



**ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ HARÇLARIN  
FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ÇOKLU  
OPTİMİZASYONU**

**Yunus Emre AVŞAR**

**Yüksek Lisans Tezi**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Timur CİHAN  
2021**

T.C.  
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ HARÇLARIN FİZİKSEL VE  
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ÇOKLU OPTİMİZASYONU

Yunus Emre AVŞAR

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Timur CİHAN

TEKİRDAĞ-2021

Her hakkı saklıdır.



Bu tez NKÜBAP tarafından NKUBAP.06.YL.21.307 numaralı proje ile desteklenmiştir.

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ HARÇLARIN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ÇOKLU OPTİMİZASYONU

**Yunus Emre AVŞAR**

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Timur CİHAN

Günümüzde yoğun enerji tüketimi ve olumsuz çevresel etkilerinden dolayı mümkün olduğunca az çimento tüketimi amacıyla farklı malzemelerin kullanımı önem kazanmıştır. Bu amaçla alkalilerle aktive edilmiş materyallerin (AAM) kullanımı oldukça yaygınlaşmaktadır. Çalışmada; alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu ve uçucu külün Portland çimentosuyla melezleştirilmesi ile üretilen harçların fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada; uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC), Portland çimentosu (PÇ), sodyum hidroksit (NaOH), sodyum metasilikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), standart kum, distile su ve kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır. Çalışma; ön deneme çalışması ve deneysel çalışma olmak üzere 2 aşamadan oluşmaktadır. Ön deneme çalışmasında, etki değişkenlerinin (ağırlıkça aktivatör oranı, A; ağırlıkça toplam alkali solüsyon/bağlayıcı oranı, B; NaOH molarite değeri, C; ağırlıkça  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  solüsyon suyu/ $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  solüsyon oranı, D) ana, etkileşim ve ikinci derece terimlerinin tepki değişkenleri (ultrasonik atımlı dalga hızı, UPV; eğilmede çekme dayanımı,  $f_t$ ; basınç dayanımı,  $f_c$ ) üzerindeki etki düzeyleri belirlenerek seçilen değişim aralıklarında optimum fiziksel ve mekanik özellikleri sağlayan deneme noktası tespit edilmiştir (A: 1,88; B: 0,4; C: 11,5; D: 60; UPV: 4,18;  $f_t$ : 6,6;  $f_c$ : 45,3). Ön deneme çalışması kapsamında belirlenen optimum deneme noktasındaki etki değişkenlerine ait değerler kullanılarak deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada; etki değişkenlerinin (A-PÇ, B-(YFC+UK), C-Gün) ana, etkileşim ve ikinci derece terimlerinin tepki değişkenleri (ultrasonik atımlı dalga hızı, UPV; eğilmede çekme dayanımı,  $f_t$ ; basınç dayanımı,  $f_c$ ; birim hacim ağırlık, BHA; ağırlıkça su emme oranı, ASE; boşluk oranı, BO) üzerindeki etki düzeyleri belirlenerek seçilen değişim aralıklarında optimum fiziksel ve mekanik özellikleri sağlayan deneme noktası tespit edilmiştir. Optimizasyon; mekanik, fiziksel ve hem mekanik hem de fiziksel tepki değişkenleri için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Elde edilen arzuedirlik değerleri sırasıyla 1; 0,97 ve 0,67'dir.

**Anahtar kelimeler:** Alkalilerle aktive edilmiş malzemeler, Geopolimer, Basınç dayanımı, ANOVA, Optimizasyon, SEM

## ABSTRACT

MSc. Thesis

### MULTIPLE OPTIMIZATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ALKALI ACTIVATED MORTARS

**Yunus Emre AVŞAR**

Tekirdağ Namık Kemal University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mehmet Timur CİHAN

Today, due to intense energy consumption and negative environmental effects, the use of different materials has gained importance in order to consume as little cement as possible. For this purpose, the use of alkali activated materials (AAM) is becoming widespread. In the study; the physical and mechanical properties of the mortars produced by hybridizing alkali activated blast furnace slag and fly ash with Portland cement were investigated. In the study; fly ash (FA), blast furnace slag (BFS), Portland cement (PC), sodium hydroxide (NaOH), sodium metasilicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), standard sand, distilled water and chemical additives were used. It consists of two stages: a preliminary trial study and an experimental study. In the preliminary trial study, the effect levels of the main, interaction and second order terms of the effect variables (ratio of activator, A; total alkaline solution/binder ratio, B; NaOH molarity value, C;  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  solution water/ $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  solution ratio, D) on the response variables (ultrasonic pulse velocity, UPV; flexural strength,  $f_r$ ; compressive strength,  $f_c$ ) were determined and the trial point that provided the optimum physical and mechanical properties in the selected variation intervals was determined (A: 1,88; B: 0,4; C: 11,5; D: 60; UPV: 4,18;  $f_r$ : 6,6;  $f_c$ : 45,3). The experimental study was carried out by using the values of the effect variables at the optimum trial point determined within the scope of the preliminary trial study. In experimental study, the effect levels of the main, interaction and second order terms of the effect variables (A-PC, B-(YFC+UK), C-Age) on the response variables (ultrasonic pulse velocity, UPV; flexural strength,  $f_r$ ; compressive strength,  $f_c$ ; unit volume weight, BHA; water absorption ratio, ASE; void ratio, BO) were determined and the trial point that provided the optimum physical and mechanical properties in the selected variation intervals was determined. Optimization performed separately for mechanical, physical and both mechanical and physical response variables. The desirability values obtained are 1; 0,97 and 0,67 respectively.

**Key words:** Alkali activated materials, Geopolymer, Compressive strength, ANOVA, Optimization, SEM

2021, 132 pages

<b>ÖZET.....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER.....</b>	<b>iii</b>
<b>ÇİZELGE DİZİNİ.....</b>	<b>vi</b>
<b>ŞEKİL DİZİNİ.....</b>	<b>viii</b>
<b>SİMGELER ve KISALTMALAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>TEŞEKKÜR.....</b>	<b>xii</b>
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1. Puzolan .....	4
1.1.1. Uçucu Kül (UK) .....	4
1.1.1.1. UK'nin Sınıflandırılması .....	5
1.1.1.2. UK'nin Kimyasal, Mineralojik, Morfolojik Yapıları ve Özellikleri.....	6
1.1.1.3. Kimyasal Oksitlerin UK Özelliklerine Etkisi .....	7
1.1.1.4. UK'nin Fiziksel Özellikleri.....	8
1.1.1.5. UK'nin Kullanım Alanları .....	9
1.1.2. Yüksek Fırın Cürufu (YFC) .....	10
1.1.2.1. YFC'nin Sınıflandırılması .....	11
1.1.2.2. YFC'nin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri .....	11
1.1.2.3. YFC'nin Kullanım Alanları .....	12
1.2. Portland Çimentosu (PÇ).....	14
1.2.1. PÇ'nin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri .....	15
1.2.2. PÇ'nin Sınıflandırılması .....	18
1.2.3. PÇ'nin Tarihçesi .....	19
1.3. Alkali ile Aktive Edilmiş Materyaller (AAM) .....	19
1.3.1. AAM Kimyası .....	20
1.3.2. AAM'nin Tarihsel Gelişimi.....	21
1.3.3. AAM'nin Kullanım Alanları .....	21
<b>2. KAYNAK ÖZETLERİ.....</b>	<b>23</b>
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>31</b>
3.1. Malzeme .....	31
3.1.1. Uçucu Kül (UK) .....	31
3.1.2. Yüksek Fırın Cürufu (YFC) .....	31

3.1.3. Portland Çimentosu (PÇ).....	32
3.1.4. Aktivatör.....	33
3.1.5. Kum.....	34
3.1.6. Distile Su.....	34
3.1.7. Kimyasal Katkı Maddesi.....	35
3.2. Yöntem.....	35
3.2.1. Deneysel Tasarım.....	35
3.2.1.1. Ön Deneme Çalışması.....	37
3.2.1.2. Deneysel Çalışma.....	39
3.2.2. Harç Numunelerinin Üretimi.....	42
3.2.3. Deneyler.....	44
3.2.3.1. Yayılma Tablası Deneyi.....	44
3.2.3.2. Priz Süresi Tayini.....	45
3.2.3.3. Birim Hacim Ağırlık (BHA) Deneyi.....	45
3.2.3.4. Ağırlıkça Su Emme ve Boşluk Oranı Tayini.....	46
3.2.3.5. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Deneyi.....	47
3.2.3.6. Eğilmede Çekme Deneyi.....	47
3.2.3.7. Basınç Deneyi.....	48
3.2.3.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi.....	49
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....</b>	<b>50</b>
4.1. Ön Deneme Çalışması Bulguları.....	50
4.1.1. İstatistiksel Analiz.....	51
4.1.2. Tepki Yüzeyleri.....	57
4.1.2.1. UPV'ye ait tepki yüzeyleri.....	57
4.1.2.2. Eğilmede çekme deneyine ait tepki yüzeyleri.....	62
4.1.2.3. Basınç deneyine ait tepki yüzeyleri.....	66
4.1.3. Optimizasyon.....	71
4.2. Deneysel Çalışma Bulguları.....	74
4.2.1. Dayanım Aktivite İndeksi.....	75
4.2.2. Deneme Noktalarının Tasarımı.....	75
4.2.3. Referans Numuneler ile Deneme Noktalarının Karşılaştırılması.....	78
4.2.4. Yayılma Tablası Değeri.....	79
4.2.5. Priz Süresi.....	80

4.2.6. İstatistiksel Analiz .....	80
4.2.7. Tepki Yüzeyleri .....	88
4.2.7.1. UPV'ye ait tepki yüzeyleri.....	88
4.2.7.2. Eğilmede çekme deneyine ait tepki yüzeyleri .....	89
4.2.7.3. Basınç deneyine ait tepki yüzeyleri .....	90
4.2.7.4. BHA'ya ait tepki yüzeyleri .....	92
4.2.7.5. ASE'ye ait tepki yüzeyleri .....	93
4.2.7.6. BO'ya ait tepki yüzeyleri .....	94
4.2.8. Optimizasyon.....	96
4.2.9. SEM Analizi .....	101
<b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....</b>	<b>104</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>110</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>120</b>



## ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 1.1. Uçucu küllerin ASTM C618'e göre sınıflandırılması.....	5
Çizelge 1.2. Bazı kritik kimyasal özellikler ve sınır değerleri .....	8
Çizelge 1.3. Bazı kritik kimyasal özellikler ve gerekleri .....	11
Çizelge 1.4. Portland-YFC çimento çeşitlerinin klinker ve YFC oranları .....	13
Çizelge 1.5. G20 ülkelerinin 2019 yılında ürettikleri çimento miktarı .....	15
Çizelge 1.6. PÇ'ye ait bazı kritik kimyasal özellikler ve sınır değerleri.....	16
Çizelge 1.7. Çimentonun anabileşenleri.....	16
Çizelge 1.8. Çimentonun anabileşenlerinin özellikleri.....	17
Çizelge 1.9. Çimento anabileşenlerinin hidrasyon reaksiyonları ve ortaya çıkan ürünler ....	17
Çizelge 1.10. Çimentonun sınıflandırılması.....	18
Çizelge 1.11. AAM ile inşa edilen bazı yapılar hakkında bilgi.....	22
Çizelge 2.1. Literatür özeti .....	30
Çizelge 3.1. UK, YFC ve PÇ'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	33
Çizelge 3.2. CEN referans kumunun elek analizi için sahip olması gereken sınır değerler.....	34
Çizelge 3.3. Ön deneme çalışmasına ait deneme noktaları .....	38
Çizelge 3.4. Deneysel çalışmaya ait deneme noktaları .....	40
Çizelge 3.5. Deneysel tasarım özeti .....	41
Çizelge 4.1. Ön deneme çalışması etki değişkenlerine ait deneysel tasarım özeti.....	50
Çizelge 4.2. Ön deneme çalışması tepki değişkenlerine ait deneysel tasarım özeti.....	51
Çizelge 4.3. UPV'ye ait varyans analiz sonuçları .....	52
Çizelge 4.4. $f_f$ 'e ait varyans analiz sonuçları.....	53
Çizelge 4.5. $f_c$ 'ye ait varyans analiz sonuçları.....	54
Çizelge 4.6. Uyum istatistiği .....	55
Çizelge 4.7. Etki ve tepki değişkenlerine ait sınırlamalar .....	72
Çizelge 4.8. Ön deneme çalışmasında etki ve tepki değişkenlerine ait optimum değerler .....	74
Çizelge 4.9. YFC ve UK'ye ait 28 günlük dayanım aktivite indeksi .....	75
Çizelge 4.10. Deneysel çalışmaya ait deneme noktaları .....	76
Çizelge 4.11. Deneysel çalışmadaki etki değişkenlerine ait deneysel tasarım özeti.....	77
Çizelge 4.12. Deneysel çalışmadaki tepki değişkenlerine ait deneysel tasarım özeti.....	77
Çizelge 4.13. Referans numunelerinin deney sonuçları .....	77
Çizelge 4.14. Referans numuneler ile deneme noktalarının karşılaştırılması .....	78

Çizelge 4.15. Yayılma tablası deney sonuçları.....	79
Çizelge 4.16. Bileşen malzeme miktarları farklı olan harç numunelerine ait priz süreleri .....	80
Çizelge 4.17. UPV'ye ait varyans analiz sonuçları.....	81
Çizelge 4.18. $f_f$ 'e ait varyans analiz sonuçları.....	82
Çizelge 4.19. $f_c$ 'e ait varyans analizi sonuçları .....	83
Çizelge 4.20. BHA'ya ait varyans analizi sonuçları .....	83
Çizelge 4.21. ASE'ye ait varyans analizi sonuçları .....	84
Çizelge 4.22. BO'ya ait varyans analizi sonuçları .....	84
Çizelge 4.23. Uyum istatistiği .....	85
Çizelge 4.24. Mekanik özellikler için etki ve tepki değişkenlerine ait sınırlamalar .....	96
Çizelge 4.25. Fiziksel özellikler için etki ve tepki değişkenlerine ait sınırlamalar .....	97
Çizelge 4.26. Mekanik ve fiziksel özellikler için etki ve tepki değişkenlerine ait sınırlamalar..	97
Çizelge 4.27. Deneysel çalışma optimizasyon sonucu elde edilen optimum deneme noktaları .	100

## ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 1.1. CaO-SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> üçlü diyagramında YFC'nin yeri .....	12
Şekil 1.2. PÇ ve YFC üretiminde açığa çıkan CO <sub>2</sub> salınım değerleri .....	13
Şekil 1.3. AAM'nin oluşum süreci.....	21
Şekil 1.4. AAM kullanılan ilk yüksek katlı bina (a) ve AAM kullanılan bir bina (b) .....	22
Şekil 3.1. UK (a) ve SEM görüntüsü (b) .....	31
Şekil 3.2. YFC (a) ve SEM görüntüsü (b) .....	32
Şekil 3.3. Portland çimentosu.....	32
Şekil 3.4. NaOH solüsyonu (a) NaOH (b) ve Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (c) .....	34
Şekil 3.5. CEN referans kumu .....	34
Şekil 3.6. Distile su.....	35
Şekil 3.7. 2 faktör için klasik merkezi birleşik tasarıma ait koordinat düzlemi .....	36
Şekil 3.8. y'nin maksimum değerini elde etmek için arzu edilirlik fonksiyonları (a), y'nin minimum değerini elde etmek için arzu edilirlik fonksiyonları (b) ve y'nin olası hedefinin oldukça yakın değerlerini elde etmek için arzu edilirlik fonksiyonları (c).....	36
Şekil 3.9. YFC ve Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> solüsyonu karışımı (a) ile YFC, Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> solüsyonu, UK ve NaOH solüsyonu karışımı (b) .....	43
Şekil 3.10. Streç filmle sarılmış kalıplar .....	43
Şekil 3.11. Sızdırmazlık kürü işlemine tabi tutulan numuneler .....	43
Şekil 3.12. Deneylere tabi tutulmaya hazır numuneler .....	44
Şekil 3.13. Kesik huniye yerleştirilen harç (a), huniden ayrılan harç (b) ve çapı ölçülen harç (c)....	44
Şekil 3.14. Yayılma tablası deneyinde kullanılan aletler .....	45
Şekil 3.15. Priz süresi tayini deneyi .....	45
Şekil 3.16. Arşimet terazisi (a) ve etüv (b).....	46
Şekil 3.17. Ultrasonik atımlı dalga hızı deney düzeneğinin üstten görünümü (a) ve yandan görünümü (b).....	47
Şekil 3.18. Eğilmede çekme deney düzeneği .....	48
Şekil 3.19. Basma deney düzeneği (a) ve deney sonucunda numunenin kırılması (b) .....	49
Şekil 3.20. SEM görüntüleri için üretilen hamur numuneleri .....	49
Şekil 4.1. UPV (a), f <sub>f</sub> (b) ve f <sub>c</sub> (c) için gerçek ve tahmini değerler .....	56
Şekil 4.2. UPV için AB (a) ve AC (b) terimlerinin etkileşim grafikleri .....	57
Şekil 4.3. UPV için BC (a) ve BD (b) terimlerinin etkileşim grafikleri.....	58
Şekil 4.4. UPV için CD teriminin etkileşim grafiği .....	58
Şekil 4.5. UPV için AB terimine ait kontur ve 3D grafikleri .....	59

Şekil 4.6. UPV için AC terimine ait kontur ve 3D grafikleri .....	60
Şekil 4.7. UPV için BC terimine ait kontur ve 3D grafikleri .....	60
Şekil 4.8. UPV için BD terimine ait kontur ve 3D grafikleri .....	61
Şekil 4.9. UPV için CD terimine ait kontur ve 3D grafikleri .....	61
Şekil 4.10. $f_f$ için AB (a) ve AD (b) terimlerine ait etkileşim grafikleri .....	62
Şekil 4.11. $f_f$ için BC (a) ve CD (b) terimlerine ait etkileşim grafikleri.....	63
Şekil 4.12. $f_f$ için AB terimine ait kontur ve 3D grafikleri.....	64
Şekil 4.13. $f_f$ için AD terimine ait kontur ve 3D grafikleri.....	64
Şekil 4.14. $f_f$ için BC terimine ait kontur ve 3D grafikleri .....	65
Şekil 4.15. $f_f$ için CD terimine ait kontur ve 3D grafikleri.....	65
Şekil 4.16. $f_c$ için AB (a) ve AC (b) terimlerine ait etkileşim grafikleri .....	66
Şekil 4.17. $f_c$ için AD (a) ve BC (b) terimlerine ait etkileşim grafikleri .....	67
Şekil 4.18. $f_c$ için BD (a) ve CD (b) terimleri için etkileşim grafikleri .....	67
Şekil 4.19. $f_c$ için AB terimine ait kontur ve 3D grafikleri.....	68
Şekil 4.20. $f_c$ için AC terimine ait kontur ve 3D grafikleri.....	69
Şekil 4.21. $f_c$ için AD terimine ait kontur ve 3D grafikleri .....	69
Şekil 4.22. $f_c$ için BC terimine ait kontur ve 3D grafikleri.....	70
Şekil 4.23. $f_c$ için BD terimine ait kontur ve 3D grafikleri.....	70
Şekil 4.24. $f_c$ için CD terimine ait kontur ve 3D grafikleri.....	71
Şekil 4.25. Etki ve tepki değişkenlerinin arzu edirlilik değerleri .....	73
Şekil 4.26. UPV (a), $f_f$ (b), $f_c$ (c), BHA (d), ASE (e) ve BO (f) için gerçek ve tahmini değerler ..	87
Şekil 4.27. UPV için AB teriminin etkileşim grafiği .....	88
Şekil 4.28. UPV için AC terimine ait kontur ve 3D grafikleri .....	89
Şekil 4.29. $f_f$ için AB teriminin etkileşim grafiği .....	89
Şekil 4.30. $f_f$ için AC terimine ait kontur ve 3D grafikleri.....	90
Şekil 4.31. $f_c$ için AB teriminin etkileşim grafiği.....	91
Şekil 4.32. $f_c$ için AC terimine ait kontur ve 3D grafikleri.....	91
Şekil 4.33. BHA için AB teriminin etkileşim grafiği .....	92
Şekil 4.34. BHA için AC terimine ait kontur ve 3D grafikleri.....	93
Şekil 4.35. ASE için AB teriminin etkileşim grafiği.....	93
Şekil 4.36. ASE için AC terimine ait kontur ve 3D grafikleri.....	94
Şekil 4.37. BO için AB teriminin etkileşim grafiği.....	95
Şekil 4.38. BO için AC terimine ait kontur ve 3D grafikleri.....	95

Şekil 4.39. Mekanik özelliklerin dikkate alındığı optimizasyon için arzu edilebilirlik değerleri ...	98
Şekil 4.40. Fiziksel özelliklerin dikkate alındığı optimizasyon için arzu edilebilirlik değerleri.....	99
Şekil 4.41. Mekanik ve fiziksel özelliklerin dikkate alındığı optimizasyon için arzu edilebilirlik değerleri .....	99
Şekil 4.42. PÇ katkısız 28 günlük numunenin 10 (a) ve 5 mikron (b) boyutlarındaki SEM görüntüleri .....	101
Şekil 4.43. %7,5 PÇ katkılı 28 günlük numunenin 10 (a) ve 20 mikron (b) boyutlarındaki SEM görüntüleri .....	101
Şekil 4.44. %15 PÇ katkılı 28 günlük numunenin 10 (a) ve 3 mikron (b) boyutlarındaki SEM görüntüleri .....	102
Şekil 4.45. %30 PÇ katkılı 28 günlük numunenin 5 ve 3 mikron boyutlarındaki SEM görüntüleri...	102
Şekil 4.46. 28 günlük referans numunesinin 20 (a) ve 5 mikron (b) boyutlarındaki SEM görüntüleri .....	103

## SİMGELER VE KISALTMALAR

°C	: Santigrat derece
cm <sup>2</sup>	: Santimetrekare
cm <sup>3</sup>	: Santimetreküp
g	: Gram
kg	: Kilogram
kWh	: Kilowattsaat
m <sup>2</sup>	: Metrekare
m <sup>3</sup>	: Metreküp
mm	: Milimetre
MWh	: Megawattsaat
t	: Ton
µm	: Mikrometre
Ar-Ge	: Araştırma-Geliştirme
ASTM	: Amerikan Test ve Materyal Topluluğu
CEM	: Çimento
CEN	: Avrupa Standardizasyon Komitesi
MPa	: Megapaskal
TL	: Türk Lirası
TS EN	: Türk Standartları Avrupa Normu

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmasının hazırlanmasında maddi ve manevi anlamda desteklerini esirgemeyen danıőmanım Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Timur CİHAN'a teşekkür ederim.

Araştırma görevlisi olmam yolunda ve uzmanlık alanımı belirlemem konusunda büyük emeğe sahip Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŐ, Prof Dr. Okan KARAHAN ve Dr. Öğr. Üyesi Serhan İLKENTAPAR'a teőekkürü bir borç bilirim.



## 1. GİRİŞ

Beton, günümüzün en önemli yapı malzemesi olup Dünya genelinde her yıl 10 milyar tondan fazla üretilmektedir [1]. 2019 yılında Avrupa Birliği üyesi ülkelerde üretilen beton miktarı 260 milyon m<sup>3</sup> iken ülkemizde 77 milyon m<sup>3</sup>'tür [2]. Beton; basınç dayanımının yüksek olması, yangına ve paslanmaya karşı dayanıklı olması, hammadde temini için az enerji gerektirmesi, rijit bir yapıya sahip olması, bakımının kolay olması, bileşenlerinin kolay temin edilebilmesi ve ucuz olması gibi birçok avantaja sahiptir [3]. Ancak bunların yanında bünyesinde birtakım dezavantajlar da bulundurmaktadır. En büyük dezavantajı, betonda bağlayıcı olarak kullanılan Portland çimentosunun (PÇ) üretimi aşamasında açığa çıkan karbondioksit (CO<sub>2</sub>) miktarıdır. Yaklaşık 1.000 kg PÇ üretimi, atmosfere yaklaşık 1.000 kg CO<sub>2</sub> salınmasına neden olmaktadır. Bu da 1 m<sup>3</sup> beton üretiminde yaklaşık 400 kg PÇ kullanıldığı için havaya yaklaşık 400 kg CO<sub>2</sub> salındığı anlamına gelmektedir. Çimento endüstrisinin, Dünya çapında açığa çıkan CO<sub>2</sub> miktarının yaklaşık %6-7'sinden sorumlu olduğu tahmin edilmektedir [1, 4]. 2019 yılında Dünyada üretilen PÇ miktarı 4,1 milyar ton, ülkemizde ise 57 milyon tondur [5]. Dünya genelinde 2019 yılında toplam enerji tüketimi 580 Exajoule (162 trilyon kWh) iken ülkemizde 6,5 Exajoule (1,8 trilyon kWh)'dür [6]. PÇ üretimi sırasında harcanan enerjinin Dünya genelinde harcanan enerjinin %6-7,5'ine tekabül ettiği [7] göz önüne alındığında; Dünya genelinde PÇ üretimi için tüketilen enerji miktarının 11,1 milyar MWh, ülkemizde ise 122 milyon MWh olduğu görülmektedir. Başka bir deyişle; son 10 yılda küresel çapta ortalama enerji tüketimi yaklaşık 13 milyar ton ham petrole (91 milyar varil), ülkemizde ise 125 milyon ton ham petrole (875 milyon varil) eşdeğerdir [8]. 1 varil ham petrolün 2019 yılındaki değerinin yaklaşık 65 dolar olduğu [9] ve PÇ üretimi sırasında harcanan enerjinin Dünya çapında harcanan enerjinin %6-7,5'ine tekabül ettiği [7] göz önüne alındığında; PÇ üretimi için tüketilen enerji miktarının parasal değerinin Dünyada yaklaşık 53 trilyon TL, ülkemizde ise 530 milyar TL olduğu görülmektedir.

Günümüzde yoğun enerji tüketimi ve olumsuz çevresel etkilerinden dolayı mümkün olduğunca az çimento tüketimi amacıyla farklı malzemelerin kullanımı önem kazanmıştır. Bu amaçla alkalilerle aktive edilmiş materyallerin (AAM) kullanımı oldukça yaygınlaşmaktadır. AAM; alüminosilikat içerikli katı materyaller (yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı, metakaolin vb.) ile alkali çözeltilerin reaksiyona girmesi sonucu meydana gelmekte olup [10] çimentoya alternatif ve çevre dostu bir malzeme olma özelliği taşımaktadır [11]. AAM



kullanımının yaygınlaşması için malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin istenilen düzeyde ve uygulanabilir olması gerekmektedir.

AAM üretiminde kullanılan alüminosilikat içerikli katı materyallerin genelde puzolan olduğu görülmektedir. Puzolanların kendi başlarına bağlayıcılık özelliği bulunmamaktadır. Fakat bu malzemeler çok ince bir şekilde öğütüldüğünde sönmüş kireçle nemli ortamlarda kimyasal reaksiyona girerek hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanmaktadır. Puzolanlar çoğunlukla silis-alümin kökenli olup inorganiktir [12].

Cüruf, çeşitli metal endüstrilerinden yan ürün olarak elde edilen atık maddelerdir [13]. Yüksek fırın cürufunun (YFC) yüksek miktarda kalsiyum oksit (CaO) içeriğinden ötürü kendi kendine hidrolik bağlayıcılık özelliği oldukça fazladır. Bu özelliği ile PÇ'ye en yakın yapay puzolandır [14]. Dolayısıyla çalışmada birincil malzeme olarak kullanılmıştır. Literatür çalışmaları incelendiğinde; ağırlıkça %20 oranına kadar kullanımı işlenebilirliği olumlu yönde etkilerken kullanım oranının %15'i aşması betonda mikroçatlak oluşumuna sebep olmaktadır [15]. YFC'nin rötre ve yüksek karbonatlaşma derinliği sorunu olduğu da bilinmektedir [16]. Ayrıca tamamen YFC kullanılarak hazırlanan karışımlarda kristal yapı oluşumu gözlenmektedir [17].

Uçucu kül (UK); pulvarize kömür ile çalışan termik santrallerde yanma neticesinde elde edilen bir yan ürün olan çok ince kalıntılardır [18]. YFC kullanımında gözlenen kristal yapı sorununu ortadan kaldırmak için çalışmada ikincil malzeme olarak kullanılmıştır. YFC ile UK'nin birlikte kullanımı homojenize ve yoğunluğu artırarak dayanım artışı sağlamaktadır [17]. UK'nin erken dayanımının düşük olması sebebiyle tamamen UK ile hazırlanan karışımlarda reaksiyona girmeyen partiküller bulunabilmektedir [19]. Fakat YFC'nin varlığı sayesinde bu sorun ortadan kalkmaktadır. Ayrıca UK'nin ilerleyen zamanlarda daha homojen ve yoğun bir yapıya sahip olması sayesinde ileri yaş dayanımları yüksektir [17].

PÇ; kil ve kalker karışımı hammaddelerin pişirilmeleriyle ortaya çıkan klinkerin çok az miktarda alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi neticesinde elde edilmektedir [20]. YFC'nin mikroçatlak oluşumu, rötre ve karbonatlaşma derinliği sorununu minimize etmek için çalışmada PÇ kullanılmıştır. PÇ; çapraz bağlantı ağları üreterek daha kompakt bir yapı elde edilmesini sağlamakta ve erken/nihai dayanımı artırmaktadır. Ayrıca ısıl kür/yüksek miktarda solüsyon kullanım ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır [21]. Dolayısıyla çalışmada PÇ, katkı maddesi ve üçüncül malzeme olarak tercih edilmiştir.

Çalışmanın amacı; AAM ile PÇ'nin melezleştirilmesi sonucu geleneksel harçların fiziksel/mekanik özelliklerine sahip alternatif harç malzemesi üretilmesidir. Bu amaç doğrultusunda, PÇ üretim miktarını azaltarak, enerji tasarrufu ve minimum karbon salınımı ile beton endüstrisinde çevre dostu sürdürülebilir üretime katkı sağlanması hedeflenmiştir.

Çalışma kapsamında üretilen harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla alkalilerle aktive edilmiş yapay puzolanlara belirli miktarda (maksimum %30) PÇ ilave edilmiştir. Çok az PÇ ilavesi ile üretilen AAM'lerin optimum fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olması çimento kullanımını azaltarak küresel çapta her yıl yaklaşık 8 milyar MWh (45 trilyon TL), ülkemizde ise 85 milyon MWh (450 milyon TL) enerji tasarrufu sağlayacaktır. Bu sayede ülkemizin ekonomik anlamda dışa bağımlılığı azalacaktır. UK, en fazla açığa çıkan (yılda 15 milyon ton) yapay puzolandır [22] (endüstriyel atık malzeme). Ülkemizde çelik üretiminde atık madde olarak yılda yaklaşık 300 bin ton çelik cürufu açığa çıkmaktadır [23]. Bu yüzden AAM üretiminde UK ve YFC kullanımı; çevre kirliliğinin önlenmesi ve endüstriyel atıkların bertarafı açısından oldukça önemli olup YFC ve UK'nin tedarik işleriyle ilgilenen yeni firmaların ortaya çıkması sayesinde istihdam katkısı sağlanacaktır. Bu durum inşaat sektöründe sürdürülebilir üretime yönelimi artıracak ve başta hava kirliliği olmak üzere çevresel sorunların en aza indirilmesine katkı sağlayacaktır. Ayrıca daha temiz bir atmosfer sayesinde insanların yaşam kalitesi artacak ve hava kirliliğinin sebep olduğu akciğer kanseri vb. hastalıkların görülme oranının azalmasına vesile olacaktır.

Bazı literatür çalışmaları [24-26] incelendiğinde ısı kütür işlemi uygulanarak AAM üretiminin gerçekleştirildiği görülmekte olup ısı kütür işlemi için numuneler özel olarak tasarlanmış fırınlarda ısıtılmaktadır. Bu durum ciddi anlamda elektrik enerjisi sarfiyatına sebep olmaktadır. Ayrıca Dünya'da her yıl tatlı su kaynaklarının %15'i enerji üretiminde kullanılmaktadır [27]. Bu nedenle çalışma kapsamında elektrik enerjisinden tasarruf etmek ve tatlı su kaynaklarını korumak amacıyla AAM üretiminde kütür sıcaklığı etki değişkeni olarak seçilmemiş olup numunelerin kütür işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Böylece hem ülke ekonomisine katkı sağlanması hem de tatlı su kaynaklarının korunmasına katkı sağlanacaktır.

Yeni nesil melez harç üretimi, farklı Ar-Ge çalışmalarının yapılmasına olanak tanıyacaktır. Dolayısıyla konu ile ilgilenen araştırmacı sayısında ve niteliğinde artış meydana gelecektir.

## 1.1. Puzolan

Puzolan; kendi başlarına bağlayıcı özelliği olmayan, çok ince bir şekilde öğütüldüğünde sönmüş kireçle nemli ortamlarda kimyasal reaksiyona girerek hidrolitik bağlayıcılık özelliği kazanan ve çoğunlukla silis-alümin kökenli olup inorganik yapıya sahip malzemedir [12].

Öğütülerek ince toz haline getirilmiş doğal puzolanların kullanım şekilleri aşağıda verilmiştir [28]:

- Doğrudan kireç ile karıştırılarak
- Katkılı çimento üretiminde katkı olarak
- Beton için mineral katkı olarak

“Doğrudan kireç ile karıştırılarak” puzolan kullanım şekli günümüzde çok yaygın olmayıp yol alt temeli işleri vb. uygulamalarda kullanılmaktadır [28].

Puzolanlar 2 gruba ayrılmaktadır: doğal puzolan ve yapay puzolan. Doğal puzolanlar ise volkanik kökenli ve ısıtma işlemi görmüş puzolanlar olarak iki gruba ayrılmaktadır. Volkanik kökenli puzolanlar çoğunlukla volkanik kökenli malzemeler olup yakın zamanda volkanik aktivitelerin meydana geldiği bölgelerde bulunur. Volkanik cam, volkanik kül ve volkanik tuf bu grupta yer almaktadır [12]. Isıtma işlemi görmüş puzolanlar ise döner fırınlarda 1-2 saat boyunca 700-900°C sıcaklıkta ısıtma işlemi gören malzemelerdir. Kil, şeyl, metakaolin ve diatomit bu grupta yer almaktadır [28]. Çeşitli endüstrilerin atık maddeleri olan UK, YFC, silis dumanı ve pirinç kabuğu külü gibi maddeler yapay puzolan grubunda yer almaktadır [29].

### 1.1.1. Uçucu Kül (UK)

UK; pulvarize kömür ile çalışan termik santrallerde yanma neticesinde elde edilen bir yan ürün olan çok ince kalıntılardır [18]. Silisli-alüminli amorf yapıya ve çok ince yapılı taneciklere sahip oldukları için puzolanik özellik gösterir [30]. UK; miktar olarak en çok açığa çıkan yapay puzolandır. Ülkemizde yılda yaklaşık 15 milyon ton [22], Dünya’da ise 600 milyon ton UK açığa çıkmaktadır [31]. Bu kadar fazla miktarda UK açığa çıkmasına rağmen bu miktarın yaklaşık %15’i değerlendirilmektedir [31].

Endüstriyel yakıt olarak veya konutlarda ısınma amacıyla kullanım imkânı olmayan düşük kalorili kömürlerden, elektrik enerjisi üretmek amacıyla kurulan termik santrallerde yararlanılmaktadır. Bu tip kömürler, termik santrallerde buhar üreten kazanları ısıtmak

amacıyla çoğunlukla pulvarize (öğütülmüş) halde yakılır. Kırılıp inceltelen kömür tozları önceden ısıtılmış hava ile karıştırılır ve yanma için kazan içine üflenir [32]. Bu yanma sonucunda farklı özellikte çeşitli gazlar ve bazı atıklar (kömür külleri ve yanmayan kalıntı) açığa çıkar. Oluşan atığın %75-80'lik birincil kısmı çok küçük tanecikler halinde yanma odasından gazlarla birlikte uçar. Bu tanecikler, gazlarla birlikte bacadan havaya çıkarken elektrostatik filtreler veya elektromanyetik yöntemler kullanılarak tutulur ve kül toplayıcı silolara gönderilir. Daha sonra silolardan konveyör bantlarla termik santrallerin uzağında atık olarak depolanır. Gelişmiş santrallerde bu malzemelerin tamamına yakını gaz çıkmadan önce tutulmaktadır [33].

Endüstrinin diğer kesimlerinde yararlanılamayan düşük kalorili linyit kömürlerini termik santrallerde kullanmak, ülkemizin enerji üretiminde dışa bağımlılığını azaltmanın yollarından biridir. Dolayısıyla yıllık açığa çıkan UK miktarlarının gelecekte daha fazla artacağı tahmin edilmektedir [31]. Bu nedenle UK'nın farklı endüstri alanlarında hammadde olarak kullanılabilirliği oldukça önem kazanmaktadır. Çalışma kapsamında beton endüstrisinde (inşaat endüstrisi) UK kullanım miktarını artırarak, oluşabilecek çevresel ve ekonomik sorunların minimize edilmesine katkı sağlanması hedeflenmiştir.

#### 1.1.1.1. UK'nin Sınıflandırılması

ASTM C618 standardı; UK'yi kimyasal bileşimlerine ve elde edildikleri kömür cinsine bağlı olarak F ve C sınıfı olmak üzere 2'ye ayırmıştır. Bu sınıflandırma Çizelge 1.1'de verilmiştir [34].

Çizelge 1.1. Uçucu küllerin ASTM C618'e göre sınıflandırılması

Sınıf	Tanım
F	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%70$ olmalıdır. Taş kömüründen elde edilen uçucu küllerdir. Yalnızca puzolanik özelliğe sahiptirler.
C	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%50$ olmalıdır. Linyit kömüründen elde edilen uçucu küllerdir. Puzolanik özelliklerinin yanında bir miktar bağlayıcılık özellikleri de vardır.

TS EN 197-1'e göre uçucu küller silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar [35]:

- V sınıfı UK: Esasen reaktif silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) ile alüminyum oksitten ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) oluşan, geri kalanı demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ve diğer bileşenler olan, çoğunluğu puzolanik özelliğe sahip küresel taneciklerden meydana gelen küllerdir. Bu grupta, reaktif kireç ( $\text{CaO}$ ) oranının %10'dan fazla, reaktif silis miktarının ise %25'ten az olmaması istenmektedir.

- W sınıfı UK: Esas olarak  $\text{CaO}$ , reaktif  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'den oluşan, geri kalanı  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve diğer bileşenler olan hidrolik ve/veya puzolanik özelliğe sahip küllerdir. Bu küllerde,  $\text{CaO}$  oranının %10'dan, reaktif silis miktarının ise %25'ten az olmaması istenmektedir.

Bir başka tür sınıflandırma ise son yıllarda oldukça geniş kabul gören  $\text{CaO}$  miktarına göre yapılan sınıflandırmadır [36].

- Düşük kireçli UK:  $\text{CaO}$  miktarı %10'dan azdır.
- Yüksek kireçli UK:  $\text{CaO}$  miktarı %10'dan fazladır. Puzolanik özelliklerinin yanında kendi başına bağlayıcılık özelliği de gösterirler.

UK'nin sınıflandırılmasında bir diğer tür ise  $\text{CaO}$  ve  $\text{SO}_3$  miktarına göre yapılan sınıflandırmadır [37].

- Silikoalüminoz UK: Taş kömüründen elde edilmekte olup esas yapısı silikoalüminatlardan oluşmaktadır.

- Sülfokalsik UK: Genellikle linyit kömüründen elde edilmekte olup diğerlerine oranla yüksek miktarda kireç ve  $\text{SO}_3$  içermektedir.

- Silikokalsik UK: Genellikle linyit kömüründen elde edilmekte olup kireç ve silika miktarı yüksektir.

### 1.1.1.2. UK'nin Kimyasal, Mineralojik, Morfolojik Yapıları ve Özellikleri

UK'nin kimyasal bileşimi; kullanılan kömürün yapısı, jeolojik kökeni vb. koşullara bağlıdır. UK'nin kimyasal yapısı esas olarak  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 'ten oluşur. Bunların haricinde az miktarda  $\text{CaO}$ , alkaliler ve yanmamış kömür parçacıkları da içerir [18].

UK'nin puzolanik özellikleri kimyasal kompozisyonlarından çok mineralojik yapılarına bağlıdır. UK; camsı veya kristalize yapılardan meydana gelmektedirler. Kimyasal yapılarında Si, Al, Ca, Fe ve S gibi elementler bulunmaktadır. Kömürün yakılma şekline göre bu elementler  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  ve  $\text{SO}_3$  gibi bileşenleri meydana getirir. Ayrıca UK'nin yapısında  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  gibi oksitler de bulunabilir. Düşük kireçli UK'de ana aktif bileşen;

alümina silikat bileşiminde amorf ve camsı fazdır. Düşük kireçli UK'nin camsı faz miktarı, yüksek kireçli UK'nin camsı faz miktarından daha fazladır. Ancak yüksek kireçli UK daha reaktiftir. Çünkü bunların camsı ve kristalize fazları kısmen kendi başına bağlayıcılık özelliği sağlamaktadır [31].

UK'nin tane şekli ve büyüklüğü dağılımında; kömürün kökeni ile üniform olması, kömürün öğütülme durumu ile yanma koşulları, yanmanın üniformluğu ve toz toplama sistemi gibi işlemlere bağlı faktörler etkili olmaktadır [38]. UK'de hem camsı küresel hem de düzensiz şekilli tanecikler bulunmaktadır [31]. Düşük kireçli küller şekil dağılımı açısından genellikle homojen mikroyapıya sahip olup bu küllerde çoğunlukla camsı faza karşılık gelen içi boşluksuz tam küresel tanecikler, senosfer ve plerosfer bulunmaktadır. Yüksek kireçli küller ise homojen olmayan mikroyapıya sahip olup bu küllerde hem küresel hem de köşeli düzensiz şekilli tanecikler mevcuttur [39].

UK'nin granülometrik bileşiminin çoğunun 10-20 µm arasında olması ve küresel şekle sahip olması puzolanik aktiviteye olumlu yönde katkı sağlamaktadır [31].

UK; senosfer (içi boşluklu) ve plenosfer (iç içe geçmiş) olarak adlandırılan süngerimsi yapıda camsı kürecikler, yanma sonucu dekompoze olmuş kil safsızlıkları, hematit ile manyetit kürecikleri, bir kristal üzerinde oluşan daha kaba kürecikler (dermosfer) ve yanmamış kömür taneciklerinden oluşur.

### **1.1.1.3. Kimyasal Oksitlerin UK Özelliklerine Etkisi**

Bazı kimyasal oksitlerin UK bünyesinde fazla miktarda bulunması olumsuz durumların (genleşme, çatlama vb.) gözlenmesine neden olabilmektedir. Serbest kireç, hidrasyon esnasında portlandite dönüşerek genleşme ve çatlak oluşumuna sebep olmaktadır. MgO, hidrate olduğunda meydana gelen ürün betonun genişip çatlamasına sebep olmaktadır. Yüksek miktarda SO<sub>3</sub> içeriği ileri yaşlarda yüksek miktarda etrenjit oluşturup genleşme ve bozulmalara sebep olmaktadır. UK'de bulunan amorf silis; çimento ve UK içindeki alkalilerle reaksiyon yaparak alkali-silika reaksiyonunu azaltmaktadır. Ancak UK'de yüksek miktarda alkali varsa alkali-silika reaksiyonunu azaltma etkisi zayıflamaktadır. UK'nin kızdırma kaybı, özellikle yanmamış karbon tanelerinden kaynaklanmaktadır. Yanmamış karbon taneleri katkı maddeleriyle güçlü bir birleşme özelliği gösterir. Bu yüzden yüksek karbon içeriğine sahip UK,

katkı dozajını artırmaktadır [36]. Çizelge 1.2’de bazı kritik kimyasal özellikler ve sınır değerleri verilmiştir [40].

Çizelge 1.2. Bazı kritik kimyasal özellikler ve sınır değerleri

	<b>Özellik</b>	<b>Sınır Değer (Kütlece)</b>
<b>1</b>	Kızdırma kaybı (üst sınır değeri)	%5 (kategori A) %7 (kategori B) %9 (kategori C)
<b>2</b>	Serbest kireç (üst sınır değeri)	%1,5
<b>3</b>	MgO muhtevası (üst sınır değeri)	%4
<b>4</b>	SO <sub>3</sub> muhtevası (üst sınır değeri)	%3
<b>5</b>	Toplam alkali muhtevası (üst sınır değeri)	%5

#### 1.1.1.4. UK’nin Fiziksel Özellikleri

UK’nin en önemli fiziksel özellikleri; yoğunluk, üniformluk, şekil yapısı, tane dağılımı, incelik, hacim değişimi ve su içeriğidir [18].

UK; camsı, küresel ve düzensiz şekilli taneciklerden oluşmakta olup büyüklükleri 0,5µm-150µm arasında değişmektedir [31]. Görünüm itibariyle PÇ’ye benzer. Yakılan kömürün cinsine ve termik santrallere göre farklı renklerde olabilir. Genellikle yığın halinde iken rengi grimsidir. Yanmamış kömür parçacıklarından dolayı daha koyu renkte de olabilir. Yüksek demir içeriği, esmer rengin kaynağıdır [36]. Özgül yüzeyleri 180-500 m<sup>2</sup>/kg arasında değişir [38]. Normal olarak yoğunluğu; inceliklerine ve mineralojik yapılarına bağlı olmakla birlikte 2,1-2,7 g/cm<sup>3</sup> arasındadır. Yoğunluğun beton özelliklerine etkisi çok azdır. Yüksek demir içerikli olanların yoğunluğu fazla iken yüksek alümin, silika ve karbon içerikli olanlarıki daha düşüktür. Kuru durumdaki UK’nin gevşek birim hacim ağırlığı yaklaşık 800 kg/m<sup>3</sup>tür [36].

UK’nin inceliği; puzolanik aktivite hızını ve betonun işlenebilirliğini etkiler. İnceliğin artması; işlenebilirliği azaltırken puzolanik aktivite hızını artırır. Ayrıca inceliğin artması terlemeyi azaltarak betonun su içeriğini artırmaktadır. Genellikle küresel şekilleri sayesinde betonun su ihtiyacını azaltır ve işlenebilirliği geliştirirler. Ancak çok fazla incelik, aynı

miktarda hava sürüklemek için gerekli hava sürükleyici katkı miktarını da artırmaktadır [36]. Çok ince taneli UK'nin su ihtiyacı, iri tanelilere kıyasla daha fazladır [18].

#### 1.1.1.5. UK'nin Kullanım Alanları

UK; en çok açığa çıkan yapay puzolandır. Ülkemizde her yıl yaklaşık 15 milyon ton [22], Dünya'da ise 600 milyon ton UK açığa çıkmaktadır [31]. UK'nin çeşitli alanlarda değerlendirilmesi; ülke ekonomisine katkı sağladığı gibi çevresel problemlerin de önüne geçilmesine vesile olabilir.

UK ile ilgili ilk çalışmalara 1930 yılında ABD'de başlanmış ve 1938 yılında Chicago'da ilk defa bir yol yapımında çimentoya karıştırılarak kullanılmıştır. Bu malzemelerin kullanımı İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra malzeme darlığından dolayı ABD ve Avrupa genelinde yaygınlaşmıştır [41]. Ülkemizde UK üzerine ilk çalışmalar Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından 1968 yılında yapılmıştır. Tunçbilek termik santralinden elde edilen UK üzerinde yapılan araştırmalar sonucu bu kül; Gökçekaya ve Porsuk barajlarının inşaatında kullanılmıştır [42]. Çimento fabrikalarında ilk UK kullanımı ise 1970'li yılların başında Afyon ve Balıkesir çimento fabrikalarında gerçekleşmiştir. Burada kullanılan kül; Soma ve Seyitömer termik santrallerinden elde edilmiştir [43].

UK'nin kullanım alanları şu şekilde sıralanabilir [37]:

- Çimento, beton, tuğla ve hafif agrega üretiminde
- Zemin stabilizasyonu işlerinde
- Dolgu işlerinde
- Döküm ve metal sanayinde
- Çimento bünyesinde katkı maddesi olarak kullanılabilir.

UK'nin en yoğun kullanım biçimi, çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanımınıdır. TS EN 197-1 standardında belirtildiği üzere Portland-Uçucu Küllü çimentolar CEM II/A-V, CEM II/B-V, CEM II/A-W ve CEM II/B-W olmak üzere dört gruba ayrılmıştır [35].

UK'nin beton bünyesinde mineral katkı malzemesi olarak çimento ile birlikte kullanılması durumunda betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine bazı etkileri olmaktadır. Gözlenen olumlu etkiler; betonun hidrasyon ısısını düşürmek, sertleşmiş betonun su



geçirimsizliğini azaltmak, sertleşmiş betonun sülfat etkisine karşı dayanıklılığını artırmak, taze betondaki terlemeyi azaltmak, taze betondaki işlenebilirliği artırmak ve maliyeti düşürmek şeklinde sıralanabilir. Gözlenen olumsuz etkiler ise betondaki sürüklenmiş hava miktarı için daha çok hava sürükleyici katkı maddesine ihtiyaç duymak, betonun daha uzun süreyle kür edilmesini gerektirmek, betonun ilk günlerdeki dayanım kazanma hızını azaltmak ve betonun prizini geciktirmek şeklinde sıralanabilir [30].

### 1.1.2. Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

Cüruf, çeşitli metal endüstrilerinden yan ürün olarak elde edilen atık maddelerdir. Ancak cüruflar elde edildikleri metal endüstrisinin üretim yöntemlerine ve ana ürün tipine bağlı olarak birbirinden farklı kimyasal özelliklere sahiptir. Örneğin demir-çelik üretiminden elde edilen cürufların tek başlarına bağlayıcı olma özelliği varken nikel ve bakır gibi metallerin cürufları sadece puzolanik özelliğe sahiptir [13].

Demir cevherinden demir elde edebilmek amacıyla yüksek fırınlar kullanılır. Kok kömürünün karbonu ile demir cevherinin içindeki oksitler yüksek fırında 1.500°C sıcaklıkta birleşerek CO<sub>2</sub> ve CO gazları şeklinde fırını terk eder. Fırının içinde ise eriyik durumdaki demir ile birlikte silis, alümin, kok kömürü külü, kireç ve diğer maddeler kalır. Bunlara “cüruf” denmektedir. Eriyik malzemeler fırının alt kısmında toplanır. Bu grupta yoğunluğu az olan cüruf üstte, fazla olan demir ise altta yer almaktadır. Daha sonra buradan eriyik demir ve cüruf farklı çıkışlarla dışarı alınırlar. Yüksek fırından alınan cüruf çok yüksek bir sıcaklığa sahip olduğundan puzolan olarak kullanılabilmesi için hızlı bir şekilde soğutulması gerekmektedir [23].

YFC'nin ani bir şekilde soğutulabilmesi için peletleme ve granülasyon yöntemleri uygulanmaktadır. Granülasyon yönteminde çok fazla su kullanılmakta olup cürufun içerdiği su miktarı yaklaşık %30'dur. Fazla suyun uzaklaştırılması amacıyla değirmenlerden veya filtreli havuzlardan faydalanılmaktadır. Bu yöntemle özellikleri bakımından en iyi ürün elde edilmekle birlikte uygulanan yöntem maliyetli olduğundan kullanımı sınırlıdır. Peletleme yönteminde ise cüruf; önce suyla soğutulmakta, sonra dakikada 300 tur dönen bir tambur ile havaya fırlatılmaktadır. Bu yöntemde 1 ton cüruf için yaklaşık 1 m<sup>3</sup> su kullanılmakta ve cürufun içerdiği su miktarı %10'un altında kalmaktadır. Ayrıca bu yöntem sayesinde değişik boyutlarda malzeme elde edilebilmektedir [13].

### 1.1.2.1. YFC'nin Sınıflandırılması

YFC; uygulanan soğutma yöntemi ve yöntemlerin uygulama hızına göre oldukça değişik yapısal karakteristikler göstermekte olup 3'e ayrılmaktadır [36]:

- Havada soğutulmuş YFC: Atmosfer koşullarında oldukça yavaş soğutulan cüruftur.
- Genleştirilmiş YFC: Su, basınçlı hava ve buhar etkisiyle soğutulan cüruftur.
- Granüle YFC: Bol miktarda su ile çok hızlı bir şekilde soğutulan cüruftur. En büyük tane boyutu yaklaşık 4 mm'dir.

### 1.1.2.2. YFC'nin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

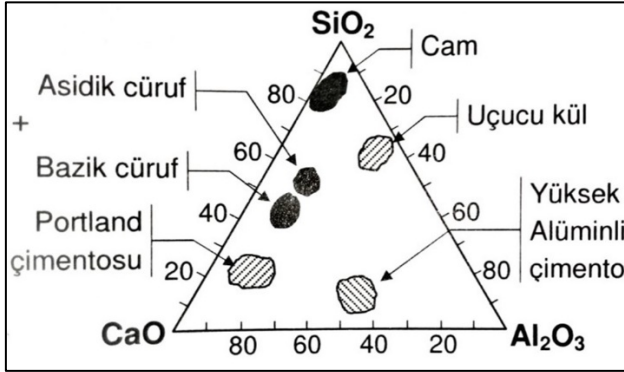
YFC'nin kimyasal yapısı, puzolanik özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Ancak yapılan araştırmalar puzolanik özellikler ile kimyasal yapı arasında net kurallar elde edememiştir. Granüle YFC'de CaO/SiO<sub>2</sub> oranının artışı, puzolanik özelliği belli bir değere kadar artırırken CaO miktarının çok yüksek olması azaltılmaktadır. Sabit bir CaO/SiO<sub>2</sub> oranında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> artışı puzolanik aktiviteyi artırmaktadır. Granüle YFC'nin suyla tek başına reaksiyonu, PC'nin hidrasyonu ile kıyaslandığında oldukça yavaş gelişmektedir [23].

YFC'nin yapısında SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, MnO ve S bulunmaktadır. En fazla yer alan oksitler ise CaO, SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'tür. Yaklaşık %30-40 oranlarında bulunan CaO; kendiliğinden bir miktar hidrolik bağlayıcı özellik göstermesini sağlamaktadır. Bu özelliği ile PC'ye en yakın yapay puzolandır [14]. Çizelge 1.3'te bazı kritik kimyasal özellikler ve gerekleri verilmiştir [44].

Çizelge 1.3. Bazı kritik kimyasal özellikler ve gerekleri

	Özellik	Gerekler (Kütlece)
1	Magnezyum oksit (MgO)	≤ %18
2	Kükürt (S)	≤ %2
3	Sülfat (SO <sub>3</sub> )	≤ %2,5
4	Kızdırma kaybı (sülfür oksidasyonu için düzeltilmiş)	≤ %3
5	Klorür (Cl)	≤ %0,1
6	Nem muhtevası	≤ %1

Şekil 1.1’de CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> üçlü diyagramında YFC’nin yeri gösterilmiştir [23].



Şekil 1.1. CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> üçlü diyagramında YFC’nin yeri

Betonda katkı maddesi olarak kullanılan öğütülmüş granüle YFC’nin hidratasyonu 2 aşamadan meydana gelmektedir. İlk aşamada cüruf ile alkali hidroksit reaksiyona girmektedir. Son aşamada ise çimentonun hidratasyonu sonucu açığa çıkan Ca(OH)<sub>2</sub> ile cüruf arasında güçlü reaksiyonlar oluşmaktadır. Ortam sıcaklığı arttıkça çimentodaki alkali hidroksitlerin çözünürlüğü artmaktadır. Böylece reaksiyonlar daha hızlı bir şekilde meydana gelmektedir [14].

YFC’nin özgül ağırlığı 2,94 g/cm<sup>3</sup>’tür. Özgül yüzey alanı ise 4.500 cm<sup>2</sup>/g’dır [45]. PÇ’ye kıyasla daha açık renktedir. Çünkü YFC’de çimentoya gri rengini kazandıran C<sub>4</sub>AF bileşeni bulunmamaktadır. PÇ’ye kıyasla daha keskin köşeli ve daha pürüzsüz yüzeyli bir yapıya sahiptir.

### 1.1.2.3. YFC’nin Kullanım Alanları

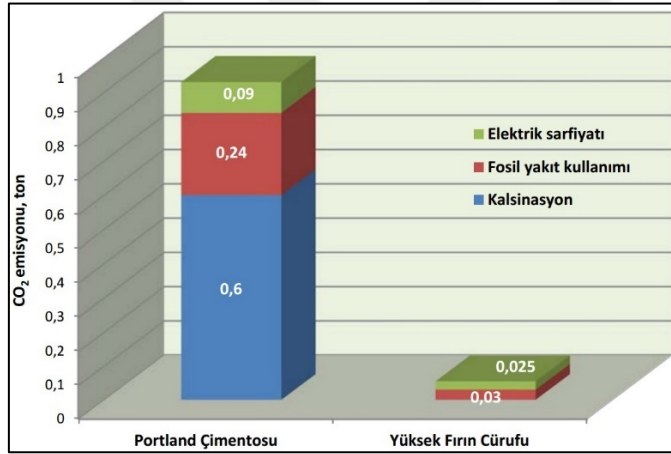
YFC’nin bağlayıcı özellik gösterdiği ilk defa Emil Largens tarafından 1862 yılında gözlenmiştir. 1865 yılında YFC-kireç karışımından elde edilen bağlayıcılar ticari olarak üretilmeye başlanmıştır. Çimento üretiminde YFC kullanımını ise ilk defa 1883 yılında gerçekleştirmiştir. Portland-YFC çimentosu, ilk defa 1892 yılında Almanya’da üretilmiştir [13]. Günümüzde de YFC; PÇ klinkeri ve alçıtaşı ile birlikte veya ayrı ayrı öğütülüp karıştırılmasıyla cürufllu çimento üretiminde kullanılmaktadır [23].

Portland-YFC çimentosu; TS EN 197-1 standardında belirtildiği üzere CEM III/A, CEM III/B ve CEM III/C olmak üzere 3 gruba ayrılmıştır. Bu çimento çeşitlerinin klinker ve YFC oranları Çizelge 1.4’te verilmiştir [35].

Çizelge 1.4. Portland-YFC çimento çeşitlerinin klinker ve YFC oranları

Çimento Tipi	Klinker Oranı (%)	YFC Oranı (%)
CEM III/A	35-64	36-65
CEM III/B	20-34	66-80
CEM III/C	5-19	81-95

Ülkemizde çelik üretiminde atık madde olarak yılda yaklaşık 300 bin ton çelik cürufu açığa çıkmaktadır [23]. Ayrıca YFC üretimi esnasında, PÇ üretimine kıyasla çok az miktarda CO<sub>2</sub> salınımı gerçekleşmektedir. Şekil 1.2’de PÇ ile YFC’nin üretiminde açığa çıkan CO<sub>2</sub> salınım değerleri verilmiştir [46].



Şekil 1.2. PÇ ve YFC üretiminde açığa çıkan CO<sub>2</sub> salınım değerleri

Yukarıdaki şekilde de görüldüğü üzere YFC’nin çeşitli alanlarda kullanımı ile ekonomik ve çevresel faydaların elde edilebilmesi mümkündür. YFC’nin kullanım alanları aşağıda verilmiştir [47]:

- Yollar, köprüler ve tüneller
- Havaalanı pistleri
- Barajlar
- Büyük temeller
- Kıyı ve liman yapıları
- Boru, menfez, sulama kanalları ve kuyu

YFC'nin beton bünyesinde mineral katkı maddesi olarak çimento ile birlikte kullanılması durumunda betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine bazı etkileri olmaktadır. Gözlenen olumlu etkiler; taze betonun priz süresini uzatmak, sertleşmiş betonun sülfat etkisine karşı dayanıklılığını artırmak, sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini azaltmak, betonun hidrasyon ısısını düşürmek, taze betondaki terlemeyi azaltmak ve taze betondaki işlenebilmeyi artırmak şeklinde sıralanabilir. Gözlenen olumsuz etkiler ise erken yaştaki beton dayanım artışının ilerleyen zamanlarda azalması, betonda belirli miktarda sürüklenmiş hava elde edebilmek için daha çok miktarda hava sürükleyici katkı maddesinin kullanılmasını gerektirmek ve betonun özellikle soğuk havalarda daha geç priz almasına yol açmak şeklinde sıralanabilir [14].

Bu kullanım tipinin haricinde granüle YFC; çimento üretiminde katkı maddesi olarak ta kullanılmaktadır.

## 1.2. Portland Çimentosu (PÇ)

PÇ; kil ve kalker karışımı hammaddelerin pişirilmeleriyle ortaya çıkan klinkerin çok az miktarda alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi neticesinde elde edilmektedir. Su ile birleştirildiğinde hidrolik bağlayıcılık özelliği göstermektedir. PÇ ile suyun birleştirildiği andan itibaren hidrasyon reaksiyonu başlamaktadır. İlk zamanlarda yumuşak plastik durumdaki çimento hamuru, zaman ilerledikçe katılaşır sertleşmektedir [20].

PÇ'nin üretiminde kullanılan başlıca hammaddeler; killi ve kalkerli malzemelerdir. Saf kalkerin yapısını kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) oluşturmaktadır. Killi malzemeler ise esas olarak  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'ten oluşmaktadır. Pişirilecek hammaddelerin karışımı; çok ince duruma getirilmiş killi ve kalkerli malzemelerin kuru veya suyla birlikte çamur gibi bir duruma getirilmesi şeklinde hazırlanmaktadır. Bu uygulamalara "kuru sistem" ve "yaş sistem" denmektedir. Son yıllarda çimento üretimi için genellikle kuru sistem kullanılmaktadır. Hammadde karışımı elde edildikten sonra döner fırınlarda pişirilmektedir. Hammadde karışımı, fırının üst ucundan verilmektedir. Fırının alt ucundan püskürtülen yakıtla fırındaki sıcaklık elde edilmektedir. Yakıt olarak fuel-oil, doğalgaz veya kömür kullanılmaktadır. Döner fırının üst ucundan beslenen hammadde karışımı; dönme işleminin ve fırının eğiminin etkisiyle aşağıya doğru hareket ederek daha yüksek sıcaklıklarla karşılaşmaktadır. Hammadde karışımının içinde bulunan kil; 500-600°C sıcaklıkta silis ve alümine dönüşmektedir. Kalker ise yaklaşık 900°C sıcaklıkta  $\text{CaO}$  ve  $\text{CO}_2$ 'ye dönüşmektedir. Sıcaklığın etkisiyle açığa çıkan bu malzemeler

yaklaşık 1.200°C sıcaklıkta kendi aralarında reaksiyona girmektedir. 1.250-1.300°C sıcaklıkta karışımın %20-30'u sıvılaşmaktadır. Karışım, soğutma işleminden sonra “klinker” denilen irili ufaklı katı taneciklere dönüşmektedir. Klinker; gri-siyah renkte, sert ve 1-25 mm çapa sahip parçacıklardan oluşmaktadır. Son olarak klinkere %3-6 oranında alçıtaşı katılıp öğütülerek PÇ elde edilmektedir [20].

Ülkemizde 2019 yılında yaklaşık 57 milyon ton, Dünyada ise 4,1 milyar ton PÇ üretilmiştir. G20 ülkelerinin 2019 yılında ürettikleri PÇ miktarı Çizelge 1.5’te verilmiştir [5].

Çizelge 1.5. G20 ülkelerinin 2019 yılında ürettikleri çimento miktarı

Ülke	Çimento Üretimi (milyon ton)
Çin	2300
Hindistan	320
ABD	88,6
Endonezya	64,2
Türkiye	57
Güney Kore	56,4
Japonya	55,2

### 1.2.1. PÇ’nin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Çimento hamurunun özelliklerini belirleyen en önemli faktör; çimento bünyesinde yer alan oksitlerdir. CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> çimento ana bileşenlerini oluşturan temel oksitlerdir. Bu oksitlerin miktarları, çimento bünyesindeki ana bileşenlerin miktarını belirlemektedir. SO<sub>3</sub> oksiti, alçıtaşından ileri gelmektedir. Gereğinden fazla miktarda alçıtaşı kullanımı, çimento hamurunda genleşmeye sebep olmaktadır. Fazla miktarda MgO ihtivası, çimentoda çatlaklara neden olmaktadır. Na<sub>2</sub>O ve K<sub>2</sub>O gibi alkalilerin gereğinden fazla miktarda bulunması, alkali-agrega reaksiyonları sonucu betonda genleşmeye yol açmaktadır. Çözünmeyen kalıntı; hidroklorik asit içerisine konulan çimento numunesinin asit içinde çözünmeyen kısmıdır. Çimento ana bileşenlerinin döner fırında oluşumu esnasında görev almayan bir miktar silis; asit içerisinde çözünmemekte ve çözünmeyen kalıntı miktarının büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Kızdırma kaybı; çimento numunesinin yüksek sıcaklıkta

kızdırılması sonucu oluşan ağırlık kaybıdır. Bu değer çimentonun uygun koşullarda saklanmadığını veya uzun süre bekletildiğini işaret eder. Bazen bir miktar CaO; reaksiyona girmeyip çimento bünyesinde serbest olarak yer alabilmektedir. Serbest CaO, su ile birleşerek Ca(OH)<sub>2</sub>'yi oluşturmakta ve bu esnada açığa çıkan ısı genişmeye sebep olmaktadır. Klor iyonu, beton içine gömülü donatıların korozyona uğramasına sebep olmaktadır [20]. Çizelge 1.6'da PÇ'ye ait bazı kritik kimyasal özellikler ve TS EN 196-2 standardına göre sınır değerleri verilmiştir [48].

Çizelge 1.6. PÇ'ye ait bazı kritik kimyasal özellikler ve sınır değerleri

	<b>Özellik</b>	<b>Gerekler (Kütlece)</b>
1	Magnezyum oksit (MgO)	≤ %5
2	Toplam alkali muhtevası (Na <sub>2</sub> O+0.658K <sub>2</sub> O)	≤ %0,6
3	Sülfat (SO <sub>3</sub> )	≤ %3,5
4	Kızdırma kaybı (sülfür oksidasyonu için düzeltilmiş)	≤ %5
5	Klorür (Cl)	≤ %0,1
6	Çözünmeyen kalıntı	≤ 3,5

Hammadde karışımının döner fırında pişirilmesi sonucu ortaya çıkan anabileşenler Çizelge 1.7'de verilmiştir [20].

Çizelge 1.7. Çimentonun anabileşenleri

<b>Anabileşenler</b>	<b>Çimento Kimyasındaki Sembolü</b>
Dikalsiyum Silikat	C <sub>2</sub> S
Trikalsiyum Silikat	C <sub>3</sub> S
Trikalsiyum Alüminat	C <sub>3</sub> A
Tetrakalsiyum Alüminoferrit	C <sub>4</sub> AF

Çimento anabileşenlerinden C<sub>2</sub>S; yavaş bir şekilde hidrate olup ileri zamandaki dayanımdan sorumludur. C<sub>3</sub>S; hızlı bir şekilde hidrate olup erken zamandaki dayanımdan

sorumludur. Yüksek miktarda ısı açığa çıkaran anabileşen  $C_3A$ 'dır.  $C_4AF$ 'nin ise dayanıma etkisi çok az olup çimentonun gri renginin kaynağıdır [20].

Çimento ile su biraraya geldiğinde her anabileşen su ile reaksiyona girmektedir. Ancak anabileşenlerin reaksiyon sonucunda oluşan ürünün çimento hamurunun bağlayıcı özelliğine katkısı, reaksiyon esnasında açığa çıkan ısı ve reaksiyon hızı farklı olmaktadır. Çizelge 1.8'de çimentonun anabileşenlerinin özellikleri belirtilmiştir [49-53].

Çizelge 1.8. Çimentonun anabileşenlerinin özellikleri

Parametreler	Anabileşenler			
	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$
Reaksiyon Hızı	Orta	Yavaş	Hızlı	Orta
Hidratasyon Isısı	Orta	Az	Yüksek	Orta
Dayanıma Katkısı:(İlk/Son)	Yüksek/Yüksek	Düşük/Yüksek	Düşük/Düşük	Düşük/Düşük

Çimento ile su birleştirildiğinde her anabileşen ayrı ayrı reaksiyona girmekte olup hidratasyon sonunda her anabileşen tarafından farklı hidratasyon ürünleri meydana gelmektedir. Bu reaksiyonlar neticesinde çimento hamuru katılaşmakta ve sertleşmektedir. Kimyasal reaksiyonlar neticesinde ortaya çıkan değişik özelliklerdeki hidratasyon ürünlerinin çimento hamuru bünyesinde yer alma oranları vasıtasıyla çimento hamurunun özellikleri belirlenmektedir. Çimento anabileşenlerinin hidratasyon reaksiyonları ve ortaya çıkan ürünler Çizelge 1.9'da verilmiştir [20].

Çizelge 1.9. Çimento anabileşenlerinin hidratasyon reaksiyonları ve ortaya çıkan ürünler

Reaksiyon Girdileri	Reaksiyon Çıktıları	Elde Edilen Ürün
$2C_3S + 6H$	$C_3S_2H_3 + 3CH$	CSH Jeli ve Portlandit
$2C_2S + 4H$	$C_3S_2H_3 + CH$	CSH Jeli ve Portlandit
$2C_3A + 21H$	$C_4AH_{13} + C_2AH_8$	Etrenjit

Çizelge 1.9'da görüldüğü üzere hidratasyon reaksiyonları sonucu CSH jeli, portlandit ve etrenjit meydana gelmektedir. CSH jeli çimento pastasının hacimce %70'ini oluşturmakta



olup dayanımdan sorumlu üründür. Portlandit, çimentonun dayanıklılığında sorumlu üründür. Etrenjit ise  $C_3A$ 'nın alçıtaşı ile reaksiyonu sonucu oluşmakta olup dayanımı etkilememektedir. Ancak fazla miktarda açığa çıkması genleşme problemine sebep olmaktadır. Çimento hamurunun içerisinde ne miktarda etrenjit oluşacağı ortamdaki sülfat miktarı ile ilgilidir. Alçıtaşının bünyesinde sülfat bulunduğundan dolayı çimento üretiminde gereğinden fazla miktarda alçıtaşı kullanımından kaçınılmalıdır [20].

PÇ, genellikle gri renkte olup bu rengin kaynağı çimento üretiminde kullanılan hammaddelerde çok az miktarda bulunan demir oksittir. Bu oksit bulunmuyorsa PÇ'nin renginin beyaz veya beyaza yakın olmaktadır. PÇ ince taneli olup tanelerin boyutları 1-200 mikron; özgül ağırlığı 3,1-3,15; birim ağırlığı ise  $1,5 \text{ t/m}^3$  civarındadır [20]. ASTM C204 standardı, PÇ'nin blaine incelik değerinin  $2.800 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'dan az olmaması gerektiğini belirtmektedir [54].

### 1.2.2. PÇ'nin Sınıflandırılması

TS EN 197-1, 27 farklı çimento tipini 5 ana grupta toplamıştır. Bu sınıflandırma Çizelge 1.10'da verilmiştir [35].

Çizelge 1.10. Çimentonun sınıflandırılması

Ana Grup Adı	Çimentonun Adı
CEM I	Portland Çimentosu
CEM II	Portland Kompoze Çimento
CEM III	Yüksek Fırın Cürüflü Çimento
CEM IV	Puzolanik Çimento
CEM V	Kompoze Çimento

### 1.2.3. PÇ'nin Tarihçesi

19. yüzyılın başlarında kireçtaşının yakılması deneyleri çimentonun keşfini sağlamıştır. 1824'te İngiliz duvar ustası Joseph Aspdin, kil-kalker karışımını pişirip öğütürerek PÇ'yi elde etmiştir. Ancak bu bağlayıcı yeterince yüksek sıcaklıkta pişirilmediği için bugünkü PÇ'nin özelliklerine ulaşamamıştır. Isaac Johnson, yüksek sıcaklıklarda hammaddelerin pişirilip öğütülmesi işlemini 1845'te gerçekleştirmiştir [50, 52, 55].

### 1.3. Alkali ile Aktive Edilmiş Materyaller (AAM)

PÇ üretimi sürecinde kömür, doğalgaz, fuel-oil gibi yakıtlar kullanılmaktadır. Bu yakıtlar yenilenebilir enerji kaynakları olmayıp doğaya zarar vermektedir. Üretim sürecinde elektrik enerjisi de kullanılmaktadır. Bu durum hem ülke ekonomisini olumsuz anlamda etkilemekte hem de elektrik enerjisinin üretildiği barajlarda su sarfiyatına sebep olmaktadır. Ayrıca PÇ'nin zararlı ortamlara karşı dayanıklılığının yetersiz olması, hidrasyon ısısının yüksek olması iyi derecede kohezyon özelliğine sahip olamaması gibi bazı olumsuz yanları da vardır [20]. Söz konusu problemler; bilim insanlarını çimento üretiminin ciddi şekilde azalmasını sağlayacak bir bağlayıcı malzeme üretimine sevk etmiştir.

Bu bağlayıcı malzemelerden biri de AAM'dir. Bu bağlayıcılar; PÇ'ye alternatif ve çevre dostu bir malzeme olarak ortaya çıkmıştır [11]. Bu bağlayıcı malzemeler; alüminosilikat içerikli katı materyaller (genellikle yapay puzolanlar) ile alkali çözeltilerin reaksiyona girmesi sonucu meydana gelen ürünlerdir [10]. AAM üretiminde yaygın kullanılan yapay puzolanlar; UK, YFC, silis dumanı, metakaolin, nano kil, kaolin ve nano silistir [11, 15, 17, 21, 24, 56-59]. Alkali çözeltiler ise kostik alkaliler, silika olmayan zayıf/güçlü asitli tuzlar, silikatlar, alüminatlar ve alüminosilikatlardır [60].

Literatür çalışmaları incelendiğinde sodyum metasilikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ile sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ) birlikte kullanımının en yaygın aktivatör kullanım tipi olduğu görülmektedir [11, 17, 24, 56-59].  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 'ün  $\text{NaOH}$ 'a göre dayanım artışı konusunda daha etkili olduğu halde  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ile  $\text{NaOH}$ 'un birlikte kullanımı yüksek dayanım sağlamaktadır [17]. Toz haldeki  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 'ün sıvı haldekinden daha aktif olduğu [16] ve fazla miktarda aktivatör kullanımı dayanımı olumsuz etkilemektedir [61]. Ayrıca bu aktivatörlerin haricinde potasyum karbonatın ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) aktivatör olarak kullanıldığı çalışmalar da bulunmaktadır [21].

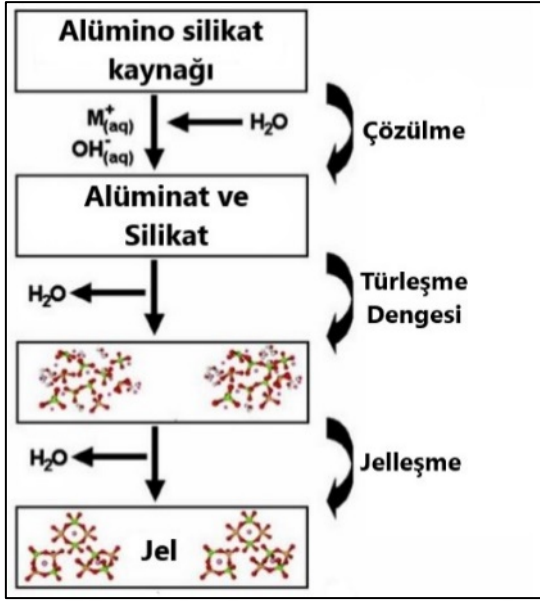
AAM'nin PÇ'ye kıyasla avantajları şu şekilde sıralanabilir [11, 17, 22]:

- Başta hava kirliliği olmak üzere çevre kirliliğinin önüne geçer.
- Doğal kaynak sarfiyatını azaltarak ülke ekonomisine katkı sağlar.
- İleri yaş dayanımı daha yüksektir.
- Daha yoğun, kompakt ve homojen bir yapıya sahiptir.
- Üretimi basittir. Laboratuarda basit ekipmanlar kullanılarak el ile üretilebilir.

### 1.3.1. AAM Kimyası

YFC ve UK'nin alkali aktivasyonu ile oluşan jeller; bileşim ve su bağlama potansiyeli açısından birbirinden farklıdır. Alkali ile aktive edilen UK, amorf yapıda hidratlanmış sodyum alümino silika hidrat (N-A-S-H) jeli oluştururken [62, 63] YFC, kalsiyum alümino silika hidrat (C-A-S-H) jeli oluşturmaktadır [64, 65]. C-A-S-H jeli; N-A-S-H jeline kıyasla daha düşük bir alkali bağlama kapasitesi [66] ve daha yüksek bir su bağlama kapasitesi sunar [67]. C-A-S-H jeli, PÇ'nin su ile hidrasyonu sonucu oluşan C-S-H jeline benzer yapıda bağlı su içerir. Bu bağlı su içeriği, aktivatör tipinden oldukça etkilenmektedir.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ile aktive edilen sistemlerin hidrasyon hızı daha düşüktür [68]. Ayrıca C-A-S-H jeli, N-A-S-H jelinden daha yoğun ve daha az gözenekli matris oluşturma eğilimindedir [69]. Bu durum  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ile aktive edilen sistemlerin NaOH ile aktive edilen sistemlere kıyasla daha düşük gözenekli ve daha yüksek mukavemetli olmasını sağlamaktadır [68]. AAM'nin oluşum süreci 3 aşamadır [70]. AAM'nin oluşum sürecine ait modelleme Şekil 1.3'te görülmektedir [62].

- **Çözülme:** Sürecin ilk aşamasıdır. Bu aşama, alüminosilikat kaynağının reaktif öncüller olan  $\text{Si}(\text{OH})_4$  ve  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  ü oluşturmak üzere çözüldüğü aşamadır. Bu aşama sonunda Si-O-Si ve Si-O-Al bağları meydana gelir.
- **Türleşme dengesi:** Sürecin ikinci aşamasıdır. Daha kararlı bir duruma gelmek amacıyla alüminosilikat öncüllerinin yeniden yapılandığı aşamadır.
- **Jelleşme:** Sürecin son aşamasıdır. Meydana gelen bağların öbek öbek ayrıldığı aşamadır.



Şekil 1.3. AAM'nin oluşum süreci

### 1.3.2. AAM'nin Tarihsel Gelişimi

AAM konusunda birçok çalışmalar yapılmıştır. Ancak bu çalışmaların hızlanması 1940'larda Purdon'un yapmış olduğu çalışma ile gerçekleşmiştir. Purdon; YFC'yi NaOH vasıtasıyla aktive etmiştir. Purdon'a göre reaksiyonlar iki aşamadan meydana gelmiştir. Birinci aşamada silika, alüminyum ve kalsiyum hidroksit serbest kalmıştır. Son aşamada ise, silika ve alümina hidratlar oluşmuştur. Elde ettiği sonuçlar; alkali hidroksitin katalizör görevi gördüğünü ortaya koymuştur [71]. Glukhovsky; AAM'nin PÇ'ye benzer alüminosilikat kalsiyum hidratlardan oluştuğu sonucuna varmıştır. Bu araştırmalara dayanarak "toprak-çimento" olarak adlandırdığı yeni bir bağlayıcı türü geliştirmiştir. Bulduğu malzeme öğütülmüş kayaya benzediğinden "toprak" kelimesini kullanmıştır [72]. 1940'lı yıllarda Purdon ve Feret ile başlayan AAM üretimi süreci birçok bilim insanı tarafından çalışılmış ve geliştirilmiştir [73].

### 1.3.3. AAM'nin Kullanım Alanları

AAM; hızlı bir şekilde dayanım kazanabilme, daha ucuz, çevre dostu ve birtakım çevresel şartlara karşı daha dayanıklı olma gibi avantajları nedeniyle yaygın bir kullanım ağına sahiptir. AAM'nin kullanım alanları şu şekilde sıralanabilir [60, 73]:

- Yapısal beton ve gaz beton uygulamaları
- Duvar blok elemanı üretimi
- Beton kaldırım ve büz boru imalatı
- Petrol kuyuları
- Sulama sistemleri ve dalgakıran betonları üretimi
- Döşeme ve temel betonları
- Prefabrik imalatı

AAM ile inşaat edilen bazı yapılar Çizelge 1.11’de görülmektedir [60]. Ayrıca AAM ile inşa edilen ilk yüksek katlı bina (Rusya, Lipetsk, 1986) ve çok katlı bir binaya (Ukrayna, Mariupol, 1960) ait görseller sırasıyla Şekil 1.4a ve Şekil 1.4b’de görülmektedir [60, 74].

Çizelge 1.11. AAM ile inşa edilen bazı yapılar hakkında bilgi

Uygulama	Lokasyon	Yıl	2000 Yılındaki Basınç Dayanımı (MPa)
Drenaj toplayıcı	Odesa/Ukrayna	1966	62
Döşeme plakaları ve duvar panelleri	Krakov/Polonya	1974	43
Yem deposu	Oblast/Ukrayna	1982	39
Ağır hizmet yolu	Magnitogorsk/Rusya	1984	86
Yüksek katlı konut	Lipetsk/Rusya	1986	35
Öngerilmeli demiryolu	Çudovo/Rusya	1988	82



Şekil 1.4. AAM kullanılan ilk yüksek katlı bina (a) ve AAM kullanılan bir bina (b)

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

AAM kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Askarian ve ark. [21], çalışmalarında oda koşullarında kür edilerek üretilmiş PÇ ilaveli AAM'nin mekanik özelliklerini araştırmıştır. Çalışma kapsamında bağlayıcı ağırlığınca %0, %10, %20, %30, %40 ve %60 oranında PÇ, %90, %81, %72, %63, %54 ve %36 oranında UK, %10, %9, %8, %7, %6 ve %4 oranında YFC ve aktivatör olarak %11,25; %9; %7,5; %6,75; %6; %5,25; %4,5 ve %3 oranında potasyum karbonat ( $K_2CO_3$ ) kullanılmış olup numunelerin işlenebilirliği, priz süresi, içyapısı ve basınç dayanımları değerlendirilmiştir. Su/bağlayıcı oranı 0,3 seçilmiştir. Sonuç olarak optimum basınç dayanımı 50,3 MPa olup, ağırlıkça %63 oranında UK, %7 oranında YFC, %30 oranında PÇ ve bağlayıcı ağırlığınca %5,25 oranında  $K_2CO_3$  kullanılan numunelerin 28 günlük deney sonuçlarından elde edilmiştir. PÇ ilavesinin işlenebilirliği ve priz süresini azalttığı fakat erken-nihai dayanımı artırdığı tespit edilmiştir.

Deb ve ark. [56], çalışmalarında oda sıcaklığında kür edilerek üretilmiş UK bazlı, UK-PÇ bazlı ve UK-YFC bazlı AAM'lerin dayanım gelişimine nano silis etkisini araştırmıştır. UK bazlı geopolimerin dayanım gelişimine nano silis etkisini araştırmak için bağlayıcı ağırlığınca %0; %0,5; %1; %1,5; %2; %2,5 ve %3 oranında nano silis, %97; %97,5; %98; %98,5; %99; %99,5 ve %100 oranında UK kullanılmıştır. Kullanılan NaOH (NH) konsantrasyonu 8M ve  $Na_2SiO_3/NaOH$  (NS/NH) ağırlıkça oranı 2'dir. Optimum basınç dayanımı 67 MPa olup, ağırlıkça %98 oranında UK, %2 oranında nano silis ve bağlayıcı ağırlığınca %40 oranında aktivatör kullanılan 28 günlük numunelerden elde edilmiştir. UK ve PÇ bazlı geopolimerin dayanım gelişimine nano silis etkisini araştırmak için bağlayıcı ağırlığınca %0; %0,5; %1; %1,5; %2; %2,5 ve %3 oranında nano silis, %10 oranında PÇ, %87; %87,5; %88; %88,5; %89; %89,5 ve %90 oranında UK kullanılmıştır. Kullanılan NH konsantrasyonu 8M ve NS/NH ağırlıkça oranı 2'dir. Optimum basınç dayanımı 65 MPa olup, ağırlıkça %88 oranında UK, %10 oranında PÇ, %2 oranında nano silis ve bağlayıcı ağırlığınca %40 oranında aktivatör kullanılan 28 günlük numunelerden elde edilmiştir. UK ve YFC bazlı geopolimerin dayanım gelişimine nano silis etkisini belirlemek için ise bağlayıcı ağırlığınca %0; %0,5; %1; %1,5; %2; %2,5 ve %3 oranında nano silis, %15 oranında YFC, %82; %82,5; %83; %83,5; %84; %84,5 ve %85 oranında UK kullanılmıştır. Kullanılan NH konsantrasyonu 8M ve NS/NH ağırlıkça oranı 2'dir. Optimum basınç dayanımı 73 MPa olup, ağırlıkça %83 oranında UK, %15 oranında YFC, %2 oranında nano silis ve bağlayıcı ağırlığınca %40 oranında aktivatör kullanılan 28 günlük numunelerden elde edilmiştir. Tüm geopolimerlerde optimum nano silis oranı %2'dir. Nano

silisin içyapı iskeletindeki boşlukları doldurup içyapının daha yoğun olmasını sağlayarak dayanımı artırdığı tespit edilmiştir.

Hadi ve ark. [57], çalışmalarında oda koşullarında kür edilerek üretilmiş AAM'nin işlenebilirlik, priz süresi ve basınç dayanımı özelliklerini araştırmıştır. Çalışma kapsamında bağlayıcı ağırlığınca %0, %10, %20, %30 ve %40 oranında YFC, %100, %90, %80, %70 ve %60 oranında UK, aktivatör olarak %40, %50, %60 ve %70 oranında NS ile NH kullanılmış olup NS/NH oranı 1; 1,5; 2 ve 2,5'tir. İlave su/bağlayıcı oranı 0,09; 0,12 ve 0,15 olarak seçilmiştir. Sonuç olarak optimum basınç dayanımı 48,7 MPa olup ağırlıkça %60 oranında UK, %40 oranında YFC, bağlayıcı ağırlığınca %50 oranında aktivatör kullanılan, ilave su/bağlayıcı oranı 0,09; su/bağlayıcı oranı 0,38 ve NS/NH oranı 2 olan 28 günlük numunelerden elde edilmiştir. Bu dayanım değeri 28 günlük kontrol numunelerinin dayanım değerinden yaklaşık 15 MPa fazladır. Ayrıca işlenebilirlik ile priz süresinin olumlu yönde değiştiği tespit edilmiştir.

Oderji ve ark. [15], çalışmalarında oda sıcaklığında kür edilerek üretilmiş kısmi UK bazlı AAM'nin taze ve sertleşmiş durumdaki özelliklerine YFC ilavesinin etkisini araştırmıştır. Çalışma kapsamında bağlayıcı ağırlığınca %100, %90, %85 ve %80 oranında UK, %0, %10, %15 ve %20 oranında YFC kullanılmıştır. Aktivatör olarak ise %6, %7 ve %8 oranlarda NS, %5,5 oranında NH ve %8 oranında potasyum hidroksit (KOH) kullanılmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0,3 olarak seçilmiştir. Karışımların işlenebilirliği, içyapısı ve basınç dayanımları değerlendirilmiştir. Sonuç olarak optimum basınç dayanımı 30 MPa olup ağırlıkça %85 oranında UK, %15 oranında YFC ve bağlayıcı ağırlığınca %8 oranında NS kullanılan 28 günlük numunelerden elde edilmiştir. Ağırlıkça %20'den fazla YFC kullanımının işlenebilirliği olumsuz etkilediği belirtilmiştir. Ağırlıkça %15'ten fazla YFC kullanımının mikroçatlak oluşumuna sebep olduğu, aktivatör oranının ağırlıkça %8 olduğu karışımlarda daha homojen içyapı elde edildiği bildirilmiştir. Düşük oranlarda aktivatör kullanımının reaksiyona girmemiş UK ve YFC partiküllerini artırdığı tespit edilmiştir.

Bouaissi ve ark. [58], çalışmalarında oda koşullarında kür edilmiş UK, YFC ve yüksek magnezyum nikel cürufu (YMNC) bazlı AAM'nin mekanik ve içyapı özelliklerini analiz etmiştir. Öncelikle UK ile yer değiştirilecek YFC miktarı araştırılmıştır. Bu kapsamda bağlayıcı ağırlığınca %5, %10, %20, %30 ve %40 oranında YFC, %95, %90, %80, %70 ve %60 oranında UK kullanılmıştır. Aktivatör olarak %50 oranında NS ile NH kullanılmış olup NS/NH ağırlıkça oranı 2,5 seçilmiştir. Kullanılan NH konsantrasyonu 12M'dir. Sonuç olarak Optimum basınç dayanımı 76,6 MPa olup ağırlıkça %80 oranında UK ve %20 oranında YFC kullanılan 28

günlük numunelerden elde edilmiştir. Optimum YFC oranının %20 olarak bulunmasının ardından UK ile yer değiştirilecek YMNC miktarı araştırılmıştır. Bu kapsamda bağlayıcı ağırlığınca %20 oranında YFC, %5, %10, %15 ve %20 oranında YMNC, %75, %70, %65 ve %60 oranında UK kullanılmıştır. Aktivatör olarak %50 oranında NS ile NH kullanılmış olup NS/NH ağırlıkça oranı 2,5 seçilmiştir. Kullanılan NH konsantrasyonu 12M'dır. Sonuç olarak optimum YMNC oranı %10 ve optimum basınç dayanımı 60,8 MPa olup ağırlıkça %20 oranında YFC, %10 oranında YMNC ve %70 oranında UK kullanılan 14 günlük numunelerden elde edilmiştir. %20'den fazla YFC ve %10'dan fazla YMNC kullanımının dayanımı olumsuz etkilediği görülmüştür. Ayrıca çalışma kapsamında SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) analizleri yapılarak, geopolimerin kohezif ve yoğun bir yapıya sahip olduğu ortaya konmuştur. Kohezif ve yoğun yapı dayanım artışının sebebini açıklamaktadır.

Alanazi ve ark. [11], çalışmalarında cüruf (C), silis dumanı (SD) ve metakaolin (MK) ilavesinin oda koşullarında kür edilen AAM özelliklerine etkisini araştırmıştır. C etkisini araştırmak için bağlayıcı ağırlığınca %85 ve %90 oranında UK, %10 ve %15 oranında C ve aktivatör olarak %40 oranında NS ile NH kullanılmıştır. NS/NH ağırlıkça oranı 1, su/bağlayıcı oranı 0,23 ve 0,24 olarak seçilmiştir. Optimum basınç dayanımı 47,1 MPa olup ağırlıkça %85 oranında UK, %15 oranında C, bağlayıcı ağırlığınca %40 oranında aktivatör kullanılan ve su/bağlayıcı oranı 0,24 olan 28 günlük numunelerden elde edilmiştir. Bu değer UK ile hazırlanmış ve 1 saat boyunca ısıtılmış numune dayanım değerlerinden 2 MPa fazladır. SD etkisini araştırmak için bağlayıcı ağırlığınca %90 ve %95 oranında UK, %5 ve %10 oranında SD ve aktivatör olarak NS ile NH kullanılmıştır. NS/NH ağırlıkça oranı 1, su/bağlayıcı oranı 0,23 ve 0,24 olarak seçilmiştir. Optimum basınç dayanımı 30 MPa olup ağırlıkça %95 oranında UK, %5 oranında SD, bağlayıcı ağırlığınca %40 oranında aktivatör kullanılan ve su/bağlayıcı oranı 0,24 olan 28 günlük numunelerden elde edilmiştir. MK etkisini araştırmak için bağlayıcı ağırlığınca %90 ve %95 oranında UK, %5 ve %10 oranında MK ve aktivatör olarak NS ile NH kullanılmıştır. NS/NH ağırlıkça oranı 2,5; su/bağlayıcı oranı 0,23 ve 0,24 olarak seçilmiştir. Optimum basınç dayanımı 37,5 MPa olup ağırlıkça %90 oranında UK, %10 oranında MK, bağlayıcı ağırlığınca %40 oranında aktivatör kullanılan ve su/bağlayıcı oranı 0,23 olan 28 günlük numunelerden elde edilmiştir. Sonuç olarak en yüksek basınç dayanım değerine C ilavesi sayesinde ulaşıldığı tespit edilmiştir.

Ravitheja ve ark. [24], çalışmalarında UK bazlı AAM'nin dayanım özelliklerine nano kil (NK) ve YFC etkisini araştırmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle bağlayıcı ağırlığınca



%100, %96, %94, %92 ve %90 oranında UK, %0, %4, %6, %8 ve %10 oranında NK ve aktivatör olarak %45 oranında NS ile NH kullanılmıştır. Kullanılan NH konsantrasyonu 12M'dır. Sonuç olarak optimum basınç dayanımı 47 MPa olup ağırlıkça %94 oranında UK, %6 oranında NK ve bağlayıcı ağırlığınca %45 oranında aktivatör kullanılan 28 günlük numunelerden elde edilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında YFC ilavesinin etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda bağlayıcı ağırlığınca %20 oranında YFC, %0, %4, %6, %8 ve %10 oranında NK, %80, %76, %74, %72 ve %70 oranında UK ve aktivatör olarak %45 oranında NS ile NH kullanılmıştır. Kullanılan NH konsantrasyonu 12M'dır. Sonuç olarak optimum basınç dayanımı 69 MPa olup ağırlıkça %74 oranında UK, %6 oranında NK ve bağlayıcı ağırlığınca %45 oranında aktivatör kullanılan 28 günlük numunelerden elde edilmiştir. Bu değer UK ile hazırlanmış ve 2 gün boyunca ısı kür işlemine tabi tutulmuş kontrol numunelerinin dayanım değerinden 30 MPa fazladır. Ağırlıkça %6'dan fazla NK kullanımının dayanımı azalttığı tespit edilmiştir.

Yahya ve ark. [59], çalışmalarında oda koşullarında kür edilmiş UK bazlı geopolimere kaolin (K) ilavesinin etkisini araştırmıştır. Çalışma kapsamında bağlayıcı ağırlığınca %100, %95, %90 ve %85 oranında UK, %0, %5, %10 ve %15 oranında K ve aktivatör olarak %66 oranında NS ile NH kullanılmıştır. Kullanılan NH konsantrasyonu 12M ve NS/NH ağırlıkça oranı 1,5; 2 ve 2.5 olarak seçilmiştir. Sonuç olarak optimum basınç dayanımı 40 MPa olup ağırlıkça %95 oranında UK, %5 oranında K, bağlayıcı ağırlığınca %66 oranında aktivatör kullanılan ve NS/NH oranı 2,5 olan 28 günlük numunelerden elde edilmiştir. Bu değer UK ile hazırlanmış ve oda sıcaklığında kür edilmiş numunelerin dayanım değerlerinden 20 MPa düşüktür. Ayrıca K miktarı arttıkça boşluk oranı arttığından dayanımın azaldığı tespit edilmiştir.

Yazdi ve ark. [17], çalışmalarında oda koşullarında kür edilmiş UK ve YFC bazlı AAM'nin içyapı ve mekanik özelliklerinin korelasyonunu araştırmıştır. Çalışma kapsamında bağlayıcı ağırlığınca %0, %30, %40, %50, %60, %70 ve %100 oranında UK, %100, %70, %60, %50, %40, %30 ve %0 oranında YFC ve aktivatör olarak %45 oranında NS ile NH kullanılmıştır. Kullanılan NH konsantrasyonu 10M, ağırlıkça NS/NH oranı 2,5 ve su/bağlayıcı oranı 0,26 olarak seçilmiştir. Sonuç olarak optimum basınç dayanımı 100 MPa olup ağırlıkça %40 oranında UK, %60 oranında YFC ve bağlayıcı ağırlığınca %45 oranında aktivatör kullanılan 28 günlük numunelerden elde edilmiştir. Bu değer sadece UK ile hazırlanmış ve oda sıcaklığında kür edilmiş numunelerin dayanım değerinden 80 MPa fazladır. SEM analizi

sayesinde UK'nin ileri yaşlardaki puzolanik aktivitesinden ötürü 28 günlük dayanımının daha fazla olduğu, ağırlıkça eşit oranlarda UK ile YFC bazlı karışımların YFC bazlı karışımlardan daha yoğun bir içyapıya sahip olmasından dolayı UK'nin dayanım artışında daha etkin rol oynadığı ve YFC bazlı karışımlarda bazı kristal yapıların görüldüğü tespit edilmiştir. Ayrıca YFC bazlı numunelerde gözlenen küresel boşluklar, işlenebilirliğin yeterli olmadığına işaret etmektedir.

Aliabdo ve ark. [26], çalışmalarında YFC bazlı AAM'nin mekanik özelliklerini etkileyen faktörleri incelemiştir. Çalışma kapsamında bağlayıcı ağırlığınca %100 YFC kullanılmış olup NaOH molaritesi 10, 12 ve 14M'dir. Solüsyon/YFC ağırlıkça oranı 0,4; 0,45 ve 0,5'tir. Kür sıcaklığı 30, 60 ve 90°C'dir. Kür süresi 1, 2 ve 3 gündür. NS/NH ağırlıkça oranı 3,25; 2,5 ve 1,75'tir. Numuneler, belirlenen kür işlemlerinin tamamlanmasının ardından test gününe kadar oda sıcaklığında kür edilmiştir. Sonuç olarak; NH molaritesindeki artış; basınç dayanımını, eğilmede çekme dayanımını, elastisite modülünü ve poroziteyi artırmıştır. Solüsyon/YFC oranındaki artış; poroziteyi artırırken basınç dayanımını, elastisite modülünü ve 7 günlük eğilmede çekme dayanımını azaltmıştır. Kür sıcaklığındaki artış; poroziteyi artırırken basınç dayanımını, eğilmede çekme dayanımını ve elastisite modülünü azaltmıştır. NS/NH oranındaki artış; basınç dayanımını, eğilmede çekme dayanımını, elastisite modülünü ve poroziteyi artırmıştır. Ayrıca optimum kür sıcaklığının 30°C ve optimum kür süresinin 2 gün olduğu tespit edilmiştir.

Wei ve ark. [75], çalışmalarında düşük sıcaklıktaki kür işleminin UK ve YFC bazlı AAM harcının mekanik özellikleri, hidrasyon süreci ve mikroyapısı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışma kapsamında bağlayıcı ağırlığınca %50 UK ve %50 YFC kullanılmış olup kum/bağlayıcı oranı 3; NS/NH ağırlıkça oranı 1,35 ve NH molaritesi 12M'dir. Su/bağlayıcı oranı 0,31; 0,36 ve 0,42'dir. Kür sıcaklığı -5, 0, 5 ve 20°C'dir. Üretilen harç numuneleri, test gününe kadar belirlenen sıcaklıklarda kür işlemine tabi tutulmuştur. En yüksek basınç dayanımı (108 MPa) 20°C'de kür edilen 90 günlük deneme noktasından elde edilmiştir. Sonuç olarak düşük kür sıcaklığının; basınç dayanımını azalttığı, reaksiyon hızını azaltarak alkalinyon sürecini uzattığı, kolayca zararlı gözenek oluşumuna sebep olduğu ve hidrasyon ürünlerinin miktarını değiştirirken tipini değiştirmediği tespit edilmiştir. Ek olarak -5°C'de alkalinyonun devam ettiği ve basınç dayanımı üzerindeki en olumsuz faktörün 0°C'nin altında kür uygulaması olduğu tespit edilmiştir.

Kabay ve ark. [76], çalışmalarında optimum fiziksel/mekanik özelliklere sahip oksijen fırını cürufu (OFC) ve YFC bazlı AAM üretmeyi amaçlamıştır. Çalışma kapsamında bağlayıcı ağırlığınca OFC kullanım oranı %0, %20, %40, %50, %60 ve %70; YFC kullanım oranı %100, %80, %60, %50, %40 ve %30; NH molaritesi 6, 8, 10 ve 12M; su/bağlayıcı oranı 0,33'tür. Üretilen numuneler, test gününe kadar 20°C sıcaklık ve %55 nem muhtevasına sahip ortamda kür işlemine tabi tutulmuştur. Sonuç olarak; optimum 28 günlük basınç dayanımı 36,8 MPa, optimum NH konsantrasyonu 6M ve optimum OFC kullanım oranı %25 olarak belirlenmiştir. %40'tan fazla OFC kullanımını priz süresini önemli ölçüde artırmıştır. 6M konsantrasyonda OFC oranındaki artış priz süresini önemli ölçüde etkilemezken işlenebilirliği iyileştirmiştir. 8, 10 ve 12M konsantrasyonda ise en iyi işlenebilirliğe %20 OFC kullanım oranıyla ulaşılmış ve OFC oranındaki artışla işlenebilirlik ile basınç dayanımı azalmıştır. Ayrıca OFC'nin reaksiyonlara tam olarak katılamamasına rağmen mikro çatlakları azalttığı tespit edilmiştir.

Reddy ve ark. [77], çalışmalarında UK ve YFC bazlı AAM üzerinde solüsyonun rolünü incelemiştir. Çalışma kapsamında bağlayıcı ağırlığınca UK ve YFC kullanım oranı %50'dir. Nano silis ve NS'nin herbirinin kullanım oranı %1, %3,3 ve %5'tir. NH molaritesi 3M ve solüsyon/bağlayıcı oranı 0,4'tür. Üretilen numuneler, test gününe kadar 27°C sıcaklık ve %95 nem muhtevasına sahip ortamda kür işlemine tabi tutulmuştur. Sonuç olarak; 28 günlük en yüksek basınç dayanımı 80 MPa olup %5 NS kullanımı ile elde edilmiştir. Erken dayanımda en etkin aktivatör %5 NS iken nihai dayanımda %5 nano silis olduğu, %1 NS ve %1 nano silis kullanımının dayanım kazanma konusunda etkisiz olduğu, %5 NS'nin en fazla dayanım kazanma ivmesine sahip olduğu ve Na iyonunun YFC'nin erken reaksiyonunu hızlandırdığı tespit edilmiştir.

Oderji ve ark. [78], çalışmalarında UK ve YFC bazlı AAM'nin dayanım ve işlenebilirliği üzerinde akışkanlaştırıcı ve priz geciktirici katkı maddelerinin etkisini incelemiştir. Çalışma 3 aşamadan oluşmakta olup her aşamada bağlayıcı ağırlığınca %85 UK, %15 YFC ve %8 NS kullanılmıştır. Üretilen numuneler, test gününe kadar 20±2°C sıcaklık ve %70±10 nem muhtevasına sahip ortamda kür işlemine tabi tutulmuştur. İlk aşamada optimum s/b oranının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda seçilen s/b oranı 0,28; 0,3 ve 0,32'dir. Sonuç olarak; su içeriğinin AAM karışımlarının nihai dayanımını belirlemede çok önemli bir parametre olduğu, artan su içeriği ile mekanik dayanımın önemli ölçüde azaldığı, s/b oranı 0,3 olan numunelerde s/b oranı 0,32 olan numunelerden daha yüksek miktarda reaksiyona girmiş öncüler bulunmasından dolayı daha homojen bir mikroyapıya sahip olduğu ve optimum s/b

oranının 0,3 olduğu tespit edilmiştir. İkinci aşamada optimum mekanik/fiziksel özellikleri sağlayan katkı maddesinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda bağlayıcı ağırlığınca %2 oranında boraks, sodyum trifosfat, polikarboksilat, sodyum glukonat, sodyum linyosülfonat ve kalsiyum linyosülfonat kullanılmıştır. Sonuç olarak; linyosülfonat esaslı katkı maddesinin işlenebilirliği iyileştirmediği ve mekanik dayanımda belirgin bir düşüşe yol açtığı için oldukça etkisiz olduğu, boraksın mekanik dayanıma olumsuz bir etkisi olmayıp işlenebilirlik ve priz süresini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Son aşamada boraksın optimum kullanım miktarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda bağlayıcı ağırlığınca boraks kullanım oranı %2, %4, %6 ve %8'dir. Sonuç olarak; boraks ilaveli karışımların tamamının kontrol numunesine kıyasla daha yüksek basınç ve eğilme dayanımına sahip olduğu, boraks ilave oranındaki artışın işlenebilirliği iyileştirirken ilave oranı %4'ü aştığında mekanik dayanımın azalttığı, boraks ilave oranının %4'ten %6'ya çıkması durumunda mekanik dayanımdaki düşüşün çok daha az olmasından dolayı optimum kullanım oranının %6 olduğu ve %6 boraks kullanımında optimum 7/28 günlük basınç dayanımının sırasıyla 32,5 MPa/35 MPa olduğu tespit edilmiştir.

Gupta [25], çalışmasında SD ve YFC bazlı AAM'nin basınç dayanım özelliklerini incelemiştir. Çalışma kapsamında bağlayıcı ağırlığınca %40 YFC ve %60 SD kullanılmış olup s/b oranı 0,3; 0,35 ve 0,4'tür. NS/NH oranı 0,5; 1,5 ve 2,5'tir. Test yaşı 7, 28 ve 56 gündür. NH molaritesi 14M'dir. Üretilen numuneler, 1 gün boyunca 60°C sıcaklıkta kür edildikten sonra test gününe kadar oda sıcaklığında kür işlemine tabi tutulmuştur. Sonuç olarak; s/b oranlarının tamamında NS/NH oranındaki artışın basınç dayanımını artırdığı, sabit NS/NH oranında s/b oranındaki artışın basınç dayanımında önemli bir değişikliğe yol açmadığı, 7 ve 28 günlük maksimum dayanım değişiminin NS/NH oranı 2,5 olan kombinasyonda gerçekleştiği ve maksimum basınç dayanımının s/b oranı 0,4 ve NS/NH oranı 2,5 olan kombinasyondan elde edildiği tespit edilmiştir.

Çizelge 2.1'de bazı literatür çalışmalarının yazar, bağlayıcıların ağırlıkça kullanım oranı, kullanılan aktivatör tipi ve basınç dayanım değeri bilgileri verilmiştir. Çizelge 2.1'de Ref; referans, YFC; yüksek fırın cürufu, UK; uçucu kül, PÇ; Portland çimentosu, C; cüruf, YMNC; yüksek magnezyum nikel cürufu, NS; nano silis, SD; silis dumanı, MK; metakaolin, K; kaolin, NK; nano kil, OC; oksijen fırın cürufu, Akt.; aktivatör, KC; potasyum karbonat, NS; sodyum metasilikat, NH; sodyum hidroksit ve g; gündür.

Çizelge 2.1. Literatür özeti

Ref.	Ağırlıkça Kullanım Oranı (%)											Akt.	Basınç dayanımı (MPa)				
	YFC	UK	PÇ	C	YMNC	NS	SD	MK	K	NK	OC		1g	3g	7g	14g	28g
[21]	7	63	30	-	-	-	-	-	-	-	-	KC	25,3	-	45,6	-	50,3
[56]	15	83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	NS+ NH	-	-	40	55	73
	-	88	10	-	-	2	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-
	-	98	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	67
[57]	40	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	28	-	48,7
[15]	20	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	NS	-	-	25	-	30
[58]	20	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	NS+ NH	-	-	38,5	45,6	76,6
		70	-	-	10	-	-	-	-	-	-		-	-	40	60,8	-
[11]	-	85	-	15	-	-	-	-	-	-	-	NS+ NH	-	-	37,5	-	47,1
		95	-	-	-	-	5	-	-	-	-		-	-	17,5	-	30
		90	-	-	-	-	-	10	-	-	-		-	-	36	-	37,5
[24]	-	94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	NS+ NH	-	32	37	-	47
		74	-	-	-	-	-	-	-	-	6		-	40	50	-	69
[59]	-	95	-	-	-	-	-	-	5	-	-		-	20	30	-	40
[17]	60	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	60	80	-	100
[75]	50	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-		30	55	75	85	100
[76]	75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25	NH	-	-	-	-	36,8
[77]	50	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	NS	-	60	60	-	80
[78]	15	85	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-	-	32,5	-

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

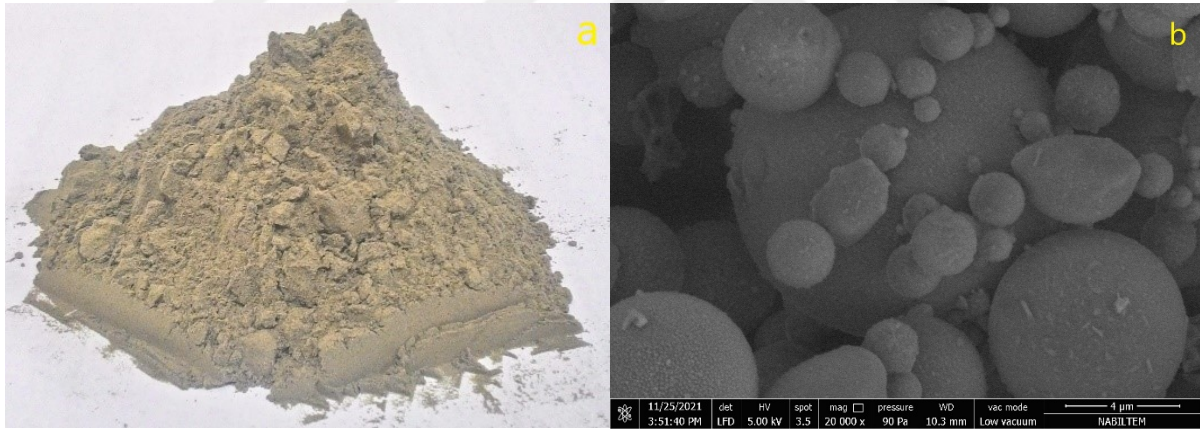
Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler, deney parametrelerini belirlemek için yapılan ön deneme çalışması, deneysel çalışma ve uygulanan deney yöntemleri aşağıda verilmiştir.

#### 3.1. Malzeme

Çalışma kapsamında uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC), Portland çimentosu (PÇ), sodyum hidroksit (NaOH), sodyum metasilikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), standart kum, distile su ve kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır.

##### 3.1.1. Uçucu Kül (UK)

Çalışmada, İSKEN Sığözü Termik Santrali'nden temin edilen F sınıfı UK kullanılmıştır. Çizelge 3.1'de çalışmada kullanılan UK'nin kimyasal [79] ve fiziksel özellikleri verilmiştir. Şekil 3.1a'da çalışmada kullanılan UK ve Şekil 3.1b'de SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.1. UK (a) ve SEM görüntüsü (b)

##### 3.1.2. Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

Çalışmada, İSDEMİR Demir-Çelik Fabrikası'ndan temin edilen YFC kullanılmıştır. Çizelge 3.1'de çalışmada kullanılan YFC'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri verilmiştir. Şekil 3.2a'da çalışmada kullanılan YFC ve Şekil 3.2b'de SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.2. YFC (a) ve SEM görüntüsü (b)

### 3.1.3. Portland Çimentosu (PÇ)

Çalışmada, CEM I 42.5R PÇ kullanılmıştır. Çizelge 3.1’de çalışmada kullanılan PÇ’nin kimyasal ve fiziksel özellikleri verilmiştir. Şekil 3.3’te ise çalışmada kullanılan PÇ görülmektedir.



Şekil 3.3. Portland çimentosu

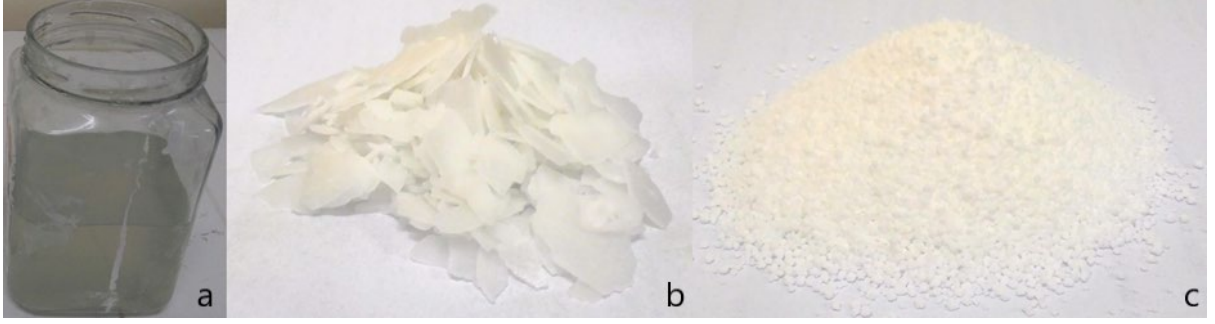
Çizelge 3.1. UK, YFC ve PÇ'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri

Özellik	Malzeme		
	UK	YFC	PÇ
CaO (ağırlıkça, %)	1,54	35,26	64,35
SiO <sub>2</sub> (ağırlıkça, %)	62	40,07	19,03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ağırlıkça, %)	20,41	12,16	4,81
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ağırlıkça, %)	7,35	0,77	2,98
SO <sub>3</sub> (ağırlıkça, %)	0,16	0,17	3,21
MgO (ağırlıkça, %)	1,78	6,73	0,9
Alkali (ağırlıkça, %)	2,55	0,8	-
Klinker (ağırlıkça, %)	-	-	94,24
Çözünmeyen Kalıntı (ağırlıkça, %)	0,87	0,66	0,31
Kızdırma Kaybı (ağırlıkça, %)	2,05	0,78	3,75
CI (ağırlıkça, %)	0,001	0,005	0,006
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	2,29	2,82	3,08
Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	2780	3880	3500

#### 3.1.4. Aktivatör

Çalışmada aktivatör olarak NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanılmıştır. NaOH, %99 saflıkta olup distile su ile çözülerek solüsyon formunda kullanılmıştır. NaOH solüsyonları üretim gününden 1 gün önce hazırlanmıştır. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ise katı formda kullanılmış olup silika modülü (SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O) 1'dir (SiO<sub>2</sub>: 28.7; Na<sub>2</sub>O: 28.8). Şekil 3.4'te Çalışmada kullanılan NaOH solüsyonu, NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> sırasıyla Şekil 3.4a, Şekil 3.4b ve Şekil 3.4c'de görülmektedir.





Şekil 3.4. NaOH solüsyonu (a) NaOH (b) ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (c)

### 3.1.5. Kum

Harç üretiminde TS EN 196-1 [80] standardına uygun CEN referans kumu kullanılmıştır. CEN referans kumu; yüksek miktarda SiO<sub>2</sub> barındıran (en az %98 oranında) doğal bir kum olup izometrik ve yuvarlak taneciklere sahiptir [80]. CEN referans kumunun elek analizi için sahip olması gereken sınır değerler Çizelge 3.2’de verilmiştir [80]. Şekil 3.5’te ise çalışmada kullanılan CEN referans kumu görülmektedir.



Şekil 3.5. CEN referans kumu

Çizelge 3.2. CEN referans kumunun elek analizi için sahip olması gereken sınır değerler

Özellik	Elek çapı (mm)					
	2	1,6	1	0,5	0,16	0,08
Alt Değer (%)	0	2	28	62	82	98
Üst Değer (%)	0	12	38	72	92	100

### 3.1.6. Distile Su

Harç numune üretiminde distile su kullanılmıştır. Distile su, temin edildikten sonra laboratuvar koşullarında belirli bir süre bekletilmiştir. Şekil 3.6’da distile su görülmektedir.



Şekil 3.6. Distile su

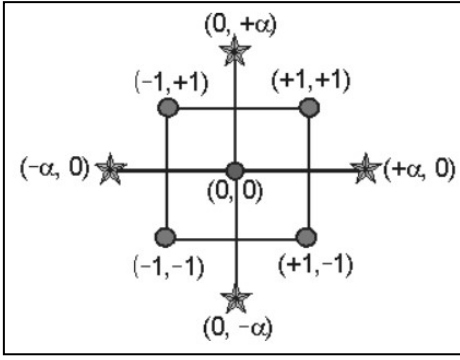
### 3.1.7. Kimyasal Katkı Maddesi

Deneysel çalışma aşamasında işlenebilirliğin sağlanması amacıyla modifiye polikarboksilat polimer bazlı sıvı yüksek performanslı süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır.

## 3.2. Yöntem

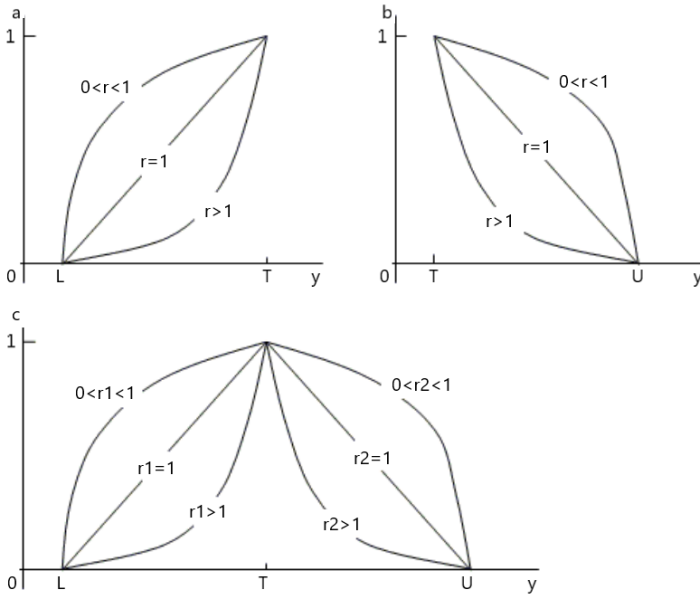
### 3.2.1. Deneysel Tasarım

Çalışma; ön deneme çalışması ve deneysel çalışma olmak üzere 2 aşamadan oluşmaktadır. Her iki aşamada da döndürülebilir merkezi birleşik tasarım (MBT) kullanılmıştır. Bu yöntem; ikinci derece modellere uyacak şekilde merkezi ve aksel noktalarla güçlendirilmiş tam faktöriyel tasarıma dayanmaktadır [81, 82]. Şekil 3.7’de 2 faktör için klasik merkezi birleşik tasarımın koordinat düzlemindeki uygulaması görülmektedir [81]. Karenin köşe noktaları, faktöriyel tasarım noktaları olup var olduğuna inanılan ilgi alanının sınırlarının (değişim aralığının) tanımlanmasını sağlamaktadır. Yıldızlı noktalar, aksel tasarım noktaları olup aşırı aksel hareketlerin bile çalışabilirlik alanı içinde olmasını sağlamaktadır. Karenin merkezi ise merkez noktası olup gelişmiş tahmin yeteneği sayesinde ilgi alanının merkezine yakın olunmasını sağlamaktadır [81]. Bu yöntemin kullanım amacı; optimum özelliklerin elde edilebilmesi için en uygun değişim aralıklarında etki değişkenlerinin tepki değişkenleri üzerindeki etki düzeylerinin belirlenmesine imkan veren deneme noktası sayısının belirlenebilmesidir.



Şekil 3.7. 2 faktör için klasik merkezi birleşik tasarıma ait koordinat düzlemi

Çalışma kapsamında çok değişkenli tepki yüzeyi problemleri optimize edilmiştir. Birçok tepki yüzeyi problemi, birkaç tepkinin çözümlenmesini barındırmaktadır. Çoklu tepkilerin eş zamanlı düşünülmesi, öncelikle her bir tepki için uygun tepki yüzeyinin oluşturulmasını, sonrasında ise istenilen aralıklarda en az birkaç tepkinin (mümkünse hepsinin) optimizasyonuna duyarlı işletim koşulları takımının elde edilmesini kapsamaktadır. Çoklu tepkilerin optimizasyonu için kullanılan yöntemlerden biri “eşzamanlı optimizasyon tekniği” olup arzuedilirlik fonksiyonlarının kullanılmasına dayanmaktadır [83, 84]. Herbir arzuedilirlik fonksiyonları Şekil 3.8’deki gibi oluşturulmaktadır [83].



Şekil 3.8.  $y$ 'nin maksimum değerini elde etmek için arzuedilirlik fonksiyonları (a),  $y$ 'nin minimum değerini elde etmek için arzuedilirlik fonksiyonları (b) ve  $y$ 'nin olası hedefinin oldukça yakın değerlerini elde etmek için arzuedilirlik fonksiyonları (c)

y tepkisi için maksimum değer hedefleniyorsa (Şekil 3.8a) arzuedilirlik fonksiyonu Denklem (3.1) yardımıyla hesaplanmaktadır [83, 84].

$$d = \begin{cases} 0, & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^r, & L \leq y \leq T \\ 1, & y > T \end{cases} \quad (3.1)$$

y tepkisi için minimum değer hedefleniyorsa (Şekil 3.8b) arzuedilirlik fonksiyonu Denklem (3.2) yardımıyla hesaplanmaktadır [83, 84].

$$d = \begin{cases} 1, & y < T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^r, & T \leq y \leq U \\ 0, & y > U \end{cases} \quad (3.2)$$

y tepkisi için alt ve üst limitler arasındaki bir değer hedefleniyorsa (Şekil 3.8c) arzuedilirlik fonksiyonu Denklem (3.3) yardımıyla hesaplanmaktadır [83, 84].

$$d = \begin{cases} 0, & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^{r_1}, & L \leq y \leq T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^{r_2}, & T \leq y \leq U \\ 0, & y > U \end{cases} \quad (3.3)$$

### 3.2.1.1. Ön Deneme Çalışması

Ön deneme çalışmasının amacı; etki değişkenlerinin (ağırlıkça aktivatör oranı, ağırlıkça toplam alkali solüsyon/bağlayıcı oranı, NaOH molarite değeri, ağırlıkça Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> solüsyon suyu/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> solüsyon oranı) ana, etkileşim ve ikinci derece terimlerinin tepki değişkenleri (ultrasonik atımlı dalgı hızı, eğilmede çekme dayanımı, basınç dayanımı) üzerindeki etki düzeylerini belirleyerek seçilen değişim aralıklarında optimum fiziksel ve mekanik özellikleri sağlayan deneme noktasını tespit etmektir. YFC ile UK'nin kullanım oranının birbirine yakın olması durumunda daha yüksek dayanım değerleri elde edilmektedir [17]. Bu nedenle ön deneme çalışmasında hem YFC hem de UK'nin kullanım oranı %50 seçilmiştir. Literatürdeki

genel eğilimler [85-101] dikkate alınarak belirlenen değişim aralıklarına göre hazırlanan ön deneme çalışmasına ait deneme noktaları Çizelge 3.3'te verilmiştir. Ön deneme çalışmasında 30 adet deneme noktası (16 faktöriyel, 8 eksenel ve 6 merkez noktası) bulunmaktadır. Her deneme noktası için 2 kalıp olmak üzere 6 numune üretilmiştir.

Çizelge 3.3. Ön deneme çalışmasına ait deneme noktaları

Deneme no.	Nokta türü	Faktör 1*	Faktör 2*	Faktör 3*	Faktör 4*
		A:NS (S)/NH (S)	B:Alkali (S)/B	C:M (NH)	D:Su NS (S)/NS (S)
		-	-	M	%
1	Faktöriyel	1,5	0,4	13	60
2	Faktöriyel	2,5	0,5	10	50
3	Merkez	2	0,45	11,5	55
4	Faktöriyel	1,5	0,5	13	50
5	Eksenel	2	0,55	11,5	55
6	Faktöriyel	1,5	0,4	10	60
7	Faktöriyel	2,5	0,4	10	50
8	Merkez	2	0,45	11,5	55
9	Faktöriyel	2,5	0,4	13	60
10	Merkez	2	0,45	11,5	55
11	Eksenel	2	0,45	11,5	45
12	Eksenel	2	0,45	11,5	65
13	Faktöriyel	1,5	0,4	10	50
14	Merkez	2	0,45	11,5	55
15	Eksenel	2	0,35	11,5	55
16	Eksenel	2	0,45	14,5	55
17	Merkez	2	0,45	11,5	55

Çizelge 3.3. (devamı)

18	Faktöriyel	2,5	0,4	13	50
19	Faktöriyel	2,5	0,4	10	60
20	Faktöriyel	1,5	0,5	13	60
21	Faktöriyel	2,5	0,5	13	60
22	Eksenel	3	0,45	11,5	55
23	Faktöriyel	1,5	0,5	10	60
24	Eksenel	2	0,45	8,5	55
25	Faktöriyel	2,5	0,5	10	60
26	Faktöriyel	2,5	0,5	13	50
27	Merkez	2	0,45	11,5	55
28	Faktöriyel	1,5	0,5	10	50
29	Eksenel	1	0,45	11,5	55
30	Faktöriyel	1,5	0,4	13	50

\*NS:  $Na_2SiO_3$ , NH: NaOH, S: Solüsyon, M: Molarite, B: Bağlayıcı (YFC+UK)

### 3.2.1.2. Deneysel Çalışma

Deneysel çalışmanın amacı; etki değişkenlerinin (ağırlıkça PÇ kullanım oranı ve numune yaşı) tepki değişkenleri (birim hacim ağırlık, su emme, boşluk oranı, ultrasonik atımlı dalga hızı, eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı) üzerindeki etki düzeylerini ana, etkileşim ve ikinci derece terimlere göre belirleyerek optimum fiziksel ve mekanik özellikleri sağlayan deneme noktasını tespit etmektir. PÇ'nin ağırlıkça ilave oranının %30 ve üzerinde kullanımı durumunda işlenebilirlik anlamlı düzeyde azaldığı [21] için deneysel çalışma kapsamında PÇ'nin ilave oranı ağırlıkça %30; %22,5; %15; %7,5 ve %0 olarak belirlenmiştir. Çizelge 3.4'te deneysel çalışmaya ait deneme noktaları verilmiştir. Çizelge 3.5'te ise deneysel tasarım ile ilgili özet bilgiler verilmiştir.

Çizelge 3.4. Deneysel çalışmaya ait deneme noktaları

<b>Deneme Noktaları</b>	<b>PÇ (%)</b>	<b>YFC+UK (%)</b>	<b>Numune Yaşı (gün)</b>
1	0	100	28
2	7,5	92,5	28
3	0	100	59
4	15	85	90
5	30	70	59
6	15	85	59
7	15	85	59
8	15	85	28
9	15	85	90
10	0	100	59
11	7,5	92,5	43,5
12	30	70	28
13	22,5	77,5	43,5
14	0	100	90
15	22,5	77,5	74,5
16	30	70	90
17	7,5	92,5	74,5

Çizelge 3.5. Deneysel tasarım özeti

	Ön deneme çalışması	Deneysel çalışma
Deneme noktası sayısı	30	17
Numune sayısı	180	102
YFC miktarı, g	13.500	6.603,75
UK miktarı, g	13.500	6.603,75
PÇ miktarı, g	0	2.092,5
Bağlayıcı miktarı (YFC+UK+PÇ), g	27.000	15.300
NH katı miktarı, g	1.302,3	575,3
NH su miktarı, g	2.843,2	1.259,1
NH solüsyon miktarı, g	4.145,5	1.834,4
NS katı miktarı, g	3.602	1.379,5
NS su miktarı, g	4.402,5	2.069,2
NS solüsyon miktarı, g	8.004,5	3.448,7
Solüsyon miktarı (NH solüsyon+NS solüsyon), g	12.150	5.283,1
CEN referans kum miktarı, g	81.000	45.900
Distile su miktarı, g	10.178,5	5.768,1
Kimyasal katkı miktarı, g	0	42
Gerçekleştirilen deneyler	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Yayımla tablası</li> <li>-Ultrasonik atımlı dalga hızı</li> <li>-Eğilmede çekme</li> <li>-Basınç</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Yayımla tablası</li> <li>-Priz süresi</li> <li>-Birim hacim ağırlık</li> <li>-Su emme ve boşluk oranı</li> <li>-Ultrasonik atımlı dalga hızı</li> <li>-Eğilmede çekme</li> <li>-Basınç</li> <li>-SEM analizi</li> </ul>



### 3.2.2. Harç Numunelerinin Üretimi

Harç numunelerinin üretimi aşağıdaki sıralamayla gerçekleştirilmiştir.

- $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  suyu,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  katısı ve YFC; kap içerisine eklenerek tanecikler tamamen eriyene kadar elle karıştırılmıştır (Şekil 3.9a).
- Elde edilen karışıma UK ile solüsyon eklenerek tanecikler tamamen eriyene kadar elle karıştırılmıştır (Şekil 3.9b).
- Elde edilen karışıma PÇ eklenerek tanecikler tamamen eriyene kadar elle karıştırılmıştır. Ön deneme çalışmasında PÇ kullanılmamıştır.
- Elle karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra karışıma CEN referans kumu ilave edilmiş ve 30 saniye boyunca yavaş devirde mikserle karıştırılmıştır. Ardından 60 saniye boyunca orta devirde karıştırılmıştır.
- Kabın cidarı temizlendikten sonra işlenebilirliğin sağlanması için ek su ilave edilmiştir. Deneysel çalışma aşamasında %30 PÇ ikameli noktalara, işlenebilirliğin sağlanması için ek suyun yanında kimyasal akışkanlaştırıcı da ilave edilmiştir.
- Karışım, 60 saniye boyunca hızlı devirde karıştırılmıştır. Kabın cidarının temizlenmesinin ardından karışım yeniden 60 saniye boyunca hızlı devirde karıştırılmıştır.

Hazırlanan karışım,  $40 \times 40 \times 160$  mm boyutlarındaki yüzeyleri yağlanmış numune kalıplarına aktarılmıştır. Taze harç numuneleri, sarsma tablası yardımı ile sıkıştırılmıştır (Kalıplar iki aşamada doldurulmuş ve her aşamada 60 düşme gerçekleşmiştir [80]). Sıkıştırma işleminin ardından kalıplar streç filmle sarılmıştır (Şekil 3.10). 3 gün sonra kalıptan çıkarılan numuneler, deneylerin yapılacağı zamana kadar  $21 \pm 1^\circ\text{C}$ 'de sızdırmazlık kürü işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 3.11). Literatürde AAM üretimi için en uygun kür yönteminin sızdırmazlık kürü olduğu görülmektedir [75, 102]. Numuneler, deney gününde streç filmde çıkarılarak deney gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.9. YFC ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  solüsyonu karışımı (a) ile YFC,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  solüsyonu, UK ve NaOH solüsyonu karışımı (b)



Şekil 3.10. Streç filmle sarılmış kalıplar



Şekil 3.11. Sızdırmazlık kürü işlemine tabi tutulan numuneler



Şekil 3.12. Deneylere tabi tutulmaya hazır numuneler

### 3.2.3. Deneyler

Ön deneme çalışması aşamasında üretilen numuneler üzerinde; yayılma tablası deneyi, ultrasonik atımlı dalga hızı deneyi, eğilmede çekme deneyi ve basınç deneyi yapılmıştır. Deneysel çalışma aşamasında üretilen numuneler üzerinde ise yayılma tablası deneyi, priz süresi tayini deneyi, birim hacim ağırlık deneyi, su emme ve boşluk oranı tayini, ultrasonik atımlı dalga hızı deneyi, eğilmede çekme deneyi, basınç deneyi ve SEM analizi yapılmıştır.

#### 3.2.3.1. Yayılma Tablası Deneyi

Harçların işlenebilirliklerinin tespit edilebilmesi için TS EN 1015-3 [103] standardı uyarınca yayılma tablası deneyi uygulanmıştır. Taze harç, kesik huniye iki aşamada ve her aşamada tokmaklanarak yerleştirilmiştir (Şekil 3.13a). Huniden ayrılan taze harcın (Şekil 3.13b) 15 düşüş sonunda çapları ölçülmüştür (Şekil 3.13c). Yayılan harcın x ve y ekseninde ölçülen çaplarının ortalaması, yayılma değerini vermektedir. Şekil 3.14'te yayılma tablası deneyinde kullanılan aletler görülmektedir.



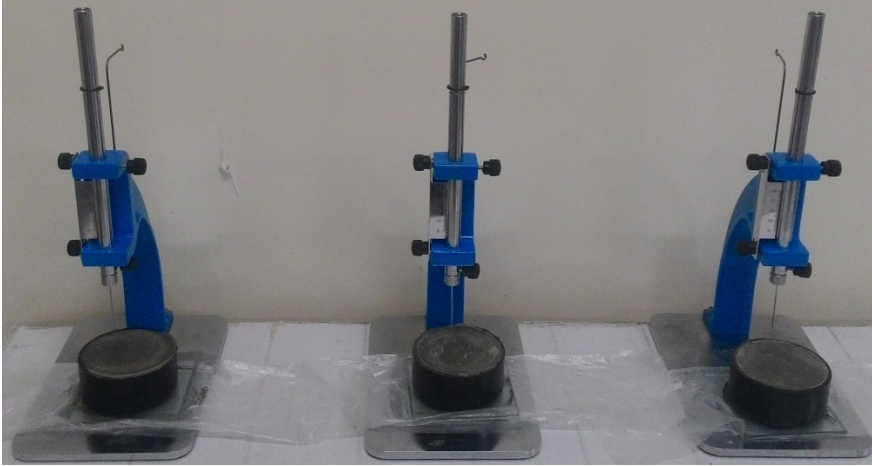
Şekil 3.13. Kesik huniye yerleştirilen harç (a), huniden ayrılan harç (b) ve çapı ölçülen harç (c)



Şekil 3.14. Yayılma tablası deneyinde kullanılan aletler

### 3.2.3.2. Priz Süresi Tayini

Harç numunelerinin başlangıç ve bitiş priz süresi ölçümleri, TS EN 196-3 [104] standardı uyarınca manuel vicat cihazı kullanılarak tayin edilmiştir. Su ile PC'nin karıştırılmaya başlandığı an ile vicat iğnesinin hamur tabanından 3-5 mm yüksekte olduğu an arasındaki süre; priz başlangıç süresini, ters çevrilmiş hamura en fazla 0,05 mm battığı an arasındaki süre ise priz bitiş süresini ifade etmektedir. Şekil 3.15'te priz süresi tayini deney düzeneği görülmektedir.



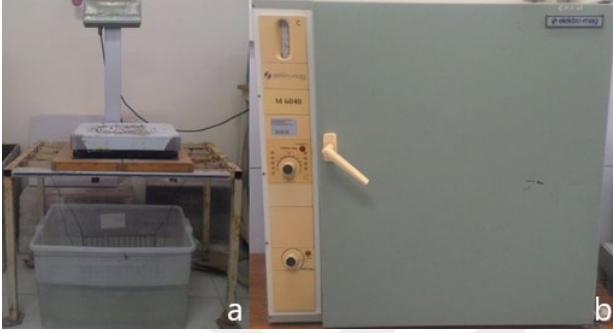
Şekil 3.15. Priz süresi tayini deneyi

### 3.2.3.3. Birim Hacim Ağırlık (BHA) Deneyi

Harç numunelerinin öncelikle doygun yüzey kuru ağırlığı, ardından arşimet terazisi (Şekil 3.16a) ile sudaki ağırlığı belirlenmiştir. Deneyde kullanılan su oda sıcaklığında olup yoğunluğu  $1\text{g/cm}^3$ 'tür. Son olarak  $105\pm 5^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki etüvde (Şekil 3.16b) 24 saat

bekletilerek fırın kurusu ağırlıkları belirlenmiştir. Harç numunelerinin BHA değerleri Denklem 3.4 yardımıyla hesaplanmıştır. Denklem 3.4'te BHA; birim hacim ağırlık ( $g/cm^3$ ), FKA; fırın kurusu ağırlık (g), DYKA; doygun yüzey kuru ağırlık (g), SA; su içindeki ağırlık (g) ve d; suyun yoğunluğudur ( $g/cm^3$ ).

$$BHA = \frac{FKA/(DYKA - SA)}{d} \quad (3.4)$$



Şekil 3.16. Arşimet terazisi (a) ve etüv (b)

#### 3.2.3.4. Ağırlıkça Su Emme ve Boşluk Oranı Tayini

Harç numunelerinin ağırlıkça su emme ve boşluk oranı değerleri sırasıyla Denklem 3.5 ve Denklem 3.6 yardımıyla hesaplanmıştır. Denklem 3.5 ve Denklem 3.6'da ASE; ağırlıkça su emme (%), BO; boşluk oranı (%), FKA; fırın kurusu ağırlık (g), DYKA; doygun yüzey kuru ağırlık (g), SA; su içindeki ağırlık (g) ve d; suyun yoğunluğudur ( $g/cm^3$ ).

$$ASE = \frac{(DYKA - FKA)}{FKA} \times 100 \quad (3.5)$$

$$BO = \frac{(DYKA - FKA)}{(DYKA - SA)/d} \times 100 \quad (3.6)$$

### 3.2.3.5. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Deneyi

Harç numunelerinin homojenitesi, boşluk/çatlak durumu, dayanımı ve kalitesi ile ilgili bilgiler elde edebilmek için TS EN 12504-4 [105] standardı uyarınca ultrasonik atımlı dalga hızı deneyi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.17a ve Şekil 3.17b). PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester) adı verilen cihazda alıcı ve verici bulunmakta olup verici tarafından gönderilen ultrasonik sinyaller numuneyi uçtan uca katederek alıcıya ulaşır ve ultrasonik sinyallerin iletim süresi  $\mu\text{s}$  cinsinden ölçülür. Ultrasonik atımlı dalga hızı Denklem 3.7 yardımıyla hesaplanmıştır. Denklem 3.7’de V; ultrasonik atımlı dalga hızı (km/s), 160; dalganın aldığı yol uzunluğu (mm) ve t; ultrasonik sinyallerin alış-veriş süresidir ( $\mu\text{s}$ ).

$$V = \frac{160}{t} \quad (3.7)$$



Şekil 3.17. Ultrasonik atımlı dalga hızı deney düzeneğinin üstten görünümü (a) ve yandan görünümü (b)

### 3.2.3.6. Eğilmede Çekme Deneyi

Harç numunelerinin eğilme dayanımı TS EN 196-1 [80] standardına göre belirlenmiştir.  $40 \times 40 \times 160$  mm boyutlarındaki sertleşmiş harç numunelerinin yan yüzleri mesnet silindirleri üstüne dik gelecek ve mesnet açıklığı 100 mm olacak şekilde numunelere üç noktadan yükleme yapılmıştır. Eğilmede çekme dayanımı, Denklem 3.8 yardımıyla hesaplanmıştır. Denklem 3.8’de  $f_f$ ; eğilme dayanımı ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ), b; prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu (mm),  $F_f$ ; prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan en büyük kuvvet (N) ve l; mesnetler arasındaki uzaklıktır (mm). Bir kalıptan çıkan 3 numuneye eğilmede çekme deneyi uygulandıktan sonra

ortaya çıkan değerlerin aritmetik ortalaması alınarak eğilme dayanım değeri belirlenmiştir. Şekil 3.18’de eğilmede çekme deney düzeneği görülmektedir.

$$f_f = \frac{1.5 \times F_f \times l}{b^3} \quad (3.8)$$

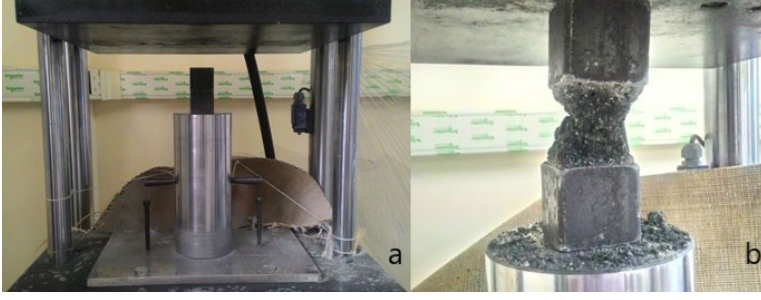


Şekil 3.18. Eğilmede çekme deney düzeneği

### 3.2.3.7. Basınç Deneyi

Harç numunelerinin basınç dayanımı TS EN 196-1 [80] standardına göre belirlenmiştir. Şekil 3.19a’da basma deney düzeneği görülmektedir. Eğilmede çekme deneyi uygulandıktan sonra ortadan ikiye bölünmüş numunelerin düzgün kalıp yüzeyleri, 40×40 mm cihaz başlığı arasına yerleştirilerek kırılmıştır (Şekil 3.19b). Basma dayanımı, Denklem 3.9 yardımıyla hesaplanmıştır. Denklem 3.9’da  $f_c$ ; basınç dayanımı ( $N/mm^2$ ),  $F_c$ ; kırılmadaki en büyük yük (N) ve  $b$ ; prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğudur (mm). Her bir parçaya ait dayanım sonuçlarının ortalaması alınarak numuneye ait basma deney sonucu belirlenmiştir.

$$f_c = \frac{F_c}{b^2} \quad (3.9)$$



Şekil 3.19. Basma deney düzeneği (a) ve deney sonucunda numunenin kırılması (b)

### 3.2.3.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

PÇ ikamesinin harç numunelerinin içyapısı üzerindeki etkilerini araştırmak için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemeler yapılmıştır. SEM, ışığa kıyasla hızlandırılmış elektronların çok daha yüksek ayırma gücüne sahip olduğunun farkedilmesi sonucu görüntü elde etmek amacıyla elektronların mikroskoplarda kullanılabileceği düşünülmüştür. Bu düşünce ile SEM cihazı icat edilmiştir. SEM; görüntüleme sistemi, optik kolon ve numune hücresi olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır. SEM’de görüntü; elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ile numune atomları arasında meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilmektedir [106]. SEM görüntüleri için hazırlanan hamur numuneleri Şekil 3.20’de verilmiştir.



Şekil 3.20. SEM görüntüleri için üretilen hamur numuneleri



## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 4.1. Ön Deneme Çalışması Bulguları

Ön deneme çalışmasının amacı; etki değişkenlerinin (A-ağırlıkça aktivatör oranı,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (S)/NaOH (S); B-ağırlıkça toplam alkali solüsyon/bağlayıcı oranı, Alkali (S)/(YFC+UK); C-NaOH molarite değeri, Molarite (NaOH); D-ağırlıkça  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  solüsyon (S) suyu/ $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  solüsyon (S) oranı, Su  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ /Solüsyon  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ana, etkileşim ve ikinci derece terimlerinin tepki değişkenleri (ultrasonik atımlı dalga hızı, UPV; eğilmede çekme dayanımı,  $f_f$ ; basınç dayanımı,  $f_c$ ) üzerindeki etki düzeylerini belirleyerek seçilen değişim aralıklarında optimum fiziksel ve mekanik özellikleri sağlayan deneme noktasını tespit etmektir. UPV deneyi ve  $f_f$  deneyi kapsamında 3 adet prizma numuneden elde edilen verilerin ortalaması alınarak 1 deney sonucu ve her deneme noktası için 2 deney sonucu (her deneme noktası için toplam 6 adet numune üretilmiştir) elde edilmiştir. Ardından 2 deney sonucunun ortalaması alınarak 1 deneme noktası için ortalama deney sonucu elde edilmiştir. Basınç deneyi kapsamında 1 adet prizma numuneden elde edilen 2 numune sonucunun ortalaması alınarak her prizma numune için ortalama değer elde edilmiştir. Ardından 3 adet prizma numuneden elde edilen verilerin ortalaması alınarak bir deney sonucu elde edilmiştir. Son olarak 2 deney sonucunun ortalaması alınarak 1 deneme noktası için ortalama değer elde edilmiştir. Ön deneme çalışması etki ve tepki değişkenlerine ait deneysel tasarım özetleri sırasıyla Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Ön deneme çalışması etki değişkenlerine ait deneysel tasarım özeti

Faktör	Birim	Tip	Min.	Maks.	Kodlanmış Min. Değer	Kodlanmış Maks. Değer	Ortalama	SS*
A	-	Sayısal	1	3	-1↔1,50	+1↔2,50	2,00	0,4485
B	-	Sayısal	0,35	0,55	-1↔0,40	+1↔0,50	0,45	0,0448
C	M	Sayısal	8,5	14,5	-1↔10,00	+1↔13,00	11,5	1,35
D	%	Sayısal	45	65	-1↔50,00	+1↔60,00	55	4,48

\*SS, Standart Sapma

Çizelge 4.2. Ön deneme çalışması tepki değişkenlerine ait deneysel tasarım özeti

Faktör	İsim	Birim	Analiz	Min.	Maks.	Ortalama	Standart Sapma	Oran	Dönüştürücü	Model
R1	UPV	km/s	Polinom	3,7037	4,4321	4,08	0,1405	1,2	Yok	İndirgenmiş kübik
R2	$f_f$	MPa	Polinom	4	8,3	6,01	0,724	2,08	Yok	İndirgenmiş dörtlenik
R3	$f_c$	MPa	Polinom	18,7	51,8	36,68	6,62	2,77	Ters karekök	İndirgenmiş dörtlenik

#### 4.1.1. İstatistiksel Analiz

Ön deneme çalışması kapsamında ultrasonik atımlı dalga hızı, eğilmede çekme dayanımı ve basma dayanımı sonuçlarına istatistiksel analiz (ANOVA) uygulanmıştır. UPV,  $f_f$  ve  $f_c$  sonuçları üzerinde gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları sırasıyla Çizelge 4.3, Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'te görülmektedir.

Varyans analizinde p-değerinin 0,05'ten küçük olması modeldeki terimlerin tepki değişkenlerini anlamlı düzeyde etkilediğini, 0,1'den büyük olması ise modeldeki terimlerin tepki değişkenlerini anlamlı düzeyde etkilemediğini ifade etmektedir [107]. Dolayısıyla tüm tepki değişkenleri için elde edilen modellerin anlamlı olduğu görülmektedir.

A etki değişkeninin ana teriminin UPV üzerindeki etki düzeyinin oldukça düşük ( $p_A = 0,6462$ ) olduğu görülmektedir (Çizelge 4.3). Hiyerarşik bir model elde edilebilmesi için etki düzeyi düşük olan A terimi de UPV'ye ait modele ilave edilmiştir.  $f_f$  tepki değişkenine ait varyans analizi incelendiğinde tüm etki değişkenlerinin ana terimlerinin tepki değişkeni üzerindeki etki düzeyleri oldukça düşüktür (Çizelge 4.4). En yüksek etkiye sahip ana etki değişkeni D olurken ( $p_D = 0,0360$ ) en düşük veya hiç etkiye sahip olmayan ana etki değişkeni A ( $p_A = 1,0000$ ) olarak elde edilmiştir. Hiyerarşik bir model elde edilebilmesi için etki düzeyi düşük olan A, B ve C terimleri de  $f_f$ 'e ait modele ilave edilmiştir.  $f_c$  tepki değişkenine ait varyans analizi incelendiğinde A ( $p_A = 0,2398$ ) ve C ( $p_C = 0,1368$ ) etki değişkenlerinin ana terimlerinin tepki değişkeni üzerinde etki düzeyleri oldukça düşüktür (Çizelge 4.5). Fakat B ( $p_B < 0,0001$ ) ve D ( $p_D < 0,0001$ ) ana terimlerinin etki düzeyleri oldukça yüksektir. Hiyerarşik bir model elde edilebilmesi için etki düzeyi düşük olan A ve C terimleri de  $f_c$ 'e ait modele ilave edilmiştir.

Çizelge 4.3. UPV'ye ait varyans analiz sonuçları

Terim	Kareler toplamı	sd*	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	Anlamlılık
Model	1,36	14	0,0970	57,01	<0,0001	Anlamlı
A	0,0004	1	0,0004	0,2129	0,6462	
B	0,0895	1	0,0895	52,60	<0,0001	
C	0,1714	1	0,1714	100,70	<0,0001	
D	0,0568	1	0,0568	33,35	<0,0001	
AB	0,3213	1	0,3213	188,76	<0,0001	
AC	0,0103	1	0,0103	6,08	0,0166	
BC	0,0381	1	0,0381	22,35	<0,0001	
BD	0,0954	1	0,0954	56,03	<0,0001	
CD	0,0247	1	0,0247	14,50	0,0003	
D <sup>2</sup>	0,0159	1	0,0159	9,35	0,0033	
ABC	0,0179	1	0,0179	10,51	0,0019	
ACD	0,2127	1	0,2127	124,96	<0,0001	
BCD	0,1107	1	0,1107	65,05	<0,0001	
A <sup>2</sup> C	0,0883	1	0,0883	51,85	<0,0001	
Artık	0,1021	60	0,0017			
Uyum Yokluğu	0,0106	7	0,0015	0,8751	0,5323	Anlamsız
Saf Hata	0,0916	53	0,0017			
Düzeltilmiş Kareler Toplamı	1,46	74				

\*sd, serbestlik derecesi

Deneysel tasarımda her bir deneme noktası için iki üretim gerçekleştirilmiştir (2 tekrar). Elde edilen iki deney sonucunun doğru tekrara sahip olup olmadığının tespiti, uyum yokluğu sınaması ile gerçekleştirilmiştir. Uyum yokluğu sınaması tepki üzerindeki iki veya daha fazla gözlemin (tekrar) elde edilmesinde kullanılmaktadır [107]. Uyum yokluğunun anlamsız olması istenen bir durum olup bütün tepki değişkenleri için uyum yokluğunun anlamsız olduğu görülmektedir (Çizelge 4.3, Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5).

Çizelge 4.4. f<sub>f</sub>'e ait varyans analiz sonuçları

Terim	Kareler toplamı	Sd*	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	Anlamlılık
Model	60,61	16	3,79	19,55	<0,000	Anlamlı
A	7,105E-15	1	7,105E-15	3,668E-14	1,0000	
B	0,1305	1	0,1305	0,6737	0,4130	
C	0,0703	1	0,0703	0,3628	0,5478	
D	0,8663	1	0,8663	4,47	0,0360	
AB	8,30	1	8,30	42,85	<0,000	
AD	6,07	1	6,07	31,32	<0,000	
BC	2,22	1	2,22	11,44	0,0009	
CD	4,61	1	4,61	23,79	<0,000	
A <sup>2</sup>	0,9754	1	0,9754	5,03	0,0262	
B <sup>2</sup>	2,02	1	2,02	10,41	0,0015	
C <sup>2</sup>	1,82	1	1,82	9,40	0,0026	
ABC	5,77	1	5,77	29,81	<0,000	
ABD	3,56	1	3,56	18,37	<0,000	
BCD	1,89	1	1,89	9,78	0,0021	
AB <sup>2</sup>	1,16	1	1,16	5,97	0,0157	
A <sup>2</sup> B <sup>2</sup>	9,51	1	9,51	49,10	<0,000	
Artık	30,61	158	0,1937			
Uyum Yokluğu	0,8420	8	0,1053	0,5304	0,8322	Anlamsız
Saf Hata	29,77	150	0,1984			
Düzeltilmiş Kareler Toplamı	91,21	174				

\*sd, serbestlik derecesi

Ön deneme çalışması kapsamında elde edilen modellerin anlamlılığı aynı zamanda uyum istatistiği ile ortaya konmaktadır. Tepki değişkenlerine ait uyum istatistiği sonuçları Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.5.  $f_c$ 'ye ait varyans analiz sonuçları

Terim	Kareler toplamı	sd	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	Anlamlılık
Model	0,0464	18	0,0026	56,71	< 0,0001	Anlamlı
A	0,0001	1	0,0001	1,39	0,2398	
B	0,0048	1	0,0048	105,66	< 0,0001	
C	0,0001	1	0,0001	2,24	0,1368	
D	0,0034	1	0,0034	74,34	< 0,0001	
AB	0,0015	1	0,0015	33,38	< 0,0001	
AC	0,0017	1	0,0017	37,72	< 0,0001	
AD	0,0010	1	0,0010	22,37	< 0,0001	
BC	0,0013	1	0,0013	29,52	< 0,0001	
BD	0,0004	1	0,0004	9,66	0,0022	
CD	0,0013	1	0,0013	28,74	< 0,0001	
B <sup>2</sup>	0,0006	1	0,0006	13,85	0,0003	
C <sup>2</sup>	0,0004	1	0,0004	8,16	0,0048	
ABC	0,0067	1	0,0067	148,30	< 0,0001	
ABD	0,0009	1	0,0009	19,49	< 0,0001	
ACD	0,0013	1	0,0013	27,75	< 0,0001	
BCD	0,0038	1	0,0038	83,27	< 0,0001	
ABCD	0,0003	1	0,0003	6,03	0,0151	
A <sup>2</sup> B <sup>2</sup>	0,0128	1	0,0128	282,66	< 0,0001	
Artık	0,0073	161	0,0000			
Uyum Yokluğu	0,0006	6	0,0001	2,23	0,0430	Anlamsız
Saf Hata	0,0067	155	0,0000			
Düzeltilmiş Kareler Toplamı	0,0537	179				

\*sd, serbestlik derecesi

Uygun kesinlik değeri, işaret/gürültü oranını hesaplamak için kullanılmaktadır. Bu değer 4'ten büyük olması arzu edilmektedir [107]. Bütün tepki değişkenleri için uygun kesinlik değerinin (UPV; 33,5777,  $f_{\beta}$ ; 16,0063 ve  $f_c$ ; 36,2128) arzu edilen değer üzerinde olması, modellerin tasarım uzayında (seçilen değişim aralıkları içerisinde) uygun (yeterli) işaret oluşturduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.6. Uyum istatistiği

Tepki	Birim	Standart sapma	Ortalama	Varyasyon katsayısı	R <sup>2</sup>	Ayarlı R <sup>2</sup>	Tahmini R <sup>2</sup>	UKD*
UPV	km/s	0,0413	4,08	1,01	0,9301	0,9138	0,8860	33,5777
f <sub>f</sub>	MPa	0,4401	6,01	7,32	0,6644	0,6305	0,5929	16,0063
f <sub>c</sub>	MPa	0,0067	0,1674	4,03	0,8638	0,8485	0,8272	36,2128

\*UKD, Uygun Kesinlik Değeri

Tepki değişkenleri (UPV, f<sub>f</sub> ve f<sub>c</sub>) için R<sup>2</sup> değerleri sırasıyla 0,9301; 0,6644 ve 0,8638 olarak elde edilmiştir. Ayarlı R<sup>2</sup> değeri, hem elde edilen modelin yeterliliğinin hem de modele eklenen terimlerin tepki değişkeni üzerinde anlamlı düzeyde etkilere sahip olduğunu göstermektedir [107]. Ayarlı R<sup>2</sup> değerinin yüksek olması istenen bir durumdur ve R<sup>2</sup> değerinden büyük sapmalar göstermemelidir. UPV, f<sub>f</sub> ve f<sub>c</sub> için elde edilen modellerin R<sup>2</sup> ile ayarlı R<sup>2</sup> değeri arasındaki fark sırasıyla 0,0163; 0,0339 ve 0,0153'tür. Ayrıca ayarlı R<sup>2</sup> ve tahmini R<sup>2</sup> değerlerinin makul düzeyde uyuşması (ayarlı R<sup>2</sup> - tahmini R<sup>2</sup> ≤ 0,2 [107]), modellerden elde edilen yeni verilerdeki değişkenlik (tahmin hatası) miktarının uygun olduğunu göstermektedir. UPV, f<sub>f</sub> ve f<sub>c</sub> için elde edilen modellerin ayarlı R<sup>2</sup> - tahmini R<sup>2</sup> değerleri sırasıyla 0,0278; 0,0376 ve 0,0213'tür. Modele ek terim ilave edilerek R<sup>2</sup> değeri artırılabilir. Fakat bu durumda modelde çok fazla terim yer aldığından terimlerin anlamlılık düzeyleri azalmakta, ayarlı R<sup>2</sup> - tahmini R<sup>2</sup> farkı artmakta ve tahmini R<sup>2</sup> değeri azalmaktadır.

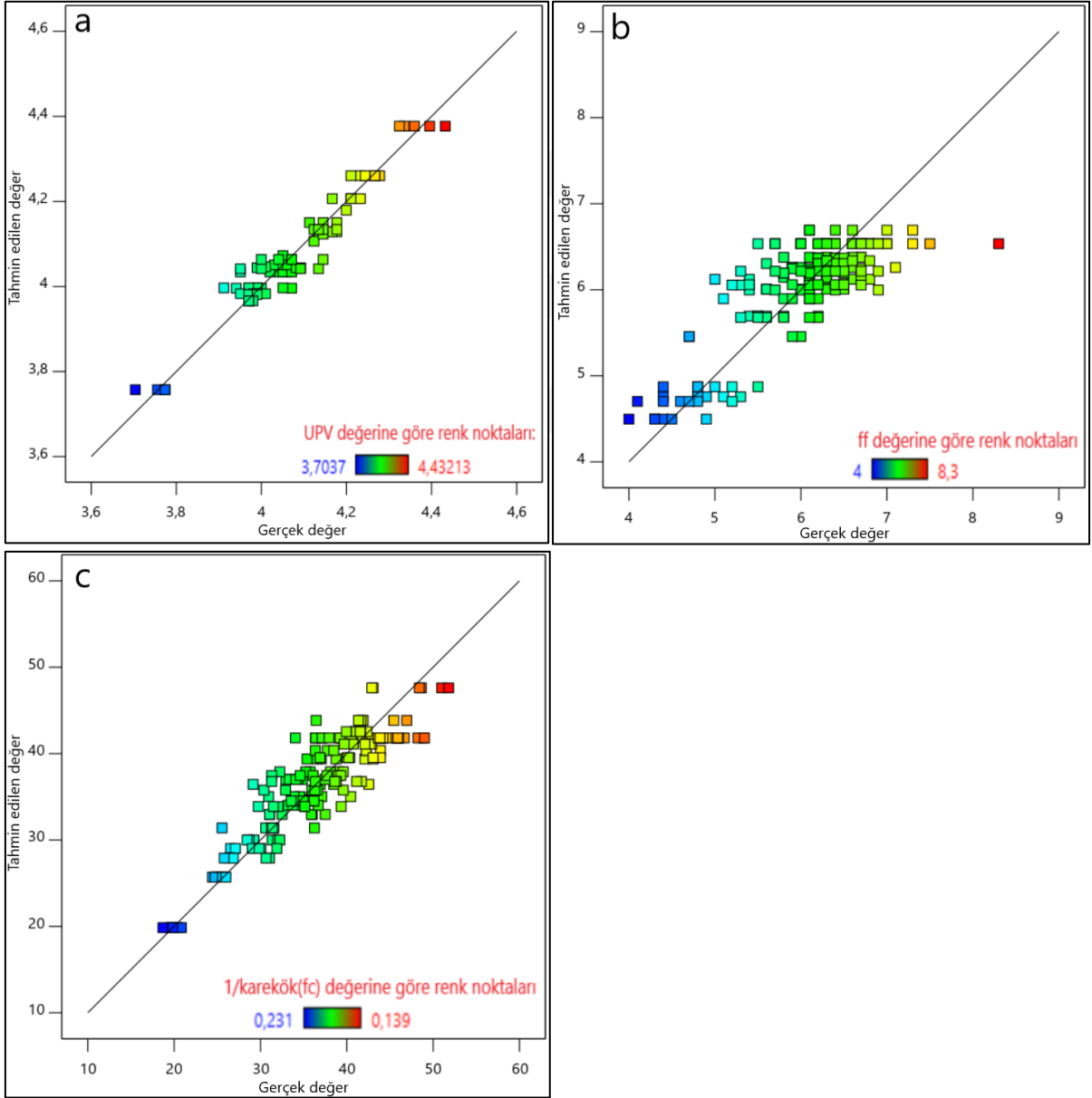
Tepki değişkenleri UPV, f<sub>f</sub> ve f<sub>c</sub> için ANOVA'dan elde edilen modellere ait denklemler sırasıyla Denklem 4.1, Denklem 4.2 ve Denklem 4.3'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 \text{UPV} = & 22,219 - 6,3 \cdot A - 41,48 \cdot B - 2,243 \cdot C - 0,009 \cdot D + 15,429 \cdot A \cdot \\
 & B + 0,396 \cdot A \cdot C + 4,228 \cdot B \cdot C + 0,203 \cdot B \cdot D + 0,026 \cdot C \cdot D - 0,001 \cdot \\
 & D^2 - 1,0433 \cdot A \cdot B \cdot C + 0,0004 \cdot A \cdot C \cdot D - 0,041 \cdot B \cdot C \cdot D - 0,002 \cdot A^2 \cdot C
 \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned}
 f_f = & 79,51 - 29,533 \cdot A - 219,186 \cdot B - 2,089 \cdot C - 0,553 \cdot D + 115,037 \cdot \\
 & A \cdot B - 0,246 \cdot A \cdot D + 5,616 \cdot B \cdot C + 0,088 \cdot C \cdot D + 1,347 \cdot A^2 + 196,117 \cdot \\
 & B^2 - 0,08 \cdot C^2 - 0,3 \cdot A \cdot B \cdot C + 0,789 \cdot A \cdot B \cdot D - 0,127 \cdot B \cdot C \cdot D - \\
 & 119,56 \cdot A \cdot B^2 - 9,657 \cdot A^2 \cdot B^2
 \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned}
1/\sqrt{f_c} = & 0,003 + 2,632 \cdot A + 2,347 \cdot B + 0,078 \cdot C - 0,026 \cdot D - 7,288 \cdot A \cdot \\
& B - 0,264 \cdot A \cdot C - 0,026 \cdot A \cdot D - 0,467 \cdot B \cdot C + 0,025 \cdot B \cdot D + 0,0009 \cdot C \cdot \\
& D + 1,608 \cdot B^2 + 0,002 \cdot C^2 + 0,719 \cdot A \cdot B \cdot C + 0,079 \cdot A \cdot B \cdot D + 0,003 \cdot \\
& A \cdot C \cdot D + 0,001 \cdot B \cdot C \cdot D - 0,009 \cdot A \cdot B \cdot C \cdot D + 0,053 \cdot A^2 \cdot B^2
\end{aligned}
\tag{4.3}$$

Tepki değişkenleri için oluşturulan modellerden elde edilen tahmini değerler ile gerçek (deney sonucu) değerler Şekil 4.1’de görölmektedir.



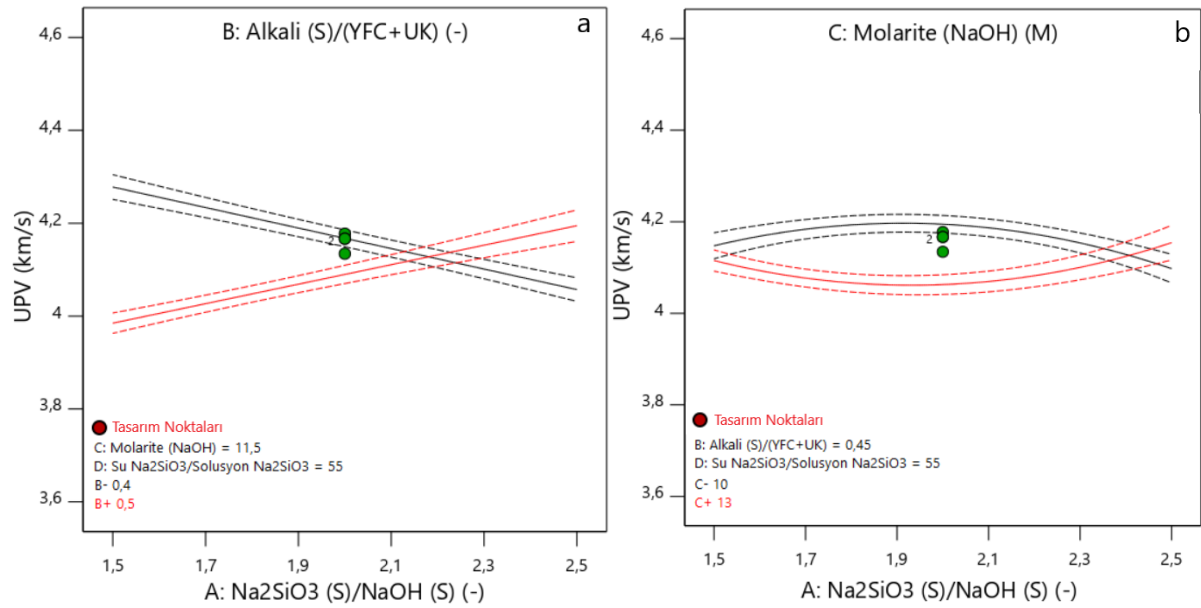
Şekil 4.1. UPV (a),  $f_r$  (b) ve  $f_c$  (c) için gerçek ve tahmini değerler

Şekil 4.1 incelendiğinde tahmini değerler ile gerçek değerler arasındaki en yüksek farkın  $R^2$  değeri düşük olan  $f_f$ 'de (0,6644) olduğu görülmektedir.

#### 4.1.2. Tepki Yüzeyleri

##### 4.1.2.1. UPV'ye ait tepki yüzeyleri

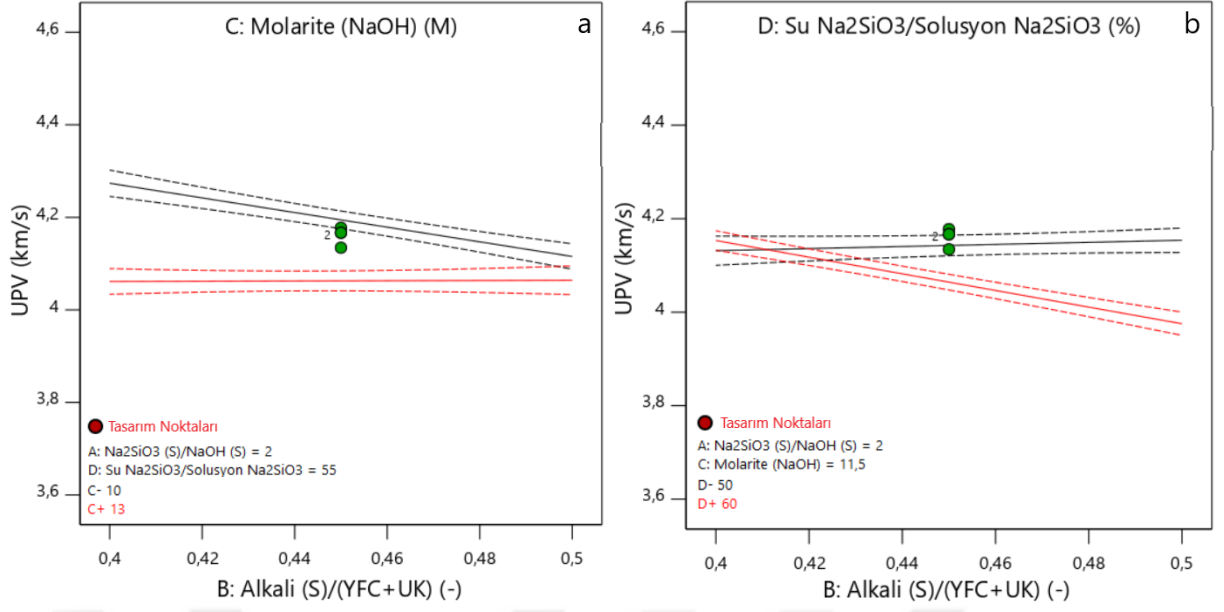
Seçilen etki değişkenlerinin değişim aralığında tepki değişkeni UPV'nin değişimi etkileşim, kontur ve 3D grafikleri ile ortaya konmuştur. UPV tepki değişkenini etkileyen etkileşim terimlerine ait etkileşim grafikleri Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.2. UPV için AB (a) ve AC (b) terimlerinin etkileşim grafikleri

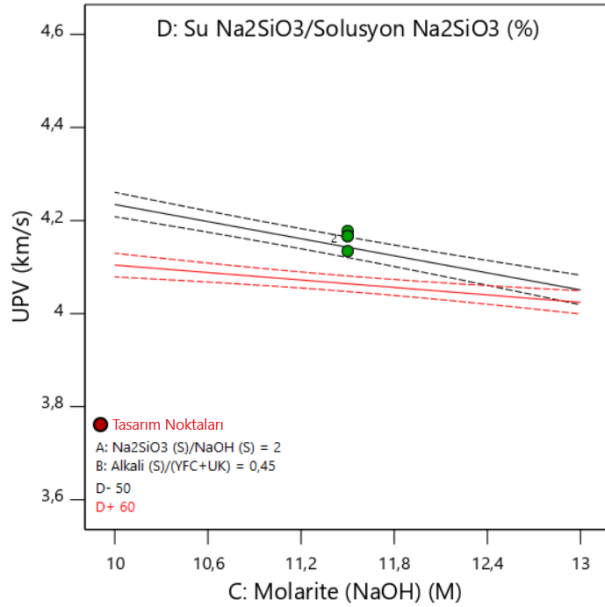
AB etkileşim grafiği (Şekil 4.2a) incelendiğinde, B'nin minimum değerinde (düşük alkali solüsyon içeriğinde) A'daki artış ile UPV değeri azalırken B'nin maksimum değerinde (yüksek alkali solüsyon içeriğinde) artmaktadır. AC etkileşim grafiği (Şekil 4.2b) incelendiğinde, C'nin minimum değerinde A'daki artışın UPV değerini belli bir değere kadar arttırdıktan sonra azaltırken C'nin maksimum değerinde UPV değerini belli bir değere kadar azalttıktan sonra artırdığı görülmektedir.





Şekil 4.3. UPV için BC (a) ve BD (b) terimlerinin etkileşim grafikleri

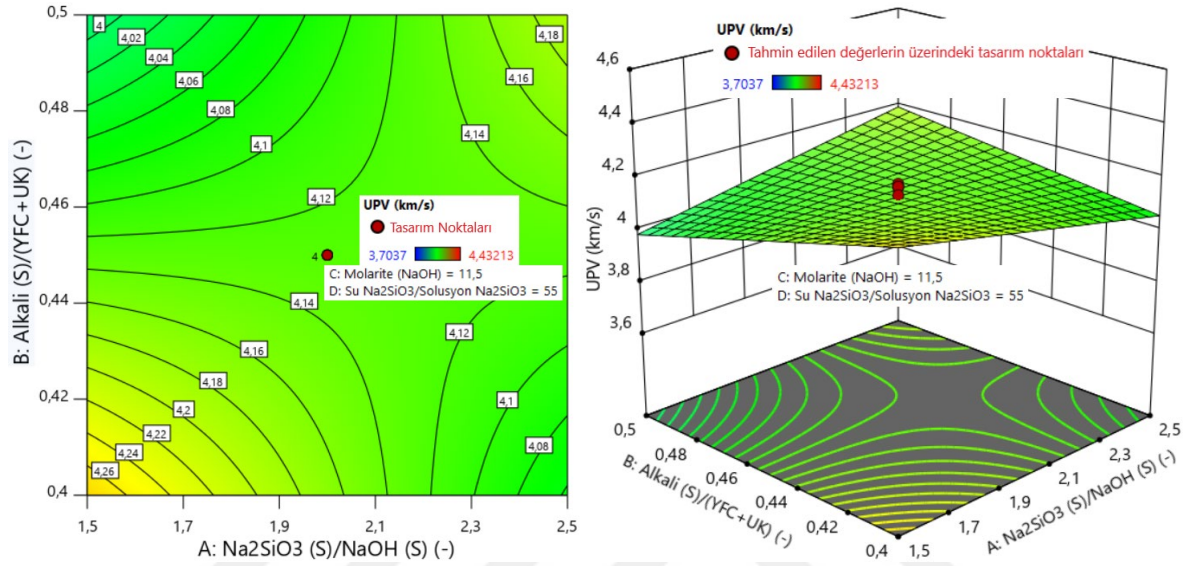
BC etkileşim grafiği (Şekil 4.3a) incelendiğinde, C'nin minimum değerinde B'deki artışın UPV değerini azaltırken C'nin maksimum değerinde UPV değerinde oldukça az bir değişim (artma) gerçekleştiği görülmektedir. BD etkileşim grafiği (Şekil 4.3b) incelendiğinde, D'nin minimum değerinde B'deki artışın UPV değerini az da olsa artırırken D'nin maksimum değerinde UPV değerini azalttığı görülmektedir.



Şekil 4.4. UPV için CD teriminin etkileşim grafiği

CD etkileşim grafiği (Şekil 4.4) incelendiğinde; D'nin minimum ve maksimum değerinde C'deki artışın UPV değerini azalttığı görülmektedir. D'nin maksimum değerinde C'nin UPV'ye etkisi daha azdır.

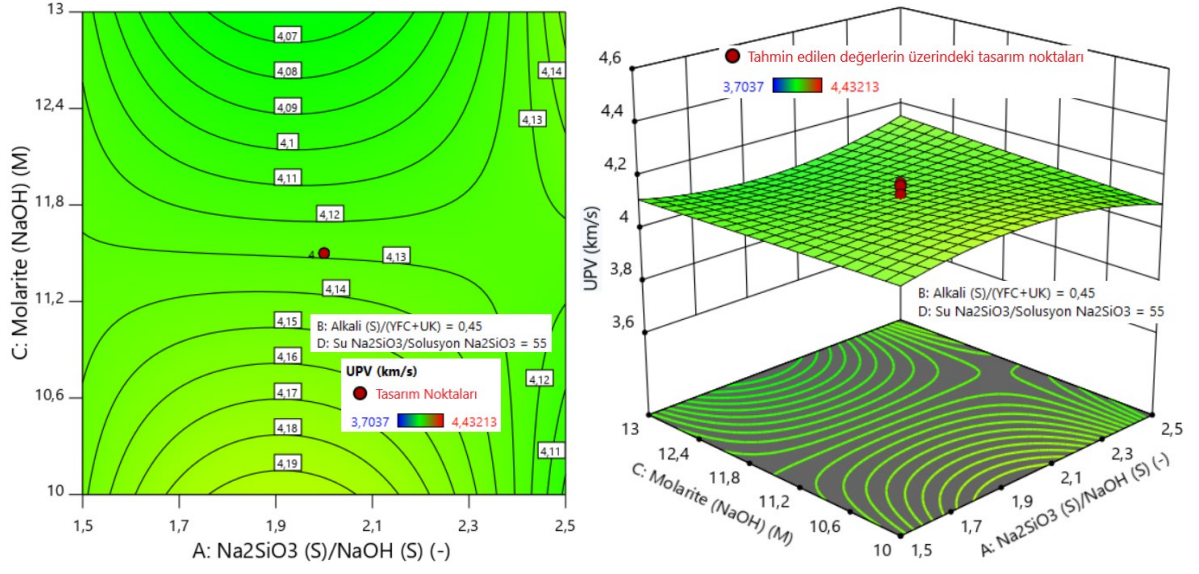
AB, AC, BC, BD ve DC terimleri için elde edilen kontur ve 3D grafikleri sırasıyla Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmiştir.



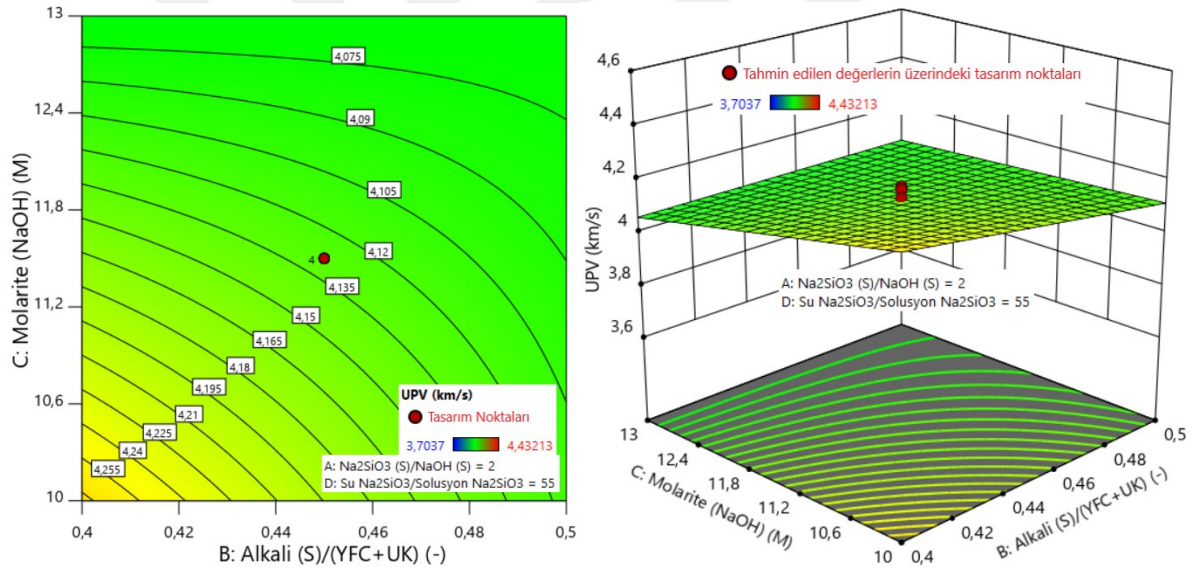
Şekil 4.5. UPV için AB terimine ait kontur ve 3D grafikleri

AB terimine ait kontur grafiğinde UPV değişiminin eyer şeklinde oluştuğu (Şekil 4.5), A ve B değişkenlerinin her ikisinin de minimum ve maksimum olduğu noktalarda UPV değerinin maksimuma yaklaştığı görülmektedir. Fakat maksimum UPV değeri, A ve B değişkenlerinin her ikisinin de minimum olduğu değerlerde elde edilmektedir.

AC terimine ait kontur grafiğinde UPV'nin değişimi (Şekil 4.6), A teriminin yüksek olduğu değerlerde oldukça karmaşık bir yapı göstermektedir. Fakat UPV; A teriminin yaklaşık 2,4 değerine kadar yükselen bayır şeklinde bir değişim göstermektedir. Maksimum UPV değeri C teriminin minimum (10 M), A teriminin ise yaklaşık 1,9 olduğu değerlerde elde edilmektedir.

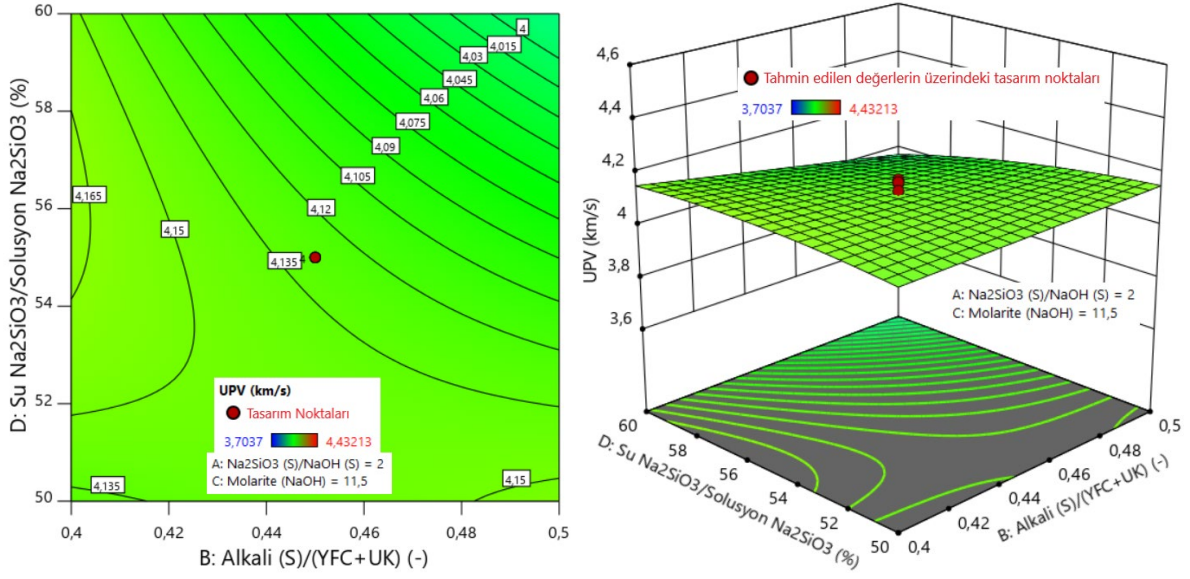


Şekil 4.6. UPV için AC terimine ait kontur ve 3D grafikleri



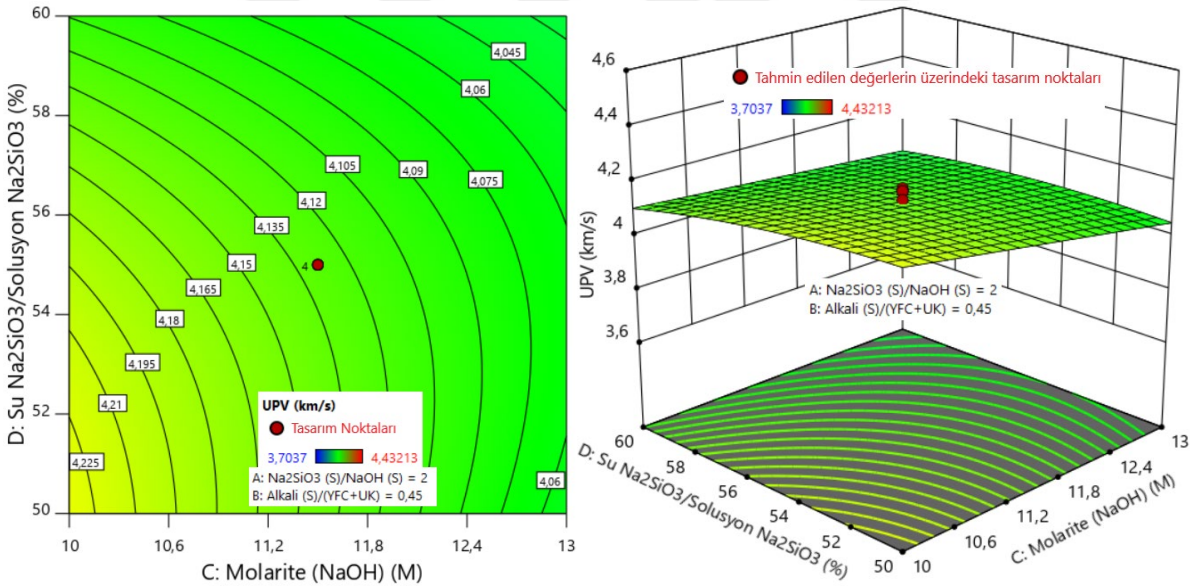
Şekil 4.7. UPV için BC terimine ait kontur ve 3D grafikleri

BC terimine ait kontur grafiğinde UPV'nin değişimi (Şekil 4.7); B ve C teriminin maksimum değerlerinde doğrusallıktan sapma göstermektedir. Maksimum UPV değeri B ve C teriminin minimum olduğu değerlerde elde edilmektedir.



Şekil 4.8. UPV için BD terimine ait kontur ve 3D grafikleri

BD terimine ait kontur grafiğinde UPV'nin değişimi (Şekil 4.8) eyer şeklini almaktadır. B ve D terimlerinin yüksek değerleri UPV değerinin azalmasına neden olmaktadır.

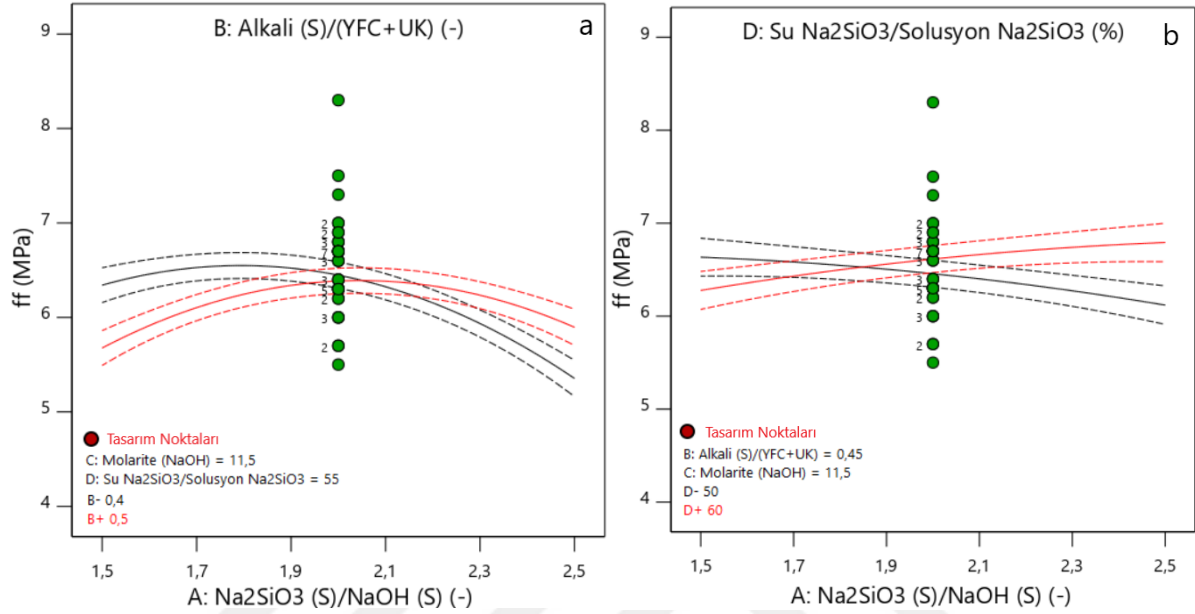


Şekil 4.9. UPV için CD terimine ait kontur ve 3D grafikleri

CD terimine ait kontur grafiğinde UPV'nin değişimi (Şekil 4.9) basit maksimum (tepe) şeklini almaktadır. C ve D terimlerinin minimum değerlerinde UPV değeri maksimum değeri almaktadır.

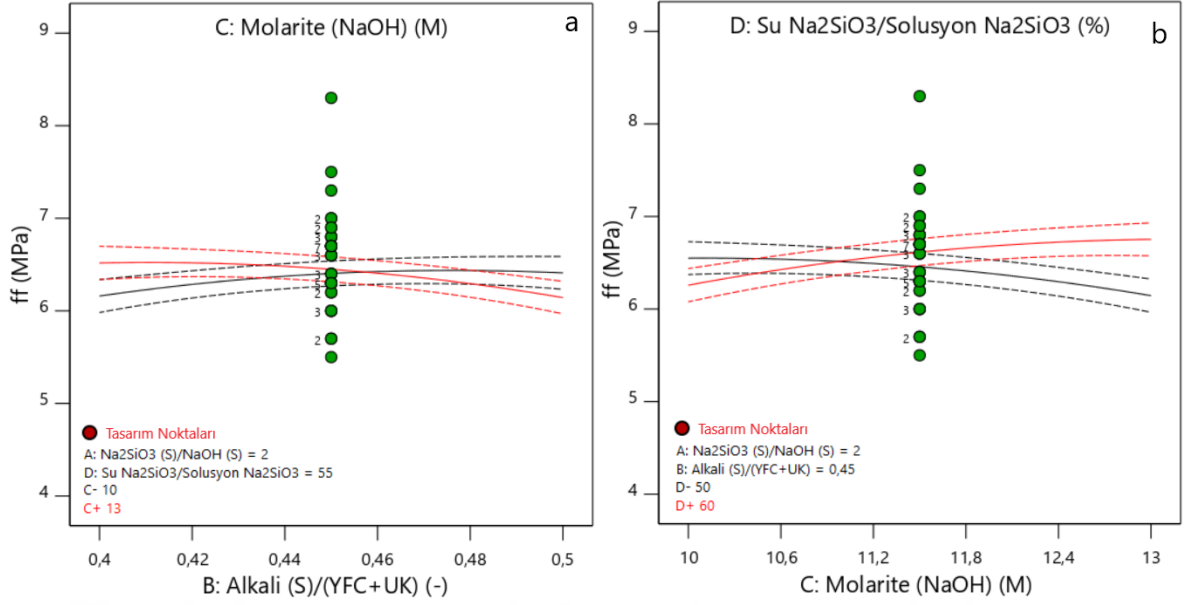
#### 4.1.2.2. Eğilmede çekme deneyine ait tepki yüzeyleri

Seçilen etki değişkenlerinin değişim aralığında tepki değişkeni  $f_f$ 'nin değişimi etkileşim, kontur ve 3D grafikleri ile ortaya konmuştur.  $f_f$  tepki değişkenini etkileyen etkileşim terimlerine ait etkileşim grafikleri Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.10.  $f_f$  için AB (a) ve AD (b) terimlerine ait etkileşim grafikleri

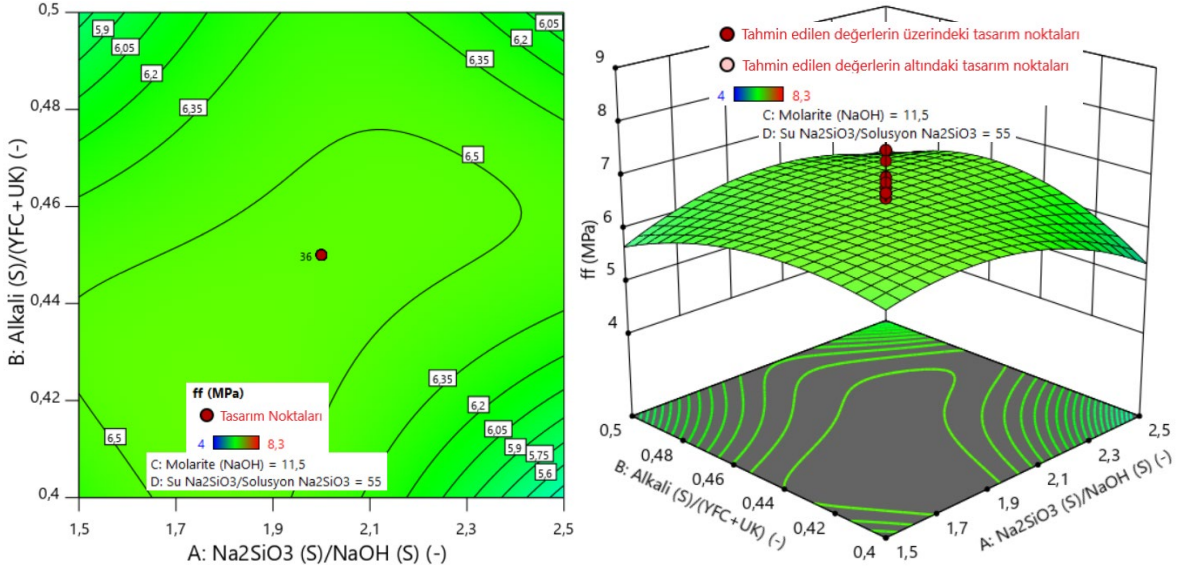
AB terimine ait etkileşim grafiği (Şekil 4.10a) incelendiğinde; B'nin minimum ve maksimum değerinde A'daki artışın  $f_f$  değerini belli bir değere kadar arttırdıktan sonra azalttığı görülmektedir. AD terimine ait etkileşim grafiği (Şekil 4.10b) incelendiğinde ise D'nin minimum değerinde A'daki artışın  $f_f$  değerini azaltırken, D'nin maksimum değerinde  $f_f$  değerini arttırdığı görülmektedir.



Şekil 4.11.  $f_f$  için BC (a) ve CD (b) terimlerine ait etkileşim grafikleri

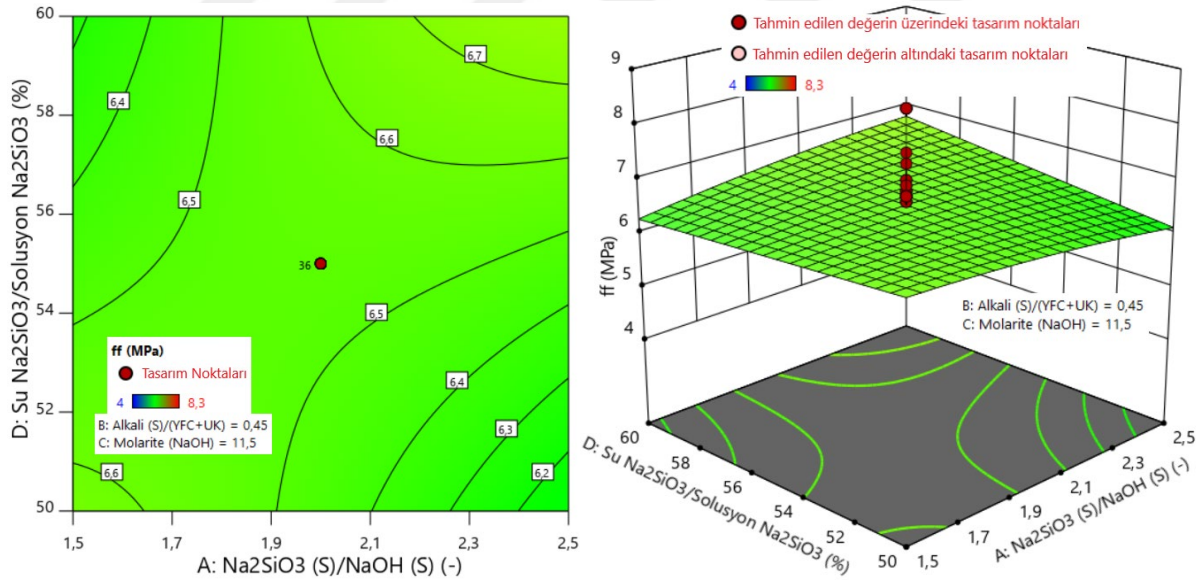
BC terimine ait etkileşim grafiği (Şekil 4.11a) incelendiğinde; C'nin minimum değerinde B'deki artışın  $f_f$  değerini belli bir değere kadar artırdıktan sonra azaltırken C'nin maksimum değerinde  $f_f$  değerini azalttığı görülmektedir. C'nin maksimum ve minimum değerlerinde B'deki artış  $f_f$  değerinde oldukça az değişkenlik oluşturmaktadır. CD terimine ait etkileşim grafiği (Şekil 4.11b) incelendiğinde; D'nin minimum değerinde C'deki artışın  $f_f$  değerini azaltırken D'nin maksimum değerinde  $f_f$  değerini artırdığı görülmektedir.

Eğilmede çekme dayanımlarına ait AB, AD, BC, CD terimlerinin kontur ve 3D grafikleri sırasıyla Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te verilmiştir.



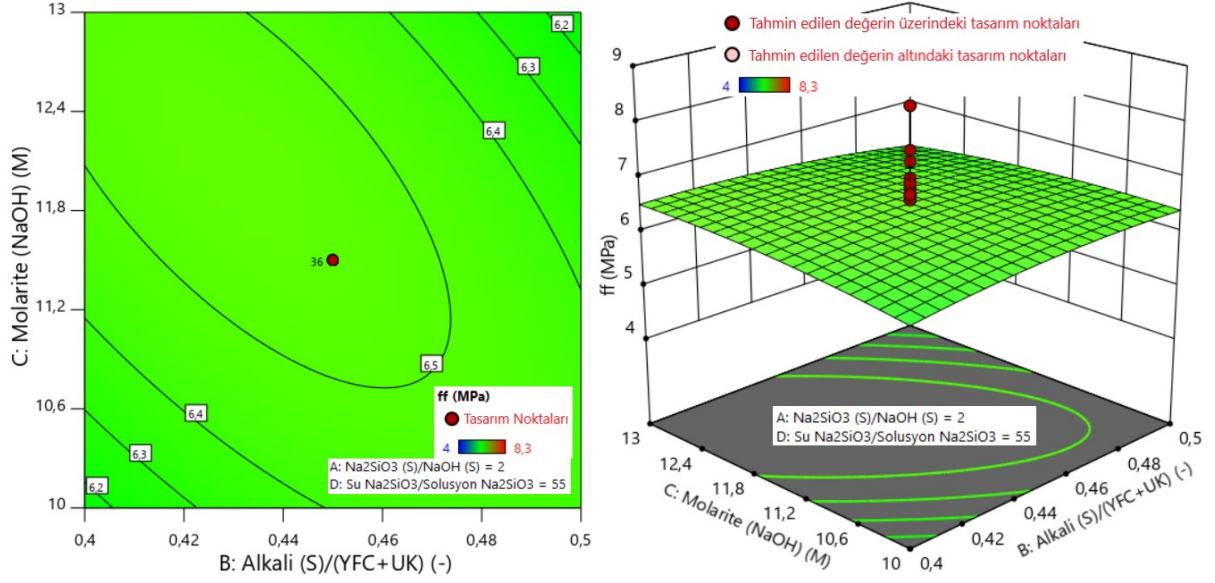
Şekil 4.12.  $f_f$  için AB terimine ait kontur ve 3D grafikleri

Şekil 4.12’de AB terimine ait kontur grafiği incelendiğinde grafiğin basit maksimum (tepe) şeklinde olduğu ve maksimum değerin A ve B etki değişkenlerinin merkez noktalarında elde edildiği görülmektedir.



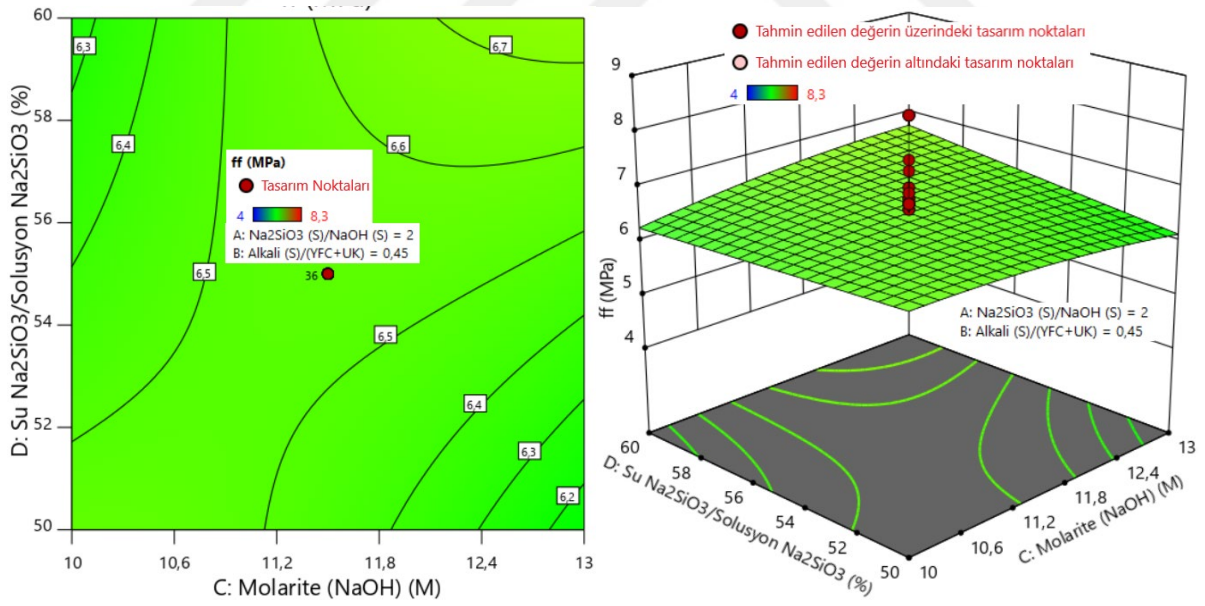
Şekil 4.13.  $f_f$  için AD terimine ait kontur ve 3D grafikleri

Şekil 4.13’te AD terimine ait kontur grafiği incelendiğinde değişimin eyer şeklinde olduğu görülmektedir. Maksimum  $f_f$  değeri A ve D’nin maksimum değerlerinde elde edilmiştir. A ve D’nin minimum değerlerinde de  $f_f$  değerinde artış eğilimi görülmekle beraber bu değişimin oldukça düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 4.14.  $f_f$  için BC terimine ait kontur ve 3D grafikleri

Şekil 4.14'te BC terimine ait kontur grafiği incelendiğinde değişimin yükselen tepe şeklinde olduğu ve maksimum değer B ve C etki değişkenlerinin merkez noktalarında elde edildiği görülmektedir.



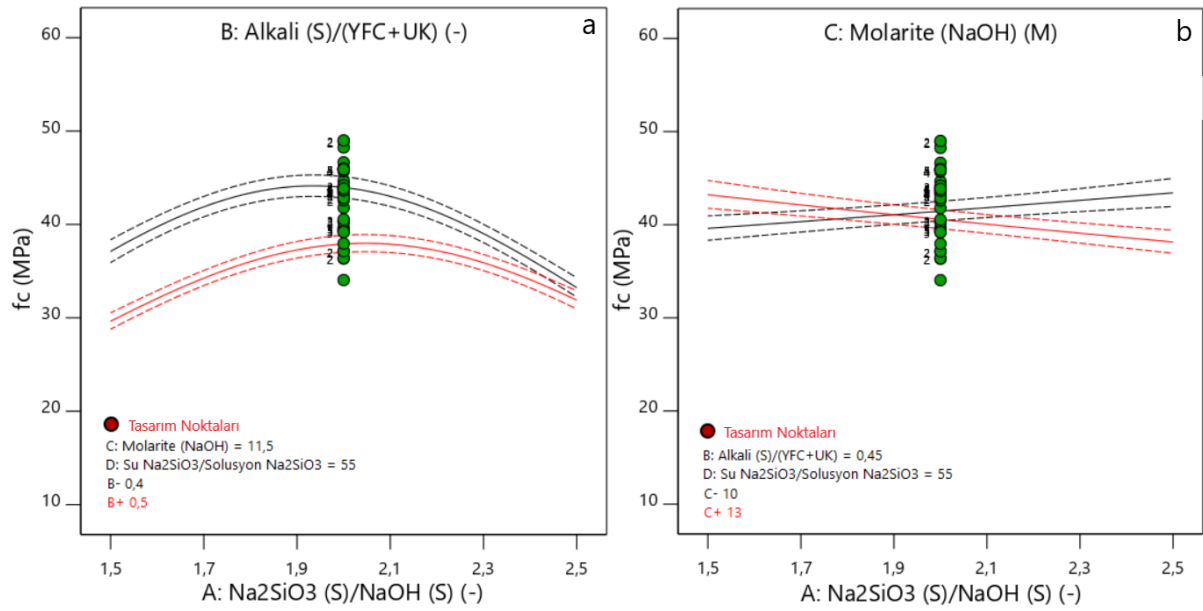
Şekil 4.15.  $f_f$  için CD terimine ait kontur ve 3D grafikleri



Şekil 4.15'te CD terimine ait kontur grafiği incelendiğinde değişimin eyer şeklinde oluştuğu görülmektedir. Maksimum  $f_c$  değeri C ve D'nin maksimum değerlerinde elde edilmiştir. C ve D'nin minimum değerlerinde de  $f_c$  değerinde artış eğilimi görülmekle beraber bu değişimin seçilen değişim aralığında oldukça düşük olduğu görülmektedir.

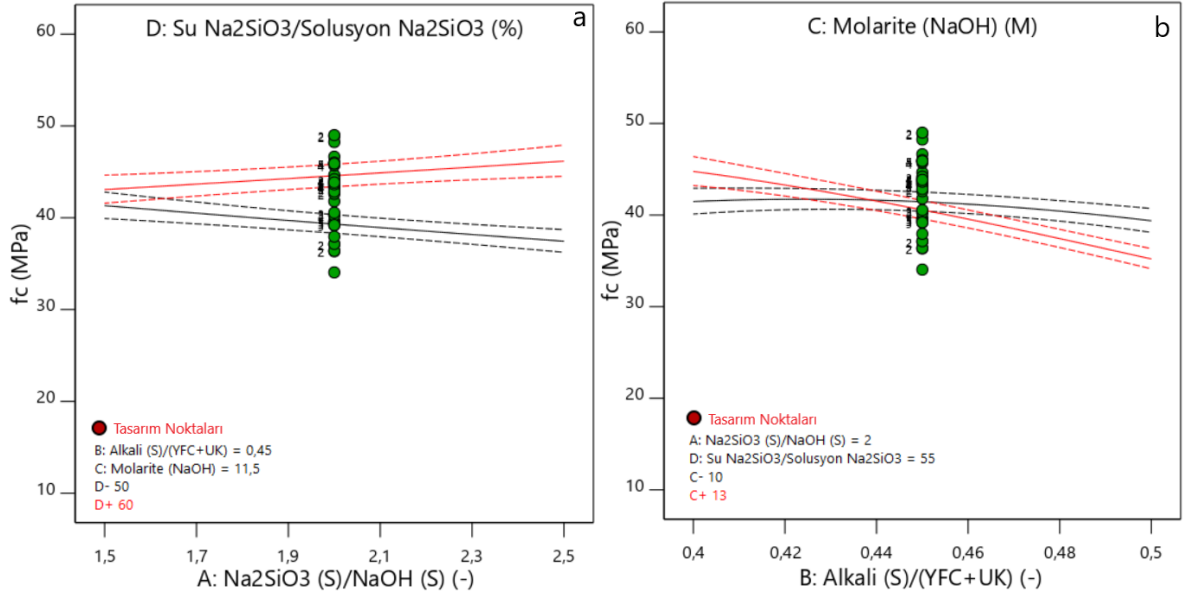
#### 4.1.2.3. Basınç deneyine ait tepki yüzeyleri

Seçilen etki değişkenlerinin değişim aralığında tepki değişkeni  $f_c$ 'nin değişimi etkileşim, kontur ve 3D grafikleri ile ortaya konmuştur.  $f_c$  tepki değişkenini etkileyen etkileşim terimlerine ait etkileşim grafikleri Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de verilmiştir.



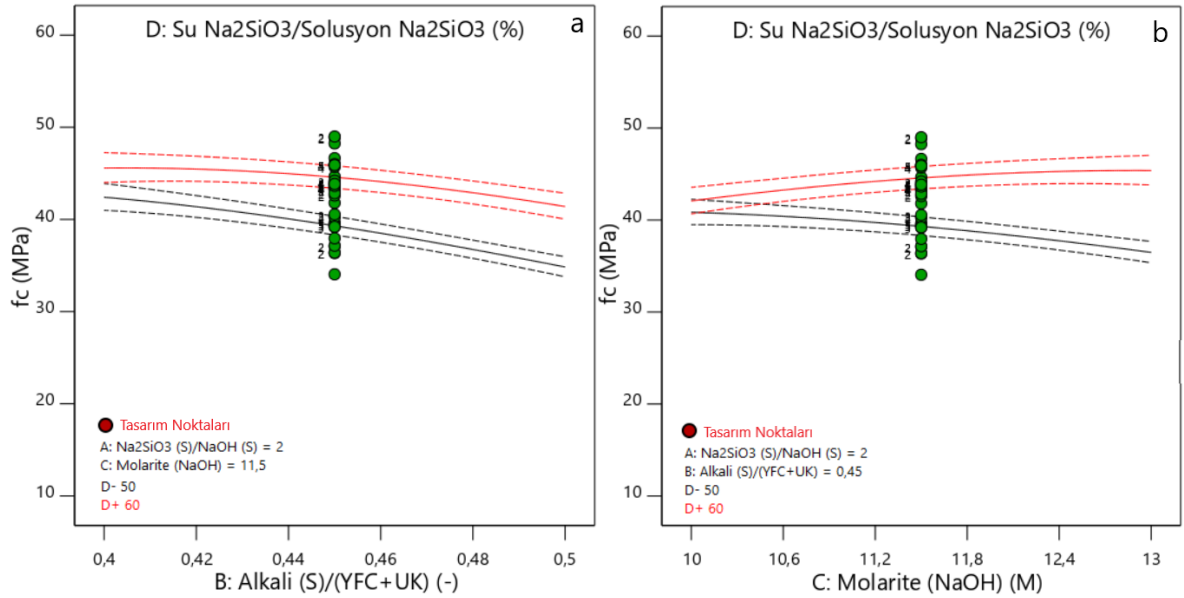
Şekil 4.16.  $f_c$  için AB (a) ve AC (b) terimlerine ait etkileşim grafikleri

AB etkileşim grafiği (Şekil 4.16a) incelendiğinde; B'nin minimum ve maksimum değerinde A'daki artışın  $f_c$  değerini belli bir değere kadar artırdıktan sonra azalttığı görülmektedir. Maksimum  $f_c$  farkı A ve B'nin minimum değerlerinde elde edilmiştir. AC etkileşim grafiği (Şekil 4.16b) incelendiğinde; C'nin minimum değerinde A'daki artışın  $f_c$  değerini artırırken C'nin maksimum değerinde  $f_c$  değerini azalttığı görülmektedir.



Şekil 4.17.  $f_c$  için AD (a) ve BC (b) terimlerine ait etkileşim grafikleri

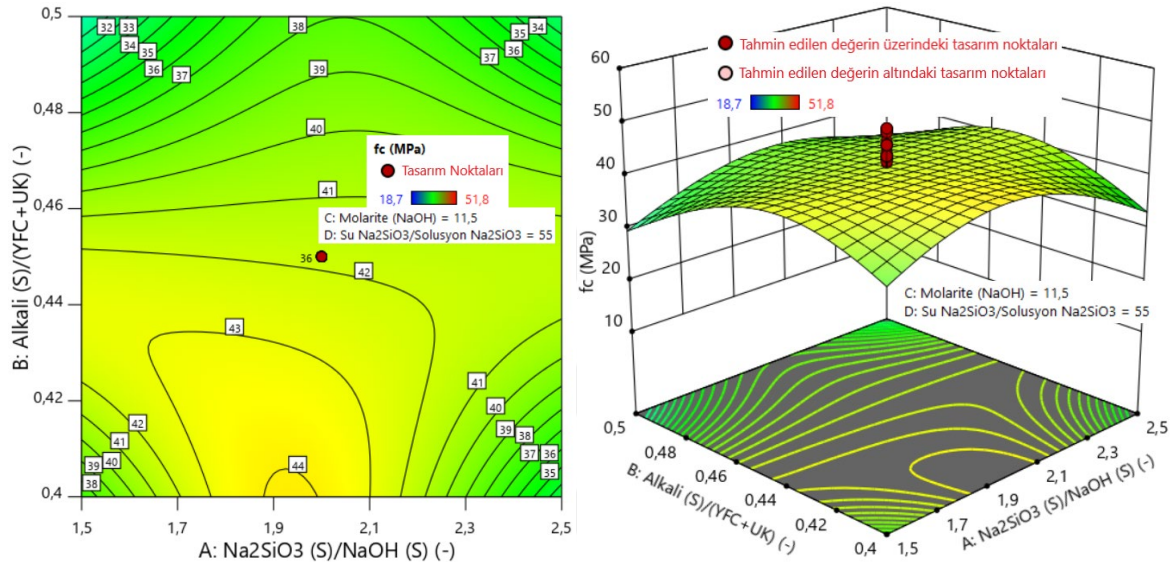
AD etkileşim grafiği (Şekil 4.17a) incelendiğinde; D'nin minimum değerinde A'daki artışın  $f_c$  değerini azaltırken D'nin maksimum değerinde  $f_c$  değerini artırdığı görülmektedir. BC etkileşim grafiği (Şekil 4.17b) incelendiğinde; C'nin minimum ve maksimum değerinde B'deki artışın  $f_c$  değerini azalttığı görülmektedir. Fakat C'nin maksimum değerindeki azalma, C'nin minimum değerindeki azalmaya oranla çok daha fazladır.



Şekil 4.18.  $f_c$  için BD (a) ve CD (b) terimleri için etkileşim grafikleri

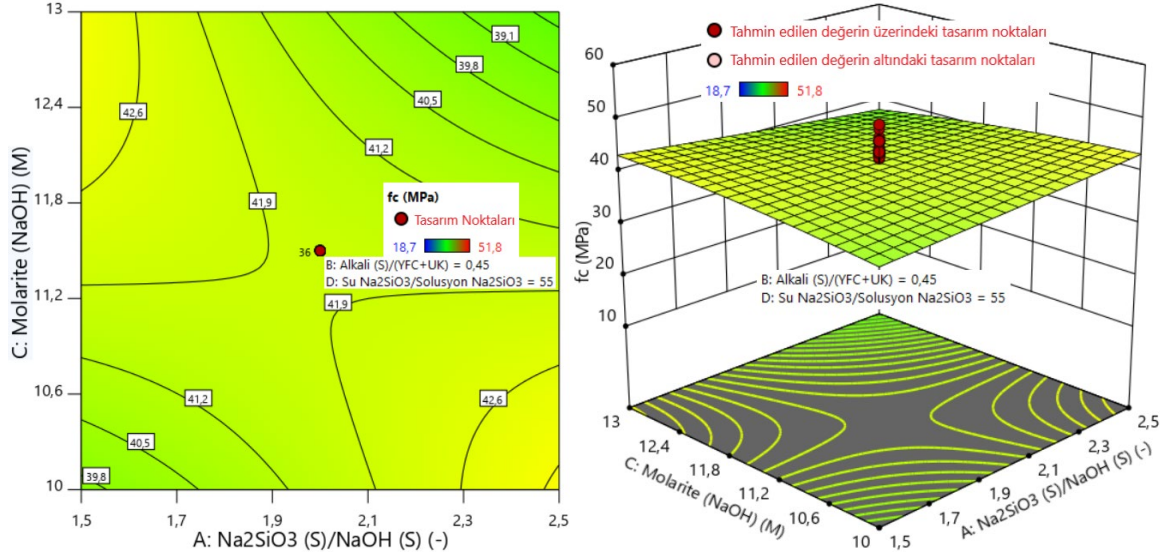
BD etkileşim grafiği (Şekil 4.18a) incelendiğinde; D'nin minimum ve maksimum değerinde B'deki artışın  $f_c$  değerini azalttığı görülmektedir. Ancak D'nin maksimum değerinde B'deki artış ile  $f_c$  değerinde oldukça düşük bir azalma gerçekleşmektedir. CD etkileşim grafiği (Şekil 4.18b) incelendiğinde; D'nin minimum değerinde C'deki artışın  $f_c$  değerini azaltırken D'nin maksimum değerinde  $f_c$  değerini artırdığı görülmektedir.

$f_c$  için AB, AC, AD, BC, BD ve CD terimlerine ait kontur ve 3D grafikleri sırasıyla Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te verilmiştir.



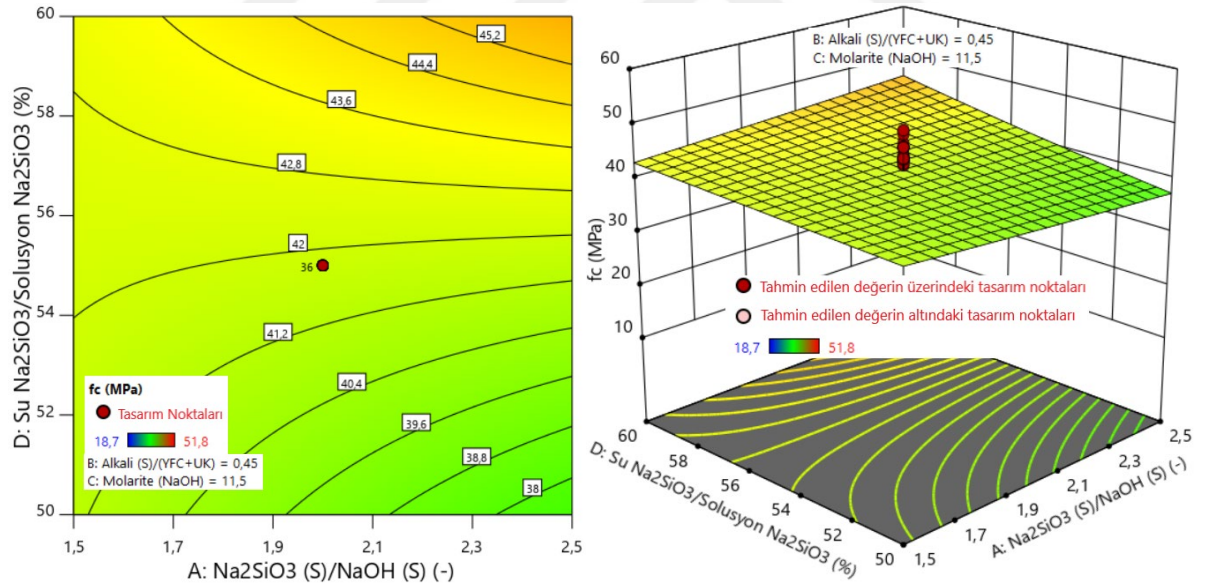
Şekil 4.19.  $f_c$  için AB terimine ait kontur ve 3D grafikleri

AB terimine ait kontur grafiği incelendiğinde (Şekil 4.19) A ve B terimlerine göre  $f_c$  değerinin oldukça fazla değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Genel olarak A ve B'nin minimum ve maksimum değerlerinde  $f_c$  değerinde azalma gerçekleşmektedir.  $f_c$  değerinin maksimum değeri B'nin yaklaşık 0,4-0,43; A'nın ise 1,8-2,1 değerleri arasında elde edilmiştir.



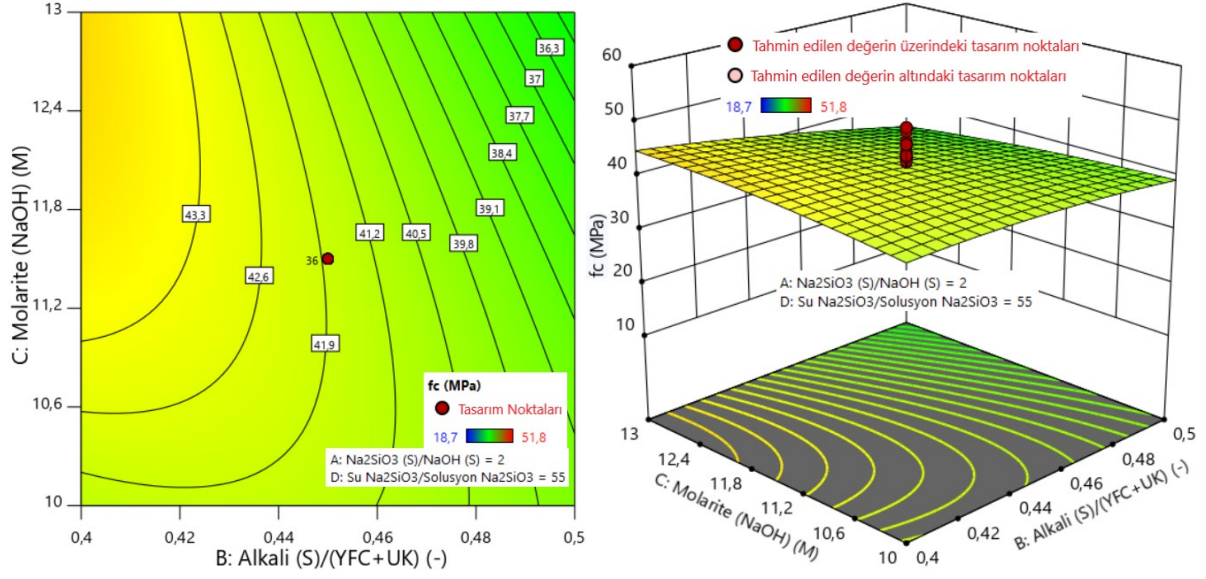
Şekil 4.20.  $f_c$  için AC terimine ait kontur ve 3D grafikleri

AC terimine ait kontur grafiği incelendiğinde (Şekil 4.20), A ve C'ye bağlı olarak  $f_c$ 'nin değişiminin eyer şeklinde olduğu görülmektedir. A'nın minimum, C'nin maksimum olduğu ve A'nın maksimum, C'nin minimum olduğu değerlerde  $f_c$  maksimum değerlere ulaşmaktadır.



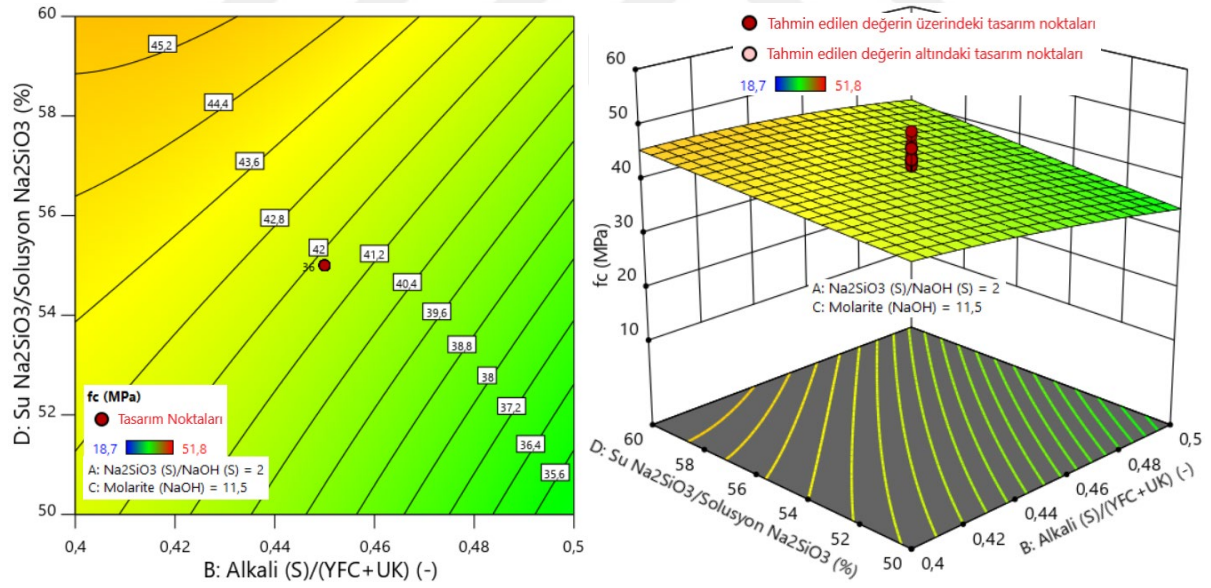
Şekil 4.21.  $f_c$  için AD terimine ait kontur ve 3D grafikleri

AD terimine ait kontur grafiği (Şekil 4.21) incelendiğinde,  $f_c$ 'nin maksimum değerinin A ve D'nin maksimum olduğu değerlerde elde edildiği görülmektedir.



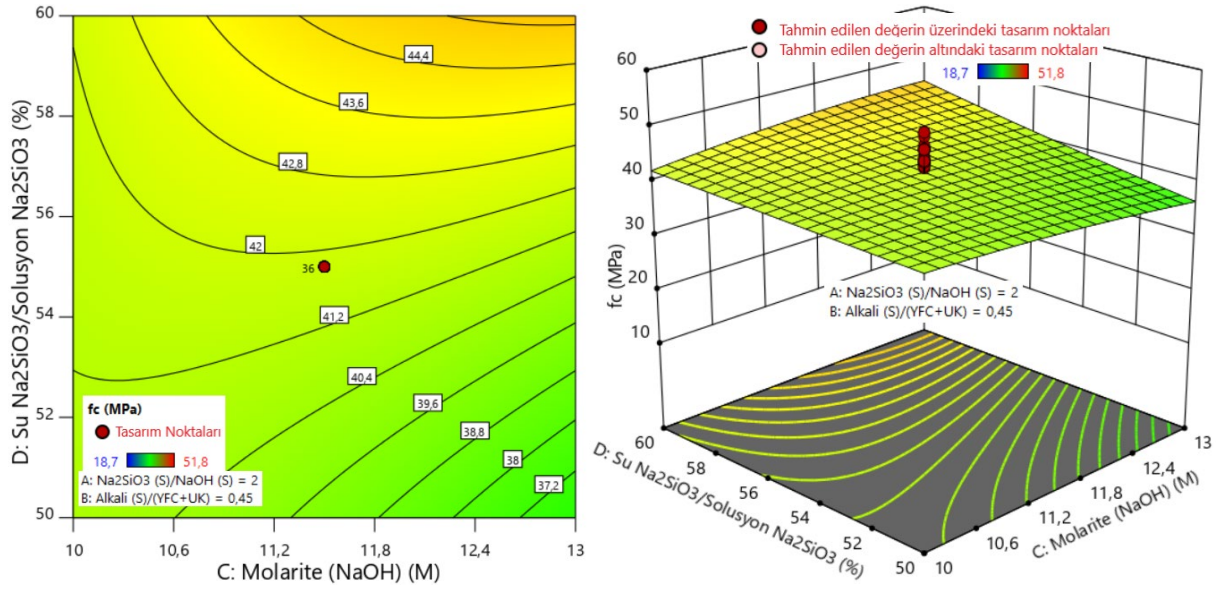
Şekil 4.22.  $f_c$  için BC terimine ait kontur ve 3D grafikleri

BC teriminin kontur grafiği (Şekil 4.22) incelendiğinde BC'nin  $f_c$  değeri üzerindeki etkisinin basit maksimum şeklinde gerçekleştiği görülmektedir. B'nin minimum, C'nin maksimum olduğu değerlerde  $f_c$  değeri maksimuma ulaşmaktadır.



Şekil 4.23.  $f_c$  için BD terimine ait kontur ve 3D grafikleri

BD terimine ait kontur grafiği (Şekil 4.23) incelendiğinde,  $f_c$ 'deki değişimin küçük sapmalara rağmen doğrusal olduğu görülmektedir. Maksimum  $f_c$  değeri B'nin minimum, D'nin maksimum olduğu değerlerde elde edilirken minimum  $f_c$  değeri ise B'nin maksimum, D'nin minimum olduğu değerlerde elde edilmektedir.



Şekil 4.24.  $f_c$  için CD terimine ait kontur ve 3D grafikleri

CD terimine ait kontur grafiği (Şekil 4.24) incelendiğinde;  $f_c$ 'deki değişimin küçük farklılıklarla AD terimine ait kontur grafiğindeki (Şekil 4.21) değişime benzediği görülmektedir. Maksimum  $f_c$  değeri C ve D'nin maksimum olduğu değerlerde elde edilmiştir.

#### 4.1.3. Optimizasyon

Çalışma kapsamında çok değişkenli tepki yüzeyi problemlerinin optimizasyonunda “arzu edirlilik yöntemi” kullanılmıştır. Arzu edirlilik, optimum değer veya özelliği belirlemek için kullanılan basit bir matematiksel yöntemdir. Bir hedefin özellikleri, ağırlık veya önem düzeyi ayarlanarak değiştirilebilmektedir. Birkaç etki ve tepki değişkeni için tüm hedefler tek bir arzu edirlilik işlevinde birleştirilmektedir. Değer; alt ve üst sınırların gerçek optimuma göre ne kadar yakın ayarlandığına bağlıdır. Optimizasyonun amacı arzu edirlilik değerinin “1” olmasını sağlamak değil, tüm hedefleri karşılayacak iyi bir koşul kümesi bulmaktır [108].

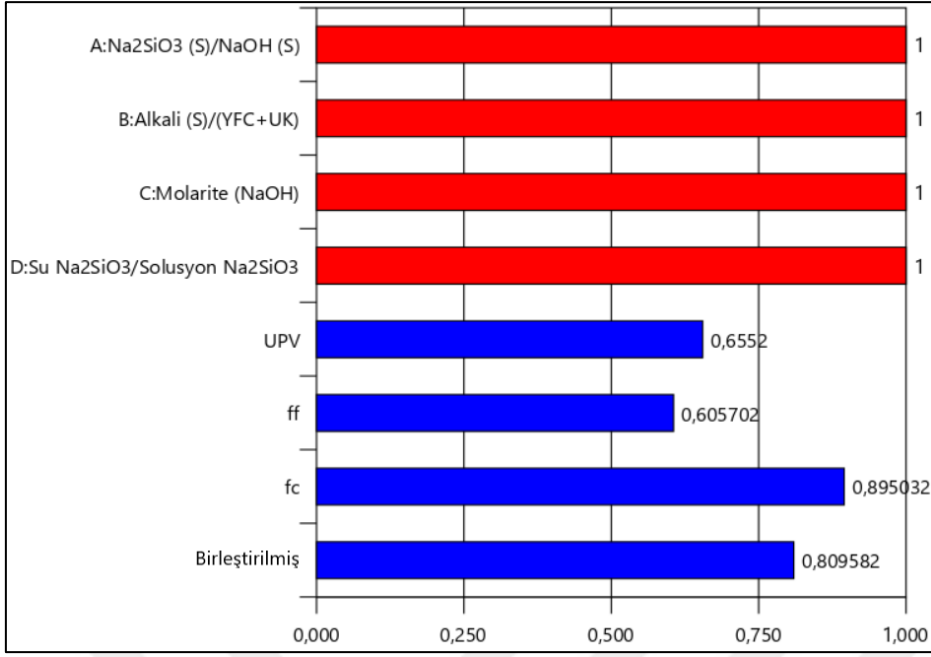
Ön deneme çalışmasında optimizasyon için seçilen sınırlamalar Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Etki ve tepki değişkenlerine ait sınırlamalar

Ad	Hedef	Alt sınır	Üst sınır	Alt ağırlık	Üst ağırlık	Önem
A	aralık	1,5	2,5	1	1	3
B	aralık	0,4	0,5	1	1	3
C	aralık	10	13	1	1	3
D	aralık	50	60	1	1	3
UPV	maksimum	3,7	4,4	1	1	1
$f_f$	maksimum	4	8,3	1	1	1
$f_c$	minimum*	0,14	0,23	1	1	5

\* $f_c$  değerlerine dönüştürücü uygulandığı için (ters karekök) minimum seçilmiştir.

Tüm etki değişkenleri için hedef olarak belirlenen değişim aralıkları dikkate alınmış olup önem düzeyi “3” olarak seçilmiştir. Tüm tepki değişkenleri için hedef, “maksimum” seçilmiştir ( $f_c$ 'ye ters karekök dönüştürücüsü uygulandığı için Çizelge 4.7’de “hedef minimum” olarak belirtilmiştir). UPV’ye ait model anlamlı olup  $R^2$  değeri yüksektir (0,93). Fakat UPV, uygulamada genel olarak kabul gören basınç dayanımının tahmin edilmesinde kullanıldığı için önem düzeyi “1” seçilmiştir.  $f_f$ 'e ait ANOVA (Çizelge 4.4) incelendiğinde elde edilen modelin anlamlı olduğu ( $p_{\text{model}} < 0,000$ ) görülmektedir. Fakat modelin gerçek değerlerinin (deney sonuçları) tahmin yeteneği düşüktür ( $R^2 = 0,66$ ). Bu nedenle  $f_f$  için de önem düzeyi “1” seçilmiştir. Hem uygulamada en fazla kullanılan özellik olması hem de  $f_c$  için elde edilen modelin gerçek değerlerinin (deney sonuçları) tahmin yeteneğinin oldukça yüksek olması ( $R^2 = 0,86$ ) nedeniyle  $f_c$ 'nin önem düzeyi “5” seçilmiştir. Seçilen etki ve tepki değişkenlerine ait kısıtlamalar dikkate alınarak elde edilen arzu edilebilirlik değerleri Şekil 4.25’de verilmiştir.



Şekil 4.25. Etki ve tepki değişkenlerinin arzu edilebilirlik değerleri

Şekil 4.25 incelendiğinde; A, B, C ve D etki değişkenleri için arzu edilebilirliğin “1” olarak elde edildiği görülmektedir. Arzu edilebilirlik değerinin “1” olması etki değişkenleri için hedeflenen değerleri (seçilen değişim aralığı) sağlayan optimum değerlerin elde edilebildiğini göstermektedir. Tepki değişkenleri için hedeflenen değerleri sağlayan optimum değerler elde edilememiştir. Önem düzeyinin düşük olduğu UPV ve  $f_f$  için hedef değerlerin sağlanabilmesi oldukça düşüktür (sırasıyla 0,66 ve 0,61). Fakat önem düzeyinin yüksek olduğu  $f_c$  için hedeflenen değer sağlanabilmesi oldukça yüksektir (0,90). Genel olarak, tüm değişkenler için hedeflenen değerlerin elde edilme ihtimali yaklaşık 0,81’dir. Birleştirilmiş arzu edilebilirlik değerinin düşük olması UPV ve  $f_f$  tepki değişkenlerine ait arzu edilebilirlik değerlerinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

Ön deneme çalışması kapsamında etki ve tepki değişkenleri için seçilen hedefler ve önem düzeylerine bağlı olarak gerçekleştirilen arzu edilebilirlik yöntemi ile optimum deneme noktası belirlenmiştir. Elde edilen optimum deneme noktasındaki etki ve tepki değişkenlerine ait değerler Çizelge 4.8’de verilmiştir.



Çizelge 4.8. Ön deneme çalışmasında etki ve tepki değişkenlerine ait optimum değerler

A	B	C	D	UPV	$f_f$	$f_c$	Arzu edilirlik Değeri
1,88	0,4	11,5	60	4,18	6,6	45,3	0,81

#### 4.2. Deneysel Çalışma Bulguları

Ön deneme çalışması kapsamında belirlenen optimum deneme noktasındaki etki değişkenlerine ait değerler kullanılarak deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada; etki değişkenlerinin (ağırlıkça PÇ kullanım oranı ve numune yaşı) tepki değişkenleri (birim hacim ağırlık, BHA; ağırlıkça su emme oranı, ASE; boşluk oranı, BO; ultrasonik atımlı dalga hızı, UPV; eğilmede çekme dayanımı,  $f_f$ ; basınç dayanımı,  $f_c$ ) üzerindeki etki düzeyleri ana, etkileşim ve ikinci derece terimlere göre belirlenerek optimum etki ve tepki değişken değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca su/çimento oranı 0,377 ve 0,500 olan standart harç numuneleri üretilmiş olup deneme noktalarında elde edilen değerlerle karşılaştırma yapılmıştır.

Deneysel çalışma kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar öncelik sırasına göre aşağıda sıralanmıştır.

- UK ve YFC'nin dayanım aktivite indeksinin belirlenmesi.
- Deneme noktalarının tasarlanması.
- Taze harçların yayılma değerinin belirlenmesi.
- Deneme noktalarının priz sürelerinin tayin edilmesi.
- UPV,  $f_f$  ve  $f_c$  değerlerinin belirlenmesi.
- BHA, ASE ve BO değerlerinin belirlenmesi.
- İstatistiksel analiz, tepki yüzeyleri ve optimizasyon değerlendirmesi
- SEM analizi (hem deneme noktalarına ait hamur numunelerde hem de harç numunelerde)

#### 4.2.1. Dayanım Aktivite İndeksi

Çalışma kapsamında kullanılan YFC ve UK mineral katkı maddelerinin puzolanik etki düzeyleri 28 günlük dayanım aktivite indeksleri aracılığıyla TS EN 450-1 [40] ve TS EN 15167-1 [44] standardına göre belirlenmiştir. YFC ve UK'ya ait 28 günlük dayanım aktivite indeksleri Çizelge 4.9'da verilmiştir. Standartlar uyarınca s/b oranı 0,5 olup kimyasal katkısız referans numunesinin basınç dayanımı baz alınmaktadır. Tez çalışmasında kullanılan YFC ve UK malzemelerinin standartlarda belirtilen dayanım aktivite indeksi değerlerini sağladığı görülmektedir.

Çizelge 4.9. YFC ve UK'ye ait 28 günlük dayanım aktivite indeksi

Numune	Karışım oranı	PÇ (g)	UK (g)	YFC (g)	f <sub>c</sub> (MPa)	Dayanım aktivite indeksi (%)	Sınır değer* (%)
Referans	%100 PÇ	900	-	-	47,7	100	-
UK	%25 UK+%75 PÇ	675	225	-	40,6	85,1	%75
YFC	%50 YFC+%50 PÇ	450	-	450	34,4	72,1	%70

\*UK; TS EN 450-1, YFC; TS EN 15167-1

#### 4.2.2. Deneme Noktalarının Tasarımı

DeneySEL çalışma kapsamında, ön deneme çalışmasında belirlenen optimum etki değişken değerleri (A=1,88; B=0,4; C=11,5; D=60) dikkate alınarak yeni bir tasarım gerçekleştirilmiştir. DeneySEL çalışmada PÇ ve YFC+UK kullanım oranları karışım tasarımı etki değişkenleri, numune yaşı (yaş) ise sayısal etki değişkeni olarak seçilmiş olup birleşik tasarım kullanılmıştır. DeneySEL çalışma kapsamında belirlenen deneme noktaları Çizelge 4.10'da verilmiştir.

DeneySEL çalışma kapsamında kullanılan birleşik tasarımda dikkate alınan etki ve tepki değişkenlerine ait tasarım özetleri sırasıyla Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12'de verilmiştir. Ayrıca çimento ile melezleştirilerek üretilen AAM harçlarının standart harç numunelerle karşılaştırılması amacıyla üretilen referans numunelerin deney sonuçları Çizelge 4.13'de verilmiştir. Referans numunelerinin deney sonuçları, deneySEL tasarıma dâhil edilmemiştir.

Çizelge 4.10. Deneysel çalışmaya ait deneme noktaları

Deneme Noktaları	PÇ (%)	YFC +UK (%)	Numune Yaşı (gün)	BHA (g/cm <sup>3</sup> )	Su Emme Oranı (%)	Boşluk Oranı (%)	UPV (km/s)	f <sub>r</sub> (MPa)	f <sub>c</sub> (MPa)
1	0	100	28	2,017	7,623	15,371	4,145	6,6	36,2
2	7,5	92,5	28	1,977	8,838	17,476	4,106	6	28,4
3	0	100	59	2,002	7,588	15,192	4,236	7,5	52,6
4	15	85	90	2,007	7,738	15,528	4,113	3,5	24,3
5	30	70	59	2,05	6,455	13,234	4,169	4,9	25,7
6	15	85	59	2,016	7,487	15,094	4,084	4,4	23,7
7	15	85	59	2,01	7,606	15,283	4,108	5,7	23,8
8	15	85	28	1,989	8,791	17,483	3,998	5,7	21,4
9	15	85	90	1,993	8,299	16,539	4,108	4,3	24,2
10	0	100	59	2,008	7,398	14,858	4,23	7,9	51
11	7,5	92,5	43,5	1,996	7,81	15,591	4,119	5	34,1
12	30	70	28	2,029	7,177	14,562	4,137	5,2	21,4
13	22,5	77,5	43,5	2,048	6,958	14,249	4,1	5,3	21,3
14	0	100	90	1,998	7,905	15,794	4,29	8,2	51
15	22,5	77,5	74,5	2,03	6,663	13,526	4,156	4,8	22,6
16	30	70	90	2,013	7,702	15,501	4,17	4,2	24,3
17	7,5	92,5	74,5	1,992	7,566	15,074	4,205	6,8	38,8

Çizelge 4.11. Deneysel çalışmadaki etki değişkenlerine ait deneysel tasarım özeti

Faktör	Ad	Birim	Tip	Min.	Maks.	Kodlanmış Min. Değer	Kodlanmış Maks. Değer	Ort.*	SS*
A	PÇ	%	Karışım	0	30	+0↔0	+1↔30	13,68	10,68
B	YFC+UK	%	Karışım	70	100	+0↔70	+1↔100	86,32	10,68
C	Yaş	gün	Sayısal	28	90	-1↔28	+1↔90	59	23,25

\*SS, Standart Sapma; Ort., Ortalama

Çizelge 4.12. Deneysel çalışmadaki tepki değişkenlerine ait deneysel tasarım özeti

Faktör	İsim	Birim	Analiz	Min.	Maks.	Ort.	SS	Oran	Dön.*	Model
R1	UPV	km/s	Polinom	3,997	4,289	4,15	0,068	1,07	Yok	İ*. Dörtlenik×Dörtlenik
R2	f <sub>f</sub>	MPa	Polinom	3,5	8,15	5,63	1,34	2,33	Yok	Dörtlenik×Doğrusal
R3	f <sub>c</sub>	MPa	Polinom	21,312	52,637	30,87	11,15	2,47	Yok	Dörtlenik×Dörtlenik
R4	BHA	g/cm <sup>3</sup>	Polinom	1,977	2,05	2,01	0,02	1,04	Yok	İ. Kübik×Dörtlenik
R5	ASE	%	Polinom	6,455	8,838	7,62	0,634	1,37	Yok	İ. Dörtlenik×Dörtlenik
R6	BO	%	Polinom	13,234	17,483	15,32	1,14	1,32	Yok	İ. Dörtlenik×Dörtlenik

\*Dön., Dönüştürücü; İ., İndirgenmiş

Çizelge 4.13. Referans numunelerinin deney sonuçları

Referans Numuneleri	Numune Yaşı (gün)	BHA (g/cm <sup>3</sup> )	Su Emme Oranı (%)	Boşluk Oranı (%)	UPV (km/s)	f <sub>f</sub> (MPa)	f <sub>c</sub> (MPa)
R28-0,5	28	2,049	8,309	17,026	4,485	7,13	47,7
R60-0,5	60	2,069	7,881	16,305	4,523	7,90	50,1
R90-0,5	90	2,059	8,597	17,702	4,555	8,05	52,0
R28-0,37	28	2,123	6,193	13,146	4,614	8,08	56,4
R60-0,37	60	2,124	6,000	12,747	4,692	8,78	56,6
R90-0,37	90	2,127	6,451	13,719	4,720	8,80	57,4

#### 4.2.3. Referans Numuneler ile Deneme Noktalarının Karşılaştırılması

Deneysel çalışma kapsamında oluşturulan deneme noktalarında üretilen numunelerden elde edilen tepki değişkenlerine ait sonuçlar ile sadece PÇ kullanılarak üretilen referans harç numunelerinden elde edilen tepki değişkenlerine ait sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.14'te referans numuneler ile deneme noktalarının karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 4.14. Referans numuneler ile deneme noktalarının karşılaştırılması

Numune Adı	Numune Yaşı (gün)	BHA (g/cm <sup>3</sup> )	Su Emme Oranı (%)	Boşluk Oranı (%)	UPV (km/s)	f <sub>r</sub> (MPa)	f <sub>c</sub> (MPa)
R28-0,5	28	2,049	8,309	17,026	4,485	7,13	47,7
R28-0,37	28	2,123	6,193	13,146	4,614	8,08	56,4
%0-PÇ	28	2,017	7,623	15,371	4,145	6,6	36,2
%7,5-PÇ	28	1,977	8,838	17,476	4,106	6	28,4
%15-PÇ	28	1,989	8,791	17,483	3,998	5,7	21,4
%30-PÇ	28	2,029	7,177	14,562	4,137	5,2	21,4
R60-0,5	60	2,069	7,881	16,305	4,523	7,90	50,1
R60-0,37	60	2,124	6,000	12,747	4,692	8,78	56,6
%0-PÇ	60	2,005	7,493	15,025	4,233	7,7	51,8
%15-PÇ	60	2,013	7,546	15,189	4,096	5,05	23,75
%30-PÇ	60	2,05	6,455	13,234	4,169	4,9	25,7
R90-0,5	90	2,059	8,597	17,702	4,555	8,05	52,0
R90-0,37	90	2,127	6,451	13,719	4,720	8,80	57,4
%0-PÇ	90	1,998	7,905	15,794	4,29	8,2	51
%15-PÇ	90	2	8,019	16,034	4,11	3,9	24,25
%30-PÇ	90	2,013	7,702	15,501	4,17	4,2	24,3

Çizelge 4.14 incelendiğinde; 28 günlük PÇ katkısız numunenin  $f_c$  değeri (36,2) referans numuneninkine (56,4) kıyasla yaklaşık %35, 60 günlük PÇ katkısız numunenin  $f_c$  değeri (51,8) referans numuneninkine (56,6) kıyasla yaklaşık %9 ve 90 günlük PÇ katkısız numunenin  $f_c$  değeri (51) referans numuneninkine (57,4) kıyasla yaklaşık %11 daha azdır. Dolayısıyla, numune yaşı arttıkça  $f_c$  değerindeki düşüş oranı azalmaktadır. PÇ katkı oranındaki artış, tüm numune yaşlarında  $f_c$  değerini azaltmaktadır. Ayrıca tüm numune yaşlarında %15 ve %30 PÇ katkılı numunelerin  $f_c$  değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.

#### 4.2.4. Yayılma Tablası Değeri

Harçların işlenebilirliği TS EN 1015-3 [103] standardına göre belirlenmiştir. Tüm deneme noktalarında yayılma değerinin belirli düzeyde olması için kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır. Çizelge 4.15'te yayılma tablası deney sonuçları ve kullanılan kimyasal katkı maddesi miktarı verilmiştir.

Çizelge 4.15. Yayılma tablası deney sonuçları

PÇ ilave oranı (%)	Yayılma değeri (cm)	Kimyasal katkı miktarı (g)	Su/bağlayıcı (YFC+UK+PÇ)
0	14,375	-	0,377
7.5	13,875	-	0,377
15	13,375	-	0,377
22.5	13,125	-	0,377
30	13,125	14	0,377
100	12,375	13	0,377
100	16,125	-	0,500

Çizelge 4.15 incelendiğinde; PÇ ilave oranındaki artış, yayılma değerini azaltmaktadır. %30 PÇ ilaveli deneme noktasının üretiminde işlenebilirlik sorunu yaşandığı için kimyasal katkı kullanılmıştır. Deneme noktalarından elde edilen sonuçlar; hem TS EN 196-1 [80] standardında tanımlanan standart harç numunelerinin sonuçları ile hem de deneme noktalarında dikkate alınan su/çimento oranına göre (0,377) üretilen harç numunelerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

#### 4.2.5. Priz Süresi

Harç numunelerinin başlangıç ve bitiş priz süresi ölçümleri, TS EN 196-3 [104] standardı uyarınca bileşen malzeme miktarları farklı olan numuneler için gerçekleştirilmiştir. Her hamur karışımında 900 g bağlayıcı kullanılmıştır. Su/bağlayıcı oranı, hamurun kıvamına göre belirlenmiş olup 0,252'dir. Priz süreleri; referans karışımı suda kür edilerek, diğer karışımlar (AAM ihtiva eden) ise havada kür edilerek belirlenmiştir. Çizelge 4.16'da bileşen malzeme miktarları farklı olan harç numunelerine ait priz süresi değerleri görülmektedir.

Çizelge 4.16. Bileşen malzeme miktarları farklı olan harç numunelerine ait priz süreleri

PÇ ilave oranı	Bağlayıcı (PÇ+YFC+UK)	PÇ	YFC	UK	Su	S/b	Priz başlama süresi	Priz bitiş süresi	Kür yöntemi
							dk	dk	
0	900	0	450	450	226,8	0,252	40	235	Hava
7.5	900	67,5	416,25	416,25	226,8	0,252	35	175	
15	900	135	382,5	382,5	226,8	0,252	30	90	
22.5	900	202,5	348,75	348,75	226,8	0,252	25	70	
30	900	270	315	315	226,8	0,252	20	45	
100	900	900	0	0	320,4	0,356	180	330	Su

Çizelge 4.16 incelendiğinde; PÇ ilave oranındaki artış ile birlikte priz başlama ve bitiş süresi kısalmıştır. Ayrıca en uzun priz başlama ve bitiş süresi %0 PÇ ilaveli hamur karışımından elde edilmiş olup bu noktadaki priz başlama ve bitiş süresinin bile referans karışımına kıyasla daha kısa olduğu görülmektedir. Bu nedenle uygulamada kullanılacak AAM ve AAM+PÇ bağlayıcıya sahip maddelerin üretim öncesinde priz sürelerinin uygunluğunun teyit edilmesi gerekmektedir.

#### 4.2.6. İstatistiksel Analiz

Deneysel çalışma kapsamında ultrasonik atımlı dalga hızı, eğilmede çekme dayanımı, basma dayanımı, birim hacim ağırlık, ağırlıkça su emme ve boşluk oranı sonuçlarına istatistiksel analiz (ANOVA) uygulanmıştır. UPV,  $f_f$ ,  $f_c$ , BHA, ASE ve BO sonuçları üzerinde

gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları sırasıyla Çizelge 4.17, Çizelge 4.18, Çizelge 4.19, Çizelge 4.20, Çizelge 4.21 ve Çizelge 4.22’de verilmiştir. Modelin ve modele eklenen terimlerin p-değerinin 0,05’den düşük olması terimlerin tepki değişkeni üzerinde anlamlı etki düzeyine sahip olduğunu; 0,1 ile 0,05 arasında olması terimlerin düşük anlamlılık düzeyine sahip olduğunu ve 0,1’den büyük olması etki düzeyinin anlamsız olduğunu göstermektedir. Uyum yokluğunun anlamsız olması beklenen bir durumdur ve elde edilen sonuçların tekrarlanabileceğini göstermektedir. Çizelgeler incelendiğinde, tüm tepki değişkenleri için elde edilen modellerin anlamlı ve uyum yokluğunun anlamsız olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.17. UPV'ye ait varyans analiz sonuçları

Terim	Kareler toplamı	sd*	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	Anlamlılık
Model	0,0678	5	0,0136	21,59	< 0.0001	Anlamlı
Doğrusal Karışım	0,0106	1	0,0106	16,84	0,0017	
AB	0,0368	1	0,0368	58,52	< 0.0001	
AC	0,0012	1	0,0012	1,84	0,2026	
BC	0,0152	1	0,0152	24,16	0,0005	
AC <sup>2</sup>	0,0022	1	0,0022	3,53	0,0869	
Artık	0,0069	11	0,0006			
Uyum Yokluğu	0,0066	8	0,0008	8,02	0,0571	Anlamsız
Saf Hata	0,0003	3	0,0001			
Düzeltilmiş Kareler Toplamı	0,0747	16				

\*sd, serbestlik derecesi

Çizelge 4.17 incelendiğinde UPV üzerinde; AB ve BC terimlerinin etki düzeyinin anlamlı ( $p_{AB} < 0,0001$ ;  $p_{BC} = 0,0005$ ), AC teriminin anlamsız ( $p_{AC} = 0,2026$ ) ve AC<sup>2</sup> teriminin ise düşük etki düzeyine ( $p_{AC^2} = 0,0869$ ) sahip olduğu görülmektedir. Anlamsız etki düzeyine sahip AC<sup>2</sup> terimi hiyerarşik bir model elde edilebilmesi için modele ilave edilmiştir.



Çizelge 4.18.  $f_f$ 'e ait varyans analiz sonuçları

Terim	Kareler toplamı	sd*	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	Anlamlılık
Model	24,92	5	4,98	13,65	0,0002	Anlamlı
Doğrusal Karışım	15,35	1	15,35	42,03	< 0.0001	
AB	4,72	1	4,72	12,93	0,0042	
AC	0,6469	1	0,6469	1,77	0,2102	
BC	1,96	1	1,96	5,36	0,0408	
ABC	1,38	1	1,38	3,78	0,0779	
Artık	4,02	11	0,3652			
Uyum Yokluğu	2,86	8	0,3570	0,9219	0,5907	Anlamsız
Saf Hata	1,16	3	0,3872			
Düzeltilmiş Kareler Toplamı	28,94	16				

\*sd, serbestlik derecesi

Çizelge 4.18 incelendiğinde  $f_f$  üzerinde; AB ve BC terimlerinin etki düzeyinin anlamlı ( $p_{AB} = 0,0042$ ;  $p_{BC} = 0,0408$ ), AC teriminin etki düzeyinin anlamsız ( $p_{AC} = 0,2102$ ) ve ABC teriminin ise etki düzeyinin düşük anlamlılığa ( $p_{ABC} = 0,0779$ ) sahip olduğu görülmektedir. Hiyerarşik bir model elde edilebilmesi için etki düzeyi düşük olan AC terimi de  $f_f$ 'e ait modele ilave edilmiştir.

Çizelge 4.19 incelendiğinde,  $f_c$  üzerinde AB, BC ve ABC ve  $BC^2$  terimlerinin etki düzeyinin anlamlılığa ( $p_{AB} < 0,0001$ ;  $p_{BC} = 0,0001$ ;  $p_{ABC} = 0,0224$ ;  $p_{BC^2} = 0,0005$ ); AC,  $AC^2$  terimlerinin etki düzeyinin anlamsızlığa ( $p_{AC} = 0,1926$ ;  $p_{AC^2} = 0,1724$ ) ve  $ABC^2$  teriminin etki düzeyinin düşük anlamlılığa ( $p_{ABC^2} = 0,0682$ ) sahip olduğu görülmektedir. Hiyerarşik bir model elde edilebilmesi için etki düzeyi anlamsız olan AC ve  $AC^2$  terimleri de  $f_c$ 'ye ait modele ilave edilmiştir.

Çizelge 4.20 incelendiğinde AB,  $AC^2$  ve AB(A-B) terimlerinin BHA üzerindeki etki düzeyinin anlamlı ( $p_{AB} = 0,0044$ ;  $p_{AC^2} = 0,0013$ ;  $p_{AB(A-B)} = 0,0044$ ) olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.21 incelendiğinde ABC,  $AC^2$  ve  $ABC^2$  terimlerinin ASE üzerindeki etki düzeyinin anlamlı ( $p_{ABC} = 0,0044$ ;  $p_{AC^2} = 0,0152$ ;  $p_{ABC^2} = 0,0014$ ) olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.19. f<sub>c</sub>'e ait varyans analizi sonuçları

Terim	Kareler toplamı	sd*	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	Anlamlılık
Model	1972,09	8	246,51	106,11	< 0.0001	Anlamlı
Doğrusal Karışım	1276,98	1	1276,98	549,67	< 0.0001	
AB	247,26	1	247,26	106,43	< 0.0001	
AC	4,70	1	4,70	2,02	0,1926	
BC	116,98	1	116,98	50,35	0,0001	
ABC	18,51	1	18,51	7,97	0,0224	
AC <sup>2</sup>	5,22	1	5,22	2,25	0,1724	
BC <sup>2</sup>	74,15	1	74,15	31,92	0,0005	
ABC <sup>2</sup>	10,31	1	10,31	4,44	0,0682	
Artık	18,59	8	2,32			
Uyum Yokluğu	17,17	5	3,43	7,28	0,0665	Anlamsız
Saf Hata	1,42	3	0,4718			
Düzeltilmiş Kareler Toplamı	1990,67	16				

\*sd, serbestlik derecesi

Çizelge 4.20. BHA'ya ait varyans analizi sonuçları

Terim	Kareler toplamı	sd*	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	Anlamlılık
Model	0,0056	4	0,0014	21,19	< 0.0001	Anlamlı
Doğrusal Karışım	0,0024	1	0,0024	35,46	< 0.0001	
AB	0,0008	1	0,0008	12,23	0,0044	
AC <sup>2</sup>	0,0012	1	0,0012	17,41	0,0013	
AB(A-B)	0,0008	1	0,0008	12,24	0,0044	
Artık	0,0008	12	0,0001			
Uyum Yokluğu	0,0007	9	0,0001	1,68	0,3672	Anlamsız
Saf Hata	0,0001	3	0,0000			
Düzeltilmiş Kareler Toplamı	0,0064	16				

\*sd, serbestlik derecesi

Çizelge 4.21. ASE'ye ait varyans analizi sonuçları

Terim	Kareler toplamı	sd*	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	Anlamlılık
Model	5,31	4	1,33	14,13	0,0002	anlamlı
Doğrusal Karışım	1,14	1	1,14	12,14	0,0045	
ABC	0,7630	1	0,7630	8,13	0,0146	
AC <sup>2</sup>	0,7509	1	0,7509	8,00	0,0152	
ABC <sup>2</sup>	1,60	1	1,60	17,04	0,0014	
Artık	1,13	12	0,0939			
Uyum Yokluğu	0,9444	9	0,1049	1,73	0,3562	anlamsız
Saf Hata	0,1820	3	0,0607			
Düzeltilmiş Kareler Toplamı	6,43	16				

\*sd, serbestlik derecesi

Çizelge 4.22. BO'ya ait varyans analizi sonuçları

Terim	Kareler toplamı	sd*	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	Anlamlılık
Model	17,75	5	3,55	12,75	0,0003	Anlamlı
Doğrusal Karışım	3,24	1	3,24	11,63	0,0058	
AB	4,35	1	4,35	15,62	0,0023	
ABC	2,47	1	2,47	8,87	0,0125	
AC <sup>2</sup>	5,97	1	5,97	21,45	0,0007	
BC <sup>2</sup>	1,06	1	1,06	3,81	0,0770	
Artık	3,06	11	0,2784			
Uyum Yokluğu	2,48	8	0,3098	1,59	0,3834	Anlamsız
Saf Hata	0,5843	3	0,1948			
Düzeltilmiş Kareler Toplamı	20,82	16				

\*sd, serbestlik derecesi

Çizelge 4.22 incelendiğinde, BO üzerinde AB, ABC ve AC<sup>2</sup> terimlerinin etki düzeyinin anlamlılığa ( $p_{AB} = 0,0023$ ;  $p_{ABC} = 0,0125$ ;  $p_{AC^2} = 0,0007$ ); BC<sup>2</sup> teriminin etki düzeyinin ise düşük anlamlılığa ( $p_{BC^2} = 0,077$ ) sahip olduğu görülmektedir.

Tepki değişkenleri için elde edilen modellere ait uyum istatistiği sonuçları Çizelge 4.23'te verilmiştir.

Çizelge 4.23. Uyum istatistiği

Tepki	Birim	Standart sapma	Ortalama	Varyasyon katsayısı	R <sup>2</sup>	Ayarlı R <sup>2</sup>	Tahmini R <sup>2</sup>	UKD*
UPV	km/s	0,0251	4,15	0,6045	0,9075	0,8655	0,7186	17,7137
f <sub>f</sub>	MPa	0,6043	5,63	10,73	0,8612	0,7981	0,7059	11,7675
f <sub>c</sub>	MPa	1,52	30,87	4,94	0,9907	0,9813	0,878	28,0419
BHA	g/cm <sup>3</sup>	0,0082	2,01	0,4058	0,876	0,8346	0,7306	15,6946
ASE	%	0,3064	7,62	4,02	0,8249	0,7665	0,633	14,1918
BO	%	0,5276	15,32	3,45	0,8529	0,786	0,5273	15,162

\*UKD, Uygun Kesinlik Değeri

Tepki değişkenleri (UPV, f<sub>f</sub>, f<sub>c</sub>, BHA, ASE ve BO) için R<sup>2</sup> değerleri sırasıyla 0,9075; 0,8612; 0,9907; 0,876; 0,8249 ve 0,8529 olarak elde edilmiştir. Ayarlı R<sup>2</sup> değeri R<sup>2</sup> değerinden büyük sapmalar göstermemekte olup UPV, f<sub>f</sub>, f<sub>c</sub>, BHA, ASE ve BO için elde edilen modellerin R<sup>2</sup> - ayarlı R<sup>2</sup> değerleri sırasıyla 0,042; 0,0631; 0,0094; 0,0414; 0,0584 ve 0,0669'dur. Ayrıca UPV, f<sub>f</sub>, f<sub>c</sub>, BHA ve ASE için elde edilen modellerin ayarlı R<sup>2</sup> - tahmini R<sup>2</sup> değerleri sırasıyla 0,1469; 0,0922; 0,1033; 0,104 ve 0,1335'tir. Bu durum modellerden elde edilen yeni verilerdeki değişkenlik (tahmin hatası) miktarının uygun olduğunu göstermektedir. BO için elde edilen modelin ayarlı R<sup>2</sup> - tahmini R<sup>2</sup> değeri ise 0,2587 olup 0,2'den büyüktür.

Bütün tepki değişkenleri için uygun kesinlik değeri (UPV 17,7137; f<sub>f</sub> 11,7675; f<sub>c</sub> 28,0419; BHA 15,6946; ASE 14,1918 ve BO 15,162) arzu edilen değer (> 4) üzerindedir. Bu durum, modellerin tasarım uzayında (seçilen değişim aralıkları içerisinde) uygun (yeterli) işaret oluşturduğunu göstermektedir.

Tepki değişkenleri UPV, f<sub>f</sub>, f<sub>c</sub>, ASE ve BO için ANOVA'dan elde edilen modellere ait denklemler sırasıyla Denklem 4.4, Denklem 4.5, Denklem 4.6, Denklem 4.7 ve Denklem 4.8'de verilmiştir.

$$UPV = 0,07 \cdot A + 0,04 \cdot B - 0,0005 \cdot A \cdot B + 0,0002 \cdot A \cdot C + 0,00002 \cdot B \cdot C - 1,55E - 06 \cdot A \cdot C^2 \quad (4.4)$$

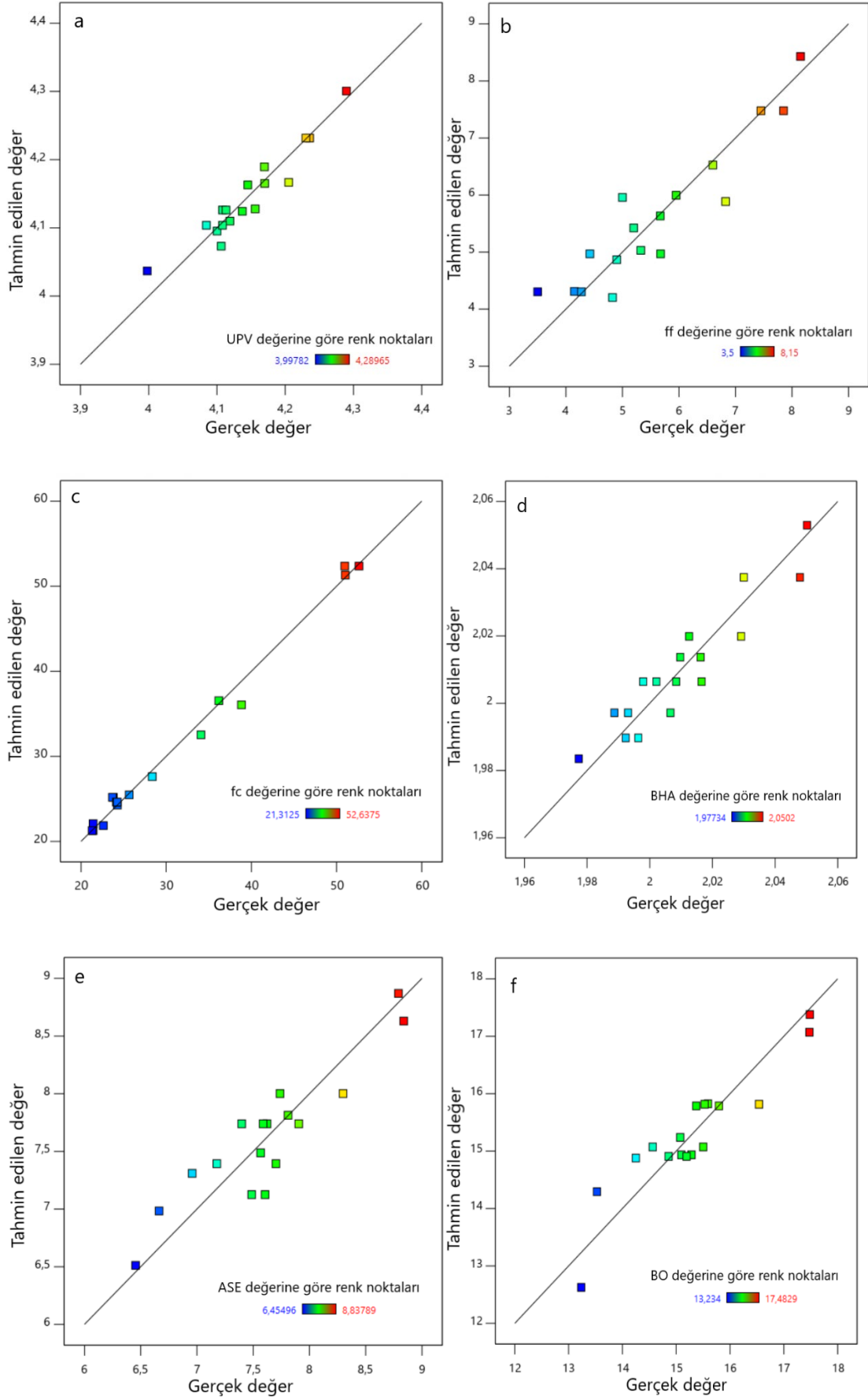
$$f_f = -0,07 \cdot A + 0,06 \cdot B + 0,002 \cdot A \cdot B + 0,007 \cdot A \cdot C + 0,0003 \cdot B \cdot C - 0,0001 \cdot A \cdot B \cdot C \quad (4.5)$$

$$f_c = -1,59 \cdot A + 0,08 \cdot B + 0,03 \cdot A \cdot B + 0,158 \cdot A \cdot C + 0,013 \cdot B \cdot C - 0,002 \cdot A \cdot B \cdot C - 0,001 \cdot A \cdot C^2 - 0,00009 \cdot B \cdot C^2 + 0,00002 \cdot A \cdot B \cdot C^2 \quad (4.6)$$

$$ASE = -1,1 \cdot A + 0,08 \cdot B + 0,02 \cdot A \cdot B + 0,03 \cdot A \cdot C - 0,0005 \cdot A \cdot B \cdot C - 0,0003 \cdot A \cdot C^2 + 4E - 06 \cdot A \cdot B \cdot C^2 \quad (4.7)$$

$$BO = -0,53 \cdot A + 0,18 \cdot B + 0,01 \cdot A \cdot B + 0,0003 \cdot A \cdot C - 0,001 \cdot B \cdot C - 0,0001 \cdot A \cdot B \cdot C - 0,00006 \cdot A \cdot C^2 + 9E - 06 \cdot B \cdot C^2 \quad (4.8)$$

Tepki değişkenleri için oluşturulan modellerden elde edilen tahmini değerler ile gerçek (deney sonucu) değerler Şekil 4.26'da görülmektedir. Tüm tepki değişkenleri için R<sup>2</sup> değerlerinin yüksek olması nedeniyle Şekil 4.26'da da görüldüğü gibi tahmini değerler ile deney sonuçları arasında küçük sapmalar elde edilmiştir.



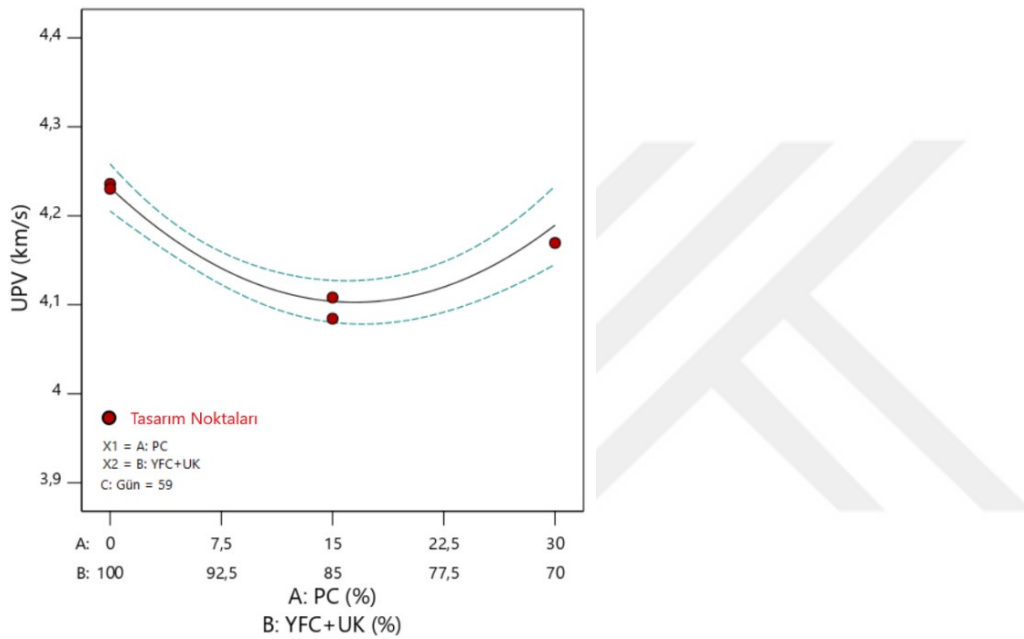
Şekil 4.26. UPV (a),  $f_f$  (b),  $f_c$  (c), BHA (d), ASE (e) ve BO (f) için gerçek ve tahmini değerler

## 4.2.7. Tepki Yüzeyleri

### 4.2.7.1. UPV'ye ait tepki yüzeyleri

Seçilen etki değişkenlerinin değişim aralığında UPV tepki değişkeninin değişimi etkileşim, kontur ve 3D grafikleri ile ortaya konmuştur.

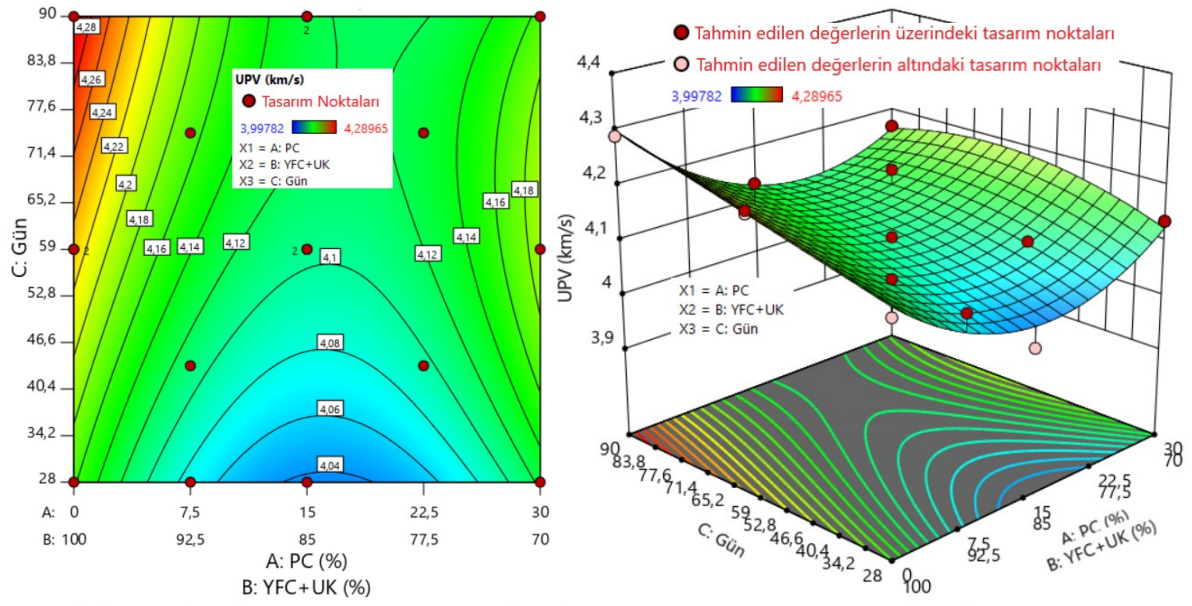
UPV tepki değişkenini etkileyen AB terimine ait etkileşim grafiği Şekil 4.27'de verilmiştir.



Şekil 4.27. UPV için AB teriminin etkileşim grafiği

Şekil 4.27 incelendiğinde; PÇ oranındaki artışın (YFC+UK oranındaki azalışın) UPV değerini belli bir değere kadar azalttıktan sonra artırdığı görülmektedir. En yüksek UPV değerine %0 PÇ oranında ulaşılırken en düşük UPV değerine %15 PÇ oranında ulaşılmıştır.

AC terimi için elde edilen kontur ve 3D grafiği Şekil 4.28'de verilmiştir. Şekil 4.28 incelendiğinde, düşük PÇ oranlarında numune yaşındaki artışın UPV değerini artırdığı görülmektedir. Fakat yüksek PÇ oranlarında numune yaşındaki artış UPV değerini çok az da olsa belli bir değere kadar artırdıktan sonra azaltmaktadır.

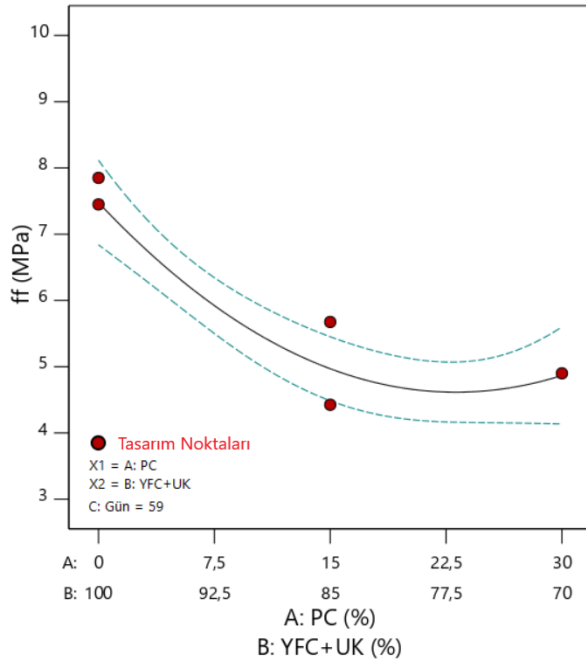


Şekil 4.28. UPV için AC terimine ait kontur ve 3D grafikleri

#### 4.2.7.2. Eğilmede çekme deneyine ait tepki yüzeyleri

Seçilen etki değişkenlerinin değişim aralığında  $f_f$  tepki değişkeninin değişimi etkileşim, kontur ve 3D grafikleri ile ortaya konmuştur.

$f_f$  tepki değişkenini etkileyen AB terimine ait etkileşim grafiği Şekil 4.29’da verilmiştir.

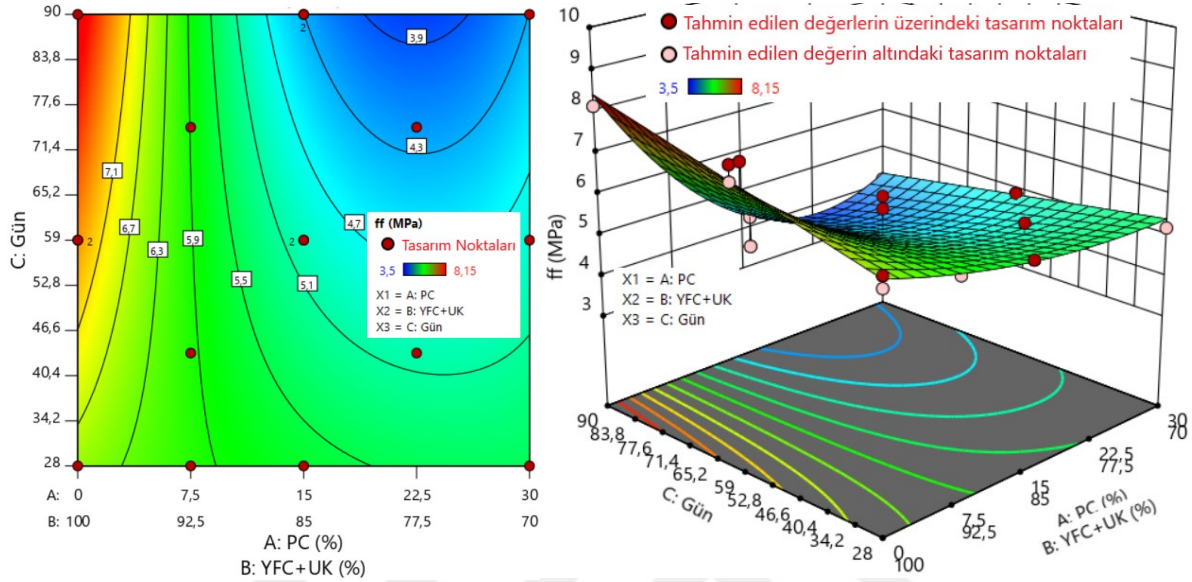


Şekil 4.29.  $f_f$  için AB teriminin etkileşim grafiği



Şekil 4.29 incelendiğinde; PÇ oranındaki artışın (YFC+UK oranındaki azalışın)  $f_f$  değerini belli bir değere kadar azalttıktan sonra yaklaşık sabit kaldığı görülmektedir. En yüksek  $f_f$  değerine %0 PÇ oranında ulaşılırken en düşük  $f_f$  değerine %22,5 PÇ oranında ulaşılmıştır.

AC terimi için elde edilen kontur ve 3D grafiği Şekil 4.30’da verilmiştir.



Şekil 4.30.  $f_f$  için AC terimine ait kontur ve 3D grafikleri

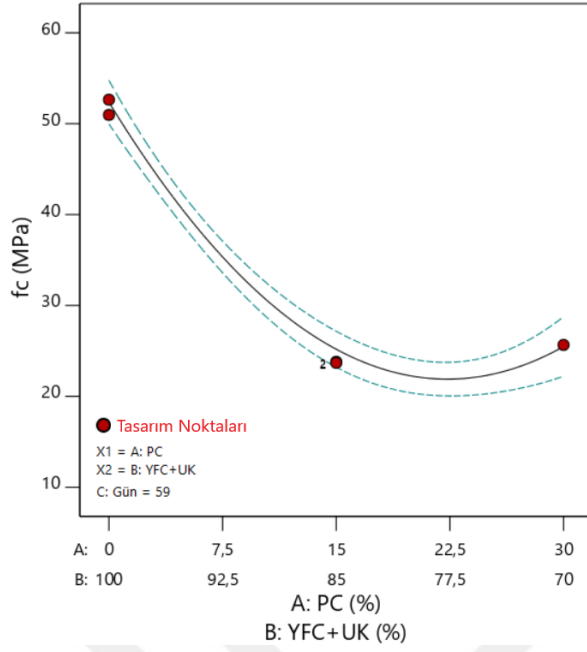
Şekil 4.30 incelendiğinde, düşük PÇ oranlarında numune yaşındaki artışın  $f_f$  değerini artırırken yüksek PÇ oranlarında numune yaşındaki artışın  $f_f$  değerini azalttığı görülmektedir. Düşük PÇ oranlarında en yüksek  $f_f$  değerine ileri yaşlarda ulaşılırken yüksek PÇ oranlarında erken yaşlarda ulaşılmaktadır.

#### 4.2.7.3. Basınç deneyine ait tepki yüzeyleri

Seçilen etki değişkenlerinin değişim aralığında  $f_c$  tepki değişkeninin değişimi etkileşim, kontur ve 3D grafikleri ile ortaya konmuştur.

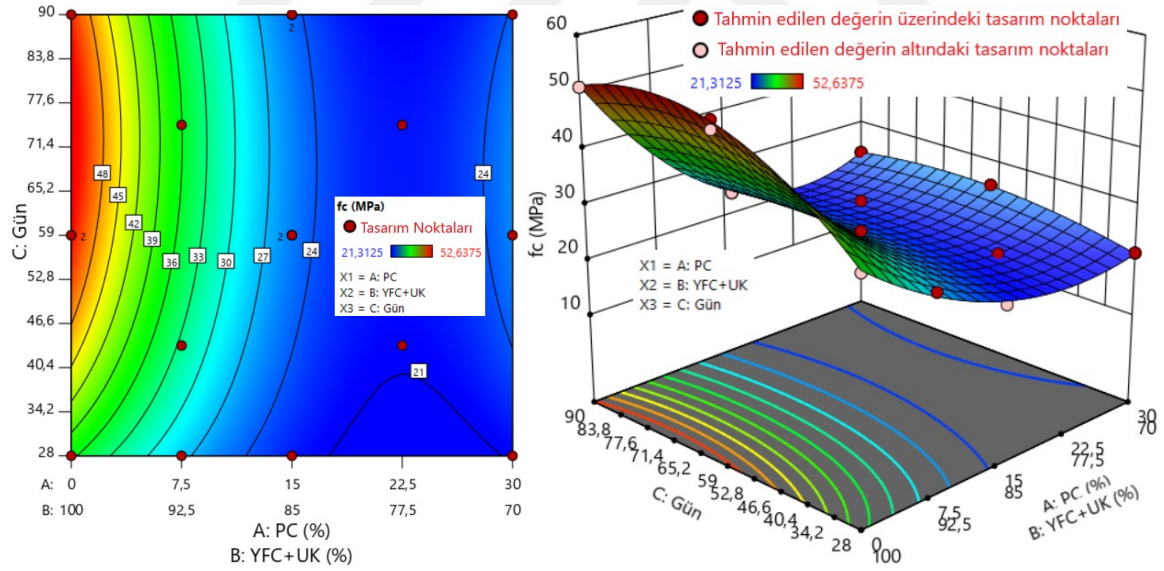
$f_c$  tepki değişkenini etkileyen AB terimine ait etkileşim grafiği Şekil 4.31’de verilmiştir.

Şekil 4.31 incelendiğinde; PÇ oranındaki artışın (YFC+UK oranındaki azalışın)  $f_c$  değerini belli bir değere kadar azalttıktan sonra yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmektedir. En yüksek  $f_c$  değerine %0 PÇ oranında ulaşılırken en düşük  $f_c$  değerine %22,5 PÇ oranında ulaşılmıştır.



Şekil 4.31. f<sub>c</sub> için AB teriminin etkileşim grafiği

AC terimi için elde edilen kontur ve 3D grafiği Şekil 4.32’de verilmiştir.



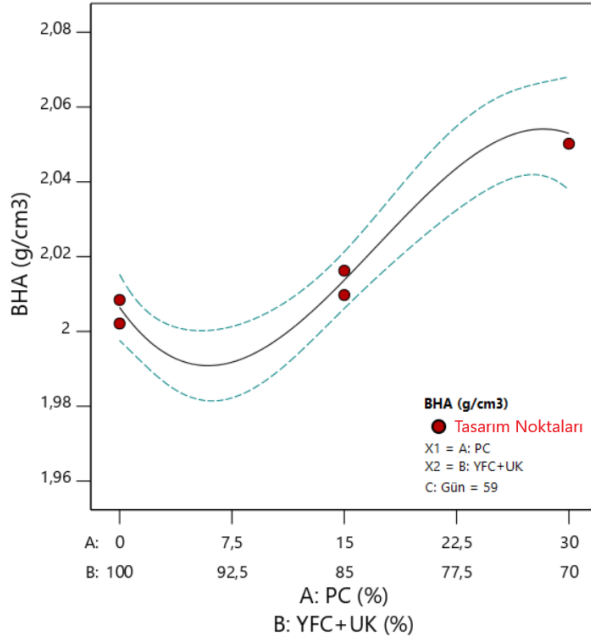
Şekil 4.32. f<sub>c</sub> için AC terimine ait kontur ve 3D grafikleri

Şekil 4.32 incelendiğinde; düşük PÇ oranlarında, numune yaşındaki artışın, f<sub>c</sub> değerini artırdığı fakat yaklaşık 47 günden sonra f<sub>c</sub> değerini etkilemediği görülmektedir. En yüksek f<sub>c</sub> değerine ileri yaşlarda ulaşılırken en düşük f<sub>c</sub> değerine erken yaşta ulaşılmıştır. Fakat yüksek PÇ oranlarında numune yaşındaki artış neticesinde f<sub>c</sub> değerinde ciddi bir değişim gözlenmemektedir.

#### 4.2.7.4. BHA'ya ait tepki yüzeyleri

Seçilen etki değişkenlerinin değişim aralığında BHA tepki değişkeninin değişimi etkileşim, kontur ve 3D grafikleri ile ortaya konmuştur.

BHA tepki değişkenini etkileyen AB terimine ait etkileşim grafiği Şekil 4.31'de verilmiştir.

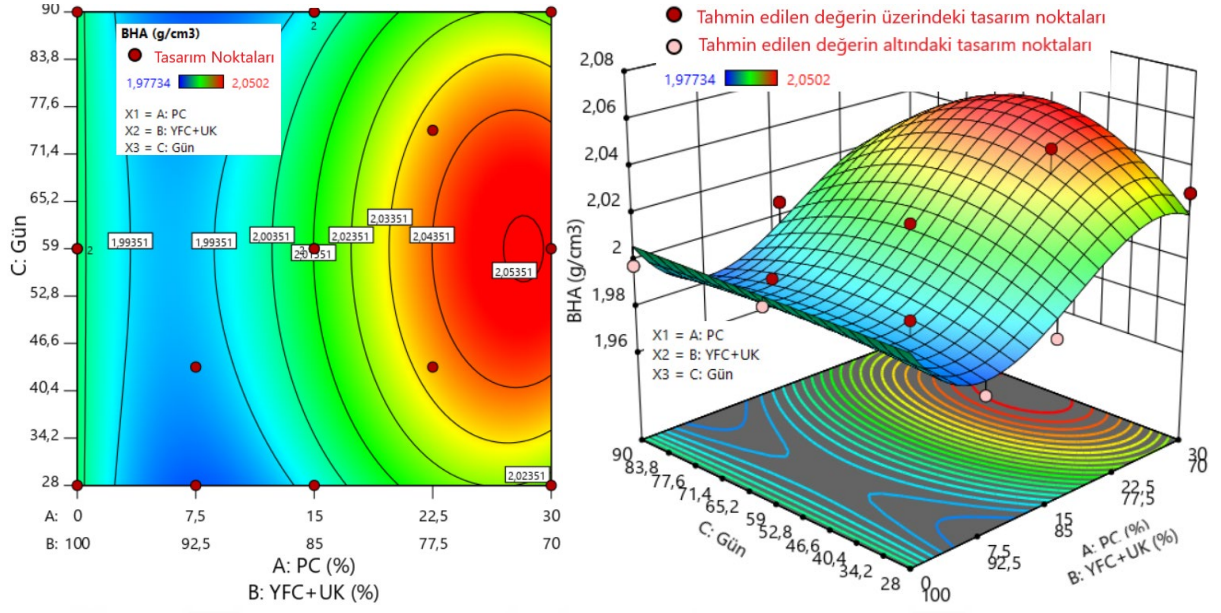


Şekil 4.33. BHA için AB teriminin etkileşim grafiği

Şekil 4.33 incelendiğinde; PC oranındaki artışın (YFC+UK oranındaki azalışın) BHA değerini genel anlamda artırdığı görülmektedir. En yüksek BHA değerine %30 PC oranında ulaşılırken en düşük BHA değerine %7,5 PC oranında ulaşılmıştır.

AC terimi için elde edilen kontur ve 3D grafiği Şekil 4.34'te verilmiştir.

Şekil 4.34 incelendiğinde; düşük PC oranlarında numune yaşındaki artış neticesinde BHA değerinde ciddi bir değişim gözlenmemektedir. Fakat yüksek PC oranlarında numune yaşındaki artışın, BHA değerini belli bir değere kadar artırdıktan sonra azalttığı görülmektedir. En yüksek BHA değerine yüksek PC oranlarında orta yaşlarda (yaklaşık 55-60 günlerde) ulaşılırken en düşük BHA değerine ise düşük PC oranlarında (düşük PC oranlarında numune yaşının BHA'ya etkisi çok düşüktür) ulaşılmıştır.

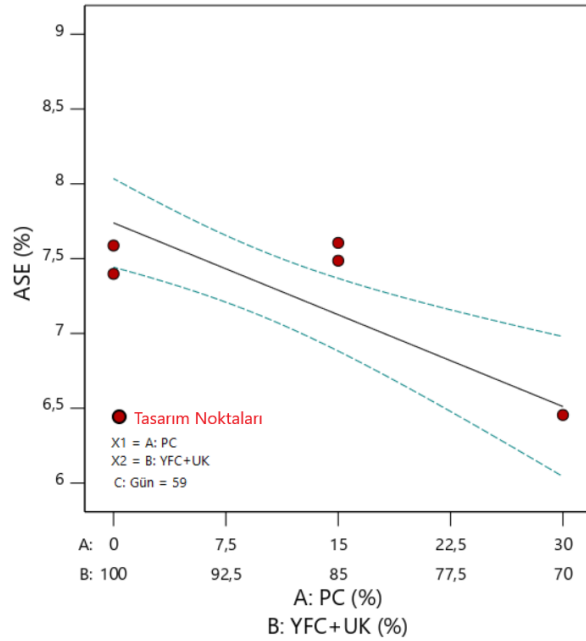


Şekil 4.34. BHA için AC terimine ait kontur ve 3D grafikleri

#### 4.2.7.5. ASE'ye ait tepki yüzeyleri

Seçilen etki değişkenlerinin değişim aralığında ASE tepki değişkeninin değişimi etkileşim, kontur ve 3D grafikleri ile ortaya konmuştur.

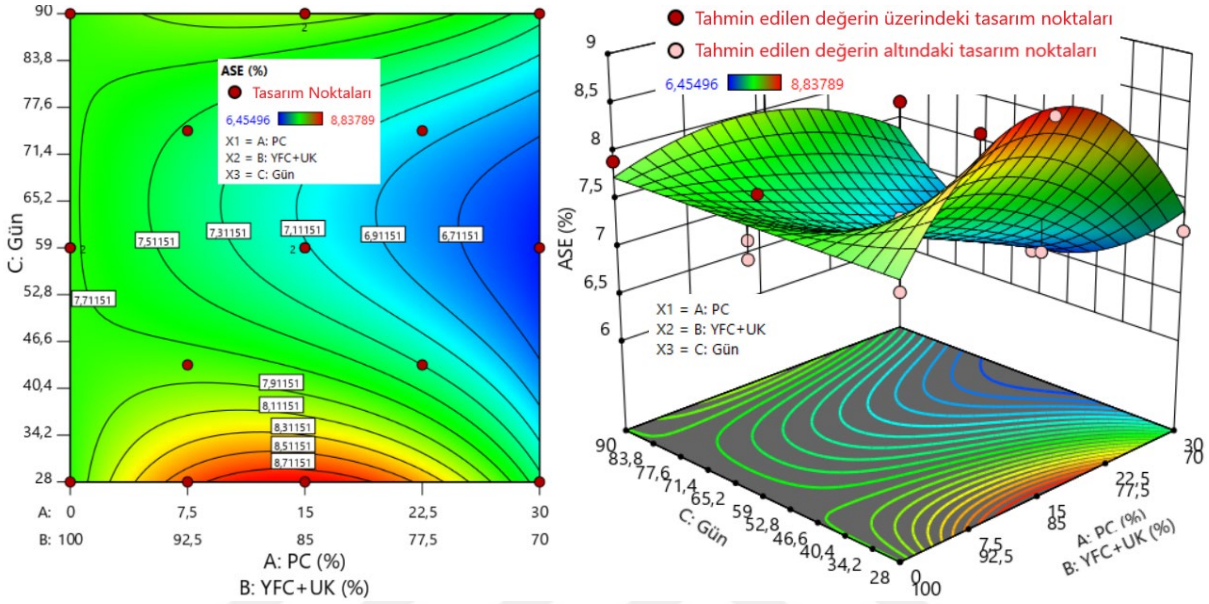
ASE tepki değişkenini etkileyen AB terimine ait etkileşim grafiği Şekil 4.35'te verilmiştir.



Şekil 4.35. ASE için AB teriminin etkileşim grafiği

Şekil 4.35 incelendiğinde; PÇ oranındaki artışın (YFC+UK oranındaki azalışın) ASE değerini azalttığı görülmektedir. En yüksek ASE değerine %0 PÇ oranında ulaşılırken en düşük ASE değerine %30 PÇ oranında ulaşılmıştır.

AC terimi için elde edilen kontur ve 3D grafiği Şekil 4.36'da verilmiştir.



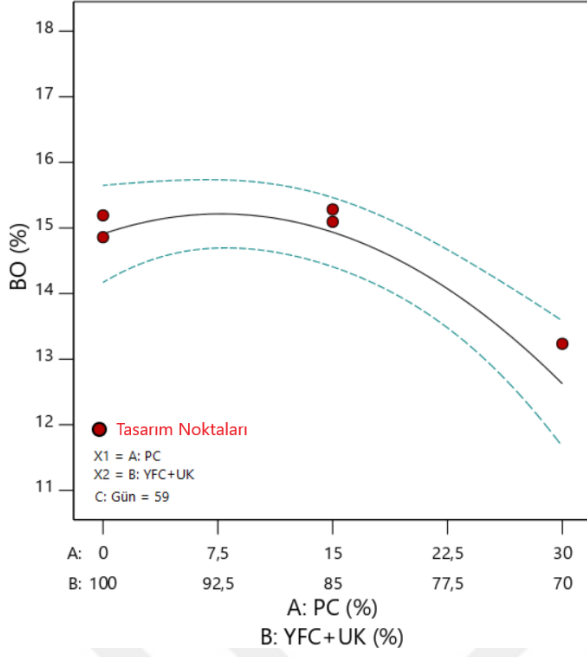
Şekil 4.36. ASE için AC terimine ait kontur ve 3D grafikleri

Şekil 4.36 incelendiğinde numune yaşındaki artışın ASE değerini belli bir değere kadar azalttıktan sonra artırdığı görülmektedir. En yüksek ASE değerine erken yaşta ulaşılırken en düşük ASE değerine orta yaşlarda ulaşılmıştır. PÇ oranı azaldıkça numune yaşının ASE değeri üzerindeki etkisi azalmıştır. Ayrıca orta yaşlarda PÇ oranındaki artış ASE değerini azaltırken erken ve ileri yaşlarda PÇ oranındaki artış ASE değerini belli bir değere kadar artırdıktan sonra azaltmaktadır.

#### 4.2.7.6. BO'ya ait tepki yüzeyleri

Seçilen etki değişkenlerinin değişim aralığında BO tepki değişkeninin değişimi etkileşim, kontur ve 3D grafikleri ile ortaya konmuştur.

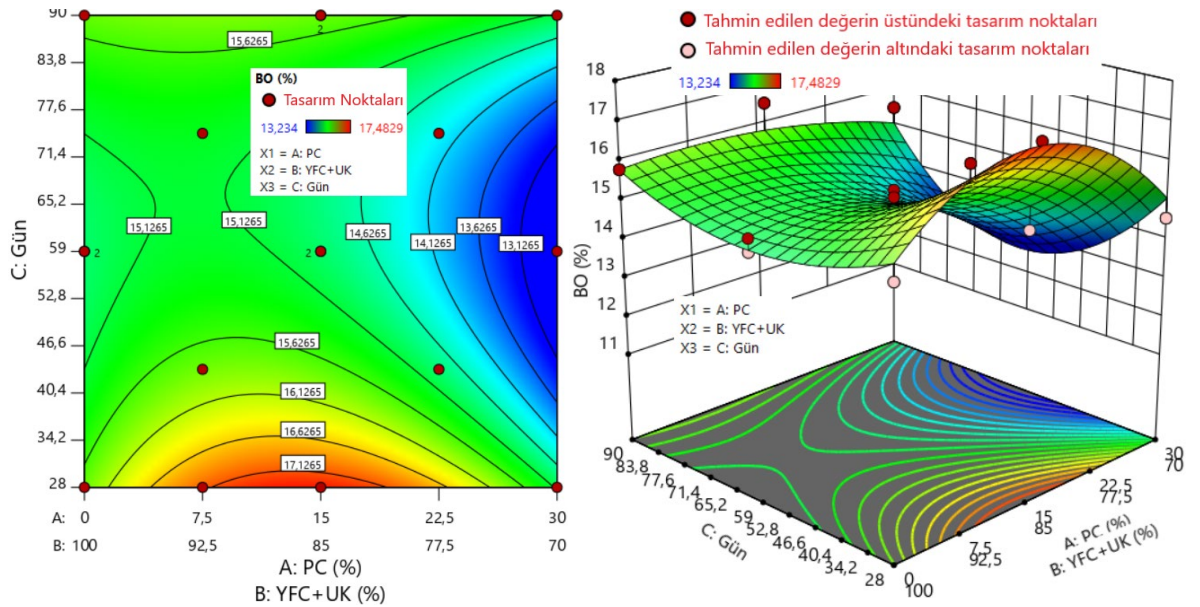
BO tepki değişkenini etkileyen AB terimine ait etkileşim grafiği Şekil 4.37'de verilmiştir.



Şekil 4.37. BO için AB teriminin etkileşim grafiği

Şekil 4.37 incelendiğinde, %15 oranına kadar PÇ oranındaki artışın (YFC+UK oranındaki azalışın) BO değerini genel olarak değiştirmedeği, daha yüksek PÇ oranlarında ise azalttığı görülmektedir. En yüksek BO değerine %7,5 PÇ oranında ulaşılırken en düşük BO değerine %30 PÇ oranında ulaşılmıştır.

AC terimi için elde edilen kontur ve 3D grafiği Şekil 4.38’de verilmiştir.



Şekil 4.38. BO için AC terimine ait kontur ve 3D grafikleri

Şekil 4.38 incelendiğinde numune yaşındaki artışın BO değerini belli bir değere kadar azalttıktan sonra artırdığı (oldukça düşük düzeyde) görülmektedir. PÇ oranı azaldıkça numune yaşının BO değeri üzerindeki etkisi azalmaktadır. Ayrıca ileri ve orta yaşlarda PÇ oranındaki artış BO değerini azaltırken erken yaşta PÇ oranındaki artış BO değerini belli bir değere kadar artırdıktan sonra azaltmaktadır. En yüksek BO değerine %15 PÇ oranında ulaşılmıştır.

#### 4.2.8. Optimizasyon

Çalışma kapsamında çok değişkenli tepki yüzeyi problemlerinin optimizasyonunda “arzu edilebilirlik yöntemi” kullanılmıştır. Deneysel çalışmada, üç farklı sınır değeri kullanılarak optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

- Mekanik özelliklerin dikkate alındığı optimizasyon,
- Fiziksel özelliklerin dikkate alındığı optimizasyon,
- Hem mekanik hem de fiziksel özelliklerin dikkate alındığı optimizasyon.

Mekanik, fiziksel ve her iki özellik için seçilen sınırlamalar sırasıyla Çizelge 4.24, Çizelge 4.25 ve Çizelge 4.26’da verilmiştir.

Çizelge 4.24. Mekanik özellikler için etki ve tepki değişkenlerine ait sınırlamalar

Ad	Hedef	Alt sınır	Üst sınır	Alt ağırlık	Üst ağırlık	Önem
PC	aralık	0	30	1	1	3
YFC+UK	aralık	70	100	1	1	3
Gün	aralık	28	90	1	1	3
UPV	hiçbiri	3,998	4,29	1	1	-
$f_f$	maksimum	3,5	8,15	1	1	5
$f_c$	maksimum	21,3	52,6	1	1	5
BHA	hiçbiri	1,977	2,05	1	1	-
ASE	hiçbiri	6,455	8,838	1	1	-
BO	hiçbiri	13,2	17,5	1	1	-

Çizelge 4.25. Fiziksel özellikler için etki ve tepki değişkenlerine ait sınırlamalar

Ad	Hedef	Alt sınır	Üst sınır	Alt ağırlık	Üst ağırlık	Önem
PC	aralık	0	30	1	1	3
YFC+UK	aralık	70	100	1	1	3
Gün	aralık	28	90	1	1	3
UPV	maksimum	3,998	4,29	1	1	1
$f_f$	hiçbiri	3,5	8,15	1	1	-
$f_c$	hiçbiri	21,3	52,6	1	1	-
BHA	maksimum	1,977	2,05	1	1	5
ASE	minimum	6,455	8,838	1	1	5
BO	minimum	13,2	17,5	1	1	5

Çizelge 4.26. Mekanik ve fiziksel özellikler için etki ve tepki değişkenlerine ait sınırlamalar

Ad	Hedef	Alt sınır	Üst sınır	Alt ağırlık	Üst ağırlık	Önem
PC	aralık	0	30	1	1	3
YFC+UK	aralık	70	100	1	1	3
Gün	aralık	28	90	1	1	3
UPV	maksimum	3,998	4,29	1	1	5
$f_f$	maksimum	3,5	8,15	1	1	5
$f_c$	maksimum	21,3	52,6	1	1	5
BHA	maksimum	1,977	2,05	1	1	5
ASE	minimum	6,455	8,838	1	1	5
BO	minimum	13,2	17,5	1	1	5

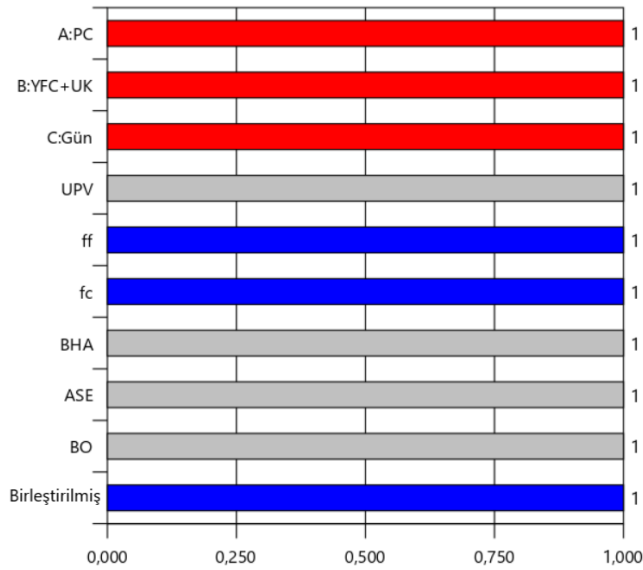
Mekanik özelliklerin dikkate alındığı optimizasyonda (Çizelge 4.24) tüm etki değişkenleri için hedef olarak belirlenen değişim aralıkları dikkate alınmış olup önem düzeyi “3” olarak seçilmiştir. UPV, BHA, ASE ve BO tepki değişkenleri, mekanik özellikleri yansıtmadığı için hedefleri “hiçbiri” seçilmiştir.  $f_f$  ve  $f_c$  tepki değişkenleri için hedefler “maksimum” seçilmiştir.  $f_f$  ve  $f_c$  için elde edilen modeller anlamlı olup ( $p = 0,0002$  ve  $p < 0,0001$ ) modellerin gerçek değerlerinin (deney sonuçları) tahmin yeteneği yüksektir ( $R^2 = 0,86$  ve  $0,99$ ). Bu nedenle  $f_f$  ve  $f_c$ 'nin önem düzeyi “5” seçilmiştir.



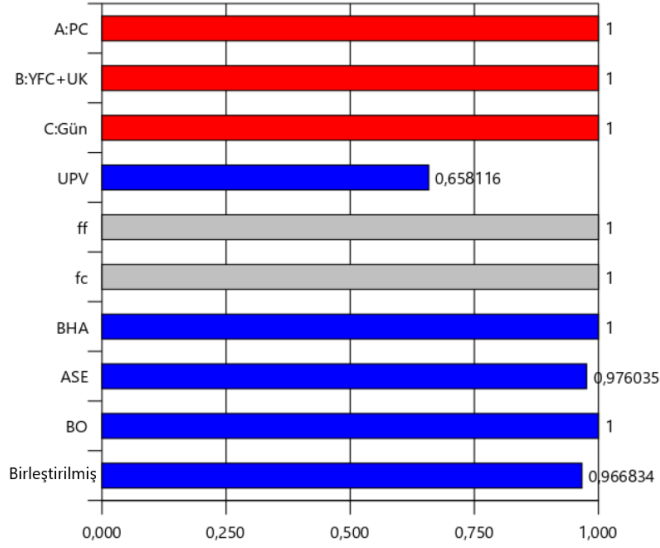
Fiziksel özelliklerin dikkate alındığı optimizasyonda (Çizelge 4.25) tüm etki değişkenleri için hedef olarak belirlenen değişim aralıkları dikkate alınmış olup önem düzeyi “3” olarak seçilmiştir.  $f_f$  ve  $f_c$  tepki değişkenleri mekanik özellik olduğu için hedefleri “hiçbiri” seçilmiştir. UPV ve BHA tepki değişkenlerinden elde edilen değerlerin yüksek olması istendiği için hedefleri “maksimum”, ASE ve BO tepki değişkenlerinden elde edilen değerlerin düşük olması istendiği için hedefleri “minimum” seçilmiştir. BHA, ASE ve BO için elde edilen modeller anlamlı olup ( $p < 0,0001$   $p = 0,0002$  ve  $p = 0,0003$ ) modellerin gerçek değerlerinin (deney sonuçları) tahmin yeteneği yüksektir ( $R^2 = 0,87$ ;  $0,82$  ve  $0,85$ ). Bu nedenle BHA, ASE ve BO’nun önem düzeyi “5” seçilmiştir. UPV için elde edilen model anlamlı olup ( $p < 0,0001$ ) modelin gerçek değerlerinin (deney sonuçları) tahmin yeteneği yüksektir ( $R^2 = 0,9$ ). Fakat UPV’nin önem düzeyindeki artış, birleştirilmiş arzuedilirliği düşürdüğü için önem düzeyi “1” seçilmiştir.

Hem mekanik hem de fiziksel özelliklerin dikkate alındığı optimizasyonda (Çizelge 4.26) hedef olarak, tüm etki değişkenleri için değişim aralıkları; UPV,  $f_f$ ,  $f_c$  ve BHA tepki değişkenleri için maksimum, ASE ve BO tepki değişkenleri için ise minimum seçilmiştir.

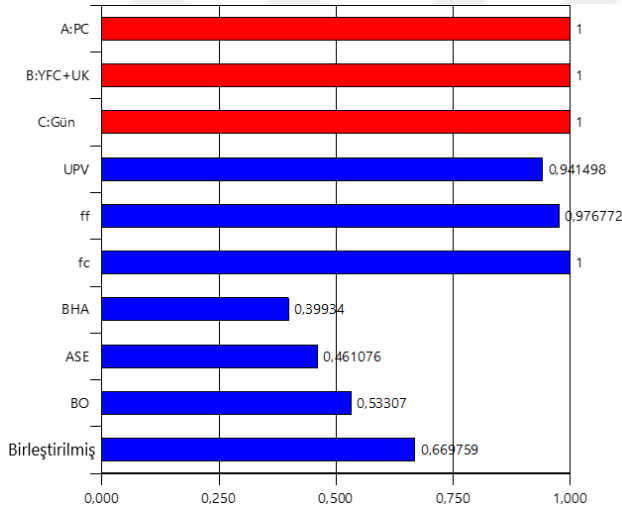
Mekanik, fiziksel ve hem mekanik hem de fiziksel özelliklerin dikkate alındığı optimizasyonlarda elde edilen arzuedilirlik değerleri sırasıyla Şekil 4.39, Şekil 4.40 ve Şekil 4.41’de verilmiştir.



Şekil 4.39. Mekanik özelliklerin dikkate alındığı optimizasyon için arzuedilirlik değerleri



Şekil 4.40. Fiziksel özelliklerin dikkate alındığı optimizasyon için arzuedilirlik değerleri



Şekil 4.41. Mekanik ve fiziksel özelliklerin dikkate alındığı optimizasyon için arzuedilirlik değerleri

Şekil 4.39 incelendiğinde, etki ve tepki değişkenleri için arzuedilirliğin “1” olarak elde edildiği görülmektedir. Arzuedilirlik değerinin “1” olması; etki ve tepki değişkenleri için hedeflenen değerleri (seçilen değişim aralığında) sağlayan optimum değerlerin elde edilebildiğini göstermektedir. Genel olarak, tüm değişkenler için hedeflenen değerlerin elde edilme ihtimali 1’dir.

Şekil 4.40 incelendiğinde, etki değişkenleri için hedeflenen değerleri (seçilen değişim aralığı) sağlayan optimum değerlerin elde edilebildiğini göstermektedir. UPV hariç tüm tepki değişkenleri için hedeflenen değerleri sağlayan optimum değerler elde edilmiştir. Genel olarak,

tüm değişkenler için hedeflenen değerlerin elde edilme ihtimali yani birleştirilmiş arzu edilebilirlik değeri yaklaşık 0,97'dir.

şekil 4.41 incelendiğinde, etki değişkenleri için hedeflenen değerleri (seçilen değişim aralığında) sağlayan optimum değerlerin elde edilebildiği, UPV,  $f_r$  ve  $f_c$  tepki değişkenlerinin hedef değeri yaklaşık olarak elde edilebildiği (arzu edilebilirlik; 0,94-1), BHA, ASE ve BO tepki değişkenlerinin ise hedef değerlerinin elde edilemediği (arzu edilebilirlik; 0,40-0,53) görülmektedir. Genel olarak, tüm değişkenler için hedeflenen değerlerin elde edilme ihtimali düşüktür (birleştirilmiş arzu edilebilirlik; 0,67).

Deneysel alışma kapsamında seçilen hedefler ve önem düzeylerine bağlı olarak arzu edilebilirlik yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda mekanik özellikler, fiziksel özellikler ve hem mekanik hem de fiziksel özellikleri dikkate alan değerlendirmeler için elde edilen optimum deneme noktalarındaki etki ve tepki değişkenlerine ait değerler izelge 4.27'de verilmiştir.

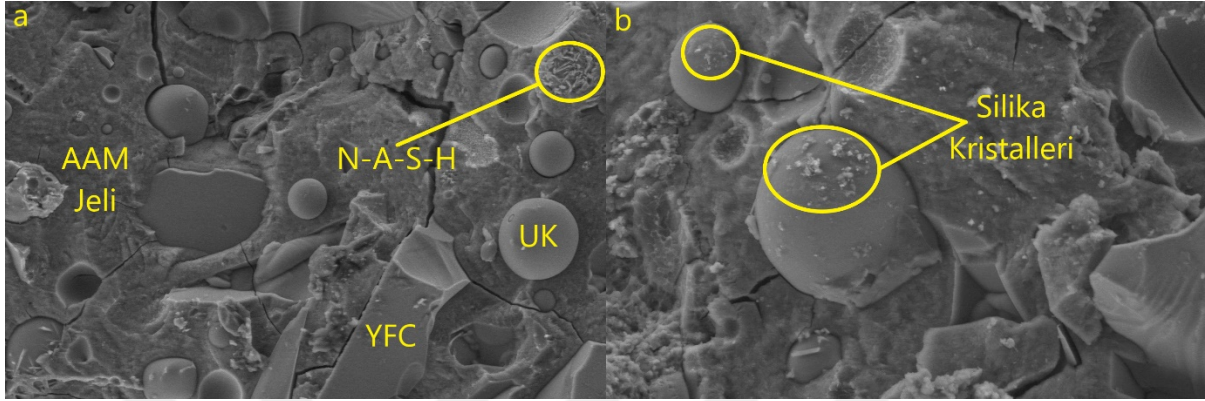
Çizelge 4.27. Deneysel alışma optimizasyon sonucu elde edilen optimum deneme noktaları

PC	YFC+UK	Gün	UPV	$f_r$	$f_c$	BHA	ASE	BO	Arzu edilebilirlik Değeri
<b>Mekanik zellikler</b>									
0	100	83,9	4,29	8,24	52,8	2,006	7,739	15,477	1
<b>Fiziksel zellikler</b>									
30	70	59,8	4,19	4,85	25,5	2,053	6,512	12,628	0,97
<b>Mekanik ve fiziksel özellikler</b>									
0,7	99,3	77,40	4,27	8,04	53,8	2,006	7,739	15,218	0,67

Çizelge 4.27 incelendiğinde hem mekanik hem de fiziksel özellikleri dikkate alan değerlendirme için elde edilen optimum deneme noktasının arzu edilebilirliği düşüktür (0,67). Bu durum, değerlendirme için tek özelliğin dikkate alınmasının daha uygun olduğunu göstermektedir.

#### 4.2.9. SEM Analizi

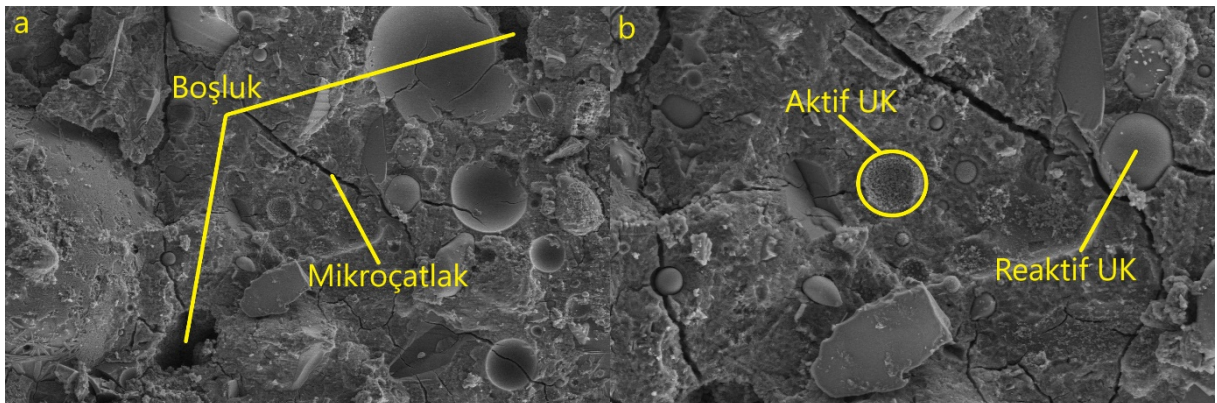
SEM analizleri 28 günlük hamur (pasta) numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. PÇ katkısız (PÇ, %0, YFC+UK, %100) 28 günlük numunenin 10 (a) ve 5 mikron (b) boyutlarındaki SEM görüntüleri Şekil 4.42’de verilmiştir.



Şekil 4.42. PÇ katkısız 28 günlük numunenin 10 (a) ve 5 mikron (b) boyutlarındaki SEM görüntüleri

Şekil 4.42 incelendiğinde; UK tanecikleri, YFC tanecikleri, AAM jeli, N-A-S-H jeli ve silika kristalleri görülmektedir. UK tanecikleri küresel şekle sahipken YFC tanecikleri keskin köşeli şekle sahiptir. UK yüzeyindeki reaksiyonun başlarında silika kristalleri oluşurken ilerleyen zamanlarda silika kristalleri N-A-S-H jeline dönüşmektedir.

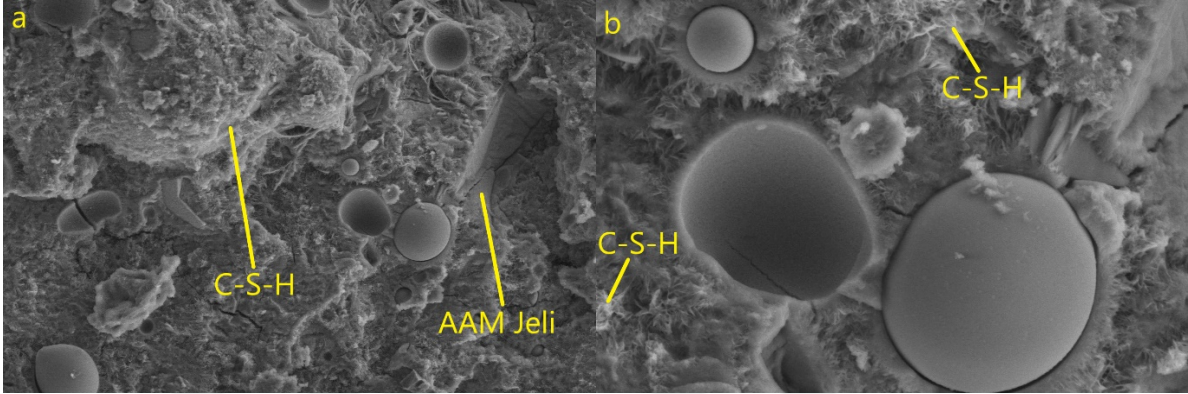
%7,5 PÇ katkılı (PÇ, %7,5, YFC+UK, %92,5) 28 günlük numunenin 10 (a) ve 20 mikron (b) boyutlarındaki SEM görüntüleri Şekil 4.43’te verilmiştir.



Şekil 4.43. %7,5 PÇ katkılı 28 günlük numunenin 10 (a) ve 20 mikron (b) boyutlarındaki SEM görüntüleri

Şekil 4.43 incelendiğinde; boşluk, mikroçatlak, aktif UK ve reaktif UK oluşumları görülmektedir. Reaksiyona girmeyen UK taneciklerinin yüzeyi pürüzsüz olup herhangi bir oluşum gözlenmemektedir.

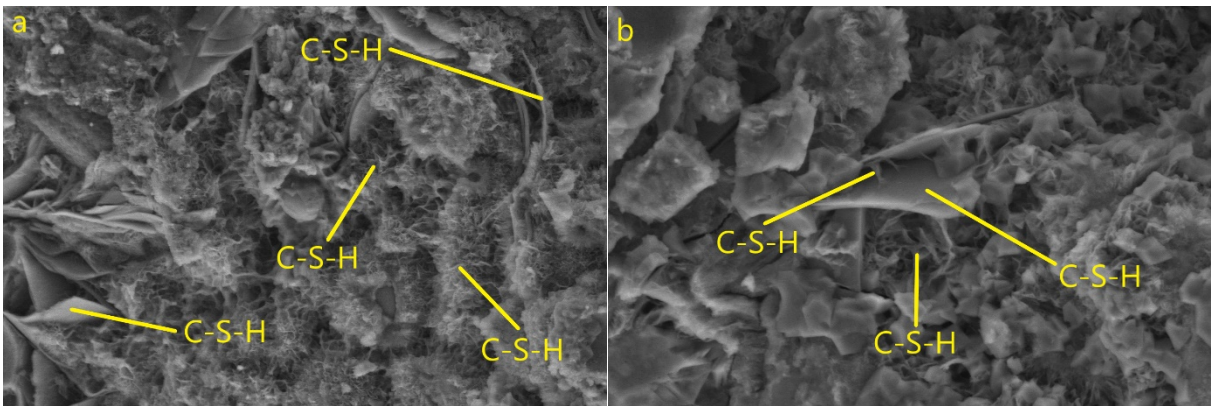
%15 PÇ katkılı (PÇ, %15, YFC+UK, %85) 28 günlük numunenin 10 (a) ve 3 (b) mikron boyutlarındaki SEM görüntüleri Şeki 4.44'te verilmiştir.



Şekil 4.44. %15 PÇ katkılı 28 günlük numunenin 10 (a) ve 3 mikron (b) boyutlarındaki SEM görüntüleri

Şekil 4.44 incelendiğinde; C-S-H jeli oluşumu, daha düşük PÇ katkılı numunelere kıyasla gözle görülür bir şekilde artmıştır. C-S-H jeli ağ görünümünde, heterojen ve boşluklu yapıya sahiptir. AAM jeli ise yoğun, boşluksuz ve homojen yapıya sahip olup C-S-H jeline kıyasla daha koyu renktedir.

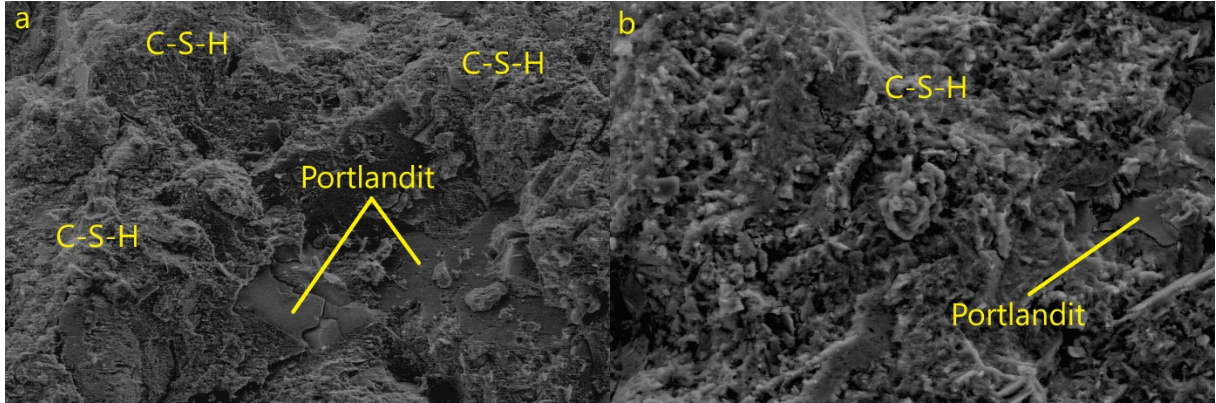
%30 PÇ katkılı (PÇ, %30, YFC+UK, %70) 28 günlük numunenin 5 (a) ve 3 mikron (b) boyutlarındaki SEM görüntüleri Şekil 4.45'te verilmiştir.



Şekil 4.45. %30 PÇ katkılı 28 günlük numunenin 5 ve 3 mikron boyutlarındaki SEM görüntüleri

Şekil 4.45 incelendiğinde; C-S-H jelinin ağ şeklinde, yay şeklinde, yassı ve ince şekilde formları mevcut olup yüzeyi yoğun bir şekilde kapladığı görülmektedir. Ayrıca C-S-H jelinin sahip olduğu farklı fiziksel yapısı, PÇ oranı arttıkça meydana gelen basınç dayanımı düşüşünü açıklamaktadır.

28 günlük referans (PÇ, %100, YFC+UK, %0) numunesinin 20 (a) ve 5 mikron (b) boyutlarındaki SEM görüntüleri Şekil 4.46'da verilmiştir.



Şekil 4.46. 28 günlük referans numunesinin 20 (a) ve 5 mikron (b) boyutlarındaki SEM görüntüleri

Şekil 4.46 incelendiğinde; C-S-H jeli pürüzlü ve heterojen yapıya sahipken portlanditin pürüzsüz ve homojen yapıya sahip olduğu görülmektedir. Referans numunesinde oluşan C-S-H jeli, AAM numunelerinde oluşan C-S-H jeline kıyasla daha boşluksuz ve yoğun bir yapıya sahiptir. Bu durum, en yüksek basınç dayanım değerinin referans numunesinden elde edilmesini açıklamaktadır.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Ön deneme çalışması ve deneysel çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Ön deneme çalışmasındaki etki değişkenleri; A-ağırlıkça aktivatör oranı ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (S)/NaOH (S)), B-ağırlıkça toplam alkali solüsyon/bağlayıcı oranı (Alkali (S)/(YFC+UK)), C-NaOH molarite değeri (Molarite (NaOH)) ve D-ağırlıkça  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  solüsyon (S) suyu/ $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  solüsyon (S) oranıdır (Su  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ /Solüsyon  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). Ön deneme çalışmasından elde edilen sonuçlar:

- Tüm tepki değişkenleri (UPV,  $f_f$  ve  $f_c$ ) için elde edilen modeller anlamlıdır.
- A ana teriminin UPV üzerindeki etki düzeyi anlamsızdır ( $p_A = 0,6462$ ).
- $f_f$  tepki değişkeni üzerinde anlamlı etkiye sahip ana etki değişkeni D iken ( $p_D = 0,0360$ ) anlamsız etkiye sahip ana etki değişkeni A'dır ( $p_A = 1,0000$ ).
- A ( $p_A = 0,2398$ ) ve C ( $p_C = 0,1368$ ) etki değişkenlerinin ana terimlerinin  $f_c$  üzerindeki etki düzeyleri anlamsızken B ( $p_B < 0,0001$ ) ve D ( $p_D < 0,0001$ ) ana terimlerinin etki düzeyleri anlamlıdır.
- Tüm tepki değişkenleri için elde edilen modellerin uyum yokluğu anlamsızdır.
- Tüm tepki değişkenleri için uygun kesinlik değerleri (UPV; 33,5777,  $f_f$ ; 16,0063 ve  $f_c$ ; 36,2128) arzu edilen değer (4) üzerindedir. Bu durum, modellerin tasarım uzayında (seçilen değişim aralıkları içerisinde) uygun (yeterli) işaret oluşturduğunu göstermektedir.
- Tepki değişkenleri (UPV,  $f_f$  ve  $f_c$ ) için  $R^2$  değerleri sırasıyla 0,9301; 0,6644 ve 0,8638 olarak elde edilmiş olup UPV ve  $f_c$  için  $R^2$  değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. UPV,  $f_f$  ve  $f_c$  için elde edilen modellerin  $R^2$  ile ayarlı  $R^2$  değeri arasındaki fark sırasıyla 0,0163; 0,0339 ve 0,0153 olup aralarında büyük sapmalar bulunmamaktadır. UPV,  $f_f$  ve  $f_c$  için elde edilen modellerin ayarlı  $R^2$  - tahmini  $R^2$  değerleri 0,2'den küçük olup sırasıyla 0,0278; 0,0376 ve 0,0213'tür. Bu durum; ayarlı  $R^2$  ve tahmini  $R^2$  değerlerinin makul düzeyde uyduğunu ve modellerden elde edilen yeni verilerdeki değişkenlik (tahmin hatası) miktarının uygun olduğunu göstermektedir.
- UPV ve  $f_c$  için oluşturulan modellerden elde edilen tahmini değerler ile gerçek (deney sonucu) değerler makul düzeyde uyumuştur. Fakat  $f_f$  için oluşturulan modellerden elde edilen tahmini değerler ile gerçek (deney sonucu) değerler UPV ve  $f_c$ 'ye kıyasla düşük düzeyde uyumuştur.

- UPV için AB etkileşiminde, B'nin minimum değerinde A'daki artış ile UPV değeri azalırken B'nin maksimum değerinde artmaktadır. AC etkileşiminde, C'nin minimum değerinde A'daki artışın UPV değerini belli bir değere kadar artırdıktan sonra azaltırken C'nin maksimum değerinde UPV değerini belli bir değere kadar azalttıktan sonra artırdığı görülmektedir. BC etkileşiminde, C'nin minimum değerinde B'deki artışın UPV değerini azaltırken C'nin maksimum değerinde UPV değerinde oldukça az bir artış gerçekleştiği görülmektedir. BD etkileşiminde, D'nin minimum değerinde B'deki artışın UPV değerini az da olsa artırırken D'nin maksimum değerinde UPV değerini azalttığı görülmektedir. CD etkileşiminde, D'nin minimum ve maksimum değerinde C'deki artışın UPV değerini azalttığı görülmektedir.

- $f_f$  için AB etkileşiminde, B'nin minimum ve maksimum değerinde A'daki artışın  $f_f$  değerini belli bir değere kadar artırdıktan sonra azalttığı görülmektedir. AD etkileşiminde, D'nin minimum değerinde A'daki artışın  $f_f$  değerini azaltırken D'nin maksimum değerinde  $f_f$  değerini artırdığı görülmektedir. BC etkileşiminde, C'nin minimum değerinde B'deki artışın  $f_f$  değerini belli bir değere kadar artırdıktan sonra azaltırken C'nin maksimum değerinde  $f_f$  değerini azalttığı görülmektedir. CD etkileşiminde, D'nin minimum değerinde C'deki artışın  $f_f$  değerini azaltırken D'nin maksimum değerinde  $f_f$  değerini artırdığı görülmektedir.

- $f_c$  için AB etkileşiminde, B'nin minimum ve maksimum değerinde A'daki artışın  $f_c$  değerini belli bir değere kadar artırdıktan sonra azalttığı görülmektedir. AC etkileşiminde, C'nin minimum değerinde A'daki artışın  $f_c$  değerini artırırken C'nin maksimum değerinde  $f_c$  değerini azalttığı görülmektedir. AD etkileşiminde, D'nin minimum değerinde A'daki artışın  $f_c$  değerini azaltırken D'nin maksimum değerinde  $f_c$  değerini artırdığı görülmektedir. BC etkileşiminde, C'nin minimum ve maksimum değerinde B'deki artışın  $f_c$  değerini azalttığı görülmektedir. Fakat C'nin maksimum değerindeki azalma, C'nin minimum değerindeki azalmaya oranla çok daha fazladır. BD etkileşiminde, D'nin minimum ve maksimum değerinde B'deki artışın  $f_c$  değerini azalttığı görülmektedir. Ancak D'nin maksimum değerinde B'deki artış ile  $f_c$  değerinde oldukça düşük bir azalma gerçekleşmektedir. CD etkileşiminde, D'nin minimum değerinde C'deki artışın  $f_c$  değerini azaltırken D'nin maksimum değerinde  $f_c$  değerini artırdığı görülmektedir.

- A, B, C ve D etki değişkenleri için arzuedilirlik değeri 1'dir. Bu durum, etki değişkenleri için hedeflenen değerleri (seçilen değişim aralığı) sağlayan optimum değerlerin elde edilebildiğini göstermektedir. Tepki değişkenleri için hedeflenen değerleri sağlayan optimum değerler ise elde edilememiştir. Önem düzeyinin düşük olduğu UPV ve  $f_f$  için hedef



değerlerin sağlanabilmesi oldukça düşüktür (sırasıyla 0,66 ve 0,61). Fakat önem düzeyinin yüksek olduğu  $f_c$  için hedeflenen değer sağlanabilmesi oldukça yüksektir (0,90). Genel olarak, tüm değişkenler için hedeflenen değerlerin elde edilme ihtimali (birleştirilmiş arzu edilirlik değeri) yaklaşık 0,81'dir. Birleştirilmiş arzu edilirlik değerinin düşük olması UPV ve  $f_f$  tepki değişkenlerine ait arzu edilirlik değerlerinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

- Ön deneme çalışması kapsamında tüm değişkenler için seçilen hedefler ile önem düzeylerine bağlı olarak elde edilen etki ve tepki değişkenlerine ait optimum değerler sırasıyla  $A = 1,88$ ;  $B = 0,4$ ;  $C = 11,5$ ;  $D = 60$ ;  $UPV = 4,18$ ;  $f_f = 6,6$ ;  $f_c = 45,3$ ; arzu edilirlik değeri = 0,81'dir.

Deneysel çalışmadaki etki değişkenleri A-PC, B-(YFC+UK) ve C-Gün'dür. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar:

- PÇ ilave oranındaki artış, yayılma değerini azaltmaktadır.
- PÇ ilave oranındaki artış ile birlikte priz başlama ve bitiş süresi kısalmıştır. Ayrıca PÇ ilaveli tüm hamur karışımlarının priz başlama ve bitiş süresi, referans karışımına kıyasla daha kısadır.

- Tüm tepki değişkenleri (UPV,  $f_f$ ,  $f_c$ , BHA, ASE, BO) için elde edilen modeller anlamlı, uyum yokluğu ise anlamsızdır.

- UPV üzerinde; AB ve BC terimlerinin etki düzeyi anlamlı ( $p_{AB} < 0,0001$ ;  $p_{BC} = 0,0005$ ), AC teriminin etki düzeyi anlamsız ( $p_{AC} = 0,2026$ ) ve  $AC^2$  teriminin etki düzeyi düşük seviyede anlamlıdır ( $p_{AC^2} = 0,0869$ ).  $AC^2$  terimi hiyerarşik bir model elde edilebilmesi için modele ilave edilmiştir.

- $f_f$  üzerinde; AB ve BC terimlerinin etki düzeyi anlamlı ( $p_{AB} = 0,0042$ ;  $p_{BC} = 0,0408$ ), AC teriminin etki düzeyi anlamsız ( $p_{AC} = 0,2102$ ), ABC teriminin etki düzeyi ise düşük seviyede anlamlıdır ( $p_{ABC} = 0,0779$ ). Hiyerarşik bir model elde edilebilmesi için etki düzeyi düşük olan AC terimi de  $f_f$ 'e ait modele ilave edilmiştir.

- $f_c$  üzerinde AB, BC, ABC ve  $BC^2$  terimlerinin etki düzeyi anlamlı ( $p_{AB} < 0,0001$ ;  $p_{BC} = 0,0001$ ;  $p_{ABC} = 0,0224$ ;  $p_{BC^2} = 0,0005$ ); AC ve  $AC^2$  terimlerinin etki düzeyi anlamsız ( $p_{AC} = 0,1926$ ;  $p_{AC^2} = 0,1724$ );  $ABC^2$  teriminin etki düzeyi ise düşük seviyede anlamlıdır ( $p_{ABC^2} = 0,0682$ ). Hiyerarşik bir model elde edilebilmesi için etki düzeyi anlamsız olan AC ve  $AC^2$  terimleri de  $f_c$ 'ye ait modele ilave edilmiştir.

- AB,  $AC^2$  ve AB(A-B) terimlerinin BHA üzerindeki etki düzeyi anlamlıdır ( $p_{AB} = 0,0044$ ;  $p_{AC^2} = 0,0013$ ;  $p_{AB(A-B)} = 0,0044$ ).

- ABC,  $AC^2$  ve  $ABC^2$  terimlerinin ASE üzerindeki etki düzeyi anlamlıdır ( $p_{ABC} = 0,0044$ ;  $p_{AC^2} = 0,0152$ ;  $p_{ABC^2} = 0,0014$ ).

- BO üzerinde AB, ABC ve  $AC^2$  terimlerinin etki düzeyi anlamlı ( $p_{AB} = 0,0023$ ;  $p_{ABC} = 0,0125$ ;  $p_{AC^2} = 0,0007$ );  $BC^2$  teriminin etki düzeyi ise düşük seviyede anlamlıdır ( $p_{BC^2} = 0,077$ ).

- Tepki değişkenleri (UPV,  $f_f$ ,  $f_c$ , BHA, ASE ve BO) için  $R^2$  değerleri sırasıyla 0,9075; 0,8612; 0,9907; 0,876; 0,8249 ve 0,8529 olarak elde edilmiştir. Ayarlı  $R^2$  değeri  $R^2$  değerinden büyük sapmalar göstermemekte olup UPV,  $f_f$ ,  $f_c$ , BHA, ASE ve BO için elde edilen modellerin  $R^2$  - ayarlı  $R^2$  değerleri sırasıyla 0,042; 0,0631; 0,0094; 0,0414; 0,0584 ve 0,0669'dur. Ayrıca UPV,  $f_f$ ,  $f_c$ , BHA ve ASE için elde edilen modellerin ayarlı  $R^2$  - tahmini  $R^2$  değerleri sırasıyla 0,1469; 0,0922; 0,1033; 0,104 ve 0,1335'tir. Bu durum modellerden elde edilen yeni verilerdeki değişkenlik (tahmin hatası) miktarının uygun olduğunu göstermektedir. BO için elde edilen modelin ayarlı  $R^2$  - tahmini  $R^2$  değeri ise 0,2587 olup 0,2'den büyüktür.

- Bütün tepki değişkenleri için uygun kesinlik değeri (UPV 17,7137;  $f_f$  11,7675;  $f_c$  28,0419; BHA 15,6946; ASE 14,1918 ve BO 15,162) arzu edilen değerin ( $> 4$ ) üzerindedir. Bu durum, modellerin tasarım uzayında (seçilen değişim aralıkları içerisinde) uygun (yeterli) işaret oluşturduğunu göstermektedir.

- Tüm tepki değişkenleri için  $R^2$  değerlerinin yüksek olması nedeniyle tahmini değerler ile deney sonuçları arasında küçük sapmalar elde edilmiştir.

- PÇ oranındaki artışın (YFC+UK oranındaki azalışın) UPV değerini belli bir değere kadar azalttıktan sonra artırdığı görülmektedir. En yüksek UPV değerine %0 PÇ oranında ulaşılırken en düşük UPV değerine %15 PÇ oranında ulaşılmış olup UPV değerinde %3,5 düşüş söz konusudur. AC terimi için düşük PÇ oranlarında numune yaşındaki artışın UPV değerini artırdığı görülmektedir. Fakat yüksek PÇ oranlarında numune yaşındaki artış UPV değerini çok az da olsa belli bir değere kadar artırdıktan sonra azaltmaktadır.

- PÇ oranındaki artışın (YFC+UK oranındaki azalışın)  $f_f$  değerini belli bir değere kadar azalttıktan sonra yaklaşık sabit kaldığı görülmektedir. En yüksek  $f_f$  değerine %0 PÇ oranında ulaşılırken en düşük  $f_f$  değerine %22,5 PÇ oranında ulaşılmış olup  $f_f$  değerinde %37,5 düşüş söz konusudur. AC terimi için düşük PÇ oranlarında numune yaşındaki artışın  $f_f$  değerini artırırken yüksek PÇ oranlarında numune yaşındaki artışın  $f_f$  değerini azalttığı görülmektedir. Düşük PÇ oranlarında en yüksek  $f_f$  değerine ileri yaşlarda ulaşılırken yüksek PÇ oranlarında erken yaşlarda ulaşılmaktadır.

- PÇ oranındaki artışın (YFC+UK oranındaki azalışın)  $f_c$  değerini belli bir değere kadar azalttıktan sonra yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmektedir. En yüksek  $f_c$  değerine %0 PÇ oranında ulaşılırken en düşük  $f_c$  değerine %22,5 PÇ oranında ulaşılmış olup  $f_c$  değerinde %60 düşüş söz konusudur. AC terimi için düşük PÇ oranlarında numune yaşındaki artışın,  $f_c$  değerini artırdığı fakat yaklaşık 47 günden sonra  $f_c$  değerini etkilemediği görülmektedir. En yüksek  $f_c$  değerine ileri yaşlarda ulaşılırken en düşük  $f_c$  değerine erken yaşta ulaşılmıştır. Fakat yüksek PÇ oranlarında numune yaşındaki artış neticesinde  $f_c$  değerinde ciddi bir değişim gözlenmemektedir.

- PÇ oranındaki artışın (YFC+UK oranındaki azalışın) BHA değerini genel anlamda artırdığı görülmektedir. En yüksek BHA değerine %30 PÇ oranında ulaşılırken en düşük BHA değerine %7,5 PÇ oranında ulaşılmış olup BHA değerinde %3 düşüş söz konusudur. AC terimi için düşük PÇ oranlarında numune yaşındaki artış neticesinde BHA değerinde ciddi bir değişim gözlenmemektedir. Fakat yüksek PÇ oranlarında numune yaşındaki artışın, BHA değerini belli bir değere kadar artırdıktan sonra azalttığı görülmektedir. En yüksek BHA değerine yüksek PÇ oranlarında orta yaşlarda ulaşılırken en düşük BHA değerine ise düşük PÇ oranlarında ulaşılmıştır.

- PÇ oranındaki artışın (YFC+UK oranındaki azalışın) ASE değerini azalttığı görülmektedir. En yüksek ASE değerine %0 PÇ oranında ulaşılırken en düşük ASE değerine %30 PÇ oranında ulaşılmış olup ASE değerinde %16 düşüş söz konusudur. AC terimi için numune yaşındaki artışın ASE değerini belli bir değere kadar azalttıktan sonra artırdığı görülmektedir. En yüksek ASE değerine erken yaşta ulaşılırken en düşük ASE değerine orta yaşlarda ulaşılmıştır. PÇ oranı azaldıkça numune yaşının ASE değeri üzerindeki etkisi azalmıştır. Ayrıca orta yaşlarda PÇ oranındaki artış ASE değerini azaltırken erken ve ileri yaşlarda PÇ oranındaki artış ASE değerini belli bir değere kadar artırdıktan sonra azaltmaktadır.

- %15 oranına kadar PÇ oranındaki artışın (YFC+UK oranındaki azalışın) BO değerini genel olarak değiştirmedeği, daha yüksek PÇ oranlarında ise azalttığı görülmektedir. En yüksek BO değerine %7,5 PÇ oranında ulaşılırken en düşük BO değerine %30 PÇ oranında ulaşılmış olup BO değerinde %13 düşüş söz konusudur. AC terimi için numune yaşındaki artışın BO değerini belli bir değere kadar azalttıktan sonra artırdığı (oldukça düşük düzeyde) görülmektedir. PÇ oranı azaldıkça numune yaşının BO değeri üzerindeki etkisi azalmaktadır. Ayrıca ileri ve orta yaşlarda PÇ oranındaki artış BO değerini azaltırken erken yaşta PÇ oranındaki artış BO değerini belli bir değere kadar artırdıktan sonra azaltmaktadır. En yüksek BO değerine %15 PÇ oranında ulaşılmıştır.

• Deneysel çalışma kapsamında tüm değişkenler için seçilen hedefler ile önem düzeylerine bağlı olarak elde edilen ve mekanik özelliklerin dikkate alındığı optimum değerler sırasıyla  $A = 0$ ;  $B = 100$ ;  $C = 83,9$ ;  $UPV = 4,29$ ;  $f_f = 8,24$ ;  $f_c = 52,8$ ;  $BHA = 2,006$ ;  $ASE = 7,739$ ;  $BO = 15,477$ ; arzuedilirlik değeri = 1'dir. Fiziksel özelliklerin dikkate alındığı optimum değerler sırasıyla  $A = 30$ ;  $B = 70$ ;  $C = 59,8$ ;  $UPV = 4,19$ ;  $f_f = 4,85$ ;  $f_c = 25,5$ ;  $BHA = 2,053$ ;  $ASE = 6,512$ ;  $BO = 12,628$ ; arzuedilirlik değeri = 0,97'dir. Hem mekanik hem de fiziksel özelliklerin dikkate alındığı optimum değerler sırasıyla  $A = 0,7$ ;  $B = 99,3$ ;  $C = 77,4$ ;  $UPV = 4,27$ ;  $f_f = 8,04$ ;  $f_c = 53,8$ ;  $BHA = 2,006$ ;  $ASE = 7,7539$ ;  $BO = 15,218$ ; arzuedilirlik değeri = 0,67'dir. Bu durum hem mekanik hem de fiziksel özelliklerin çoklu optimizasyonu sonucu istenilen hedef değerlerin sağlanamadığını göstermektedir. Bu nedenle uygulamada çevresel koşulların önceden belirlenip buna uygun tasarımın yapılarak optimum değerlerin dikkate alınması gerekmektedir.

• %15 PÇ katkılı (PÇ, %15, YFC+UK, %85) 28 günlük numunede C-S-H jeli oluşumu, daha düşük PÇ katkılı numunelere kıyasla gözle görülür bir şekilde artmıştır.

• %30 PÇ katkılı (PÇ, %30, YFC+UK, %70) 28 günlük numunede oluşan yüksek miktardaki C-S-H jelinin sahip olduğu farklı fiziksel yapı, PÇ oranı arttıkça meydana gelen basınç dayanımı düşüşünü açıklamaktadır.

• 28 günlük referans numunesinde oluşan C-S-H jeli, AAM numunelerinde oluşan C - S - H jeline kıyasla daha boşluksuz ve yoğun bir yapıya sahiptir. Bu durum, en yüksek basınç dayanım değerinin referans numunesinden elde edilmesini açıklamaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] C. Meyer, "The greening of the concrete industry," *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, no. 8, pp. 601-605, 2009.
- [2] Türkiye Hazır Beton Birliği, "Türkiye hazır beton sektörü istatistikleri," İstanbul, 2019.
- [3] T. Y. Erdoğan, "Yapı malzemesi olarak "Beton"", *Beton*, Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., 2015, ss. 6-8.
- [4] J. L. Provis ve J. S. J. Deventer, "Alkali activated materials: state of the art report," International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures, 2014.
- [5] The European Cement Association, "Activity report," Brussels, 2020.
- [6] British Petrol, "Statistical review of world energy," London, 2021.
- [7] N. A. Madlool, R. Saidur, M. S. Hossain ve N. A. Rahim, "A critical review on energy use and savings in the cement industries," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 4, pp. 2042-2060, 2011.
- [8] British Petrol, "Statistical review of world energy," London, 2019.
- [9] Anonim, "Petrol," 2020. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://bigpara.hurriyet.com.tr/kobi/dunya-emptia-borsalari/brent-petrol/>. [Erişim tarihi: 14 Eylül 2020].
- [10] A. Rodrigue, J. Duchesne, B. Fournier ve B. Bissonnette, "Influence of added water and fly ash content on the characteristics, properties and early-age cracking sensitivity of alkali-activated slag/fly ash concrete cured at ambient temperature," *Construction and Building Materials*, vol. 171, pp. 929-941, 2018.
- [11] H. Alanazi, J. Hu ve Y. R. Kim, "Effect of slag, silica fume, and metakaolin on properties and performance of alkali-activated fly ash cured at ambient temperature," *Construction and Building Materials*, vol. 197, pp. 747-756, 2019.
- [12] B. Baradan ve ark. "Puzolanlar," *Beton*, İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 2015, ss. 26-34.
- [13] M. Tokyay ve K. Erdoğan, "Cüruflar ve cürüflü çimentolar," Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, ss. 50, 2011.

- [14] T. Y. Erdoğan, “Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu,” *Beton*, Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., 2015, ss. 205-212.
- [15] S. Yousefi Oderji, B. Chen, M. R. Ahmad ve S. F. A. Shah, “Fresh and hardened properties of one-part fly ash-based geopolymer binders cured at room temperature: Effect of slag and alkali activators,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 225, pp. 1-10, 2019.
- [16] S. İlkentapar, “Kimyasal katkı içeren alkali ile aktive edilmiş cüruf harçlarının farklı kür koşulları altındaki özellikleri,” Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2013.
- [17] M. A. Yazdi, M. Liebscher, S. Hempel, J. Yang ve V. Mechtcherine, “Correlation of microstructural and mechanical properties of geopolymers produced from fly ash and slag at room temperature,” *Construction and Building Materials*, vol. 191, pp. 330-341, 2018.
- [18] B. Baradan ve ark. “Uçucu küller,” *Beton*, İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 2015, ss. 34-42.
- [19] M. Kaur, J. Singh ve M. Kaur, “Microstructure and strength development of fly ash-based geopolymer mortar: Role of nano-metakaolin,” *Construction and Building Materials*, vol. 190, pp. 672-679, 2018.
- [20] T. Y. Erdoğan, “Portland çimentoları ve diğer çimento türleri,” *Beton*, Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., 2015, ss. 11-65.
- [21] M. Askarian, Z. Tao, G. Adam ve B. Samali, “Mechanical properties of ambient cured one-part hybrid OPC-geopolymer concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 186, pp. 330-337, 2018.
- [22] G. Güler, E. Güler, Ü. İpekoğlu ve H. Mordoğan, “Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları,” *19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı*, İzmir, 2005.
- [23] B. Baradan ve ark., “Yüksek fırın cürufu,” *Beton*, İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 2015, ss. 47-52.
- [24] A. Ravitheja ve N. L. N. K. Kumar, “A study on the effect of nano clay and GGBS on the strength properties of fly ash based geopolymers,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 19, pp. 273-276, 2019.

- [25] A. Gupta, "Investigation of the strength of ground granulated blast furnace slag based geopolymer composite with silica fume," *Materials Today: Proceedings*, vol. 44, pp. 23-28, 2021.
- [26] A. A. Aliabdo, A. E. M. Abd Elmoaty ve M. A. Emam, "Factors affecting the mechanical properties of alkali activated ground granulated blast furnace slag concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 197, pp. 339-355, 2019.
- [27] World Water Assessment Programme, "The United Nations world water development report 2014: water and energy," Paris, 2014.
- [28] T. Y. Erdoğan, "Doğal puzolanlar," *Beton*, Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., 2015, ss. 179-187.
- [29] R. N. Swamy, *Cement Replacement Materials (Concrete Technology & Design)*. Guildford: Surrey University Press, 1986.
- [30] T. Y. Erdoğan, "Uçucu küller," *Beton*, Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., 2015, ss. 188-195.
- [31] P. Türker, B. Erdoğan, F. Katnaş ve A. Yeğınobalı, "Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri," Ankara, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 2009.
- [32] J. E. Cook, "Fly ash in concrete-technical considerations," *Concrete International*, vol. 5, no. 9, pp. 52-57, 1983.
- [33] W. T. Bakker, "Use of fly ash in cement and concrete in the USA," *Electric Power Research Institute Coal Combustion Systems Division*, 1982, pp. 79-89.
- [34] *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*, American Society for Testing and Materials ASTM C618-19, 2019.
- [35] *Çimento-bölüm 1: genel çimentoların bileşimi, özellikleri ve uygunluk kriterleri*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 197-1, 2012.
- [36] T. Y. Erdoğan, *Admixtures for Concrete*. Ankara: ODTÜ Yayıncılık, 1997.
- [37] M. Tokyay ve K. Erdoğan, "Türkiye'deki termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin karakterizasyonu," Ankara, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 1998.
- [38] American Concrete International, "Use of fly ash in concrete," Detroit, 2002.
- [39] T. Tanosaki ve ark., "Characterization of incineration ashes in Japan," *Inorganic Materials*, vol. 5, no. 273, pp. 149-158, 1998.

- [40] *Betonda kullanılan uçucu kül-bölüm 1: tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 450-1, 2013.
- [41] B. Postacıoğlu, *Beton*. İstanbul: Teknik Kitaplar Yayınevi, 1986, ss. 175.
- [42] A. Atanur ve F. Yağız, “An investigation of the use of cement-fly ash for base course stabilization,” 1970.
- [43] M. Orhun, F. Günday, N. Özden ve B. Atbaş, “The use of fly ash in Turkey for cement and cement products,” 1970.
- [44] *Öğütülmüş yüksek fırın curufu-beton, harç ve şerbette kullanım için-bölüm 1: tarifler, özellikler ve uygunluk kriterleri*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 15167-1, 2013.
- [45] S. Kosmatka, B. Kerkhoff ve W. Panarese, *Design and Control of Concrete Mixtures*. Portland Cement Association, 2002, pp. 358.
- [46] Y. Engin, “Yüksek Fırın Cürufu,” 2014. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://www.betonvecimento.com/surdurulebilirlik/yuksekk-firin-curufu-ozet>. [Erişim tarihi: 19 Nisan 2020].
- [47] Y. Engin, “Yüksek Fırın Cürufu Çimentonun Üretimi, Özellikleri ve Etkileri,” 2015. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.betonvecimento.com/wp%20content/uploads/2015/02/Y%C3%BcksekF%C4%B1r%C4%B1n-C%C3%BCrufu-El-Kitab%C4%B1.pdf>. [Erişim tarihi: 19 Nisan 2020].
- [48] *Çimento deney yöntemleri-bölüm 2: çimentonun kimyasal analizi*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 196-2, 2013.
- [49] A. P. Mills, H. W. Hayward ve L. F. Rader, *Materials and Construction*. New York: John Wiley & Sons Inc., 1955.
- [50] S. Mindess ve J. F. Young, *Concrete*. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1981.
- [51] A. M. Neville, *Properties of Concrete*. London: Longman Scientific & Technical, 1981.
- [52] G. C. Bye, *Portland Cement*. Oxford: Pergamon Press, 1983.
- [53] T. Y. Erdoğan, *Betonu Oluşturan Malzemeler-Çimentolar*. Ankara: Türkiye Hazır Beton Birliği, 1995.
- [54] *Standard test method for fineness of hydraulic cement by air permeability apparatus*, American Society for Testing and Materials ASTM C204, 2018.



- [55] P. C. Hewlett, *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2004.
- [56] P. S. Deb, P. K. Sarker ve S. Barbhuiya, "Effects of nano-silica on the strength development of geopolymer cured at room temperature," *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 675-683, 2015.
- [57] M. N. S. Hadi, H. Zhang ve S. Parkinson, "Optimum mix design of geopolymer pastes and concretes cured in ambient condition based on compressive strength, setting time and workability," *Journal of Building Engineering*, vol. 23, pp. 301-313, 2019.
- [58] A. Bouaissi, L. Li, M. M. Al Bakri Abdullah ve Q. B. Bui, "Mechanical properties and microstructure analysis of FA-GGBS-HMNS based geopolymer concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 210, pp. 198-209, 2019.
- [59] Z. Yahya, M. M. A. B. Abdullah, N. Mohd Ramli, D. D. Burduhos-Nergis ve R. Abd Razak, "Influence of kaolin in fly ash based geopolymer concrete: destructive and non-destructive testing," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 374, 2018.
- [60] C. Shi, P. V. Krivenko ve D. Roy, *Alkali Activated Cements and Concretes*. London: CRC Press, 2005.
- [61] W. Song ve ark., "Effect of steel slag on fresh, hardened and microstructural properties of high-calcium fly ash based geopolymers at standard curing condition," *Construction and Building Materials*, vol. 229, 2019.
- [62] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo ve J. S. J. Van Deventer, "Geopolymer technology: the current state of the art," *Journal of Materials Science*, vol. 42, no. 9, pp. 2917-2933, 2007.
- [63] A. Palomo, M. W. Grutzeck ve M. T. Blanco, "Alkali-activated fly ashes: a cement for the future," *Cement and Concrete Research*, vol. 29, no. 8, pp. 1323-1329, 1999.
- [64] I. G. Richardson, A. R. Brough, G. W. Groves ve C. M. Dobson, "The characterization of hardened alkali-activated blast-furnace slag pastes and the nature of the calcium silicate hydrate (C-S-H) phase," *Cement and Concrete Research*, vol. 24, no. 5, pp. 813-829, 1994.
- [65] F. Puertas, M. Palacios, H. Manzano, J. S. Dolado, A. Rico ve J. Rodríguez, "A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 31, no. 12, pp. 2043-2056, 2011.

- [66] S. A. Bernal ve ark., “Gel nanostructure in alkali-activated binders based on slag and fly ash, and effects of accelerated carbonation,” *Cement and Concrete Research*, vol. 53, pp. 127-144, 2013.
- [67] J. L. Provis, R. J. Myers, C. E. White, V. Rose ve J. S. J. van Deventer, “X-ray microtomography shows pore structure and tortuosity in alkali-activated binders,” *Cement and Concrete Research*, vol. 42, no. 6, pp. 855-864, 2012.
- [68] M. Ben Haha, G. Le Saout, F. Winnefeld ve B. Lothenbach, “Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags,” *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 3, pp. 301-310, 2011.
- [69] S. A. Bernal ve J. L. Provis, “Durability of alkali-activated materials: progress and perspectives,” *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 97, no. 4, pp. 997-1008, 2014.
- [70] R. Pouhet, “Formulation and durability of metakaolin-based geopolymers,” Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği, Toulouse Üniversitesi, Toulouse, 2015.
- [71] A. O. Purdon, “The action of alkalis on blast-furnace slag,” *J Soc Chem Ind*, vol. 59, no. 9, pp. 191-202, 1940.
- [72] V. D. Glukhovskiy, *Soil Silicates*. Kiev: Gostroiizdat Publish, 1959.
- [73] U. Durak, “Nanoparçacık katkıların geopolimer harcın dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisinin araştırılması,” Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2019.
- [74] X. Hua, J. L. Provis, J. S. J. Van Deventer ve P. V. Krivenko, “Characterization of aged slag concretes,” *ACI Materials Journal*, vol. 105, no. 2, pp. 131-139, 2008.
- [75] X. Wei, D. Li, F. Ming, C. Yang, L. Chen ve Y. Liu, “Influence of low-temperature curing on the mechanical strength, hydration process, and microstructure of alkali-activated fly ash and ground granulated blast furnace slag mortar,” *Construction and Building Materials*, vol. 269, pp. 121811, 2021.
- [76] N. Kabay, N. Miyan ve H. Özkan, “Basic oxygen furnace and ground granulated blast furnace slag based alkali-activated pastes: Characterization and optimization,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 327, pp. 129483, 2021.

- [77] K. C. Reddy ve K. V. L. Subramaniam, "Investigation on the roles of solution-based alkali and silica in activated low-calcium fly ash and slag blends," *Cement and Concrete Composites*, vol. 123, pp. 104175, 2021.
- [78] S. Y. Oderji, B. Chen, C. Shakya, M. R. Ahmad ve S. F. A. Shah, "Influence of superplasticizers and retarders on the workability and strength of one-part alkali-activated fly ash/slag binders cured at room temperature," *Construction and Building Materials*, vol. 229, pp. 116891, 2019.
- [79] Z. Ergeshov, "Uçucu kül tabanlı geopolimer harçlarda silis dumanı ikamesinin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkilerinin araştırılması," Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2021.
- [80] *Çimento deney yöntemleri-bölüm 1: dayanım tayini*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 196-1, 2016.
- [81] StatEase, "Merkezi Birleşik Tasarım Yöntemi," [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.statease.com/docs/v11/designs/>. [Erişim tarihi: 15 Temmuz 2020].
- [82] Engineering Statistics Handbook, "Merkezi Birleşik Tasarım Yöntemi," [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri3361.htm>. [Erişim tarihi: 15 Temmuz 2020].
- [83] R. H. Myers, D. C. Montgomery ve C. M. Anderson-Cook, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Design Experiment*. Wiley-Blackwell, 2016.
- [84] M. T. Cihan, "Tepki yüzeyi yöntem bilgisinin beton uygulamasında kullanılabilirliğinin geliştirilmesi," Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.
- [85] L. Imtiaz, S. K. Rehman, S. Ali Memon, M. Khizar Khan ve M. Faisal Javed, "A review of recent developments and advances in eco-friendly geopolimer concrete," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 21, 2020.
- [86] F. Ahmed Memon, M. F. Nuruddin, S. Demie ve N. Shafiq, "Effect of curing conditions on strength of fly ash-based self-compacting geopolimer concrete," *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 183-186, 2011.

- [87] P. Chindaprasirt, T. Chareerat ve V. Sirivivatnanon, "Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer," *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, no. 3, pp. 224-229, 2007.
- [88] P. S. Deb, P. Nath ve P. K. Sarker, "The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature," *Materials and Design*, vol. 62, pp. 32-39, 2014.
- [89] A. Islam, U. J. Alengaram, M. Z. Jumaat ve I. I. Bashar, "The development of compressive strength of ground granulated blast furnace slag-palm oil fuel ash-fly ash based geopolymer mortar," *Materials and Design*, vol. 56, pp. 833-841, 2014.
- [90] D. L. Y. Kong ve J. G. Sanjayan, "Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 2, pp. 334-339, 2010.
- [91] S. Kumar ve R. Kumar, "Mechanical activation of fly ash: Effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer," *Ceramics International*, vol. 37, no. 2, pp. 533-541, 2011.
- [92] A. Mehta ve R. Siddique, "Sustainable geopolymer concrete using ground granulated blast furnace slag and rice husk ash: strength and permeability properties," *Journal of Cleaner Production*, vol. 205, pp. 49-57, 2018.
- [93] P. Nath ve P. K. Sarker, "Use of OPC to improve setting and early strength properties of low calcium fly ash geopolymer concrete cured at room temperature," *Cement and Concrete Composites*, vol. 55, pp. 205-214, 2015.
- [94] A. Özcan ve M. B. Karakoç, "The resistance of blast furnace slag and ferrochrome slag based geopolymer concrete against acid attack," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 17, no. 10, pp. 1571-1583, 2019.
- [95] S. V. Patankar, S. S. Jamkar ve Y. M. Ghugal, "Geopolymer concrete-a best solution to cement concrete in hot climate," *J. Emerg. Technol. Innov. Res*, vol. 6, pp. 271-276, 2019.
- [96] T. Phoongernkham, S. Hanjitsuwan, N. Damrongwiriyanupap ve P. Chindaprasirt, "Effect of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on strengths of alkali activated high calcium fly ash containing Portland cement," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 21, no. 6, pp. 2202-2210, 2017.

- [97] G. Ravichandran, M. Sivaraja, M. Jegan, M. Harihanandh ve A. R. Krishnaraja, “Performance of glass fiber reinforced geopolymer concrete under varying temperature effect,” *International Journal of Civil Engineering and Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 1316-1323, 2018.
- [98] P. Risdanareni, J. J. Ekaputri ve T. Triwulan, “The influence of alkali activator concentration to mechanical properties of geopolymer concrete with trass as a filler,” *Materials Science Forum* vol. 803, pp. 125-134, 2015.
- [99] B. S. Umniati, P. Risdanareni ve F. T. Z. Zein, “Workability enhancement of geopolymer concrete through the use of retarder,” *AIP Conference Proceedings*, vol. 1887, 2017.
- [100] A. Wongsu, V. Sata, P. Nuaklong ve P. Chindaprasirt, “Use of crushed clay brick and pumice aggregates in lightweight geopolymer concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 188, pp. 1025-1034, 2018.
- [101] V. Živica, “Effects of type and dosage of alkaline activator and temperature on the properties of alkali-activated slag mixtures,” *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 7, pp. 1463-1469, 2007.
- [102] G. Huang, Y. Ji, L. Zhang, J. Li ve Z. Hou, “The influence of curing methods on the strength of MSWI bottom ash-based alkali-activated mortars: The role of leaching of OH<sup>-</sup> and free alkali,” *Construction and Building Materials*, vol. 186, pp. 978-985, 2018.
- [103] *Kagir harcı-deney metotları-bölüm 3: taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile)*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 1015-3, 2000.
- [104] *Çimento deney yöntemleri-bölüm 3: priz süreleri ve genleşme tayini*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 196-3, 2017.
- [105] *Beton deneyleri-bölüm 4: ultrasonik atımlı dalga hızının tayini*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 12504-4, 2012.
- [106] Namık Kemal Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı, “Taramalı Elektron Mikroskobu,” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: [http://merkezlab.nku.edu.tr/Taramal%C4%B1ElektronMikroskobu\(SEM\)/0/s/5472/5923](http://merkezlab.nku.edu.tr/Taramal%C4%B1ElektronMikroskobu(SEM)/0/s/5472/5923). [Erişim tarihi: 16 Haziran 2020].
- [107] StatEase, “Varyans Analizi,” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.statease.com/docs/v11/contents/analysis/anova-output/>. [Erişim tarihi: 23 Kasım 2021].

[108] StatEase, “Arzuedilebilirlik Fonksiyonu,” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.statease.com/docs/v11/contents/optimization/desirability-function/>. [Erişim tarihi: 23 Kasım 2021].



## ÖZGEÇMİŞ

