyum konsantrasyonunun karesel değişimi de gaz geçirimsizliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Sodyum konsantrasyonu arttıkça gaz geçirimsizliği azalmıştır. Kür süresi, kür sıcaklığı ve silikat modülü parametreleri gaz geçirimsizliği üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip olmasına rağmen, gaz geçirimsizliği üzerinde belirgin değişimlere yol açmamıştır.
10. AAECB ısı iletkenlik katsayıları 0.586 ile 1.112 W/mK arasında değişmiştir. AAECB ısı iletkenlikleri üzerinde en etkin bağımsız değişken %33 etki oranı ile sodyum konsantrasyonu-silikat modülü ikili etkileşimidir. Sodyum konsantrasyonu ve silikat modülünün birlikte artması ile ısı iletkenlik katsayısında belirgin artış görülmüştür.
11. Yapı malzemeleri ile ilgili deneysel çalışmalarda varyans analizi ve regresyon modeli gibi istatistiksel yöntemler kullanılarak deney sayısının azaltılabileceği ve birden fazla değişkenin etkisinin aynı anda az sayıda deney yaparak incelenebileceği belirlendi. Çalışma kapsamında belirlenmiş olan bağımsız parametrelerin değişim aralığı içerisinde, yüksek korelasyon katsayılı regresyon modelleri ile bağımlı değişkenlerin tahmin edilebileceği belirlenmiştir.
12. Çoklu objektifli optimizasyon yöntemi kullanılarak AAECB optimum üretim parametreleri belirlenmiştir. Çalışma kısıtları altında, mekanik özellikleri maksimize ederken aynı zamanda geçirimsizlik özelliklerini minimize edebilecek, üretim şartlarının sodyum konsantrasyonu %5.92, silikat modülü 1.82, kür sıcaklığı 48.3 °C ve kür süresi 8.28 saat olarak belirlenmiştir. Elde edilen optimum üretim parametrelerine bağlı olarak laboratuvarında doğrulama üretimleri gerçekleştirilmiş ve teorik olarak beklenen deney sonuçları ile laboratuvarında elde edilen doğrulama değerlerinin kabul edilebilir hata

sınırları içerisinde gerçekleştiği görülmüştür. Uygulamada istenen özelliklerin elde edilebilmesi için çoklu objektifli optimizasyon yönteminin kullanımı ile malzeme, zaman ve işçilikten tasarruf sağlanabileceği kanısına varılmıştır.



KAYNAKLAR

- ACI 116R Cement and Concrete Terminology.
- ACI 233 R03, Slag Cement in Concrete and Mortar.
- Aguilar R.A., Díaz O.B., García J.I.E., 2010. Lightweight concretes of activated metakaolin-fly ash binders, with blast furnace slag aggregates. **Construction and Building Materials**, 24:1166–75.
- Aldea C.M., Shah S.P. ve Karr A., 1999. Permeability of cracked concrete. **Materials and Structures**, 32: 370-376.
- Altan E. ve Erdoğan S.T., 2012. Alkali activation of a slag at ambient and elevated temperatures. **Cement and Concrete Composites**, 34(2): 131- 139.
- Alyamaç K.E. ve Aydın A.B., 2015. Concrete Properties Containing Fine Aggregate Marble Powder. *Korean Society of Civil Engineers*, 19(7): 2208-2216.
- Andersson R., Gram H.E., Malolepszy J. ve Deja J., 1988. Alkali-activated slag. **Swedish Cement and Concrete Research Institute**, Stockholm, 104.
- ASTM C 39, 1994. Standart test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. **Annual Book of ASTM Standarts**.
- ASTM C 496, 2004. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. **Annual Book of ASTM Standarts**.
- ASTM C 597-02, 1994. Standart test method for pulse velocity through concrete. **Annual Book of ASTM Standarts**.
- ASTM C 642, 2013. Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. **ASTM International**, West Conshohocken, PA.
- ASTM C 1202-97, 1997. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. **Annual Book of ASTM Standarts**.
- Aydın, S., 2010. Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu bağlayıcılı lifli kompozit geliştirilmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi.
- Aydın S., 2013. A ternary optimisation of mineral additives of alkali activated cement mortars. **Construction and Building Materials**, 43: 131- 138.
- Aydın, S. ve Baradan B., 2014. Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars. **Composites Part B: Engineering**, 57: 166-172.
- Bakharev T., Sanjayan J.G. ve Cheng Y. B., 1999. Effect of elevated temperature curing on properties of alkali-activated slag concrete. **Cement and Concrete Research**, 29(10): 1619–25.
- Bakharev T., 2005. Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. **Cement and Concrete Research**, 35: 1224- 1232.
- Bernal S.A., Meji'a de Gutierrez R., Provis J.L., ve Rose V., 2010. Effect of silicate modulus and metakaolin incorporation on the carbonation of alkali silicate-activated slag. **Cement and Concrete Research**, 40: 898–907.
- Bilim C. ve Atiş C.D., 2012. Alkali activation of mortars containing different replacement levels of ground granulated blast furnace slag. **Construction and Building Materials**, 28: 708-712.
- Bilim C., Karahan O., Atis C.D., İlkentapar S., 2015. Effects of chemical admixtures and curing conditions on some properties of alkali-activated cementless slag mixtures. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 19(3): 733-41.

- Bondar D., Lynsdale C.J. ve Milestone N.B., 2013. Alkali- activated natural pozzolan concrete as new construction material. **ACI Materials Journal**, 110: 3.
- Brooks J.J., 2002. Prediction of setting time of fly ash concrete. **ACI Materials Journal**, 99(6): 591-597.
- Burciaga-Diaz O. ve Escalante-Garcia J.I., 2013. Structure, mechanisms of reaction, and strength of an alkali-activated blast-furnace slag. **The American Ceramic Society**, 96(12): 3939– 3948.
- Cheng T.W. ve Chin J.P., 2003. Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. **Mineral Engineering**, 16: 205- 210.
- Chowdhury, U., 2013. Alkali activated systems understanding the influence of curing conditions and activator type/chemistry on the mechanical strength and chemical structure of fly ash/slag systems. Arizona State University, Master of science.
- Clean Technology Platform, 2015. <http://www.climatetechwiki.org/technology/blast-furnace-slag>, 17.20. Erişim tarihi: 04.08.2015.
- Collins F.G. ve Sanjayan J.G., 2010. Capillary Shape: Influence on water transport within unsaturated alkali activated slag concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 22(3):260-266.
- Demirboğa R., 2006. Thermal conductivity and compressive strength of concrete incorporation with mineral additives. **Building and Environment**, 42: 2467- 2471.
- Diaz O.B. ve Garcia D.J. I., 2013. Structure, mechanism of reaction and strength of an alkali activated blast furnace slag. **Journal of American Ceramic Society**, 96: 3939- 3948.
- Doğan U.A., Kurt E.B., Saran A.G. ve Özkul M.H., 2009. Benchmarking concretes with pozzolanic materials in terms of rapid chloride penetration test. **ACI Materials Journal**, 106: 3.
- Ersoy, U., 1985. Betonarme-Temel ilkeler ve Taşıma Gücü. Bizim Büro Basımevi, Ankara.
- Fernández-Jiménez A. ve Puertas F., 1997. Alkali-activated slag cements: Kinetic studies. **Cement and Concrete Research**, 27(3): 359– 368.
- Fernandez- Jimenez A., Palomo J.G., Puertas F., 1999. Alkali activated slag mortars mechanical strength behaviour. **Cement and Concrete Research**, 29: 1313– 1321.
- Fernández-Jiménez A. ve Palomo A., 2005. Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. **Cement and Concrete Research**, 35(10): 1984- 1992.
- Flower D.J.M. ve Sanjayan J.G., 2007. Green house gas emissions due to concrete manufacture, **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 12: 282- 288.
- Fu X. ve Chung D.D.L., 1999. Effect of admixtures on the thermal and thermo mechanical behavior of cement paste. **ACI Materials Journal**, 96(4): 455– 61.
- Gasteiger H.A., Frederik W.J., Streise R.C., 1992. Solubility of aluminosilicates in alkaline solutions and a thermodynamic equilibrium model. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, 31: 1183- 1190.

- Gebregziabihir B.S., Thomas R.İ. ve Peethamparan S., 2014. Very early age reaction kinetics and microstructural development in alkali activated slag. **Cement and Concrete Composites**, 55: 91- 102.
- Gürkan Y., Sahmaran M., Balcikanli M., Ozbay E. ve Lachemi M., 2015. Influence of cracking and healing on the gas permeability of cementitious composites. **Construction and Building Materials**, 85: 217-226.
- Hardjito D., Wallah S.E., Sumajouw D.M.J. ve Rangan B.V., 2003. Properties of geopolymer concrete with fly ash as source material: effect of mixture composition. **7th Canmet/ ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology**, Las Vegas USA.
- Hardjito D., Wallah S.E., Sumajouw D.M.J., Rangan B.V., 2004. Behaviour and strength of geopolymer concrete column. 18th Australasian conference on the mechanics of structures and materials (ACMSM)1-3, Perth Australia.
- Hossain M.M., Karim M.R., Hossain M.K., Islam M.N. ve Zain M.F.M., 2015. Durability of mortar and concrete containing alkali activated binder with pozzolans. **Construction and Building Materials**, 93: 95– 109.
- Hwang C.L. ve Lin C.Y., 1986. Strength development of blended blast furnace slag cement mortars. Proceedings of the 2nd International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, Spain, 2., **American Concrete Institute**, Detroit, MI, USA, 1986, 1323-1340.
- Isozaki K., Iwamoto S. ve Nakagawa K., 1986. Some properties of alkali activated slag cement. **8th Int. Cong. Chem. Cem.**, 6: 395- 399.
- Jaarsveld J.G.S., Deventer J.S.J. ve Lorenzen L., 1997. “The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part I. Theory and applications. **Minerals Engineering**, 10(7): 659-669.
- Jansson A., Lofgren I., Lundgren K. ve Gylltoft K., 2012. Bond of reinforcement in selfcompacting steel-fibre reinforced concrete. **Magazine of Concrete Research**, 64(7): 617–630.
- Karahan O. ve Yakupoğlu A., 2011. Resistance of alkali-activated slag mortar to abrasion and fire. **Advances in Cement Research**, 23(6): 289-297.
- Khale D., Chaudhary R., 2007. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. **Materials Science**, 42: 729- 746.
- Kim K.H., Jeon S.G., Kim J.K. ve Yang S., 2003. An experimental study on thermal conductivity of concrete. **Cement and Concrete Research**, 33: 363– 71.
- Kirschner A. ve Harmuth H., 2004. Investigation of geopolymer binders with respect to their application for building materials. **Ceramics-Silikaty**, 48: 117- 120.
- Kou J.L., Liu Y., Wu F. M., Fan J.T., Lu H.J. ve Xu Y.S., 2000. Fractal analysis of effective thermal conductivity for three-phase (unsaturated) porous media. **Journal of Applied Physics**, 106: 1- 6.
- Komljenovic M., Bascarevic Z. ve Bradic V., 2010. Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers. **Journal of Hazardous Materials**, 181: 35–42.
- Krivenko P.V., 1993. Sodium sulphate-based slag alkaline cements. Proc. 3rd Beijing Int. Symp. **Cement and Concrete**, Beijing, 2: 1032- 1037.
- London A.G., 1979. The thermal properties of lightweight concretes. **The International Journal of Lightweight Concrete**, 1(2): 71– 85.
- Lothenbach B., Scrivener K., Hooton R.D., 2011. Supplementary cementitious materials, **Cement and Concrete Research**, 41: 1244–1256.

- Moseson A.J., Moseson D.E., Barsoum M.W., 2012. High volume limestone alkali activated cement developed by design of experiment. **Cement and Concrete Composites**, 34: 328– 336.
- Myers, R.H., ve Montgomery, D.C., 2002. Response surface methodology, process and product optimization using designed experiments, **John Wiley & Sons**.
- Neville A.M., 1996. Properties of concrete, ELBS publication. **Addison-Wesley Longman Limited**, Essex, UK, 80.
- Nkinamubanzi P.C., Baalbaki M., Bickley J. ve Aitcin, P.C., 1998. The use of slag for making high performance concrete. Sixth NCB International Seminar on Cement and Building Materials, XIII, NCB, New Delhi, 13– 39.
- Official web site of Turkish cement manufacturer association, 2015. www.tcma.org, 18.36. Erişim tarihi: 04.08.2015.
- Onaran K., 1993. **Science Technical Press**, İstanbul, Turkey, p. 174.
- Palomo, A., Grutzeck, M.W., ve Blanco, M.T., 1999. Alkali-activated fly ashes, a cement for the future. **Cement and Concrete Research**, 29: 1323- 1329.
- Palomo A., Fuente J.I., 2003a. Alkali-activated cementitious materials: alternative matrices for the immobilisation of hazardous wastes: part 1. stabilisation of boron. **Cement and Concrete Research**, 33: 281- 288.
- Palomo A. ve Palacios A., 2003b. Alkali-activated cementitious materials: alternative matrices for the immobilisation of hazardous wastes: part II. stabilisation of chromium and lead. **Cement and Concrete Research**, 33: 289- 295.
- Palomo A., Alonso S., Fernandez-Jiménez A., Sobrados I. ve Sanz J., 2004. Alkaline activation of fly ashes: NMR study of the reaction products. **Journal of the American Ceramic Society**, 87: 1141- 1145.
- Paramesvaran P.S. ve Chatterjee A.K., 1986. Alkali activation of Indian blast furnace slags. **8th Int. Cong. Chem. Cem.**, 4: 86- 91.
- Phair J.W., Deventer J.S.J., 2001. Effect of silicate activator pH on the leaching and material characteristics of waste-based inorganic polymers. **Mineral Engineering**, 14: 289- 304.
- Pia G. ve Sanna U., 2013. Intermingled fractal units model and electrical equivalence fractal approach for prediction of thermal conductivity of porous materials. **Applied Thermal Engineering**, 61: 186– 92.
- Piatak N.M., Parsons M.B., Seal R.R., 2015. Characteristics and environmental aspects of slag: A review. **Applied Geochemistry**, 57: 236–266.
- Prince M.J.R. ve Singh B., 2013. Bond behavior of deformed steel bars embedded in recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, 49: 852–862.
- Pu X.C., 1988. Summary reports of research on alkali-activated slag cement and concrete. **Chongqing Institute of Architecture and Engineering**, 6.
- Puertas F., Martínez-Ramírez S., Alonso S. ve Vázquez T., 2000. Alkali-activated fly ash/slag cement - strength behaviour and hydration products. **Cement and Concrete Research**, 30: 1625- 1632.
- Ravikumar, D., 2012. Property development, microstructure, and performance of alkali activated fly ash and slag systems. Clarkson University, Department of Civil and Environmental Engineering, Doctor of philosophy.
- Regourd M., 1980a. Characterization of thermal activation of slag cements, proceedings. 7th International **Congress on the Chemistry of Cements**, Septima, Paris, 2, 105-111.

- Regourd M., 1980b. Microanalytical studies (X-Ray Photo Electron Spectrometry) of surface hydration reactions of cement compounds. **Philosophical Transactions**, Series A., London, 310, 85-91.
- Regourd M., 1980c. Structure and behavior of slag Portland cement hydrates. Proceedings, 7th International **Congress on the Chemistry of Cements**, Septima, Paris, 1, III-2, 10-18.
- Roy A., Schilling P. J. ve Eaton H.C., US Patent, 5435843.
- Ryu, G.S., Lee Y.B., Koh K.T. ve Chung Y.S., 2013. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. **Construction and Building Materials**, 47: 409-418.
- Sahmaran M., Bilici Z., Ozbay E., Erdem T.K., Yucel H.E. ve Lachemi M., 2013. Improving the workability and rheological properties of Engineered Cementitious Composites using factorial experimental design. **Composites: Part B Engineering**, 45: 356–68.
- Sathonsaowaphak A., Chindapasirt P. ve Pimraksa K., 2009. Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. **Journal of Hazardous Materials**, 168: 44–50.
- S.C. Pal, A. Mukherjee ve S.R. Pathak, 2003. Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. **Cement and Concrete Research**, 33: 1481-1486.
- Shi C. ve Qian J., 2000. High performance cementing materials from industrial slags-a review. **Resources, Conservation and Recycling**, 29: 195–207.
- Sonebi M., 2004. Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans. **Cement and Concrete Research**, 34: 1199–1208.
- Sonebi M., Lachemi M. ve Hossain K.M.A., 2013. Optimization of rheological parameters and mechanical properties of superplasticised cement grouts containing metakaolin and viscosity modifying admixture. **Construction and Building Materials**, 38:126–38.
- Swanepoel J.C. ve Syrtdom C.A., 2002. Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. **Applied Geochemistry Journal**, 17: 1143-1148.
- Talling B., Effect of curing conditions on alkali-activated slags, 1989. **3d Inter. Conf. Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete**, Norway, SP114-74: 1519–1546.
- Talling B., Effect of curing conditions on alkali-activated slags, 1989. **3rd Inter. Conf. on Fly-ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete**, Norway, SP114-72: 1485- 1500.
- Tang S.W., Chen E., Shao H.Y. ve Li Z.J., 2015. A fractal approach to determine thermal conductivity in cement pastes. **Construction and Building Materials**, 74: 73- 82.
- Tanzer R., 2010. Dependency of the physical properties of alkali-activated granulated blast furnace slag on the nature of the alkaline activator. **8th fib PhD Symposium in Kgs Lyngby**, Denmark.
- Terzano R., Spagnuolo M., Medicu L., Vekemans B., Vincze L., Janssens K. ve Ruggiero P., 2005. Copper stabilization by zeolite synthesis in polluted soils treated with coal fly ash. **Environmental Science and Technology**, 39: 6280- 6287.

- Thokchom S., Ghosh P. ve Ghosh S., 2009. Effect of water absorption, porosity and sorptivity on durability of geopolymer mortars. **Journal of Engineering and Applied Sciences**, 4: 28– 32.
- Thomas M., Hooton R.D., Rogers C. ve Fournier B., 2012. 50 years old and still going strong. **Concrete International**, 34: 35– 40.
- Topçu İ.B., Canbaz M., 2009. Sülfatlı ortamların alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın çürüflü harçların mikroyapısına etkisi. *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10: 309-318.
- Torgal F.P. , Gomes J.C. ve Jalali S, 2008. Alkali-activated binders: a review part 1. historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. **Construction and Building Materials**, 22: 1305–1314.
- Trends in global CO₂ emissions report, 2014. **PBL Netherlands Environmental Assessment Agency**.
- TS EN 12390-8, 2002. Basınç altında su işleme derinliğinin tayini. **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara.
- TS 706 EN 12620, 2009. Beton agregaları. **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara.
- TS 699, 2000. Tabii yapı taşları-muayene ve deney metotları. **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara.
- Türker H. T., Balçıkanlı M., Durmuş İ. H., Özbay E. ve Erdemir M., 2016. Microstructural alteration of alkali activated slag mortars depend on exposed high temperature level. **Construction and Building Materials**, 104: 169-180.
- Türker H.T., Ozbay E. ve Balcıkanlı M., 2016. Pullout capacity development of cast in place anchors with embedded studs. **Construction and Building Materials**, 102: 39-43.
- Wang S.D., Scrivener K.L., Pratt P.L., 1994. Factors affecting the strength of alkali-activated slag, **Cement and Concrete Research**, 24(6): 1033– 1043.
- Wang S.D., Pu X.C., Scrivener, K.L. ve Pratt, P.L., 1995. Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems. **Advances in Cement Research**, 27: 93– 102.
- Wang K., Shah S.P. ve Mishulovich A., 2004. Effects of curing temperature and NaOH addition on hydration and strength development of clinker-free CKD- fly ash binders. **Cement and Concrete Research**, 34(2): 299-309.
- Wang W. C., Wang H. Y. ve Lo M. H., 2015. The fresh and engineering properties of alkali activated slag as a function of fly ash replacement and alkali concentration. **Construction and Building Materials**, 84: 224-229.
- Woolard C.D., Petrus K. ve Horst V.D., 2000. ISSN 0378- 4738-Water, SA 26:531.
- Xu H. ve Van Deventer J.S.J., 2000. **International Journal of Mineral Processing**, 59- 247.
- Xiong C.J, Ban C.H., Pei X. ve Fang Z., 2004. International workshop on sustainable development and concrete technology, Beijing, p. 299.
- Yahia A. ve Khayat K.H., 2001. Experimental design to evaluate interaction of high range water reducer and anti washout admixtures in high performance cement grouts. **Cement and Concrete Research**, 31: 749–57.
- Yalçın, M., 2009. Çelik lif donatılı betonların performansına dayalı tasarımı ve optimizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi

- Ya-min G., Yong-hao F., Duo Y., Yong-fan G. ve Chen-hui Z., 2015. Properties and microstructure of alkali-activated slag cement cured at below-and about-normal temperature. **Construction and Building Materials**, 79: 1-8.
- Yang K.H., Song J.K., Ashour A.F., Lee E.T., 2008. Properties of cementless mortars activated by sodium silicate. **Construction and Building Materials**, 22(9): 1981-89.
- Yardımcı, M.Y., 2007. Çelik lifli kendiliğinden yerleşen betonların reolojik, mekanik, kırılma parametrelerinin araştırılması ve optimum tasarımı. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi
- Yuksel I., Bilir T. ve Ozkan O., 2007. Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate. **Building and Environment**, 42(7): 2651–2659.
- Zhang Y.J., Zhao Y.L., Li H. H. ve Xu D.L., 2008. Structure characterization of hydration products generated by alkaline activation of granulated blast furnace slag. **Journal of Materials Science**, 43: 7141- 7147.

ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında Malatya’da doğdu. İlkokul, ortaokul ve lise öğrenimini Malatya’da tamamladı. 2008 yılında başladığı Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden 2012 yılında mezun oldu. 2013 yılında Mustafa Kemal Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Şubat 2014 tarihinde yüksek lisans eğitimine başladı ve Mart 2015’de Mustafa Kemal Üniversitesinden ayrılarak, yeni kurulan İskenderun Teknik Üniversitesi’nde Ocak 2016 arasında Yüksek Lisans öğrenimine devam etti. 2016 yılında İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalından Yüksek Lisans derecesiyle mezun oldu. Halen aynı bölümde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.